T.C.

ALTINBAŞ ÜNİVERSİTESİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Bölümü

KESTİRİMCİ BAKIM METOTLARI İLE ARIZALARIN TESPİT EDİLMESİ VE J79 TURBOJET UÇAK MOTORLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

Aykut ATAPEK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Çağlar CERŞİT

İstanbul, 2022

KESTİRİMCİ BAKIM METOTLARI İLE ARIZALARIN TESPİT EDİLMESİ VE J79 TURBOJET UÇAK MOTORLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

Aykut ATAPEK

Endüstri Mühendisliği

Yüksek Lisans Tezi

ALTINBAŞ ÜNİVERSİTESİ

2022

Aykut ATAPEK tarafından hazırlanmış ve 28.02.2022 tarihinde sunulmuş "KESTİRİMCİ BAKIM METOTLARI İLE ARIZALARIN TESPİT EDİLMESİ VE J79 TURBOJET UÇAK MOTORLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI" başlıklı tez Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Çağlar CERŞİT

Danışman

Tez Savunma Sınavı Jüri Üyeleri:

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Çağlar CERŞİT	Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Altınbaş Üniversitesi	_____
Dr. Öğr. Üyesi Engin SANSARCI	Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Altınbaş Üniversitesi	_____
Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan ÖZEROĞLU	İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İstanbul Rumeli Üniversitesi	_____

Bu tezin Yüksek Lisans. tezi olarak bütün şartları sağladığını beyan ederim.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü kabul tarihi:

____/____/____

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışlara uygun olarak edinildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde, bu çalışmada, orijinal olmayan tüm materyalleri ve sonuçları tamamen alıntı yaptığımı ve referans gösterdiğimi de beyan ederim.

Aykut ATAPEK

İTHAF

Yüksek Lisans bitirme tezimde çalışmam süresince bana her türlü yardım ve destek sağlayan, bilgi ve tecrübeleri ile çalışmamı aydınlatan ve yol gösteren çok değerli Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Çağlar CERŞİT hocama sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tezimi; çalışmam süresi boyunca özellikle manevi yardımlarını esirgemeyen ve bana hep destek olan sevgili eşim Sibel ATAPEK ve kızlarım Ezgi ile Öykü ‘ye ithaf ediyorum.

ÖZET

KESTİRİMCİ BAKIM METOTLARI İLE ARIZALARIN TESPİT EDİLMESİ VE J79 TURBOJET UÇAK MOTORLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

ATAPEK, Aykut

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği, Altınbaş Üniversitesi,

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Çağlar CERŞİT

Tarih: Şubat, 2022

Sayfa Sayısı: 127

Toplam Üretken Bakım (TPM) Japonya ‘da doğmuş bir bakım felsefesi olup 1950 ve 1960 yılları arasında ABD ‘de popüler olan Koruyucu Bakım (PM) modelinin alınarak Japonya ’da geliştirilmesiyle ile ortaya çıkartılmıştır. TPM işletmedeki üst yönetimden alttaki çalışana kadar herkesin katılımını amaçlayan, işletmedeki bakım, üretim, tasarım mühendisliği, proje mühendisliği, stok kontrol, satın alma, muhasebe ve yönetim bölümlerini de kapsayan bir bakım geliştirme stratejisidir.

Toplam üretken bakımın tarihçesine bakıldığında; 1950 öncesine kadar arıza/tamir bakımı olarak benimsenen bakım felsefesinin gelişen teknoloji ve bakım ihtiyaçlarına göre seyrini önleyici bakım, düzeltici bakım, kestirimci bakım olarak devam ettirmiş ve 2000 li yıllarda “Toplam Üretken Bakım” olarak karşımıza çıktığı görülmektedir.

TPM ’in ana hedefi; arıza kayıpları, hazırlık ve ayar kayıpları, boşta çalışma ve küçük duruşlar, hız kayıpları, kalite kayıpları ve başlangıç kayıplarından oluşan altı büyük ekipman kaybının elenerek arızaların sıfıra veya en alt düzeye indirilerek ürün kalitesinin ve ekipman verimliliğinin arttırılmasının sağlanmasıdır. Odaklanmış İyileştirmeler (Kobetsu-Kaizen), Otonom Bakım (Jishu-Hozen), Planlı Bakım, Personelin Eğitimi, Erken Ekipman Yönetimi, Kalite, Çevre - İnsan Sağlığı ve İş Güvenliği, Ofis TPM konuları Toplam Üretken Bakımın 8 sütununu oluşturmuştur.

TPM 'de 16 büyük kayıbı ekipman, işgücü ve malzeme-enerji kaynaklı üç ana başlık altında toplanmaktadır. Ekipman kullanım etkinliğini kısıtlayan 8 büyük kayıp arıza, setup-ayar, takım değişimi, başlangıç, küçük duruşlar, hız, kusurlu ürünleri düzeltme ve kapatma kayıplarından oluşmaktadır. İşgücü verimini kısıtlayan 5 büyük kayıp yönetim, üretim hareket, hat organizasyonu, lojistik ve ölçme ve ayar kayıplarından oluşmaktadır. Ekipman-enerji kaynaklı 3 büyük kayıp ise yararlanılmayan ekipman - kalıp-aparat, enerji ve malzeme kaynaklı kayıplardır.

Plansız bakım (arızi bakım) maliyetleri diğer bakım modellerine göre daha düşük olmakla birlikte çok riskli bir bakım modelidir. Üretim ve işgücü kayıplarına tahammül edemeyecek ve ekipmanlarında yüksek verim elde etmek isteyen işletmeler ise planlı bakım modelini seçmek zorundadırlar. Tezimin ikinci bölümünde ise planlı bakım modelleri ve planlı bakım bileşenerinden periyodik, kestirimci ve önleyici bakımlar ile TPM ‘de çok önemli bir yeri olan otonom bakım hakkında detaylı bilgilere ulaşılacaktır. Tezimin üçüncü bölümde ise kestirimci bakım ve kestirimci bakım uygulanmasında kullanılan teknikler hakkında detaylı çalışmalar ile analizler hakkında bilgiler ve kestirimci bakım uygulama örnekleri hakkında detaylı çalışmalar sunulmuştur. Kestirimci bakım tam zamanında yapılan bakımdır. Bu bakım metodunda kullanılan izleme yöntemleri ile arızalar henüz başlangıç aşamasında iken tespit edilerek daha ciddi sonuçların meydana gelmesi engellenir.

Anahtar Kelimeler: Toplam Üretken Bakım, 16 Büyük Kayıp, Kestirimci Bakım, Titreşim Analizi, Turbojet Motor.

ABSTRACT

DETECTING FAULTS BY PREDICTIVE MAINTENANCE METHODS AND PREDICTIVE MAINTENANCE APPLICATIONS IN J79 TURBOJET AIRCRAFT ENGINES

ATAPEK, Aykut

M.Sc., Industrial Engineering, Altınbaş University,

Supervisor: Dr. Yavuz Çağlar CERŞİT

Date: February, 2022

Pages: 127

Total Productivity Maintenance is a philosophy born in Japan that is a improved model of Preventative Maintenance was popular in US between the years of 1950 and 1960. TPM aims that from top to bottom every member of company must join maintenance improvement strategy which including maintenance, production, design engineering, stock control, purchasing, accounting and management departments.

When we research the history of TPM up to 1950's it was in repair and failure correction mentality than, up to 2000's preventative maintenance, productive maintenance, total productive maintenance, then, it has been form as TPM from the years of 2000.

The main aim of TPM is to prevent six main loss with researching failure, preset and adjustment time, idle operation and small stoppage time, velocity loss, quality loss and startup loss, as a reason to supply zero failure or as much as close to zero failure because of to improve product quality and equipment efficiency. Focused improvement/ Kobetsu Kaizen, Autonomous Maintenance/Jishu-Hozen, Planned Maintenance, Training, Early Equipment Management, Quality, Enviroment- Human Health and Safety, Office TPM Items are creating the eight columns of TPM.

16 big loss grouped in three main topics as equipment, labor, material-energy loses. There is eight main failure lose are grouped as pre-setup, magazine setup, start-up, stoppage, velocity, faulty product correction and close up loses. The five main lose of labor efficiency are grouped as management, product handling, line organization, logistic, measurement and adjustment loses. Equipment- energy caused three main lose are grouped as equipment - mold - tool lose, energy lose and material lose.

Unscheduled maintenance (failure repair maintenance) costs lower than others but categorized as very risky type maintenance model. If a company doesn't want to meet production and labor lose and want to realize high efficiency on equipment, have to choose planned maintenance option. In the second part of my thesis, you will be able to access detailed information about planned maintenance models and periodic, predictive and preventive maintenance from planned maintenance components and autonomous maintenance, which has a very important place in TPM. In the third chapter of my thesis, detailed studies about predictive maintenance and techniques used in predictive maintenance, information about analysis and examples of predictive maintenance applications are presented. Predictive maintenance is just-in-time maintenance. With the monitoring methods used in this maintenance method, malfunctions are detected while they are still in their infancy, and more serious consequences are prevented from occurring.

Key Words: Total Productive Maintenance, 16 Big Loses, Predictive Maintenance, Vibration Analysis, Turbojet Engine.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**

ABSTRACT ..... **viii**

TABLO LİSTESİ ..... **xiv**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**

KISALTMALAR ..... **xviii**

1. GİRİŞ **1**

2. TOPLAM ÜRETKEN BAKIM (TPM) **3**

2.1 TOPLAM ÜRETKEN BAKIM (TPM) TANIMI 3

2.2 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN TARİHSEL GELİŞİMİ 6

2.2.1 Arızi/Tamir Bakım (Breakdown Maintenance) 6

2.2.2 Önleyici Bakım (Preventive Maintenance) 6

2.2.3 Düzeltici Bakım (Corrective Maintenance) 7

2.2.4 Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance) 7

2.2.5 Toplam Üretken Bakım-TPM (Total Productive Management-TPM) 7

2.3 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN AMAÇLARI 8

2.4 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN HEDEFLERİ 10

2.4.1 TPM ’in Ana Hedefleri 12

2.4.2 TPM ’in Sıfır Hedefleri 13

2.4.3 TPM ’in İş Hedefleri 14

2.5 TOPLAM ÜRETKEN BAKIM SİSTEMİNİN 12 UYGULAMA ADIMI 14

2.6 5S TEMİZLİK VE DÜZEN 16

2.6.1 Ayıklama 16

2.6.2 Düzenleme 17

2.6.3 Temizleme 17

2.6.4 Standartlaştırma 17

2.6.5 Disiplin 17

2.7 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN 8 ANA SÜTUNU 18
2.7.1 Odaklanmış İyileştirmeler - Kobetsu-Kaizen 19
2.7.2 Otonom Bakım - Jishu-Hozen 19
2.7.3 Planlı Bakım (Etkin Bakım) 20
2.7.4 Toplam Üretken Bakımda Eğitim 21
2.7.5 Erken Ekipman Yönetimi 21
2.7.6 Kalite Bakımı - Hinshutsi-Hozen 22
2.7.7 Çevre - İnsan Sağlığı ve İş Güvenliği 22
2.7.8 Ofis Toplam Üretken Bakım 23
2.8 TPM 'İN ÜZERİNE GİTTİĞİ 16 BÜYÜK KAYIP 23
2.8.1 Arıza Kayıpları 24
2.8.2 Ayarlar, Mamul ve Set-Up Kayıpları 24
2.8.3 Sarf Malzemesi ve Aparat Değişim Kayıpları 24
2.8.4 Başlama - Bitirme Kayıpları 25
2.8.5 Küçük Duruşlar (Çokote) ve Rölanti Kayıpları 25
2.8.6 Hız Kayıpları 26
2.8.7 Kusurlu Ürünlerde Düzeltme (Rework) Kayıpları 26
2.8.8 Kapatma (Yemek Paydosları, Dinlenmeler... vb.) Kayıpları 26
2.8.9 Yönetim (Talimat Bekleme) Kayıpları 27
2.8.10 Üretim Hareket Kayıpları 27
2.8.11 Hat Organizasyonu Kayıpları 28
2.8.12 Lojistik Kayıpları 28
2.8.13 Ölçme ve Ayar Kayıpları 28
2.8.14 Yararlanılmayan Ekipman-Kalıp-Aparat Kayıpları 29
2.8.15 Enerji Kayıpları 29
2.8.16 Malzeme Kayıpları-Fireler / Zayiat 29
2.9 TPM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 30

3. BAKIM STRATEJİLERİ 32
3.1 PLANLI VE PLANSIZ BAKIM STRATEJİLERİ 32
3.2 PLANSIZ BAKIM 33
3.3 PLANLI BAKIM 35
3.3.1 Periyodik Bakım 36
3.3.1.1 Metot 38
3.3.1.2 Makine 39
3.3.1.3 Malzeme 39
3.3.1.4 Adam saat 39
3.3.2 Kestirimci Bakım 40
3.3.3 Önleyici Bakım 41
3.3.4 Otonom Bakım 42
4. KESTİRİMCİ BAKIM 45
4.1 KESTİRİMCİ BAKIMIN TANIMI 45
4.2 ULTRASONİK İZLEME 48
4.2.1 Basınçlı Hava Kaçakları 49
4.2.2 Rulmanların İzlenmesi 50
4.2.3 Buhar Sistemlerinin Takibi 53
4.2.4 Elektriksel Arızaların Takibi 53
4.2.5 Dişli Kutuları (Redüktörler) 54
4.3 TİTREŞİM ANALİZİ 55
4.3.1 Titreşim Ölçüm Yönleri 59
4.3.2 Arıza ile Titreşim Arasındaki İlişki 61
4.3.3 Balanssızlık 62
4.3.4 Kaplin Ayarsızlığı 63
4.3.5 Mekanik Çözülme 64
4.3.6 Dişli Arızaları 65
4.3.7 Rulman Arızaları 66

4.3.8 AC Motor Arızaları 67
4.3.9 Titreşim Ölçümü Yoluyla Arıza Tespiti 68
4.4 YAĞ ANALİZİ 71
4.5 KIZIL ÖTESİ ANALİZİ (TERMOGRAFİ) 76
4.5.1 Termal Kameralar 77
4.5.1.1 Termal kameranın elektrik alanında kullanılması 78
4.5.1.2 Sürtünme kaynaklı arızaların tespiti 80
4.5.1.3 Termal kameraların vana ve hatlarda kullanılması 81
4.5.1.4 Termal kameralar ile enerji verimliliği 82
4.5.1.5 Sağlık alanında termal kamera uygulamaları 83
4.5.2 Termal Kamera ile Tesislerde Bakım Yapılmasının Avantajları 83
4.6 ASENKRON MOTOR AKIMI İZLEMESİ 84
4.7 KESTİRİMCİ BAKIMIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI 86
5. J79 TURBOJET MOTORLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI 88
5.1 J79 TURBO JET MOTOR TANIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ 88
5.2 TİTREŞİM İZLEME VE ARIZA TEŞHİS SİSTEMİ 90
5.2.1 Sistemin Tasarımı 91
5.2.2 Sistemin Teknik Özellikleri 92
5.3 TİTREŞİM İZLEME VE ARIZA TESPİT UYGULAMASI 94
5.3.1 Titreşimin Değerlendirilmesi 94
5.3.2 Arıza Teşhisi 95
5.3.3 Rotor Dengesizliği 96
5.3.4 Yanlış Hizalama 96
5.3.5 Kırık Rotor Kanatçığı 97
5.3.6 Yanlış Alarm 99
5.4 ÇALIŞMANIN SONUÇLARI 99
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 100
REFERANSLAR 102

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: TPM uygulamasının 12 adımı 15

Tablo 2.2: 5S temizlik ve düzen sistemi 16

Tablo 2.3: Operatör ve bakım ekibinin sorumluluk alanı 20

Tablo 2.4: TPM uygulamasının üzerine gittiği 16 büyük kayıp 23

Tablo 3.1: Planlı bakımın uygulanması 35

Tablo 3.2: Otonom bakımın yedi adımı 43

Tablo 4.1: Titreşim kaynağına göre ölçüm yönü 61

Tablo 4.2: Titreşim ölçümü yoluyla arıza bulma 70

Tablo 5.1: J79 turbojet motorun genel özellikleri 88

Tablo 5.2: Frekans bandı. 95

Tablo 5.3: Oran ve arıza eşik karşılaştırma tablosu 95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Bakım sistemlerinin gelişimi 8

Şekil 2.2: Toplam üretken bakımın hedefleri. 10

Şekil 2.3: TPM 'in sıfır hedefleri ile sütunları arasındaki ilişkisi 13

Şekil 2.4: TPM sütunları 18

Şekil 2.5: PUKÖ çevrimi ve odaklanmış iyileştirmelerin 10 adımı 19

Şekil 2.6: 16 büyük kayıp 30

Şekil 3.1: Planlı bakım şeması 36

Şekil 3.2: Bakımın 4M konsepti 37

Şekil 3.3: Arıza evrelerinde kullanılan bakım teknikleri 41

Şekil 4.1: P-F arıza eğrisi 46

Şekil 4.2: Kestirimci bakım yöntemlerinin tercih edilme oranları 47

Şekil 4.3: Ultrason izleme ile buhar kaçağı tespiti 49

Şekil 4.4: Ultrasonik rulman izlemesi 51

Şekil 4.5: Rulman yağ durumunun ultrasonik izlemesi 51

Şekil 4.6: Akustik rulman yağlama tabancası 52

Şekil 4.7: Ultrason ile elektrik kaçaklarının izlenmesi 54

Şekil 4.8: Dalga formlarının basit sinus formlarına ayrılması 55

Şekil 4.9: Sinyal çevrim akışı 56

Şekil 4.10: Titreşim ölçümü 57

Şekil 4.11: Frekans dalga dağılımları 57

Şekil 4.12: Periyodu bir dönüş olan hareket 58
Şekil 4.13: Genlik ölçüm tipleri 59
Şekil 4.14: Titreşim ölçüm yönleri 60
Şekil 4.15: Elektrik motorunda yapılan 3 yönde ölçüm 60
Şekil 4.16: Balanssızlığa örnek spektrum 62
Şekil 4.17: Balanssızlığa örnek dalgaformu 63
Şekil 4.18: Kaplin ayarı öncesi ve sonrası makina simulasyonu 63
Şekil 4.19: Kaplin kaçıklılığına örnek spektrum 64
Şekil 4.20: Mekanik çözülmeye örnek bir makinadan alınan spektrum grafiği 64
Şekil 4.21: Dişli sinyali bulunan bir spektrum örneği 65
Şekil 4.22: Rulman arızasına örnek spektrum 66
Şekil 4.23: Rulman arızasının dalgaformu 67
Şekil 4.24: AC motor kısa devre çubukları arızası spektrum örneği 68
Şekil 4.25: Yağlama hatası nedeni ile rulman deformasyonu 71
Şekil 4.26: Elle yağ numunesinin alınması 73
Şekil 4.27: Yağ numunesinin pompa ile alınması 73
Şekil 4.28: Hidrolik Ölçüm Setleri 74
Şekil 4.29: Yağ analiz raporu 75
Şekil 4.30: Elektrik bağlantısındaki gevşekliğin termal kamera ile tespit edilmesi 76
Şekil 4.31: Elektrik şalterindeki bağlantı kontrolü 79
Şekil 4.32: Ulaşılması güç bir fanın termal kamera ile sürtünme kontrolü 80
Şekil 4.33: Termal kamera ile sıcak su izlemesi 81

Şekil 4.34: Termal kamera ile enerji verimliliği izlenmesi 82

Şekil 4.35: Termal kameranın sağlık alanında kullanılması 83

Şekil 4.36: Elektrik motor arızalarının dağılımı 84

Şekil 4.37: Asenkron motorun yapısı ve parçaları 85

Şekil 5.1 : F4 Phantom uçağı 89

Şekil 5.2 : J79 jet motorun genel özellikleri 89

Şekil 5.3 : Havadaki titreşim izleme ve teşhis sisteminin şeması. 91

Şekil 5.4 : Havada veri toplama sisteminin yer ile olan ilişkişi. 92

Şekil 5.5 : Havada veri toplama sistemi genel akış şemasi. 93

Şekil 5.6 : Takeoff motor spektrumu. 96

Şekil 5.7 : Uçuş motor spektrumu. 97

Şekil 5.8 : Kırık kanatçık kaynaklı titreşimin genliği. 98

Şekil 5.9 : Kırık kanatçık kaynaklı titreşimin spektrumu. 98

Şekil 5.10 : Hasarlı rotor kanatçıkları. 98

KISALTMALAR

4M	:	Man, Machine, Material, Method – İşgücü, Makine, Malzeme, Metot
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
AC	:	Alternating Current - Alternatif Akım
AR-GE	:	Araştırma Geliştirme
AVM	:	Airborne Vibration Monitoring – Havadaki Tireşim İzleme
EDS	:	Engine Diagnostic System – Motor Diyagnostik Sistemi
GMF	:	Gear Frequency Multi Function - Dişli Birleştirme Frekansı Genliği
HZ	:	Hertz
JIPM	:	Japan Institute of Plant Maintenance - Japonya Planlı Bakım Enstitüsü
MP	:	Maintenance Prevention - Bakım Gerektirmeyen Uygulamalar
KPI	:	Key Performance Indicators - Anahtar Performans Göstergesi
NETA	:	International Electrical Testing Association - Uluslararası Elektrik Testleri Birliği
NDT	:	Non Destructive Testing - Tahribatsız Muayene
MRO	:	Maintenance Repair Overhaul - Bakım Onarım ve Revizyon
MTBF	:	Mean Time Between Failure - Ardışık İki Arıza Arası Ortalama Süre
MTTR	:	Mean Time to Repair – Ortalama Tamir Süresi
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration - Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
OEE	:	Overall Equipment Effectiveness - Toplam Ekipman Etkinliği
PM	:	Preventive Maintenance - Önleyici Bakım
RPM	:	Revolution Per Minute – Devir/Dakika
RMS	:	Root Mean Square - Karekök Ortalaması
SAP	:	Systemanalyse und Programmentwicklung - Sistem Analizi Yazılım Geliştirme
SMED	:	Single Minute Exchange of Dies - Tekli Dakikalarda Kalıp Değişimi

TMMOB	:	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TPM	:	Total Productive Maintenance – Toplam Üretken Bakım
ÜR-GE	:	Üretim Geliştirme

1. GİRİŞ

TPM (Toplam Üretken Bakım) temeli yokluğa dayanan Japonya ‘da ortaya çıkan bir verimlilik felsefesidir. Ülke nüfusunun fazla olması ve kaynaklarının sınırlı olması gibi nedenlerle Japonlar ellerinde bulunan varlıkları en etkin bir şekilde kullanmak zorundalardı. İşte bu zorunluluk çok da yabancı olmadıkları kendi kültür, ahlak ve en önemlisi iş ahlakı ve disiplinlerine uygun TPM felsefesini doğurmuştur.

1970’li yıllarda Seiichi Nakajima tarafından Japonya ‘da doğan TPM felsefesi kısa bir sürede tüm dünyada isminden bahsettirerek etkileri hızla yayılmaya başlamıştır. Yeni bir felsefe olan TPM ‘in etkisi 1980 ‘li yıllarda Avrupa ‘da görülmüştür. 1990 ‘lı yılların sonunda ise Türk Pirelli fabrikasında yapılan TPM uygulamaları ile Türkiye ‘de uygulanmaya başlanmıştır. Rakiplerine üstünlük ve farklılık yaratacak olan TPM ne yazıktır ki ülkemizde beklenen oranda yaygın olmadığı görülmektedir. Buna karşın her geçen gün TPM hakkındaki farkındalığın ve işletmelerde kullanılması için çalışmalara önem verilmesi sevindirici haberlerdendir.

Bu çalışmanın amacı; genel ekipman etkinliği (OEE), %100 ekipman verimliliği, arızasızlık gibi iddialı bir bakım modeli olan TPM ‘in işletmelerde yarattığı üstünlükler hakkındaki farkındalığı arttırmak, TPM hakkında bilgileri olmayan kişi ve işletmeler için bir kaynak oluşturmak, TPM ‘in kabul ettiği tekniklerinin yaygınlaştırılmasını sağlamak ve asıl önemli olan tüm bu tanımlara uygun olarak sıfır hata, sıfır arıza, sıfır kayıp gibi hayati terimlerin işletmelerde yaygınlaşmasını sağlamaktır. Bir diğer amaç ise planlı bakım ve özellikle kestirimci bakım uygulamaları ile ekipman, makina ve üretim hatlarının arızalarının olma ihtimalinin önceden tespiti ile arızaların meydana gelmeden öncesinde giderilmesidir.

Bu çalışma üç ana bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde Toplam Üretken Bakımın tanımı, tarihçesi, uygulama hedefleri, avantajları ve dezavantajları, Toplam Üretken Bakımın nasıl uygulanacağı, Toplam Üretken Bakımın sekiz sütunu ve 16 büyük kayıp hakkında bilgileri paylaşılacaktır.
İkinci bölümünde ise TPM çatısını ayakta tutan sekiz sütundan biri olan “Planlı Bakımlar” ve planlı bakımın bileşenleri olan periyodik bakım, kestirimci bakım ve önleyici bakım

hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Yine bu bölümde “Arızi Bakım” ile operatörlerinde bakım faaliyetlerine katılımına, kullanmış olduğu ekipmanını daha iyi tanımasına olanak tanıyan “Otonom Bakım” konularında bilgilerine ulaşılacaktır. Üçüncü bölümde ise sıfır hatadan, sıfır arızadan, %100 ekipman verimliliğinden bahsedilebilmesi için gerekli olan ve günümüzde artık önemi kabul görmüş bir bakım tekniği olan kestirimci bakım ile ve bu bakım metodunun turbojet uçak motorları üzerinde yapılan örnek uygulamaları hakkında bilgiler verilecektir.

2. TOPLAM ÜRETKEN BAKIM (TPM)

Toplam Üretken Bakım (TPM) kavramının geçmişi 1950 'li yıllara kadar dayanmaktadır. Bu yıllarda ABD ' de yaygın olarak kullanılan Planlı Bakım tekniklerinden biri olan koruyucu bakımın (PM - Preventive Maintenance) Japon kültürü ve çalışma prensipleri ile tekrar yorumlanarak endüstride uygulandığı şeklidir. TPM kısaca kullanım ömrü boyunca ekipman etkinliğini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda kullanılan ekipman, tesis, üretim hattının sürekli iyileştirilmesi, beklenmeyen arızaların önceden tespit edilerek üretim ve hız kayıplarının önlenmesi, ekipmanların tam verimli olarak kullanılması, sıfır arıza, sıfır duruş, sıfır hata gibi yaklaşımlarının tamamını kapsamaktadır. Yine Toplam Üretken Bakım, planlı bakım tekniklerinin arka planda çalışan ve yalnızca ihtiyaç duyulduğunda ortaya çıkan bir işlevden başka bir şey olmadığı görüşünü savunan gelenekselcilere meydan okuyan bir felsefedir [1].

2.1 TOPLAM ÜRETKEN BAKIM (TPM) TANIMI

TPM Japonya 'da ortaya çıkmış bir metodoloji olup 1950 ve 1960 'lı yıllarda ABD 'de yaygın olarak kullanılan Koruyucu Bakım (PM) prosedürlerinin JIPM (Japonya Planlı Bakım Enstitüsü) yönetim başkanı Seichi Nakajima tarafından yeniden şekillendirilmesi ile 1971 yılında ortaya çıkartılmıştır. Nakajima tarafından TPM, işletmelerde çalışanların tamamının katılımı ve yetkilendirilmesi ile sonuçların işletme içerisinde ölçülmesi ve üretim aşamalarının sürekli gelişimini sağlayan bir metodoloji olarak tanımlamıştır [1]. 1971 yılında gündeme gelen Toplam Üretken Bakım uygulaması 1989 yılında ilk gündeme getiren Nakajima tarafından geliştirilmiş ve çerçevesi yeniden çizilmiştir [2].

TPM üretimin bütün aşamalarında "sıfır iş kazası, sıfır arıza, sıfır hata gibi çok önemli sonuçlara ulaşmamızı sağlayacak, işletmede çalışan tüm personel tarafından benimsenen, en yüksek verimliliğe ulaşmayı amaçlamış bir yönetim anlayışıdır.

TPM felsefesinin sıfır hedeflerinde ekipmanları kullanan operatörlere de büyük görevler düşmektedir. Öncelikle operatörlerin makinesini sahiplenmesi, değerinin farkına varması sağlanmalıdır. İkinci aşamada ise kullanacağı makinesinin kapasitesi, çalışma prensibi ve kapasitesi dahilinde yapabileceği temizlik ve bakım hizmetleri hakkında teknik eğitimleri alması planlanmalıdır. Tüm bu eğitimler ile operatörlere kullandığı ekipmana sahip olabilme, küçük bakımları yapabilme yeteneği ve yağlama ayar gibi becerilerin kazandırılması sağlanmalıdır.

TPM işletmedeki üst yönetimden alttaki çalışana kadar herkesin katılımını amaçlayan, işletmedeki bakım, üretim, tasarım mühendisliği, proje mühendisliği, stok kontrol, satın alma, muhasebe ve yönetim bölümlerini de kapsayan bir bakım geliştirme stratejisidir [3]. TPM başlangıçta sadece üretim alanı ile ilgili bir teknik olarak algılansa da sonrasında sadece üretimi değil, üretim ile direkt ve endirekt ilişki içerisinde olan diğer birimlere de yayılmış ve toplam üretim yönetimi tarzına dönüştürülmüştür [4].

TPM en sade ifade ile; bir fabrikada kullanılan ekipman, makina ve üretim hatlarının mevcut verimliliğinin ve etkinliğinin arttırılması ve ekipman kaynaklı arıza ve plansız duruşları önlemek amacıyla yapılan tüm çalışmaları kapsaması anlamına gelmektedir.

TPM uygulamaları başlangıçta ekipmana yönelik bakım departmanlarında uygulanırken, etkinliği artırmak amacı ile yönetsel ve destek operasyonlarda uygulamaya alınmıştır. Tokutaro SUZUKİ ‘nin de değindiği gibi “TPM felsefesi; en üst düzey yöneticilerden en alt seviyedeki personele kadar tüm çalışanları kapsamalıdır”. Bu görüş doğrultusunda bakım birimlerinin dışında kalan yönetsel ve destek birimlerinin de TPM ‘e entegre edilerek bakım kısmını anlamlı bir şekilde çalışması sağlanmalıdır. Örgütlenmede son aşama olarak TPM gelişim metotları, ürün geliştirme ve satış departmanlarına da uyarlanarak bütünsel bir yönetim sistemi haline gelmiştir. TPM felsefesinin doğuşuna ve geçmişine bakıldığında her ne kadar bakım, üretim ve montaj hatlarını kapsıyor gibi görünse de, TPM‘i kabul eden kuruluşlarda üretim ile ilgili kısımlar haricinde üretim öncesi ve ürün geliştirme departmanında ve aynı zamanda idari ve satış departmanlarında TPM uygulanmaktadır.

Japon Fabrika Bakım Enstitüsü (Japan Institute of Plant Maintenance/JIPM) 1989 yılında TPM ‘in stratejik bileşenlerini daha da genişleterek yeni bir tanımını ortaya koydu. Bu tanım daha çok montaj hattı endüstrileri için yapılan uygulamaları kapsamaktadır [5].

TPM ‘in stratejik bileşenleri beş temel boyutta ifade edilmiştir: [5].

a) Ekipman, makinalar ve üretim hatlarının verimlilik oranlarının en üst seviyeye getirilmesi amaçlanmıştır. Kestirimci bakım teknikleri ile ölçüm, analiz ve değerlendirmeler yapılarak arızaları henüz başlangıç aşamasında tespit edilip, ekipmanların arızalarda geçen sürelerin en alt seviyelere çekilmesi,
b) Üretim sisteminin ömrü için kayıpların her çeşidini önleyen bir planlı bakım organizasyonun oluşturulması,
c) Ekipmanı ve makinaları kullanan operatörlere kullanımdan hariç bakım eğitimleri de verilerek operatörler tarafından günlük bakım, ayar, kalibre ve yağlama gibi otonom bakım (kendi kendine yeten) uygulamalarının yapılması,
d) Yöneticilerden en alt seviyedeki personele kadar çalışanların tamamının bakım faaliyetlerine katılımının sağlanması,
e) Personeli motive ederek periyodik bakım uygulamalarına teşvik edilmesi önerilmektedir.

Buraya kadar yapılan açıklamalara göre toparlayacak olursak TPM’nin tam tanımını aşağıdaki beş başlık altında toplayabiliriz [6].

a) İşletmelerin envanterinde bulunan tüm ekipman ve makinalar ile üretim hatlarının en etkin şekilde kullanılmasını hedefler,
b) Şirket genelinde periyodik bakım, kestirimci bakım, önleyici bakım ve otonom bakımı kapsayan bir bakım sistemi oluşturulur,
c) Ekipman üreticilerini operatörler ile bakım personelinin işbirliğine ihtiyaç duyar,
d) İşletmelerde en üst yönetim personeli de dahil olmak üzere tüm çalışanları kapsamı içine alır,
e) Kullanıcıların küçük grup faaliyetlerine dayalı verimli bakımı özendirir, geliştirir ve teşvik eder.

2.2 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN TARİHSEL GELİŞİMİ

Japonlar işletmeler tarafından iyi yönetilemeyen bakım süreci ve ekipmanlar ile kaliteli ürün üretemeyeceklerinin farkına varıp, 1950 li yıllarda TPM ‘ın temellerini atmışlardır. TPM ‘dan sonra Japon işletmelerinde uygulamaya alınan PM (Preventative Maintenance / Önleyici Bakım) faaliyetleri ile ürün kalitesinin yükseldiği ve verimliliğin büyük oranlarda arttığı gözlemlenmiştir.

Bakımın gelişiminden başlayarak TPM’ın günümüzde bir yönetim sistemi olarak ifade edilmesine kadar geçen tarihsel gelişim süreci aşağıdaki gibi özetlenebilir [5].

2.2.1 Arızi/Tamir Bakım (Breakdown Maintenance)

Bozulmadıkça tamir etme yaklaşımından hareket edilerek, makinenin ancak arızalandığında bakıma alınması gerektiğini ifade eden, günümüzde halen bazı şirketler tarafından uygulanan bir yaklaşımdır. 1950 yılları öncesi döneminde koruyucu bakım, periyodik bakım ve kestirimci bakım yerine arızi bakım uygulanmaktaydı. Bakım faaliyetleri gibi operasyonlar ve maaliyetlerine katlanmak yerine ekipmanın arıza yapması sonrası uygulanan bir yöntemdi. Bu dönemde öngörülemeyen arızalar sebebi ile ekipmanların verimliliği ve kullanılabilirlik oranları çok düşüktü ve beklenenden fazla işgücü ve maliyet kayıbına sebep oluyordu.

2.2.2 Önleyici Bakım (Preventive Maintenance)

Önleyici Bakım yaklaşımı, ABD işletmeleri tarafından Japonya’ya tanıtılmıştır. Bu dönemde ekipmanlarda meydana gelen arızaları ve beraberindeki kayıpları önlemek için ön plana çıkmaya başlayan koruyucu bakım prosedürlerinin oluşturulmasına başlanılmıştır. Koruyucu bakım prosedürleri ile ekipmanlar ve makinaların faaliyet oranlarında ve verimlilik katsayılarında artışlar görülmüştür.

2.2.3 Düzeltici Bakım (Corrective Maintenance)

Plansız bakım türüdür. Arıza meydana geldikten sonra mümkün olan en kısa süre içerisinde arızanın giderilmesini hedefleyen bir bakım türüdür. Bu bakım türünde arızanın meydana gelmesi beklenir ve müdahale arıza görüldükten sonra gerçekleştirilir. Arızi bakım olarak da adlandırılan bu bakım türünde arıza bakım personeli tarafından yapılan fiziksel, görsel ve diagnostik kontroller yapılarak tespit edilir ve giderilme işlemleri yapılır. Bu bakım türü çok yüksek bakım maliyeti ortaya çıkaran, işgücü ve malzeme kayıpları ile sonuçlanan bir olumsuzluklar zinciridir . Bu bakım türünde arızanın ne zaman ortaya çıkacağı bilinmediğinden planlama yapılamaz. Beklenmedik anlarda duruşlara neden olabilir, geç fark edilirse arıza çok daha büyük sonuçlar doğurur. Olumsuzluk etkisi yedek parça stoğu bulundurularak azaltılabilir. Başta havacılık sektörü olmak üzere kritik ve çok tehlikeli iş kolları için önerilmemektedir.

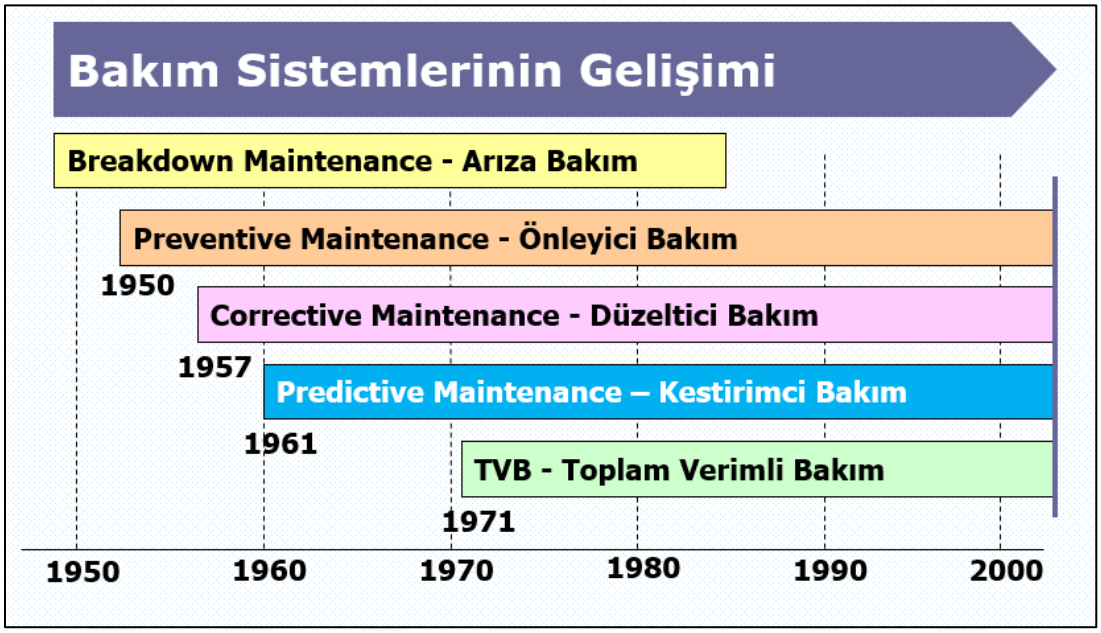
2.2.4 Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance)

Planlı bakımlar içinde en kapsamlı, gelişmiş ve teknolojik bakım türüdür. Bu yöntem ekipmanlar çalışırken üzerlerinden alınan ölçüm değerlerinin, tüm performans bilgilerinin tecrübe ile birlikte, üretici firmaların koyduğu sınırlar dahilinde analizlerinin izlenmesi ve istatistiksel olarak değerlendirilerek önlem alınması ilkesine dayanır. Bu bakım türü sıfır arızaya çok yakın olup istenmeyen duruşlar ve yüksek bakım maliyetleri engellenebilir.

