

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LASTİK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN  
KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. Gürkan HANCI**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vahdet UÇAR**

**Haziran 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LASTİK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN  
KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

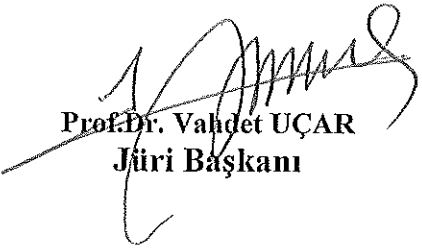
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. GÜRKAN HANCI


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALAT

Bu tez 19 / 06 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof.Dr. Vahdet UÇAR  
Jüri Başkanı

  
Prof.Dr. Recep KOZAN  
Üye

  
Doç.Dr. H.Özkan TOPLAN  
Üye

## **TEŞEKKÜR**

Bana bu çok değerli konuda çalışma firsatı veren, danıŐmanlıęımı üstlenerek yoğun çalışma temposuna rağmen her zaman her konuda yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Vahdet UÇAR'a, desteklerini her zaman gördüğüm Goodyear Lastikleri T.A.Ő. fabrikasındaki tüm çalışma arkadaşlarıma, çalıŐmamın ve daha da önemlisi hayatımın her aşamasında sonsuz sabır, sevgi, saygı ve hoşgörülerıyla bana destek olan sevgili aileme teŐekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xv

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Bakım Onarım.....	3
1.2. Bakım Teknikleri.....	4
1.2.1. Arıza çıktıkça bakım.....	5
1.2.2. Koruyucu (Periyodik) bakım.....	6
1.2.3. Önleyici (Proaktif) bakım.....	7
1.2.4. Kestirimci (Uyarıcı) bakım.....	8

## BÖLÜM 2.

KESTİRİMCİ (UYARICI) BAKIM.....	9
2.1. Giriş.....	9
2.2. Kestirimci Bakım Kavram ve Teknikleri.....	10
2.3. Vibrasyon (Titreşim) Ölçüm ve Analizi.....	12
2.3.1. Titreşim parametreleri.....	14
2.3.2. Kullanılacak vibrasyon parametresinin seçimi.....	19
2.3.3. Titreşim sensörleri.....	20
2.3.3.1. İvme sensörleri.....	20

2.3.3.2. Hız sensörleri.....	20
2.3.3.3. Deplasman sensörleri.....	20
2.3.4. Titreşim ölçüm yönleri.....	21
2.3.5. Arızalar ve titreşim ilişkisi.....	22
2.3.5.1. Rotor titreşim bölgesi.....	22
2.3.5.2. Eleman geçiş frekans bölgesi.....	23
2.3.5.3. Yüksek frekans bölgesi.....	23
2.3.6. Dalga form ve spektrum grafikleri.....	24
2.3.7. Makinelerde görülen arızalar ve titreşim frekansları.....	25
2.3.7.1. Balanssızlık (Dengesizlik).....	25
2.3.7.2. Eksen kaçıklığı.....	28
2.3.7.3. Mekanik gevşeklik.....	31
2.3.7.4. Dişli arızaları.....	34
2.3.7.5. Rulman arızaları.....	34
2.3.7.6. Elektriksel arızalar.....	39
2.4. Yağ Analizi.....	43
2.4.1. Motor yağı analizi.....	44
2.4.1.1. Viskozite.....	44
2.4.1.2. Yağdaki katkı maddelerinin sayısı (TBN).....	45
2.4.1.3. Yağ durum analizi.....	45
2.4.1.4. Aşınma miktarı analizi.....	46
2.4.2. Hidrolik yağı analizi.....	47
2.4.2.1. Viskozite.....	47
2.4.2.2. Asitlik (TAN).....	47
2.4.2.3. Su miktarı.....	47
2.4.2.4. Parçacık sayımı.....	47
2.4.3. Akışkanları ayırt etmede kullanılan fiziksel testler.....	48
2.4.3.1. Görsel ve fiziksel testler.....	48
2.4.3.2. Metal aşınma analizi.....	49
2.4.4. Sonuçların yorumlanması.....	50
2.4.4.1. Motor yağı.....	51
2.4.4.2. Hidrolik yağı.....	52
2.5. Termografi (Kızılötesi).....	54

2.5.1. Termografinin kullanım alanları.....	55
2.5.1.1. Elektrik yükü.....	56
2.5.1.2. Elektrik direnci.....	56
2.5.1.3. Harmonik etkiler.....	57
2.5.1.4. Sürtünme.....	57
2.5.1.5. Elektrik motorlarının muayenesi.....	58
2.5.1.6. İndüksiyon ısınması.....	59
2.5.1.7. İzolasyon aşınması.....	59
2.5.1.8. Kaplin ayarsızlığı.....	60
2.5.1.9. Pistonlu kompresörler.....	60
2.5.1.10. Yetersiz yağlama.....	60
2.5.1.11. Güç aktarma organları.....	60
2.5.1.12. Vanalar ve hatlar.....	61
2.5.1.13. Depolama tankları.....	61
2.5.2. Termografinin diğer kestirimci bakım teknikleriyle karşılaştırılması.....	61
2.6. Ultrasonik Ölçüm.....	62
2.6.1. Ultrason uygulamaları.....	64
2.6.1.1. Kaçaklar.....	64
2.6.1.2. Rulmanların izlenmesi.....	65
2.6.1.3. Buhar sistemlerinin takibi.....	65
2.6.1.4. Vanalar ve kondenstoplar.....	66
2.6.1.5. Elektriksel problemlerin takibi.....	67
2.6.1.6. Basınçsız sistemlerin kontrolü.....	68
2.6.1.7. Dişli kutuları.....	68
2.6.1.8. Eşanjör, boyler ve kondenserler.....	69
2.6.1.9. Pompa kavitasyonu.....	69
2.6.1.10. Conta kontrolleri.....	69
2.6.2. Ultrasoniklerin ayrıştırılması.....	69
2.6.3. Zayıf ultrasoniklerin tespiti.....	70
2.7. Tahribatsız kontrol yöntemleri.....	71
2.7.1. Penetrasyon yöntemi.....	71
2.7.2. Manyetik toz yöntemi.....	72

2.7.3. Ultrasonik yöntem.....	73
2.7.4. Radyografi yöntemi.....	74
2.7.5. Eddy (Fuko) yöntemi.....	74
2.7.6. Tebeşir yöntemi.....	75
2.7.7. Endoskopik yöntem.....	75
2.8. Sistem Değişkenlerinin Analizi.....	75

### BÖLÜM 3.

#### SANAYİDE KULLANILAN KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMASI

ÖRNEKLERİ.....	77
3.1. Titreşin Analizi Uygulaması.....	77
3.1.1. Titreşim ölçümlerinin alınması.....	79
3.1.2. Titreşim sonuçlarının alınması ve yorumlanması.....	79
3.1.3. Titreşim ölçümü sonucunda alınması gereken önlemler.....	83
3.2. Yağ Analizi Uygulaması.....	85
3.2.1. Yağ analizi sonuçları ve alınması gereken önlemler.....	85
3.3. Termal Kamera Analizi Uygulamaları.....	89
3.3.1. Trafo termal kamera ölçümü.....	89
3.3.2. Trafo termal kamera ölçümü.....	90
3.3.3. Kompanzasyon panosu termal kamera ölçümü.....	91
3.3.4. Termal kamera analizinin faydaları.....	93
3.4. Motor Durum İzleme Sistemi.....	94
3.4.1. Motor durum izleme sisteminin çalışma prensibi.....	94
3.4.2. Arıza tespiti.....	99
3.5. Busbar İzolasyon Direnci Ölçüm Uygulaması.....	100
3.5.1. İzolasyon direnci ölçüm yöntemi çalışma prensibi.....	101
3.5.2. Busbar sistemi.....	102
2.5.2.1. Kullanım yerine göre busbar sistem çeşitleri.....	102
3.5.3. Busbar izolasyon direnci testinin yapılması.....	103
3.5.4. Ölçüm sonuçlarının yorumlanması.....	105

### BÖLÜM 4.

SONUÇLAR.....	107
---------------	-----

BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	108
KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	113



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Titreşim genliği
A	: Amper
a	: İvme
BD	: Bilya çapı
BFO	: Doş bilezik bilya geçiş frekansı
BPFI	: İç bilezik bilya geçiş frekansı
BSF	: Bilya dönme frekansı
CPM	: Devir / dakika
CPS	: Devir / saniye
d	: Deplasman
$F_L$	: Elektrik hat frekansı
$F_p$	: Kutup geçiş frekansı
$F_s$	: Kayma frekansı
f	: frekans
$f_r$	: Devir frekansı
g	: Yerçekimi ivmesi
Hz	: Hertz
kW	: Kilo watt
MDİ	: Motor durum izleme
mA	: Mili amper
$N_b$	: Yuvarlanma elemanı sayısı
$N_s$	: Senkron hızı
n	: Bilya sayısı
P	: Kutup sayısı
P-P	: Maksimum üst tepeden alt tepeye genlik
PPM	: Milyonda bir birim

RBPF	: Rotor çubuğu geçiş frekansı
RPM	: Dönme devri
RMS	: Etkin değer
T	: Periyot
t	: Zaman
TAN	: Asitlik
TBN	: Yağdaki katkı maddelerinin sayısı
V	: Volt
v	: Hız
THD	: Toplam harmonik distorsiyon
$\omega$	: Açısal frekans
$\beta$	: Temas açısı
$\phi$	: faz

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Bakım sistemleri.....	4
Şekil 1.2.	Koruyucu bakımda arıza olasılığı – zaman grafiği.....	7
Şekil 2.1.	Kestirimci bakım akış şeması.....	11
Şekil 2.2.	İki kütle arasındaki faz farkı a). $0^\circ$ fark ile b). $90^\circ$ fark ile.....	14
Şekil 2.3.	Genliği tanımlayan büyüklükler.....	15
Şekil 2.4.	Yan bant oluşumu.....	16
Şekil 2.5.	Titreşim ölçüm yönleri.....	21
Şekil 2.6.	Elektrik motorunda yapılan 3 yönde ölçüm.....	21
Şekil 2.7.	Üç farklı fiziksel olayın dalga formu.....	24
Şekil 2.8.	Dengesizlik dalga form grafiği.....	26
Şekil 2.9.	Dengesizlik spektrum grafiği.....	27
Şekil 2.10.	Statik ve kuvvet çifti balanssızlıkları.....	28
Şekil 2.11.	Eksen kaçıklığı çeşitleri.....	29
Şekil 2.12.	Eksen kaçıklığı dalga form grafiği.....	30
Şekil 2.13.	Eksen kaçıklığı spektrum grafiği.....	31
Şekil 2.14.	Gevşeklik dalga form grafiği.....	33
Şekil 2.15.	Gevşeklik spektrum grafiği.....	33
Şekil 2.16.	Arızalı rulman dalga form grafiği.....	36
Şekil 2.17.	Arızalı rulman spektrum grafiği.....	36
Şekil 2.18.	Rulman geometrisi.....	37
Şekil 2.19.	Termal kamera ile görüntü alma.....	54
Şekil 2.20.	Elektrik şalterindeki bağlantılardan birinde gevşeklik olması durumu.....	57
Şekil 2.21.	Mekanik bir problemin neden olduğu yatak ısınması.....	58
Şekil 2.22.	Fırın kapağındaki ısı kaybı.....	59
Şekil 2.23.	Ultrason ile kaçak tespiti.....	64

Şekil 2.24.	Korona tespiti.....	67
Şekil 2.25.	Sızdırmazlık testi.....	68
Şekil 2.26.	Sıvı penetrant testi ile çatlak kontrolü.....	72
Şekil 2.27.	Manyetik toz yöntemi ile çatlak kontrolü.....	73
Şekil 2.28.	Ultrasonik test.....	74
Şekil 2.29.	Radyografi yöntemi ile çatlak kontrolü.....	74
Şekil 3.1.	Uygulamada kullanılan titreşim ölçüm cihazı ve titreşim ölçüm sensörü.....	78
Şekil 3.2.	Titreşim ölçüm noktaları.....	78
Şekil 3.3.	Motor ön yatay titreşim ölçümü.....	79
Şekil 3.4.	Motor ön yatay – dikey – eksenel titreşim ölçümlerinin spektrum grafikleri.....	80
Şekil 3.5.	Motor arka yatay - dikey titreşim ölçümlerinin spektrum grafikleri.....	81
Şekil 3.6.	Motor ön - arka rulman titreşim ölçümlerinin spektrum grafikleri.....	82
Şekil 3.7.	Titreşim standartları.....	84
Şekil 3.8.	Redüktörden yağ numunesi alınması.....	85
Şekil 3.9.	Yağ analiz sonucu 1.....	86
Şekil 3.10.	Yağ analiz sonucu 2.....	87
Şekil 3.11.	Trafonun termal kamera ile fotoğraflanması.....	90
Şekil 3.12.	Trafonun panosunun termal kamera ile fotoğraflanması.....	90
Şekil 3.13.	Trafo panosu üzerinde LI01 ve LI02 doğruları boyunca sıcaklık dağılımı.....	91
Şekil 3.14.	Kompanzasyon panosunun termal kamera ile fotoğraflanması.....	92
Şekil 3.15.	Kompanzasyon panosu üzerinde ölçülen sıcaklık değerleri.....	92
Şekil 3.16.	Kompanzasyon panosu üzerinde LI01 ve LI02 doğruları boyunca sıcaklık dağılımı.....	92
Şekil 3.17.	Matematiksel Modelin Gerçek Sistemle Karşılaştırılması.....	94
Şekil 3.18.	MDİ - Motor Durum İzleme Cihazı.....	97
Şekil 3.19.	Motor panosunun üzerinde bulunan MDİ.....	98

Şekil 3.20. MDİ cihazında tespit edilen hataların teşhis penceresinde gösterilmesi.....	98
Şekil 3.21. Akım balansına ait grafik.....	99
Şekil 3.22. Elektrik motorunda yapılan izolasyon direnci testi.....	101
Şekil 3.23. Busbar kanalı.....	102
Şekil 3.24. Elektrik İzolasyon direnci ölçüm cihazı.....	104
Şekil 3.25. Örnekte geçen, izolasyon direnci ölçümü yapılan busbar sistemlerinden biri.....	104
Şekil 3.26. İzolasyon direnci ölçüm sonuçları.....	105

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Frekans aralığına göre kullanılması önerilen parametreler.....	19
Tablo 2.2.	Titreşim kaynağına göre ölçüm yönü.....	22
Tablo 2.3.	Makine çalışma hızı ile orantılı olarak ortaya çıkan frekans değerlerine göre, vibrasyona sebep olan muhtemel makine kusurları.....	41
Tablo 2.4.	Makine çalışma hızı ile orantılı olarak ortaya çıkan frekans değerlerine göre, vibrasyona sebep olan muhtemel makine kusurları.....	42

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Bakım teknikleri, Kestirimci bakım, Titreşim analizi, Yağ analizi, Termografi, Ultrasonik testler, Tahribatsız muayene

Kestirimci bakım tekniği, makine parçalarının arızalanmadan önce çeşitli uyarılar vermesi esasına dayanmaktadır. Makinelerin verdiği uyarıların farkına varmak için; titreşim analizi, yağ analizi, ultrasonik test, kızılötesi termografi ve sistem değişkenlerinin ölçülmesi gibi tahribatsız testlere ihtiyaç vardır. Makine durumlarını saptamak için bu tekniklerin kullanılması, önceki bakım yöntemleriyle kıyaslandığı zaman, bakım başarısı açısından çok daha verimlidir.

Kestirimci bakım, işletme yönetiminin makine durumlarını ve bakım programlarını çok iyi bir şekilde kontrol etmelerine olanak sağlar. İşletmelerde kestirimci bakım kullanılarak makine durumları kapsamlı bir şekilde bilinebilir ve çok daha gerçekçi planlar yapılabilir. Bu yaklaşımda firmalara beklenmedik arızaları asgariye indirme, stok ve bakım maliyetlerini düşürme fırsatı sunar.

Bu çalışmada bakım teknikleri tanıtılmış, kestirimci bakım metotları anlatılmış ve bazı uygulama örnekleri verilmiştir.

# **PREDICTIVE MAINTENANCE APPLICATIONS IN TIRE INDUSTRY**

## **SUMMARY**

Key Words: Maintenance concepts, Predictive maintenance, Vibration analysis, Oil analysis, Infrared thermography, Ultrasonic inspection, Non-destructive test

Predictive maintenance technique is dependend on the fact that most machine components will give some type of warning before they fail. To sense the symptoms by which the machine is warning us requires several types of non-destructive testing, such as vibration analysis, oil analysis, ultrasonic inspection, infrared thermography and other system variable measurements. Use of these techniques to determine the machine condition results in a much more efficient use of maintenance effort compared to any earlier types of maintenance.

Predictive maintenance allows plant management to control the machinery and maintenance programs very well. In a plant using predictive maintenance, the overall machinery condition at any time is known, and much more accurate planning is possible. This approach offers plants to minimise unexpected failures and decrease stock/maintenance costs.

In this study, maintenance concepts are introduced, predictive maintenance techniques are being explained and some case studies are given.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bakım, aletin ilk icat edildiği veya işletmeye konduğu andan itibaren var olan bir olgudur. Çalışan teçhizat veya makinenin bozulması, yıpranması mutlak olduğuna göre onun neticesinde bakımda var olmaktadır. Endüstri geliştikçe ve otomasyona gidildikçe yatırım giderleri artmakta, işçilik giderleri azalmaktadır. Yatırım giderlerine bağlı olarak bakım giderleri de artmaktadır. Bir üretim hattında, planlanan üretimin yapılması beklenirken ortaya arızalar çıkabilmekte ve bu arızaların yarattığı kesintiler ile üretim planları etkili bir biçimde uygulanamamaktadır. Bu durum bulunduğumuz yoğun rekabet ortamında, bir işletme için çok büyük kayıplara neden olmaktadır.

Sağlıklı üretim yapılabilmesi ve üretim programlarının aksamadan gerçekleştirilebilmesi için makinelerde oluşabilecek arızaların hızla çözülebilmesi ve hatta beklenmeyen arızaların oluşmasının önüne geçilmesi gerekir.

Kobu' ya göre, bakım-onarım faaliyetlerindeki aksaklıkların üretim akışı, verimlilik ve dolayısıyla maliyetler üzerindeki etkileri şöyle özetlenebilir:

- a. Makinelerin ve onları çalıştıran operatörlerin boş kalması,
- b. Dolaylı işçilik ve imalat genel masraflarının artması,
- c. Müşteri taleplerinin karşılanamaması dolayısıyla müşteri memnuniyetinin düşmesi,
- d. Aksaklığın meydana geldiği bölümde ve bu bölümle ilgili diğer bölümlerde gecikme ve boş beklemler olması,
- e. Hatalı ürün oranının artması ve beklenen kalitenin yakalanamaması,
- f. Zamanında teslim edilemeyen siparişler sebebiyle müşteri kaybı oluşması [1].

İşletmeler bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için farklı metotlar denemiş,

periyodik olarak yaptıkları yağ ve parça değişimleri ile belirli seviyede başarılı olmuşlar, fakat beklenmedik arızaların önüne etkin olarak geçememişlerdir.

Üretimin sürekli yapıldığı endüstriyel tesislerde, uygulanan bakım türleri özellikle büyük önem taşır. Üretimin aksamasını engellemek isteyen bazı tesisler, erken uyarı niteliği olan kestirimci bakım yöntemlerini tercih etmektedirler. Ani arızalarla karşılaşmamak, beklenmeyen üretim kayıplarını engellemek ve bakım onarım işlerini planlanabilir hale getirmek, kestirimci bakımın hedeflerini oluşturur.

Erken uyarı özelliği olan kestirimci bakım yöntemleri, kritik süreçler için idealdir. Bu bakım yöntemleri, makinelerin durumlarının düzenli olarak izlenmesine ve önemli değişikliklerin görülmesi durumunda, arıza meydana gelmeden müdahale edilmesine olanak sağlar. Böylece onarımlar arası maksimum süreyi sağlayacak veriler elde edilmiş olur [2].

Kestirimci bakım stratejisini benimseyerek kullanmanın bir işletmeye temel faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- a. Ekipmanın hazır bulunma süresi ve sağlıklı olarak çalıştığı zaman artacağından, ekipmanın kendini amorti etme süresi kısalacak ve yatırım daha hızlı geri dönecektir.
- b. Hangi parçanın arızalanacağı doğru olarak tespit edilebileceğinden, değişmesi gerekmeyen, kullanım ömrü dolmamış parçaların değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkan gereksiz maliyet artışlarının önüne geçilecektir.
- c. Duruşlar planlı olacağından, sürpriz arızaların giderilmesi için ortaya çıkan ekstra maliyetler ortadan kalkacak, bakım maliyetleri azalacak, bununla birlikte üretim ve verimliliğin artması sağlanacaktır.
- d. Yapılan bakımın faydası kontrol edilebileceğinden, bakım verimliliği yükselecektir.
- e. Arıza trendine giren parçanın bozulma zamanı tahmin edilebileceğinden, bakım malzemelerinin stokları azaltılabilecek buna bağlı olarak riske girmeden stok maliyetinden tasarruf edilebilecektir.

## 1.1. Bakım Onarım

Makinelerin performansını düşüren nedenlerin başında arızalar gelmektedir. Düşük performansta çalışan bir makineden de, hızlı ve kaliteli bir üretim beklemek hayal olur. Ancak, planlı bir bakım programı uygulamak büyük ölçüde verimi arttıracaktır.

İşletmedeki en kritik bölümlerden birisi bakım-onarım bölümü olup, üretimin sürekli olarak devam ettirilebilmesi, makine ve donanımlarda meydana gelen beklenmedik arızaların giderilmesi ve arızaların önüne geçilmesi için periyodik bakımlarının yapılması, işletmenin bina ve yardımcı tesislerin bakımı ve işletilmesi ile tezgâhların montajı ve yer değiştirmesi gibi temel görevleri olan bu bölüm, çoğu zaman tezgâhların işleyişini geliştirecek yada etkinliğini ve verimliliğini arttıracak yeni tasarımlar yapılması, imalatı ve montajı, çevre kirliliğine karşı önlemler alınması, iş güvenliği önlemlerinin uygulanması, hurda ve atık malzemelerin yönetimi, bina ve tesislerin yangından korunması gibi işlerden de sorumlu tutulur.

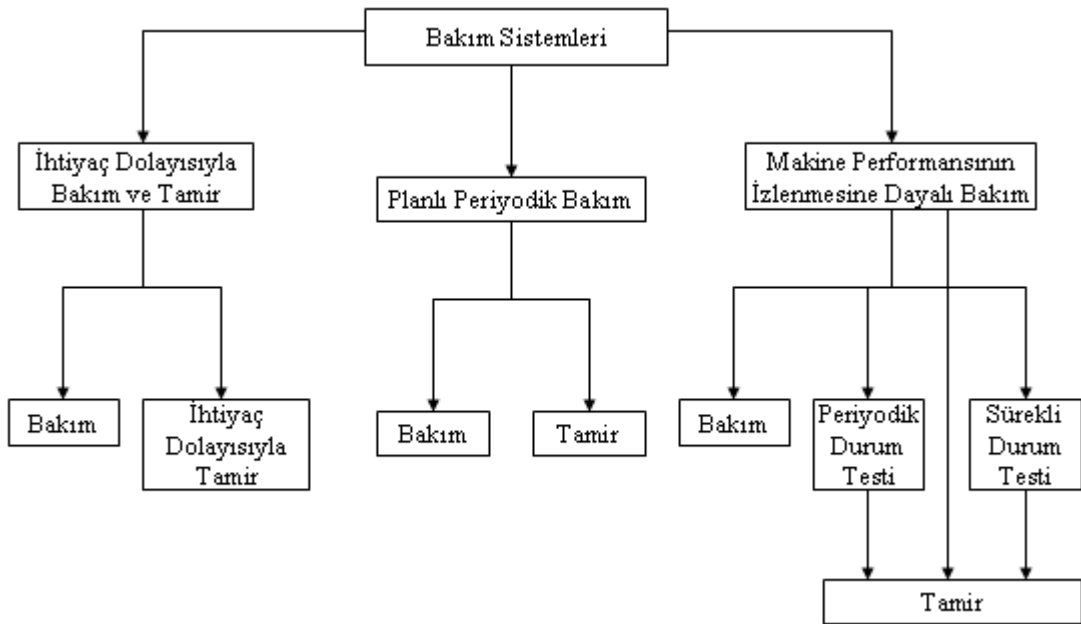
İşletmeler büyüyüp karmaşıklaştıkça, bakım onarım bölümünün önemi de artar. Sipariş üzerine imalat yapan işletmelerde meydana gelen arızalarda üretimin diğer tezgâhlara kaydırılması ile ekonomik kayıplar en aza indirilse de, seri imalat yapan işletmelerde böyle bir çözüm söz konusu olamayacağından, arızanın bir an önce giderilmemesi çok büyük ekonomik kayıplara sebep olabilir. Meydana gelen arızaların en kısa sürede çözümlenebilmesi için gereken ilk şart, yetkin ve eğitimli bakım onarım ekibidir. Bakım onarım personelinin sürekli olarak eğitimine önem verilmelidir. Bunun yanında teknolojik tamir ve ayar donanımlarının da bakım onarım bölümünün demir başına katılması gerekir. Herhangi bir arızada, tam donanımlı ve teknik yeterliliğe sahip personel doğru çözümün tek anahtarıdır. Ayrıca düzenli bir bakım planlama sisteminin kurulması da bir işletme için büyük önem taşımaktadır. Bakım planlama sisteminin kurulması gerekliliği şöyle özetlenebilir [3].