2.2.5 Toplam Üretken Bakım-TPM (Total Productive Management-TPM)

TPM'ın yalnızca bir bakım sistemi olmadığı, aynı zamanda fabrikanın tüm süreçlerini içeren bir sistem olduğu ifade edilmiştir. TPM 'in kurucularından Tokutaro SUZUKİ, şirketlerin küreselleşme ile birlikte odaklanması gereken konuların farklılaştığını, bu nedenle Toplam Üretken Bakım sistemi içerisinde var olan sütunlara ilave olarak başka sütunların da eklenmesi ile birlikte Toplam Üretken Bakım kavramının klasik yapısından uzaklaşması gerektiğini [5] belirtmiştir.

Toplam Üretken Bakım, işletmenin çevresinde meydana gelen değişime karşı ayakta kalmasını sağlayan durağan bir yapıdan çıkıp, işletmenin ihtiyaçlarına göre şekillenen bir yaklaşımdır. Bu nedenle işletmenin faaliyetlerini sürdürülebilir kılmak için TPM de kendisini sürekli yenilemekte, ihtiyaç doğrultusunda ortaya çıkan diğer üretim sistemleri içerisinde var olmaktadır.



Şekil 2.1: Bakım sistemlerinin gelişimi [5].

2.3 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN AMAÇLARI

Buraya kadar yapmış olduğumuz tanımlara göre TPM uygulamasının en temel amacı işletmenin toplam verimliliğinin arttırılmasıdır. Bu doğrultuda; teknik eğitimler düzenlenerek tüm çalışanların teknik ve teorik becerilerinin artması beklenmektedir. Bu çalışmaların temel hedefi İşletme içerisinde bakım faaliyetlerinin iyileşmesi, takım çalışmalarının ve iyileştirme önerilerinin artması ve işletme kültürünün olumlu yönde değişmesi olmalıdır. TPM uygulamaları kapsamında ekipman verimliliği ve ürün kalitesi artar. Çalışmalar sayesinde, üretim hataları, iş gücü kayıpları ve gereksiz stoklamanın azaldığı gözlemlenir [7].

TPM kavramı, “değer katan bir şirket kültürü yaratmak” düşüncesine dayanmakta ve bu nedenle, her şirket bulunduğu sektörün gerekliliklerine uygun olarak üretimde rekabet avantajına yol açan belirli hedefler koymakta ve bu doğrultuda TPM uygulama çalışmalarını gerçekleştirmektedir [8].

Kabul edilen TPM hedefleri yalnız tek bir sütunu etkileyebileceği gibi birden çok sütun çalışma alanlarında girebilmektedir. TPM’ in hedefleri [1];

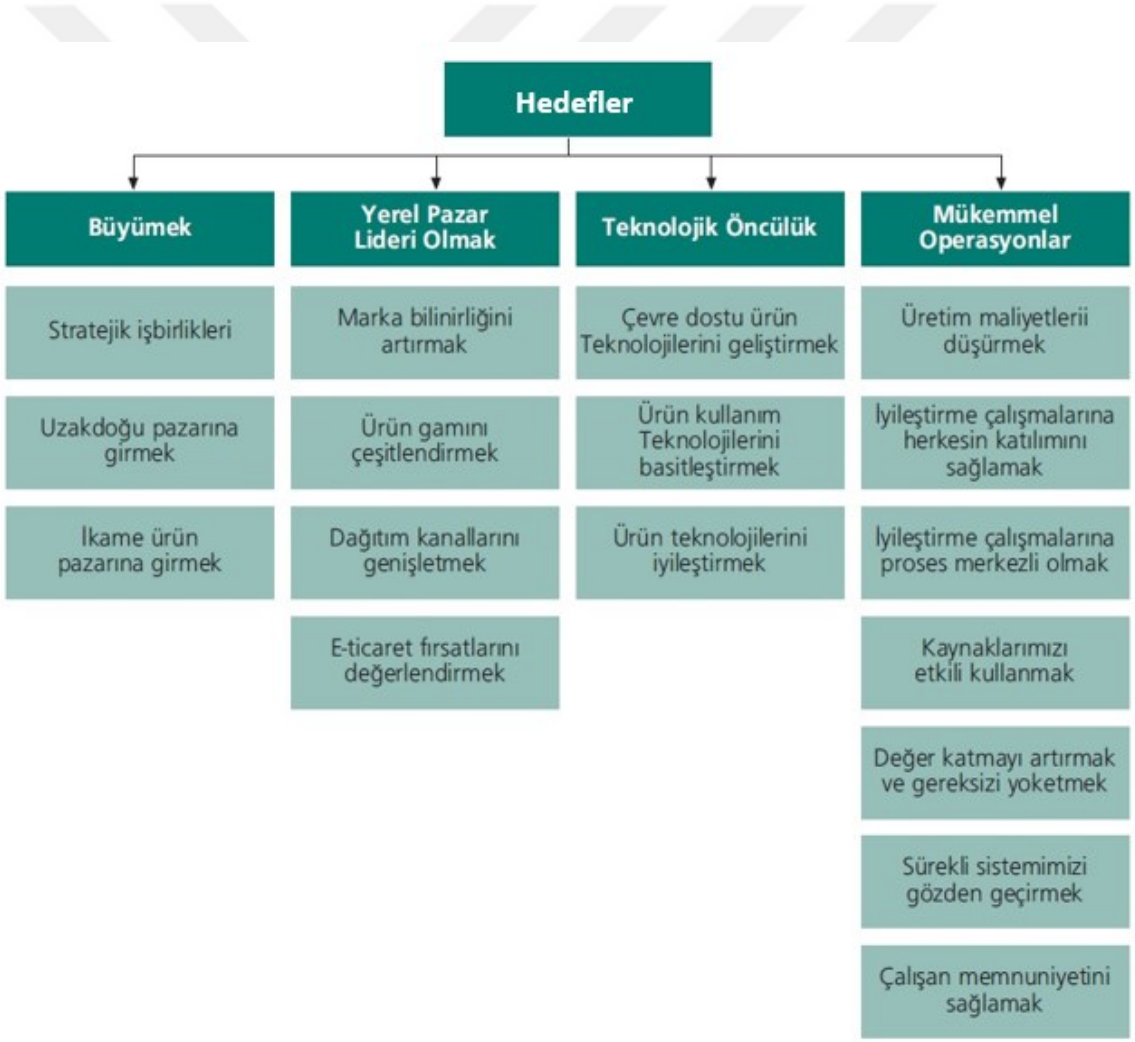
a) İşletmelerin rekabet gücünü arttırmak,
b) Yalın çalışılan yüksek performanslı bir çalışma ortamı yaratmak,
c) Üretimin tüm aşamasında gerekli prosedürlere uyularak müşteriler tarafından tam güvenebilen ürün ve hizmetleri üretmek,
d) Kayıp ve israfları tamamen engelleyerek maliyetleri azaltmak ve maksimum verimlilik elde etmek,
e) TPM uygulamalarının sadece üretim ve bakım alanlarında yapılmayıp idari ofisler dahil tüm işletme geneline yayılmasını sağlamak,
f) 5S’in uygulandığı temiz ve düzenli işyeri oluşturmaktır.

TPM kavramı, “değer katan bir şirket kültürü yaratmak” düşüncesine dayanmakta ve bu nedenle, her şirket bulunduğu sektörün gerekliliklerine uygun olarak üretimde rekabet avantajına yol açan belirli hedefler koymakta ve bu doğrultuda TPM uygulama çalışmalarını gerçekleştirmektedir [8].

TPM ‘in amaçları baskın olarak ekipman ve makina verimliliğinin arttırılması gibi görünse de insan faktörünün de unutulmaması gerekmektedir. Çünkü bu tezde paylaşılacağı üzere tüm konuların temelinde doğal afetler hariç aslında insan faktörü bulunmaktadır. TPM ‘in bizlere yüklediği sürekli iyileştirme çalışmalarında insan davranışlarındaki olumlu değişimler gözlenmektedir. Buradan yola çıkılarak çalışanların yeteneklerinin arttırılması, aynı zamanda işletme içerisindeki iletişim bağlarını kuvvetlendirecek, böylece kabul görmüş ortak hedefler doğrultusunda çalışanlar iyileştirme çalışmalarına katkıda bulunabileceklerdir [9].

2.4 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN HEDEFLERİ

TPM felsefesinin hedefleri; verimlilik, ürün kalitesi, bakım kalitesi ve sürekli iyileştirme faaliyetlerinin arttırılması ile sıfır arıza, sıfır kayıp, sıfır fire, sıfır stok maliyeti, sıfır iş kazası gibi çok önemli sonuçların elde edilmesidir. İnsan faktörü yönünden incelendiğinde takım çalışmalarının arttırılması, meslek içi eğitimlerin arttırılması, çalışanların farkındalıklarının arttırılması da birer örnek olarak gösterilmektedir. TPM hedefleri içerisinde çalışanların sürece sahip çıkmaları çok önemlidir. Bu aşamada unutulmaması gereken en önemli nokta, çalışanların süreç içerisinde kalmalarının sağlanması açısından, verilen hedeflerin ulaşılabilir ve çalışanları güdüleyici olmasıdır.



Şekil 2.2: Toplam üretken bakımın hedefleri [4].

TPM çalışmalarına başlamadan önce vizyonun ve uzun vadeli hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. İşletmelerin vizyon ve hedeflerinin TPM hedefleri doğrultusunda birleştirilmesi işlemi 3-5 yıl sürebilir. Bunun haricinde TPM vizyon ve hedefleri ile şirketin uzun vadeli diğer iş stratejilerinin de ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Böylece TPM 'in şirkete katkısı somut olarak belirlenmiştir. TPM ’ın temel hedefi başlangıçta altı büyük ekipman kaybının tespit edilip düzeltici aksiyonların alınması ile ürün kalitesinin ve ekipman verimliliğinin arttırılmasının sağlanmasıdır. Bu çalışma ile aşağıdaki olumlu sonuçlara ulaşılır [5]:

a) Ani arıza kayıpları,
b) Ayar kayıpları,
c) Rolanti ve kısa duruş kayıpları,
d) Hız kayıpları,
e) Kullanılabilirlikte artış ve
f) Performans oranında artış.

TPM ’ın hedefiyle şirketin iş hedefleri çakışmaktadır. Bu nedenle TPM ’ın bütün organizasyonca kabul görmesi gerekir. Böylece üst düzeyden en alt kademeye kadar, organizasyonun stratejik hedefleri doğrultusunda hedef yayılımı gerçekleştirilmiş olur [8]. TPM felsefesinin hedefleri aşağıda belirtilmiştir [10]:

a) Ekipman verimliliğinin arttırılması,
b) Ürün kalitesinin arttırılması,
c) Hataların azaltılması (Sıfır hata),
d) Kayıpların azaltılması (sıfır kayıp),
e) Firelerin azaltılması (sıfır fire),
f) Stokların azaltılması (Sıfır stok),
g) İş kazalarının azaltılması,
h) Bakım kalitesinin arttırılması,
i) Grup çalışmalarının arttırılması,
j) İyileştirme fikirlerinin arttırılması ve
k) Eğitimler ile kültür değişiminin sağlanması.

2.4.1 TPM ’in Ana Hedefleri

TPM ‘in iki ana hedefi bulunmkatadır; Kolay çalışılan yüksek performanslı bir iş yeri yaratmak ve rekabet gücünü arttırmaktır. TPM felsefesi, “değer katan bir şirket kültürü yaratmak” düşüncesine dayanmaktadır. Bu düşünceden yola çıkarak işletmeler bulunduğu sektörün ihtiyaçlarına uygun olarak ürün ve hizmet üretiminde rekabet avantajına yol açan belirli hedefler koyarak ve bu hedefler doğrultusunda TPM uygulama haritası çıkartmalıdır. Konulan bu hedefler TPM ‘in sekiz sütunundan sadece tek bir sütunu etkileşim içerisinde olabileceği gibi bir çok sütunla da etkileşim içinde de olabilmektedir. Üretim performansını arttırmak için her bir sütun hedefler doğrultusunda ele alınarak incelenmelidir.

TPM ‘in ana hedef kazanımlarından biri olan pazarda rekabet avantajı elde etmeyi sağlayacak, üretim performansını etkileyen ve bu doğrultuda literatürde sıklıkla adı geçen kalite terimleri aşağıdaki gibidir [11].

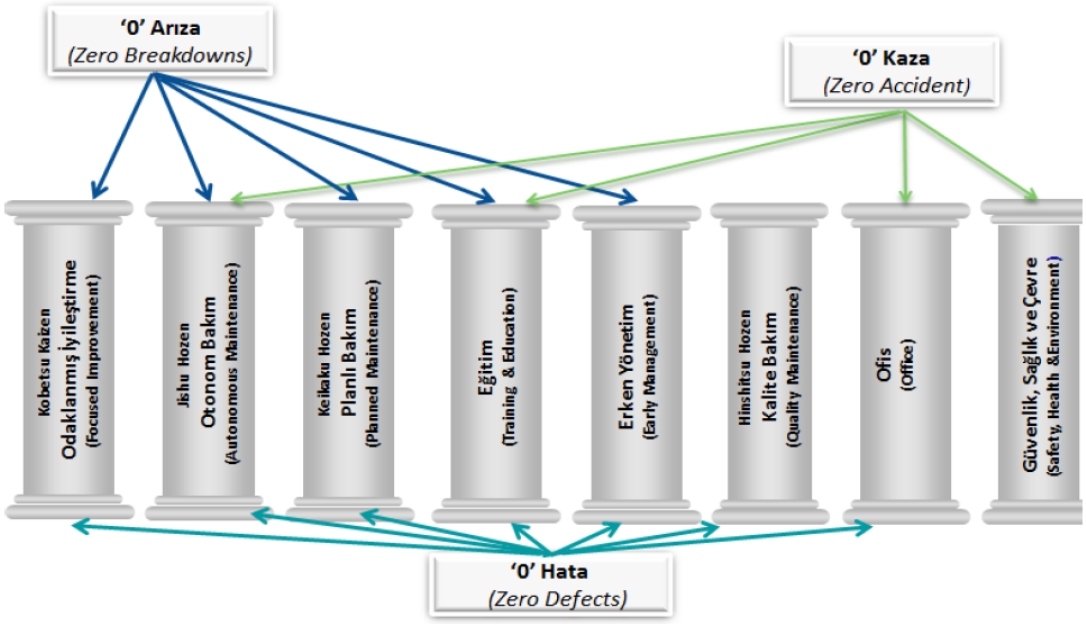
a) Kalite; Müşterilerin ihtiyaçlarına bağlı olarak üretilen ürünlerin kalitesini arttırmaya yönelik hedefleri içerisinde barındırmaktadır. Müşteri şikayetleri ve iç şikayetler kalite hedefinin alt hedeflerini oluşturur.
b) Dağıtım; Şirketin teknolojik hızını göstermesinin yanında ürünü müşteriye tam zamanında ulaştırabilme hedeflerini de içerisinde barındırmaktadır.
c) Esneklik; Şirketin ürün çeşitliliği sunmasına yönelik koymuş olduğu hedefleri içermektedir.
d) Maliyet; Ürün maliyeti ve toplam üretim maliyeti hedeflerinin gösterilmesidir.
e) Hız; Çalışmaları daha kısa zamanda, daha hızlı şekilde gerçekleştirmek için koyulan hedefleri içermektedir.
f) Verimlilik; Ürünün üretilebilirliği ve verimliliğine yönelik koyulan hedeflerdir.
g) İş Güvenliği; İş güvenliği ve iş sağlığına yönelik hedefler koyulmaktadır. Örneğin minör ve majör iş kazaları hedefleri gibi.
h) Çevre; Çevresel faaliyetlere yönelik hedefler belirlenmektedir. Örneğin karbon emisyonu, hijyen hedefleri gibi.
i) Motivasyon; İnsan kaynağının gelişimi ve çalışanların faaliyetlere katılım hedeflerini içermektedir.

2.4.2 TPM 'in Sıfır Hedefleri

Bu bölüme kadar yapmış olduğumuz tanımlardan yola çıkarak Toplam Üretken Bakımın en önemli hedeflerinden biri de sıfır hedeflerdir. TPM çalışmaları ile gelmek istediğimiz sıfır hedefler içerisinde, "sıfır hata, sıfır kaza, sıfır arıza" bulunmaktadır [12]. Bu amaçların gerçekleştirilmesiyle sistem içerisinde makine/teçhizat ve insandan oluşan kayıplar yok edilmektedir. Böylelikle TPM'in üç temel sıfır durumunun yanı sıra "sıfır kayıp" hedefi de sağlanmış olmaktadır.

Sıfır hata ile müşteri memnuniyeti, sıfır kaza ile çalışanlar arasında yüksek motivasyon, sıfır arıza ile işyerinde yüksek verimlilik ve sıfır kayıp ile maliyet avantajı sağlanmaktadır. Böylelikle işletmenin kâr amacına ulaşması ve bu amaca ulaşırken de çalışanları ve müşterileri ile bütünleşmesi sağlanmış olmaktadır.

TPM 'in sıfır hedeflerine ulaşabilmemiz için; TPM 'in sıfır hedefleri ile TPM 'in sekiz sütununda arasındaki ilişkinin derlenmesi ve anlamlı ilişkilerin kurulması gerekmektedir. Her sütunun sıfır hedeflerini sağlamak için üstlenmiş olduğu belirli görevler bulunmaktadır. Aşağıdaki şekilde sütunların sıfır durumları ile olan ilişkisi belirtilmiştir:



Şekil 2.3: TPM 'in sıfır hedefleri ile sütunları arasındaki ilişkisi.

Uygulamada yanlış anlaşılmaya sebep olmaması için sıfır kavramına bir açıklık getirilmesi gerekmektedir. Sıfır kavramı saha ve üretim uygulamalarında "sürekli" sıfır arıza, sıfır kaza ve sıfır hata olarak algılanmaktadır. Ancak buradaki "sıfır" kavramı matematiksel anlamda sıfır olmaktadır [13].

2.4.3 TPM 'in İş Hedefleri

TPM uygulamaları çok uzun süreye yayılan bir çalışmadır. Bu çalışmanın başında yapılacaklardan biri de TPM 'in vizyon ve hedefleri ile işletmelerin uzun vadeli iş stratejileri arasında bağlantının kurulması olacaktır. Gerçekleştirilen ilişkilendirme ile TPM faaliyetleri işletme stratejilerini olumlu olarak etkileyecek ve sonuçları işletmenin tüm faaliyetlerine olumlu yansıyacaktır.

TPM her ne kadar kusursuzluk modeli olsa da aynı zamanda bir iştir ve stratejilerde açık bir şekilde yerini alır. Bu tanımdan yola çıkarak işletmeler tarafından gelinmek istenilen hedefler belirlenir ve belirlenen her bir hedef ile TPM sütunları arasındaki ilişkileri değerlendirilir. Her sütunun değerlendirmesi ile işletmenin misyonu ve vizyonu ile TPM arasında ortak bir bağ kurulmalıdır. Örnek; sıfır iş kazası, büyüme, üretim ve sermaye arttırımı, kalite gibi.

2.5 TOPLAM ÜRETKEN BAKIM SİSTEMİNİN 12 UYGULAMA ADIMI

Toplam Üretken Bakım sisteminin uygulama sürecinde izlenecek olan 12 temel adım; Hazırlık, Uygulama ve Sürekliliği Sağlama olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır. Uygulamanın hazırlık aşamasında Toplam Üretken Bakımın tanıtımı ve ilanı, TPM politikalarının ve hedeflerinin belirlenmesi ve planların hazırlanması adımlardan oluşur. TPM sisteminin Organizasyon ve Uygulama Yapısı bu bölümde şekillenir. Uygulama aşamasında süreç başlama vuruşu ile başlatılır ve üretimin kayıpları, üretimi etkileyen sorunların analizlerinin yapılması, tespit edilen sorunların bakım planlarına entegre edilmesi, yine planlı bakım stratejilerinin geliştirilmesi, sürekli iyileştirme ve eğitim gibi çalışmaları kapsar. Son adımda ise sistemin değerlendirilmesi, disipline edilmesi, sürekliliğinin sağlanması ile yeni ve üst düzey hedeflerin konulmasını içermektedir [10].

Tablo 2.1: TPM uygulamasının 12 adımı [10].

AŞAMALAR	ADIMLAR	DETAYLAR
HAZIRLIK	1.Üst Yönetim Tarafından İşletmede TPM Uygulanacağının İlanı	İşletme yöneticileri öncü olarak, konuyu ve önemini duyururlar. Çalışanlar genel olarak bilgilendirilir ve uygulamanın faydası açıklanır.
	2. TPM Konusunda Tanıtım ve Eğitim Faaliyetlerinin Başlatılması	TPM'ın içeriği ve uygulanabilirliği konusunda seviyesine göre çalışanlara eğitimler verilir. Çalışanlar motive edilmeye çalışılır.
	3.Organizasyonel Yapının Oluşturulması	TPM uygulamalarının sürekliliğini sağlamak için bir organizasyon kurulması, çalışma kurallarını belirleyerek, işlerlik kazandırılması safhasıdır.
	4. TPM Konusunda Temel Politika ve Hedeflerin Belirlenmesi	Var olan koşulların analiz edilmesi, temel politika ve hedeflerin belirlenmesi adımıdır.
	5. TPM için Ana Planın Hazırlanması	Detaylı uygulama planı hazırlanır.
UYGULAMA	6. TPM Başlama Vuruşu Yapılması	Planın hazırlanmasından sonra tüm çalışanların katılacağı bir organizasyonla uygulamalar başlatılır. Bu aşamadan sonra, her çalışan kritik önemdedir.
	7. Ekipman Yönetim Sisteminin Kurulması	Sürekli iyileştirme takımlarının çalışmaları ile kayıpları önleyecek faaliyetlere odaklanılır.
	8. Otonom Bakım Sistemi Kurulması	Arızalar için önlem alınması, üretim araçlarının periyodik bakımının bir bölümünün makine başında çalışan operatörler tarafından yapılmasıdır.
	9.Planlı Bakımın Geliştirilmesi	Üretim araçlarının gruplandırılması, üretim araçlarına ait dosyaların oluşturulması, alt grupların ayrılması, eylemlerin tanımlanması, uygulamanın takibi ve kontrolünü içerir.
	10. Önleyici Mühendislik Faaliyetlerinin Yerine Getirilmesi	Elde edilen sonuçların yeni ekipmanlara aktarılması ve ömür çevrim maliyeti analizi yapılmasıdır.
	11. Operasyon ve Bakım Yetenekleri Geliştirilmesi için Eğitim	Tüm düzeylerdeki çalışanların eğitimlerinin süreklilik kazanmasıdır.
SÜREKLİLİK	12. TPM Sisteminin Korunması ve Yeni Hedeflerin Belirlenmesi	Değerlendirme yapılması, hedeflerin güncellenmesi, PM ödülüne başvuru gibi aşamaları içerir.

2.6 5S TEMİZLİK VE DÜZEN

TPM çatısını oluşturan sekiz güçlü sütunun olduğu yapının ana resmine baktığımızda, bu sütunların 5S temeli üzerinden yükseldiğini görürüz. İnşaa etmeyi planladığımız TPM yapısına geçmeden önce temeli oluşturan 5S 'in önemi ve gücü hakkında bilgi vermeden geçmemek gerekmektedir.

Türkçe karşılıkları toparlanma, düzen, temizlik, standardizasyon ve disiplin anlamına gelen Japonya merkezli bir uygulama olan 5S, Japoncada "S" harf ile başlayan "seiri, seiton, seiso, seiketsu, shitsuke" beş kelimenin kısaltılmasıdır [14]. Yine temeli yalınlığa dayanan 5S uygulaması adı altında yapılan çalışmaların sonucunda iş ortamlarının daha sade, daha verimli olduğu ve çalışanların memnuniyetinin arttığını belirtmişlerdir.

Tablo 2.2: 5S temizlik ve düzen sistemi.

JAPONCA	İNGİLİZCE	TÜRKÇE
Seiri	Sort	Ayıklama
Seiton	Set in Order	Düzenleme
Seiso	Shine / Sweep	Temizleme
Seiketsu	Standardize	Standartlaştırma
Shitsuke	Sustain / Self - discipline	Disiplin

2.6.1 Ayıklama

5S 'in başlangıcı ve ilk adımıdır. Rahat ve verimli bir çalışma ortamı oluşturabilmek için başlangıçta gerekli, gereksiz malzemeleri ayıklayarak tasnif edilmesi gerekmektedir. Diğer bir tanım işletmedeki her malzemenin doğru yerinde bulundurulması amacı ile yapılan tasnif işlemidir. Çalışmanın birinci adımında etrafımızda bulunan makina, eşya, malzeme, ölçü aleti, el aleti ve teçhizatların yapacağımız iş için gerçekten gerekli olup olmadığı değerlendirilip bu bilgilere göre gereksiz olan eşyaların çalışma bölgesinden uzaklaştırılması sağlanmalıdır.

2.6.2 Düzenleme

Genel olarak tertip ve düzenin sağlandığı aşamadır. Bu aşamada çalışma alanında tutmaya karar verdiğimiz malzemeleri gerektiğinde kolayca bulabilmek ve kullanabilmek için yapılan düzenleme ve işaretlemedir. Düzenleme ve işaretleme aşamasında yerlerin boyanması, isimlendirilmesi, gölgelendirme gibi teknikler kullanılmaktadır.

2.6.3 Temizleme

Çalışılan yerlerin sürekli temizlenerek dağınıklılığa ve verimliliğin düşmesine sebep olacak kirlilik kaynaklarının tespit edilerek ortadan kaldırılmasının sağlanmasıdır. Yapılan temizlik çalışmalarının belirlenen bir periyot ile sürekliliği sağlanmalıdır, aksi halde çalışma alanları çok kısa bir sürede eski haline dönüşür.

2.6.4 Standartlaştırma

Bu aşamaya kadar yapılmış olan çalışmaların devamlılığının sağlanması ve oluşturulan düzenin sürekli güncel tutulması için yapılan tüm faaliyetlerin belli bir standartlara kavuşturulması ve bu standartların 5S çalışması yapılan diğer birimlerde de uygulanmasını sağlanmasıdır.

2.6.5 Disiplin

5S çalışmalarında yukarıda belirtilen aşamaların yapılması işletmelerde kalıcı bir hale gelmeleri için yeterli olmayacaktır. Yapılan çalışmaların devamlılığının sağlanması ve kalıcı olabilmesi için personele eğitim verilmesi, çalışanların yapılan 5S faaliyetlerini sahiplenmesi için disiplin gerekmektedir. Etkili bir disiplin sağlanamazsa yapılan tüm çalışmalar sonuçsuz kalabilir ve eski dağınık düzene kolayca dönülebilir.

Sonuç olarak 5S ‘in başarı ile gerçekleştirildiği çalışma ortamlarında iş güvenliği, ürün ve hizmet kalitesi, üretim, verimlilik ve makina performansında olumlu gelişmelere sebep olduğu gözlenmiştir.

2.7 TOPLAM ÜRETKEN BAKIMIN 8 ANA SÜTUNU

Fabrikalarda TPM felsefesi sadece bir kişiyi veya ilgili bir departmanı değil başta üst yönetim olmak üzere tüm şirket çalışanlarını ilgilendirmektedir. TPM çalışmalarında hedeflere ulaşabilmek için TPM Komitesince alınan tüm kararda, sunulan metodolojilerin eksiksiz uygulanmasının etkin olacağını belirtilmesi gerekir. TPM 'in çatısı, ancak 8 sütunun dengeli bir şekilde inşa edilmesiyle yerine oturabilecektir [5].



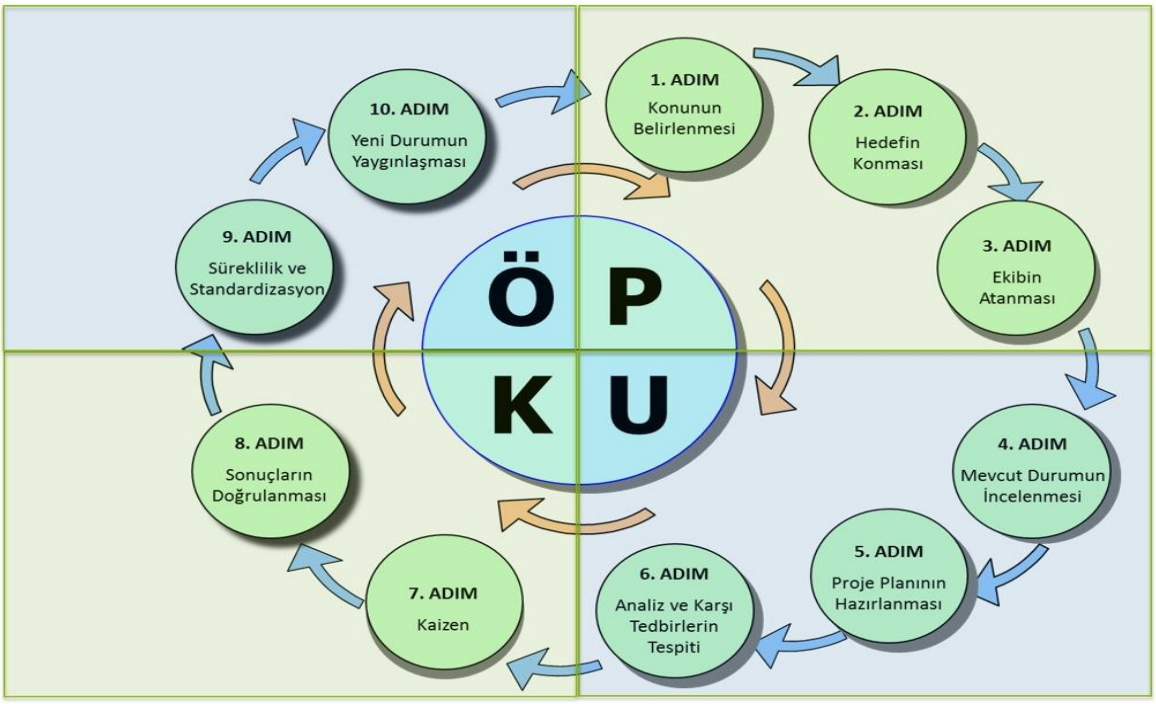
Şekil 2.4: TPM sütunları.

TPM 'ın 8 ana sütunu şunlardır:

a) Odaklanmış İyileştirmeler - Kobetsu-Kaizen,
b) Otonom Bakım - Jishu-Hozen,
c) Planlı Bakım (Etkin Bakım),
d) Personelin Eğitimi / Bilgi ve Becerilerin Geliştirilmesi,
e) Erken Ekipman/Ürün Geliştirme Yönetimi,
f) Kalite Programı - Hinshutsi-Hozen,
g) Çevre - İnsan Sağlığı ve İş Güvenliği ve
h) Ofislerde TPM.

2.7.1 Odaklanmış İyileştirmeler - Kobetsu-Kaizen

"Kai" ve "Zen" sözcüklerinden oluşan Kaizen Japoncada "iyiye doğru değişim" anlamına gelmekte olup batı dünyasında ise "sürekli iyileştirme" anlamında kullanılmaktadır. Sürekli iyileştirmede amaç, donanım etkinliğinin maksimizasyonudur. Ekipman, makina ve üretim hatlarında meydana gelecek kayıpları önleyebilmek için yapılan tüm çalışmalarda enerji, malzeme ve işgücü kayıplarının en az seviyeye indirilmesi hedeflenmektedir. Donanım yönetiminin üç bileşeni; donanımların iyileştirilmesi, kayıpların analizi ve sürekli iyileştirme takımları olarak sıralanabilir [10].



Şekil 2.5: PUKÖ çevrimi ve odaklanmış iyileştirmelerin 10 adımı.

2.7.2 Otonom Bakım - Jishu-Hozen

Otonom kavramı, "kendi kendine yetebilen" anlamına gelmektedir. Otonom bakım, yani "Jishu Hozen" operatörlerin kendi ekipmanını sahiplenerek, yapmış olduğu faaliyetlerin haricinde temel seviye kontrol, küçük bakımlar, temizlik ve yağlama gibi faaliyetleri içerir. Bunların dışında meslek için eğitimler ile operatörler bakımlarıda yapabilme yetkinliğine kavuşturulmalıdır.

Bu durum her ne kadar operatörler tarafından artı bir iş yükü gibi görünse de gerçekte ekipmanını daha iyi tanımasını teknik özelliklerini öğrenmesini ve bu ilave bilgiler ile ekipmanını daha etkin kullanmasını sağlayacaktır. Otonom bakımın başarısı operatörlerin yetkinliğine bağlıdır. İdeal bir operatör meydana gelen anormallikleri fark edebilme, anormallikleri düzeltebilme, makinanın ideal çalışma koşullarını belirleyebilme, makinasını ideal çalışma koşullarında tutma yetkinliğine sahip olmaları hedeflenmektedir [15].

Tablo 2.3: Operatör ve bakım ekibinin sorumluluk alanı [15].

Faaliyet	Bakımcılar	Operatörler
Üretim Yapmak		X
Setup ve Ayar Yapmak		X
Temizlik		X
Yağlama		X
Sıkma		X
Periyodik Bakım	X	X
Düzeltici Bakım	X	
Kestirimci Bakım	X	X
Arıza Bakımı	X	X
Bakım Gerektirmeyen Uygulamalar	X	
Revizyonlar	X	X

2.7.3 Planlı Bakım (Etkin Bakım)

Planlı bakımlar ile elde edilmesi istenilen hedef: Arızaların olmadığı, verimliliğinin en üst seviyede olan makine ve ekipmanlara sahip olmaktır. Arıza makinalar ve sistemlerinin çalışma özelliğini kaybederek veya verimsiz çalışması sebepleri ile duruşa geçmesidir. Arıza istenilmeyen bir durumdur ve bunların gerçekleşmesinin temelinde kendini belli etmeyen gizli uygunsuzluklar yatmaktadır. Planlı bakım uygulamalarının amacı ekipman ve makinaların arızalarını önlemek ve uygunsuzlukların ortaya çıkarılmasını sağlamak, düzeltici işlemlerin yapılmasını sağlamaktır. Planlı bakımlar, alanında profesyonelleşmiş bakım personeli tarafından gerçekleştirilir [1].

2.7.4 Toplam Üretken Bakımda Eğitim

TPM felsefesinde çalışanlar, işletmelerinin en önemli değerleridir. Bu nedenle çalışanların kişisel gelişiminin ve bilgi seviyesinin arttırılması için meslek içi eğitimlerin uygulanması gerekmektedir [5]. Eğitim sütunu faaliyetleri yoluyla çalışanların yeteneklerinin gelişimine yönelik gerçekleştirilen uygulamalar ile işgücünün bilgi ve beceri seviyesi yükselmekte, motivasyonu artmaktadır. Alınması istenilen eğitimler ihtiyaca göre planlanmalıdır. Eğitimin içeriği ve süresi çalışanların motivasyonunu düşürmeyecek şekilde hazırlanmalıdır. Planlanacak olan eğitimlerin sürekliliği de çalışanların beceri kazanmaları açısından oldukça önemlidir [10]. Aynı zamanda düzenlenen eğitimler ile çalışanlar çevre ve iş güvenliği hakkında daha da bilinçlenmekte, arızalara ve sorunlara bakış açıları değişmektedir [16].

2.7.5 Erken Ekipman Yönetimi

TPM ‘ın bu faaliyet alanında yeni bir makina veya ekipman alımında, bir tesisin devreye alınmasında, yeni tasarlanmış bir ürünü ilk defa üretilme aşamasında meydana gelebilecek uygunsuzlukları ve büyük kayıpları tespit ederek henüz meydana gelmeden önlemek ve ortadan kaldırmak amacıyla başvurduğumuz yöntemlerin tamamıdır. Titizlikle yapılması gereken bu aktivitenin amacı hızlı ve ekonomik bir şekilde üretimin sağlanması, kullanımı kolay amaca uygun ekipmanların satın alınması ve devreye alınmasıdır [5].

Erken ekipman yönetimi temelinde ekonomiklik olduğu kadar alınacak olan makinanın çalışılacak yere ve yapılacak işin niteliğine uygunluğu yatmaktadır. Bu uygunluğun sağlanması için kullanıcı operatörden eğitim birimine kadar, bakım bölümünden ilgili satınalma birimine kadar uzman personelden oluşturulan bir ekip kurulması ve hayata geçirilmesi gerekmektedir. Yeni bir ekipman alınmadan veya yeni bir tesis devreye alınmadan önce erken ekipman yönetimi ekibi; mevcut ekipmanlarda/tesislerde odaklanmış iyileştirmeler, otonom bakım ve planlı bakım aktiviteleri, ekipmanların performansları ve personel tecrübeleri ile elde edilen bilgi birikimi ile yeni ürün ve yeni ekipman gelişim safhalarına geri beslenmekte ve alınmasına karar vermektedir.

2.7.6 Kalite Bakımı - Hinshutsi-Hozen

Kalite bakımı, koşulları sıfır hataya ayarlayan ve kalite hatası yapmayacak şekilde ekipmanı kontrol altında tutan TPM yaklaşımıdır. Kalite bakımı ile ölçülen değerlerin standart limitler arasında olduğunu doğrulanır ve sonuç olarak kalite kaynaklı hatalar önlenir. Diğer bir çalışma ile gözlemlenen değerlerdeki değişimler analiz edilerek hata olasılıklarını önceden tespit edilir ve bu tespitler doğrultusunda çalışmalar sürdürülür.

Kalite-bakım sütunu, işletmenin tüm süreçlerinde kalite koşullarının sürekliliğinin sağlanmasına yönelik gerçekleştirilen uygulamaları içermektedir. Burada vurgulanması gereken en önemli nokta yalnız ekipman ve üretim aşamasındakilere değil, tedarik zincirinde bulunan tüm süreçlere odaklanmak üzere çalışmalar yapılmasıdır [4]. Kalite bakımı alanında uzmanlaşmış bakım personeli tarafından gerçekleştirilmelidir. Yapılacak olan bakım ve kontrollar ekipman verimliliği ile direkt ilişkili olduğu kadar aynı zamanda bakım personeli tarafından gerçekleştirilen bakımın kalitesi ile arıza ekibinin yapmış olduğu arıza giderme işlemlerinin kalitesini de değerlendirecektir.

2.7.7 Çevre - İnsan Sağlığı ve İş Güvenliği

İşletmeler genelinde tertip ve düzenin sağlanabilmesi için üretim sahalarının ve ekipmanların 5S kurallarına uygun olarak düzenlenmesi ve yerleşimlerinin sağlanarak sürekliliğinin temin edilmesi ve kontrol edilmesi işletmelerin önem verdiği prensiplerden biridir. Tüm çalışanların bireysel sorumluluk alanlarına odaklanarak, fabrika ve Makine 5S ve çevre bilinçleri, eğitimlerle arttırılmakta ve bu alandaki katkıları teşvik edilmektedir.

TPM'in karakteristik özelliklerinden biri de çalışanlara verilen değer, işçi sağlığı ve iş güvenliğidir. Verilmiş olan bu değerler neticesinde çalışanların güvenliğini ve sağlığını gözetecek çalışma ortamları yaratabilmesi gerekmektedir. TPM işçi sağlığı ve iş güvenliğine verdiği önem ile aşırı gürültü, nem, aydınlatma, sıcaklık vb. gibi ergonomik faktörler ile psikolojik faktörlere düzenleme getirilerek çalışma performansını, iş güvenliğini ve işçi sağlığını tehdit eden durumların oluşması da engellenmektedir. Böylelikle iş güvenliği, tüm TPM faaliyetlerinde sistematik bir şekilde uygulanmaktadır [5].

2.7.8 Ofis Toplam Üretken Bakım

Ofis sütunu, Toplam Üretken Bakımın temel karakteristiklerinden biri olan "herkesin katılımı" yaklaşımı ile yalnızca üretim çalışanlarının değil, aynı zamanda idari kısımda çalışanların da faaliyetleri destekleyecek şekilde TPM uygulamalarında yer almalarıdır [10]. Böylece başlangıçta üretim hatlarında gerçekleştirilen iyileştirmeler, ofis çalışmaları ile iş süreçlerini de etkilemekte, sonuç olarak daha etkin bir çalışma organizasyonunun oluşmasına yol açmaktadır. TPM fabrikalarında üretim sahası dışında, İdari Birimler, Depolama ve Sevkiyat, Satınalma, Üretim Planlama, Pazarlama ve Satış, İnsan Kaynakları, Muhasebe, Yönetim Sistemleri gibi birimler Ofis TPM faaliyetlerini yürütmektedirler.

2.8 TPM 'İN ÜZERİNE GİTTİĞİ 16 BÜYÜK KAYIP

TPM 'in kayıpları önlemek alanındaki temel amacı işletmelerde meydana gelebilecek gözlemler, deneyler ve tecrübeler ile tespit edilmiş üç ana kategori altında toplanmış 16 büyük kayıpları azaltarak, nihai verimi (Toplam Ekipman Etkinliği 'ni OEE) arttırmaktır. Bunun için işletmelerde meydana gelebilecek kayıpları tespit etmek, kayıpları gidermek ve bu çalışmaların kalıcı olmasını sağlamak gerekmektedir. Kayıplar azaltılırken genellikle büyük kayıplara odaklanmakla birlikte çok düşük kayıplarında değerlendirilmesi gereklidir. Önemsiz gibi görülen tüm kayıpların doğru bir şekilde kategorize edilmesi ve iyileştirilmesi büyük kazançların elde edilmesine sebep olacaktır [17].

Tablo 2.4: TPM uygulamasının üzerine gittiği 16 büyük kayıp.

TPM Uygulamasının Üzerine Gittiği 16 Büyük Kayıp		
Ekipman	**İşgücü**	**Ekipman ve Enerji**
Arıza kayıpları	Yönetim Kayıpları	Yararlanılmayan ekipman
Setup-Ayar Kayıpları	Üretim Hareket Kayıpları	Enerji kayıpları
Takım Değişimi Kayıpları	Hat organizasyonu	Malzeme fireleri ve zayiat
Başlangıç Kayıpları	Lojistik Kayıpları	
Küçük duruşlar ve rölanti	Ölçme ve ayar kayıpları	
Hız kayıpları		
Kusurlu üretim		
Kapatma Kayıpları		

2.8.1 Arıza Kayıpları

Ekipmanın çalışma mekanizmasında oluşan hasarlar sebebiyle ortaya çıkan genelde 10 dakikadan fazla duruşlardan kaynaklı kayıp zamandır. Ekipmanın amacı dışında veya yanlış kullanılması, kapasitesinin zorlanması, periyodik bakımının yapılmaması, performansında gözlemlenen düşüşe rağmen çalıştırılmaya devam edilmesi; yağlama, civata sıkma, temizlik gibi otonom bakımlarının düzenli yapılmaması, bilgisizlik, dikkatsizlik gibi sebepler arıza kaynaklı duruşların oluşmasına sebep olabilir. Arıza kayıpları terminde gecikmelere yol açabileceği gibi, çalışan motivasyonunun düşmesine de sebep olabilmektedir [18].

2.8.2 Ayarlar, Mamul ve Set-Up Kayıpları

Genelde üretim hatlarında görülem, model değiştirmek için geçen süredir. İşletmelerde ürün çeşitleri artıkça yeni model ürün için hazırlık ve ayar için harcanan süre, asıl üretimden daha fazla vakit alabilir. Esnek üretim, yani ürün çeşidinin fazla olması için model değişim sürelerinin azaltılması gerekmektedir. TPM ‘da çalışanlara özellikle kalıp bakımcılarına öğretilen SMED (Single Minute Exchange of Dies) yöntemi ile amaç tekli dakikalarda kalıp değişimini gerçekleştirmektir [17].

2.8.3 Sarf Malzemesi ve Aparat Değişim Kayıpları

Makinede üretim esnasında kullanılan filtre, conta, tamir takımları gibi aşınmalı sarf malzemeler ile baskı, şablon, kesici uç gibi aparatların değiştirilmesi esnasında oluşan kayıp zamandır. Kullanılan sarf malzeme ile aparatların ortalama ömürlerinin belirlenmesi ve bu süre dolmadan değiştirilmesi, yeni takılacak olan takımın temin edilmiş olması ve yerinin belirli olması yaşanacak olan kaybın en aza indirilmesini sağlamaktadır. Aksi durumda yaşanan duruştan kaynaklı maliyete, kırılan bir takımın fark edilmemesi ile üretime devam edilmesi durumunda oluşacak firenin maliyeti eklenecektir [18].

2.8.4 Başlama - Bitirme Kayıpları

Vardiya, gün veya hafta başında makinalar güç kayıpları veya düzensiz çalışma gibi olumsuzlukları engellemek için üretime/işe başlatmadan önce çalıştırmamız, çalışırken bazı ayarların yapılması gerekmektedir. Bazen makinaların hazır olabilmeleri için saatlerin geçmesi gerekebilir. Ekipmanların, makinaların veya üretim hatlarının başlangıç aşaması henüz çalışmaya başlamadan önce özellikle ısınması veya rolanti süresi gibi ilk üretim yapılana kadar geçen süredir. İşbaşı saatlerinin başlarında oluşan ve makinalardan ilk kaliteli ürünü elde edinceye kadar geçen tüm duruşlar da bu kapsamda değerlendirilebilir [4]. Bu hazırlık aşaması kayıp süre olarak değerlendirilmekte, yapılacak düzeltici işlemler, tasarım değişikliği, güncellemeler veya üretim tekniğinin değiştirilmesi gibi önlemler ile bu kayıp süreler giderilebilmektedir.

2.8.5 Küçük Duruşlar (Çokote) ve Rölanti Kayıpları

Küçük sorunlar nedeniyle makinanın durması veya herhangi bir nedenle makinanın boşta beklemesi ile oluşan kayıplardır. Az iş yükleme, takılı kalma, yavaşlama, hız dalgalanması, malzeme sıkışması, tıkanma, sensör hatası ve kirliliği, kalite hatası, makinanın iş beklemesi çokoteye örnektir. Üretim esnasında birtakım hız kayıpları ise ölçülemeyecek derecede küçük ve anlık genel olarak 10 dakikadan daha az sürede gerçekleşir. Bunları kayıt altına almak ve analiz etmek kaybın yaşandığı süreden daha fazla zaman alabilir. Bu tür kayıplar "çokote kaybı" olarak adlandırılır.

Bazı küçük duruşlar operatör ve bakım personeli tarafından yapılan müdahaleler ile giderilebileceği gibi teknik destek ile detaylı analiz yöntemleri de gerekebilir. Sık sık tekrar eden bu duruşlar operatörleri sürekli meşgul eder ve kaza riskini arttırır. Ayrıca bu tür duruşlar ekipman, makina ve üretim hatlarının verimlilik oranlarının çok düşmesine dolayısıyla maddi kayıplara sebep olur. Küçük duruşları yok etmekle büyük bir kazanç ortaya çıkacaktır.

2.8.6 Hız Kayıpları

Üretilen ürünün belirlenmiş standart zamanı ile fiili üretim süresi arasındaki fark hız kaybı olarak adlandırılır. Bu performans düşüklüğünün sebepleri olarak makinenin performansının düşmüş olması, arıza sebebiyle yavaşlatılmış olması, üretim ünitelerinden birinin kapatılmış olması, makinenin ulaşabileceği en yüksek hızın hiç denenmemiş olması, makine ayarlarının standartlaştırılmamış olması, bu sebeple her ayarda ayarı yapan operatöre göre işlem süresinin değişiklik göstermesi gibi örnekler gösterilebilir. Hız kayıplarının ölçülmesi zordur. Bu sebeple tezgâhtan mekanik ya da elektronik sinyaller alarak, bu sinyaller arasında geçen süreyi standart zaman ile kıyaslayan sistemler geliştirilmiştir [8].

2.8.7 Kusurlu Ürünlerde Düzeltme (Rework) Kayıpları

Üretimde ilk seferde ürünü "doğru" yapmak esastır. Verimli bir üretimin bu konudaki yeteneği kalitesizlik maliyeti ve/veya bir kerede üretebilme endeksi ile değerlendirilir. İlk defada hatalı olup tamir gören veya rework edilen ürünlerin bu işlem için gerektirdiği masraflar, makina, işgücü ve ekipmanın fazladan meşgul edilmesi birer kayıp olarak kabul edilirler.

2.8.8 Kapatma (Yemek Paydosları, Dinlenmeler... vb.) Kayıpları

Vardiya başı ve sonları, yemek paydosları, çay molaları, dinlenme, üretim hattı veya makina değişimi ve toplantı gibi sebepler ile ekipmanın bilinçli olarak kapalı tutulduğu zaman, kapatma kaybı olarak adlandırılır. Kapatma kaybı gibi planlı kayıplar nedeni ile ekipman etkinliğini etkilenmesine izin verilmemelidir [17]. İlk aşamada yukarıda bahsedilen olumsuzluklara çözüm bulunması gerekmektedir. Vardiya değişimleri, çay ve yemek molaları gibi kayıba sebep olacak durumlar hakkında idari ve mühendislik iyileştirme yapılabilir. Ayrıca makinaların otonom çalışması sağlanarak makinalar biz onların başını beklemesek de üretim yapacak hale getirebilir, ekipman duruşu engellenebilir.

Programlama, otomasyon gibi işlemlerle makinalarımızı kapatma sürelerinde de çalıştırabilir ve bunun çıktısı olarak fabrikalarımızın mevcut kapasitesinin tamamını kullanabilir, hatta önemli boyutta arttırabiliriz.

2.8.9 Yönetim (Talimat Bekleme) Kayıpları

Geciken malzeme, ekipman, işgücü, takım, tamir, iş emri, plansızlık kaynaklı beklemeler talimat bekleme kayıplarıdır. Yönetimsel ve planlama kaynaklı stok fazlası hammadde veya yarı mamuller yönetim kaybına örnek olarak gösterilebilir. Yani üretim ekipmanı ve operatör hazır olduğu halde üretimin çeşitli beklemeler nedeniyle gerçekleştirilememesi nedeniyle gerçekleşen duruşların tümü yönetim kayıpları içerisinde yer alır [17].

Yaşanan bu plansızlıktan dolayı çalışan kişi öyle bir duruma düşer ki, o anda yapabileceği hiçbir iş olmayıp çalışabilmesi için talimat bekleme pozisyonuna gelirler. Dolayısıyla ücreti kendisine ödenen çalışma zamanında bir "değer" ortaya koymaksızın geçirdiği anlar şirket raporlarına kayıp olarak yansımaktadır.

2.8.10 Üretim Hareket Kayıpları

Lüzumsuz mal hareketi, istif, istiften tekrar alma, operatörlerin yaptığı iş ile ilgili beceri eksikliği, hatalı malzeme, hatalı el aleti ve ekipmandan kaynaklı yavaşlamalardır. Yapılan bu hareketler sonucu ortaya çıkan ısraflar birer kayıp olup bu olumsuzluklar yalın ilkelerine göre katma değersiz hareketler olarak değerlendirilirler. Bu tür kayıpların önlenebilmesi için, malzeme taşıma faaliyetleri, olabildiğince insan gücünden alınarak, konveyörlere, hareketli bantlara aktarılmalı, robotik sistemden faydalanmalı veya üretim için gerekli olan malzemelerin tamamı üretim hazırlık planlanması aşamasında üretimin yapılacağı yerde hazır edilmelidir.

Üretim hareket kayıpları giderilebilmesi Spagetti Diyagramında değerlendirilebilir. Bu diyagram çizilirken üretim akışı boyunca operatörün yapmış olduğu tüm hareketler kaydedilir, kayıplara sebep olacak gereksiz operatör hareketleri belirlenerek 5S, ergonomik şartların düzenlenmesi gibi yöntemlerle gereksiz hareketler ortadan kaldırılır [19].

2.8.11 Hat Organizasyonu Kayıpları

Eliyahu M. Goldratt'ın Amaç kitabında ortaya koyduğu üzere her üretim sisteminin hızını belirleyen bir kısıt vardır. Sistemin hızını o sistemin kısıtı olan darboğaz süreç belirler [20]. Hat organizasyon kayıpları hat dengesinin bozulması nedeniyle tüm işlerin en yavaş tempoya düşmesi anlamına gelmektedir. Hattın ürünün üretim sürecine göre optimum dengelenememesi, eksik ya da fazla operatörle çalışılması gibi kayıplar bu gruba girer. Yeni bir ürün devreye alınırken ya da yeni bir çalışanın işe başladığında oluşan öğrenme eğrisi kayıpları da üretim hareket kaybı olarak değerlendirilir. Bu kaybın azaltılması tüm hattaki operasyonların sürelerinin eşit hale getirilmesi ile mümkündür.

2.8.12 Lojistik Kayıpları

Üretim elemanlarının yapmak zorunda kaldığı değer yaratmayan standart işinin yanında, malzeme getirip götürme, araç gereç arama, makinelerdeki takılmaları giderme, kaldırma, indirme, sürükleme, parça temizleme, hava tutma vb. faaliyetlerine ilişkin kayıplardır. Değer yaratmayan her türlü faaliyete harcanan işgücü insan kaynağımızın israfı demektir [17].

2.8.13 Ölçme ve Ayar Kayıpları

Sıklıkla yapılan gereksiz ölçme, tartım, ayarlar ve kalibrasyon nedeniyle meydana gelen kayıplardır. Üretimin istenilen kalite standartlarında gerçekleşmediği hallerde kusurlu üretimi engellemek amacıyla, operatörlere yaptıkları işleri sık sık kontrol etme talimatı verilir. Ancak gereksiz şekilde abartı olarak yapılan bu kontrollerin hiçbir katma değeri olmayacak ve bunlarla geçen süreler kayıtlara "Ölçme ve Ayar Kayıpları" olarak geçecektir. Gereksiz yere yapılan ölçüm ve kalibre işlemlerinin verimliliğe olan olumsuz etkilerinin önüne geçilebilmesi için sürekli iyileştirme çalışmaları ile gereksiz veya sıklıkla yapılan ölçüm ve kalibre işlemleri bir plan doğrultusunda yeniden düzenlenebilir. Bu düzeltici işlemleri ile gereksiz işgücünün önüne geçilerek ekipman verimliliğinin artışına, değer yaratmayan kayıpların önlenmesine sebep olacaktır.

2.8.14 Yararlanılmayan Ekipman-Kalıp-Aparat Kayıpları

Belirli tipteki ürünleri üretmek üzere satın alınmış makinalarda söz konusu ürünlerin demode olması veya ihtiyaç kalmaması nedeni ile ömürlerini tamamlamamış olsalar dahi sadece bunları üretebilen makina ve teçhizata ihtiyaç kalmayacaktır. Ancak makina veya teçhizatı almadan önce yapmış olduğumuz hesaplamalarda sanki bu tür kayıpların meydana gelmeyecekmiş gibi ekipmanı ömrünün sonuna kadar çalıştıracak şekilde kabul ederiz. Dolayısıyla ömrünü tamamlamadan devre dışı kalan ekipmanlar bizim için pahalı birer kayıplardır. Bu tür kayıplarla karşılaşmamak için operasyonlarımızda, genel amaçlı makinaların tercih edilmesi en doğru yoldur.

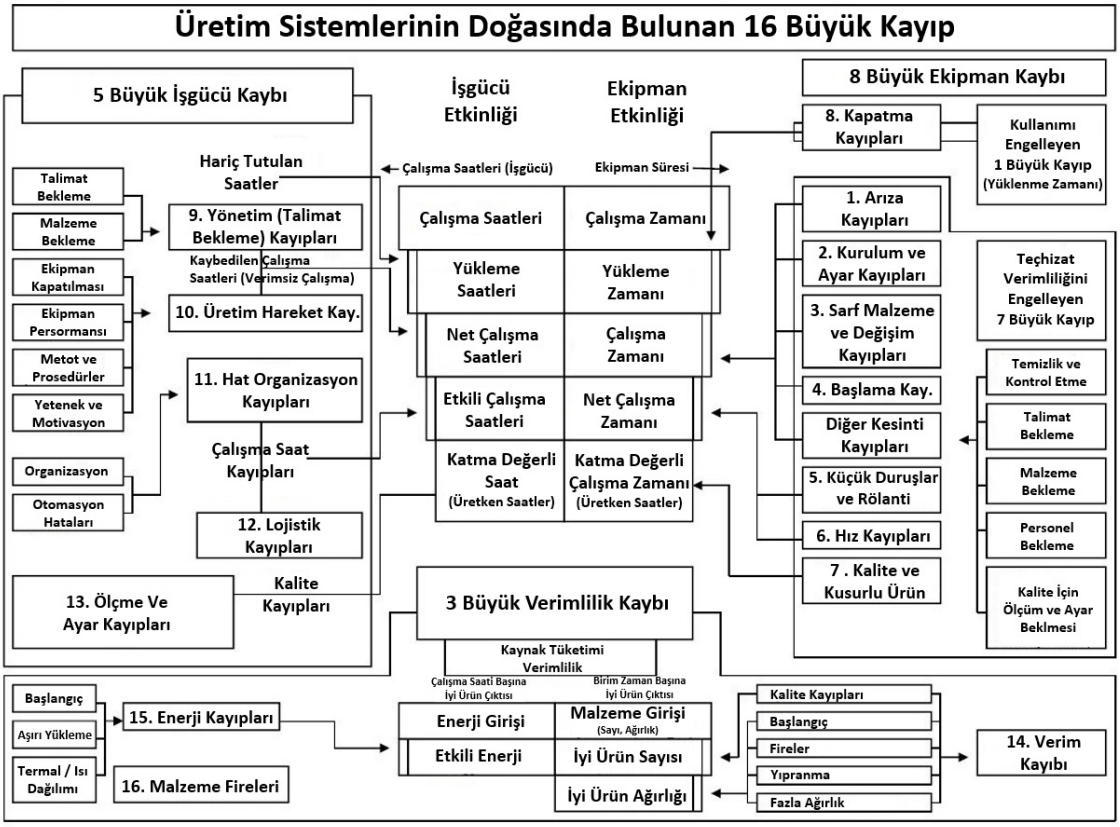
2.8.15 Enerji Kayıpları

Hatalı üretim, gereksiz taşıma, yönetim kaynaklı duruşlar, başlama bitiş kaynaklı duruşlar, yönetim kaynaklı duruşlar gibi durumlarda boşa kullanılmış enerji, gereksiz yere açık bırakılan makineler ve gereksiz aydınlatmada harcanılan enerji bu kayıp türüne girmektedir. İşletme genelinde veya makina bazında üretim yapılmadığı, üretime yönelik olmayan zaman fazladan harcanan ısı, ışık, elektrik, basınçlı hava ve suyun getirdiği ekstra maliyettir [4].

2.8.16 Malzeme Kayıpları-Fireler / Zayiat

Üretime giren malzemelerin tamamı ürüne dönüşmüyor bir kısmı üretim prosesleri gereği fire olarak ayrılmaktadır. Hatalı olarak üretilen ürünler ile meydana gelen firelerin geri dönüşümü imkansız halde ise bunlar satın alırken ödediğimiz değerin çok altında bir bedelle satılabilen hurdaya veya hiç bir bedeli olmayan atık durumuna dönüşmektedir.

Malzeme kayıpları ve fireleri yönetemezsek bu şekilde meydana gelen kayıplar pahalı kayıplara sebep olabilirler. Hatalı üretim nedeniyle atılan, hurdaya çıkan malzemelerin (kırık parçalar, yarı mamuller, ham madde, malzemeler, atılan veya yenilenen ambalaj malzemeleri v.s.) maliyet kaybıdır [17].



Şekil 2.6: 16 büyük kayıp [17].

2.9 TPM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İşletmelerde uygulamaya konulan TPM çalışmalarının sonuçlarını ve başarılarını ölçülebilen veya ölçülemeyen sonuçları ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Ölçülebilen sonuçlar bizlere analiz ve grafiklerde kullanılmak üzere çok değerli ham veriler sunmaktadır. Bu ham verilerin işlenmesi ile ekipmanların, makinaların ve üretim hatlarının sağlık durumları ve gelecekteki durumları hakkında bilgi sahibi olabiliriz. Elde ettiğimiz sayısal değerlerin işlenmesi ile ekipmanlara ve sistemlerine ait KPI (Key Performance Indicators), MTTR (Mean Time Between Failure), MTBF (Mean Time Between Failure), OEE (Overall Equipment Effectiveness) grafiklerini hazırlayabiliriz.

TPM ‘in Ölçülebilen Kazanımları:

a) Ekipman arıza oranlarının her geçen gün azalması,
b) Ekipman verimliliklerinin artması,
c) Planlı bakımların etkinliğinin arttırılması,
d) Sıfır arıza, sıfır hata ve sıfır kazaya ulaşma,
e) Sürekli iyileştirmeler yapılarak bakım ve arıza maliyetlerinin düşürülmesi,
f) 16 büyük kayıbın tespit edilmesi ve mümkün olduğu kadar ortadan kaldırılarak işgücü, ekipman, malzeme ve maliyetlerde kar yapılması ve
g) Rekabette artış olarak gösterilmektedir.

TPM ‘in ölçülemeyen kazançlarını incelediğimizde daha soyut bir kavram olarak genelde çalışanların davranışlarında meydana gelebilecek olumlu davranış farklılığını ve bunların zamanla alışkanlık haline getirildiğini gözlemleyebiliriz.

TPM ’in Ölçülemeyen Kazanımları:

a) Otonom bakım çalışmalarının bir sonucu olarak operatörler makinalarına sahip çıkmaya başlaması,
b) Sıfır Kusur, Sıfır Arıza, Sıfır Kaza inancının giderek yaygınlaşması,
c) Çalışma ortamlarının daha temiz, daha düzenli bir hale gelmesi,
d) Çevre farkındalığı,
e) Bölümler arası işbirliğinin artması,
f) Personel güçlendirme faaliyetleri ile özellikle mavi yaka personel arasından ekip lideri ve takım liderlerinin belirlenmesi,
g) Daha iyi bir çalışma ortamı,
h) Bilgi paylaşımı ve aktarımı yaygınlaşması,
i) Değişime olan direncin kalkması,
j) Taleplere hızlı cevap verme ve
k) Disiplin.

3. BAKIM STRATEJİLERİ

Bakım kavramı ilk olarak düzeltici bakım olarak karşımıza çıkmıştır. Diğer bir adı arıza bakımı olan düzeltici bakım stratejisi arızalar meydana geldikten sonra yapılan bakım faaliyetini kapsamaktadır. Bu bakım tekniği ekipmanın arızaya geçmesinden sonra yapılan arıza giderici işlemlerde ekipmanda meydana gelen arızadan etkilenerek daha büyük arızalara yol açılmaması için uygulanan arıza tespiti, arıza giderme, düzeltici işlemler ve ayar gibi işlemleri kapsar. Ancak bu bakım metodunun çok maliyetli olması, arızaların beklenmedik bir anda karşımıza çıkması, gereğinden fazla malzeme ve işgücü kayıplarına sebep olması ve ekipman verimliliğin ciddi boyutlarda düşmesi gibi olumsuzluklar nedenleri ile bu bakım tekniği zamanla yerini planlı bakıma bırakmıştır.

Planlı bakım stratejisi; periyodik bakım, önleyici bakım ve kestirimci bakım olarak üzere üçe ayrılmaktadır. Planlı bakım uygulamaları ekipmanların ve makinaların güvenilirlik ve sağlamlığını en düşük maliyetle sürdürmeyi amaçlar. Diğer bir tanımla planlı bakım, üretim hatlarının, ekipman ve makinaların belirlenmiş toleranslar arasında tutmayı, işlevsel özelliklerinin devamlılığını amaçlayan bir politikadır [21].

3.1 PLANLI VE PLANSIZ BAKIM STRATEJİLERİ

Bakım stratejilerini incelediğimizde en başta planlı ve plansız bakım olarak iki ana başlık altına ayırmamız mümkündür. Plansız ve planlı bakım modellerinden plansız bakım genelde küçük işletmeler tarafından tercih edilen maliyeti düşük ancak yüksek riskli bir bakım modelidir. Plansız bakımın uygulanmasındaki sebepler bakım-onarım maliyetlerinin düşük olması, daha az malzeme stoku ve stok maliyeti, düşük yedek parça giderleri ve daha az işgücüne ihtiyaç duyulmasıdır. Ancak işletmede arıza zamanı bakım yapıldığından hiç beklenmedik bir anda arıza ile karşılaşıldığında çok ciddi kayıplara sebep olmaktadırlar. Bu beklenmeyen arızaları maddi kayıpların yanı sıra personelin yaralanmasına ve ölümü gibi çok daha ciddi sonuçlara neden olduğu bilinmektedir. Arızi bakım olarak da bilinen bu bakım türünde maliyet, üretim ve işgücü kaybı oldukça yüksektir, işletmeler çok büyük riskleri ve sonuçlarını kabul etmek zorundadır. Ancak bu bakım türü çok kabul görmeyip zamanla yerini planlı bakıma bırakmıştır.

Makina, ekipman ve üretim hatlarında beklenmedik arızalar ile kayıplara ve duruşlara tahammülü olmayan, bakım stratejilerine daha bilinçli yaklaşan, sıfır arıza ve sıfır kayıp hedefleri olan işletmeler tarafından kabul etmesi gereken şüphesiz planlı bakım uygulamalarıdır. Planlı bakım; makina, ekipman ve üretim hatlarının olası arızalardan arındırılarak ekipmanların kullanım ömür süresi içerisinde arıza yapmadan verimli bir şekilde çalışmasının sağlanması şeklinde tanımlanmaktadır.

3.2 PLANSIZ BAKIM

İşletmede yer alan tesislerin, tesisatların, makine ve araçların arıza yapması durumunda, söz konusu arızanın tespit edilmesi, arıza nedeni parçanın değiştirilmesi ve uygun ayarların yapılması faaliyetlerine arıza adı verilir. Plansız bakım diğer bir deyişle düzeltici bakım temelde arıza yapana kadar kullanılması mantığına dayanan bir bakım tekniğidir. Bu bakım türünün amacı; Arıza yapana kadar ekipman kullanılır, arızalandıktan sonra teknik personelin bilgi ve becerisi mertebesinde tamir edilme yoluna gidilir. Meydana gelen arızalar bakım personelin tamir edemeyeceği kadar büyük boyutlarda ise ekipman veya makina servisi ile görüşülerek servis personelinden destek istenilir. Arızanın başlangıcından ekipmanın faaliyetine kadar geçen süreye baktığımızda arızanın büyüklülüğüne göre uzayabilmektedir. Ekipmanların arızada geçen süresi boyunca ciddi üretim ve enerji kayıpları görülecektir. Bu kayıplar planlı bakım uygulamaları ile kıyaslandığında arızi bakımın daha fazla işgücü, zaman ve maliyet kaybına sebep olduğu görülecektir. Plansız bakım arıza meydana geldikten sonra yapılan düzeltici işlemleri kapsamaktadır. Hatta arıza durumunda tetikleyebilecek başka arızaların farkına varılamayacağı nedeni ile sonrasında bu tip arızaların daha büyük arızalara ve duruşlara neden olduğu görülmektedir [22]. TPM ‘in sıfır arıza felsefesinden yola çıkarsak arıza işlemlerinin mümkün olduğunca az hatta hiç olmaması hedeflenmelidir.

Diğer bir tanımla plansız bakım çok maliyetli ve riskli bakım yapma yöntemi olup, her an çıkabilecek arızalara reaksiyon göstermeyi kendine görev edinmiş bir bakım anlayışıdır. Bu bakım tekniğinin en önemli sakıncası, arızanın ne zaman ortaya çıkacağı belirsizliği nedeni ile gerçek bir üretim planı yapılmasına izin vermemesidir [23].

Plansız bakım sürecinde:

a) Üretim veya çalışmanın her aşamasında arıza çıkabilir,
b) Problemlerin gelmesi beklenir,
c) Plansız ve uzun süreli duruşlar görülür, bu duruşlar üretimi olumsuz etkiler,
d) Yedek parça ve tedarik maliyetleri yüksektir,
e) Arıza giderme çalışmaları nedeni ile fazla mesai yapılır,
f) İmalat ve bakım kaynakları israf edilir,
g) Bu bakım modelinin yönetimi zor ve streslidir,
h) Gerektiğinden fazla ve plansız işgücü gerektirir,
i) Arıza nedeni ile enerji kayıpları meydana gelir ve
j) İş kazaları ile yaralanma ve can kaybına sebebiyet verebilir.

Arıza kavramı çok büyük kayıplara sebep olabildiği gibi prestij kaybına da sebep olabilir. Kullanmış olduğunuz bir makinanın beklenmedik bir anda arıza vermesi ve bunu tekrarlaması durumunda kullanıcıların tutumlarını olumsuz yönde etkiler. Bazı hallerde bir arızanın bedeli çok ağır ödenebilir. Başta havacılık ve uzay sektörü olmak üzere tehlikeli iş alanlarına yönelik sektörlerde meydana gelebilecek arızaların telafisi bile söz konusu olamaz.

İnsan hayatı yönünden değerlendirmek gerekirse çok tehlikeli sektörlerde meydana gelebilecek kazaların en iyimser sonuçları personel yaralanması olacak, karşılaşılması istenilmeyen en kötü tablo ise personelin ölümüyle sonuçlanması olacaktır. Bu üzücü sonuçlar ile karşılaşmamak için arızaların henüz başlangıç aşamasında tespit edilmesi çok önemlidir. Bu nedenle planlı bakımların çok büyük önemi bulunmaktadır. Arızalar ile uğraşmaya tahammülü olmayan işletmeler mutlaka planlı bakım teknikleri, özellikle kestirimci bakım metotlarına geçiş yapmaları gerekmektedir.

3.3 PLANLI BAKIM

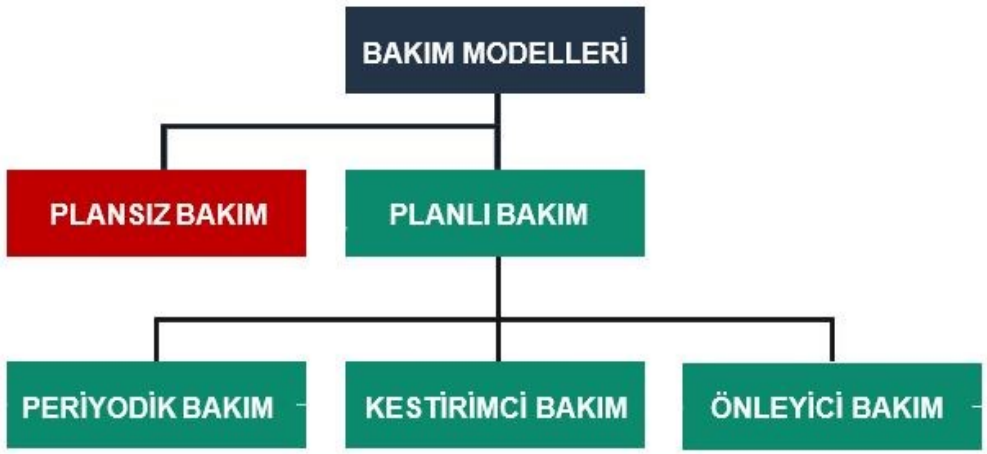
Planlı bakımların yapılmasının amacı arızaların henüz oluşma aşamasındayken tespit edilmesi ve ekipmanların arıza yapmadan çalışmalarının sağlanmasıdır. Zaten %100 ekipman verimliliği, sıfır arıza, sıfır duruş, düşük MTTR değeri ve MTBF aralığını uzaması gibi kavramlar ne kadar önemli ise planlı bakım terimleri de o kadar önemlidir. Planlı bakımlar ile ekipmanların verimlilik durumları en üst seviyelere çıkarılabilmesi ekipmanların mutlaka alt sistemleri dahil tüm parçalarının kontrol altında tutulması gerekir. Parça ömürleri arttırıldıktan ve parça ömürleri konusunda hassasiyet yakalandıktan sonra planlı bakım faaliyetleri daha iyi sonuç vermeye başlayacaktır.

Tablo 3.1: Planlı bakımın uygulanması.

ADIMLAR	FAALİYETLER
Mevcut durum analizi ve ekipmanın sınıflandırılması	a. Ekipman envanter listesi çıkartılmaktadır. b. Ekipmanlar sınıflara ayrılmaktadır. Ekipmanlar için A, B, C sınıflandırması yapılmaktadır. Bu sınıflar ekipmanda oluşabilecek olası hatanın etki düzeyine göre belirlenmektedir. Majör hata oluşturabilecek ekipman A, acil hata oluşturabilecek ekipman B, minör hata oluşturabilecek ekipman C sınıfıdır. Böylelikle hatanın bir daha meydana gelmemesi için önlem alınmakta ve benzer hataların oluşması engellenmektedir.
Otonom bakım desteğinin alınması	a. Otonom bakımın desteği ile ekipmanın temel koşulları oluşturulmaktadır. b. Ekipmanın bozulmuş kısımları ayrılmakta ve kötüye gidiş engellemektedir.
Bakım veri toplama sisteminin kurulması	a. Yedek parça ve teknik kısımların kontrolü için bir sistem kurulmaktadır. b. Ekipman hatası verileri yönetim sistemi kurulmaktadır. c. Ekipman bakım yönetim sistemi ve ekipman bütçe yönetim sistemi kurulmaktadır.
Zamana dayalı bakım sisteminin kurulması	a. Ekipman ömrünün belirlenerek, yenilenme zamanlarının standartlarının oluşturulmasıdır. b. Arıza analizleri yapılmaktadır.
Duruma dayalı bakım sisteminin kurulması	a. Ekipmanların fiziksel parametrelerinin tanımlanmasıdır. Bu aşamada titreşim ve yağ analizleri yapılmaktadır.
Planlı bakım sisteminin değerlendirmesi	a. Fayda-maliyet analizleri yapılmaktadır. b. Ekipmanın güvenilirliğinin değerlendirilmesidir (MTBF, küçük duruşlar). c. Ekipmanda bakım sürdürebilirliğinin değerlendirilmesidir (MTTR, önleyici bakım oranı).

Planlı bakım altyapısı olan bir bakım yönetim sistemi, üretim işletmeleri için vazgeçilmez bir gerekliliktir. Arızalara reaksiyon göstererek yönetilen bakım yönetimi anlayışından, proaktif bakım moduna geçildiğinde şu faydalar görülür:

a) Maksimum kullanılabilirlik ve yüksek verimlili,
b) Beklenmeyen arızaların önceden öngörülmesi,
c) Ekipmanların yaşam sürelerinin uzatılması,
d) Hızlı setuplar,
e) Düşük bakım maliyetleri ve
f) Bakım, mühendislik ve üretim birimleri arasından koordinasyon ve takım çalışmasının gelişmesi.