- a. Yatırımda söz konusu olan makine ve tesislerin uygun ve yeterli bakımlarının yapılmasını projelendirmek,
- b. Duruşları asgari düzeyde tutarak makinelerden azami yararlanmayı sağlamak,

- c. Bakım iş gücünü teminat altında tutmak,
- d. Bakım bölümünde ekonomiyi sağlamak,
- e. İşçi ve diğer kaynaklardan azami düzeyde yararlanmak,
- f. Bakım için gerekli teknik bilgileri temin etmek.

## 1.2. Bakım Teknikleri

Bakım tekniği, bir sistemdeki teknik elemanlara ait olması gereken özelliklerin olması gereken durumunu korumak veya bu durumu yeniden kazandırmak; benzer şekilde, teknik elemanların mevcut durumlarını tespit edip değerlendirmek için gerekli önlemler topluluğudur. Bakım sistemlerinin şematik gösterimi Şekil 1.1' de verilmiştir.



Şekil 1.1. Bakım sistemleri

İşletmeler günümüze kadar çok çeşitli bakım onarım metotları kullanarak üretimlerinin sürekliliğini devam ettirmeye çalışmışlardır, tabii ki bu metotların çoğu temel olarak aşağıda belirtilen dört adet bakım onarım türünün farklı yorumlanmasıdır.

- a. Arıza çıktıkça bakım
- b. Koruyucu (Periyodik) bakım
- c. Önleyici (Proaktif) bakım
- d. Kestirimci (Uyarıcı) bakım

### **1.2.1. Arıza çıktıkça bakım**

En ilkel bakım yöntemi olup, makineler arızalandıktan sonra tamir yoluna gidilir. Makinelere servis süresince gereken yağlama vs. gibi işlemlerin uygulanması bakım planı dahilinde yapılır. Arıza anında, makinenin varsa yedeği devreye girer. Yoksa, makinenin onarımı tamamlanana kadar üretim veya hizmet durur. Esas olarak, henüz bakım planlaması yapacak teknik düzeye ulaşmış işletmelerde kullanılan bir yöntemdir.

Dünya genelinde halen en yaygın olarak kullanılan bakım onarım metodu olarak görünse de, gelişen şartlara uyum sağlamanın gerekliliğini fark eden ve bakım yönetim sistemlerini kurmaya başlayan işletmelerin hızla terk ettiği bu metodun temel avantajları, daha az bakım personeli gerektirmesi ve görünen maliyetinin düşük olmasıdır. Bunun yanında bakım onarım personelinin verimsiz kullanılması, tezgâhın bozulması sonucunda başka bir arızanın ortaya çıkma olasılığı, parça değişimi ve/veya tamiri maliyeti, çoğunlukla fazla mesai yapılması gereği ile ortaya çıkan fazladan işçilik ücreti ve beklenmedik zamanlarda meydana gelen arızalar sebebi ile oluşan plansız duruşlar sonucu artan maliyetler gibi dezavantajları vardır. Yinede kritik olmayan, ucuz ve/veya bozulması halinde tamir edilene kadar üretimi çok fazla etkilemeyecek ekipmanlar için en uygun bakım metodu olarak kullanılabilir, örnek olarak işletmedeki aydınlatma lambalarının belirli aralıklarla değişiminin planlanmaması, bozulunca değiştirilmesi verilebilir. Tabî ki bozulunca değiştirilecek ekipmanın kritik ekipmanlar için zincirleme reaksiyon başlatmadığından emin olunmalıdır.

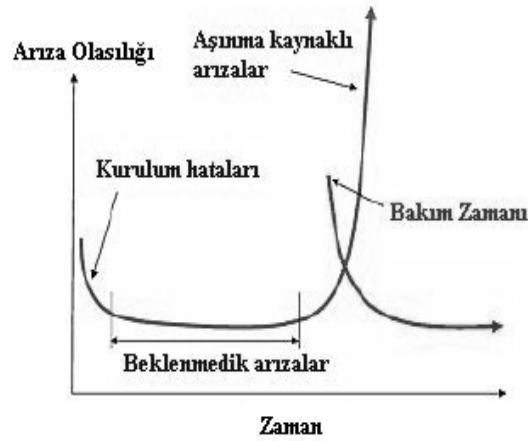
### 1.2.2. Koruyucu (Periyodik) bakım

Servis süresinde oluşmaya başlamış, hasara neden olabilecek hataların basit, düzeltici ve koruyucu bakım yöntemleri ile önlenerek, hasarın oluşma süresinin uzatılabileceği düşüncesiyle ortaya çıkmış bir bakım tekniğidir. Ancak, tarafsız bir gözlem yapılırsa, günümüzdeki ağırlaşan piyasa şartlarına cevap veremeyecek bir bakım tekniği olduğu görülebilir.

Bu bakım yönteminde, önceden belirlenen bir zaman periyodunda makine parçalarının bakım ve onarımları yapılmaktadır. Düzenli olarak makine üzerindeki bütün donanımlar gözden geçirilerek tespit edilen arızalar giderilmektedir. Arızaların çıkması beklenmemekte, periyodik olarak yapılan bakımların neticesinde olası arızaları engellemek hedeflenmektedir.

Periyodik bakımda, aşınmanın zamanla hızlanan yavaş ve sürekli bir süreç olduğu ve önleyici bakımın aşınma hızını yavaşlatarak aşınmayı düşük bir seviyeye indirdiği kabul edilir, ancak aşınmanın doğası biraz daha farklıdır. Ekipman normal olarak çalışırken bir dış etken olmazsa, yağda bozulma yada tezgâhın sınırlarının aşırı zorlanması gibi, parçalarında neredeyse hiçbir aşınma belirtisi görülmez. Bu tip bir dış etkenin olmadığı durumlarda yapılan bakım gereksizdir. Bu dış etkilerin oluşup hızla aşınmaya neden olarak tezgâhın ömrünü kısaltmaya başladığı sırada yapılan bakım ise geç kalmış bir uygulama olacaktır. Birçok periyodik bakım uygulamasında yapılan ise maalesef ya gereksiz yada çok geç kalınmış bakım uygulamalarıdır [4].

Şekil 1.2'deki arıza olasılığı-zaman grafiğine bakıldığında, döngünün nispeten yüksek bir arıza olasılığı değeri ile başladığı görülür, bunun sebebi tezgâhın imalatı ve kurulumu aşamasında meydana gelen hatalardır. Bundan sonra arıza olasılığı, tezgâhta aşınma baş gösterene kadar göreceli olarak düşük seyrederek. Periyodik bakım, artış tam olarak başlamadan önce yapılması gereken bir bakım türüdür. Bu genelde tam olarak belirlenemediğinden ya zamanından çok önce yapılarak maliyet artışına ve güvenilirlik azalmasına (her bakımdan sonra, bir takım bakım hataları sebebi ile arıza olasılığı başlangıçta biraz daha yüksektir) ya da geç yapılarak tezgâhın parçalarının aşınmasına neden olur.



Şekil 1.2. Koruyucu bakımda arıza olasılığı-zaman grafiği

Buradan da anlaşılacağı gibi, periyodik bakımla bir takım arızaların önüne geçebilmek mümkün olmakla birlikte, hem her zaman arızaların kesin olarak giderilememesi, hem de gereksiz maliyet artışlarına sebep olabilmesi nedeniyle bakım sorununa kesin bir çözüm değildir.

### 1.2.3. Önleyici (Proaktif) bakım

Bu bakım yönteminde, makine arızalarını ortadan kaldırmak için iki mantık geliştirilmiştir. Birincisi; arızaya neden olabilecek temel faktörler ortadan kaldırılarak makine çalışmaya dayanıklı hale getirilir. Buna örnek olarak kaplin ayarsızlığı, yağ kirliliği ve ısınma gösterilebilir. Bu problemlerin önceden taranması ve giderilmesi işleme önleyici (Proaktif) bakım denir [5].

Diğer düşünce ise, erken arıza belirtileridir. Her ne kadar önleyici bakım uygulaması ile arızaya sebep olan nedenler gözlenip ortadan kaldırılarak arızanın ortaya çıkması önlenmeye çalışılsa da, gerçekçi olmak gerekirse, bu her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, arızanın ortaya çıktığı an belirlenmeli ve makine ciddi bir şekilde arızalanmadan gereğinin yapılması sağlanmalıdır. Bu yöntem de, uyarıcı bakım olarak bilinmektedir.

Örneğin bakım çalışmasından sonra makinenin tekrar devreye alınması sırasında, titreşim seviyesi olması gerekenden yüksek çıkabilmektedir. Başka bir anlatımla, yapılan bakım-onarımda tam olarak istenilen hedefe erişilememiştir. Kestirimci bakıma ek olarak uygulanacak proaktif bakımla, bakım sonrası devreye girmeden önce bu ölçüt kontrol edilir. Eğer bakım istenilen kalitede değilse düzeltilir. Bunun sonucunda bakım periyotlarının arası açılır, yıl boyunca daha az bakım ihtiyacı doğar.

Bu yöntemde esas olarak dikkat edilecek nokta makinenin sağlıklı korunumudur, hastalıklı konumu değildir.

#### **1.2.4. Kestirimci (Uyarıcı) bakım**

Diğer bakım tekniklerinden farkı, bakımın arızada veya bir bakım planı dahilinde değil de gerektiğinde yapılmasıdır. Titreşim, sıcaklık, ses ve yağ partikülleri gibi seçilen parametreler periyodik olarak ölçülerek makinenin durumu belirlenir. Bu ölçümler sürekli takip edilir ve bakım gerektiren bir durumla karşılaşıldığında makine bakıma alınır, yakın zamanda oluşması muhtemel arıza giderilir. Aynı zamanda, yapılan ölçümlerden makinenin durumunun kabul edilebilir çalışma sınırlarını ne zaman aşacağı tahmin edilmesine de çalışılır. Bu yüzden kestirimci bakım (veya erken uyarıcı bakım) olarak da adlandırılmaktadır. Bakım metotları içerisinde ilk yatırım ve uygulama maliyetleri içermesine rağmen kestirimci bakım iyi bir alternatif olarak gösterilebilir. Ancak özellikle can güvenliği içeren ve pahalı sistemlerde ilk yatırımın kısa zamanda kendini amorti edeceği unutulmamalıdır [6].

Kestirimci bakımın üretim akışı ve verimliliğe birçok faydası vardır. Bakım giderleri %50-%80 arasında azalır. Bakım yönetiminin verimliliği üzerine yapılan son araştırmalar, bakım masraflarının 1/3'ünün gereksizce yapılan veya zamanında yapılmayan bakımlar sonucu israf edildiğini göstermiştir [7].



## **BÖLÜM 2. KESTİRİMCİ (UYARICI) BAKIM**

### **2.1. Giriş**

Kestirimci bakım İngilizce'deki “predictive maintenance” sözcüğünün karşılığıdır. Bozulunca bakım (Breakdown maintenance), önleyici bakım (Preventive maintenance) evrelerinden geçen bakım teknolojisi 1960'lı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde enerji sektöründe gelişmeye başlamıştır. Ancak, aktif olarak endüstride kullanımı 1970'li yıllarda başlamıştır. O yıllardaki elektronik cihazların boyut ve ağırlık sorunu uygulamayı zorlaştırdığı için, pratik uygulamalar 1980'li yıllara kalmıştır. Özellikle bu yıllarda gelişen bilgisayar ve mikroişlemci sayesinde büyük bir atılım gerçekleştirmiştir. Günümüzde hem cihazların ebadı küçülmüş, hem fiyatları ucuzlamış, hem de kullanım hızı artmıştır. Böylece endüstride kullanım alanı yaygınlaşmıştır.

Uyarıcı bakım teknolojisinin aktif olarak Türkiye'ye gelişi 90'lı yılların başında olmuştur. Uygulamalar öncelikle çimento sektöründe başlamıştır (Bir rivayete göre sadece Türkiye ve Güney Afrika'da uyarıcı bakım teknolojisi ülkeye çimento sektörüyle girmiştir [8]). Bugün çimento sektörünün büyük bir bölümü ya uyarıcı bakım uygulamasını yapmaktadır, ya da yaptırmaktadır. Ancak, Türkiye'de daha önceki yıllarda petro-kimya, lastik gibi sektörlerde konu duyulmuş ve bazı basit cihazlar kullanılmıştır.

Konunun popülaritesinin artması ile Türkiye'de uyarıcı bakım için kullanılan cihazları pazarlayan şirketlerde artmıştır. Bu da günümüz kullanıcılarına hem daha geniş bir sistem ve fiyat tablosu sunmuş, hem de satıcıdan beklentilerini arttırmıştır. Böylelikle uyarıcı bakım tamamen Türk sanayisine mal olmuş ve gıdadan demir çeliğe, nakliyattan kağıda her sektörde kullanıcılarını bulmuştur.

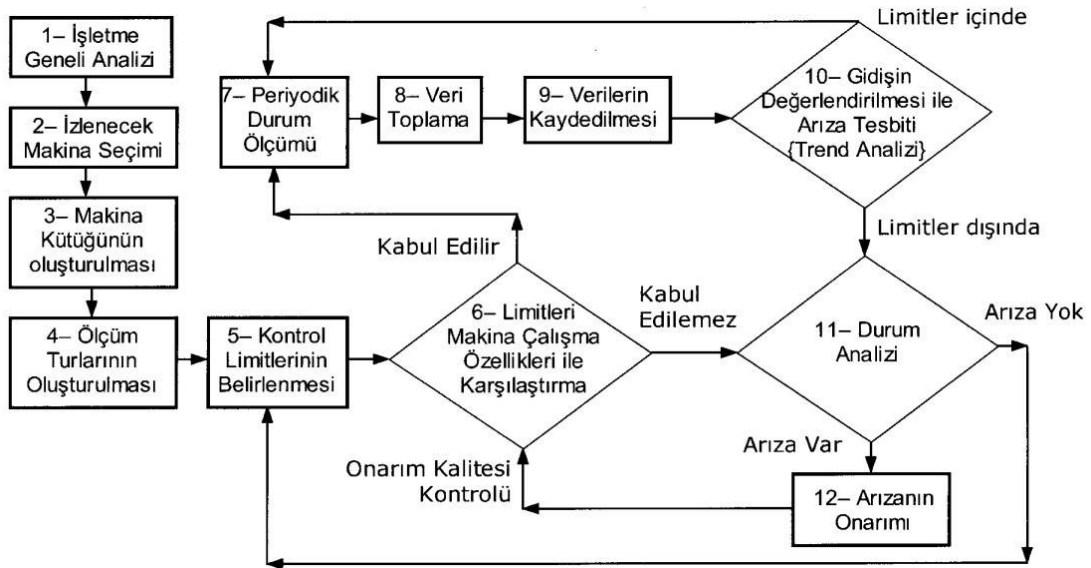
## 2.2. Kestirimci Bakım Kavram ve Teknikleri

Kestirimci bakım, ekipmanların fiziksel parametrelerinin trendlerinin ölçülmesi, bilinen mühendislik limitleriyle karşılaştırılması, sonuçların analizi, yorumlanması ve arızalara yol açabilecek sorunların ekonomik bir biçimde etkisiz hale getirilmesi ve düzeltilmesi şeklinde çabalar olarak tanımlanabilir [9].

Bilindiği gibi düzeltici bakım, ya da yalın ifadeyle onarım anlayışı arıza oluşuktan, olumsuz sonuç doğup zarar yaşandıktan sonra müdahale etmeyi öngörmektedir ve geç kalınmış olduğu için de günümüzde kabul görmemektedir. Periyodik bakım ise, belirli zaman aralıkları ile ekipmanı muayene etmek ve elde edilen bulgulara göre bakım işlemleri gerçekleştirmek olduğundan, oldukça büyük kaynak gerektirmekte ve her zaman doğru müdahaleler zamanında gerçekleştirilememektedir. Kestirimci bakım mantığı ise, her arızanın en az bir habercisi olduğu varsayımına dayanmaktadır. Dolayısıyla, tüm ekipmanı muayene etmek yerine haberci olarak ifade edilen belirtileri izlemek, arıza odaklı bir çalışma biçimini geliştireceğinden hem daha az kaynak gerektirmekte, hem de bakım çalışmalarının etkinlik ölçüsü olan istenmeyen arızaların sıfır olması şeklindeki amacı erişilebilir kılmaktadır.

Kestirimci bakım, her geçen yıl kabul edilirliliğini arttırarak endüstrideki yerini sağlamlaştırmaktadır. Temelde kestirimci bakım, titreşim, sıcaklık, basınç, gerilim veya direnç gibi fiziksel parametrelerin ölçülebildiği tüm ekipmanların sorunlarının önlenmesinde kullanılabilir. Ancak, ekipmanın bu değerlerinin ölçülmesi tek başına yeterli olmaz. Ölçümlerin yorumlanabilmesi için mihenk taşlarının, yani kriterlerin bulunması gerekir. Kriterler, uyarıcı bakım terminolojisi içinde mühendislik limitleri olarak bilinirler. Tüm fiziksel parametrelere ilişkin genel mühendislik limitlerinin bulunmasına karşın her ekipmanın kendine özgü koşulları nedeniyle firma içerisinde kullanılacak şekilde uyarlanması gerekir. Aynı şekilde erken uyarı anlamına gelen bu limit değerler, arıza oluşuncaya kadar sorun üzerinde düşünme ve en uygun önlemin alınması için ne kadar zaman bulunduğunu belirleyici etken olmaktadır. Zira, asıl sorunun çözümü uyarıcı bakım çalışmasının temel amacıdır.

Kestirimci bakım yönteminde ana prensip, üretim sırasında yapılan ölçmelerle makinelerin performansını izleyerek ne zaman bakıma gerek olacağına karar vermek ve kısa bir süre üretime ara vererek daha önceden belirlenen arızayı onarmaktır. Makinenin karakteri ve çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılan program çerçevesinde, üretimi durdurmadan kontrol ve ölçümler yapılır. Bu ölçümler değerlendirilerek makinenin çalışma şartları hakkında fikir oluşturulur ve önceki ölçümlerle karşılaştırılarak varsa hasarın gelişmesi izlenir. Hatayı oluşturan sebep/sebepler belirlenerek hata teşhisi yapılır. Ölçülen ve izlenen parametreye bağlı olarak hata belirleme işlemi değişik kriterlere dayanarak yapılır. Hata teşhis edildikten sonra, gerekli yedek parça temin edilerek üretim durdurulur ve mümkün olan en kısa zaman süresinde bakım yapıp, tekrar üretime devam edilir [10].



Şekil 2.1. Kestirimci bakım akış şeması

Kestirimci bakım her işletme için ayrı şekilde teknikler ve yaklaşımlar gerektirebilir. Kestirimci bakımın kusursuzlaştırılması için, bakım yönetiminin araştırma yapması ve uygun projeler geliştirmesi gerekir. Zira kimse dışarıdan tam olarak bir işletmenin kestirimci bakım gereksinimlerini belirleyemez, ancak fikir verebilir. Bu konuda dünyada kabul görmüş ve pratik olarak uygulanabilecek yaklaşımlar aşağıda maddelenmiştir [11].

- a. Vibrasyon ölçüm ve analizi
- b. Yağ analizi
- c. Termografi
- d. Ultrasonik ölçüm
- e. Tahribatsız kontrol yöntemleri
- f. Sistem değişkenlerinin analizi  
( Basınç, sıcaklık, hız, akım, voltaj, debi vb.)

### 2.3. Vibrasyon (Titreşim) Ölçüm ve Analizi

Kestirimci bakım metotlarından belkide en yaygın olarak kullanılan olan titreşim analizi, dönel parçaları bulunan her türlü makineye uygulanabildiği ve çok geniş bir problem çözme yelpazesine sahip olduğu için tercih edilmektedir. Çoğu zaman kestirimci bakım denildiğinde akla gelen tek metot olduğundan kestirimci bakımla özdeşleştirilmiştir. Makineler durumlarını titreşimlerle ortaya koyarlar. Titreşim, bir kütlenin referans konum etrafında yaptığı periyodik olan yada olmayan hareketler olarak adlandırılabilir. Bu hareketin şiddeti, cismin kütesine, şekline, üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğüne ve kendisiyle çevresinin sönümleme gücüne göre değişir. Titreşimleri birçok gruba ayırabilmek mümkünse de, temelde kestirimci bakımla ilgili olarak rasgele titreşimler ve periyodik titreşimler şeklinde ikiye ayrılabilir. Rasgele titreşimler, proses dalgalanmaları yada çevre koşulları ile ortaya çıkan, yön ve şiddetleri sürekli değişen, zamanla azalıp çoğalan geçici hareketlerdirler. Matematiksel olarak bir ifadeleri yoktur. Makineler rejime girene kadar çok kısa bir süre devam edip kaybolan ve geçiş rejimi titreşimi olarak adlandırılan özel bir şekli bulunur. Periyodik titreşimler ise, sistemin dinamik yapısı yada bir arıza sonucunda oluşur. Düzenli aralıklarla tekrarlanırlar ve matematiksel olarak ifade edilebilirler. Titreşim analizinde kullanılan titreşimler bu türe dâhildir. Ölçümlerde rasgele titreşimler ile periyodik titreşimler birbirlerinden ayrılmalıdırlar.

Titreşimlerin ölçülmesi ve analizlerinin yapılabilmesi için günümüzde çok çeşitli cihazlar mevcuttur. Elektronik ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birçok işlevi üzerinde bulunduran yazılımlarla donatılmış titreşim cihazları mevcuttur. Bu cihazlarla titreşim analizi yapılabilmesi için, titreşim sayısı (frekans), titreşimin

genliği ve titreşim genliği ile zorlayıcı kuvvet arasındaki faz farkı ölçülebilmektedir.

Titreşim frekansı, bir makinede titreşim probleminin incelenmesinde en önemli bilgilerden biridir. Titreşimin frekansı, bir makine üzerinde belli noktalara (yatac, kavrama, mil vb.) konulmuş olan titreşim ölçüm cihazları ile Hz veya d/d birimlerinde tespit edilir. Makine üzerinde bulunan parçaların her birinin çalışması, karakteristik frekanslarda titreşim oluşturarak sistemi etkiler. Ayrıca sistemde oluşan her mekanik arıza da ayrı bir titreşim frekansı oluşturmaktadır. Yapılan analiz çalışmalarında, her frekans türünün hangi problemde ve nereden kaynaklandığı belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu işleme spektral analiz de denilmektedir. Spektral analiz, makine titreşimlerinin frekanslarına göre genliklerinin incelenerek, arıza kaynaklarını tanımlama yöntemi ile arızaların başlangıcından itibaren gelişimini inceler ve doğru zamanda müdahale edilmesini amaçlar [12].

Frekans değeri karşı gelen titreşim genliği, ayrıca değerlendirilir. Frekans arızanın kimliği olarak düşünülürse titreşim genliğini de arızanın şiddeti veya seviyesi olarak ifade edebiliriz. Titreşim genliğinin değerlendirilmesi, yer değiştirme, titreşim hızı ve ivme birimlerinde yapılmaktadır. Yer değiştirme terimi, oluşan titreşimin tepe noktaları arasındaki aralığın boyutu olarak ifade edilmektedir. Titreşim hızı (mm/s) ise, sürekli değişerek minimum ve maksimum değeri almaktadır. Değerlendirmede maksimum değeri dikkate alınmaktadır. Titreşim ivmesi ( $\text{mm/s}^2$ ) ise, titreşim hızının değişme hızı olarak da tanımlanabilmektedir [13].