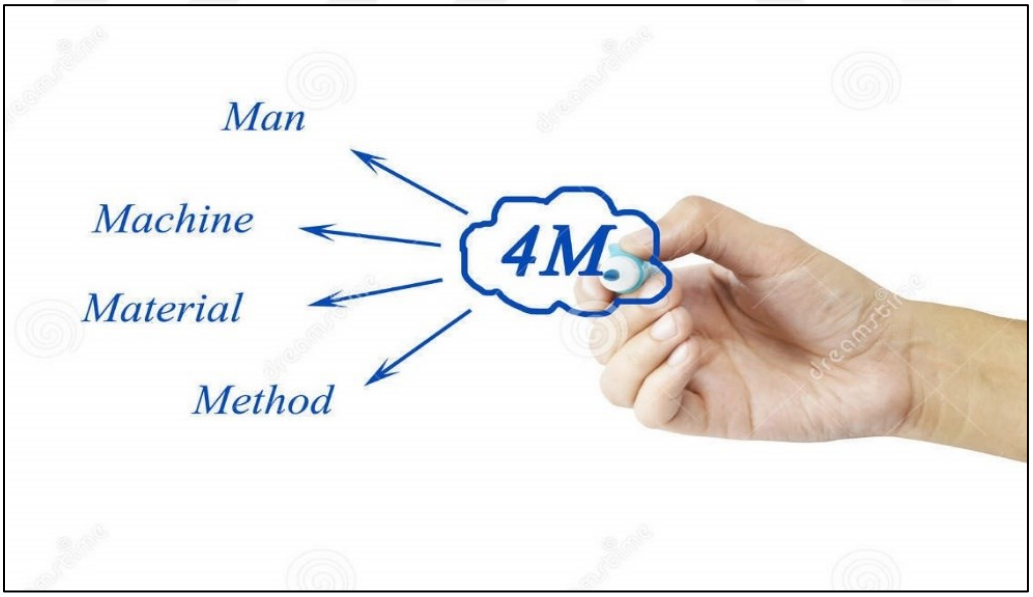
Şekil 3.1: Planlı bakım şeması.

3.3.1 Periyodik Bakım

Ekipman, makina ve üretim hatlarının kullanım ömürlerinin uzatılması, verimliliğinin yüksek olması, plansız duruşların azaltılmasını hedefleyen zaman bazlı tekrarlı bir örüntü içerisinde gerçekleşen filtre, yağ, parça değişimi ile kontrollara dayalı bir planlı bir bakım türüdür. Bu bakım yöntemde arızaların çıkması beklenmemekte olası arıza ihtimallerinin önüne geçilmektedir.

Bu uygulamadaki amacımız periyodik olarak yapılan bakım neticesinde olası arızaların önüne geçmektir. Planlama ve bakım ekibinin tecrübeleri, ekipmanların geçmişteki performansı, benzer ekipmanın referans alınması, ekipmanlar ve makinaların çalışma şartlarının zorluğu, üretici firmalardan alınan bakım ve kullanım kitapları, ekipmanlardaki malzemelerin kullanım ömürleri, arıza ve verimlilik analizleri ile MTTR ile MTBF bilgilerinin tamamı değerlendirilerek, makinenin hangi zaman aralıklarında durdurularak bakıma alınacağı periyotlar belirlenmiştir. Periyodik bakım stratejileri yine üretici firmaların vermiş olduğu talimatlara sadık kalınarak saat bazlı veya zaman bazlı olarak planlanmaktadırlar.

Doğru bir periyodik bakım uygulamasından bahsedebilmemiz için kusursuz bir planlamanın ve programlamanın olması gerekmektedir. Periyodik bakımın bileşenleri ingilizceden dilimize geçen 4M (Man, Machine, Material, Method) karşılığı olan işgücü, makina/ ekipman, malzeme/yedek parça ve bakım metodunun programlanan tarihte bir araya getirilmesi gerekmektedir. Periyodik bakımların çok daha iyi anlaşılabilmesi için 4M bileşenlerinin detaylarına bakmakta fayda görülmektedir.



Şekil 3.2: Bakımın 4M konsepti.

3.3.1.1 Metot

Periyodik bakım paketlerinin hazırlanmasının birinci aşaması ve en önemlisi metot kısmıdır. Çünkü gerçekleştirmek istenilen periyodik bakımın çok kapsamlı bir prosedürün hazırlanması ve bunların bir usul dahilinde uygulanmasını içerir. Periyodik bakım hazırlık çalışmasının ilk aşaması envantere katılan ekipmanın üretici firması tarafından yayınlanan Bakım Kataloğu, Operatör ve Kullanım Kataloğu, Parça Kataloğu gibi standard manuellerin alınması ile başlar. İkinci aşamasında ise yine imalatçı firma ile yapılan görüşmeler sonucu hazırlanmış olan bakım tabloları, bakım için gerekli olacak yedek parça ve sarf malzeme listeleri ile yağlama tabloları da temin edilir. Yine ekipmanda en sık kullanılan yedek parçaların kullanım ömürleri ile tavsiye listeleri istenilir. Ekipmanın katalogları, yağlama tabloları ve parça tavsiye listeleri ile taslak bakım bakım maddeleri ve bakımda kullanılacak olan yedek parça ve sarf malzeme bileşenleri hazırlanır. Hazırlanan taslak bakım maddeleri ilgili süpervizör ve takım liderlerinin kontrollarından geçtikten sonra uygulamaya başlanır. Bakım uygulaması anında görülen aksaklıklar, zaman etüdü ve iş uygulama etüdü sonucu elde edilen tüm veriler derlenerek planlı bakım maddelerinin son şekli verilmiş olur. Süreç devam ettikçe üretici firma tarafından yayınlanan bültenler, uygulayıcılar tarafından yapılan öneriler, TPM ve kestirimci bakım kanalından alınan sürekli geliştirme ve Kaizen önerileri ile bakım prosedürlerinin güncel tutulması sağlanır.

Periyodik bakım maddeleri zaman veya saat bazlı olarak uygulanır. Zaman bazlı olarak değerlendirildiğinde haftalık, iki haftalık, aylık, yıllık gibi periyotlar belirlenir. Saat bazında ise sektörün kabul etmiş olduğu saat paketlerinde 50, 100, 250, 1000, 2000, 4000, 8000 saat ve katları olacak şekilde bir örüntüye dayalı periyotlarda ekipmanlar bakıma alınırlar. Periyodik bakım sürecinin çalışmasını kusursuz hale getirmek, insan faktörü ve hatalarını ortadan kaldırmak için SAP ve benzeri programları kullanan işletmelerde periyodun otomatik olarak çalışmasının sağlanması için hazırlanan bakım maddelerinin bilgisayar tabanlı bakım programlarında otomatik olarak çalıştırılır. Otomatik periyodik bakım sürecinde saati veya günü yaklaşan bakımlara ait iş emri, gerekli olan sarf malzeme, değişim parçaları ile kullanılacak yağların istekleri tedarik süreleri dikkate alınarak otomatik olarak açılır.

3.3.1.2 Makine

Periyodik Bakımın 4M bileşenlerinden biri olan makine (machine), bakıma alınacak olan makina/ekipman ve üretim hatlarını temsil eder. Bu aşamasında ekipmanların hangi bakım periyodunda, ne zaman, nerede bakıma alınacağı programlanır.

3.3.1.3 Malzeme

Periyodik bakımın uygulanmasında Malzeme (Material) bileşeni periyodik bakımlarda bakım için gerekli olacak filtre, conta, civata, somun, pul, yağ, hidrolik gibi sarf malzemeler ile yedek parçaların eksiksiz olarak önceden bakımı yapılacak olan alanda hazır olması sağlanarak kullanılmasını kapsayan bir süreci oluşturmaktadır. Bakımlarda kullanılacak parça ve yağların üretici firma tarafından hazırlanan bakım kılavuzlarında periyotlarında değişimi tavsiye edilen orijinal malzemelerdir. Periyodik bakımların aksatılmaması için ekipmanların alınacakları bakım tipine göre önceden malzeme kullanım miktarları tespit edilir ve bu malzemelerin bakımlarda hazır olması sağlanır.

Yine ekipman etkinliğinden, sıfır arızadan bahsedebilmek için malzeme kalitesine de çok önem verilmesi gerekmektedir. Bakımlarda kullanılacak sarf malzemeler ve yedek parçalar üretici firmanın orjinal parçaları ile tavsiye ettiği ürünlerden tercih edilmelidir. Bakım maliyetlerinin düşürülmesi amacı ile firmalar yan sanayi, tamir görmüş veya çıkma malzemeler tercih etme yoluna gidebilirler ancak ekipman verimliliği ve kullanım ömrü hesaplandığında garantisi olmayan bir tercih olacaktır.

3.3.1.4 Adam saat

İyi bir bakım planlanması için bakım metotunun, ekipmanın, yedek parça ve sarf malzemelerin ile bakımı gerçekleştirecek olan personelin de aynı zamana planlanması gerekmektedir. Ekipman ve malzemenin planlandığı ancak bakım uygulayacak olan işgücünün yeterli olmaması durumunda etkin bir bakımdan söz edilemez.

3.3.2 Kestirimci Bakım

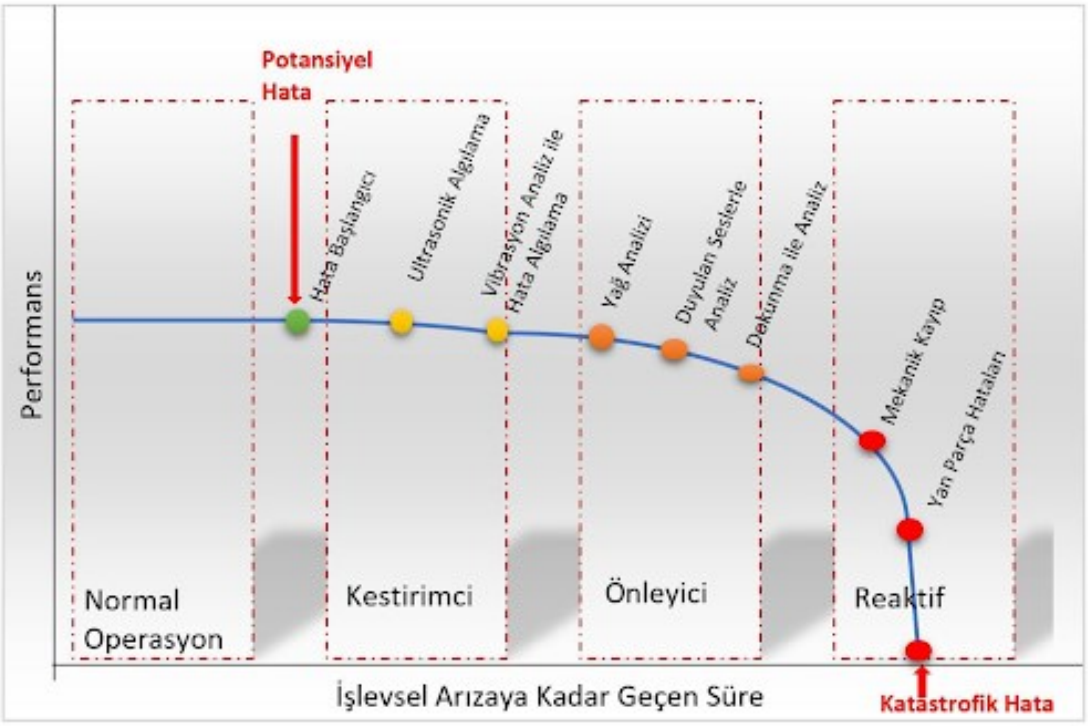
Kestirimci Bakım bir makinanın arıza yapma ihtimalini, hangi süre içerisinde arıza yapacağını, ekipman sağlığının ne durumda olduğunu, ekipmanın kalan kullanım ömrü hakkında bilgi vermek amacıyla ölçme, analiz, deney ve gözlemlere dayalı bir kontrol ve bunun sonuçlarına dayalı bir bakım stratejisidir.

Kestirimci bakım, ekipmandan alınan verilerin işlenmesine bağlı olarak ekipmanların arıza riskini azaltarak, verimliliğini ve kullanım ömrünü artırmayı amaçlar [24]. Yapılan çalışmalar ile problemler önceden tespit edilerek daha pahalı ve büyük arızalara dönüşmeden düzeltilirler. Özellikle döner ve hareketli sistemlere sahip tüm makina, ekipman ve üretim hatlarının çalışma toleransları arasındaki değerler baz alınarak belirli ölçme, analiz ve değerlendirme teknikleri ile yapılan, arıza oluşumunu engelleyen öngörmeli bir bakım uygulamasıdır.

Kestirimci Bakımın diğer bakım tekniklerine göre en büyük üstünlüğü ölçümler ile makinadan alınan verilerin değerlendirilmesi üretimi durdurmaksızın arızaları öncesinden planlanarak uygulanmasıdır. Kestirimci bakım sisteminin geçmişine bakıldığında duyu organlarımız ile elde edilen nesnel bilgilerin değerlendirilmesi ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak veri toplama ve değerlendirme işlemleri bu çalışmaları yapacak personelin tecrübeleri ve duyu organlarınının kapasiteleri kadar sınırlı kalmaktaydı. Gelişen teknoloji ve dijitalleşme ile arıza verilerinin toplanması zamanla kendini insan kapasitesinin dışında kalan algılayıcılar ile yapılan uygulamalara bırakmıştır [25]. Kestirimci bakım planlamasına esas teşkil eden ölçümler ve temel izleme çalışmaları; titreşim, ısı, yağ analizi ve elektrik motor akım izleme sistem parametrelerinin izlenmesidir. Kestirimci bakımın veri toplama aşamasında ses ve vibrasyon izlemesi en sık uygulanan yöntemdir. İzlemeler ile elde edilen bilgiler değerlendirilip analiz edilebilir ve arıza ile ilgili kesin tanı konulabilir [26].

3.3.3 Önleyici Bakım

Önleyici bakımın amacı makinalarda meydana gelen arızalarının tespit edilmesi değil periyodik bakımı destekleyici nitelikte olan belirlenmiş bir periyota dayalı izleme ve kontrol çalışmalarıdır. Çalışılan bölgenin coğrafik özellikleri, meteorolojik şartlar, çalışılan lokasyonlar, yapılan işin zorluk derecesi, operator tecrübesi, malzeme ve ekipmanların kalitesi gibi değişkenlere bağlı olarak üretici firma tavsiyeleri ve tecrübeler ile belirlenmiş arıza verebilecek lokasyonların kontrol ve takip edilmesi ile arızaların arızaların ortaya çıkma ihtimalinin ortadan kaldırılmasına olanak tanıyan bir bakım metotudur. Genelde kestirimci bakım ile karıştırılan önleyici bakım makina ve tesislerin donanımların tasarımında ve işletme şartlarında yapılacak olan değişiklikler, aşınma değerlerinin takibi, test ve kontroller gibi faaliyetlerle arızaların sebepleri ortadan kaldırılabilir. Kestirimci bakım ile önleyici bakım karşılaştırıldığında, kestirimci bakım sensör ve izleme cihazı tabanlı elde edilen verilerin analizleri ile ekipmanın durumunu ve gelecekte ne olacağı hakkında bizlere bilgi verirken, önleyici bakım daha çok operator ve bakım personeli tarafından gerçekleştirilen kontrol, gözlem ve ölçümlere dayanan periyodik bakıma ilave bir bakım tekniğidir.



Şekil 3.3: Arıza evrelerinde kullanılan bakım teknikleri [27].

Önleyici bakım yine planlı bakımlarda olduğu gibi ekipmanların kullanım ömürlerini uzatmak, planlı bakım faaliyetlerinin haricinde ilave bakım tekniklerinin uygulanması ile arızaların etkilerini azaltmak için yapılan bakım stratejisidir. Örnek verilmesi gerekirse;

a) Personel ve yük kaldırıcı ekipmanların yük ve uygunluk testlerinin yapılması,
b) Boom ve gövde kaynak yerlerinin kontrolları,
c) Pim ve burç aşınma kontrolları,
d) Lastik aşınma takibi,
e) Kova aşınma takibinden oluşmaktadır,
f) Yağ analizi,
g) Tahribatsız Muayene / NDT (Non-destructive testing),
h) Duyulan ses ile analiz ve
i) Dokunma analizi,

3.3.4 Otonom Bakım

TPM ‘in kilit taşlarından biri olan otonom bakım ile operatörlerinde unutulmamış olduğu görülmekte olup bu bakım metotu ile bakım sistemine dahil etmiştir. Otonom bakım; ekipman, makina ve üretim hatlarının işletilmesini sağlayan operatörlerin günlük bakım, küçük tamir ve kontrol faaliyetlerini bakım personelinden yardım almadan kendi başlarına gerçekleştirmesidir. Otonom bakımın en önemli amacı aslında ekipmanını kullanan operatörlerin ekipmanlarına sahip çıkma olanağı tanımasıdır. Bu sahiplenme operatörlerde makinenin sadece üretim anlamında değil, aynı zamanda çalışır durumda kalmasını sağlayacaktır. Makinenin gerek üretim gerekse bakım açısından ilk sorumlularının operatörler olduğunun, operatörler tarafından hissedilmesi süreçteki temel beklentilerden biridir. Operatörlerin bilhassa, yağlama, bakım ve arıza izleme faaliyetlerinde daha etkin olmaları amaçlanır [38]. Otonom bakımı gerçekleştirecek operatörlerden beklenen becerilerin kazandırılması için teknik eğitimlerin verilmesi gerekmektedir [10]. Otonom bakımın operatörlere önemli görevler; sistem çalışmasının kontrolü, periyodik kontroller, temizlik, sıkma, yağlama, küçük ayar değişiklikleri, basit tamirler ve anormal durumları fark ederek tedbir almak ve ilgili sorumlulara raporlamaktır [7].

Tablo 3.2: Otonom bakımın yedi adımı [10].

ADIM	TANIM	UYGULAMALAR
1	Veri toplama ve duruş takip sisteminin oluşturulması. Genel temizlik ve Kontrol	Duruş raporlarının kullanılması, makinaların temizlenmesi, kontrolü, civata ve somunların sıkılması, yağlama ve greslemenin yapılması.
2	Ulaşılması güç noktaların ve problem kaynaklarının ortadan kaldırılması	Birinci adımda yapılan işlerin kolaylıkla yapılır hale getirilmesi, ulaşılması zor veya yağlanması zor yerlere çareler bulunması.
3	Geçici temizlik, yağlama ve kontrol standartlarının oluşturulması	Temizleme ve kontrol, yağlama, sıkma işlemleri için "geçici" standartların hazırlanması ve geçici standartların yürürlüğe konması.
4	Teknik eğitimler ve genel kontroller	Makina üzerinde oluşan anormalliklerin görsel yoldan tespit edilip arızaya dönüşümünün engellenmesi için Tek Nokta Dersleri ve genel teknik eğitimlerin hazırlanarak uygulanması.
5	Otonom kontroller	Otonom kontroller için standart kontrol maddeleri belirlenir ve otonom kontroller yürütülür.
6	Standardizasyon	Temizleme ve kontrol, yağlama, sıkma, iş akışı, bilgi akışı, takım ve kalıp yönetimi faaliyetlerin yürütülmesinin bir standarta bağlanması
7	Otonom Bakım Yönetimi	Otonom bakımın uygulanması.

5S bölümünde önemini vurguladığımız temizlik faaliyetleri ya da rutin kontrollerde fark edilen uygunsuzluklar operatörler tarafından çeklistlerine kayıt edilerek ilgili birimlere ulaştırılması sağlanır. Kullanılacak olan ekipmanların operatörler tarafından temiz tutulmaları ile ekipman ve bölümleri daha net görülecek olup yağ, hidrolik, yakıt gibi sıvı kaçakları, hasar deformasyon gibi uygunsuzlukların ortaya çıkması sağlanacaktır. Bu şekilde arıza oluşmadan önce operatörler tarafından tespit edilip kayıt altına alınarak, arızanın ve plansız duruşun oluşması beklenmeksizin önlem alınmasına olanak tanıyacaktır. Bu bölümde dikkat edilmesi gereken bir konuda kirliliğin değerlendirilmesidir. Yapılan gözlem ve incelemelerde meydana gelen kirliliğin kaynaklarının belirlenmesi, kirliliğin anlık veya sürekli olup olmadığına karar verilir. Kirlilik sürekli meydana geliyor ise kirlilik kaynakları tespit edilerek kayıt altına alınır. Kök neden analizleri ile kirliliğin sebeplerinin bulunması ve kirliliği kaynağında çözmeye veya mümkün olduğu kadarı ile etkisinin azaltılması tedbirleri alınır. Bu çalışmaların kalıcı olması için periyodik olarak temizlik ve kontrolların yapılması gerekir.

Otonom bakım ile operatörlere yüklenen görevler iyileşme ve ilave aksiyonlar getirmelidir. Aksi halde otonom bakımın faydasından bahsedemeyiz. Bu tür durumlardan otonom bakım faaliyetleri tekrar gözden geçirilmeli olumlu sonuç alana kadar kısıtlar tespit edilip düzeltici işlemler yapılmalıdır. Bu çalışmada başarıdan bahsedebilmek için; otonom bakım sürelerinde azalma olması, gözlemlenen hataların çözümleniyor olması ve temizliğin zor olduğu alanlarda temizlik çalışmalarının basitleştirilmesi, ve tabiki ekipman verimlilik oranının yükselmesi ile arızada geçen sürelerinin azalması gözlemlenebilecek temel çıktılardır [17].

Operatörlerin otonom bakım sürecine dahil olabilmesi için operatörlük eğitimleri haricinde ayrıca teknik eğitimlerine planlanması gerekmektedir. Dahil edilecek olan teknik eğitimler ile otonom bakım çalışmalarını gerçekleştirecek operatörlere aşağıdaki temel yetkinliklerin kazandırılması gerekmektedir. Özetle operatörlerden beklenen yetenekler:

a) Rutin çalışmanın dışında meydana gelebilecek anormallikleri fark edebilecek bilgi ve tecrübeye sahip olması,
b) Tespit ettiği arızaları yorumlayabilecek ve tamir edebilecek yetenek sahip olması,
c) Ekipmanını daha verimli kullanabilecek metotlar geliştirebilmeli, verimlilik artışı için çalışma ve önerilerde bulunabilmeli,
d) Ekipmanını kullanırken çalışma şartlarına ve çalışılan ortama göre oluşabilecek her türlü emniyetsizliği önceden fark ederek emniyetsizliğe sebep olacak davranışlardan kaçınabilmesi ve
e) İnisiyatif alabilmesidir [7].

4. KESTİRİMCİ BAKIM

Kestirimci bakım diğer planlı bakım metotları ile kıyaslandığında analize dayalı ve erken uyarı özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Bu bakım yöntemi, makinelerin durumlarının düzenli olarak izlenmesine ve önemli değişikliklerin görülmesi durumunda, arıza meydana gelmeden planlanan bir duruş ile periyodik bakımlarda müdahale edilmesine olanak sağlar. Böylece ekipmanların plansız durması engellenerek, arızada kalma süreleri azalacak (MTTR), meydana gelebilecek arızalar arasındaki sürelerin (MTBF) artmasını ve etkin ekipman verimliliğinin sağlanmasına kaynak olacaktır. Bu hedeflere ulaşmak için bakım uygulamaları söz konusu olduğunda şüphesiz ki "Kestirimci Bakım" uygulanabilecek en doğru tekniklerden biridir [39].

4.1 KESTİRİMCİ BAKIMIN TANIMI

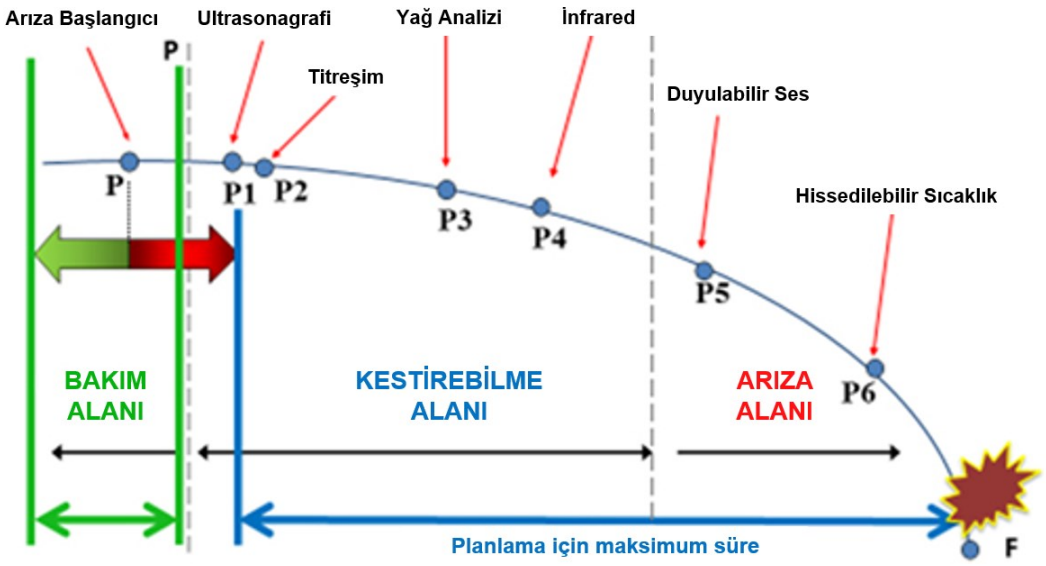
Kestirimci bakım; makinaların, ekipmanların ve üretim hatlarının durumlarının izlenerek elde verilerin analiz edilmesiyle arızasız çalışma ömürlerini, arıza çıkarma ihtimallerini ve ne kadar süre içerisinde arıza yapacağı tespit edilerek arıza çıkmadan önce zamanında önlem alınmasını kapsamaktadır. Bu bakım metotu ile ekipmanlar üretici firmalar tarafından belirlenmiş kriterler içerisinde takip edilir, bu tolerans değerlerinin dışına çıkmaya başladığı andan itibaren takip altına alınarak, gelecekte hangi arızaları verebileceğine karar verilir. Kestirimci bakımın iki temel amacı vardır, bunlardan birincisi ekipmanların vermesi gereken olası arızanın belirlenmesi, diğeri ise bu arızanın büyüyerek meydana gelebilecek daha ciddi arızalar hakkında önceden tedbirlerin alınmasıdır.

Günümüzün en popüler ve heyecan verici bakım metotlarından biri olan kestirimci bakım ekipmanların durumundaki parametrelerin değerlendirilmesi ile, arıza riskini arttırmadan makinelerin ve işlemlerin ömrünü optimize etmek için uygun görevleri yerine getirip getirmediğini ölçerek yapılan bakım türüdür [39]. Kestirimci bakım, makine ve ekipmanların çalışma durumlarını, ölçüm ve analizlerinin sonuçlarını değerlendiren, olumsuz bir durum varsa önlem alarak gerekli planlamaların yapılmasını sağlayan bir bakım türüdür [40].

Diğer bir tanımla kestirimci bakım; “Ekipmanların anlık parametrelerinin ölçülmesi, bilinen mühendislik ve tolerans limitleriyle karşılaştırılması, analiz edilmesi ve yorumlanması ile arızalara yol açabilecek sebeplerin önceden tespit edilerek ekonomik biçimde etkisiz hale getirilmesi ve düzeltmesi şeklindeki çalışmaların bütünü” olarak tanımlanır [41].

Kestirimci bakım yaklaşımında, çalışır durumdaki makinelerin durumlarını izleyerek, oluşabilecek muhtemel arızaları, analizler neticesinde yorumlanarak uygun zamanda ve stokları planlayıp mümkünse makinayı durdurmadan veya en az duruş süresi içerisinde arızaya müdehale ederek makinaların arızasız çalışmasını sağlamaktır. “Makinalar bizleri değil, bizler makinaları durdurmalıyız” prensibi ile hareket edilmelidir.

Aşağıdaki P-F Eğrisinde arızanın öncesi olan proaktif bakım alanı, kestirebilme alanı ve arıza alanı görülmektedir. Proaktif bakım alanı periyodik bakımların arızaların öncesinde yapıldığı gösterilmektedir. Bakım kalitesi, bakım metotu, bakım periyotları, işgücü yetkinliği, malzeme kalitesi, ortam koşullarının yetersiz olması gibi olumsuzluklar arızayı tetiklemektedir. P (Potansiyel Failure) sınırından sonra arıza sürecinde kestirimci bakım aşamasına geçilmiştir. Bu alan insanların duyu organları tarafından tespit edemediği ancak kestirimci bakım yöntemleri ile tespit edilebilen kestirilebilen alandır. İyi bir analiz ve değerlendirme ile arıza bu alanda tespit edilmelidir.

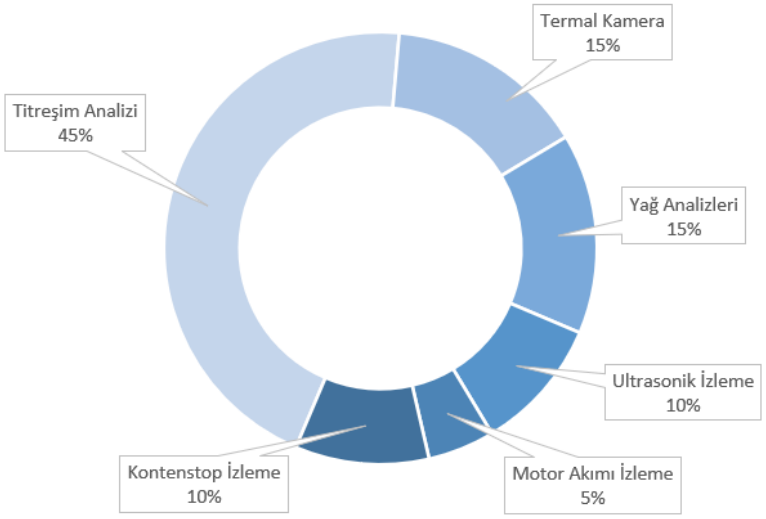


Şekil 4.1: P-F arıza eğrisi [27].

Kestirimci bakımın yapılmadığı veya başarısız olması halinde arıza yakalanamaz ise süreç bu sefer F (Failure) sınırından sonra arıza alanına geçilmiş olur. Artık bu alanda arıza kendini duyulabilir ses, göz ile tespit edilebilir, yüksek sıcaklık gibi duyu organlarına hitap edecek veya daha basit teknikler ile görülebilecek hale gelmiştir. Bu alanda da herhangi bir düzeltici işlemin yapılmaması durumunda artık kaçınılmaz son, yani arıza gerçekleşmiş olur.

İşletmelerde güvenilirlik ve sıfır arızadan bahsedebilmemiz için kestirimci bakım yaklaşımının çeşitli yöntemler kullanılmalıdır. Bakım ekibi ne kadar tecrübeli ve ön görülü olursa olsunlar en fazla duyu orgaları tarafından algılayabildikleri kadar arıza tespiti yapabilirler. Bu eşiğin altındaki ve çok daha hassas belirtileri yakalayıp tespitin yapılabilmesi ve yorumlanabilmesi için kestirimci bakım yöntemleri kullanılmaktadır [46]. İşletmeler aşağdaki bu yöntemlerin birini kullanabileceği gibi birkaçını da birlikte kullanarak kestirimci bakım programı oluşturulabilirler:

a) Ultrasonik İzleme,
b) Titreşim Analizi,
c) Yağ Analizleri,
d) Kızıl Ötesi Termografi /İnfrared izleme,
e) Motor Akımı İzleme ve
f) Kondenstop (buhar kapanı) İzleme.



Şekil 4.2: Kestirimci bakım yöntemlerinin tercih edilme oranları [55].

4.2 ULTRASONİK İZLEME

Ultrasonik ses tanım olarak insan kulağının duyma eşiğinin üzerindeki seslere verilen isimdir. İnsan kulağının duyma frekansı 20 Hz ile 20 kHz arasındadır. Genel olarak 16,5 kHz üzerindeki sesleri birçok insan duyamaz. Yine duyulabilir sınırdaki seslerin dalga boyu yaklaşık 1,9 cm ile 17 m arasında değişir. Ultrason cihazları ile yakalanan seslerin dalga boyu ise 0,3-1,6 cm arasında olup bu değerler insan kulağı tarafından maalesef duyulamaz [28]. İnsan kulağı tarafından duyulamayan frekansları algılamak için izleme cihazları tasarlanmıştır. Bu cihazlar çevredeki frekansları rahatlıkla tespit edebilir ve bir dizi elektronik filtreleme işleminden sonra, bu sesleri insan kulağı tarafından da duyulabilir hale getirilebilir. Ultrason izleme sistemlerinin kullanımını üstün kılan önemli bir etken de ses izlemesi yapabilmesi için sessiz bir ortama ihtiyaç duyulmamasıdır. İşletmelerde duyma eşiğinde olan yoğun gürültülü ortamdaki seslerin arasından çok düşük mikardaki ultrasonik sesleri algılayıp anlamlı verilere çevrilmesini sağlayarak bizlere ulaştırmaktadır.

Ultrason tekniğini durum izleme alanlarına kullanımı 40 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır [29]. Kestirimci bakım tekniklerinden biri olan ultrasonik izleme işletmelere önemli kazançlar sağlayan bir yöntemdir. Bu kestirimci bakım tekniği prensip olarak titreşim analizine benzeyen ilkeleri kullanır. Ultrasonik izleme ile üretim hatları, makina ve ekipmanlar tarafından üretilen sıra dışı gürültüler dinlenerek arızaların tespit edilmesine olanak tanır. Titreşim analizinin aksine ultrasonik daha yüksek frekansları izler [30].

Ultrasonik izleme ile basınçlı hava kaçakları, kondenstopların (buhar kapanı), rulmanların yağlama ve hasar durumları, tesisatlarda kalınlık ölçülmesi, elektriksel sistemlerde ark dinlenmesi ve korozyonun tespiti yapılabilir.

Ultrasonik yöntemle dinleme yapıldığında elektrik motorlarındaki koronalarının (sargı arkları) çatırdadığı, rulmanların sağlam ise hafif bir hışırtı sesi verirken bozulmaya başladığı andan itibaren patlama sesleri çıkardığı duyulabilir. Kayışlar, dişli kutuları ve pompalardaki arıza başlangıç belirtisi gıcırdama sesi ile olacaktır. Pompalarda iç aşınma meydana geliyorsa patlama sesleri ile kendini belli edecektir.

Havadaki ultrasonik sesleri dinleyen sensörler aracılığı ile hava kaçakları, vakum, buhar, azot ve bazı soğutucu gazları tespit ederken, temaslı cins sensör ile buhar kapanlarını dinleyip doğru olarak çalışıp çalışmadıklarını tespit edilmesinde önemli rol oynarlar. Ultrasonik izleme ile aşırı yağlama hatalarıda ortaya çıkarılabilir. Bu şekilde sadece eksik yağlama değil, aynı zamanda endüstride çok yaygın bir yanlış olan aşırı yağlama sorunu da belirlenmiş olur.

4.2.1 Basınçlı Hava Kaçakları

Basınçlı havanın kontrol altında tutulamaması işletmelerde önemli bir enerji kaynağının boşa harcanmasına neden olmaktadır. Üretilen basınçlı havanın %25 ile %35 'i kaçak değer olarak tespit edilmiştir [29]. Ayrıca kayıp enerji kaynağının maliyet değeride unutulmamalıdır. Basınçlı hava kaçağı olan yerlerde türbülans meydana gelir ve kuvvetli ultrasonik dalgalar yayar. Yayılan bu ultrasonik dalgalar çevre gürültüsünden farklı olarak ultrason algılayıcıları ile tespit edilirler. Uygulama sadece hava kaçaklarıyla sınırlı olmayıp, her türlü gaz kaçağı ultrason izlemeler ile tespit edilebilir [31].



Şekil 4.3: Ultrason izleme ile buhar kaçağı tespiti.

Taşınabilir bir ultrason sistemi kullanarak sadece basınçlı hava kaçaklarını değil aynı zamanda vakum, buhar ve nitrojen kaçaklarını ve ayrıca bazı soğutucu gazları bulmak mümkündür [29]. Bu tür kaçakların da basınçlı hava kaçakları kadar maliyetli olması nedeni ile vakum kaçaklarının basınçlı gaz sistemlerinde oldugu gibi ultrasonik metotlarla kontrol altında tutularak, arızaları önceden tespit edilerek giderilmelidir [31].