Ölçüm sonuçları spektrum ve dalga form grafikleri olarak görüntülenebildiği gibi, titreşim ölçümlerinin değerlendirilmesinde en genel olanı o ölçüm noktasına ait geçmişe dönük ölçümlerin hepsini bir şekil üzerinde görüntülemek ve oluşan farklılıkları hemen görmektir. Bu hem spektrum hem de dalga form grafikleri için yapılabilmektedir. Bir diğer değerlendirme yöntemi ise arıza frekanslarına ait titreşim seviyelerinin zaman ile değişiminin gözlemlendiği eğilim grafikleridir. Eğilim grafiklerinin, gelişmekte olan arızanın önem derecesinin belirlenmesinde etkinliği vardır. Titreşim genliğindeki artış hızı, arızanın ciddiyetini belirlemede önem taşır.

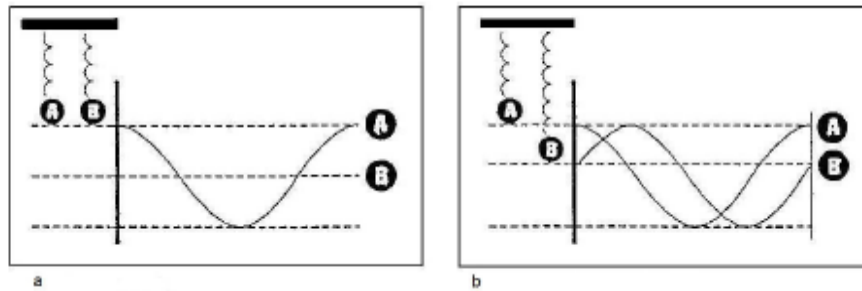
### 2.3.1. Titreşim parametreleri

Frekans ( $f$ ): Frekans, belirli bir hareketin birim zaman içerisindeki tekrar sayısıdır. Frekans üç değişik şekilde ifade edilebilmektedir. Titreşim hareketinin bir saniye süre içinde tekrarlanma miktarıdır. Birimi Hertz (Hz)'dir. Titreşim hareketinin bir dakika süre içinde tekrarlanma miktarıdır. Birimi RPM (Revolution Per Minute) yada CPM (Cycles Per Minute) olarak alınır.  $RPM/60 = Hz$  olarak dönüşüm yapılabilir. Titreşim sinyalinin, o sinyale neden olan birincil hareketin dönme devrinin hangi katlarında meydana geldiğinin ölçüsüdür. Birimi kat olan bu bağıl hareket, titreşimin ölçüldüğü yatak içinde dönen milin dönüş devri katları ile, titreşim sinyalinin tekrarlanma frekanslarının çakışıp çakışmadıklarını ifade eder. Örnek olarak, dengesizlik sinyali milin dönme devrinin tam bir katında oluşur. Periyot ile frekans birbirlerinin tersi olan terimlerdir.

Periyot ( $T$ ): Titreşimin bir tam tur yapması için gereken süreyi ifade etmek için kullanılır,  $T$  ile ifade edilir. Frekans ile ters orantılıdır. Buna göre  $f=1/T$  ve  $T=1/f$  olarak alınır.

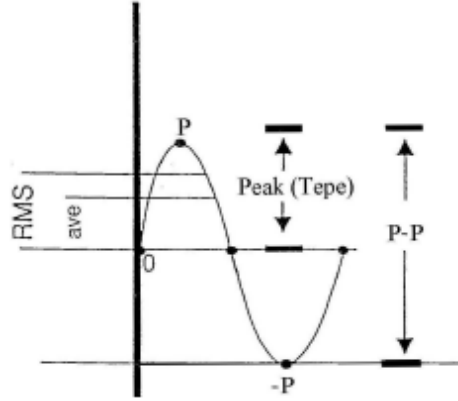
Açısal frekans ( $\omega$ ): Dönme hareketi yapan bir cismin birim zamanda kat ettiği yolun radyan cinsinden değeridir. Birimi rad/s dir,  $\omega = 2\pi f$  ile ifade edilir.

Faz ( $\phi$ ): İki olaydan birinin diğerine göre ne kadar önce veya sonra meydana geldiğinin ölçüsüdür. Birimi derece ( $0^\circ-360^\circ$ ) veya radyan ( $0-2\pi$ ) olarak verilir. Faz açısı hesaplamalarında dönüş yönü (-) negatif, dönüş yönünün tersi (+) pozitifdir. Faz farkı, Şekil 2.2'de açıklanmıştır.



Şekil 2.2. İki kütle arasındaki faz farkı a)  $0^\circ$  fark ile b)  $90^\circ$  fark ile

Genlik: Titreşim şiddetini gösterir ve sinüs eğrisinin “0” noktası ile tepe noktası arasındaki mesafesidir. Bir makineye etkiyen tüm kuvvetlerin oluşturduğu titreşimlerin toplam büyüklüğü olarak da tanımlanır. Genliği tanımlamak için Şekil 2.3’deki büyüklükler kullanılır.



Şekil 2.3. Genliği tanımlayan büyüklükler

Pik, tepe (peak): Sinyalin bir yönde eriştiği maksimum değerdir.

Pik-Pik (P-P): Sinyalin (+) tepe noktası ile (-) tepe noktası arasındaki uzaklığı temsil eder. Bir makine yada elemanın titreşiminin toplam genliğini verir. Pik değerinin iki katına eşittir.

Etkin değer (RMS): Adını “root mean square” teriminin baş harflerinden almıştır. Bir sinyalin  $t_1$ - $t_2$  aralığındaki değerlerinin karelerinin ortalamasının kareköküdür. Denklem 2.1’deki gibi hesaplanır.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.1)$$

$RMS = 0.707 \times$  Tepe değeri ifadesi olarak da hesaplanabilir ve RMS ile tepe değeri arasında dönüşüm yapılabilir.

Ortalama (Average): Bir sinyalin  $t_1$ - $t_2$  aralığında aldığı değerlerin aritmetik

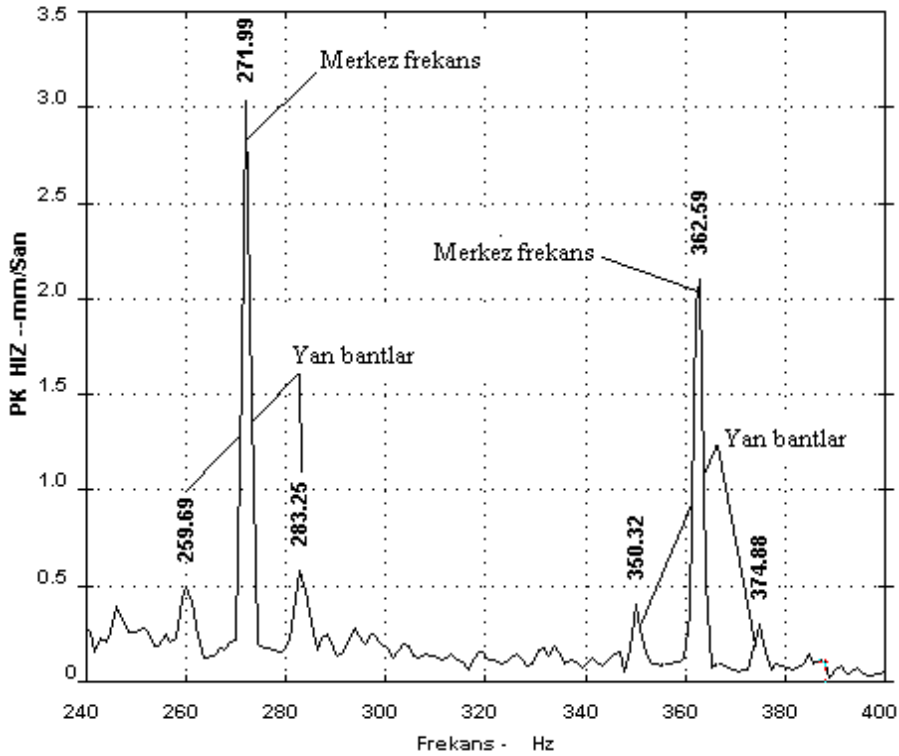
ortalamasıdır. Denklem 2.2'deki gibi hesaplanır.

$$\text{Ortalama} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (2.2)$$

Ortalama = 0.5 x Tepe değeri ifadesi ile elde edilir. Titreşim genlik birimleri yer değiştirme, hız ve ivme birimlerinden birisi olabilir.

Harmonik: Frekansı, temel frekansın tam sayı katlarına sahip titreşim sinyallerine temel frekansın harmonikleri adı verilir. 1x, 2x, ... şeklinde gösterilebildikleri gibi dönme hızının katları olarak da ifade edilirler. 1xRPM gibi. Bunlardan birinci harmonik, ikinci harmonik şeklinde de bahsedilir. Alt harmonikler, 0.5x şeklinde belirtilirken ara harmonikler 1.5x, 2.5x şeklinde ifade edilir.

Yan bant: Merkez frekans etrafında (sağ ve sol yanında) eşit olarak yerleşmiş frekans bileşenleridir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Yan bant oluşumu



Pratikte makine veya elemanların simetrik olmamalarından dolayı yan bantlar merkez frekansa göre nadiren simetriklerdir. Merkez frekans, taşıyıcı frekans olarak adlandırılır. Dişli kavrama frekansı, rulman bilya geçiş frekansı katları, makine veya yapının rezonans frekansı veya ivme metrenin rezonans frekansı taşıyıcı frekans olabilir. Yan bantlar modülasyon frekansı olarak da adlandırılır. Çünkü modülasyon frekansı bir sinyalin modülasyonu sonucu oluşur. İki çeşit modülasyon vardır. Bunlar genlik ve frekans modülasyonudur. Genlik modülasyonu sabit bir frekans sinyalinin genliğindeki değişimdir. Frekans modülasyonu ise sabit bir genlik sinyalinin frekansındaki değişimdir. Genelde genlik modülasyonu yükleme durumundaki değişimle birlikte olur. Frekans modülasyonu ise hızdaki değişimle birlikte olur. Rulmanlı yataklarda genlik modülasyonu olur. Dişlilerde yan bantlar mil dönme hızında ve onun harmoniklerinde oluşur. Eksantrik dişli, eğik yada eksenini kaçık mil üzerinde dişli olması durumunda kavrama oluştuğunda genlik modülasyonları olur. Bu durumda dişleri periyodik olarak kavramaya sokan kuvvetten dolayı tekrarlayıcı yükleme olur. Milin her dönüşünde bir kez minimum ve maksimum kavrama kuvveti oluşur. Eksantriklik artınca yan bant genlikleri de artar [14].

Rezonans ve kritik hız : Rezonans, bir cismin doğal frekansında uyarılması durumunda ortaya çıkan durumdur. Her cismin doğal frekansı vardır. Şayet cisim doğal frekansında uyarılırsa, cisim çok düşük bir uyarı düzeyiyle çok yüksek titreşim seviyelerinde titreşir ve cisim tamamen tahrip olabilir. Makine elemanları, farklı çalışma hızlarında farklı frekanslar üretirler. Bu çalışma frekanslarının makine elemanına ait doğal frekanslarla çakışması durumunda makine elemanını tahrip edebilecek seviyelerde rezonans frekansları oluşabilmektedir. Rezonansa sebebiyet veren bu çalışma hızlarına kritik hız denir ve makine elemanı mümkün olduğu kadar bu hızlarda çalıştırılmamalıdır.

Bir kuvvetin şiddeti, meydana getirdiği hareketin deplasmanı, hızı ve ivmesi cinsinden belirtilebilir. Bu kavramlar şu şekilde açıklanabilir.

Deplasman: Bir kuvvetin etkisindeki kütlelerin belli bir referans noktasına göre kat ettiği mesafedir. mm, mikron, inç yada mil birimleriyle ifade edilir.

Hız: Birim zamanda alınan yoldur, titreşime neden olan parçanın ne kadar hızlı hareket ettiğinin ölçüsüdür. Deplasmanın birinci türevinin yada ivmenin integralinin alınması ile hesaplanır. Birimi mm/s, mikron/s yada inç/s olarak verilir.

İvme: Birim zamandaki hız değişimi ivmeyi verir. Deplasmanın ikinci yada hızın birinci türevi ile hesaplanır. Birimi  $\text{mm/s}^2$  yada g's olarak verilir (g's yer çekimi ivmesidir ve değeri  $g's= 9.81 \text{ m/s}^2$  dir.).

Ölçümleri yaparken büyüklük için hangi birimde ölçüm yapılması gerektiğine dikkat edilmelidir, zira gerek deplasmanın gerek hızın gerekse de ivmenin kendilerine has avantaj ve dezavantajları vardır. Deplasman ile ölçüm genellikle 10 Hz den küçük (600 CPM) devirlerde kullanılmalıdır. İvme ile yapılan ölçümlerde 5000 Hz (300.000 CPM) den büyük frekans üreten dişli ya da rotor sistemleri için kullanılır. Hız birimi ise genellikle 10 ile 2000 Hz (600–120.000 CPM) arasında kalan frekanslar için kullanılır.

Deplasman, hız ve ivme birimleri birbirleriyle ilgilidir. Bu birimlerin her üçü ile de ölçüm yapılmaktadır. Hangi ölçümün kullanılacağı çok önemlidir. Çünkü bazı ölçümler yanıltıcı olabilir. Bazen aynı makine bir birimle ölçüldüğü zaman normal değerler içinde olabilir, fakat diğer bir birim ile ölçüldüğünde ise titreşim normal değerler üzerinde olabilir.

Makinelerde sorun belirgin hale gelmiş ise deplasman ile de problem fark edilebilir. Fakat problemin başlangıç anında deplasman ile hiçbir sorun görülemeyebilir. Hız ile ölçüm yapıldığında gelişmekte olan bir sorun önceden fark edilebilir. Hız en çok kullanılan ölçüm birimlerinden biridir. Hız, yer değiştirmeye göre daha sağlıklıdır. İvme ise yüksek frekansların söz konusu olduğu yerlerde kullanılır. Mesela dişlilerdeki diş bozuklukları ve rulmanlardaki bilya gibi elemanlardaki bozuklukları anlamak için en sağlıklı yol ivme ölçümü yapmaktır. Fakat hız ölçümü yapmak da bir ip ucu ve fikir verebilir. Hız ölçümü ile ön bir inceleme yapıldıktan sonra ivme ile kesin bir teşhis konulabilir [15].

### 2.3.2. Kullanılacak vibrasyon parametresinin seçimi

Vibrasyon cihazları basitten karmaşığa doğru çok çeşitlidir ve bir çoğu vibrasyon büyüklüklerini birkaç parametre ile ölçebilir. Bu durumda genelde hız kullanılmasına rağmen, frekans çok azaldığı zaman deplasman, arttığı zaman ivme kullanılmaktadır. Bu durumda Tablo 2.1'de frekans aralığına göre kullanılması önerilen parametreler belirtilmiştir.

Tablo 2.1. Frekans aralığına göre kullanılması önerilen parametreler

Önerilen Parametre	Birim		Frekans Aralığı ( CPM )
	( Metrik )	( İngiliz )	
Deplasman	mikron	mil	0-600
Hız	mm/s	inç/s	600-60000
İvme	mm/s <sup>2</sup>		60000+

Aslında bazı formül ve diyagramlarla, deplasman, hız ve ivme birbirleri üzerinden hesaplanabilir veya bulunabilir. Bununla ilgili matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir;

$$a = \text{ivme}$$

$$v = \text{hız}$$

$$d = \text{deplasman}$$

$$f = \text{frekans}$$

$$a = 2\pi f v \quad (2.3)$$

$$v = 2\pi f d \quad (2.4)$$

$$d = v / 2\pi f \quad (2.5)$$

Burada ve her yerde formüllerin kullanımında dikkat edilecek bir noktada tüm büyüklüklerin metrik veya İngiliz sisteminde olması gerektiğidir [16].

### 2.3.3. Titreşim sensörleri

Günümüzde sıklıkla kullanılan 3 tip sensör vardır. Bunlar ivme sensörleri, hız sensörleri ve deplasman sensörleridir. Bu sensörler ayrıca kendi içlerinde de çeşitli gruplara ayrılmışlardır.

#### 2.3.3.1. İvme sensörleri

Direk ivme “g” ölçümü yaparlar. İvme ölçerlerin performanslarını etkileyen 3 temel karakteristikleri vardır. Bunlar voltaj hassasiyeti (mV/g), frekans (CPM,Hz) ve ağırlığıdır (oz,gr).

#### 2.3.3.2. Hız sensörleri

Hız sensörleri, pahalı oluşları, dar frekans bantları ve nispeten fazla olan ağırlıkları sebebi ile yerlerini ivme sensörlerine kaptırmışlardır. Ama yine de harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları ve birimlerinin herhangi bir çevrim işlemine ihtiyaç duymaması nedeni ile ivme sensörleriyle alınan ölçümlerin çevriminde ortaya çıkan gürültünün oluşmaması gibi avantajları vardır. Sismik ve piezoelektrik hız sensörü olmak üzere 2 temel çeşidi vardır. Piezoelektrik sensörlerin aksine, sismik hız sensörleri kendi kendilerine çalışırlar. Bu sistemin doğal frekansı 10 Hz civarındadır. Ağırlıkları sebebi ile sistem ataletini yenmek zorlaştığından, sismik hız sensörlerinin frekans limiti 1000-2000 Hz civarındadır. Daha yüksek yada düşük değerlerde direkt hız ölçümü yapılması gerekiyorsa piezoelektrik hız sensörleri kullanılmalıdır. Sismik sensörler manyetik alanlardan etkilenirken, piezoelektrik sensörlerde bu dezavantaj yoktur.

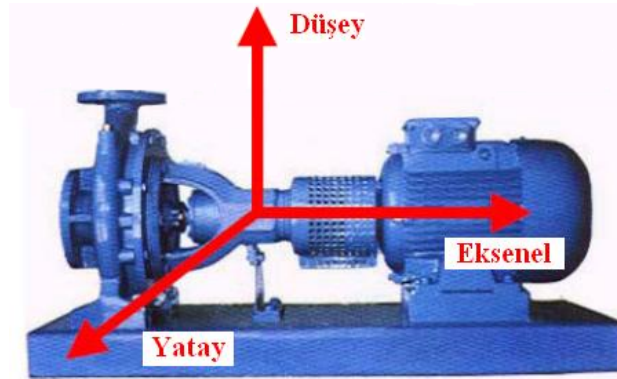
#### 2.3.3.3. Deplasman sensörleri

Deplasman sensörleri ivme ve hız sensörlerinin aksine, mutlak titreşim değerini değil, ölçüm noktasına göre şaft titreşimini ölçerler. Temaslı ve temassız tipler olmak üzere 2 grupta incelenebilirler. Temassız deplasman sensörleri genellikle şaft titreşimini, radyal/eksenel şaft pozisyonunu ve şaft pozisyonu ve rotor ile motor

gövdesi arasındaki diferansiyel genişlemeyi ölçmede kullanılırlar. Özellikle türbin, jeneratör ve kompresör gibi yağ filmleri üzerinde çalışan büyük motorlarda efektif olarak çalışırlar.

#### 2.3.4. Titreşim ölçüm yönleri

Ölçüm alınacak noktaların makine veya sistem üzerinde kendi gövdesinden ve yataklara en yakın yerlerden alınmalıdır [17]. Vibrasyon değerlerini mümkün olduğu sürece rulmana en yakın noktadan alınmalıdır, çünkü rotorlar rulmanlar ile yatakları olduğundan sistemdeki vibrasyonun en fazla algılandığı noktalardır.



Şekil 2.5. Titreşim ölçüm yönleri

Yapılacak ölçümler mümkün olduğunca radyal, yatay ve aksiyal olmak üzere 3 farklı yönden olmalıdır zira bu mekanik problemlerin teşhis edilmesine yardımcı olacaktır [18].



Şekil 2.6. Elektrik motorunda yapılan 3 yönde ölçüm

Tablo 2.2. Titreşim kaynağına göre ölçüm yönü

Titreşim Kaynağı	Ölçüm Yönü
Kütle dengesizliği	Radyal
Eğik şaft	Eksenel
Ekzantrik 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

### 2.3.5. Arızalar ve titreşim ilişkisi

Makinelerdeki değişik hasarlar titreşim sinyalinde değişik frekanslarda kendini gösterir. Buda hata teşhisinde esas teşkil eder. Frekans düzlemindeki titreşim sinyali, bir çok hata gelişimi hakkında bilgi verir. Arızalar hakkında daha çok bilgi sahibi olabilmek için makinelerden alınan titreşim ölçümlerinin dahil olduğu frekans bölgelerini bilmemiz gerekir.

Dönen makinelerden elde edilen titreşim frekanslarının spektrum grafiğinde temsil ettiği yer, araştırmacılar tarafından üç farklı bölgeye ayrılmıştır.

#### 2.3.5.1. Rotor titreşim bölgesi

Rotorla ilgili titreşimler normal olarak mil dönme hızının 1/4'ü ile 3 katı arasındaki

aralıkta oluşur ve en iyi hız veya yer değiştirme birimlerinde ölçülür. Çok genel amaçlı makineler 1200 ile 3600 d/d hız aralığında çalıştığı için rotor ile ilişkili titreşim sinyalleri 10 Hz'den 500 Hz'e kadar olan aralıkta kalmaktadır. Bir çok rulman arızası rotor ile ilişkili bozukluklar (dengesizlik, eksen kaçıklığı, rotor kararsızlığı) sonucu oluşmaktadır. Bu frekans bölgesindeki titreşim gözlemlenmezse rotor ile ilgili bozukluklar belirlenmeyecek buda devam eden süreçte rulman arızası oluşturacaktır. Rotor titreşim bölgesinde sadece rotorla ilgili titreşim olayları olmaz aynı zamanda rulmanla ilgili titreşim frekanslar da bu bölgede olabilirler. Hasarlı bir kafes, mil dönme hızının  $\frac{1}{2}$ 'sinin altında titreşim oluşturacaktır [14].

### **2.3.5.2. Eleman geçiş frekans bölgesi**

Rulman yataklı makinelerin durumunu gözlemlemek için ikinci frekans bölgesi eleman geçiş bölgesidir. Eleman geçişi, yuvarlanma elemanlarının iç veya dış bilezik hasarı üzerinden geçmesi sonucu oluşan rulman frekanslarını içine alan titreşim frekans aralığını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu frekans aralığı normal olarak eleman geçiş hızının 1'den 7 katına kadar olan kısmı içine alır ve yer değiştirme, hız veya ivme birimlerinde etkili olarak ölçülebilir. Eleman geçiş hızı yuvarlanma elemanının iç veya dış bilezikteki bir noktadan geçme anındaki hızı olarak tanımlanır. Saha çalışmaları tüm rulman hasarlarının yaklaşık %90'ının iç veya dış bilezik kusurları ile ilgili olduğunu göstermiştir. Diğer %10'u rotor titreşim bölgesinde titreşim frekansları üreten yuvarlanma elemanı veya kafes kusuru ile ilgilidir. Eleman geçiş bölgesinin oluşturulması ve rotor ile ilgili titreşim bileşenlerinin filtrelenmesiyle rulmanların durumlarının gözlemlenmesi geliştirilebilir [14].

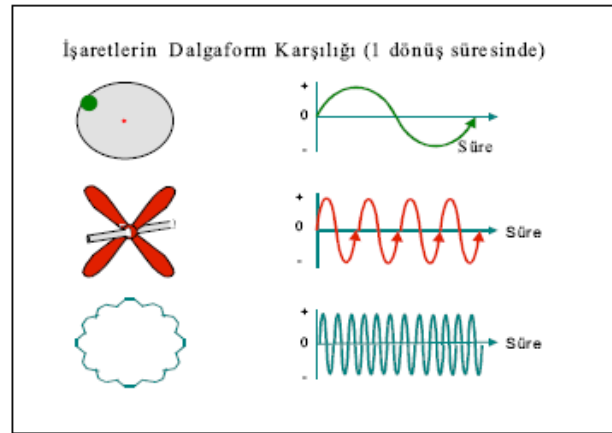
### **2.3.5.3. Yüksek frekans bölgesi**

Üçüncü frekans bölgesi yüksek frekans bölgesidir. Bu bölge 5 kHz'den yaklaşık 25 kHz'e kadar olan frekansları kapsar. Rulmanda bir kusur olduğunda üretilen titreşim sinyalleri kısa, ani darbeler şeklindedir. İvme ölçerler hafif sönümlü cihazlar oldukları için kendi rezonans frekansında çınlayarak bu tip sinyallere tepki gösterirler. İvme ölçerin montaj rezonans frekansı kullanılarak ve genliği ivme

biriminde ölçülerek rulmanların durumunu yüksek frekans bölgesinde gözlemlemek mümkündür. Ancak gürültüden etkilenebilen problemler ve hasarın ilerlemesine rağmen yüksek frekans genlik değerlerini azaltan rulman hasarının kendini ezmesi nedeniyle yüksek frekans ölçümleri sadece rotor titreşim ve eleman geçiş bölgelerine ek olarak kullanılmalıdır. Tecrübeler rulmanların durumu hakkındaki bilgilerin ve rulman hasarlarının belirtilerinin bir çoğunun eleman geçiş bölgesinde olduğu görülmüştür. Rotor davranışı hakkındaki bilgiler genellikle dönme hızının 1/4 ve 3 katı arasında oluşmaktadır. Oldukça yüksek frekanslardaki bilgiler makinenin durumu ile ilgili diğer bilgileri (sürtünmeler, kavitasyon, valf gürültüsü) içerdiği kadar, rulman hasarı hakkında oldukça erken uyarı verir [14].