4.2.2 Rulmanların İzlenmesi

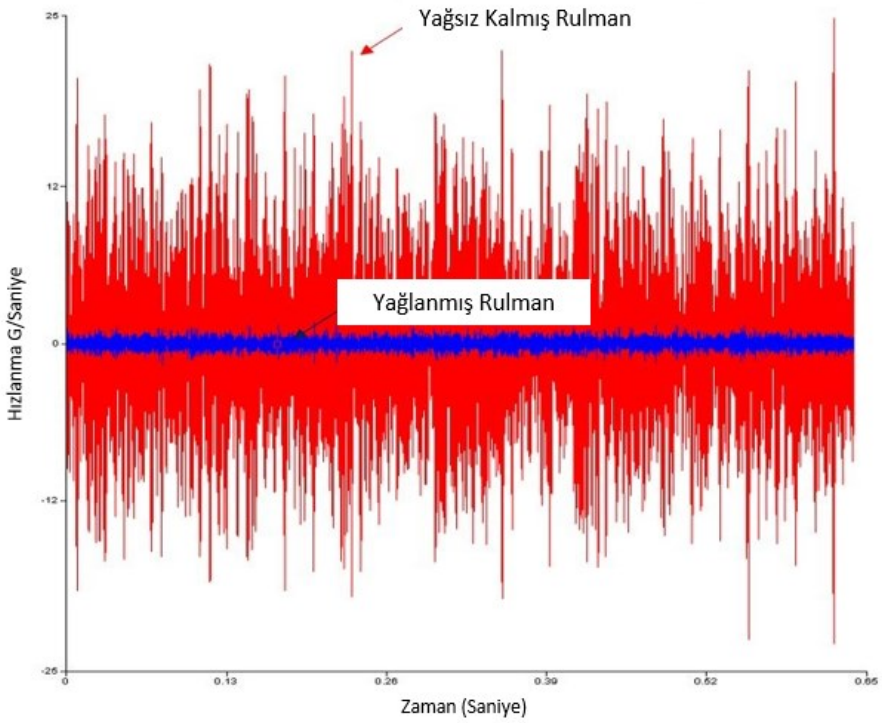
Makina elemanlarının içerisinde en kritik elemanlardan biri rulmanlardır. Rulman kaynaklı arızalarının tespit edilmesi, ikmal işlemleri, değiştirilme süreci ve faaliyetlerinin sağlanması çok büyük maliyetlere ve işgücü kayıplarına aynı zamanda ekipmanların uzun süreli duruşlarına sebep olmaktadır. Yapılan araştırmalara ve arıza kayıtlarının değerlendirilmesi sonucu yeni takılan rulmanların %30 'unun montaj hatası veya eksenel ayarsızlık yüzünden arızalandığı, kullanım ömürlerinin 2-5 kat arası azaldığı tespit edilmiştir. Yine rulmanların takıldığı tarihten itibaren ilk altı ay içerisinde arızalandıkları tespit edilmiştir [31]. Rulman bilye ve makaraları dönüşleri esnasında kafes, iç ve dış bilezikleri ile olan sürtünmeleri ile ultrasonik sesler çıkarırlar. Arızasız ve toleranslar içerisinde yağlanmış bir rulmanın yaydığı ultrasonik sesler hafif hışırtı halinde iken, az yağlama yapılmış veya yağsız kalmış bir rulmanda güçlü bir çıtırtı ve gıcırtı sesleri duyulur. Aşırı yağlanmış rulmanlardan ise hiç ses alınamaz. Rulmanlar arıza yapmaya başladığı andan itibaren oluşan hasarın büyüklüğüne ve arızanın seyirine göre tırmalama, tıkırdama ya da sıyrılma sesi gibi çesitli ultrasonik sesler yayarlar. Bu ultrasonik seslerin takibi ve değerlendirilmesi ile rulmanların sağlık durumlarını takip edebilir, elde ettiğimiz veriler ile ihtimali bulunan arızaları henüz başlangıç aşamasında tespit edebiliriz. NASA 'nın rulmanlar üzerine yapmış olduğu araştırmalara göre [33], bir önceki ölçüm ile karşılaştırıldığında 12dB'lik bir ses artışının rulman arızalarının başladığını göstermektedir. Bir önceki ölçüm değeri ile kıyaslandığında;

a) 8 dB 'lik bir artış arızanın ön belirtisini veya yağlama eksikliğini,
b) 12 dB 'lik bir artış arıza başlangıç aşamasında olduğunu,
c) 16 dB 'lik bir artış meydana gelmiş bir arızayı ve
d) 35-50 dB 'lik bir artış meydana gelmiş ise çok ciddi arızaları göstermektedir.



Şekil 4.4: Ultrasonik rulman izlemesi [32].

Aşağıdaki grafikte (Şekil 4.5) ultrasonik izleme ile bir rulmanın normal yağlanmış durumu ile yağsız kalmış durumlarında alınan ses örnekleri birleştirilmiştir. Bu grafikteki mavi renk ile gösterilen bölge rulmanın normal yağlama seviyesinde olduğu, kırmızı renk ile gösterilen bölgeler de oluşan yüksek tepecikler ise yağlanma ihtiyacının olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5: Rulman yağ durumunun ultrasonik izlemesi [33].

Rulmanların eksik yağlanmasında olduğu gibi aşırı yağlanması da rulman arızalarına sebep olur. Periyodik bakımlarda yapılan rulman yağlamaları ile rulmanların arıza yapma oranlarının düşeceği gibi bir düşünce olmasına rağmen bakımlarda bilinçsizce yapılan aşırı yağlamanın rulmanların arızalarına sebep olacağı unutulmamalıdır. Yağlama esnasında rulmanlara verilen yağ miktarını doğru olabilmesi için gres tabancasının ultrasonik sensör birlikte kullanılması gerekmektedir (Şekil 4.6). Ölçüm ve yağlamanın eş zamanlı yapılabilmesi için gres tabancası ile sensörler akustik yağlama adaptörü ile birleştirilir veya bu tür çalışmalar için tasarlanmış gres tabancaları kullanılılır [34].



Şekil 4.6: Akustik rulman yağlama tabancası [34].

Rulmanlara gres verilmesi işlemindeki ultasonik dinleme rulmanların yaymış olduğu temel ses seviyesine inene kadar yapılmalıdır. Eğer rulmanların temel ses seviyesi bilinmiyorsa yağlama işlemi sesin düşüp yeniden yükselmeye başladığı ana kadar devam ettirilir, ses yükselme eğilimine geçtiği anda tamamlanır. Bu aşamadan sonra yağlama işlemine devam edilmesi halinde rulmanların yaymış olduğu ses frekanslarında yükselmeler meydana gelecektir. Daha önce de belirtildiği gibi rulman yağlarının eksik olması kadar fazla olması hali de istenilmeyen bir durumdur.

4.2.3 Buhar Sistemlerinin Takibi

Üretim maliyetleri sebebi ile basınçlı hava teknolojisi gibi buhar enerjisi de pahalı enerji kaynakları içine dahil edilmiştir. Buhar kapanları, buhar kaybını engellemek veya en az seviyeye indirmek, buhar sistemlerinin verimli çalışmasını sağlamak için sistemdeki yoğuşmaları, yoğuşmayan gazları ve havayı sistemden tahliye edilmesini sağlayan elemanlardır. Buhar kapanlarında meydana gelen arızalar sistemdeki buhar kalitesinin ve basıncının düşmesine ve türbülansların oluşmasına neden olur. Buhar kaynaklı kaçaklar işletmeler için kayıp maliyet olarak değerlendirildiği gibi neden oldukları korozyon olayları da ciddi bir sorun teşkil etmektedir. İşletmelerdeki buhar kapanlarının %15-20'sinin arızalı oldugu göz önüne alınırsa, arızalı olan kapanların tespit edilmesi ve arızalarının giderilmesi ile maliyetlerde önemli bir düşüş görülecektir. Buhar kapanları her ne kadar görsel veya termografi ile takip edilse de ultrasonik izleme daha kesin sonuç verebilecektir. [33]. Buhar sistemlerindeki kapanlarının dışında çekvalf, vana, eşanjör, boyler (sıcak su deposu) ve borular gibi devre elemanlarınında meydana gelebilecek buhar kaçaklarının tamamı ultrasonik dinleme ile tespit edilebilir.

4.2.4 Elektriksel Arızaların Takibi

Ultrasonik dinleme elektrik kaynaklı arızaların tespitinde yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Elektrik sistemlerinin ultrasonik izlenmesi ile ark, bebek ark, korona kaynaklı arızalar önceden tespit edilir. Elektrik arkı yüksek akımlardaki oluşan yoğunluklar nedeni ile oluşan elektrik yükünün boşalmasıdır. Elektrik sistemlerinde oluşan maksimum akım ark yolu ile atlama yapabilir. Maksimum seviyelere ulaşan akım iletken olmayan hava tarafından iletildiği anda elektriksel ark oluşur. Ark boşalması voltajın az olduğı kısımdan görülebilir [35]. Elektrik arkı özellikle yangına sebebiyet vermeleri nedeni ile çok önemli ve arzu edilmeyen bir problemdir. Korona deşarjı; yüksek gerilimli bir iletkenin, etrafını saran hava gibi akışkanların iyonlaşmasıyla oluşan elektriksel bir deşarjdır [36]. Korona, tespit edilip önlenmezse hattan hatta ya da hattan yere elektrik atlamaları kaçınılmaz olacaktır. Korona sonucu yangınlar ve ölümlü kazalar meydana gelebilir.

Yüksek voltaj hatlarındaki meydana gelen ark ve korona olaylarının öncesinde sorunları belirtecek nitelikte ultrasonik ses dalgaları oluşur ve bu sesler ultrasonik cihazlarla rahatlıkla tespit edilebilir [37]. Bu izleme tekniği ile temaslı veya temassız;

a) Elektrik panoları,
b) İletim hatları,
c) Transformatörler,
d) Trafolar ve
e) İzolatörlerde meydana gelebilecek arızalar tespit edilir.



Şekil 4.7: Ultrason ile elektrik kaçaklarının izlenmesi [42].

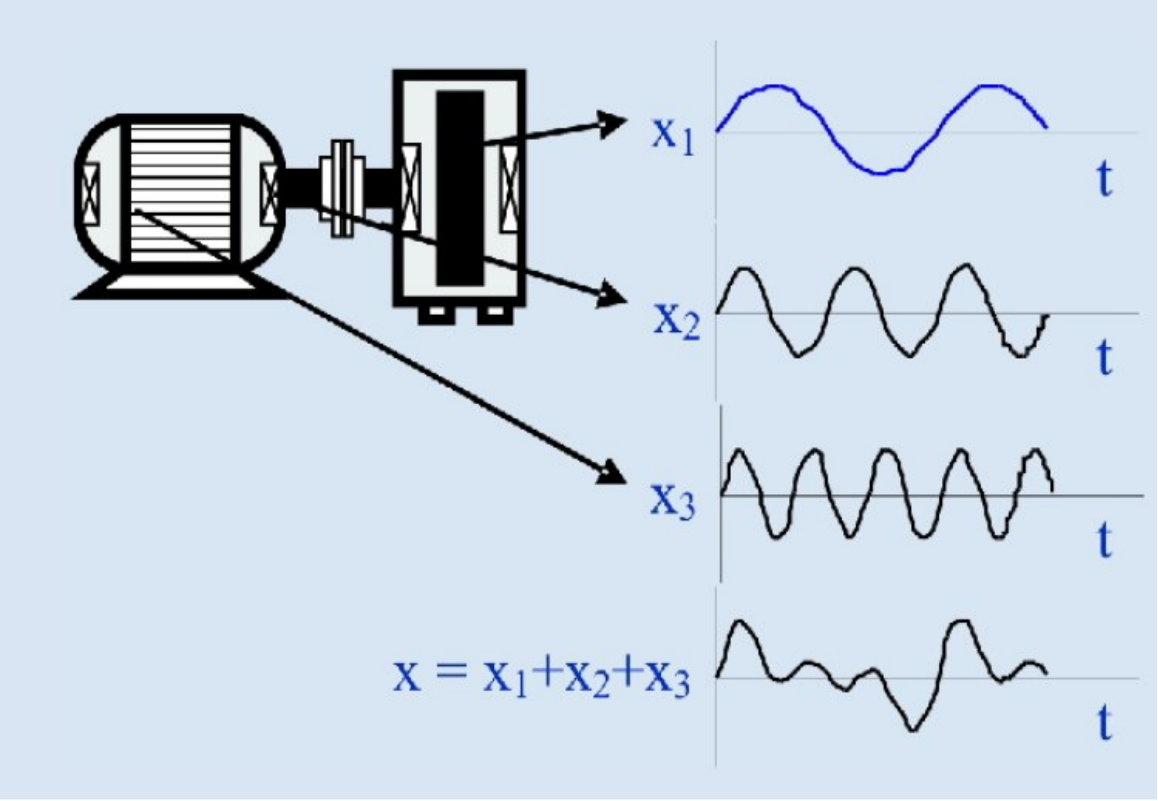
4.2.5 Dişli Kutuları (Redüktörler)

Redüktörler, dişli grubu, rulmanlar ve millerden meydana gelmiş, motor tarafından üretilip aktarılan dönme hareketinin yönünü, dönme momentini ve hızını değiştirebilen sistemlerdir. Redüktörlerin içerisinde bulunan dişli çarklarda deformasyon, aşınma, diş kırılması, şaft ve rulmanlarda hasarlar ve yatak ve iç aşınmalar ultrasonik sesler üretirler. Üretilen bu ses dalgalarının tespit ve analiz edilmesi ile redüktör içlerinde meydana gelebilecek hasarlar önceden tespit edilirler.

4.3 TİTREŞİM ANALİZİ

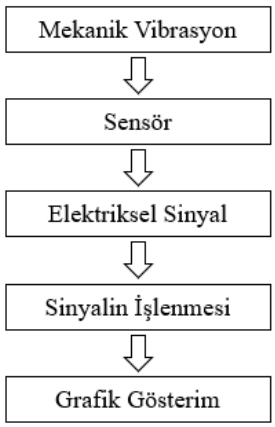
Titreşim analizi konularına girmeden önce titreşimin tanımının yapılması gerekmektedir. Herhangi bir nesnenin, bir referans eksenine göre bulunduğu doğal pozisyondan, farklı bir periyodlarda ve genliklerlerde tekrarlamış olduğu yer değiştirmelere titreşim denir. Titreşim tekrarlanan bir çevrim şeklinde olup ve sürekliliği bulunmaktadır.

Saha araştırmaları ve anketlere göre titreşim analizi, kestirimci bakım yöntemleri arasında en çok uygulanan ve en hızlı sonuç alınabilen eş zamanlı bir yöntemdir. Titreşim analizi 1822 yılında Baron Jean Baptiste Fourier tarafından yapılmıştır [43]. Fourier yapmış olduğu çalışmada günümüze ışık tutacak ve literature Fourier Serisi [44] olarak giren titreşim algılamaları ile elde edilen basit sinus dalgaların (Şekil 4.8) formlara ayrılabileceğini ispatlamıştır.



Şekil 4.8: Dalga formlarının basit sinus formlarına ayrılması [42].

Titreşim analizinin çalışması meydana gelen titreşimleri algılayarak elektrik sinyaline dönüştüren bir sensör aracılığı ile makine üzerinden ölçümlerin alınması ve bu ölçüm sonucunda oluşan elektrik sinyalleri işleyen bir cihaza aktarılması ve grafik gösterimi prensibi üzerine dayalıdır. Bu metotda çalışan bir makinayı durdurmadan sensörler tarafından titreşim verilerinin alınarak, bu bilgiler bilgisayara aktarılır, analiz programları tarafından analiz edilerek kullanıcılara makineler hakkında anlamlı sonuçlar verir.



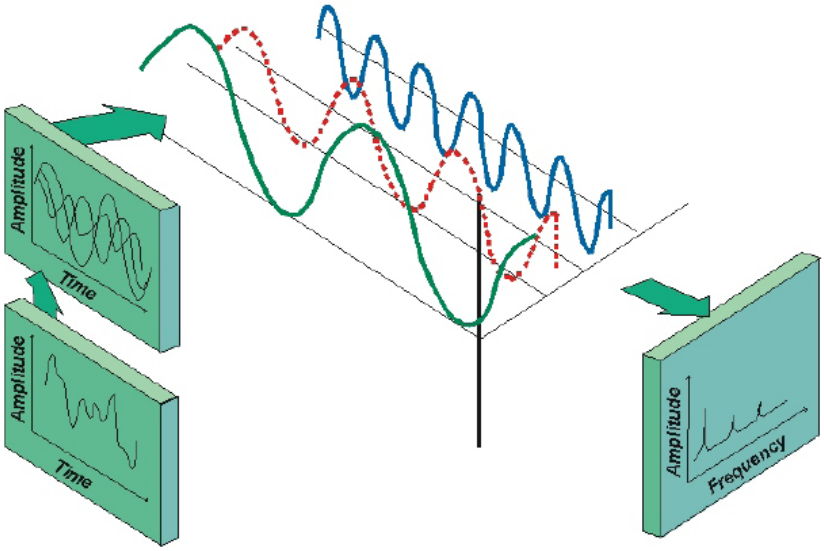
Şekil 4.9: Sinyal çevrim akışı [45].

Titreşim analizi yöntemi başta dönen parçaları bulunan makineler olmak üzere titreşim yaratan tüm makina ve ekipmanların durumlarının izlenmesi için en uygun yöntem denilebilir. Özetle titreşim analizi tekniği makinenin mekaniksel durumu hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar [46]. İzleme yapılması gereken makinaların önem durumlarına göre belirlenen periyotlarda veya sürekli titreşim ölçümlerinin yapılması ve elde edilen verilerin analizi ile makinaların güvenilirliği hakkında çok önemli bilgilere sahip olabiliriz. Titreşim analizi neticesinde çok fazla sayıda arızayı henüz başlangıç aşamasında yakalama şansımız çok yüksektir. Titreşimin düzenli olarak izlenmesiyle titreşim kaynaklı arızalar, arızalı yataklar, meydana gelmiş boşluklar, aşınmış veya hasarlı dişliler tespit edilebilir. [47].



Şekil 4.10: Titreşim ölçümü [48].

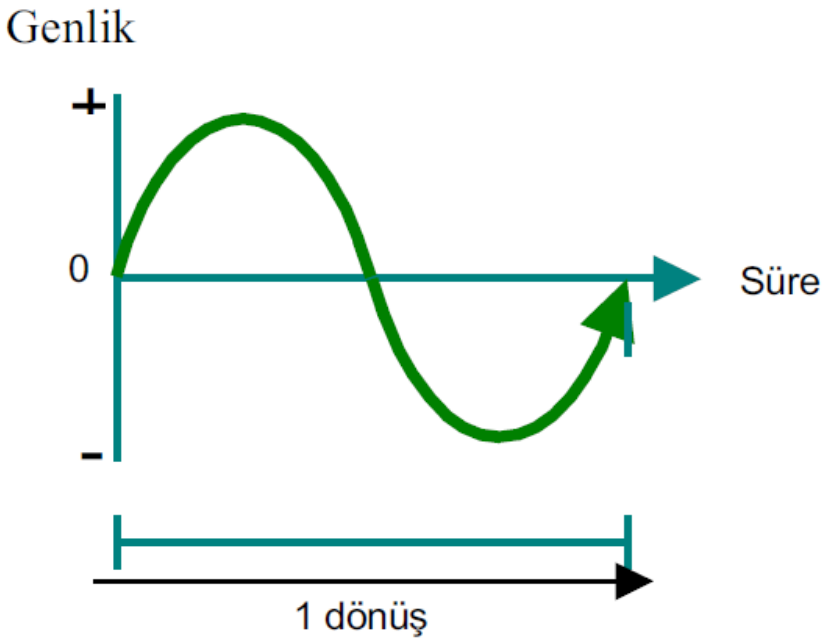
Kontrolümüz altında bulunan makinalara ait elde edilen titreşim verilerinin bilgisayar destekli işlenerek çok iyi yorumlanması gerekmektedir. Bu metotda tüm kestirimci bakım tekniklerinde olduğu gibi kullacının tecrübesine ihtiyaç duyan bir metotdur. Belki de içlerindeki en çok tecrübe isteyen yöntemidir. Aksi halde yanlış tespitler yapmak mümkün olabilmekte veya arıza belirtisini göremeyip makinaların arızaya geçmesine sebebiyet verilebilir.



Şekil 4.11: Frekans dalga dağılımları [49].

Titreşim kaynaklı arızalar periyodik olarak kendini tekrar eden işaretleri oluştururlar. Meydana gelen bu periyodik işaretler kendi içinde harmoniklerine ayrılarak detaylandırılır. Harmonik sinyali bir sinus eğrisi şeklinde tanımlayabiliriz. Elde edilen sinüs eğrisi bizlere hareketin periyodu ve genliği hakkında kestirimci bilgiler verecektir. En basit titreşim harmonik titreşimdir [50]. Oluşan bütün harmonik hareketler periyodik formdadır ve ters harmonik genelde mümkün değildir. Titreşimi oluşturan kuvvetlerin büyüklüğü titreşimin şiddetini ifade eder. Titreşimi meydana getiren kuvvetler ne kadar büyürse yer değiştirme miktarı yani titreşimin genliği de aynı oranda büyüyecektir.

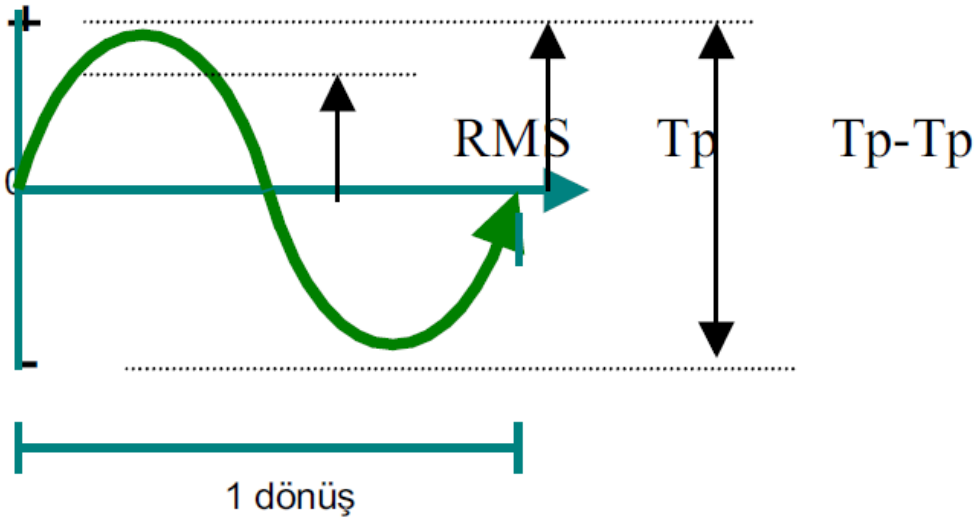
Titreşimin kendini tekrar ettiği zaman aralığına periyot adı verilir [50], birim zamandaki tekrarlama sayısına da frekansı denir. Periyot ile frekans terimleri titreşim analizinin temel iki kavramı ifade eder. Frekans iki türlü ifade edilebilir: Birinci frekans tipinde titreşimin bir saniye içindeki tekrarlama miktarı tanımlanır ve birimi **Hertz** (Hz)'dir [50]. İkinci titreşim modelinde ise frekansın bir dakika içerisindeki tekrarlama miktarına bakılır ve birimi **RPM** (revolution per minute) yani devir/dakika (d/d) 'dır.



Şekil 4.12: Periyodu bir dönüş olan hareket [45].

Harmonik sinyali oluşturan sinüs eğrisinin dikey ekseni sinyalin genliğini ifade eder. Rakama dönüştürülen titreşim değeri birimi yanında kesinlikle genlik tipi belirtilmelidir.

Tepe değeri : 0 – Tp
Tepeden tepeye değeri : -Tp + Tp
RMS değeri : Efektif Tp (RMS=kareköklerinin ortalaması). Saf Sinüs Eğrisinde Tepe değeri ile RMS arasındaki ilişki Tp = 0.707 RMS 'dir.

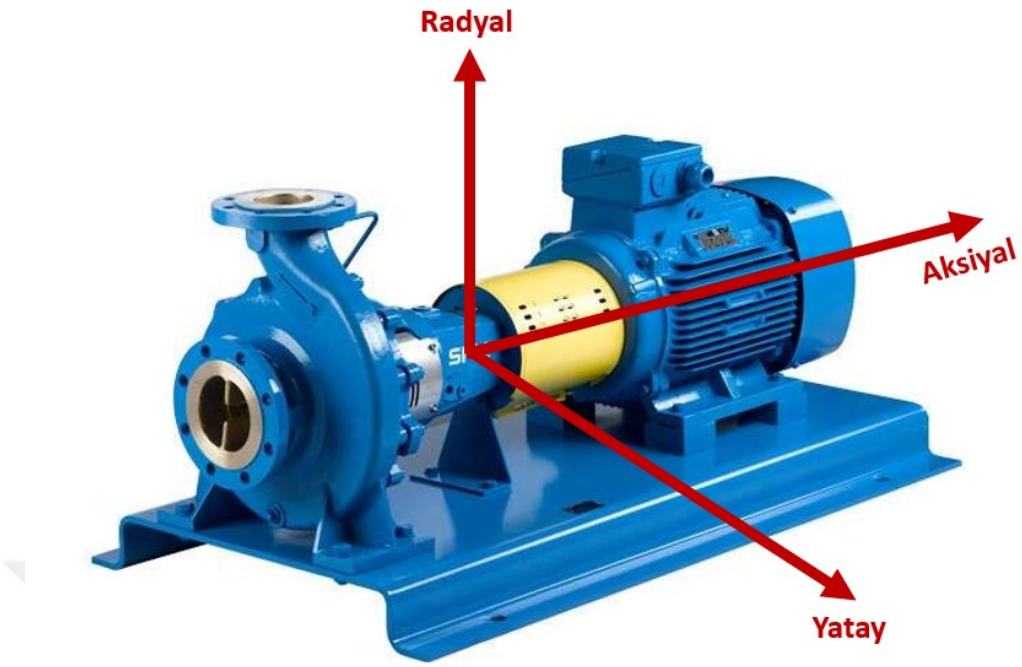


Şekil 4.13: Genlik ölçüm tipleri [45].

4.3.1 Titreşim Ölçüm Yönleri

Titreşim değeri alınacak noktalar, makine veya sistem üzerinde kendi gövdesinden ve yataklara en yakın yerlerden alınmalıdır [51]. Vibrasyon değerleri mümkün olduğu sürece rulmana en yakın noktadan alınır, çünkü dönü hareketleri rulmanlar ile yataklandığından sistemdeki vibrasyonun en fazla hissedildiği noktalardır.

Yapılacak ölçümler mümkün olduğunca radyal, yatay ve aksiyal olmak üzere 3 farklı yönden olmalıdır zira bu mekanik problemlerin teşhis edilmesine yardımcı olacaktır [52].



Şekil 4.14: Titreşim ölçüm yönleri.



Şekil 4.15: Elektrik motorunda yapılan 3 yönde ölçüm.

Tablo 4.1: Titreşim kaynağına göre ölçüm yönü.

Titreşim Kaynağı	**Ölçüm Yönü**
Kütle dengesizliği	Radyal
Eğik şaft	Eksenel
Eksantrik motor rotoru	Radyal
Statik balanssızlık	Radyal
Dinamik balanssızlık	Radyal
Paralel	Radyal
Açısal	Eksenel
Paralel-açısal birlikte	Radyal ve/vaya eksenel
Kaymalı yataklar	Radyal ve/vaya eksenel
Bilyalı yataklar	Eksenel
Rulman yataklar gibi dönmeyen parçalar	Radyal
İmpeller gibi dönen parçalar	Radyal

4.3.2 Arıza ile Titreşim Arasındaki İlişki

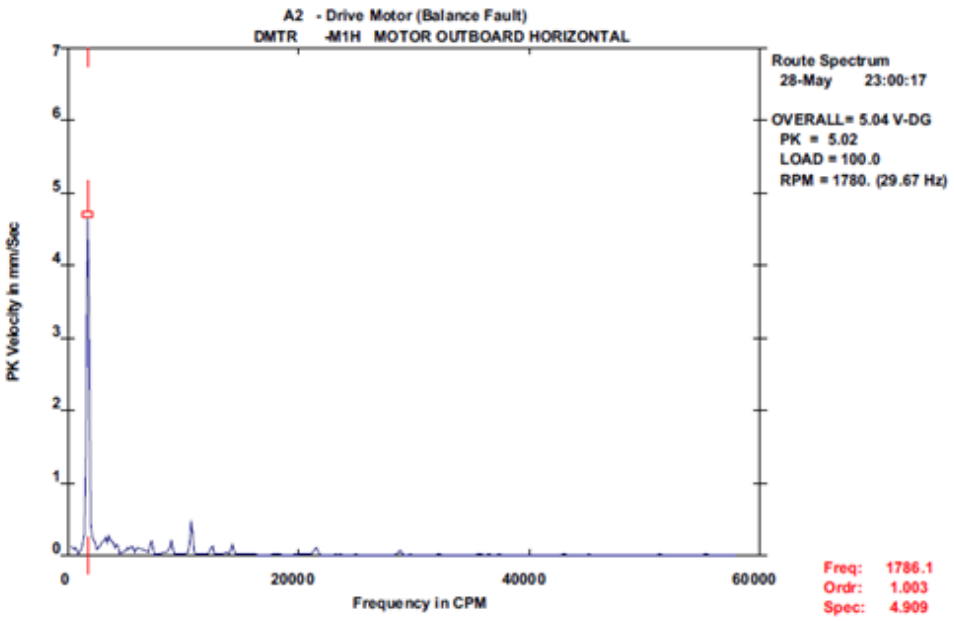
Makinelerde meydana gelen hasarlar ve uyumsuzluklar titreşim sinyalinde değişik frekanslarda kendini gösterir. Bu da arızaların önceden teşhis edilmesi açısından çok önemlidir. Frekans düzlemindeki titreşim sinyali bir çok arıza gelişimi hakkında bilgi verir. Titreşimler hakkında daha çok yorum yapılabilmesi için alınan titreşim değerlerinin olması gereken değerlere göre iyi yorumlanması gerekir.

Yapılacak arıza tanımlamalarda spektrum ve dalgaformu gibi terimlerden bahsedilecektir. Spektrum veya tayf [53]; renklerin, seslerin, elektromanyetik dalgaların ya da diğer fiziksel gerçeklerin, belli bir değer kümesi ile sınırlanmadan birbiri ardına süreklilik içinde sonsuz değişmesi durumudur. Dalgaformu veya dalga biçimi [54]; Elektronik, akustik ve ilgili alanlarda, bir sinyalin dalga biçimi, zamanın ve büyüklük ölçeklerinden ve zaman içindeki herhangi bir yer değiştirmeden bağımsız olarak, grafiğin zamanın bir fonksiyonu olarak şeklidir.

4.3.3 Balanssızlık

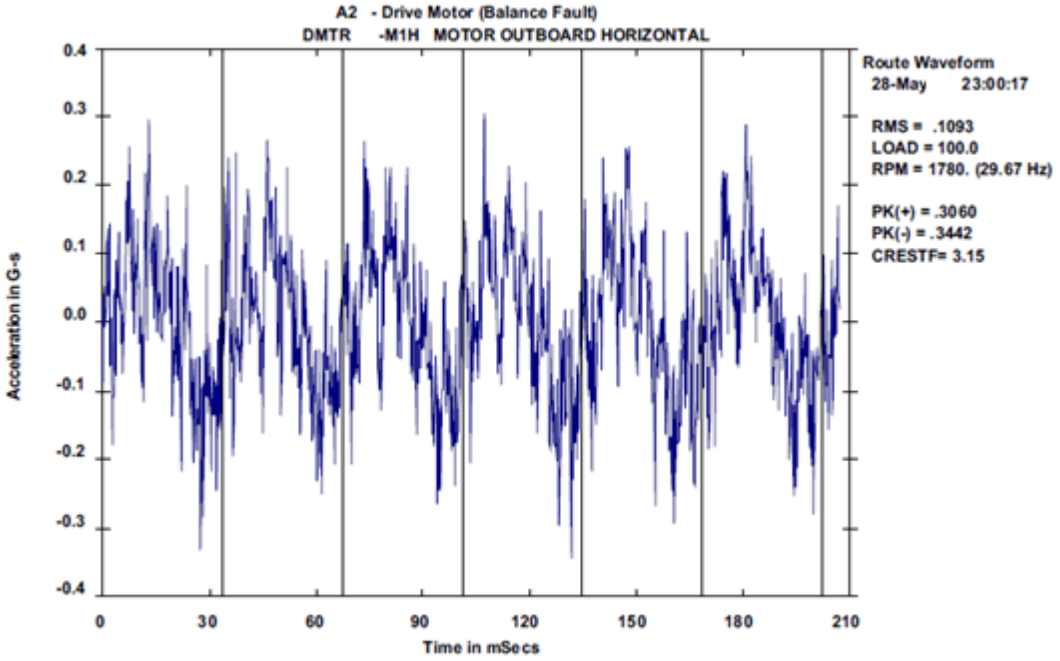
Balanssızlık “denge”, “ağırlık” terimleri ile doğrudan ilgilidir. Rotorun dönme eksenindeki kütlesel olarak dengesizliği bu rotorun balanssızlığı olarak adlandırılır. Rotorun dönüş devir hızının artması veya azalması sonucu meydana gelen balanssızlık etkisini doğru oranla etkiler. Rotor dönüş devri arttıkça balanssızlık nedeni ile oluşan merkezkaç kuvveti etkisi artacaktır. Balanssızlık sonucu titreşim meydana gelecek ve etkisi rahatsız edici gürültülere kadar yükselebilir. Balanssızlık sonucu meydana gelen titreşimler dönen tüm aksamları zamanla hasarlayacak arızalara sebep olacaktır. Makinalarda meydana gelen arızalar önceden tespit edilememesi sebebi ile zamanla büyüyerek makinaların kullanım ömrünün kısalmasına, verimliliğinin düşmesine neden olacaktır. Balanssızlık kaynaklı titreşimler özellikle rulman ve yataklar başta olmak üzere tüm döner aksamlı makina elemanlarının yapısının bozulmasına, verimsiz çalışmasına sebep olacaktır. Tam bu noktada titreşim analizleri devreye girmektedir. Titreşim analizleri sonucu elde ettiğimiz bilgiler ile makinalarda balanssızlık kaynaklı arızalar henüz başlangıç noktasında tespit edilerek ekipmanların arıza yapmaları, işgücü ve yüksek maliyet kayıpları engellenecektir.

Spektrumda: Radyal alınan ölçümlerde, 1xRPM frekansında baskın, sabit değişmeyen, kökünde şişme olmayan tepecik.



Şekil 4.16: Balanssızlığa örnek spektrum [45].

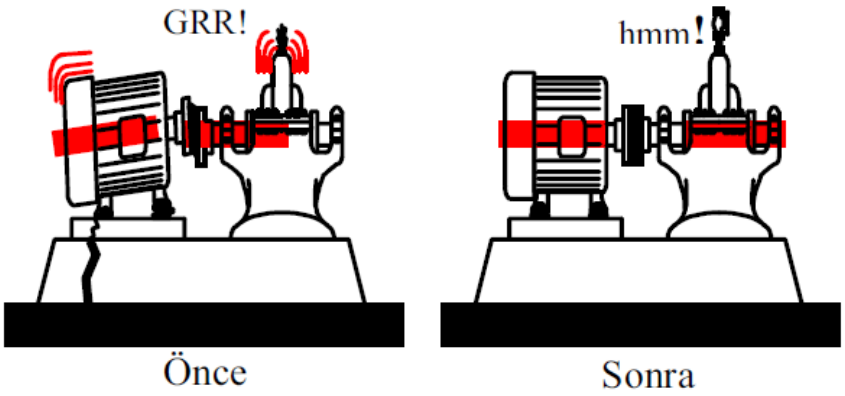
Dalgaformunda: 1xRPM periyodunda sinüs deseni. Genelde başka arızaların türevi olarak ortaya çıkar.



Şekil 4.17: Balanssızlığa örnek dalgaformu [45].

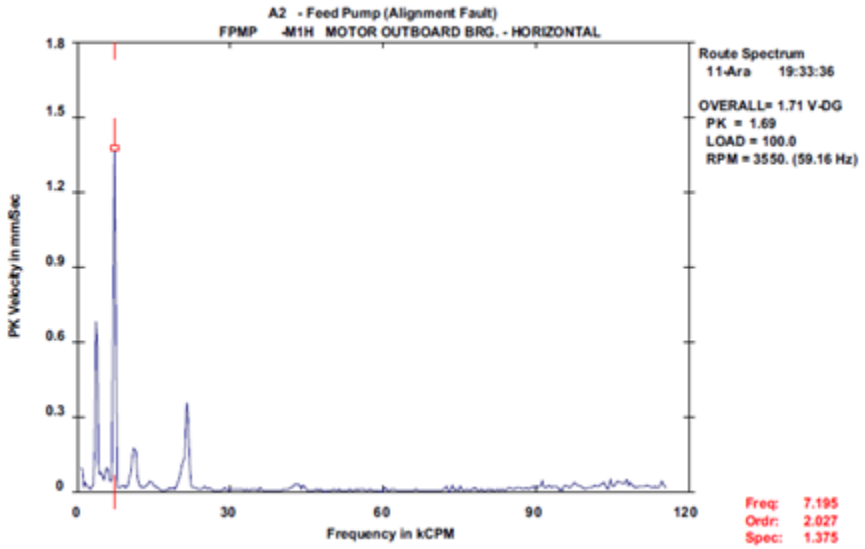
4.3.4 Kaplin Ayarsızlığı

Hareketin eksenel miller ile iletildiği motor bağlantılarında kaplinler kullanılmaktadır. Bu bağlantı türünde yapılan hizalama, yanlış torklama ve bağlantı hataları nedenleri ile eksen kaçıklığı meydana gelebilir. Kaplin ayarsızlığı en yaygın bir eksenel kaçıklık sorunudur. Eksen kaçıklılığı kasıntı adları ile de anılmaktadır. Eksen kaçıklılığı eksenel yönden millere uygulanan lazerli ayar cihazları ile giderilir.



Şekil 4.18: Kaplin ayarı öncesi ve sonrası makina simulasyonu [45].

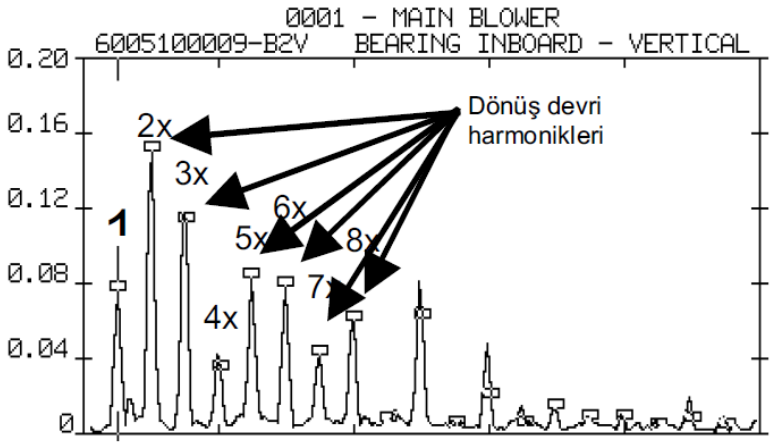
Hatalı rulman montajı, eğik şaft, yalpalı montaj, milde çatlak, makina üzerindeki gerilmeler, topal ayak gibi sorunlar benzer işaretleri verir.



Şekil 4.19: Kaplin kaçıklılığına örnek spektrum [45].

4.3.5 Mekanik Çözülme

Titreşim kaynaklı hareketler mekanik sistemler için istenmeyen bir durum olup, makina parçalarının yorulmasına, çözülmelerine ve dağılmalarına sebep olurlar. Mekanik çözülme Spektrumda; yapı bağlantılarında çözülmeler dönüş devri katlarında 8xRPM frekansına kadar harmonikler üretir. Dönen kısımdaki çözülmeler; 0.5xRPM harmoniklerinde göreceli olarak düşük tepecikler oluşturur. Rulman iç bilezik dönmesi, yine rulman kafes arızaları bunlara örnektir. Kendini 0.5xRPM frekansında gösterir. Her dur-kalk da farklı genlik alınır.