### 2.3.6. Dalga form ve spektrum grafikleri

Dalga formu grafiği, analiz cihazı üzerinde set edilen frekans aralığındaki toplam titreşimin zaman eksenindeki değişimini görüntüler. Yatay eksen zamandır. Birim saniyedir. Dikey eksen genliktir. Arıza kendi kendine düzelmeyeceğinden sürekli milin her dönüşünde kendini tekrarlar. Bu nedenle her periyottaki desen birbirini andırmalıdır. Eğer bir tekrarlılık yok ise titreşime neden kaynak, makine dönüş devrinden çok, prosesten ya da çevredeki başka makinelerden gelebilir. Diske yapışmış bir parça, mil üzerinde dört kanat ve aynı mil üzerinde 12 dişli olan bir dişli çark olması durumlarında oluşacak dalga form grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.7. Üç farklı fiziksel olayın dalga formu



Bir periyodik fonksiyonu oluşturan harmonik fonksiyonları ayırım metoduna FFT, Hızlı Fourier Çevirimi denir. Fourier Serisi; periyodik bir sinyali meydana getiren, basit harmonik sinyallerin oluşturduğu seridir. Bu çevirim sonucu belirlenen harmonik sinyallerin, frekans ekseninde dizildiği grafik FFT spektrum grafiği olarak anılır.

### 2.3.7. Makinelerde görülen arızalar ve titreşim frekansları

Arızalar belirli frekanslarda titreşim üretirler. Bu frekansların bilinmesi sayesinde makinelerden elde edilen titreşim frekanslarında hangi arızaların katkısı olduğu belirlenebilir. Dolayısıyla makinedeki arıza da bu yolla tespit edilebilir. Frekans düzlemindeki titreşim sinyali, rulmanlı yataklardaki, dişli çarklardaki vb. hata gelişimleri hakkında bilgi verir. Bu bilgileri görebilmek için makinenin çalışma hızı, dişli kavrama frekansı, diş sayısı, rulman geometrisi gibi bilgileri bilmek gerekir.

#### 2.3.7.1. Balanssızlık ( Dengesizlik )

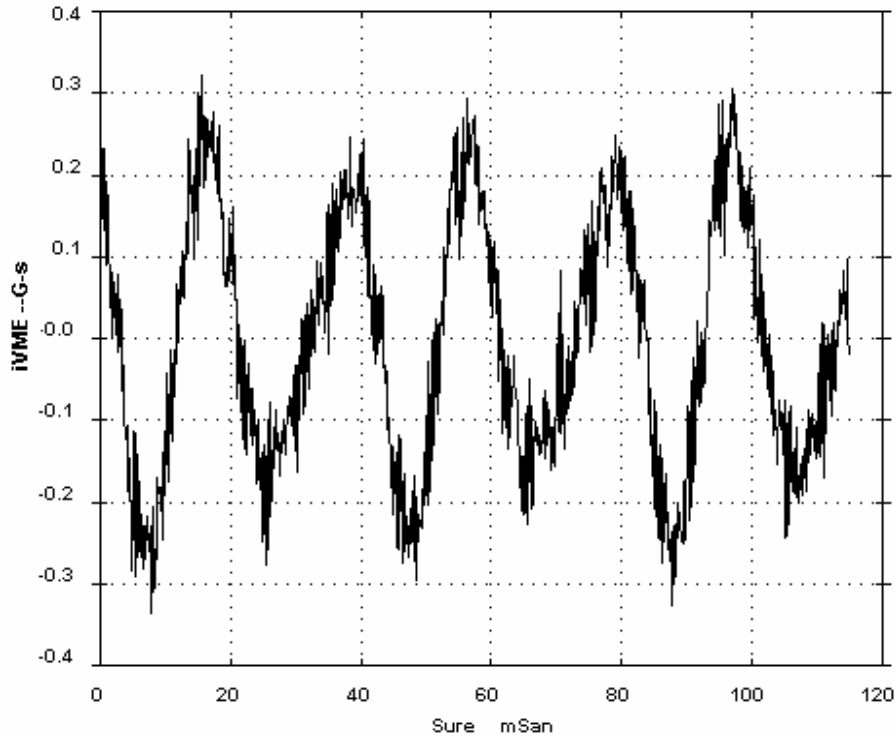
Balanssızlık şaft merkezi ile kütle merkezinin aynı olmaması sonucunda ortaya çıkan bir problemdir. Dönel parçalar üzerinde oluşan dengelenmemiş kuvvetler şiddetli titreşimler oluşturarak ana gövdeyi ve temelleri zorlarlar. Balans alma işlemi, temel olarak makine üzerindeki dengelenmemiş kütlelerin karşı bir kütle ile dengelenmesidir [19].

Pratikte mükemmel olarak dengelenmiş makine yoktur. Tüm makineler az seviyede de olsa dengesizdirler. Genel olarak dengesizlik nedenlerini;

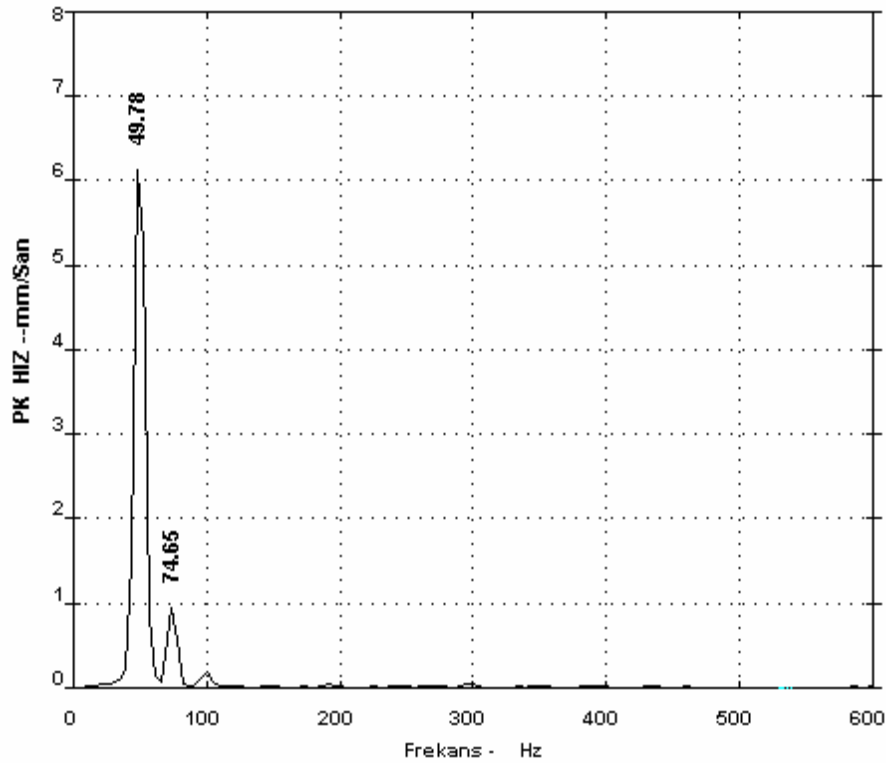
- a. Elemanlardaki malzemenin homojen olmaması.
- b. Parçanın geometrik olarak simetrik olmaması.
- c. Çalışma şartlarında meydana gelen ısıl genleşme, korozyon, aşınma, madde birikimi, v.s.
- d. Montajın balans şartlarına eş değer şartlarda yapılamaması.
- e. Kaymalı yatakların eksantrik monte edilmesi sonucunda, geometrik merkezin dışında bir merkez etrafında dönüş olarak gösterebiliriz.

Balanssızlık mutlaka 1xRPM'de yüksek titreşim olarak kendini gösterir (ancak 1xRPM deki titreşim her zaman balanssızlık olmayabilir). Sadece balanssızlık olması durumunda, 1xRPM deki sinyal genliği, toplam genliğin genellikle %80'i civarındadır (başka problemlerde varsa, bu oran %50-80 arasında olabilir). Balanssızlığa sebep olan kütle, sürekli yön değiştiren ama tüm radyal yönlerde uygulanan bir kuvvet oluşturur. 1xRPM frekansında, faz farkı  $0^\circ$  yada  $180^\circ$  ye yakın, yüksek bir sinyal var ise, balanssızlıktan değil, eksantriklikten şüphelenmek çok daha doğru olacaktır.

2985 d/d (49.78 Hz) devirle çalışmakta olan bir pompadan elde edilen titreşim değerleri incelendiğinde spektrum grafiğinde mil dönme hızının 1 katında tepe oluşması (Şekil 2.9), yine dalga form grafiğinin sinüs deseni şeklinde ve vuruntusuz olması (Şekil 2.8) dengesizliğin açık belirtisidir [20].



Şekil 2.8. Dengesizlik dalga form grafiği

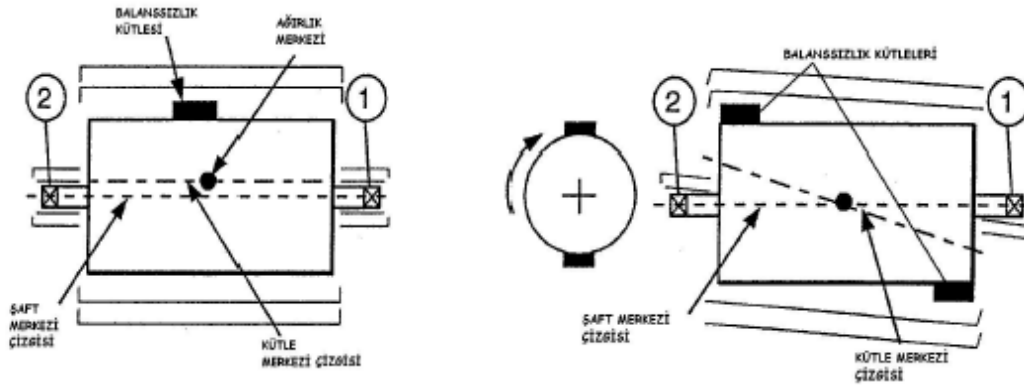


Şekil 2.9. Dengesizlik spektrum grafiği

Balanssızlığın üç temel çeşidi vardır;

**Statik balanssızlık:** Balanssızlığa sebep olan kütlelerin merkez çizgisinin, şaft merkez çizgisine paralel ve buna belirli bir mesafede olması durumunda ortaya çıkan balanssızlık çeşididir (Şekil 2.10). Statik balanssızlığın karakteristikleri; titreşimlerin her iki yatakta da eşit fazda olması ve balanssızlığa neden olan ağırlığın zıt yönünde eşit bir ağırlığın uygulanması ile tek düzlemde rahatlıkla giderilebilmesidir.

**Kuvvet çifti balanssızlığı:** Balanssızlığa sebep olan kütlelerin merkez çizgisinin şaft merkez çizgisini orta noktadan kesmesidir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi farklı iki düzleme  $180^\circ$  açı ile yerleştirilmiş iki kütle oluşturduğu balanssızlık gösterilmektedir. Bu tip bir balanssızlıkta; rotor statik olarak dengededir,  $1xRPM$ 'de her iki yatakta da yüksek genlikli titreşimler üretir, yataklardaki faz farkı  $180^\circ$  dir.



Şekil 2.10. Statik ve kuvvet çifti balanssızlıkları

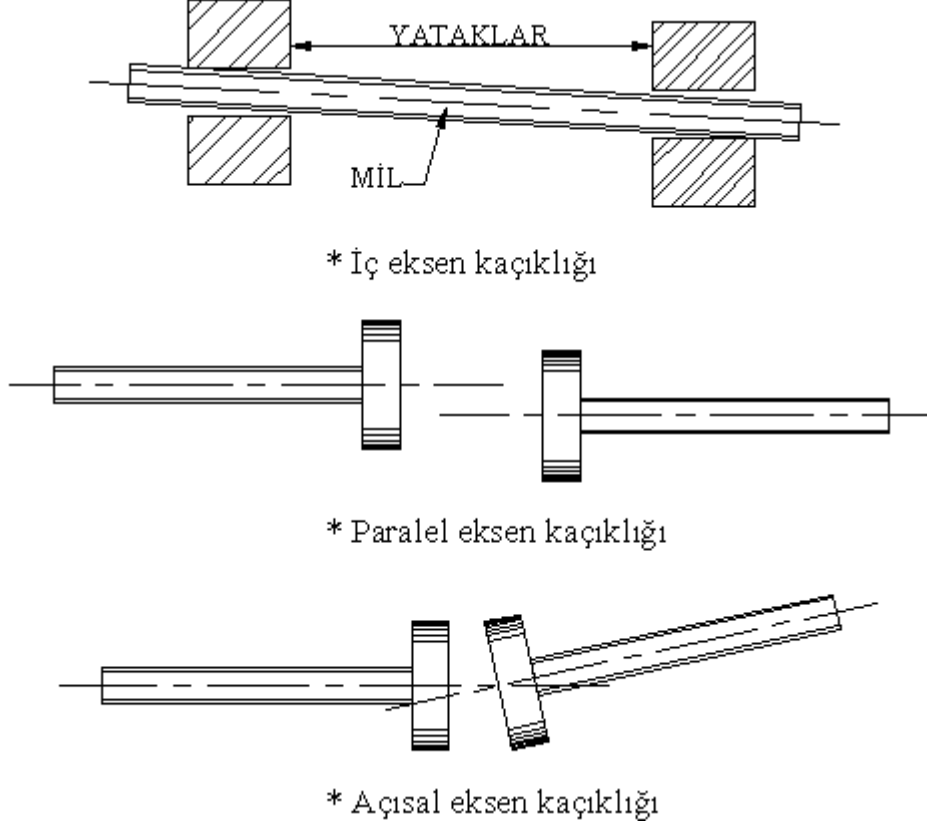
Dinamik balanssızlık: Diğer tiplere göre endüstride en sık karşılaşılan balanssızlık çeşididir. Statik balanssızlık ile kuvvet çifti balanssızlığının toplamından oluşur. Balanssızlığa sebep olan kütle merkezi ne şaft merkezine paraleldir, ne de bu merkezi orta noktadan keser. Bu balanssızlık türü, 1xRPM frekansında yüksek genlikli titreşimler oluşturur ancak yataklardaki genlikler farklıdır. Faz farkı,  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında herhangi bir değerde olabilir.

### 2.3.7.2. Eksen kaçıklığı

Eksen kaçıklığı, döndüren ve döndürülen makine millerinin aynı merkezde olmaması durumudur. Eksen kaçıklığı, makinelerin yanlış montajı ve anormal ön yüke sebep olan rulman yatağının ısıl genleşmesi sonucu oluşmaktadır. Genel olarak eksen kaçıklığının miller ve onları bağlayan kaplinler, V kayışları, ara bağlayıcılar arasında olduğu düşünülür. Ancak milin yataklarında ve makinenin diğer noktalarında da olabilir. Eksen kaçıklığının neden olduğu titreşimin spektrum grafiğinde mil dönme hızının 1 ve 2 katında tepe oluşur. Mil dönme hızının iki katında oluşan tepe baskındır. Dalga formu grafiğinde ise düzenli titreşim deseni oluşur [21].

İç, paralel ve açılmalık üzere üç çeşit eksen kaçıklığı vardır. Her üç tip eksen kaçıklığı makinede bariz bir dengesizlik oluşturacağı için spektrum grafiğinde 1x frekansında bir tepeciğe sebep olan titreşim meydana getirir. İç (yatak) ve paralel eksen kaçıklığı aynı zamanda 2x harmonik frekansında bir tepelik oluşmasına neden olur. Mil bir devir yapmasına rağmen iki yüksek frekans oluşturur. Bunlar mil

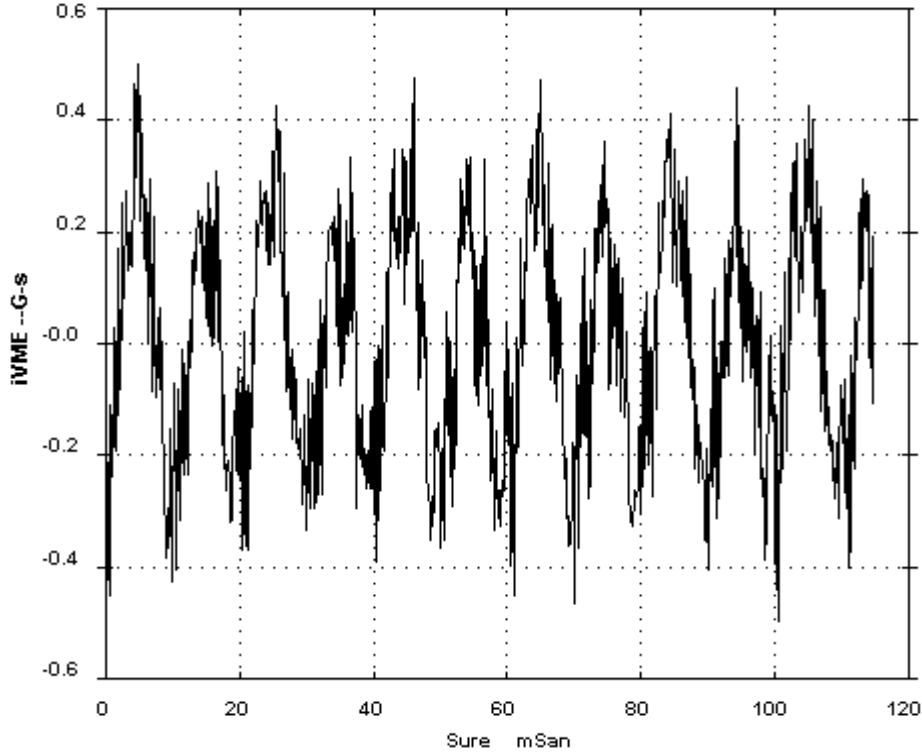
devrinin birinci (1x) ve ikinci (2x) harmonikleridir. Açısal eksen kaçıklığı birçok şekilde kendini gösterir ve titreşim spektrum grafiğinde 1x ve 2x bileşenlerinin oluşmasına yol açar. Faz ilişkisine bağlı olarak üçüncü harmonik (3x) frekansını da oluşturabilir. Aynı zamanda kuvvetli eksenel titreşim oluşturur.



Şekil 2.11. Eksen kaçıklığı çeşitleri

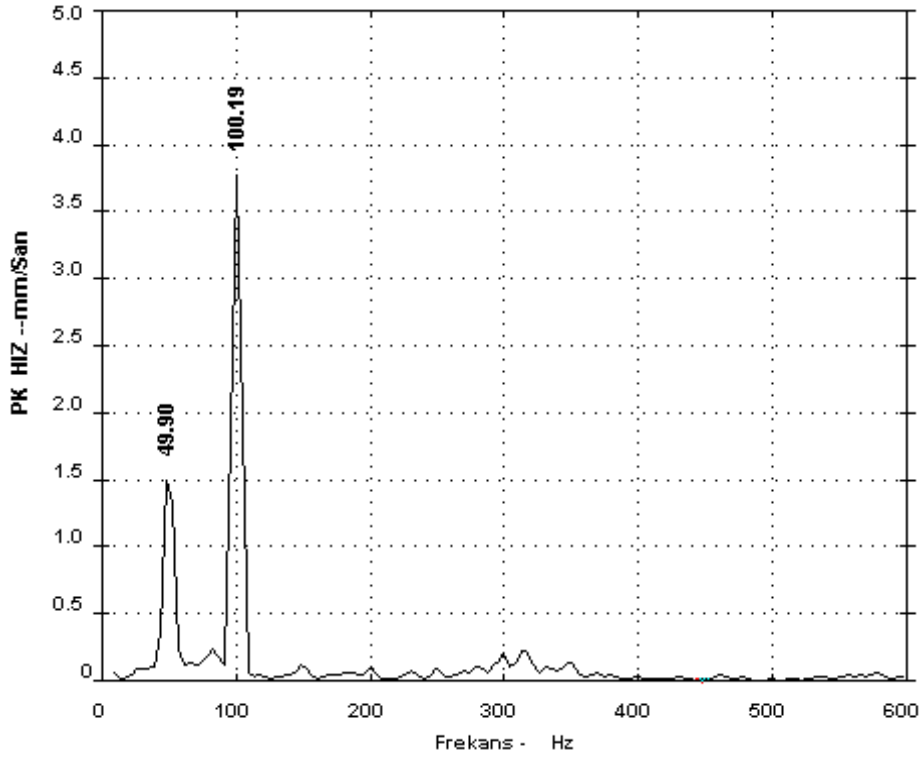
Bazı durumlarda eksen kaçıklığını mekanik gevşeklikten ayırmak zordur. Bu gibi durumlarda dalga formu tekrarlı bir şekle sahipse eksen kaçıklığına işaret eder. Açısal eksen kaçıklığı eksenel yönde kaplin boyunca tipik olarak  $180^\circ (\pm 30^\circ)$  faz kayması gösterir. Paralel eksen kaçıklığı radyal yönde kaplin boyunca tipik olarak  $180^\circ (\pm 30^\circ)$  faz kayması gösterir. Rulman eksen kaçıklığı, rulmanın bir tarafından diğer tarafına veya üst tarafından alt tarafına  $180^\circ (\pm 30^\circ)$  faz kayması gösterir. Eksen kaçıklığı olan rulman, bazen yuvarlanma elemanı sayısı ile dönme hızının çarpımından elde edilen frekansta titreşime sebep olur. Rulman eksen kaçıklığı, rulmanın bir tarafından diğer tarafına veya üst tarafından alt tarafına  $180^\circ (\pm 30^\circ)$  faz kayması gösterir.

Örneğin 2900 d/d ile dönmekte olan bir pompada kaplin ile mil arasında oluşan eksen kaçıklığının neden olduğu titreşimin dalga formu grafiğinde düzenli tekrarlı sinyallerin oluşması (Şekil 2.12), spektrum grafiğinde ise mil dönme devrinin 2 katında baskın frekansın oluşması (Şekil 2.13) ile eksen kaçıklığı kendini belli etmektedir [20].



Şekil 2.12. Eksen kaçıklığı dalga form grafiği

Ölçüm sonucunda oluşan arızanın dengesizlik mi eksen kaçıklığı mı olduğu hakkında kesin olarak bir karara varılamıyorsa, makineyi değişik hızlarda çalıştırıp dönme devri frekansının genliğini izlemek kolaylık sağlar. Eğer dengesizlik varsa makinenin hızı artırılınca titreşimin genliği de artacaktır. Tüm arızalarda olduğu gibi dengesizlik ve eksen kaçıklığı problemleri zamanında giderilmediği takdirde makinede başka arızaların oluşmasına neden olabilir.



Şekil 2.13. Eksen kaçıklığı spektrum grafiği

Eksen kaçıklığı, rulmanın dizayn edilen ve taşıyacağı yüklerden daha fazla yük taşımaya neden olur, buda rulmanın erken yorulmasına sebep olmaktadır. Rulmanın erken yorulması; rulmanın yük taşıma yüzeyinin altına uygulanan ekstra kuvvet neticesinde yuvarlanma yüzeylerinde parça kopmalarının meydana gelmesine sebep olur [22]. Buda aşırı sürtünmenin neden olduğu sıcaklık artışına ve kaplinde de hasarlanmaya neden olmaktadır. Sonuç olarak makinede titreşim ve gürültü artar.

### 2.3.7.3. Mekanik gevşeklik

Çalışan makine parçalarının bağlantılarında zamanla gevşemeler olmaktadır. Gevşeklik düşey ve yatay düzlemlerde olabilmekte, genellikle mil dönme devrinin çoklu harmonikleri (1x, 2x, 3x, 4x, v.s.) titreşim spektrum grafiğinde oluşmaktadır. Bazı durumlarda mil dönme devrinin yarım harmonikleri (0.5x, 1.5x, 2.5x, v.s.) de oluşmaktadır. Dalga formu grafiğinde ise düzensiz darbe sinyalleri oluşmaktadır [23]. Hemen hemen tüm durumlarda tam ve yarım harmonikler bulunmaktadır. Mekanik gevşeklik düşey ve yatay olmak üzere ikiye ayrılabilir.

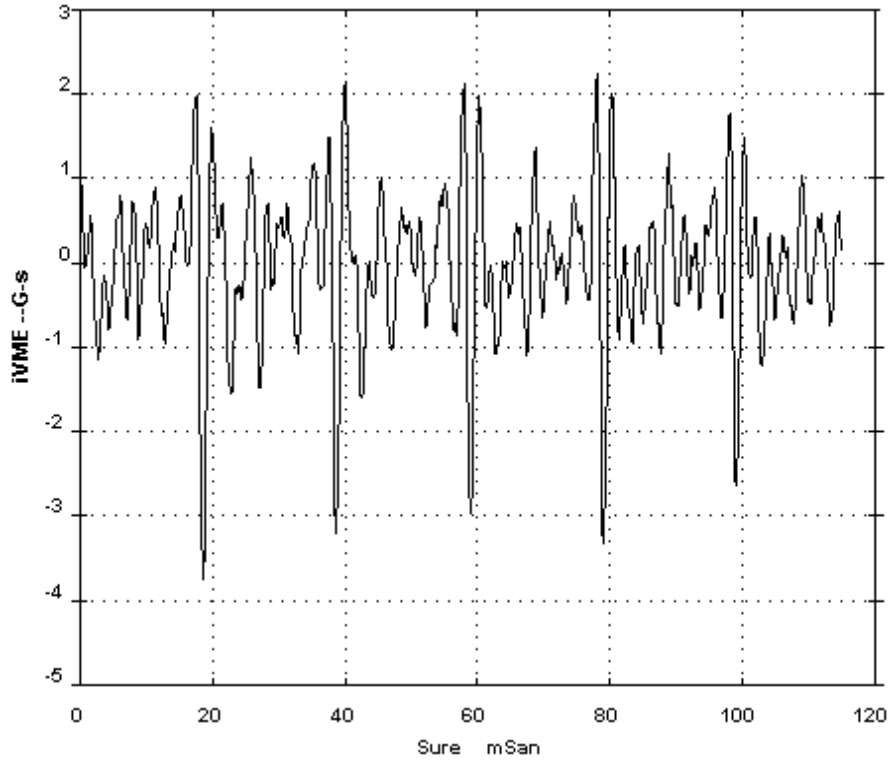
Düsey düzlemdeki gevşeklik mil dönme devrinin tam ve yarım harmonik titreşim frekanslarını ( $0.5x$ ,  $1x$ ,  $1.5x$ ,  $2x$ ,  $2.5x$ , v.s.) oluşturur. Birçok durumda yarım harmonik frekansların genliği, yaklaşık olarak harmonik frekansların genliğinin yarısına eşittirler. Tam ve yarım harmonik frekansların genliklerindeki farklılık yer çekimi ivmesinden kaynaklanmaktadır. Makine düşeyde yukarı doğru çıktığında yer çekimi çıkış kuvvetine direnir. Bu yüzden makine ayağının bağlantı civatası ile teması sonucu ortaya çıkan darbe kuvveti, çıkış kuvveti ile yer çekimi arasındaki farka eşittir. Makine geri düştüğünde yer çekimi kuvveti dengesizlikten oluşan kuvvet ile birleşir. Makine ayağının zemin ile teması sonucu ortaya çıkan darbe kuvveti, yer çekimi kuvveti ile dengesizlikten oluşan kuvvetin toplamına eşittir.

Yatay gevşeklik  $1x$  ve  $2x$  titreşim frekanslarını oluşturur. Makinenin enerji kaynağı makinenin dönen mili olduğu için esneme zamanı milin bir tam devrine yani  $1x$ 'e eşittir. Bu tek dönüş boyunca bağlantı ayakları denge konumunun her iki yönünde maksimum esneme miktarına ulaşırlar. Ayak ilk önce bir tarafa, sonra diğer tarafa yer değiştirdiği için yöndeki bu çift değişim mil dönüş hızının iki katında ( $2x$ ) bir frekans üretir.

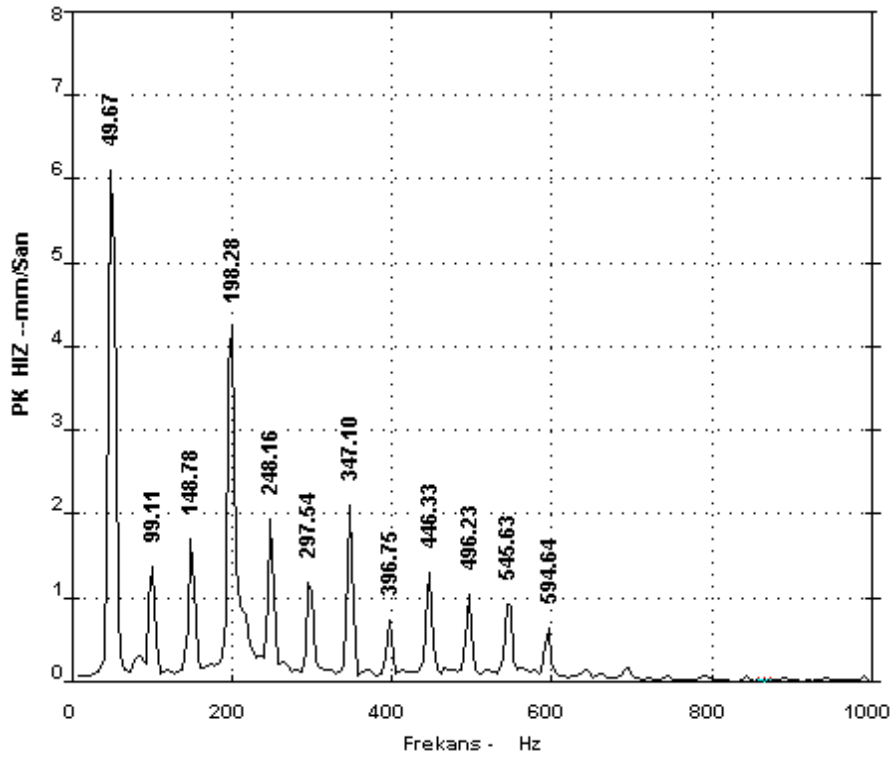
Örneğin  $2975$  d/d ( $49.58$  Hz) ile dönmekte olan  $9$  kademeli bir santrifüj pompada oluşan gevşeklik probleminin neden olduğu titreşim, spektrum grafiğinde mil dönme devrinin  $12$  katına kadar frekanslar ve dalga formu grafiğinde düzensiz darbeler ile gevşeklik belirtilerini net olarak göstermiştir (Şekil 2.14 – Şekil 2.15).

Bazı durumlarda eksen kaçıklığını mekanik gevşeklikten ayırmak zordur. Bu gibi durumlarda dalga formu tekrarlı bir şekle sahipse eksen kaçıklığına işaret eder. Eksen kaçıklığının en kolay belirtilerinden birisinin dalga formunun “M” ve “W” şeklinde bir desene sahip olduğu pratik çalışmalar sonucu görülmüştür [20].





Şekil 2.14. Gevşeklik dalga form grafiği



Şekil 2.15. Gevşeklik spektrum grafiği

#### 2.3.7.4. Dişli arızaları

Dişlilerdeki hatalar eksen kaçıklığı, dengesizlik, gevşeklik gibi mil hataları ve aşınma, çizilme, çatlak gibi diş ile ilgili hatalar olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılabilir [24]. Dişli hataları, hata türüne özgün belirgin titreşimler oluşturur. Bu yüzden diğer makine elemanlarında olduğu gibi dişli hataları da titreşim analizi ile belirlenebilmektedir. Dişli dişleri sabit bir açısal hız oranı sağlayacak şekilde tasarlanırlar. Yanlış diş profilleri, dişler arasındaki boşluk hataları ve diş sehimleri iletim hatasına sebep olur. İletim hatası da dişlilerin ve millerin titreşimine yol açar [25].

Bir dişlideki hasarlı bir diş, kavramaya her girişinde bir vuruşu oluşturur. Bu vuruşunun tekrarlanma frekansı dişlinin dönme hızına eşittir. Bu vuruşu helisel dişlilerde aksel tabii frekansları, düz dişlilerde ise radyal tabii frekansları uyarır. Kırık diş, kavrama halinde diğer dişe vurduğunda bir darbe sinyali üretilir. Sonra sağlam olan dişli kavramaya girer ve darbeden kaynaklanan titreşim azalır. Tek dişli hasarlı bir dişli her devirde bir darbe sinyali üretebilir. İki veya daha fazla diş kırıkta, her devirde iki veya daha fazla darbe sinyali oluşabilir. Her bir devir boyunca tek olay söz konusu olduğu var sayıldığında titreşimler arasındaki frekans farkı, problemlili dişlinin hızına eşittir. Her bir devir boyunca iki veya daha fazla olay gerçekleşiyorsa frekans farkı olayların sayısı ile problemlili dişlinin hızının çarpımına eşittir. Eğer her iki dişli de problemlili ise dişli kavrama frekansı her iki dişlinin hızında modülasyona uğrar. Böyle durumlarda iki dişlinin hızında yan bantlar oluşur ve analiz karmaşık bir hal alır.

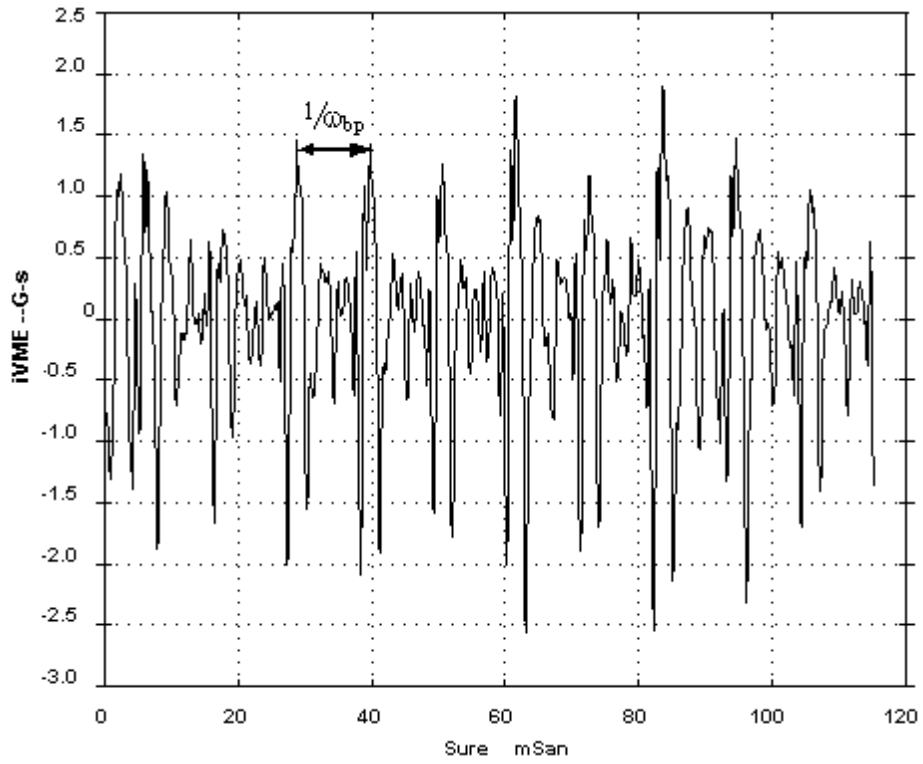
#### 2.3.7.5. Rulman arızaları

Rulmanlar dönen makinelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Makinelerin problemsiz çalışması rulmanların sağlıklı çalışması ile doğrudan ilgilidir. Makine yataklarından titreşim ölçülerek makinenin iç yapısında gelişen olaylar hakkında bilgi edinilebilir.

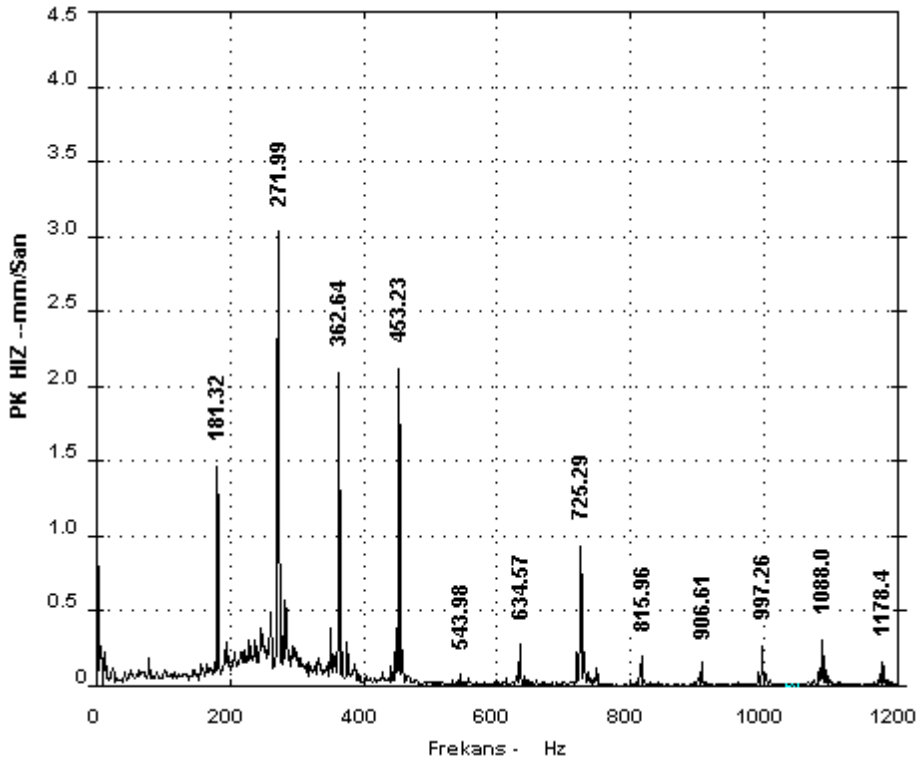
Rulmanların maksimum metal gerilmesi, dış bilezik yük bölgesinde ve yatak yüzeyinin birkaç milimetre altında gelişir. Bu yüzden aşınmalar genelde dış bilezikte başlar. Rulman aşınmalarının çoğu çatlak yada boşluk halinde başlar. Çatlaklar yüksek frekans bölgesinde darbe üretirler.

Rulmanların dönen makinelerin yataklanmasında çok kullanılmaları sebebiyle arızasız çalışmaları, makinelerin düzenli çalışması ve ömürleri açısından büyük önem taşımaktadır. Rulman arızaları iç bilezikte, bilyada, kafeste ve dış bilezikte oluşabilmektedir. Rulman arızaları, rulmanın geometrisi ve mil dönme devrine bağlı olan formüllerle hesaplanan arıza frekansları ile ölçüm sonucu elde edilen titreşim frekanslarının karşılaştırılması ile belirlenir. Hangi elemanda bir arıza oluşmuşsa titreşim frekanslarında bu elemanın arıza frekansları, bunun katları, bazı durumlarda mil dönme devri ile oluşturduğu yan bant frekansları bulunur. Sağlam bir rulmandan elde edilen titreşim frekanslarında da rulman arıza frekanslarına rastlanıldığı görülmüştür. Dolayısı ile rulman arıza frekansının oluşmuş olması her zaman rulmanın arızalı olduğu anlamına gelmez.

Örnek olarak Şekil 2.16'da 741 d/d (12.35 Hz) ile dönen büyük bir fanda gerçekleştirilen titreşim ölçümleri sırasında fan motoru iç yatak rulmanının dış bileziğinde tespit edilen bir hasarı gösteren grafikleri ele alalım. Söz konusu rulman SKF NU 224 tür. Formülle hesaplanan dış bilezik arıza frekansı 91.55 Hz'dir. Titreşim analizinden elde edilen frekansların, dış bilezik arıza frekansının 2, 3, 4, 5, ... ,13 katlarından oluştuğu görülmüştür. Yine dalga form grafiğinde kısa süreli darbe sinyallerinin frekansının dış bilezik arıza frekansına eşit olduğu görülmüştür . Bu iki durum birlikte değerlendirildiğinde bu arızanın dış bilezik arızası olduğu çok açıktır [20].

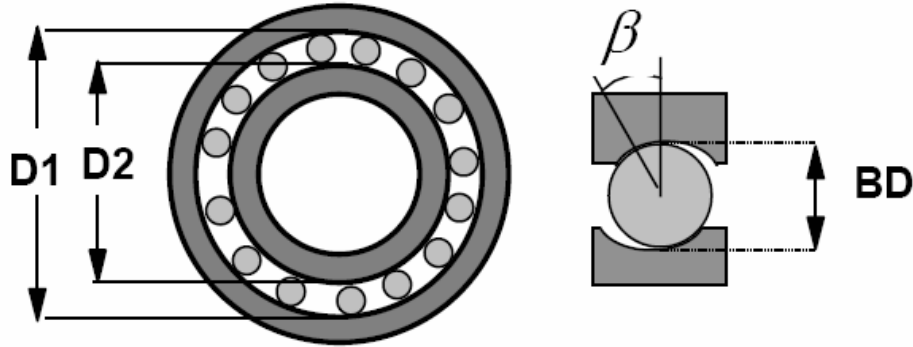


Şekil 2.16. Arızalı rulman dalga form grafiği



Şekil 2.17. Arızalı rulman spektrum grafiği

Rulmanda bir arıza oluşumunda arızayı karakterize eden dört çeşit arıza frekansı vardır. Bunlar dış bilezik, iç bilezik, yuvarlanma elemanı, ve kafes frekansdır. Bu frekanslar Şekil 2.18’de görülen rulman geometrisine göre hesaplanırlar.



Şekil 2.18. Rulman geometrisi

Dış bilezik bilya geçiş frekansı: Bilyalar veya yuvarlanma elemanlarının dış bilezik üzerinden geçerken oluşturdukları titreşim frekansıdır. Dış bilezik bilya geçiş frekansı; Denklem 2.6’daki gibidir.

$$BFO=f_{du} = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \quad (2.6)$$

Burada;

$n$  = Bilya sayısı

$$PD = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2.7)$$

$BD$  = Bilya Çapı

$f_r$  = Devir frekansı

$\beta$  = Temas açısı’dır.

Rulmanlarda dış bilezik arızaları aylar öncesinden belli olur. Titreşim spektrum grafiğinde kendini dış bilezik bilya geçiş frekansı ve harmoniklerinde belli eder.

İç bilezik bilya geçiş frekansı: Bilya veya yuvarlanma elemanlarının iç bilezik üzerinde bağlı dönme hareketleri neticesinde oluşan titreşim frekanslarıdır. İç bilezik bilya geçiş frekansı Denklem 2.8'deki gibi hesaplanır.

$$\text{BPFI} = f_{i\dot{c}} = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \quad (2.8)$$

İç bilezik arızaları günler veya haftalar öncesinde belli olur. Spektrum grafiğinde iç bilezik bilya geçiş frekansı, yan bantlar vede devir sayısı harmoniklerinde kendini belli eder.

Bilya dönme frekansı: Her bir bilya veya yuvarlanma elemanı bilezikler etrafında döndüğü için kendi eksenini etrafında da dönmüş olur. Spektrum grafiğinde bilya dönme frekansını oluşturan bu dönme hareketi bilya dönmesi olarak adlandırılır. Bilya dönme frekansı Denklem 2.9'daki gibi hesaplanır.

$$\text{BSF} = f_{\text{bilya}} = f_r \frac{PD}{BD} \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos\beta \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

Bilya arızaları anında müdahale gerektirir. Spektrum grafiğinde bilya dönme frekansı ve harmoniklerinde kendini gösterir.

Kafes frekansı: Rulman kafesi bileziklerin hızına bağlı olarak döner. Kafes; yuvarlanma elemanlarını birbirine bağlayarak onların birbirine çarpıp çarpmaması için aralarında belirli boşluklar oluşturulmasını sağlar. İyi bir yağlama sağlansa bile yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasında sürtünme olur. Genellikle mil hızının yarısına yakın bir hızla döner [14].

Kafes frekansı denklem 2.10'deki gibi hesaplanır.

$$f_{\text{kafes}} = f_r \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \quad (2.10)$$

Rulman hakkında yeterli bilgi edinilemiyorsa, sadece yuvarlanma elemanı sayısının bilinmesi ile rulman hasar frekansları yaklaşık olarak aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilir [14].

$$f_{\text{kafes}} \cong 0,4 \times f_r \quad (2.11)$$

$$f_{\text{du}} = 0,4 \times f_r \times N_b \quad (2.12)$$

$$f_{\text{iç}} = 0,6 \times f_r \times N_b \quad (2.13)$$

Burada  $N_b$  yuvarlanma elemanı sayısıdır.

### 2.3.7.6. Elektriksel arızalar

Her ne kadar, titreşim analizi ile elektriksel problemlerin tespit edilebilmesi garip görünse de, motorun oluşturduğu manyetik alanın ve tetiklediği manyetik kuvvetlerin yataklara iletildiği ve bunlarında titreşimler olarak algılanacakları bir gerçektir. Elektrik motorlarıyla ilgili olarak bilinmesi gereken başlıca eşitlikler aşağıdadır;

$$N_s = \frac{120F_L}{P} \quad (2.14)$$

$$F_s = N_s \times \text{RPM} \quad (2.15)$$

$$F_p = F_s \times P \quad (2.16)$$

$$\text{RBPF} = \text{Rotor Çubuğu} \times \text{RPM} \quad (2.17)$$

$F_L$  = Elektrik hat frekansı (genellikle 50 Hz)

RPM = Rotor hızı

$N_s$  = Senkron hızı

$$F_s = \text{Kayma frekansı} (N_s - \text{RPM}) \quad (2.18)$$

$F_p$  = Kutup geçiş frekansı

P = Kutup sayısı

RBPF = Rotor çubuğu geçiş frekansı

Birçok elektriksel problem  $2x$  elektriksel hat frekansında tespit edilir. Bunun sebebi, 2 kutuplu 3600 rpm'lik bir motorun 1 turunda, hafif eksantriklik durumunda, rotor ile statorun birbirine en yakın noktasından 2 kez geçmesidir. Rotorla statorun doğru olarak merkezlenemediği durumlarda, rotorla stator arasında değişken bir hava boşluğu oluşur ve bu boşluk her zaman  $2x$  hat frekansı titreşimini etkiler.