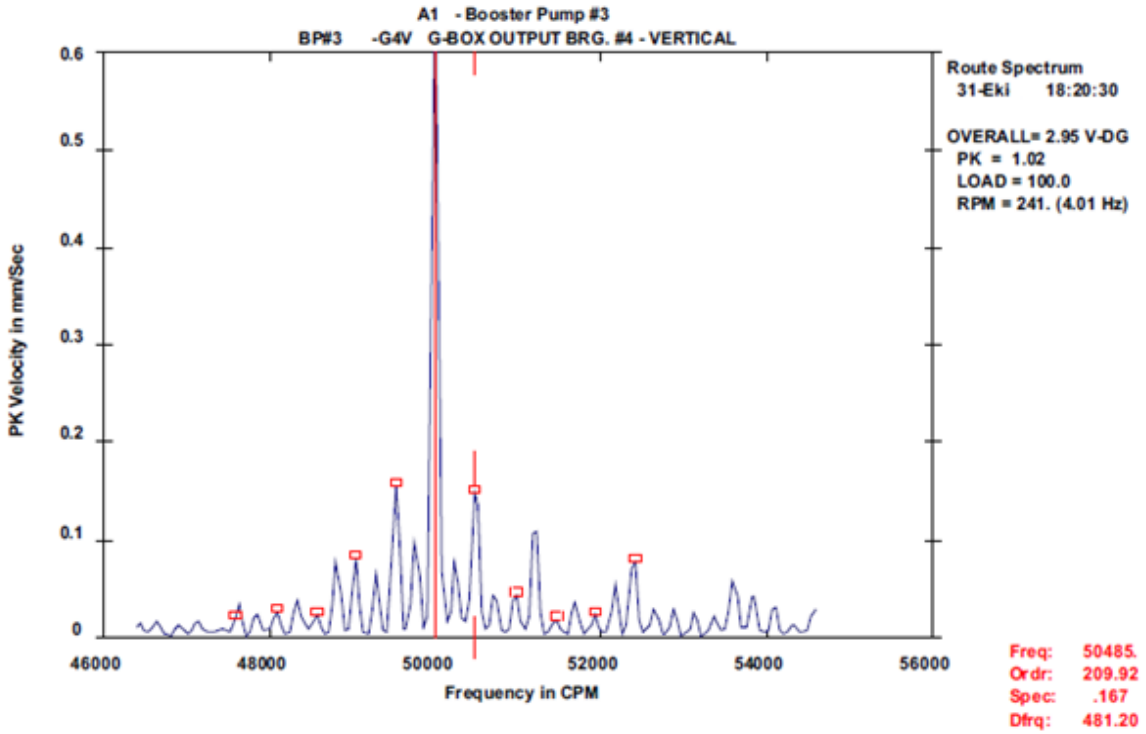
Şekil 4.20: Mekanik çözülmeye örnek bir makinadan alınan spektrum grafiği [45].

4.3.6 Dişli Arızaları

Mekanikte hareketler mil ve dişli aracılığı ile iletilmektedir. Dişli gruplarında, redüktörlerde bulunan dişli çarkların gövdesinde kırık veya çatlak var ise titreşim üretirler. Hasarlı olan çarkın dönüş devri ile dişli birleştirme frekansı (GMF) genliğini yükseltir ve yan bantlarda küçük artışlara sebep olur. Dişli çarklarda meydana gelen hasarlanmaların başlangıç aşamasında tespit edilmesi yine titreşim algılayıcı sensörler ile gerçekleşmektedir. Sensörler ile elde edilen bilgilerin grafiklere dökülmesi ve yorumlanması ile dişli çarklarının ne zaman başladığı, arızanın boyutu, kullanım ömür süresi hakkında bilgi sahibi olabilecek, bu süre içerinde arıza büyümeden planlı duruşlarda değişiminin sağlanmasına olanak verecektir.

Spektrumda; dişli kavrama frekansında tepecikler görülür, GMF Harmoniklerinin olması, hatalı dişli ayarını, GMF etrafında yan bantların olması kırık dişten kaynaklanabilecek sorunu gösterir.

Dalgaformunda Genlik modülasyonu görülür.

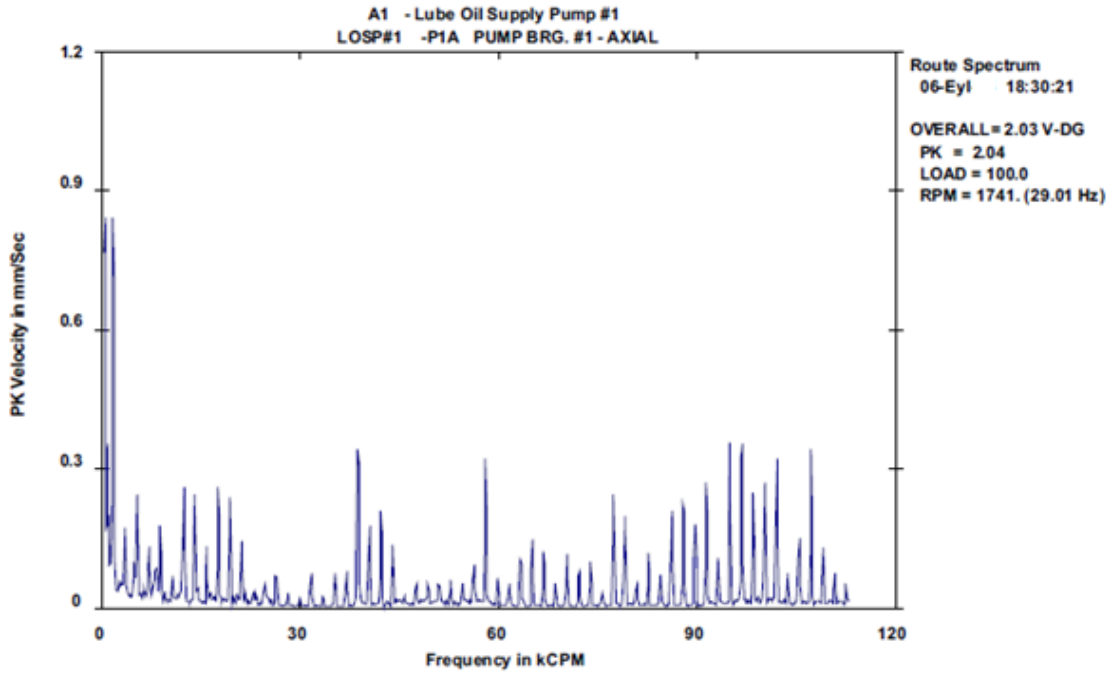


Şekil 4.21: Dişli sinyali bulunan bir spektrum örneği [45].

4.3.7 Rulman Arızaları

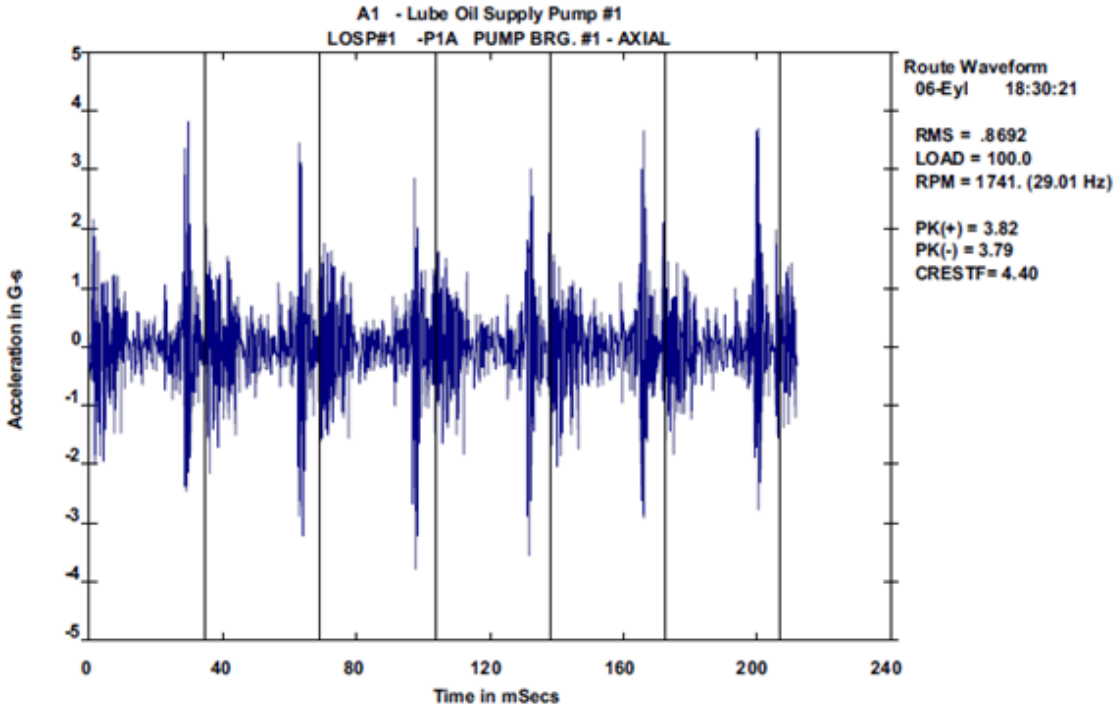
Dönü hareketi ile çalışan tüm makinalarda rulmanlar çok önemli bir makina elemanıdır. Kullanım ömrünün dolması, rulmanı oluşturan parçalarda meydana gelebilecek yorulmalar, aşınma, imalat hatası, hatalı montaj, eksik veya aşırı yağlama gibi sebeplerden dolayı rulmanlar arızaya geçmeye başlar ve bu aşamada yaymış olduğu titreşim ve gürültüde farklılıklar oluşmaktadır. Rulman ve yataklarında arıza oluşmaya başladığı zaman rulman elemanları arasındaki çarpmalar sonunda titreşim enerjisi belirli frekanslarda diğerlerine göre baskın duruma geçmeye başlar. Kestirimci bakım teknikleri ile rulman arızalarının tespitinde, rulmanın uygunsuz çalışması anında ortaya çıkardığı gürültü ve titreşim çok büyük önem taşımaktadır. Rulmanların karakteristik titreşim seyrinden farklı olarak yaymış oldukları titreşimlerin incelenmesi ve değerlendirilmesi bizlere önemli bilgiler sunmaktadır.

Spektrumda: Kendi içinde harmonik ailesi bulunan, ancak dönüş devri katlarında oluşmayan tepecikler, ve/ya da spektrum zemininde kabarma şeklinde görülür. Erken sinyaller yüksek frekanslarda oluşur. Önlem alınmaz ise dağılmadan önce balanssızlık gibi görülebilir. Stress dalgası spektrum analizi ile detaylandırılır.



Şekil 4.22: Rulman arızasına örnek spektrum [45].

Dalgaformunda: Mekanik çözülme gibi düzensiz yığıntılı vuruntular verir. Ivme birimli dalgaformunda genliğin 2 g's sınırını aşması sorun işareti olarak algılanır. Melek Balığı deseni, rulman bileziklerinde çatlak olduğunu gösterir. Rulmanlar çok elemanlı olduğu için birden fazla arıza frekansı setine sahiptir. Bilgisi bulunmayan dış bilezik sabit, iç bilezik dönen rulmanlarla ilgili aşağıdaki formüller arıza frekansları ile ilgili yaklaşık bilgi verecektir.

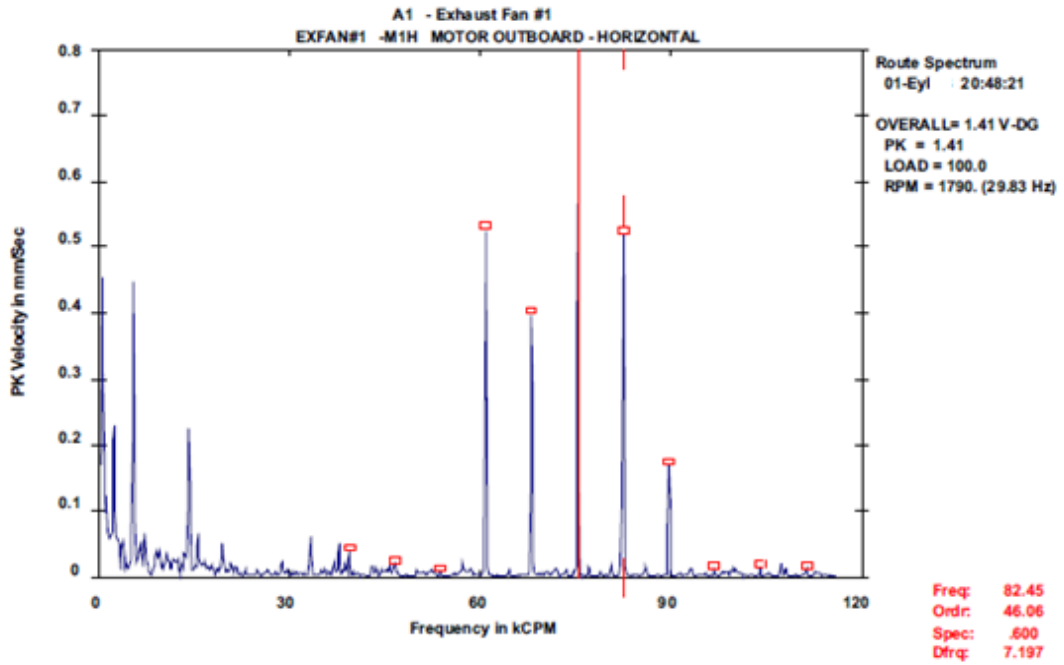


Şekil 4.23: Rulman arızasının dalgaformu [45].

4.3.8 AC Motor Arızaları

AC motor arızalarının tespitinde akım izleme teknikleri, ultrasound izlemesi haricinde titreşim analizleri de önemli bilgiler vermektedir. Titreşim analizi ile elektrik motorlarının izlenmesi ile rotor kol ve kanatlarındaki uygunsuz kütle dağılımını, motor mil eğrilikleri, kaplin ayarsızlığı, tespit civatası gevşekliği, imalat kaynaklı hataları tespit edilebilir.

Spektrumda: Mekanik nedenli tepeciklere ek, 2xHat frekansında ise keskin tepecikler oluşur. Canlı izlemede, ölçüm anında elektrik kesilince birden yok olur. Mekanik titreşim sinyalleri motorların yavaşlaması seyrine paralel olarak yavaş yavaş azalır ve motorun durması ile kesilirler.



Şekil 4.24: AC motor kısa devre çubukları arızası spektrum örneği [45].

4.3.9 Titreşim Ölçümü Yoluyla Arıza Tespiti

Titreşim ölçümlerininin çok güvenilir olması için öncelikle titreşim sensörlerinin ölçüm yapılması istenilen makina elemanlarına mümkün olan en yakın noktaya yerleştirilmesi gereklidir. Gerekli ölçüm noktalarından titreşim değerlerinin alınmasından sonra verilerin bilgisayar ortamına aktarılması sağlanır. Sensörler aracılığı ile elde edilen titreşim verileri ile bilgisayar programlarında spektrum grafikleri hazırlanarak takip edilen makina elemanları hakkında yorum yapmamızı, makinaların arızalı olup olmadığı hakkında kararlar vermemizi sağlar. Bu arızalar şu şekilde sıralanabilir; balanssızlık, eksenel ayarsızlık, mekanik gevşeklik, rulman arızaları, dişli arızaları, yatak aşınma arızaları, yağlama problemleri, şase zayıflıkları, akış problemleri, sürtünme, kayış-kasnak problemleri ve kaplin hasarları gibi pek çok arıza önceden yakalanıp müdahale edilebilir [55].

Titreşim ölçümü metotu ile kestirimci bakımcılıkta kullandığımız titreşim sensörlerinin almak istediğimiz verilerin özelliğine göre yerleştirilmesi gereken yönler bulunmaktadır. Çünkü bazı arızaların karakteristik özellikleri incelendiğinde alınması gereken ölçüm yönlerine göre daha kolay yakalanabilir.

Makinenin gövdesi üzerinden ve yataklara en yakın olan yerden titreşim ölçümleri radyal ve eksenel yönlerden alınmalıdır. Titreşim ölçümü yaptığımız sensörü ölçüm yaptığımız yatağa, dönen mile dik olacak şekilde dikey ve yatay tutarak ölçümler alınır. Ayrıca eğer makinede bir kaplin bağlantısı, kayış kasnak bağlantısı gibi durumlar mevcutsa, o yataktan bir de dönen mile paralel olacak şekilde ölçüm alınmalıdır. Bu ölçümlerde yatay yönde mile dik eksende yapmış olduğumuz ölçümde balanssızlık problemini yakalamamız kolaylaşır. Balanssızlık temel bir problemdir ve makinelerde görülen yaygın bir titreşimdir [55]. Makinalardaki gevşeklik kaynaklı arızaları dikey yönde alınan titreşim ölçümleri ile daha kolay yakalayabiliriz. Eksenel yönden alınacak ölçümde ise eksenel ayarsızlık problemlerini daha rahat bir şekilde yakalayabiliriz. Titreşim analizi ile ölçüm yapılan sistem, makina ve ekipmanlar.

a) Dönerli sistemler,
b) Rulmanlar ve yataklar,
c) Kayış kasnak sistemleri,
d) Dişli sistemler, aşınmaları ve hasarları,
e) Kaplin hasarları,
f) Mil eğrilikleri,
g) Sürtünme,
h) Yağlama problemleri,
i) Şase ve ankraj zayıflıkları,
j) Elektrik motorları,
k) Pompalar, fanlar,
l) Redüktörler,
m) Eksenel ayarsızlık,
n) Balanssızlık problemleri ve
o) Mekanik gevşeklik.

Tablo 4.2: Titreşim ölçümü yoluyla arıza bulma [45].

TİTREŞİMİN NEDENİ	TİTREŞİM YÖNÜ	TİTREŞİMİN GENLİĞİ	AÇIKLAMA
Dengesizlik (Balans bozukluluğu)	Radyal	a) Dengesizlikle doğru orantılı b) Dönme hızıyla artar	a) Çok sık rastlanır b) Nedenleri Montaj hatası Malzeme birikimi Makina aşınması Parça kırılması
Radyal eksen kaçıklığı	Radyal	Eksen kaçıklılığın olduğu yönde en fazla	a) Sık rastlanır b) Çoğunlukla açısal eksen kaçıklığıyla birlikte görülür
Açısal eksen kaçıklığı	Eksenel	Eksenel yöndeki genlik, radial yöndekinin 2 katına kadar çıkabilir	c) Sık rastlanır Çoğunlukla açısal eksen kaçıklığıyla birlikte görülür
Kaymalı yataklarda eksen kaçıklılığı	Radyal ve Eksenel		a) Genellikle balans bozukluğuyla ilişkilidir b) Balanslama radial ve eksenel titreşimleri azaltır
Rulmanlı yataklarda eksen kaçıklılığı	Eksenel		Balansa bağlı değildir
Eğilmiş mil	Eksenel ve Radyal	Eksenel yönde fazla	Radyal yönde 1xn de, eksenel yönde ise 2xn titreşim daha fazladır
Yuva içerisinde gevşek duran kaymalı yatak	Radyal yönde fazla		Geşeklik yalnız dönme hızında oluşur
Kaymalı yatakta yağ filmi karasızlılığı	Radyal	Düzensiz	Yüksek hızlarda görülür
Arızalı rulmanlı yatak	Radyal ve Eksenel	a) Radyal yönde daha fazla b) Düzensiz zaman zaman şok şeklinde c) Bozulma başlangıcında düşük değerlerde	Birçok makinada görülen ortak bir sorundur
Arızalı kayış	Radyal	Değişken düzensiz	Hatalı kayış bulunabilir
Arızalı veya aşınmış dişli çark	Radyal ve Eksenel (Alın dişlilerde sadece radyal)	a) Arızalanma ile birlikte yan bant frekanslarında genlik artar b) Genlik düşük değerdedir	a) Yan bant frekanslar yardımıyla tanınırlar b) Analizi genelde güçtür
Gevşek parçalar	Radyal	Yönle değişir	
Elektriksel kaynaklar	Radyal ve Eksenel	Akım kesildiğinde kaybolur	
Akışkan kaynaklı	Radyal ve Eksenel	Düşük düzeyde	Türbilanstan kaynaklanan titreşim geniş bir frekans aralığında görülür

4.4 YAĞ ANALİZİ

Yağlama uygulamaları mekanik sistemlerde birlikte çalışan iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının düşürülmesi amacı ile yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda yağlamanın en önemli görevlerinin ne olduğuna bakıldığında en başta sistemlerin orijinal performansını korumak ve hassas çalışmasını sağlamak olduğu görülecektir. Bir önemli görevinin ise arızasızlığın sağlanması olduğu unutulmamalıdır. Makinalarda kullanılan rulman, mil, yatak, kızak gibi döner ve hareketli aksamlar yüksek hızlarda ve ağır yüklerde çalıştıkları için sürekli olarak yağlanma ihtiyacı duyarlar. Yağlamanın yapılmaması, uygun şartnamede yağ kullanılmaması, özelliğini ve vizkozitesini kaybetmiş yağların kullanılması gibi durumlarda makinalarda geri dönüşü mümkün olmayacak kadar büyük arızalara sebep olmaktadır. Yine arızaların çoğunda sistemlerin yağsız kaldığı görülmüştür.



Şekil 4.25: Yağlama hatası nedeni ile rulman deformasyonu.

Yağlama uygulamalarında yaşanacak sorunlar nedeni ile beklenmedik bir anda arıza ile karşılaşılmaması için yağlama çalışmalarının belirlenen bir periyota bağlı düzenli olarak yapılmasının gerekliliği gibi yağlarında incelenmesi çok önemlidir. Bu noktada yağ analizleri ön plana çıkmaktadır ve bu uygulama kestirimci bakım çalışmalarında da oldukça önemlidir [55]. Yağ analizi sonucunda, yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, yağ içerisinde su olup olmadığı, yağların viskozite durumu, aşınma değerleri, yağ içerisindeki partiküllerin sayısı ve büyüklüğü ve yağ kirliliği gibi parametreler analiz edilerek [47] muhtemel arıza hakkında yorumlar yapılabilmektedir.

Yağ analizinin uygulanmasının önündeki engeller yağ örneğinin doğru alınamaması ve yağ analizinin getirdiği ekstra maliyetdir. Numune sonuçlarının güvenilir olması nedeni ile yağ numunesi alma işlemleri çok önemlidir. Bu çalışma esnasında temizlik kurallarına çok dikkat edilmesi gereklidir. Numune alma işleminde ellerin temiz olması gerekmekte ve çalışma boyunca mutlaka temiz tek kullanımlık eldiven kullanılmalıdır. İkinci aşamada ise numune alınacak bölgenin temizliği yapılmalıdır. İşlem sırasında kullanılacak numune kapları, hortum ve numune pompaların temiz olması gerekmektedir. Numune alma işlemi mümkünse kapalı alan ve hava akımının olmadığı bir ortamda gerçekleştirilmelidir. Numune alma açık alanda yapılacak ise toz, toprak, partikül gibi kirletici faktörlerin olmaması, havanın açık ve rüzgarsız olması gerekmektedir. Bunlara dikkat edilmemesi durumunda alınacak numune kirleneceğinden çıkacak olan analiz sonuçları bizleri yanıltacaktır.

Yağ numuneleri elle manuel alınabildiği gibi numune alma pompaları yardımıyla daha kolay alınabilir. Bu işlemler sırasında numune almadan önce makinanın bir süre durması, yağ ısısının oda ısısı şartlarında olması ve yağın dinlendirilmesi sağlanır. Numune uzun süre çalışmamış bir ekipmandan alınacak ise bu sefer alınan numunenin homojen olabilmesi için makinanın bir süre çalıştırıldıktan sonra numune alma prosedürlerinin uygulanması gerekir. Elle veya pompa yardımı ile numune alma işleminde dipteki tortularıda çekmemek için hortum tamamen dibe kadar gönderilmemeli mümkünse yağ seviyesine göre orta bölgelerden alınmalıdır.

Yağ analizi işlemlerinde yanlış uygulanan bir süreç ise alınan yağ numunesinin analize geç gönderilmesidir. Bazı işletmelerde alınan yağ numunelerinin kayıtlara geç girilmesi, numuneleri bekleterek toplu olarak gönderilmesi, kargolama süreci ve kargoda geçen süreler, analiz süreleri gibi olumsuzluklar nedenleri ile analiz sonucunun açıklanması bir kaç haftayı bulmaktadır. Yaşanan gecikmeler nedeni ile analiz sonuçlarının bir kıymeti kalmayabilir. Bu tür olumsuzluklara sebep vermemek için numune alındıktan sonra sürecin çok hızlı olması, mümkünse kendi işletmelerinde de yağ analiz laboratuvarlarının kurulması gerekir. Bu süreçte makinalardan numune alındıktan sonra makina işe verilmeden bakım süresi içerisinde önce analiz sonuçlarının çıkarılıp incelenmesi yararlı olacaktır.



Şekil 4.26: Elle yağ numunesinin alınması.



Şekil 4.27: Yağ numunesinin pompa ile alınması.

Yağ analiz işlemlerinde zaman kayıpları gibi olumsuzluklar nedeni ile meydana gelebilecek ciddi arızaları önleyebilmek için son zamanlarda makinaların özellikle hidrolik sistemlerinde kullanılan arıza erken uyarı cihazları ile hidrolik sistemler kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Sisteme monte edilen yağ analiz cihazları ile hidrolik sıvıların içerisinde bulunan kirlilik faktörleri, metal aşınmaları ve viskozite değerleri online veya offline olarak izlenebilmektedir. Ayrıca sistemin ilgili noktalarına yerleştirilen basınç, debi ve sıcaklık sensörleri ile sistemdeki hidrolik sıvısının olması gereken basınç ve debi değerleri ile sıvı sıcaklığının kontrol altında tutulması sağlanır. Takılan cihazlar yardımı ile yağların gerçek zamanlı analizleri yapılmakta ve raporları alınabilmektedir. Erken uyarı sistemleri olarak adlandırılan bu sistemin kestirimci bakım adına en büyük avantajı içerisinden geçen sıvıların durumlarını sürekli olarak denetlemesi ve tespit ettiği uygunsuzlukları wifi veya radyo dalgaları aracılığıyla servis cihazları ile bağlantı kurarak toplamış olduğu verileri bizlere bildirebilmesidir.



Şekil 4.28: Hidrolik ölçüm setleri [56].

İşletmelerin çoğu tarafından ekstra maliyet gibi görünen yağ analizi aslında çok büyük bir kazanç olarak algılanması gerekmektedir. Yağ analizleri tıpkı kan tahlili gibi bizlere yağın kullanıldığı sisteme ait spesifik çok önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda makinaların sağlık durumları, herhangi bir arızanın habercisi ise bu arızanın boyutu ve ne zaman gerçekleşeceği olayın önemi açısından çok önemlidir. Analizlerden elde edebileceğimiz sonuçlar ile yağın içerisinde başta su, silis gibi istenmeyen maddelerin olup olmadığı, yağın viskozitesi ve aşınma metal değerleri hakkında bilgilere sahip olabiliriz. Yağ analizi ile edeceğimiz bilgiler kestirimci bakım çalışması sonucunda yağın ait olduğu sistemde aşınma, kırılma gibi mekanik deformasyon gibi fiziksel olaylar ile yağın yapısına ait kimyasal olaylar hakkında değerli fikirlere sahip olma imkanı sunmaktadır. Çevre yönünden de incelendiğinde gereksiz yağ atılmasının önüne geçilecektir.

Fullcheck LAB

FİRMA BİLGİLERİ

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

YORUM

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

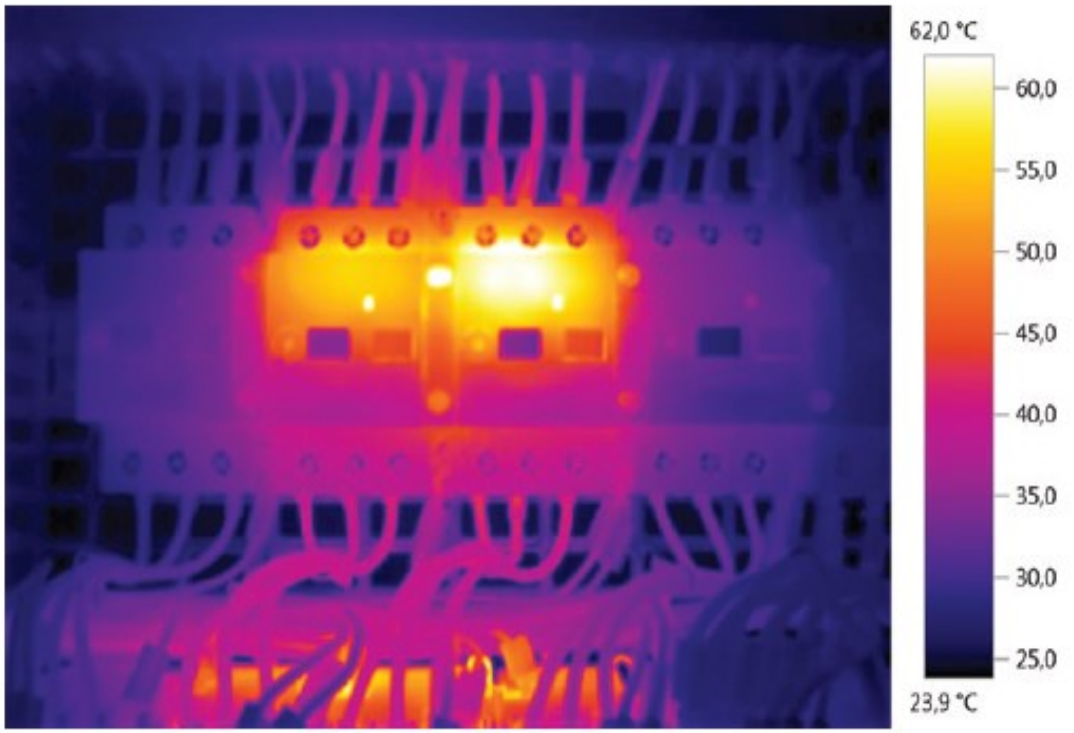
NUMUNE BİLGİLERİ	SON	2	3	4
Numune Numarası	T2021010968			
Numune Alınış Tarihi	30.11.2021			
Numune Lab. Giriş Tarihi	13.12.2021			
Kullanılan Yağın Kodu	Opet Fullpro HT CI-4 15W-40			
Ekipman Çalışma Süresi	578 saat			
Yağın Çalışma Süresi	194 saat			
Genel Durum				

DENEY SONUÇLARI	METOD	BİRİM	Ortalama	SON	2	3	4
Kirleticiler							
FT-IR Su Miktarı*	ASTM E 2412	%wt	0	0	-	-	-
FT-IR Glikol*	ASTM E 2412	%wt	0	0	-	-	-
ICP - Si	ASTM D 5185	mg/kg	17	17	-	-	-
FT-IR Kurum*	ASTM E 2412	% wt	0,31	0,31	-	-	-
Kimyasal Analiz							
VI	ASTM D 2270	-	144	144	-	-	-
Kinematik Viskozite, @40°C	ASTM D 445	mm²/s	97,64	97,64	-	-	-
Kinematik Viskozite, @100°C	ASTM D 445	mm²/s	13,86	13,86	-	-	-
FT-IR Sülfat*	ASTM E 2412	Abs/cm	6	6	-	-	-
FT-IR Oksidasyon*	ASTM E 2412	Abs/cm	3	3	-	-	-
FT-IR Nitrasyon*	ASTM E 2412	Abs/cm	8	8	-	-	-
Aşınma Metalleri							
ICP - Sn	ASTM D 5185	mg/kg	6	6	-	-	-
ICP - Pb	ASTM D 5185	mg/kg	1	1	-	-	-
ICP - Ni	ASTM D 5185	mg/kg	0	0	-	-	-
ICP - Fe	ASTM D 5185	mg/kg	14	14	-	-	-
ICP - Cu	ASTM D 5185	mg/kg	5	5	-	-	-
ICP - Cr	ASTM D 5185	mg/kg	3	3	-	-	-
ICP - Al	ASTM D 5185	mg/kg	4	4	-	-	-

Şekil 4.29: Yağ analiz raporu.

4.5 KIZIL ÖTESİ ANALİZİ (TERMOGRAFİ)

Termografi kelimesi “sıcaklığın resmi” anlamına gelen kelimelerin köklerinden elde edilmiştir. Kızılötesi termografi bilimi ışınımı bağlı yüzey sıcaklığını algılamak ve ölçmek üzere, elektronik ve optik cihazlar kullanma bilimidir [57]. Doğada bulunan her nesnenin insanlar tarafından algılanamayan kendine ait yaymış olduğu bir ısı enerjisi vardır. Termal görüntüleme sistemi, duyu organlarımız ile tespit edemediğimiz bu ısı enerjisini algılayıp, ısının derecesine göre renklendirerek bir görüntü elde etmesi prensibine dayanır [58]. Kızılötesi ışınlar göz ile görülebilen ışınların sınırının üzerinde bir dalga boyuna sahip ışın türüdür. Mutlak sıfırdan (0 ºK, -273,15 ºC) daha sıcak olan tüm maddeler mutlaka çevresine enerji yayarlar. Göz ile göremediğimiz ışınlar termal kameralar yardımı ile fotoğraflanabilmektedir. Termal kameralar yardımı ile yapılan görüntülemede ısı arttıkça sıcak bölgeler beyaza yakın renkler alırken, soğuk bölgeler ise siyah ve siyaha yakın renkler almaktadırlar. Renkli olarak yapılan görüntülemede ortam sıcaklığına göre renkler ℃ veya ℉ karşılığı skalada değerlendirilerek maviden sarıya kırmızı rengi kullanarak geçer. Mavi en soğuk, sarı ise en sıcak bölgeleri gösterir [57].



Şekil 4.30: Elektrik bağlantısındaki gevşekliğin termal kamera ile tespit edilmesi [57].

4.5.1 Termal Kameralar

Termal kameralar havacılık ve uzay alanları başta olmak üzere neredeyse tüm alanlarda ısı değişkenliği prensibi ile çalışan görüntüleme ve tanı cihazıdır. Bu cihazla normalde çıplak gözle göremeyeceğiniz uygunsuzluklar tespit edilebilir. Termal kameralar objelerden yayılan termal enerjiyi algılayan lensler ile algılayıcılardan meydana gelmiştir. Diğer bir tanımla termal kameralar ekipmanların yaymış olduğu ısı enerjisinin doğrudan temas etmeye gerek duymadan ölçmeye yarayan cihazlardır. Termal kameralarda görüntüleme çıplak gözle görülemeyen infrared enerjiyi (ısıyı) ve infrared kaynaklı görüntünün genel yapısını ölçtüğü ısı karşılığı renklere çevirme prensibi ile sağlanır. Termal kameralar ciddi sonuçlara yol açabilecek en küçük problemleri bile net olarak görmemizi sağlayarak meydana gelebilecek arızaların önlenmesine yardımcı olur.

Termografi, potansiyel arızaların bulunmasında yıllardır kullanılan bir metottur. Termal kamera ile ölçüm tekniğinin temel olarak kullanılması elektrik sistemleri, elektrik ve elektronik devre bileşenleri ve demir çelik sanayisi olmuştur. Diğer kestirimci bakım metotları ile kıyaslandığında termografi daha yüksek olan yatırım maliyetleri, işletim ve bakım masrafların sebebi ile birkaç yıl öncesine kadar sadece uzmanlar tarafından kullanılabiliyor iken, günümüzde yaygınlaşan el tipi termal kameraların kullanımı ile çok fazla uzmanlık gerektirmeyen kişiler tarafından kullanılmasına, uygulama maliyetlerinin düşmesine ve daha çok geniş alanlarda kullanılmasına olanak sağlamıştır. 0,1 derecelik hassasiyet ile çalışabilen termografi yönteminin avantajları aşağıdaki gibidir [52].

a) Ölçüm yapılacak olan yerlere temas edilmesine gerek yoktur,
b) Uzaktan kontrol yapılmasına olanak verdiğinden dolayı, kontrol esnasında tehlike yaratabilecek bir durum bulunmamaktadır,
c) Sıcaklık değişimleri görülebilir ve ölçülebilir olduğundan yorumlanması kolaydır,
d) Elektromanyetik alanlardan etkilenmez,
e) Kontrol edilecek sistemlerin durdurulmasına gerek yoktur,
f) Elde edilen bilgiler kesin ve güvenilirdir,
g) Yorumlanması titreşim ve ses analizinde olduğu gibi uzmanlık gerektirmez.