Tablo 2.3. Makine çalışma hızı ile orantılı olarak ortaya çıkan frekans değerlerine göre, vibrasyona sebep olan muhtemel makine kusurları

Üretilen Frekans (Makine Çalışma Hızı Cinsinden )	En Kuvvetli Sebep	Diğer Muhtemel Sebepler
1xRPM	Balanssızlık	* Eksantrik muylu, dişli, kasnak * Ayarsızlık veya yamulmuş şaft (Eğer yüksek aksiyal vibrasyon varsa) * Kayış problemi (Eğer kayışın RPM de ise) * Rezonans * Elektrik problemi * Piston (Dalma) hareketi
2xRPM	Mekanik boşluk veya gevşeklik	* Ayarsızlık (Eğer yüksek aksiyal vibrasyon varsa) * Piston (Dalma) hareketi * Rezonans * Kayış problemi (Eğer 2xRPM de ise)
3xRPM	Ayarsızlık	* Genellikle ayarsızlık ve aşırı aksiyal gevşeklik kombinasyonu şeklinde
1xRPMden küçük (0.4xRPM gibi)	Yağ çalkalanması (Eğer ½ RPM den küçükse)	* Kusurlu kayış-kasnak * Temelden vibrasyon * Alt harmonik rezonans
Senkronize (AC frekansı-50 Hz)	Elektriksel problemler	* Elektriksel problemlerin çoğu elektrik motorundaki sorunlardan kaynaklanır
Birçok kez RPM	* Kötü dişliler * Aerodinamik güçler * Hidrolik güçler * Mekanik gevşeklikler * Piston hareketi	* Dişli sayısı x RPM ( Hasarlı dişlinin ) * Fanın kanatçık sayısı x RPM * Pompanın kanatçık sayısı x RPM
Çok yüksek frekans	Rulman hasarı	* Sürtünme * Kavitasyon * Türbülanslı akış * Akışkan geri tepmesi

Tablo 2.4. Makine çalışma hızı ile orantılı olarak ortaya çıkan frekans değerlerine göre, vibrasyona sebep olan muhtemel makine kusurları

Vibrasyon Kaynağı	Frekans	Büyüklik	Açıklamalar
Balanssızlık	1xRPM	Balanssızlıkla orantılı ve radyal yönde	En kuvvetli vibrasyon sebebi
Kaplin veya rulman ayarsızlığı, yamuk şaft	Genelde 1xRPM bazen 2 veya 3xRPM	Radyal yöne göre, aksiyal yönde %50 veya daha fazla oranda yüksek	Büyük aksiyal değer en büyük delildir. Komparatör ile ölçüm yapılır
Rulman hasarlı	Çok yüksek veya birçok kez xRPM	Genelde kararsız	Yüksek veya güçlü frekansın elde edildiği nokta rulmana yakınsa vibrasyon kaynağı rulmandır
<p>* Rulmanların hasarlı olmasından kaynaklanan frekans sayısı hasarın iç ve dış bilezikte olmasına göre değişir. Şöyle ki;  Rulman iç bileziği hasarlı ise yaklaşık vibrasyon frekans değeri = <math>0,6 \times \text{RPM} \times \text{Yuv.El.Sayısı}</math>  Rulman dış bileziği hasarlı ise yaklaşık vibrasyon frekans değeri = <math>0,4 \times \text{RPM} \times \text{Yuv.El.Sayısı}</math></p>			
Eksantrik mıyulu	1xRPM	Genelde yüksek değil	Elek. motorunda ise akım kesilince durması tespitinde yararlıdır, fanda ve vantilatörde ise balans yapılır
Hasarlı dişli veya sesli dişli	RPMxDişli sayısı	Genelde yüksek değil	Dişli modüllerinde hasar kırık-çatlak modül var. Dişliler eksantrik, yan boşluk problemi
Mekanik gevşeklik	2xRPM		Genelde balanssızlık ve /veya ayarsızlık ile birlikte var olur
Kusurlu kayış	1,2,3,4xKayış RPM si	Kararsız	Stroboskop kayışın problemini teşhis etmede en iyi yoldur.
Elektriksel	1xRPM 1 veya 2 Frekans (50Hz)		Enerji kesilirse vibrasyon büyüklüğü aniden kaybolur
Aerodinamik&Hidrolik kuvvetler	1xRPM veya fandaki/pompadaki kanat sayısı ile RPM çarpımı		Rezonans dışında nadir olarak problem yaratır
Piston hareketi (Krank)	1,2 veya daha çok xRPM		Tasarım değişikliği veya izolasyon ile çözülebilir.

## 2.4. Yağ Analizi

Mekanik parçalar temelde 10 mikronluk bir yağ filmi üzerinde çalışırlar ki bu kalınlık yaklaşık olarak bir kan hücresinin çapına eşittir. Bu yağ filminin ortadan kalkması arızanın oluşması anlamına gelir. Bu yağ filminin temiz ve sağlıklı olması son derece önemlidir. Bu amaca ulaşılmasını sağlayan kestirimci bakım metodu yağ analizi olarak adlandırılır. Buna ek olarak, insan vücudundaki kan gibi, makinelerdeki yağ da makinenin sağlığı ile ilgili olarak çok önemli ip uçları verir. Yağ analiziyle bu ip uçları analiz edilerek operasyonları ve bakım kararlarını etkileyen çok önemli bilgilere dönüştürülür. Yağ analizi sadece kullanılan yağa yapılmamalıdır. Çoğunlukla, işletmeye yeni giren yağın temiz ve standartlara uygun olduğu gibi bir kabul yapılır, ancak bu kabul son derece tehlikeli ve yanıltıcıdır. Gelen yağın uygun özelliklerde ve temiz olup olmadığının anlaşılması için, ilk girişte yağdaki parçacık sayımı yapılmalı, nemi ve viskozitesi kontrol edilmelidir. Aynı şekilde, stokta bekleyen yağlar da düzenli olarak kontrol edilmelidir. Bununla birlikte, yapılan rutin kontrollerle makinelere hatalı yağ eklenmesi, sistemdeki keçe ve sıyrıcıların düzgün çalışmaması yada aşınması sonucu sisteme su veya pislik girmesi, bakımı yapılan, yeni yada tamir edilen makinelerin haznelerindeki yağın parçacıktan arınmamış veya kirli olması gibi problemlerin önüne geçilir [26].

Yağ analizinde yapılan parçacık sayımı ile makinedeki filtre arızaları, aşınma ve sürtünme gibi problemler tespit edilebilir. Eğer metal parçacık sayımı da yapılırsa, tespit edilen parçacıkların kir mi, yoksa keçe parçacıkları yada aşınma sonucu oluşan metal parçacıkları mı oldukları kolaylıkla belirlenebilir ve arıza kaynağının çok daha çabuk bir şekilde tespiti sağlanabilir. Metalin metale sürtmesinin temel nedeni olan düşük viskozite periyodik olarak izlenebilir, yağın içindeki kesif parçalar ve su miktarı belirlenerek yağın kimyasal değerleri takip edilir ve özelliklerini kaybetmeye başladığı noktada, bir arıza kaynağı tespit edilmişse (filtre arızası, keçe yırtılması, yağa soğutucu karışması vs.) yağ değişimi ve/veya arızanın giderilmesi için planlama yapılarak makine bakıma alınabilir [27].

İşletmelerde, yağ değişim takvimleri hazırlanırken çoğunlukla göz ardı edilen birçok gizli maliyet bulunmaktadır. İşletmelerin çoğunda, yağ değişim maliyeti, atık yağın

uzaklaştırılmasının (ISO 14001 çevre yönetim sistemine göre), yeni yağın ve yağ değişim işçiliğinin maliyetlerinin toplamına eşit olarak alınır, fakat bunlar buz dağının sadece görünen kısmıdır. Bu maliyete ek olarak kullanım ömrü daha dolmamış olan yağın atılmasının, duruş süresinin, üretim kaybının, taşımanın, yağın stok maliyetlerinin de hesaplanması gerekir. Ayrıca yağ değişimi sonrasında yanlış yağ kullanımı, yağ tankını eksik yada fazla doldurma, tezgâhı yağsız çalıştırma, yağa pislik bulaşması gibi sorunlar dolayısı ile tezgâhın arıza yapabileceği gerçeği de göz ardı edilmemesi gereken bir risktir.

Yağ değişimi, analizlerde göz önüne alınan testlerin sonuçlarına bakılarak gerektiğince yapılır. Yağ analizi için yüzlerce çeşit test metodu bulunmakla birlikte, temelde iki çeşit analitik analizden bahsedebiliriz. Bunlardan ilki yağın fiziksel özellikleriyle, diğeri kirlilik seviyesi ile ilgilidir. Fiziksel özellikler yağın durumunu çok iyi bir şekilde belirtir ve genellikle yağ değişimine karar verilmesinde kullanılır. Sıklıkla kullanılan fiziksel testler, viskozite, TAN ve TBN (yağdaki katkı maddelerinin sayımı) testleridir. Kirlilik seviyesi testleri ise genelde radyatör kaçakları yada filtre arızalarının bulunmasında kullanılır. En sık kullanılan kirlilik seviyesi testleri yakıt derişimi, parçacık sayımı, yağdaki su miktarı ve metal aşınma analizidir.

Yağları, motor yağları ve hidrolik yağlar olarak ikiye ayırırsak, bu ayrımın sebebi motor yağlarında yanma sonucu kimyasal değişimler olur iken hidrolik yağlarda bu tarz kimyasal değişimler olmamasıdır. Motor yağlarında yapılacak yağ analizleri sonucunda, sağlıklı yağ kullanımı ile motor ömrü artar. Ayrıca yapılan analizler sonucunda motor problemleri, çok daha ciddi boyutlara ulaşmadan fark edilebilir.

### **2.4.1. Motor yağı analizi**

#### **2.4.1.1. Viskozite**

Motor yağının bozulmaya başladığını gösteren temel göstergelerdendir. Genellikle 37°C deki SUS (Saybolt Universal Seconds) birimi ile gösterilir. Viskozitedeki %25'lik artış, yağın kullanılabilir ömrünün tamamlandığını gösterir.

#### **2.4.1.2. Yağdaki katkı maddelerinin sayısı (TBN)**

Birçok motor yağının içine, özelliklerini iyileştirici katkı maddeleri eklenerek daha uzun süre çalışması sağlanmaya çalışılır. Motor yağı formülleri çok çeşitli olduğundan dolayı TBN analizi sonuçları, analiz edilen yağın bilgi formundan kontrol edilir. Bilgi formundaki değerlere göre oluşacak %50'lik bir azalma, yağın bozulmaya başladığını gösterir.

#### **2.4.1.3. Yağ durum analizi**

Yağ durum analizi, analiz programlarının önemli bir bölümünü oluşturur. Yağdaki bozulmayı izleyerek, parçalarda oluşması muhtemel hasarların önüne geçilmesine yardımcı olur. Kirlenme, sıcaklık ve oksijene maruz kalması, yağın bozulmasına neden olur. Özellikle motor yağı, sülfür, nitrasyon, yanma ürünleri, yüksek sıcaklıklar, yanma sebebi veya yoğunlaşmadan kaynaklanan su nedeniyle bozulabilir. Bu analiz yapılmadan önce, temiz bir yağ örneği analiz edilerek veri bankasına kaydedilmelidir. Böylelikle, analiz edilecek olan kullanılmış yağdaki değişimlerin karşılaştırılabileceği bir numune elde edilir.

Yağ durum analizi ile, kullanım sırasında yağın ne kadar bozulduğu ve istenilen kriterlere uygunluk derecesi saptanabilir. Yağ durum analizinde incelenen parametreler ve bu parametrelerin motorda sebep olabileceği arızalar şu şekilde özetlenebilir.

**Kurum:** Sadece motor yağında bulunur ve tam olarak yanamayan yakıtın çözünemeyen artıklarıdır. Yüksek konsantrasyondaki kurum, birbirine temas eden yüzeylerde yağlanmayı azaltarak aşınmaya neden olur.

**Oksidasyon:** Yüksek yağ sıcaklığı, motor yağı soğutucusundan kaynaklanan antifriz, bakırın varlığı ve yağ değişim süresinin uzaması, oksidasyonu hızlandıran etkenlerdir. Oksidasyon yağı kalınlaştırarak asit oluşumuna sebep olur, yağlama kalitesini azaltır ve motorun ömrünü kısaltır.

Nitrasyon ürünleri: Nitrasyon ürünleri bütün motor yağlarında ortaya çıkar. Yanma ürünlerinden gelen nitrasyon bileşikleri yağı incelterek yağlama yeteneğini azaltır.

Sülfür (Kükürt) ürünleri/asitler: Sülfür (kükürt) yakıtta bulunur ve tüm motoru etkiler. Yanma sırasında yakıttaki sülfür oksitlenir ve suyla karışması sonucu sülfürik asit meydana gelir. Asit bütün motor parçalarını aşındırır.

Antifriz: Antifriz, yağın hızla oksitlenmesine neden olur ve genellikle soğutma sistemindeki bir kaçağı işaret eder. Yağda antifrizin en az miktarı bile kabul edilemez.

Su: Yağlar ortalama olarak içlerinde %1 kadar yağ çözebilirler. Eğer analiz sonucunda, yağda su olma ihtimali tespit edilirse, hot plate metodu ile yaklaşık su miktarı belirlenir. Su miktarının %0.5'in üzerinde olması aşırı yüksek seviye olarak kabul edilir.

Yakıt: Yağa yakıt karıştığı, “flash test” kullanılarak doğrulanır. Yağa yakıt karışması genellikle yanlış ateşleme zamanı, motorun uzun süre rölantide çalışması, hasarlı enjektör, pompa veya yakıt borularından kaynaklanır.

#### **2.4.1.4. Aşınma miktarı analizi**

Aşınmış metal parçalarının analizi hangi motor parçasının arızalandığı konusunda bilgi verir. Birçok testte, 10 mikron büyüklüğe kadar olan bakır, demir, krom, kurşun, alüminyum, molibden, silikon ve sodyum elementlerinin varlığı araştırılır. Yağ içindeki elementlere bakılarak motor elemanlarındaki aşınmalar tespit edilir [28].

Endüstriyel hidrolik yağlarda ise periyodik yağ analizi daha uzun tezgâh ömrü, daha az duruş ve daha fazla verim anlamına gelmektedir.

## **2.4.2. Hidrolik yağı analizi**

### **2.4.2.1. Viskozite**

Hidrolik yağındaki bozulmayı gösteren temel göstergelerden biri viskozitedir. Viskozitede oluşacak %10 seviyesindeki bir artış, yağın ömrünü tamamladığını gösterir.

### **2.4.2.2. Asitlik (TAN)**

Yağdaki bozulmayı ölçmeye yarayan bir başka metottur. Hidrolik yağları bozuldukça, asidik yan ürünler üretmeye başlarlar. TAN, bir gram örneği nötr hale getirmek için gereken potasyum hidroksit oranını gösterir.

### **2.4.2.3. Su miktarı**

Hidrolik sistemlerin en büyük problemlerinden biride yağa su karışmasıdır. Su sadece kötü bir yağlayıcı değil, aynı zamanda korozyon hızlandırıcıdır. Petrol türevi birçok yağın %1 oranında su çözebilme kapasitesine sahip olduğu göz önüne alınırsa, %0,2 uygun bir uyarı noktası olarak gösterilebilir.

### **2.4.2.4. Parçacık sayısı:**

Temiz yağ, bir sistemin sağlıklı çalışmasının en önemli şartlarından biridir. Yağ her ne kadar temiz görünse de, içinde sistemin aşınmasına neden olacak, verimini ve performansını düşürecek birçok küçük parçacık barındırır. Parçacık sayısı, 2 ile 100 mikron arasındaki tüm parçaları sayarak gruplandırır, ancak metal olup olmadıklarını tespit edemez. Bu sebeple genellikle aşınma miktarı analizi ile birlikte kullanılır ve yağdaki hortum, conta, o-ring, keçe vs. parçacıklarının tespitinde son derece etkili bir araç haline gelir.

### 2.4.3. Akışkanları ayırt etmede kullanılan fiziksel testler

Akışkanları ayırt etmede kullanılan yüzlerce farklı test türü vardır. Ancak bunlardan bir kısmı üretici ve satıcılar tarafından hem ekonomikliği hem de daha doğru sonuç vermesi ve kullanışlı olması dolayısı ile tercih edilir.

#### 2.4.3.1. Görsel ve fiziksel testler

**Görünüm:** Yapılabilecek en kolay testlerdendir. Yağın kirliliği ve durumu ile ilgili birçok ipucu içerir. Bununla birlikte; sonuçları kişiseldir, temizken koyu olan yağlarda sonuç vermesi çok zordur, kirlilik seviyesini ve yağdaki parçacıkların cinsini veremez.

**Koku:** Genellikle yağların çok ayırt edici bir kokuları yoktur. Yağda fark edilecek normal dışı kokular yağın bozulmaya başladığının göstergesidir. Bu metodun sonuçları da kişiseldir ve testi yapanın koku duyusunun gücünden etkilenir. Ayrıca kapalı tanklar ve saklama kapları ilk açıldıklarında, içeride biriken buharın oluşturduğu güçlü koku test edeni yanıltabilir.

**Viskozite (Düşen kütle testi):** Yağ analizlerinde yapılan en önemli testlerden birisidir. Testte viskozitesi bilinen bir yağ ile test edilecek yağ özdeş kaplara konularak içlerine bir kütle atılır ve kütlelerin düşüşü gözlemlenir. Kütlelerin arasındaki mesafe, viskozitenin hesaplanmasında kullanılır. Bu test genelde %1 yanılma payı ile sonuç verir.

**Kurutma kâğıdı testi:** Karter yağlarındaki çamur oluşumunu tespit etmek için kullanılan bir testtir.

**Su içerme (Çatlama testi):** Yağda bulunan küçük miktardaki su (~%0,1) yağ içerisinde kendini pek belli etmez fakat 120-125°C deki sıcak bir yüzeye damlatılırsa, çatlama benzeri bir ses çıkararak hızla buharlaşır. Oldukça kişisel olan bu test yağdaki su miktarını tam olarak belirtmez.



Parçacık sayımı (Benek testi): Benek testi, parçacık sayımında kullanılan en basit testlerden biridir. Yaklaşık 100 ml hacmindeki yağ, standart boydaki bir filtre kâğıdından geçirilir. Kâğıt kurutularak, oluşan benek, parçacık seviyeleri bilinen resimler ile karşılaştırılır. Bu test sonucunda, yağdaki parçacık boyutu ortaya çıkar ancak kompozisyonu tam olarak belirlenemez.

#### **2.4.3.2. Metal aşınma analizi**

Bu analiz iki başlık altında incelenebilir.

Metal aşınma analizi (Atomik soğurma yöntemi): Bu metotta, yağ örneği yüksek sıcaklıkta yakılarak metal parçaların ne kadar enerji soğurduğu bulunur. Analiz edilen her metal için örnek, kalibreli cihazdan tekrar geçirilir. Bu metotta analiz edilen metal başına doğruluk oranı çok yüksektir ancak çok zaman alır.

Metal aşınma analizi (Emisyon spektrometresi yöntemi): Bu metotta da yağ örneği yüksek sıcaklıkta yakılır ancak bu kez cihaz ışınım seviyelerini ölçer. 18 farklı aşınma parçası için ölçüm yapılabilir. Analiz süresi kısalmış ve ppm mertebesinde doğru sonuçlar verir [29].

Yağ analizi yapanlar için yağda bulunan parçacıkların boyutları, yüzey alanları, sertlikleri, yoğunlukları, şekilleri, kompozisyonları, kutupsallıkları ve manyetik etkilenebilirlikleri son derece önemlidir. Doğru ölçü, yapı ve sertlikteki parça, zamanını bekleyen potansiyel bir tehlikedir.

Bu özellikteki iki parça, riski doğru orantılı olarak artırır. Aslında, yüzeyden kaldırılan metal miktarı, bu metali kaldıran parçacığın kütlesinin 4-10 katı kadar olabilir. Filtre edilmeyen banyo ve sıçrama tarzı yağlama sistemi kullanan makinelerde risk çok daha fazladır. Ayrıca, bu parçacıkların yeni parçacıklar oluşturdukları ve oluşan bu parçacıklarında çevrime aynı şekilde devam ettikleri unutulmamalıdır. Bu sebeple parçacık sayısının kontrol altında tutulması makine güvenilirliğinin sağlanmasında oldukça yararlı bir stratejidir [30].

Analizi yapılacak örneklerin alındıkları zaman, örnekleme periyodu, örnekleme yerleri, alınma teknikleri ve dokümantasyonu oldukça önemlidir. Yağ analizi için örnekler genelde ya tezgâh çalışırken, yada kapatıldıktan hemen sonra alınır. Bu sayede yağ içinde taşınan aşınmış parçalar ile kirler çökmemiş ve yağa karışmış su ile soğutma sıvısı yağdan ayrılmamış olur.

Temelde, yağ analiz periyotlarının belirlenmesinde 3 temel teknik vardır. Bunlar; problem oluşunca örnekleme, kontrol için rasgele örnekleme ve trend analizi için örnekleme. Bu metotların tamamı kullanılıyor olsa da genel eğilim maliyet üzerine olduğundan problem oluşunca örnekleme daha sık tercih edilen metottur.

Örnek alma teknikleri de yağ analizi sonuçlarını çok büyük oranda etkiler. Bu nedenle yağ örneği alırken kullanacağımız teknik, örnek şişesinin içine en fazla miktarda bilgiyi alırken, analiz sonuçlarını etkileyecek çevresel etkileri mümkün oldukça dışarıda tutmalıdır [31]. Özellikle maden bölgeleri, şantiyeler, dökümhaneler, rüzgârlı sahalar ve yere yakın örnek alma noktaları gibi yüksek riskli yerlerden alınan örneklerin tozla kirlenmemiş olduğundan emin olunmalı, gerekirse birden fazla örnek alınmalıdır.

#### **2.4.4. Sonuçların yorumlanması**

Yağ analizinin temel amacı ekipmanın ve ekipmanda kullanılan yağın durumu hakkında bilgi edinmektir. Bu bilgiler beklenmedik arızaların önlenmesinde, yağ değişim zamanlarının ve makine ömrünün uzatılmasında kullanılır.

Bazı durumlarda analitik veriler problemi açıkça gösterir. Örnek olarak, yüksek düzeydeki su, bor ve/veya sodyum, antifriz kaynaklı bir kaçak olduğunun göstergesidir, fakat birçok durumda veriler kesin bir sonuca varmayı sağlamaz. Bu tip durumlarda daha sağlıklı sonuçlara ulaşabilmek için o an alınan örnek ile önceki örnekler karşılaştırılır. Yağ analizinde göz ardı edilmemesi gereken önemli bir nokta vardır. Her makine kendi şartlarına göre aşınma miktarı gösterecektir, bu sebeple aynı şartlarda çalışan makinelerde farklı sonuçlar görülebilir. Karşılaştırma yapılırken mümkün oldukça aynı tezgâhın önceki ölçümleri kullanılmalı, benzer

şartlarda çalışan makinelerin ölçümleri sadece zorunlu kalındığında bir fikir vermesi için kullanılmalıdır.

Sonuçların güvenilirliğini arttırabilmek adına veriler, benzer uygulamalardan alınan örneklerin verileri ile karşılaştırılabilir. Karşılaştırma, tezgâh tiplerine, çevre ve iklim koşullarına veya kullanım şartlarına göre yapılabilir.

Analizlerin tümünde olduğu gibi deneyim, yorumlamada doğruluğu arttırmadaki en önemli etmendir. Analizi yapacak kişinin deneyimi ne kadar fazla ise, sonuçların doğruluğu da o kadar yüksek olacaktır.

#### **2.4.4.1 Motor yağı**

Motor yağının özelliğini kaybetmeye başladığını gösteren en temel gösterge viskozite artışıdır. Bu artışın en önemli sebepleri, yağ içerisinde bulunan daha hafif bazdaki yağ parçacıklarının buharlaşması ve bozulmaya başlayan ürünlerin yağ içinde kimyasal olarak birleşerek uzun polimer zincirleri oluşturmasıdır. Motor yağları için viskozitedeki %25'lik bir artış, yağın ömrünü tamamlamaya başladığının en temel göstergesidir. Motor yağı çalıştıkça viskozitesi yavaşça artar. Ancak viskozitede bir düşüş görülürse yağa yakıt karışmış olabileceğinden şüphelenilmelidir.

Birçok motor yağına yağlamayı arttırıcı, oksidasyon ve korozyonu yavaşlatıcı ve çamurlaşmayı engelleyici ajanlar katılır. Kritik ajanların seviyesi, yağın korozyonu önlemeye devam etme yeteneğini ölçen toplam baz sayısı (TBN) gözlemlenerek belirlenebilir. TBN deki düşüş, ajanların bozulmaya başladığının göstergesidir.

Genellikle TBN de %50'lik bir düşüş gözlemlendiğinde yağ değişimi yapılır. Her yağdaki katkı miktarı farklı olduğundan ajan miktarı da farklıdır. Bu sebeple yağın temizken ki TBN değeri bilinmelidir. Bu değer malzeme bilgi formundan alınabileceği gibi spektrografik metal analizi ile de belirlenebilir.

Normal metal analizinde birçok yağda ortak olarak bulunan ajanlardan çinko, fosfor, kalsiyum ve baryum miktarına ppm olarak bakılır. ppm deki %50'lik bir düşüş yine değişimin gerekliliğini gösterir.

En önemli motor yağı kirleticilerinin başında su ve soğutucu gelir. Bunlar, yağın yağlama kabiliyetini azaltır, korozyona ve çamurlaşmaya sebep olur. Yüksek sıcaklıklarda su buharlaştığı için bazen sadece yağdaki su miktarına bakmak, gerçek sonucu bize vermez, zira %0,05'in altındaki değerler testlerde genellikle görülemez. Bu yüzden yağdaki kirlilik analizi yapılırken glikol varlığına ya da bor veya sodyum seviyesi spektrografisine bakılmalıdır. Yağların bazıları bor ve sodyum ajanlar içerdiklerinden spektrografik değerlerindeki belirgin bir değişim, soğutucu kaçağını gösterecektir.

Toz ve pislikler motor yağlarının en genel kirleticileridir ve yüksek miktarları motor aşınmalarına neden olur. En kolay tespit metotları spektrokimyasal analizdeki silikon oranına ve başlangıçtaki değerine göre değişimine bakmaktır. Kirlilik seviyesi, motor tipine ve çalışma yerlerine göre değişmekle birlikte, eğer çok büyük veya hızlı bir değişim varsa yağ deposu kapağının açık olmasından yada filtrelerin iş görmediğinden şüphelenilebilir.

#### **2.4.4.2. Hidrolik yağı**

Hidrolik yağının bozulduğunu gösteren göstergelerin başında viskozite gelir. Normal şartlarda viskozite artışı oldukça yavaştır. Genellikle 65°C sıcaklığın altında çalışan sistemlerde yağ ömrü binlerce saat olur. Viskozitede oluşacak %10'dan fazla bir artış yağın ömrünü tamamladığını işaret eder. Viskozite artış trendinde ani bir hızlanma yada düşüş olması durumunda, sistemde sıcak bir nokta olduğundan, soğutma sistemi arızasından, yağa yakıt veya başka sıvıların karışmasından şüphelenilmelidir. Daha kesin bir yargıya varmak için toplam asit sayısı (TAN) kontrol edilmelidir. Hidrolik yağı bozulmaya başladığında asidik yan ürünler üretmeye başlayacağından, TAN sayısında önemli bir değişim olmadığı halde viskozitenin ani değişiminde yağa yakıt yada başka bir akışkan karışmasından şüphelenilmelidir.

Kir, hidrolik yağı için en önemli tehdittir. En genel kirleticiler su, pislik, keçe parçaları, yakıt sızması ve hatalı hidrolik yağı eklenmesidir.

Su, yağlamayı azaltması ve korozyona sebep olması sebebi ile en tehlikeli kirleticilerin başında gelir. Petrol türevi yağlar içlerinde en fazla %1 oranında su çözebilir. Su, genellikle analiz örneğinin alınmadığı depo tabanında çökmüş vaziyette bulunur, bu yüzden analiz sonucu elde edilen değer genellikle toplam su miktarını vermez. Su, petrol türevi yağlara beyazımsı bir krema rengi verir ve göz ile ayırt edilebilir. Yapılan analizler sonucunda, yağdaki su miktarı ppm cinsinden belirtilebilse de, daha kesin bir sonuç veren su aktivitesinin ölçülmesi daha doğru olacaktır. Su aktivitesi, bir maddedeki su miktarının o maddenin alabileceği su miktarına oranıdır [32].

Parçacık sayımı, tezgâhın aşınma durumu ile ilgili oldukça önemli bilgiler verir. Parçacık sayımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, her makinenin kendine has, sistemin normal olarak çalıştığı bir parçacık sayısı olmasıdır. Sistemlerde yeni oluşan parçacıklar filtreler tarafından yakalanan veya ölü noktalarda takılı kalan parçacıklarla yer değiştirir. Sistemlerin normal parçacık sayısının bulunabilmesi için, 3–6 aylık periyotlarla analizler yapılmalıdır. Bu noktada, analizi yapanların deneyimi de oldukça önemlidir. Sonraki testlerde, parçacık sayısındaki değişim kolayca izlenir. Parçacık miktarı ve boyutu, problemin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Yapılacak detaylı analizlerle parçaların kum, toz gibi dış kaynaklı mı, yoksa metalik yada keçe gibi iç kaynaklı mı oldukları belirlenir. Birçok durumda kirlilik 25 mikronluk büyük parçalar halinde başlar ve ufalanarak 10 mikrondan daha küçük ve çok daha tehlikeli parçacıklar haline dönüşür.

Yağ analizinin kestirimci bakım programına dahil edilmesiyle makinelerde oluşan yağ kaynaklı sorunların önüne geçilir, tezgâh ömrü ve verimlikte artış sağlanır. Yapılacak analizin diğer bir faydası da, periyodik bakımlarda ömrü dolmadan atılan ve daha uzun süre kullanılabilen yağların ortaya çıkardığı ekonomik kayıpların ve oluşan çevresel sorunların, yağ tüketiminin azalmasına paralel olarak azalacak olmasıdır.

Yağ analizinin uygulanmasının önündeki engeller yağ analizinin maliyeti ve yağ örneğinin doğru alınmamasıdır. Bu analizi yapacak cihazların maliyeti on binlerce doları bulur. Bununla birlikte doğru örnek toplanması, tezgâhların fiziksel şartları sebebiyle bazen imkansızla yakın olabilmektedir, bu da analizin sonuçlarının yorumlanmasında sıkıntılara neden olur.

## 2.5. Termografi (Kızılötesi)

Kızıl ötesi, ışık tayflarına ayrıldığında, göz ile görülebilen ışınların sınırının üzerinde bir dalga boyuna sahip ışın türüdür. Mutlak sıfırdan (0 °K, -273,15 °C) daha sıcak olan tüm maddeler mutlaka çevresine enerji yayar.

Kızıl ötesi ışınların dalga boyu 0,75 ile 1000 mikron arasındadır. Göz ile görünmese de sıcaklık şeklinde hissedilebilir. Özellikle, teknolojideki gelişmelerinde yardımı ile bu ışınlar günümüzde fotoğraflanabilmektedir, diğer bir deyişle görülebilir hale gelmişlerdir. Termal kamera olarak adlandırılan cihazlarla alınan görüntülerde ısı arttıkça sıcak bölgeler beyaza yakın renkler alırken, soğuk bölgeler ise siyah ve siyaha yakın renkler almaktadırlar [33]. Termal kameralar ile yapılan çalışmalarda mutlaka göz önünde bulundurulması gereken konu, termal kameraların sadece yüzeyleri görebildikleridir. Termal kamera ile alınan görüntü sadece dış yüzey sıcaklığıyla alınan görüntüdür, yani maddelerin içini göremez. Bu nedenle dış yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığına eşit olan maddeler termal olarak görünmezdirler.



Şekil 2.19. Termal kamera ile görüntü alma

Termografi, potansiyel arızaların bulunmasında yıllardır kullanılan bir metottur. Termografinin ortaya çıkmasından bu yana temel uygulaması elektrik sistemleri, elektrik ve elektronik devre bileşenleri ve demir çelik sanayisi olmuştur. Termografi, diğer metotlara göre daha yüksek olan yatırım maliyetleri, işletim ve bakım masraflarının sebebi ile birkaç yıl öncesine kadar sadece uzmanlar tarafından kullanılabilirken, son yıllarda kullanımı yaygınlaşan el tipi termal kameralar, makinelerde arızalara yol açabilecek problemlili bileşenlerin sıcaklık artışlarını tespit edip iki boyutlu fotoğraflarını çekerek, gerekli değişimlerin yapılabilmesi için doğru bir bakım planlaması yapılabilmesine olanak tanır. Bu kameralar 0,1 derecelik hassasiyet ile çalışabilmektedir. Termografi yönteminin avantajları aşağıdaki gibidir.

- a. Kontrol edilecek yüzeylere temas edilmesine gerek yoktur.
- b. Kontrol esnasında tehlike yaratabilecek hiçbir aktivite yoktur.
- c. Sıcaklık artışları şekilsel olduğundan yorum kabiliyeti verir.
- d. Elektromanyetik dalgalardan etkilenmez.
- e. Sistem çalışırken kolaylıkla kullanılabilir.
- f. Sağladığı bilgiler kesindir.
- g. Yorumlanması vibrasyon gibi uzmanlık gerektirmez [34].

### **2.5.1. Termografinin kullanım alanları**

Termografi sıcaklık üretebilen tüm proseslerde yararlanılabilecek bir metot olduğundan kullanım alanlarının kısıtlanması doğru değildir. Termografinin kullanılması bakım ve işletme yönetimlerinin yaratıcılıklarına kalmış olsa da fikir vermek amacı için en yaygın kullanım alanlarından bahsetmek yararlı olacaktır. Termografi diğer kestirimci bakım yaklaşımları gibi düzenli sistem kontrolü ile başarıya ulaşabilecek bir çalışmadır. Bakım yönteminin kontrol edilmesini öngördüğü sistemlerin düzenli kontrol edilmesi gerekir. Kontrol periyotları sistemin gereksinimlerini karşılayacak şekilde belirlenmelidir. Önemli bir elektrik motorunun her gün kontrol edilmesi gerekebilirken, bir buhar hattı izolasyonu 6 ayda bir termografi kontrolü gerektirebilecektir. Aşağıdaki konu başlıkları termografinin en sık kullanıldığı alanlardır [34].

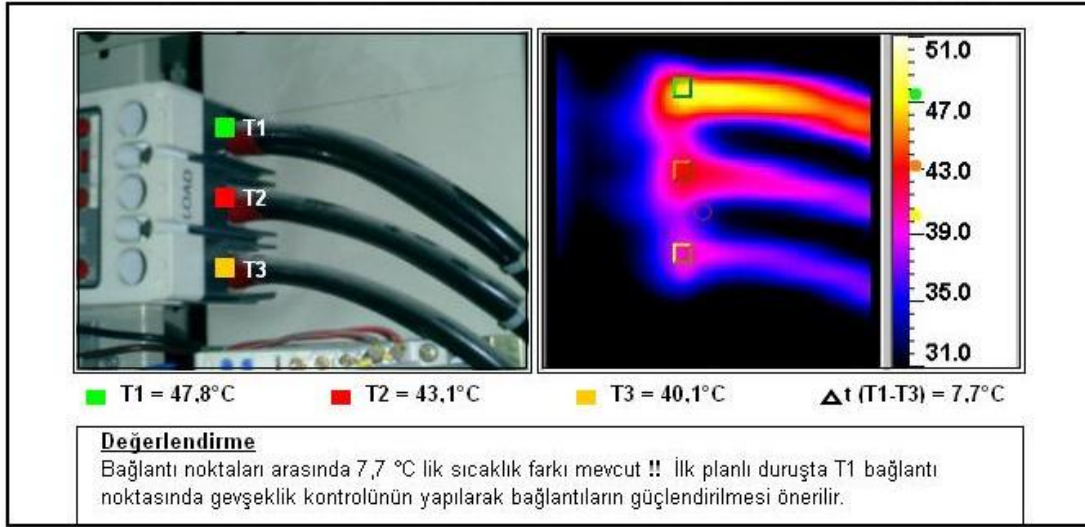
### 2.5.1.1. Elektrik yükü

Elektriksel yük dengesizlikleri bir enerji iletim problemi, bir ayak üzerindeki düşük voltaj veya motor sargılarındaki izolasyon rezistansının kaybolması gibi farklı nedenlerden meydana gelebilir. %100 verimli çalışmayan herhangi bir elektrik bileşeninin çektiği akım, dolayısıyla sıcaklığı artar. Küçük bir voltaj dengesizliği dahi bağlantıların kötüleşmesine, motorlar ve diğer yükler aşırı akım çekerken beslenen voltajın miktarının azalmasına ve (ilişkili mekanik gerilim ile birlikte) daha düşük moment değerlerinin iletilmesine ve kısa bir süre sonra da arızaya neden olabilir. Ciddi bir yük dengesizliği bir sigortayı attırarak operasyonların tek bir faza kaydırılmasına neden olabilir. Bu arada dengesiz akım nötr üzerinden dönerek tesisin pik elektrik kullanımından ötürü para cezası almasına neden olacaktır. Yük artışı bazı bileşenler üzerinden ölçümle tespit edilebileceği gibi, kontaktör yada motorun tamamının termal olarak görüntülenmesi ile de tespit edilebilir.

### 2.5.1.2. Elektrik direnci

Termografinin elektrik sistemlerinin izlenmesinde son derece uygulanabilir olmasının nedeni, elektrik bileşenlerinin takılır takılmaz kötüleşmeye başlamasıdır. Elektrik bağlantıları en az enerji kaybı ile en fazla gücü transfer edebilmeleri için çok düşük dirençli olarak tasarlanırlar. Yüksek direncin oluşacağı gevşek, kirlenmiş yada paslanmış bağlantılarda sıcaklık artışı gözlemlenir. Elektrik bağlantılarının gevşekliğinin sebebi bir devre üzerindeki yüklenme, vibrasyon, yorgunluk veya yağ kalıntısından hangisi olursa olsun, çevresel koşullar bunların paslanma sürecini hızlandırabilir. Kısaca belirtmek gerekirse, bütün elektrik bağlantılar zaman içinde arızalanmaya giden bir yol izleyecektir. Bu noktalar bağlantı klemensleri olabileceği gibi, şalterlerin ve devre elemanlarının iç bağlantıları da olabilir. Şekil 2.20'de, bu konu ile ilgili olarak bir elektrik paneli bağlantısı örneği verilmiştir. Uluslararası elektrik testleri birliği (NETA) tarafından yayınlan kılavuzlara göre, benzer yükler altında çalışan benzer bileşenler arasındaki sıcaklık farkı 15°C'yi aşarsa derhal gerekli onarım faaliyetlerine başlanmalıdır. Aynı kılavuza göre ortam sıcaklığı ile bileşen arasındaki sıcaklık farkı 40 °C'yi aştığında yine gerekli bakım çalışmaları yapılmalıdır.





Şekil 2.20. Elektrik şalterindeki bağlantılardan birinde gevşeklik olması durumu

Bunun dışında elektrik sistemlerinde sıcaklık artışı sağlayabilecek aşağıdaki diğer olumsuzluklar da termografi ile tespit edilebilir.

- 3 fazlı sistemlerde uygun olmayan sıcaklık dağılımı fazlarda dengesizlik olduğunu gösterebilir.
- Hatlardaki aşırı akım problemleri tespit edilebilir.
- Trafooldaki ısınma problemleri tespit edilebilir.
- Kapasitör, izolatör, tristör gibi elemanlarda ısınma kontrolü yapılabilir.
- Akım ve direnç kontrolü yapılabilir [34].

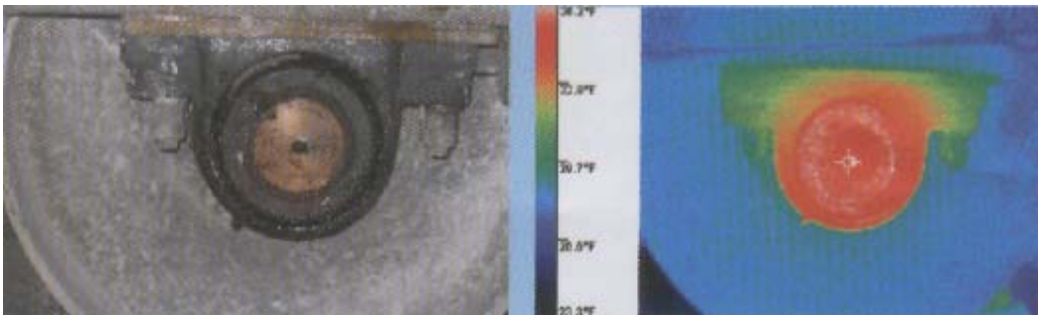
### 2.5.1.3. Harmonik etkiler

Elektronik sistemlerde, aletlerin çalışma prensiplerine bağlı olarak bir çok yüksek frekanslı sinyal oluşur. Bazı durumlarda oluşan bu sinyaller harmonikler oluşmasına, dolayısı ile iletkenlerde ve bağlantılarında bölgesel sıcaklık artışlarına neden olabilir.

### 2.5.1.4. Sürtünme

Sürtünen iki yüzeyin, yetersiz yağlamanın, eksantrik birleştirmenin Ya da hasarlı bir rulmanın olduğu bir makede yüksek oranda sürtünme, dolayısı ile ısı yükselmesi

olur. Genel olarak vibrasyon analizi, büyük, erişilebilir, görece olarak yüksek hızlı yataklar için seçilen kestirimci bakım teknolojisidir, ancak yataklara sensörlerin uygun olarak yerleştirilebilmesi halinde doğru ve emniyetli bir şekilde yapılabilir. Görece olarak küçük olan (örneğin konveyör silindirlerindeki yataklar), düşük hızlı operasyonlarda kullanılan, fiziksel erişim yapılması mümkün olmayan veya ekipmana yaklaşılması güvenli olmayan yataklarda, termografi, vibrasyon analizine iyi bir alternatif olabilir. Pek çok durumda ekipman çalışır durumda iken emniyetli bir mesafeden termografi uygulaması yapmak mümkündür.



Şekil 2.21. Mekanik bir problemin neden olduğu yatak ısınması

### 2.5.1.5. Elektrik motorlarının muayenesi

Endüstrinin bel kemiğini oluşturan elektrik motorlarının sadece ülkemiz işletmelerindeki sayıları milyonlarla ifade edilebilir. Pompaların çalıştırılmasından eksen hareketlerinin yapılabilmesine, fener mili tahrikinden, konveyör bandı tamburlarının döndürülmesine kadar bir çok yerde elektrik motorları kullanılmaktadır. Motorlar sıcakta, soğukta, kumda, suda, kimyasallarda, kısaca her ortamda çalışmaktadır. Birbirinden çok farklı olan bu ortamlarda çalışacak motorlar prosese özel olarak üretilir ve üzerindeki ısı değerleri farklıdır. Bu yüzden termografin hangi sıcaklığın normal, hangisinin anormal olduğuna karar verirken temel yardımcısı deneyimleri ve benzer motorları karşılaştırması olacaktır. Termografi ile dişli kutusu arızası, yetersiz hava akışı olması, yakın yatak arızası, shaft kuplajı problemleri ve bir motorun rotor veya statorundaki izolasyon bozulması gibi durumlar tespit edilebilir.

### 2.5.1.6. İndüksiyon ısınması

İndüksiyon ile ısıtma her ne kadar bazı çelik işleme proseslerinde kontrollü olarak kullanılsa da, büyük AC akımlarının çelik konsollar gibi geçirgen metallere çok yakın olması durumunda beklenmedik zamanlarda ve kontrolsüz bir biçimde oluşabilir. Kablo konsollarının içindeki yüksek akım taşıyan AC kablolarının çelik destek ve kanallarda indüksiyon ısınmasına sebep olduğu görülebilmektedir. Isınma sonucunda kablonun izolasyonu sertleşir, kırılğan bir hal alır ve beklenmedik bir zamanda koparak kısa devreye sebep olabilir.

### 2.5.1.7. İzolasyon aşınması

İzolasyon kaplı ve içinde yüksek sıcaklıkta malzeme bulunan her hangi bir hat, kullanımı esnasında çok yüksek sıcaklık artışları gösterir. Bunlara örnek olarak buhar hatları verilebilir. Termografi, bu hatlardaki izolasyon malzemenin incelmeye başladığı noktalarda oluşan lokal sıcaklık artışlarını yakalar. Tabii ki kullanımı sadece buhar hatları ile sınırlı değildir. Endüstriyel tip ısıtma fırınlarında izolasyon arızaları sonucu ısı kaybı olan bölgelerin tespiti yada tam mühürlenmeyen giriş çıkışlarda oluşan enerji kayıpları ve enerji geri kazanım sistemlerindeki arızalar yine termal kameralarla rahatlıkla tespit edilebilir.



Şekil 2.22. Fırın kapağındaki ısı kaybı

#### **2.5.1.8. Kaplin ayarsızlığı**

Esnek bir ara eleman barındırmayan yani metalik kaplinlerin, kaplin ayarı bozulduğu anda, sürtünme daha fazla artacağından ısınmaları da olacaktır. Termografi ile bu sıcaklık artışı tespit edilip, durdurulup ölçülmesi mümkün olmayan sistem kaplinlerinin kontrolü sağlanır. Yamulmuş şaftta sonuç olarak kaplin ayarsızlığı gibi düşünüleceğinden onunda tespiti termografi ile mümkündür [34].

#### **2.5.1.9. Pistonlu kompresörler**

Havanın sabit hacimde sıkıştırıldığında sıcaklığının artması bilinen bir durumdur. Pistonlu kompresörlerde sıkıştırma esnasında ısınan havanın valflerden kaçak yapması o bölgenin ısınması ile sonuçlanır. Hava kaçağı ve dolayısıyla hasarlı valf termografi yöntemi ile tespit edilebilir [34].

#### **2.5.1.10. Yetersiz yağlama**

Bilindiği gibi yağlama yakın temas halinde olan iki katı yüzeyin arasında sürtünme katsayısını düşürüp temas ile oluşabilecek olumsuz etkileri azaltmaya yönelik bir eylemdir. Eğer bir yerde yetersiz yağlama var ise aşırı sürtünmeden dolayı sıcaklık artışı meydana gelir ve bu da termografi ile tespit edilebilir [34].

#### **2.5.1.11. Güç aktarma organları**

Aşırı sürtünme bir ısı kaynağı olarak güç aktarma organlarında da mevcut olabilir. Kasnakları ayarsız veya gerginliği uygun olmayan, aşınmış kayış ve zincirler gereğinden fazla ısınabilir. Aynı şekilde çeşitli olumsuzluklar yüzünden ısınmış rulmanlar (yataklar) ve dişli kutularında düzenli veya şüpheli durum kontrollerinde termografi kestirimci bakımın bir unsuru olabilir [34].

### 2.5.1.12. Vanalar ve hatlar

Özellikle yüksek sıcaklıklı akışkanların kontrolünde kullanılan vanalardaki kaçaklar ve hatlardaki akışın herhangi bir engel olmadan gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilebilir. Örneğin hat üzerinde bir filtre mevcut ise o bölgedeki sıcaklık artışı filtrenin tıkanıdığı anlamına gelir [34].

### 2.5.1.13. Depolama tankları

Depolama tanklarındaki seviyeler eğer bir sıcaklık farkı var ise kolaylıkla tespit edilebilir [34].

## 2.5.2. Termografinin diğer kestirimci bakım teknikleriyle karşılaştırılması

Seçilen kameranın özelliklerine göre bir kestirimci bakım programındaki en pahalı kalem kızılötesi termografi olabilir. Kestirimci bakım metotlarının bir çoğu bazı alanlarda çok etkin olarak kullanılabilir. Örnek olarak yağ analizi ve titreşim analizi, özellikle, dönel parçaları olan tezgâhları hedefler ancak bunlardan hiçbiri elektrik arızalarının teşhisinde etkin olarak kullanılamaz. Kızılötesi termografinin temel farkı, elektrik arızalarının yanında hatalı ayar, rulman aşınması, yağlama hatası, bara bağlantı sorunları, elektrik motor yükleri, döküm hatlarındaki refrakter aşınmaları, arızalı şalter bağlantıları, dengesiz yükler gibi bir çok problemi tespit edebilmesinin yanında tankların iç seviyelerini belirleme, izolasyon bakım ve tamiratlarını planlama, izolasyon malzemelerinin yerleşimini ve bağlantılarını doğrulama gibi tanı fonksiyonlarını da desteklemesidir [35]. Bununla birlikte kalınlık, termografinin etkinliğini azaltan bir parametredir. Takip edilmesi planlanan eleman, ekipman yüzeyinden ne kadar derinde ise, istenilen sonuca ulaşılması, sıcaklık yüzeye kadar dağılmış olacağından, o kadar zor olacaktır. Böyle yerlerdeki ekipmanlarda takip yapabilmek için tezgâh üzerinde tadilat yapılması (kapak yapılması, gövde inceltmesi vs) gerekebilir. Ayrıca, çevre sıcaklığı ile kontrol edilen ekipmanın sıcaklığı bir diğer sınırlayıcıdır. Bu sıcaklıklar birbirlerine ne kadar yakınlarsa, ekipman termal olarak o kadar görünmezdir.

## 2.6. Ultrasonik Ölçüm

Ultrason ile çeşitli ölçümler yapılmasının yaklaşık 40-50 yıllık bir geçmişi bulunmaktadır. Günümüzde endüstriyel kullanım yönünden ultrason, basınçlı hava kaçaklarının belirlenmesi, buhar kapanları çalışma testlerinin yapılması, rulmanların yağlama ve hasar durumunun kontrolü, elektriksel sistemlerde ark-korona dinlenmesi, kalınlık ölçülmesi, boru ve tesisatlardaki korozyon ve erozyonun tespiti gibi geniş bir alanı kapsamaktadır [36].

Tanım olarak ultrason, insan kulağının duyma eşiğinin üzerindeki seslere verilen isimdir. İnsan kulağının duyma eşiği 20 Hz ile 20 kHz arasındadır. Genel olarak 16,5 kHz üzerindeki sesleri birçok insan duyamaz. 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 arasındadır. Bu değerler insan kulağı tarafından duyulamaz, ama bu frekansları dinlemek için ayarlanmış bir cihaz tarafından rahatlıkla tespit edilebilir ve bir dizi elektronik filtreleme işleminden sonra, bu sesler insan kulağı tarafından da duyulabilir hale getirilebilir. Bu cihazlar temelde iki şekilde bilgi verebilirler. Ultrasonik sesi bir dizi elektronik filtreden geçirdikten sonra, bu sesleri insan kulağı tarafından da duyulabilir hale getirerek çevre gürültüsünü izole eden bir kulaklıkla operatöre ulaştırır yada bir gösterge üzerinde sayısal olarak gösterir.

Ultrason sistemlerinin kullanımını kolaylaştıran önemli bir etkende, ses araştırması yaptığı halde sessiz bir ortama ihtiyacı olmamasıdır. Bunun en büyük sebebi, işletmelerin yoğun gürültülü ortamındaki seslerin çok büyük bir kısmının duyma eşiğinde olması ve çok düşük miktarda ultrasonik unsur içermesidir.