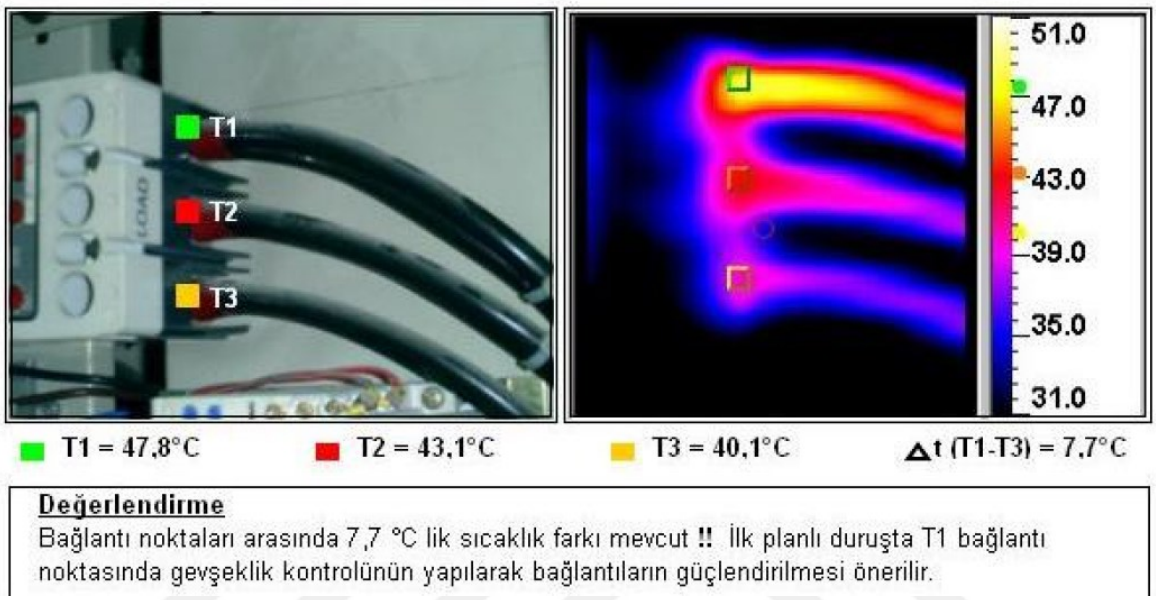
Termal kameralar sıcaklık yayan tüm makina ve ekipmanlar için uygulanması nedeni ile kullanım alanları çok geniştir. Termografinin bakım ve kontrollarda kullanılması ilk bakışta hayalperestlik olarak görülse de gerçekte çok yaygın alanlarda kullanılmaktadır. Termografi diğer kestirimci bakım tekniklerinde olduğu gibi düzenli ve bir periyota uygun olarak uygulandığında sonuçları kesin, başarı elde edilecek eş zamanlı bir çalışmadır. Aşağıda termal kamera ile arızaların tespit edildiği alanlar bulunmaktadır [59];

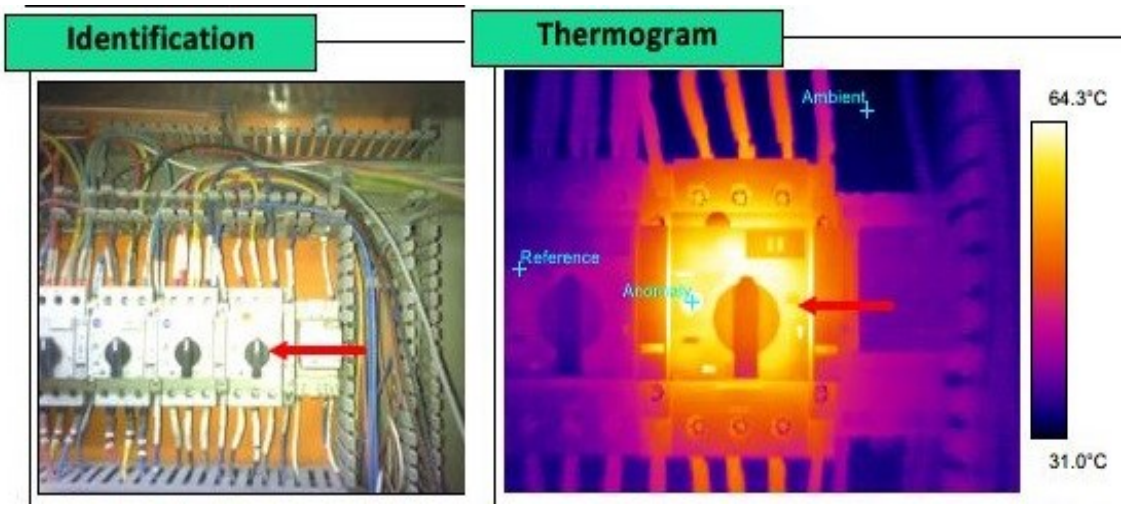
a) Elektrik motorları,
b) Pompalar,
c) Kompresörler,
d) Fanlar,
e) Rulmanlar,
f) Yetersiz yağlama,
g) Buhar kapanları/vanaları,
h) Yanıcı gaz sızıntıları,
i) Eşanjör tıkanıklığı,
j) Trafo,
k) Dağıtım panelleri,
l) Aydınlatma devreleri,
m) Şalterler,
n) Elektrik kabloları,
o) İletim sistemleri ve
p) İzolasyon hasarı.

4.5.1.1 Termal kameranın elektrik alanında kullanılması

Başta elektrikli motorlar olmak üzere verimsiz çalışan elektrikli ekipmaların çekmiş olduğu aşırı veya daha az akım, voltaj dengesizliği, yüksek direncin oluşturduğu gevşek bağlantılar, patlamış bağlantılar, gereğinden fazla yüklenme ile elektrik devre elemanları, klemensler, şalterlerde meydana gelebilecek arızalar gibi durumlarda sıcaklık artışı meydana geleceğinden bu tür arızalar termal kameralar ile tespit edilebilmektedir.

Uluslararası elektrik testleri birliği (NETA) tarafından yayınlanan kılavuzlara göre, benzer yükler altında çalışan benzer bileşenler arasındaki sıcaklık farkı 15ºC'yi aşarsa derhal gerekli onarım faaliyetlerine başlanmalıdır. Aynı kılavuza göre ortam sıcaklığı ile bileşen arasındaki sıcaklık farkı 40 ºC'yi aştığında yine gerekli bakım çalışmaları yapılmalıdır [28].



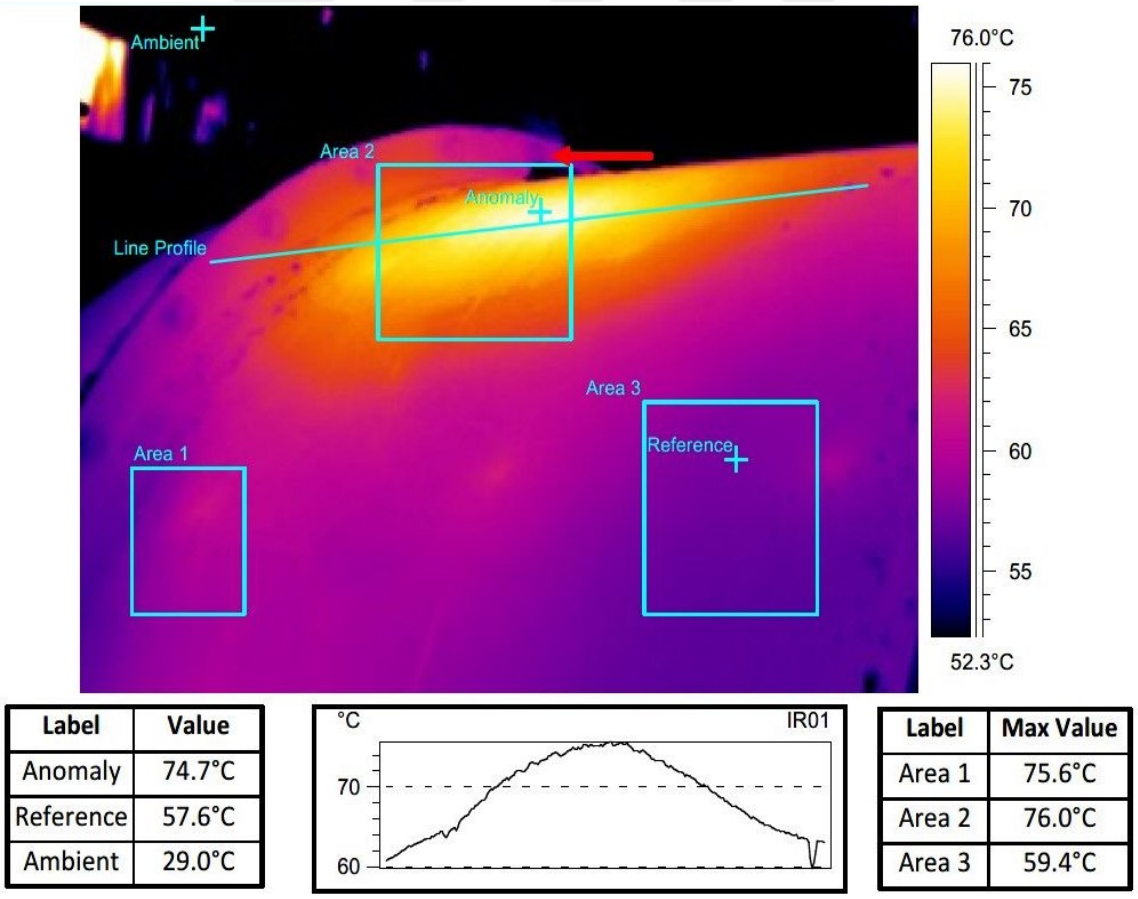


Şekil 4.31: Elektrik şalterindeki bağlantı kontrolü.

4.5.1.2 Sürtünme kaynaklı arızaların tespiti

Birlikte çalışan makina elemanlarında meydana gelen arızalar, yetersiz yağlama, mekanik bağlantı elemanlarındaki uygunsuzluklar, hasarlı rulmanlar, kaplin ayarsızlığı yüksek oranda sürtünmeler meydana gelir ve bu olumsuzluklar ısının yükselmesine sebep olur. Sürtünme kaynaklı uygunsuzlukların tespiti kestirimci bakımın diğer tekniklerinden biri olan vibrasyon analizinde bahsedilmişti ancak kontrol edilecek olan yerlerin kolay erişilebilir olmaması, sensör montajlarının mümkün olmaması ve ekipmana yaklaşılması güvenli olmayan gibi zor şartlarda termografi tekniği doğru ve emniyetli bir şekilde uygulanabilir.

Termografi tekniğine fan gibi ulaşılması güç olan yerlerde dönen aksamların iç kısımlara olan sürtünmesi, uçakların fren sistemleri, içten yanmalı motor bloklarının iç kısımları, dişli kutuları gibi kullanım örnekleri verilebilir.



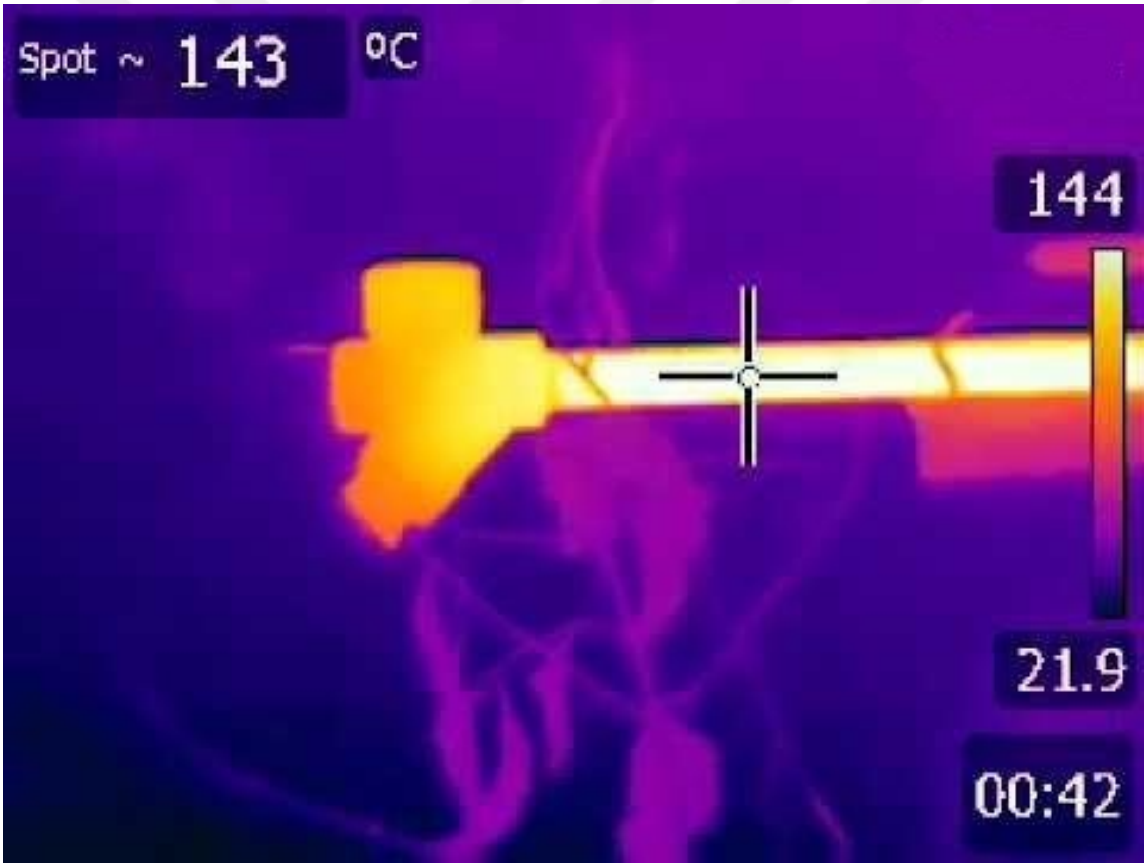
Label	Value
Anomaly	74.7°C
Reference	57.6°C
Ambient	29.0°C

Label	Max Value
Area 1	75.6°C
Area 2	76.0°C
Area 3	59.4°C

Şekil 4.32: Ulaşılması güç bir fanın termal kamera ile sürtünme kontrolü.

4.5.1.3 Termal kameraların vana ve hatlarda kullanılması

Özellikle yüksek sıcaklık sıvı ve gaz akışı olan hatlarını oluşturan boru, valf, vana, filtre, gibi devre elemanları ile kompresörler ve güç üreten ünitelerde hasar, kaçak ve tıkanıklık olup olmadığının kontrol edilmesi için termografi uygulaması ile başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Ölçüm sonucu elde edeceğimiz değerler hatlarda tıkanma veya kaçak olup olmadığı konusunda bizlere bilgiler vermektedir [28]. Yine termal ölçümle ile hatlarda akış yapan sıvı ve gazların olması gereken sıcaklıkları da kontrol edilerek verimliliğin arttırılması sağlanır. Termal kamera yardımı ile tesisatlarda meydana gelen sıvı ve hava kaçakları da çok net bir şekilde tespit edilir.



Şekil 4.33: Termal kamera ile sıcak su izlemesi.

4.5.1.4 Termal kameralar ile enerji verimliliği

Konut ve iş merkezlerinde en çok meydana gelebilecek enerji kayıplarından biri de ısınma ve soğutma kaynaklı enerji kayıplarıdır. Beklenmeyen bu kayıplar çok büyük maliyetlere yol açabilir. Binaların enerji verimliliğinin ölçülmesinde, enerji kullanımının kontrol altında tutulması ve enerji kayıplarının tespit edilmesinde termografi metotu kullanlabilir. Enerji verimliliği için genellikle aşağıdaki alanlarda termografi uygulanır [58].

a) Çatılar,
b) Duvarlar,
c) Isı yalıtım malzeme bitim noktaları,
d) Kapılar ve pencereler,
e) Su kaçağı ve
f) Rutubet ve nem



Şekil 4.34: Termal kamera ile enerji verimliliği izlenmesi.

4.5.1.5 Sağlık alanında termal kamera uygulamaları

Sağlık sektöründe özellikle güncel Corona ile domuz gribi gibi yüksek ateşe sebep olan hastalıkların tespiti için kullanılmaya başlanmıştır. Tıpta iç yaralanma, iltihap ve damar tıkanıklarının tespitinde termal kameralar tercih edilebilirler [57].



Şekil 4.35: Termal kameranın sağlık alanında kullanılması.

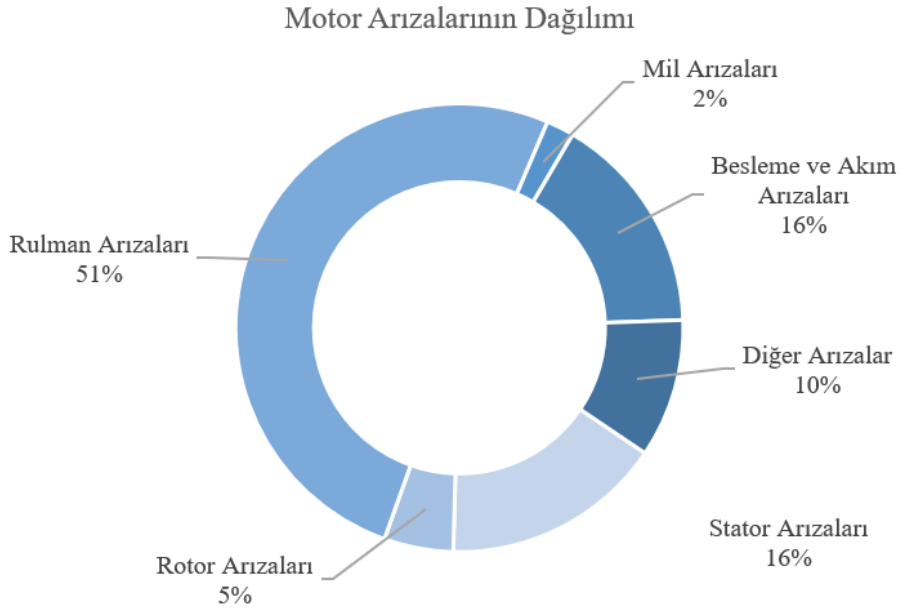
4.5.2 Termal Kamera ile Tesislerde Bakım Yapılmasının Avantajları

Termal kamera uygulamaları ile işletmelerde gözle görülmesi mümkün olmayan arızaların kolaylıkla ve anında tespit edilebilmesini, makinaların, ekipmanların ve üretim hatlarının arıza nedeni ile duruşlarını önlenerek verimliliğin yüksek kalmasını sağlar. Gerçekleşen bu tespitler ile işletmelerin üretim kayıplarını azaltır. Termal kamera izlemesi ile bakım uygulamalarının kalitesini artıracağı gibi ortaya çıkabilecek arızaların önceden tespit edilmesi ile duruşlardaki kayıpları ve yüksek onarım maliyetlerini önler. Tesisteki enerji kayıplarının fazla olduğu noktaları tespit edebilme özelliği sayesinde, enerji tasarrufu sağlayarak maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olur. İşletmelerdeki yangın riskini de erken tespit edebilme özelliği ile can ve mal güvenliğini de üst seviyeye çıkartmaktadır.

4.6 ASENKRON MOTOR AKIMI İZLEMESİ

Asenkron motorlarının akımlarının izlenmesi ile yapılan kestirimci bakım tekniği, endüstrinin neredeyse tüm alanlarında kullanılan elektrik motorlarının elektrik ve mekanik kaynaklı arızalarının önceden belirlenmesi, güvenirlik, ekonomiklik ve verimlilik açısından son derece önemlidir [60].

Elektrik motorlarında en fazla görülen arızalar aşırı ısınma, yanma, yalıtımda bozulmalar, rulman arızaları, mekanik arızalar ve motor devresindeki arızalar olarak sıralandırılabilir. Bunların haricinde güç kaynaklarında meydana gelen harmoniklerin de arızalara sebep olduğu tespit edilmiştir. Motorlarda meydana gelen arızalar ve dağılımları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

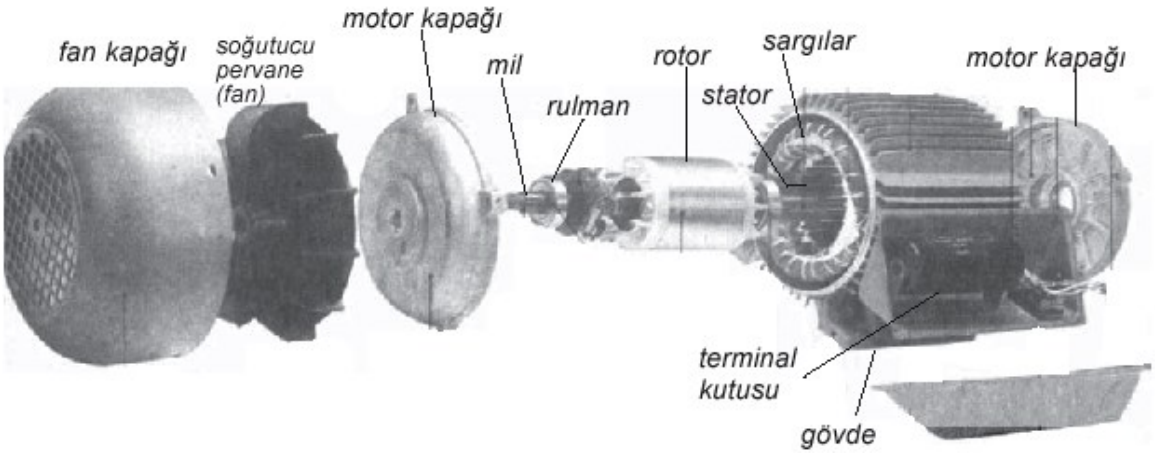


Şekil 4.36: Elektrik motor arızalarının dağılımı.

Motorlarda meydana gelen arızaların stator akımının harmonik genliği arasında bir ilişki vardır. Kestirimci bakım alanında yapılan araştırmalara göre motorlarda meydana gelen belirli arıza durumlarında motorların şebekeden çektiği faz akımının belirli harmonikleri değişim göstermektedir. Akım izleme tekniği ile motorların faz akımındaki meydana gelen harmonik değişimlerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi ile meydana gelme ihtimali olan arızalar önceden tespit edilebilmektedir.

Akım izlemesi ile motor faz akımlarında meydana gelen harmoniklerin genetik yapıları değerlendirildiğinde, aşağıdaki arızaları önceden tespit edebiliriz.

a) Aşırı kayıplar veya motorun olması gerekenin üzerinde bir yükle yüklenmesi sonucu meydana gelen güç kayıpları,
b) Dengesiz elektromanyetik çekim kuvveti ile meydana gelen arızalar,
c) Titreşim kaynaklı arızalar,
d) Üretim hataları,
e) Aşınma ve kırılma kaynaklı arızalar,
f) Merkezkaç kuvveti nedeniyle meydana gelen anormallikler,
g) Kirlilik kaynaklı çevresel etkiler ve
h) Rulman ve yatak kaynaklı arızalar.



Şekil 4.37: Asenkron motorun yapısı ve parçaları [61].

Sonuç olarak, Türkiye'de toplam net elektrik tüketiminin yaklaşık %36'sı, sanayi elektrik tüketiminin ise yaklaşık %70'i üç fazlı AC indüksiyon elektrik motor sistemlerinde kullanıldığını düşünürsek, bu veriler bizleri mecburen motorlar üzerinde analiz yapmaya zorlamaktadır. Gözden kaçırdığımız veriler ile yanmasına sebep olacağımız motorların tekrar sardırılması daha düşük maliyetli bir arıza giderme işlemi olsa da fabrika çıkışı orijinalliğini sağlayamayacağı nedeni ile veriminin %1-4 oranında düşmesi, yanlış motor-yük seçiminden dolayı motor verimlerinin %18 'lere varan oranlara kadar azalabileceği tespit edilmiştir. Bu tür arızalar kendilerini diğer kestirimci bakım teknikleri haricinde aşırı akım çekme eğilimi ile gösterebilmektedir.

4.7 KESTİRİMCİ BAKIMIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Üretim hatları, ekipmanlar ve makinaların gelecekteki performans durumları hakkında bizlere ön bilgi vermesi, %100 ekipman verimliliğin sağlanması, sıfır arıza faaliyetleri gibi iddialı sonuçlar elde etmemizi sağlayan Kestirimci Bakım tekniğini diğer bakım stratejileri ile kıyasladığımızda şüphesizdir ki Kestirimci Bakımın birçok avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları:

a) Malzeme ve işgücü kayıplarının önlenmesi ile bakım maliyetlerinin %25-%30 oranında düşürülmesi,
b) Arızaların %70-%75 oranında düşmesi (MTBF) ve arıza sürelerinin %35-%45 oranında düşmesi (MTTR),
c) İzlenen makinalarda meydana gelebilecek çok önemli arızaların henüz başlangıç aşamasından tespit edilmesi ve arızaların sıfır seviyesine kadar indirilmesi,
d) Plansız duruşlar yerine bizim planladığımız duruşlarda arıza için gerekli işgücü, sarf malzemeler ve yedek parçaların planlanan duruş zamanında kullanıma hazır olması,
e) Üretim planlarına uyulma olasılığını arttırır,
f) Planlı bakım faaliyetlerine büyük bir veri kaynağı ile katkıda bulunması,
g) Makinaların mevcut durumları ve ömürleri hakkında gerçekçi verilerin sağlanması,
h) Kestirimci bakım faaliyetleri ile makinalar iyi durumda olup çalışan makineler gereksiz yere durdurulmamış olur,
i) Bakım gerektiren ekipman yalnızca yakın bir arızadan önce kapatılır. Dolayısıyla duruşlar ve süreleri azalır,
j) Plansız bakıma göre kıyaslandığında yedek parça stokları azaltır,
k) Makinelerin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğinin arttırılması,
l) Makinaların ve işlem ömrünün uzatılmasını sağlar,
m) Çok büyük arızalar neticesinde işgücü, ekipman, malzeme ve duruş kayıplarına sebep olabilecek olumsuzlukların önlenmesi ve kullanım ve bakım maliyetlerini azaltılması,
n) Olası iş kazalarının önüne geçilir ve
o) Elde edilen verilerin Kalite, AR-GE ve ÜR-GE alanlarında kullanılmasına destek sağlar.

Araştırmalara göre Kestirimci Bakım uygulaması yapan işletmelerin sağladığı kazançlar aşağıda belirtilmiştir [62];

a) Bakım faaliyetlerinde azalma: % 25 -30
b) Bozulmalarda azalış % 35 - 45
c) Üretimde artış: %20-25
d) Yatırımın geri dönüş miktarı 10 kat artmıştır.

Bununla birlikte, Kestirimci Bakımın dezavantajları aşağıda aşağıda sıralanmıştır:

a) İşlenecek verilerin toplanabilmesi için birden fazla kaynaktan veri erişimi, veri kalitesi ve veri birleşmesi gibi yüksek talepler,
b) Toplanan verilerin işlenerek olumlu sonuçlar çıkartılması için toplanan ve depolanan verilerin kullanabilme, analiz etme ve işleme yeteneği,
c) Kestirimci bakım için gerekli olacak verilerin toplanmasını ve işlenmesini sağlayacak kalifiye personel ihtiyacı,
d) Kestirimci bakım metotları için gerekli olan sensörler, ses ve titreşim algılayıcıları, termal kameralar gibi donanımlar ile bunların işlenmesinde kullanılacak ekipmanlar ile yazılımların maliyetlerinin çok yüksek olması ve
e) Kestirimci bakım stratejilerine karşı sergilenebilecek olumsuz ön yargılar.

5. J79 TURBOJET MOTORLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM ÖRNEK UYGULAMALARI

Çalışmanın bu bölümünde J79 turbojet uçak motorlarında meydana gelebilecek arızaların titreşim analizi tekniği kullanılarak önceden tespit edilmesi üzerine çalışmalara örnekler verilecektir. Bu çalışmada aynı zamanda uçak motorlarının havadaki titreşim izleme (Airborne Vibration Monitoring - AVM) sisteminin tasarımındaki ve titreşim izleme ve arıza teşhisi yöntemine ilişkin araştırmalardaki yeni başarıları sunulmaktadır. Arızalı olanlar da dahil olmak üzere onbeş motorun titreşim sinyalleri ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Elde edilen ölçüm ve analiz sonuçlarına göre, geliştirilen sistemin güvenilir bir şekilde çalıştırılabileceği ve motor arızalarının önceden belirlenmesinde titreşim analizinin etkili olduğunu kanıtlamıştır.

5.1 J79 TURBO JET MOTOR TANIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Amerika Birleşik Devletleri 'nde General Electric Uçak Motorları tarafından üretilen J79 artyakıcılı (Afterburning) özelliğe sahip turbojet uçak motoru çeşitli savaş ve bombardıman uçakları ve süpersonik bir seyir füzesinde kullanılmak üzere yapılmış eksenel akışlı bir motordur. Motorda bulunan artyakıcı özelliği, motorun yanma odasının üçüncü kademesinde bulunan ilave enjektörler ile atılan havanın tekrar yakılarak ek bir güç elde edilmesini sağlamaktadır. Elde edilen ilave bu güç sayesinde jet uçaklarının kalkışında ve tırmanışında ivmelenmeyi artırmak ve ses hızını aşmasında büyük avantaj sağlamaktadır.

Tablo 5.1: J79 Turbojet motorun genel özellikleri [63].

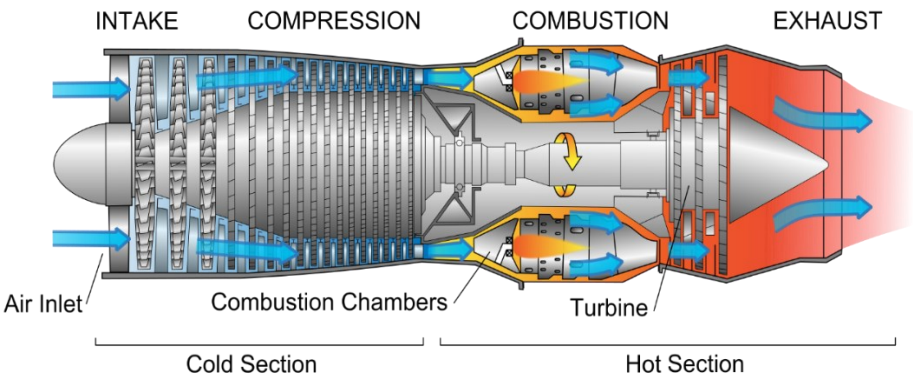
J79 Turbojet Motorun Genel Özellikleri	
Tipi	Artyakıcılı Turbojet Motor
Uzunluğu	5,301 m (208,69 inç)
Çapı	0,992 m (39,06 inç)
Yakıtsız Ağırlığı	1.740 kg (3.835 lb)
Kompresör	17 adet eksenel türbin
Yanma Odası	3 Kademeli
Yakıt Tipi	JP-4 / JP-5

J79 turbojet motorları F-104 Starfighter, B-58 Hustler, F-4 Phantom, A-5 Vigilante ve IAI Kfir uçaklarında kullanılmıştır [63].



Şekil 5.1: F4 Phantom uçağı

Turbojet uçak motorları emiş, kompresör, yanma odaları ve egzos olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Emiş ve kompresör kısımları motorun soğuk bölümü olarak tanımlanırken, yanma odaları ve egzos kısımları motorun sıcak bölümünü oluşturur. Motor tarafından atmosferden çekilen havanın akışı ve basıncı emiş bölümündeki düzenlenerek kompresör bölümüne aktarılır. Kompresör bölümüne gelen hava sıkıştırılıp yanma odalalarının bulunduğu üçüncü bölüme gönderilir. Yanma odalarında sıkıştırılmış formda bulunan hava yakıtla yakılarak ısıtılır. Bu ısıtma sonucunda meydana çıkan gazları hızla dışarı püskürterek dördüncü bölüm olan egzos bölümünden hızla dışarı atılır. Egzos bölümünden dışarı atılan hava basıncı etki-tepki prensibi ile ters yönde bir itme gücü oluşturur. Elde edilen bu güçle motorların bağlı olduğu hava aracının ileri yönde hareket etmesi sağlanır.



Şekil 5.2: J79 turbojet uçak motoru [64].

5.2 TİTREŞİM İZLEME VE ARIZA TEŞHİS SİSTEMİ

Sistem, uçuş öncesi ve uçuş esnasında sensörler aracılığı ile algılanan motor titreşimlerinin izlemesi, analiz edilmesi ve titreşim genlik değerleri ile karşılaştırılması sonucu arıza hakkında karar verme prensibi ile çalışır. 1960'lı yıllardan günümüze kadar olan süre içerisinde gelişmiş uçak motorları hava ve yer şartlarına uygun çeşitli titreşim izleme sistemleriyle donatılmıştır. Uçak motorlarında kullanılan titreşim izleme tekniği iki önemli alanda kullanılmaktadır. Bunlardan biri motor takatsizliğini önlemek amacı ile motora giren havanın ölçümü için rotor titreşimlerini izlemek ve sürekli denetim alında tutmak, diğeri ise titreşim ölçümleri motorda meydana gelebilecek arızaların önceden tespitini yapmaktır.

Eski nesil uçak motorlarında bulunan Motor Diyagnostik Sistemi titreşim ölçümü yapabilmekte ancak frekans ve genlik gibi bilgiler ile değerlendirmediği için sadece motorun kütle titreşim değerini kayıt etmekte idi. Diyagnostik sisteminde, sensörler tarafından algılanan titreşimlerin değerleri belirlenmiş olan titreşim eşikleri ile karşılaştırma, limitleri aşıp aşmadığına karar vermek gibi konularda zayıf olması nedenleriyle uçuş sırasındaki motorlardaki arızaları iyi teşhis edemiyordu. Ayrıca elde edilen titreşim bilgilerinin karşılaştırıp değerlendirildiği bir gelişmiş bilgisayar, yazılım sistemleri yoktu. Uzmanlar tarafından titreşim izleme metotu ile arıza teşhis yöntemleri üzerinde çok başarılı çalışmaların yapılması ve sistemin geliştirilmesi ile titreşim analizinin uçak motorlarında kullanımı sağlanmıştır. J79 Turbojet motorda gerçekleştirilen titreşim izleme ve arıza tespit süreci şu şekildedir:

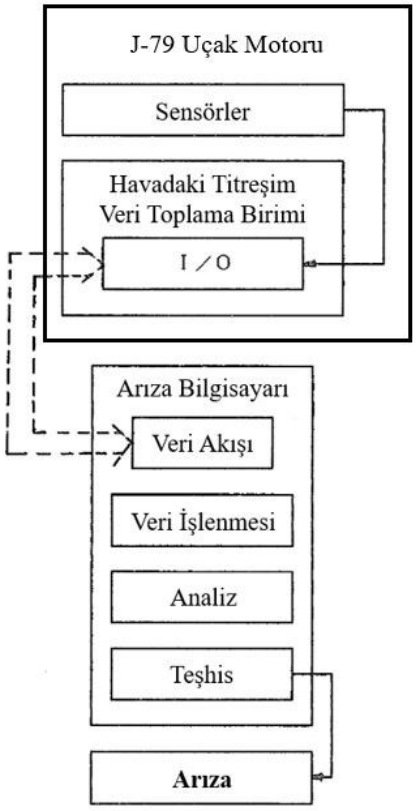
a) Öncelikle faal olan motorların tüm frekans eşikleri tespit edilerek sisteme tanımlanır. Motorların durumunun izlenebilmesi için elde edilen titreşim değerlerinin ivmesinin toplamı (G) ile hızlarının toplamı değerleri (mm/s) alınır,
b) Bilgisayarda toplanan titreşim değerlerinin arıza eşik sınırları içerisinde olup olmaması şartına göre spektral benzerlik teorisinden teşhis yöntemi kullanılır,
c) Elde edilen verilerin bilgisayar destekli analiz edilmesi ile motorda meydana gelen veya gelmesi beklenen arıza tipleri belirlenir ve
d) Arıza ihtimalinin olması durumunda dahi uçuş anında veya yerde arıza ikaz sisteminde rapor etmesi ile gerekli tedbirlerin alınması sağlanır.

Turbojet motorlar çalışması anında çok yüksek ses ve ısı meydana geldiğinden ultrasound ve termal izleme ile durum izleme ve arıza tespit çalışmalarında sağlıklı sonuçlar vermesi beklenemez. Bu nedenle motor durum izlenmesinde en uygun tekniğin titreşim analizi olduğu ortaya çıkmaktadır. Jet motorlarının çalışmasında çok yüksek titreşimler oluşturduğu bilinmekte ancak motorların arızasız çalışmasındaki titreşim frekans eşiği ve genlik durumlarının bilinmesi titreşim analizinin yapılmasını mümkün hale getirmektedir.

Bu çalışmada 15 adet J79 Turbojet motorunun titreşimleri ölçülmüş ve titreşim özellikleri detaylı olarak incelenmiş olup 4 adet motor arızası önceden tespit edilmiştir.

5.2.1 Sistemin Tasarımı

Titreşim izleme ve arıza tespit sistemi, uçak motorları ve motor yuvası üzerine tespit edilmiş titreşim sensörleri, titreşim verilerinin toplandığı bilgisayar ile hava ve yer arıza raporlama sisteminden oluşur. Titreşim izleme ve teşhis sisteminin bir şeması Şekil 5-2 'de gösterilmektedir.

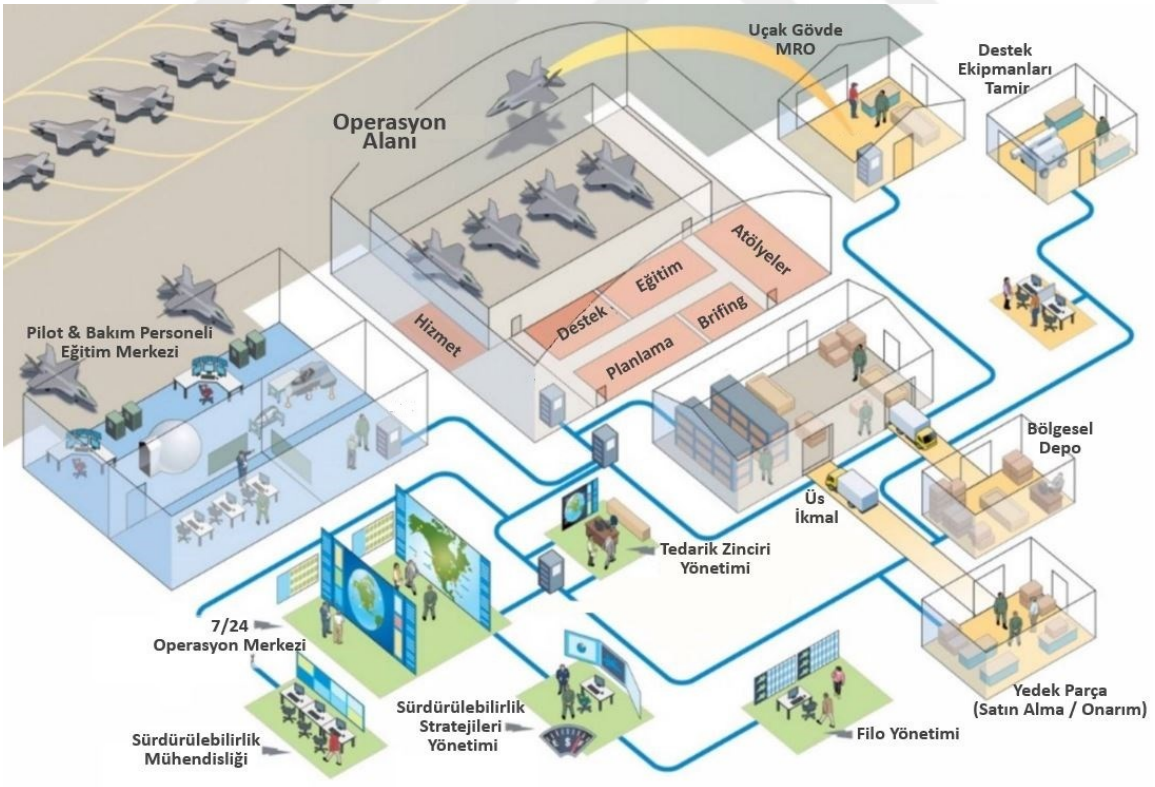


Şekil 5.3: Havadaki titreşim izleme ve teşhis sisteminin şeması [65].

Sensörler elde edilen titreşim değerlerini elektrik sinyallerine çevirerek verileri transmiterler aracılığı ile arıza bilgisayarına gönderir. Arıza bilgisayarı almış olduğu titreşim verilerini işleyerek analiz eder daha sonra girilmiş olan arızalara ait eşik değerleri ile karşılaştırılır, çıkan sonuca göre arızanın teşhisi yapar. En son aşamada ise motor arızasının tipi hakkında pilota ve yer birimlerine gerekli raporlamayı yaparak meydana gelebilecek hava veya yer kazalarının önlenmesinde hayati önem taşıyan bir katkıda bulunur.

5.2.2 Sistemin Teknik Özellikleri

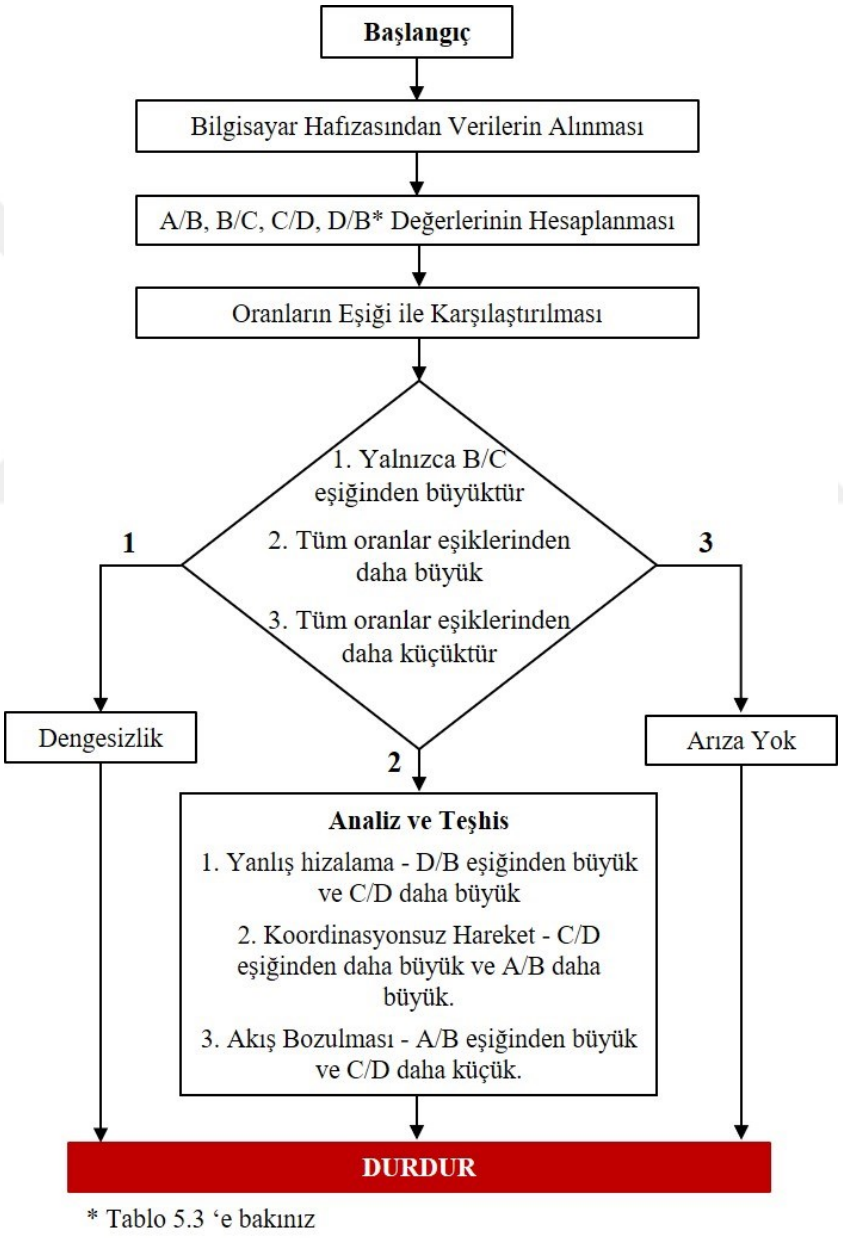
Havadaki veri toplama sistemi bir mikrobilgisayar tarafından kontrol edilir ve dijital verileri bellek kartına kaydeder. Sistem motorların sıradışı titreşimleri ve arızalarının analiz edilebilmesi için uçuş halindeki geniş bant tüm titreşim sinyallerini kayıt edebilir. Ayrıca elde edilen verilerin planlama, bakım ve ikmal kanalları ile ilişkisi olması durumunda verilerin çevrimiçi işlenmesi ve analiz edilmesi için yerdeki genel amaçlı bir bilgisayara doğrudanda bağlanabilir.



Şekil 5.4: Havada veri toplama sisteminin yer ile olan ilişkişi [66].

Havadaki veri toplama sistemi, aşağıda listelendiği gibi küçük boyut, yüksek örnekleme hızı, geniş bellek kapasitesi ve geniş bant avantajlarına sahiptir:

a) Örnekleme hızı: 1 KHz veya 25.6 KHz
b) Toplam bellek kapasitesi: 192 K veya 1M bayt
c) Sinyalin frekans bandı: 0-400 Hz veya 0-10 KHz
d) Hacim: 220X140x70 (mm)



Şekil 5.5: Havada veri toplama sistemi genel akış şeması [65].

Veri işleme ve titreşim analizi için bir dizi bilgisayar yazılımı düzenlenir. Yazılım, veri aktarım ve dönüştürme programı, dijital veri işleme programı, titreşim izleme ve arıza teşhis programını içerir. Arıza teşhis programının genel akış şeması Şekil 5.4'te verilmiştir. Elde edilen verilerin depolandığı bellek kartı sayesinde uçakta iki ay boyunca tutabilir, bir bilgisayara bağlandığında hafıza kartında saklanan veriler uzun süre saklanmak üzere bir bilgisayarlara iletilebilir.

5.3 TİTREŞİM İZLEME VE ARIZA TESPİT UYGULAMASI

Uçuş güvenliği için uçak motorlarında meydana gelebilecek arızaların özellikle önceden tespit edilmesi çok önemlidir. Motorların ve motor yuvasının her noktasına yerleştirilen titreşim sensörlerinden gelen titreşim bilgilerinin değerlendirilmesi ile uçuş sırasında uçak motorlarının durumları sürekli olarak izlenir ve denetlenir. Yine uçuş öncesi ve uçuş sırasında meydana gelebilecek motor arızalarını tespitinde önemli rol üstlenmiştir.

5.3.1 Titreşimin Değerlendirilmesi

Titreşim sensörleri tarafından alınan titreşim frekeanslarının değerlendirilmesi ile uçak motorlarının titreşim durumları hızlı bir şekilde tespit edilir. Bu amaca ulaşmak için motor üzerinden belirli bir banttaki titreşimlerin toplamı değerlendirme parametresi olarak alınır. Titreşim toplamı ivmenin G cinsinden toplamını ve V hızının toplamını içerir. G bir sensörden gelen titreşim sinyali 70 ile 200 Hz bant geçiren filtreye aktarıldıktan sonra dedektör tarafından elde edilen bir değerdir. Sinyal bandı motor rotorunun temel frekansını, 1/2 harmoniği ve frekanslarını içerir. 70 ile 200 Hz bandındaki tüm "parazit sinyallerinin". V bant geçiren filtreden gelen sinyal entegre edildikten sonra değerlendirilir.

Uçuş sırasındaki motorun yaymış olduğu titreşim değerlerinin yorumlanması için kalkış durumunda motor titreşimini izlemek için G bilgileri, uçuş durumundaki değerlendirmeler için V değerleri kullanılır. G ve V titreşim eşikleri arızasız motorlardan alınan gerçek verilerin olasılık analizi yoluyla belirlenir. Arızalı motorların titreşim değerleri eşik değerleri ile kıyaslanarak motorlarda arıza olup olmadığına karar verilir.

5.3.2 Arıza Teşhisi

Titreşim izleme analizi, motor arızalarını çok şiddetli titreşimde anında tespit edebilse de, bazen yanlış yorumlama yapabilirler. Ayrıca motor arızasının türünü ve kapsamını da analiz edemeyebilir. Bu olay kestirimci bakım ihtiyacını karşılayamaz. Bu durumda titreşim analizi geniş bant titreşim sinyalinin genliği ve frekansından faydalanılabilir. Bu metot motorun çalışmasının normal olup olmadığına karar verilmesi ve ardından arıza tipinin belirlenmesinde çok önemlidir. Bu çalışmada spektral benzerlik teorisine dayanan bir teşhis yöntemi sunulmaktadır. Yöntemin içeriği aşağıdaki tabloda gösterildiği gibi 0 ile 400 ft arasındaki güç spektrumu baz alınmış bu değerler Tablo 5.2 'de gösterildiği gibi dört banda bölünür. Arıza tipi, iki bant üzerindeki en büyük güç spektrumunun oranlarına göre değerlendirilir.

Tablo 5.2: Frekans bandı [65].

Spektral Tepe	A	B	C	D
Band (Hz)	45-100	150-200	225-300	305-400

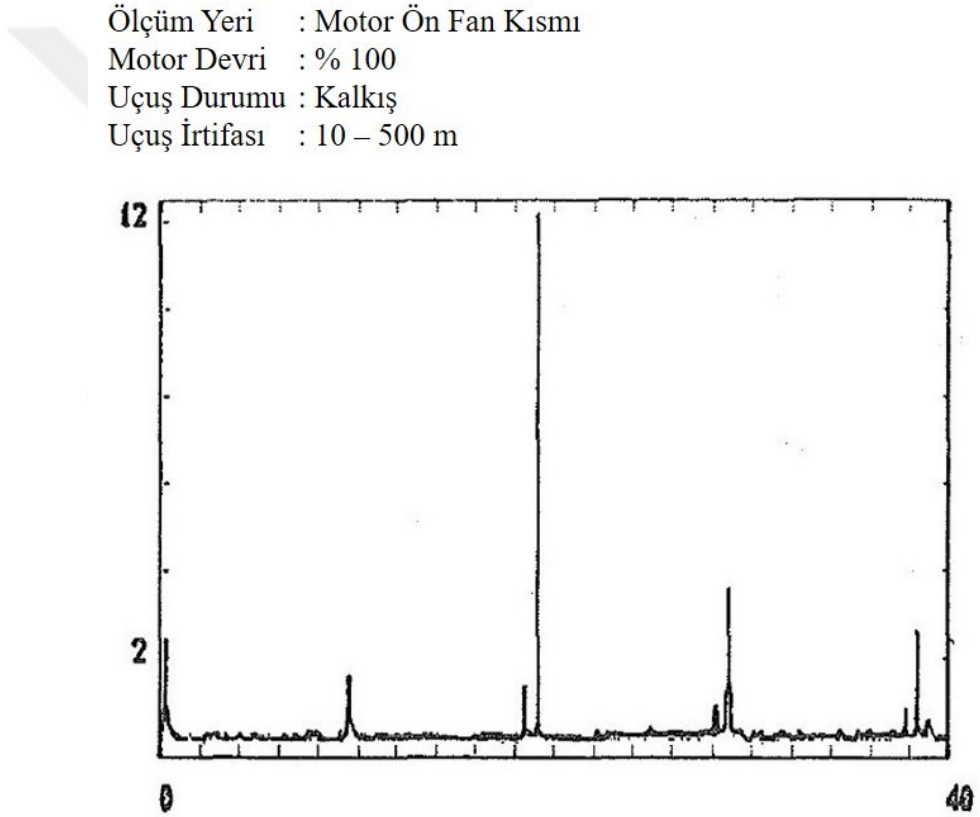
Teorik analiz ve deney yoluyla tüm oranların eşik değerleri ve bunlara karşılık gelen hata türleri elde edilmiştir. Bunlar Tablo 5.3 'de verilmiştir. Spektrumlar arasındaki benzerliğin değerlendirilmesi için, spektrumu analiz etmek için "spektral tepe değerlerinin iki bant üzerindeki oranı" yöntemi kullanılır.

Tablo 5.3: Oran ve arıza eşik karşılaştırma tablosu [65].

Ölçüm Yeri	Oran	Eşik	Arıza Tipi	Arıza Kaynağı
Motor Ön Türbin Kısmı (Türbin dış halkası)	B/C	3.0 (1.0)	Dengesizlik	Daha büyük sıcaklık deformasyon. Düzensiz korozyon ve sürtünme
	C/D	0.5 (0.1)	Rotorların koordine olmayan hareketi	Rotorların düşük eş merkezliliği. Destekleyici rijitlik azalan
	A/B	0.2	Hava giriş akışının bozulması, türbilans	Hava akışının kendinden uyarımlı titreşimi. Motor dalgalanması.
	D/B	1.5 (0.5)	Yanlış hizalama	Şaft eğriliği. Şaft ayarsızlığı. Rulman ve yatak arızaları.

5.3.3 Rotor Dengesizliği

Motor yer testleri sırasında titreşim izleme sisteminin alarm vermesi nedeniyle uçmasına izin verilmeyen bir uçak vardı. Testlerin uçak kalkış aşamasına gelindiğinde motor ön fan rotor kısmının (türbin dış halkası) ivme (G) değeri toplam 4.5 g idi ve bu değerin eşik limiti olan 4.0 g ‘yi aştığı görüldü. Bilgisayar tarafından yapılan değerlendirme sonucu B 'nin C 'ye oranının 3.5 olduğunu, bu da eşiğin (1.0) üzerinde olması nedeni ile arızanın türbin rotor dengesizliği kaynaklı olduğuna karar verildi. Arızalı olan motor fabrikaya gönderek rotor dengesizlik arızasının giderilmesi sağlandı. Motor spektrumu Şekil 5-5 'te gösterilmektedir.

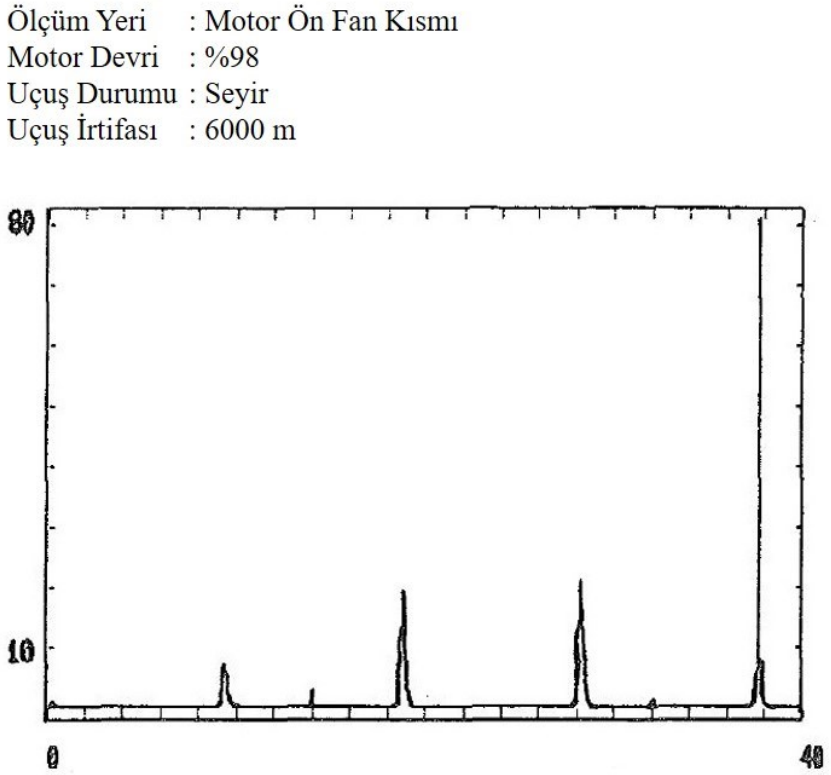


Şekil 5.6: Takeoff motor spektrumu [65].

5.3.4 Yanlış Hizalama

Uçak içi titreşim değeri limitin üzerinde olan bir motor tespit edildi. Uçuş anında motor ön fan kısmında tespit edilen hız toplamı 40 mm/sn idi, bunun da limiti (35 mm/sn) aştığı tespit edildi ve bu bir arızaya işaretdi. Yapılan değerlendirmede D'nin B'ye oranı 3.9 'du ve 1.5 'ten daha büyüktü (Tablo 5.3).

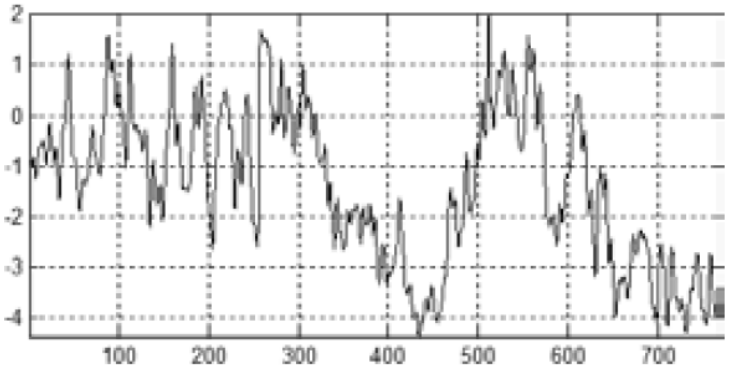
Bu değerlendirmeye göre motorun arızasının yanlış hizalamadan kaynaklandığına karar verildi ve motor fabrikaya gönderildi. Bakım merkezinden gelen raporda motor şaft rulmanlarının birinde aşırı derecede aşınma ve deformasyon olduğu bu nedenle motorda eksen kaçıklığı tespit edilmiştir. Motor spektrumu Şekil 5.6 'da gösterilmektedir.



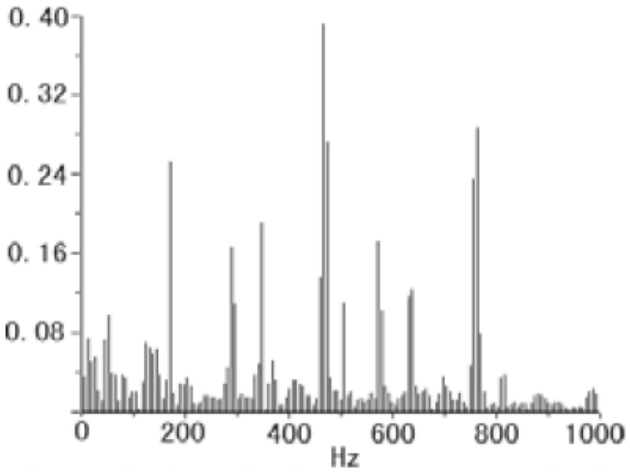
Şekil 5.7: Uçuş motor spektrumu [65].

5.3.5 Kırık Rotor Kanatçığı

Motor testleri sırasında çalışmanın 300 ncü ile 760 ncı saniyeleri aralığında (Şekil 5.7) motor kademeli olarak tam güce getirildiğinde rotor titreşim değerinin eşik değerinin üzerinde aşırı bir şekilde yükseldiği görüldü. Spektral analiz grafiği (Şekil 5.8) incelendiğinde titreşim frekanslarının 180 Hz, 480 Hz, 760 Hz olmak üzere toplam üç tepe noktası oluşturduğu ve genliğin sırasıyla 0,25, 0,40, ve 0.29 Amp olduğu görüldü. Test sonucunda tespit edilen dengesizlik ve sürtünme olayının olduğu ve bu arızanın sürekliliğin görülmesi öncelikle rotor kaynaklı arıza olduğunu işaret etmekteydi. Motor incelenmek üzere fabrikaya gönderildi.



Şekil 5.8: Kırık kanatçık kaynaklı titreşimin genliği [67].



Şekil 5.9: Kırık kanatçık kaynaklı titreşimin spektrumu [67].

Fabrika bakım ekibi yapılan inceleme sonucunda rotor kanatçıklarının (bıçak) hasarlı olduğu (Şekil 5.9) ve bu hasarlı kanatçıkların aşırı titreşime sebep olduğu tespit edilmiştir. Hasarlı olan kanatçıklar yenileri ile değiştirilmiş motor tekrar test için çalıştırıldığında herhangi bir anormal titreşim değerinin alınmadığı, herşeyin yolunda olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10: Hasarlı rotor kanatçıkları [67].

5.3.6 Yanlış Alarm

Yapılan yer testlerinin uçuş şartları aşamasında titreşim izleme sistemi bir arıza verdi. Ancak sensörlerden elde edilen motor titreşiminin değerleri incelendiğinde, Tablo 5.3 'de gösterilen oranların hiçbirinin eşik değerinin aşılmadığı, tüm titreşim değerlerinin titreşim limitleri içerisinde olduğu, arıza ikazının anlık olduğu ispatlandı. Sonuçların kesin olması nedeni ile uçak test uçuşuna verildi ve test uçuşunda herhangi bir anormallik görülmemiştir. Kontrole dayalı uçuşları sonunda motor planlanan ömrüne kadar çalışmıştır.

5.4 ÇALIŞMANIN SONUÇLARI

a) Elde edilen geniş bant titreşim değerlerinin uçuşun öncesi, uçuş anı ve uçuş sonu tüm aşamalarında toplanabilir ve saklanabilir olması,

b) Uçakta bulunan arıza tespit ve değerlendirme bilgisayarı karmaşık uçak ortamında hızla değişen sinyalleri başarı ile değerlendirip sonuçlandırdığı ispatlanmıştır. Yüksek hızda örneklenen ve büyük kapasitede saklanan uçuş halindeki çok kanallı geniş bant sinyallerinin yerde analiz edilebilir olduğu görülmüştür,

c) Frekans spektrum analizi ve genlik analizi tekniklerinin turbojet motor arızalarının teşhis edilmesinde en etkili araçlardan biri olduğu görülmüştür,

d) Çalışmada arızalarla ilgili titreşim değerlerinin vermiş olduğu arıza tipleri yanlış alarm dahil olmak üzere tam olarak anlaşılmış ve fabrika bakım personelinin yapmış olduğu tespitler ile ispatlanmıştır,

e) Motorlarda yer ve hava şartlarında test edilmiş olası bir arıza, önceden tespit edilerek uçaklarda motor kaynaklı arızaların önüne geçilmiştir. Bu sayede ölüm yaralama ve uçak kayıplarının önüne geçilmiştir.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada TPM ‘den planlı bakımlara, planlı bakımlardan kestirimci bakıma doğru bir yol izlenmiştir. Konuların daha iyi anlaşılması amacı ile kestirimci bakım konularına geçmeden önce kestirimci bakımların amacı olan sıfır hata, sıfır arıza ve etkin ekipman verimliliği gibi hedefleri içerisinde barındıran TPM konuları birinci bölümde ele alınmıştır. Kestirimci bakımın planlı bakımlar içerisindeki yerinin ve öneminin daha iyi algılanması için ikinci bölümde plansız ve planlı bakımlar ile planlı bakımı oluşturan bakım stratejileri hakkında bilgiler verilmiş, üçüncü bölümde ise planlı bakım stratejilerinden kestirimci bakım ve uygulamaları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

İşletmelerin bakım politikalarını belirlemedeki en önemli kriter maliyet olarak karşımıza çıkmaktadır. Kestirimci bakım diğer planlı bakım tekniklerine göre daha üstün olmakla birlikte kullanılan teknoloji nedeni ile daha maliyetli bir bakımdır. Ancak bu bakım tekniği ile ekipmanların arızada geçen sürelerini en aza hatta sıfıra indirildiğinde kar/zarar ilişkisine bakıldığında ekipman, malzeme ve işgücü kayıplarının maliyeti kapsamında değerlendirildiğinde aslında kârlı ve prestijli bir bakım tekniğidir. Günümüz teknolojisinde üretimde kullanılan ekipman ve makinaların karmaşık yapılarına klasik bakım tekniklerinin yetersiz kaldığı görülmekte bu nedenle kestirimci bakım metotlarının kullanımını zorunlu hale getirmiştir.

Kestirimci bakım uygulamaları işletmeler için hayati önem taşımaktadır. Kestirimci bakım gereği yapılan ölçüm ve analizler ile çalışan makinaların durumları hakkında bilgi sahibi olmamızı, kontrol altında bulunan makinaların ne zaman arızalanacağı veya arıza meydana gelmeden önce ne zaman planlanması gerektiğini tahmin etmemizi sağlar. Önceden tespit edilen arızaların planlanması ile arıza kaynaklı duruşların önüne geçmemizi sağlayacak ve üretimin beklenmedik kesintilere uğramasını engelleyecektir.

TPM ve Kestirimci bakım uygulamaları ile kalite standardında yükseliş, ekipmanların güvenilirliğinde artış gözlenmiştir. Yine kestirimci bakımın TPM ile entegre edilmesi ile TPM kaynaklı sürekli iyileştirme ve disipline etme teknikleri ile arızalarda tespit ettiğimiz olumsuzlukların iyileştirilmesi ve bu iyileştirmelin kalıcı olması sağlanacaktır.

Sonuç olarak, kestirimci bakım uygulamaları bir varış noktası değil, sürekli devam edecek olan bir yolculuk olarak görülmekte, her alanda sürekli kontrol ve iyileştirme çalışmaları ile insiyatifi makinalara ve belirsizliğe bırakmamak gerekmektedir. Yine unutulmalıdır ki makinaları tasarlayan, üretenler ve çalıştıranlar olarak üretmiş olduğumuz makinalara ve sistemlere hakim olmamız ve onları kontrolümüz altında tutmalıyız. Kullandığımız makinalar bizi değil, ancak biz makinaları durdurmalıyız.

REFERANSLAR

[1] Nakajima, S. (1989). TPM Development Program Implementing Total Productive Maintenance. Cambridge MA: Productivity Press Inc.

[2] Jeon, J., Kim, C., & Lee, H., (2011). Measuring Efficiency of Total Productive Maintenance (TPM). A Three-Stage Data Envelopment Analysis (DEA) Approach. UK: 911-924.

[3] Wireman, T. (1991). Total Productive Maintenance An American Approach. New York: Industrial Press.

[4] Tiryakioğlu, U., Utaş, T., Savaş, H. (2011). Toplam Verimli Yönetim: İstanbul Sanayi Odası. İstanbul: Mürettebat Yayınları.

[5] Suzuki, T. (1994). TPM in Process Industries: Originally Published By The Japan Institute Of Plant Maintenance. New York: Productivity Press Inc.

[6] Shirose K., Nakajima S. (1996). TPM Team Guide. New York: Productivity Press Inc.

[7] Tazegün, A. (2009). Toplam Verimli Bakım ve Çimento Sektöründe Uygulamaları. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Edirne.

[8] Eti, M.C., Ogaji S.O.T., Probert S.D., (2004). Implementing Total Productive Maintenance in Nigerian Manufacturing Industries, Applied Energy, Cilt:4, Sayı:79, 2004, ss. 385-401, UK.

[9] Suzaki, K. (2013). İmalatta Mükemmellik Yolu Sürekli İyileştirme Teknikleri. İstanbul: Optimist Yayınları.

[10] Yenen V. Z., Görener A., (2007). İşletmelerde Toplam Verimli Bakım Çalışmaları Kapsamında Yapılan Faaliyetler ve Verimliliğe Katkıları, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Sayı:11, İstanbul.

[11] Willmott, P., McCarthy, D. (2001). TPM a Route to World-Class Performance. India: Replika Press.

[12] Ahmed, T., Ali, S. M., Allama, M. M., ve Parvez S. S. (2010). A Total Productive Maintenance (TPM) Approach to Improve Production Efficiency and Development of Loss Structure in a Pharmaceutical Industry, Global Journal of Management and Business Research, 10 (2): 186-190, USA.

[13] Kendir, A. (2007). Toplam Verimli Bakım Planlamasının Hava Araçlarına Uygulanması: Cessna Model R172H (T-41D) Uçağı Pervane Çatlak Çentik Kontrolleri Üzerinde Uygulama. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

[14] Elvan, F. (2012). Türkiye 'de Toplam Verimli Bakım Uygulaması Yapan Seçilmiş Kuruluşların Kıyaslanması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.

[15] Koç, G., Durak, V., (2017). Dökümhanelerde Otonom Bakım Çalışmalar, Tüdöksad Akademi 9. Döküm Kongresi, Eskişehir.

[16] Sezen, B., (2011). Üretim Yönetiminde Yeni Yaklaşımlar ve Uygulamalar, Elif Yayınevi, Ankara.

[17] Tiryakioğlu, U., Utaş, T., Savaş, H., (2011). Toplam Verimli Yönetim "TPM", Toplam Verimli yönetim "TPM". İstanbul Sanayi Odası, İstanbul Tasarım ve Uygulama, Mürettebat Reklamcılık, İstanbul.

[18] Tekin, İ. (2009). Üretim Kayıp Maliyetlerinin Belirlenmesi ve Bir Uygulama, (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

[19] Başer, H. (2011). Lean Manufacturing, Value Stream Mapping a Case Study in a Production Company. Fatih Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[20] Goldratt E. M., Cox J, (2012). Amaç, Çev. Ayşe Bilge Dicleli, Optimist Yayınları, İstanbul.

[21] Lyonnet, P. (1991). Maintenance Planning Methods and Mathematics. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://doi.org/10.1002/qre.4680090514

[22] Baskak, M., (2005). İstanbul Teknik Üniversitesi İşletme Fakültesi Endüstri Müh. Bölümü Bakım Yönetimi Ders Notları, İstanbul.

[23] Er, E. (2004). Bakım Yönetimi ve Bilgisayarlı Bakım Yönetim Sistemlerinin Türkiye'de Uygulama Düzeyi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[24] Garcia, M. A., Sanz-Bobi, Pico, J. (2006). SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance. "Application to the health condition monitoring of a wind turbine gearbox", Comput. Ind., 57, 552–568, USA.

[25] H., Bean, W. C. (2011). State-of-the-art predictive maintenance techniques. IEEE Trans. Instrum. Meas., 60, 3480–3492, USA.

[26] Zafer, N., Türkeş, E., & Kasap, M. (2003). Bakım Mühendisliği ve Yeni Teknikler. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, Denizli.

[27] Senshero Predictive Maintenance. (2021). Reaktif Önleyici ve Kestirimci Bakım. Erişim: 16 Aralık 2021 adresi http://senshero.com/tr/content/reaktif-onleyici-ve-kestirimci-bakim

[28] Hancı, G. (2009). Lastik Endüstrisinde Kullanılan Kestirimci Bakım Uygulamaları. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

[29] Murphy, T. (2021). Understanding Ultrasonic Signal Analysis. Erişim: 19 Aralık 2021 adresi https://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942962662638/filePointer/399590942964788053/fodoid/399590942964788051/murphy_usound_doc.pdf

[30] Mobley, K., Higgins, L., Wikoff, D., (2008). Maintenance Engineering Handbook. McGraw-Hill eBook, New York.

[31] Fried, B. (2021). Machinery Lubrication Ultrasound for Better Lubrication, Practicing Oil Analysis. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://www.machinerylubrication.com/Read/670/ ultrasound-lubication

[32] Industrial Reliability Guide, Preventing Bearing Failure Using Ultrasound, http://reliabilitylink.com/preventing-bearing-failure-using-ultrasound/ (20.12.2021)

[33] Denli, H. (2007). Kestirimci Bakım ve Uygulamalarının İyileştirilmesi. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Mersin.

[34] Reliability Edge. (2021). Acoustic Lubrication of Bearings. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://edgereliability.com/service/ acoustic-lubrication-of-bearings/

[35] Vikipedi Özgür Ansiklopedi. (2021). Elektrik Arkı. Erişim: 30 Aralık 2021 adresi https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_arkı

[36] Vikipedi Özgür Ansiklopedi. (2021). Korona Deşarjı. Erişim: 30 Aralık 2021 adresi https://tr.wikipedia.org/wiki/Korona_deşarjı

[37] CTRL Systems (2021). Ultrasound Electrical Systems Solutions. Erişim 16 Aralık 2021 adresi https://www.ctrlsys.com/electrical-inspection-solutions

[38] Doğan, E. (2010). Toplam Üretken Bakım Uygulamasından Başarı Sağlamada Örgütsel Öğrenmenin Rolü ve Bir Üretim İşletmesindeki Uygulama. Osman Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

[39] Gürsoy, M., Çolak, U., Gökçe, M., Akkulak, C., Ötleş, S., (2019). Endüstri İçin Kestirimci Bakım. International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 56-66, İzmir.

[40] Zhou, X., Xi, L., Lee, J. (2007). Reliability centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. Reliability Engineering & System Safety, 92, 530-534, China.

[41] Topaz, K., Sümen, H., (2003). Kestirimci Bakım Yöntemini Uygulamak. MakinaTek Dergisi, Sayı:63, Bileşim Yayınevi, İstanbul.

[42] Alexander, J. (2019). Efficent Plant, Add Ultrasound to Electrical Inspections. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi www.efficientplantmag. com/2019/04/add-ultrasound-to-electrical-inspections/

[43] Kalyoncu, M., (2006). Titreşim Analizi ile Makina Elemanları Arızalarının Belirlenmesi. Mühendis ve Makina, Cilt: 47, Sayı: 552, Ankara.

[44] Dokumacı, E., Ergüven, N., (1994). Mekanik Titreşimler ve Gürültü Kontrolü. TMMOB Yayın No 169, Cilt 1, Bölüm 6, Ankara.

[45] Köse, K., (2004). Makina Arızalarının Belirlenmesinde Titreşim Analizi. Mühendis ve Makina, Cilt: 45 Sayı: 538, Ankara.

[46] Orhan, S. (2002). Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analizi İle Kestirimci Bakımı. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, Kırıkkale.

[47] Parida, S., Kotu, N.R., and Prasad, M.M, (2007). Development And Implementation Of Reliability Centered Maintenance Using Vibration Analysis. Experiences At Rourkela Steel Plant, Roma.

[48] Orhan, S., Aktürk, N. ve Çelik, V., (2003). Bir santrifüj pompa rulmanlarının çalışabilirliğinin analizi ile belirlenmesi. G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi Cilt 16, Sayı 3, Sayfa 543–552, Ankara.

[49] Ateş, M., C. (2016) Frekans Tanım Teknikleri. Erişim: 22 Aralık 2021 adresi https://www.voltimum. com.tr/ haberler/frekans-tanim-teknikleri

[50] Baykara, V. İ. (2009). Titreşim analizi ile şanzımanlarda arıza teşhisi ve kestirimci bakım. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.

[51] Güngör, A. İ., (2007), Kestirimci Bakımda Titreşim Analizi. Mühendis ve Makina, Cilt : 48, Sayı: 570, sf. 27, Ankara.

[52] Kirazlılar, B., (2007). Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri, Birsen Yayınevi, ISBN:978-975-511-463-7, İstanbul.

[53] Vikipedi Özgür Ansiklopedi. (2021). Spektrum. Erişim: 16 Aralık 2021 adresi https://tr.wikipedia.org/wiki/Spektrum

[54] Vikipedia The Free Encyclopedia. (2021). Waveform. Erişim: 16 Aralık 2021 adresi https://en.wikipedia.org/wiki/Waveform

[55] Yaman, G., Karadayı, H., (2014). Titreşim Analizi ile Pompalarda Arıza Tesbiti ve Kestirimci Bakım İçin Örnek Bir Çalışma. Tesisat Mühendisliği Dergisi Sayı 140, İstanbul.

[56] Guard Filter. (2021). Stauf Hidrolik Ölçüm Setleri. Erişim: 28 Aralık 2021 adresi https://www.guardfilter.com/templates/filter/upload/file/products/1_Stauff_Hidrolik_Olcum_Setleri.pdf

[57] Çalışan, M., Türkoğlu, İ., (2011). Termal Kameralar Ve Uygulamaları. Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Elazığ.

[58] Demirci, B., Korkmak C., (2016). Termal Video Görüntüleme. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, Sayı 458, Ankara.

[59] JPS Reliability. (2021). Thermography Erişim: 28 Aralık 2021 adresi https://jpsreliability.com/our-services/thermography

[60] Eker, S., Ayaz, E., (2002). Endüstriyel Süreçlerde Durum İzleme Ve Öngörülü Bakım Teknolojileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Dergisi, Cilt 1 Sayı 1, İstanbul.

[61] Otomasyon Okulu. (2019). Asenkron Motorun Yapısı ve Parçaları. Erişim: 28 Aralık 2021 adresi https://otomasyonokulu.com/2019/02/04/asenkron-motorun-yapisi-ve-parcalari/

[62] Bilginer, S. (2021). Türkiye ‘nin Endüstri 4.0 Platformu. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://www.endustri40.com/endustri-4-0-ile-kestirimci-bakim

[63] Vikipedia The Free Encyclopedia. (2021). General Electric J79. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://en.wikipedia.org/wiki/ General_Electric_J79 (20.12.2021)

[64] Vikipedi Özgür Ansiklopedi. (2021). Turbojet. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://tr.wikipedia.org/wiki/Turbojet

[65] Yi, J., (1987). Vibration Monitoring And Fault Diagnosis Of Inflight Aircraft Engines. Aeronautical Technology Research Center, China.

[66] Simon, A. (2016). F-35 – Fighter Jet Maintenance in The Age of Data. Erişim: 20 Aralık 2021 adresi https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/f-35-fighter-jet-maintenance-in-the-age-of-data/#

[67] Jin, X., Yang, H,. Wang H., (2012). Fault Diagnosis for Civil Aviation Engine Test Based on the Vibration Signal. Procedia Engineering, China.