Ultrasonik olarak dinlendiğinde, elektrik motorlarının koronalarının (sargılarının) çatırdadığı, rulmanların sağlam ise hafif bir hışırtı sesi verirken bozulmaya başlayanların patlama sesleri çıkardığı duyulabilir.

Havadaki ultrasonik sesleri belirleyen sensörle hava kaçakları, vakum, buhar, azot ve bazı soğutucu gazları tespit ederken, temaslı cins sensör ile buhar kapanlarını

dinleyip doğru olarak çalışıp çalışmadıkları, bir yataktaki rulmanın arızalı olup olmadığı tespit edilebilir. Diğer yandan yağlamanın ne kadar doğru yapıldığı da belirlenebilir. Bu şekilde sadece eksik yağlama değil, aynı zamanda endüstride çok yaygın bir yanlış olan aşırı yağlama sorunu da belirlenmiş olur.

Mekanik analiz ve kaçak tespiti için kullanılan sensörler ses dalgalarını elektrik sinyallerine çeviren piezoelektrik mikrofonlar kullanırlar. Kullanılan ekipmanların göstergeleri dijital yada analog olabilir. Burada bilinmesi gereken, analog göstergelere alınan değerlerin daha kesin olduğudur. Bu tip göstergeler küçük değişimleri bile atlamadan tepki verirler ve daha az enerji harcarlar.

Ultrasonik kestirimci bakım metodunu tanımak için ultrasonik enerji hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Doğada 3 formda ses bulunur.

İnfrasonik: Frekansı 20 CPS (Cycles Per Second = Saniyedeki Salınım Sayısı) az olan ve insan kulağının algılama eşiğinin altında olan ses grubudur.

Audiosonik: Frekansı 20-20000 CPS aralığında olan ve insan kulağının algılama aralığında olan ses grubudur.

Ultrasonik: Frekansı 20000 CPS den fazla olan ve insan kulağının algılama eşiğinin üstünde olan ses grubudur.

Ayrıca ultrasonik enerji ile ilgili aşağıdaki fiziksel özelliklerin bilinmesinde ölçme tekniği açısından yarar vardır.

- a. Ultrasonik enerjiyi oluşturan titreşim hareketi uzun mesafeleri kat edemez.
- b. Bu hareket yalnızca kaynaktan dik şekilde uzaklaşır.
- c. Katı materyallerde ilerleyebileceği bir çatlak-boşluk yok ise durur.
- d. Küçük engeller bile havadaki bu hareketi kolayca engeller.
- e. Diğer ultrasoniklere girişim yapmaması için izole edilmesi gerekir.
- f. Ultrasonik kontrolde havada ve iç yapılarda ölçümler ayrı değerlendirilecektir zira iç yapıdakiler için temaslı problemler kullanılmalıdır [37].

### 2.6.1. Ultrason uygulamaları

Ultrasonik kontrolle yapılabilecek pratiklerin sonu yok gibidir, ancak yine de endüstriyel uygulamalarda en çok yararlanılan konular sırasıyla verilmiştir. Buradaki konu başlıklarında hem oluşmakta olan arızaların tespitini yapmak hem de bazı durumlarda enerji tasarrufu amacı vardır.

#### 2.6.1.1. Kaçaklar

Basıncı hava kaçakları, endüstrideki en pahalı enerji kaynaklarından birinin boşa harcanmasına neden olur. Normal bir sistemde üretilen basınçlı havanın %25 ile %35'inin kaçakları karşılamak amacıyla kullanıldığı, başka bir anlatımla iş yapmadığı göz önüne alındığında, boşa giden parasal kaynağın büyüklüğü ortaya çıkmaktadır. Kaçak noktalarında oluşan türbülans kuvvetli ultrasonik dalgalar yayar. Yayılan bu dalgalar, çevre gürültüsünden farklı olarak ultrason tarayıcıları ile bulunabilir.

Uygulama sadece hava kaçaklarıyla sınırlı değildir, basınçlı her türlü gaz kaçağı ultrason uygulamalarıyla tespit edilebilir [38].



Şekil 2.23. Ultrason ile kaçak tespiti

Sanayide, özellikle enerji üretimi, rafineriler, kimya, petrokimya, gıda, paketlenme ve kağıt endüstrisinde ayrıca hastanelerde kullanılan vakumun (negatif basınç) sürekliliği son derece önemlidir ve bu sistemlerdeki vakum kaçakları da basınçlı



hava kaçaqları kadar maliyetlidir. Bu sebeple vakum kaçaqları da basınçlı gaz sistemlerinde olduğu gibi ultrasonik metotlarla tespit edilerek giderilmelidir [39].

#### **2.6.1.2. Rulmanların izlenmesi**

Rulmanlar, bir çok tezgah için en kritik elemandır. Bozulmaları halinde tespit edilip temini ve değiştirilmesi de dahil olmak üzere saatler, hatta günler sürecektir duruşlara neden olurlar. Yapılan araştırmalar yeni takılan rulmanların %30'unun montaj hatası yada şafttaki ayarsızlık yüzünden arızalandığını, ömürlerinin 2-5 kat arası azaldığını ve rulmanların %10'unun takıldıklarından itibaren ilk 6 ay içerisinde arızalandıklarını göstermektedir [40].

Rulman bilya ve makaraları dönüşleri sırasında, bilezikleri ile olan temasları sonucunda ultrasonik sesler çıkarırlar. Doğru olarak çalışan ve yeteri kadar yağlanmış bir rulmanda bu sesler hafif hışırtı halinde ve az iken, az yağlama yapılmış bir rulmanda güçlü bir çıtırtı yada gıcırtı sesi duyulur. Fazla yağlanmış rulmanlardan ise hiç ses alınmaz.

Rulmanlar bozulmaya başladıkça, oluşan hasarın şekline göre tırmalama, tıkırdama yada sıyrılmaya sesi gibi çeşitli sesler alınır. Bu ultrasonik seslerin takibi sonucunda rulmanların durumları ile ilgili bilgi edinilebilir ve ayrıca takılırken yapılmış olabilecek montaj hataları tespit edilerek ileride daha büyük sorunlara neden olması engellenebilir.

Periyodik olarak yağlanan rulmanlardaki bozulma riski, duruma dayalı olarak yağlanan rulmanlara göre çok daha fazladır. Periyodik olarak yapılan yağlama genellikle eksik yada fazla olacaktır ki, her iki durumun da rulman üzerindeki etkisi olumsuzdur.

#### **2.6.1.3. Buhar sistemlerinin takibi**

Yükselen enerji fiyatları, basınçlı hava gibi buharı da pahalı enerji kaynakları içine sokmuştur. Buhar kapaları, buhar sistemlerinin verimli çalışabilmesi için sistemdeki

yoğuşmaları, yoğuşmayan gazları ve havayı, buhar kaybını engelleyerek yada en aza indirerek sistemden çıkaran elemanlardır.

Bozuk buhar kapanları sistemdeki buhar kalitesinin düşmesine ve koç darbelerinin oluşmasına neden olur. Kapandan geçebilen buhar görevini yapamadan dışarı çıkmış olacağından boşa giden kaynak olacaktır, ayrıca yoğuşmayan gazlar ciddi bir korozyon sebebidir.

İşletmelerdeki buhar kapanlarının %15-20'sinin arızalı olduğu göz önüne alınırsa, bunların bulunması ve arızalarının giderilmesi maliyetlerde önemli bir azalma sağlayacaktır. Buhar kapanları görsel olarak yada kızıl ötesi termografi ile de kontrol edilebilmesine rağmen, bu metotlarla elde edilen sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir. Oysa ultrasonik metotlarla yapılan kontrollerde daha kesin sonuçlar alınır [41].

Buhar sistemlerindeki tek kaçak noktası elbette buhar kapanları değildir. Çekvalfler, vanalar, eşanjör ve boylerler gibi bir çok devre elemanı da kaçak sebebi olabilir ve bunların tamamı ultrasonik metotlarla tespit edilebilir.

#### **2.6.1.4. Vanalar ve kondensstoplar**

Bir akışkanı kontrol eden elemanlarda kaçak olması olası bir durumdur. Bu durumda ultrasonik detektör ile vananın her iki tarafı da kontrol edilir ve kaçak kontrolü yapılır. Kaçak olduğu takdirde ultrasonik cihaz kaçak yapan akışkanın oluşturduğu ultrasonik enerjiyi tespit edecektir. Kondensstoplar buhar hatlarında sadece yoğuşmuş buharı (suyu) kazana gönderen parçalardır. Kondensstopların verimli çalışması sistemde büyük enerji tasarrufu sağlar zira buhar kazanlarında ısı verilerek elde edilmiş buharın kondensstoptan besleme hattına kaçması büyük bir verimsizliktir. Kondensstopların verimli çalışması için yerleşimleri çok önemlidir. Şöyle ki; her makineye ayrı kondensstop koyulur zira buharda her her akışkan gibi kısa devre yapabilir. Bakımları için gerekli her yerde kapama vanası koyulur. Kondensstop makinenin veya hattının en altına bağlanır, su paketleri sistemde kullanılabilir. Sistemde bir by-pass varsa kesinlikle açık unutulmamalıdır aksi halde bu verimi düşürür. Gerekli yerlere çekvalf konarak kondens olmuş buharın olağan üstü hallerde

geri dönüşü engellenebilir. Kondensatörlerin hatlara direk bağlanmasından ziyade manşonlarla bağlantı sağlamaktır ve bu değişim kolaylığı sağlayacaktır [37].

#### 2.6.1.5. Elektriksel problemlerin takibi

Ultrason, elektriksel problemlerin tespitinde son derece aktif olarak kullanılabilir. Güçlü elektrik alanları, havadaki kirleticilerinde etkisi ile iletim yüzeylerinde malzeme kaybına sebep olur ve bunun sonucunda bu yüzeylerde farklı direnç ve geçirgenlikte lokal bölgeler oluşur. Diğer bir sorun ise koronadır. Korona, tespit edilip önlenmezse hattın hatta, yada hattın yere elektrik atlamaları kaçınılmaz olacaktır. Oluşumunun temel sebebi, iletkenleri çevreleyen moleküllerin iyonlaşmasıdır. Oluşan enerji atlaması sonucu ozon ve azot oksitler oluşur ki, bu da izolasyon malzemelerini bozar, ayrıca korona sonucu ölümlü kazalar meydana gelebilir.

Elektrik arkı, sanayide özellikle yangına sebebiyet vermeleri dolayısıyla önemli bir problemdir. Ayrıca iletkenlerin birbirlerine kaynamasına yada iletkenin erozyona uğramasına sebep olur. Korona ile arasındaki en temel farklılık koronanın başlangıç ve bitiş voltajları aynı iken arklarda başlangıç ve bitiş voltajları arasında %50 oranında fark olmasıdır. Yüksek voltaj hatlarındaki bahsedilen problemler gelecekte olabilecek sorunları belirtecek nitelikte ultrasonik ses dalgaları oluşturur ve bu sesler ultrasonik cihazlarla rahatlıkla tespit edilebilir [42].



Şekil 2.24. Korona tespiti

### 2.6.1.6. Basınçsız sistemlerin kontrolü

Bu grup, içlerinde basınçlı akışkan yada vakum bulundurmayan, bazen basınç altında kalan fakat basınç altında test edilemeyen, depolama tankları, basınçsız boru hatları, kamara ve ambar sızdırmazlık elemanları, ön cam, kapı ve pencere fitilleri, laboratuvarlar, klimalı araçların kabinleri, soğutucu bölmeler, tehlikeli yada zararlı madde taşıyan taşıtların kasaları gibi sistemleri kapsar. Kontrol edilmek istenen boşluğa bir ultrason üretici konur ve kontrol edilecek fitil, conta, bant ve kaynaklar yine ultrason ölçüm cihazı ile kontrol edilerek kaçak olup olmadığı tespit edilir [43].



Şekil 2.25.Sızdırmazlık testi

### 2.6.1.7. Dişli kutuları

Dişli kutuları, dişli grubu, rulmanlar ve şafttan oluşan, motor tarafından üretilip aktarılan mekanik hareketin yönünü, dönme momentini ve hızını değiştiren sistemlerdir. Dişli deformasyonu ve aşınma, dişli setlerinin çeşitlerine göre farklı olacaktır. Oluşan ultrasonik titreşimler dişliler ile ilgili olarak bir çok tasarım ve kullanım koşullarına bağlıdır. Bu koşullar; dişli kutusunun tahrik sisteminin türü (elektrik, hidrolik, pnömatik, içten yanmalı motor veya türbin), dişli kutusu ile tahrik sisteminin bağlantısı, dişli kutusu ile dişli grubunun tasarımı ve çevredeki endüstriyel ekipmanlardan yayılan ultrason dalgalarıdır [44].

### **2.6.1.8. Eşanjör, boyler ve kondenserler**

Bilindiği üzere bu tarz ekipmanların çoğunluğu tüpler, tüp sacları ve yuvalardan meydana gelmişlerdir. Kaynaklarda veya saclarda oluşabilen nokta kaçakların tespit edilmesi hassas temaslı detektörlerle yapılır [37].

### **2.6.1.9. Pompa kavitasyonu**

Kavitasyon nadir de olsa yüksek sesle tezahür etmeyebilir. Bu durumda pompa içinde oluşan hava kabarcıklarının pompa parçalarına çarpıp patlaması ve aşınma yapması tespit edilemeyebilir. Bu gibi durumlarda hava kabarcıklarının patlarken ürettiği ultrasonik enerji tespit edilebilir [37].

### **2.6.1.10. Conta kontrolleri**

Conta veya sızdırmazlık elemanlarının uygun şekilde sıkılırsa bile kaçak yapıp yapmadıkları hep merak edilmiştir. Ultrasonik detektörle sıkılmış contaların ve sızdırmazlık elemanlarının kaçak yapıp yapmadığı kontrol edilebilir [37].

## **2.6.2. Ultrasoniklerin ayrıştırılması**

Ultrasonik detektörün kullanılması esnasında, her ne kadar sinyallerin kuvvetli şekilde alınmasını sağlayan yardımcı ekipmanlar ve detektörün en güçlü sinyali ayrıştırıcı özelliklerinden yararlanılsa da, pratikte diğer kaynaklardan ultrasonik parazitler (girişim) kaçak olarak, tespit edilmek istenen ultrasonik enerjiye karışabilir. Bu teşhisin yapılmasını zorlaştırır veya hatalı sonuçlara sebep olabilir. Bu sebepten dolayı pratikte sağlıklı kaçak tespiti yapabilmek için basit bir takım kuralların ölçüm anında yerine getirilmesi uygun olacaktır. Bu kuralları bilmeyen kişiler, ölçüm sonuçlarının hassas olmayacağını bilmelidirler. Aşağıdaki kurallar; ölçüm yapan kişinin mutlaka göz önüne alması gereken noktalardır.

- a. Kaçak aranan bölgenin ölçümlerinde parazit yapan başka ultrasonik enerjileri engellemek amacı ile vücut bariyer olarak kullanılır. Daha önceden

bahsedildiği gibi diğer kaynaklardan gelen karşılık yaratabilecek ultrasonikler fiziksel engellerle bloke edilebilir. Ölçüm esnasında kaçak araması yapılan bölgeden vücudunuzu sağa-sola döndürerek en temiz sinyaller alınmaya çalışılmalıdır.

- b. Bir sayfa büyüklüğündeki bir karton ölçüm esnasında kaçak bölgesindeki diğer kaynaklara ait ultrasonik ait ultrasonikleri ekarte etmekte kullanılabilir. Bir elinizde detektör, diğer elinizde ise karton, kaçak etrafında pozisyonlandırılarak girişim yapan ultrasonikler bloke edilebilir.
- c. Bazı durumlarda büyük perdeler bile ultrasonik kaynakların arındırılmasında kullanılabilir.
- d. Çok zayıf değerlerde ve kapalı ortamlardaki ölçümlerde, probun kaçak şüphesi olan bölgeye teması gerekir ve burada el ayası diğer ultrasonik kaynaklara karşı bariyer olarak kullanılır. Ancak burada önemli nokta eldiven giyilmesidir zira damarlardaki kanda ultrasonik bir enerji yaratacak ve karmaşa oluşabilecektir.

Buradaki önerileri çoğaltmak mümkündür, ancak kuvvetli sinyallerin alınmasında temel mantık aynıdır. Özet olarak, ultrasonik enerji kaynağı ile detektör arasına diğer ilgisiz ultrasoniklerin girmesi fiziki bariyerlerle engellenir. Burada bakım servisleri yaratıcı olarak en güçlü sinyalleri alacak şekilde düzenlemeler yapmalıdır [37].

### **2.6.3. Zayıf ultrasoniklerin tespiti**

Özellikle 25 RPM in altında dönüş yapan rulmanların çıkarttığı ultrasonik enerjinin tespiti çok zor olduğundan böyle uygulamalarda çalışma yapılmaz veya devir artırılır. Zayıf ultrasoniklerin tespitinde bir diğer yöntemde ultrasonik jeneratör kullanmak olabilir. Bu şekilde kaçak olmasından şüphe edilen fakat tespit edilemeyen kaçakların tespiti mümkün olabilmektedir.

Ultrasonik enerjinin üretilmesinin temelinde bir nozuldan (kaçaktan) çıkan akışkanın basıncı ile ürettiği enerjinin hava taneciklerini titreştirmesinden oluşan ses dalgalarının tespit edilmesi yattığı belirtilmişti. Üretilen akışkan basıncının yeterli olmaması halinde üretilen ultrasonik enerji de az olacak, ve tespit edilmesi

zorlaşacaktır. Bu durumda eğer mümkünse akış veya basınç ölçüm esnasında artırılarak kuvvetli sinyaller alınır ve kaçak tespit edilir. Bir başka tespit tarzı da karışıklığa sebep olabilecek diğer ultrasonik enerji kaynaklarının geçici olarak devreden çıkartılması şeklinde olabilir. Bu şekilde şüphe duyulan kaynağın ürettiği sinyaller arınacak ve tespit kolaylaşacaktır. Aynı şekilde kontrol edilecek ekipmanın kontrol zamanı geçici olarak kapatılması da bir başka karşılaştırma imkanı sağlayacak yaklaşımdır. Bahsedilen yaklaşımlar her zaman işletme şartlarında uygulanamasa da yardımcı ekipmanların olmadığı veya yetersiz kaldığında çözüm olarak kullanılabilir. Bazı durumlarda ise gaz kaçakları gerekli yeterlilikte ultrasonik sinyal üretmediğinden özel bir likit kaçağın olabileceği bölgelere sürülür. Bu durumda likit kaçak noktasından hava kabarcıkları üretir ve bunlar patlarken güçlü ultrasonik sinyaller üretir, yalnız bu baloncuklar çıplak gözle tespit edilemeyecek boyuttadır. Bu yöntem kontrolü ve tespiti güç uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir [37].

## **2.7. Tahribatsız Kontrol Yöntemleri**

Tahribatsız kontrol yöntemleri metalik malzemelerin yüzey ve yüzey altı kalitelerini kontrol etmek amacı ile kullanılan ve endüstriyel bakımla dolaylı olarak ilgili olan bir konudur.

### **2.7.1. Penetrasyon yöntemi**

Yüzeylerde çıplak gözle görülemeyecek kılcal çatlakların tespit edilmesi amacıyla özel bir sıvının yüzeye sürülmesi ve bu sıvının kılcal çatlığa girmiş olan bölümünün özel belli edicilerle (fosforlu ışık, astar, developer vb.) tespit edilip, yorumlanmasıdır.



Şekil 2.26. Sıvı penetrant testi ile çatlak kontrolü

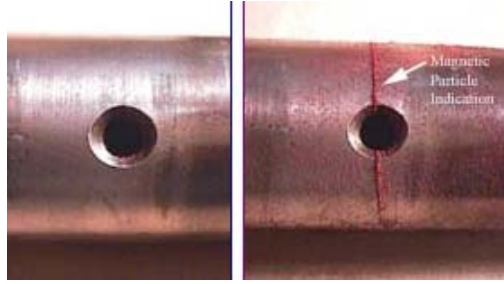
Penetrant testi basitçe aşağıdaki adımlar izlenerek yapılmaktadır.

- a. Ön temizlik : Malzeme yüzeyindeki yabancı maddeleri, yağı kiri pası temizlemek için yapılır.
- b. Penetrant tatbiki : Penetrant sıvısı yüzeye püskürtülür, bu sıvı çatlakları doldurur. 15 dakika beklenir.
- c. 2. temizlik : Malzeme yüzeyindeki kırmızı sıvının (penetrant) temizleme işlemidir.
- d. Developer tatbiki : Su, çözücü ya da püskürtme ile tatbik edilebilir. Çatlaktan sıvıyı emip dışarı çıkarır.
- e. İnceleme : Floresan sıvı kullanılıp kullanılmadığına göre, gözle yada flor ışık altında muayene edilir.

### 2.7.2. Manyetik toz yöntemi

Kontrol edilecek malzemenin yüzey altında bulunan ve kusurlu bölgelerini tespit eden pratik bir yöntemdir. Kontrol edilecek parça düşük voltajlı elektrik akımı ile manyetikleştirilir ve demir tozuna bulanır. Parça içinde eğer bir kusur varsa, oluşturulan manyetik akı doğrultusu bu kusurdan dolayı etkileyecek ve bu bozukluk yüzeydeki demir tozlarının da düzenini bozacaktır. Bu şekilde yüzey altı kusurları tespit edilecektir.





Şekil 2.27. Manyetik toz yöntemi ile çatlak kontrolü

### 2.7.3.Ultrasonik yöntem

Bu yöntemde yüzey altında bulunan kusurları (deformasyonları) tespit etmek amacıyla ultrasonik ses dalgalarının kontrol edilecek parçalara verilmesi ve bu dalgaların parça içinde ilerlerken kusurlardan dolayı gösterdikleri değişimlerin yorumlanması üzerine kurulmuş bir kontrol sistemidir.

Çalışma prensibi sesin yankılanmasına benzer. Ultrasonda bir piezoelektrik kristaline elektrik şarjı uygulanması ile kısa bir titreşim oluşur, yani kristal kalınlığı ile orantılı olan bir frekansta çok kısa süre için titreştirilir. Hata tespitinde bu frekans genellikle saniyede bir ile altı milyon arasındadır. Bu frekansta titreşimler veya ses dalgaları homojen elastik malzemelerde yeterli mesafelere ulaşabilecek durumdadır. Bu dalgaların hızı malzemenin karakteristikleri ve Young modülü ile ilişkilidir. Örneğin, çeliklerde hız 5900 m/s ve suda 1400 m/s'dir.

Ultrasonik enerji havada oldukça zayıflar ve bir ışın demeti katı içinde ilerlerken bir ara yüzeye rastlarsa (bir hata veya olası bir boşluk vs.) belirli bir miktarda enerji yansır. Numuneye temas ile yapılan ölçümlerde titreşen kristal test edilen malzeme üzerine elle tutulan bir probun içinde yer alır. Test parçası ve kristal arasındaki küçük bir hava boşluğunu geçen enerjinin kolaylıkla transfer edilmesi için yüzeye genellikle yağ, su veya gres şeklinde sıvı tabakası uygulanır. Özellikle kaynaklı bağlantılarda özel cihazlarla oluşturulan ses üstü dalgaları parçaya gönderilir. Çatlak bulunan yerlerde, dalgalar kuvvetli bir yansıma yaparak geri dönerler. Deney cihazının ekranında yansıma şekillerine ve yerlerine bakılarak hatalı noktalar tespit edilir.



Şekil 2.28. Ultrasonik test

#### 2.7.4. Radyografi yöntemi

İnsanlardaki röntgen çekilme mantığına benzeyen bir metot olup, parçaların yüzey altındaki kusurlarının X veya Gama ışınlarından yararlanıp tespit edilmesi yöntemidir. Her iki ışının kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. En sık uygulaması yüksek basınç hatlarının ve kapların kaynaklarının kontrolünde kullanılır.



Şekil 2.29. Radyografi yöntemi ile çatlak kontrolü

#### 2.7.5. Eddy (Fuko) akımı yöntemi

Bu yöntem daha çok yüzeye yakın kusurların tespit edilmesinde başarılı olan bir yöntemdir. Alternatif akımın, kontrol edilecek parçada oluşturduğu akımların yardımı ile kusurların tespit edilmesidir.

### 2.7.6. Tebeşir yöntemi

Penetrasyon yöntemi ile yüzeydeki kılcal çatlakların tespit edilmesinde piyasada bir çok materyal çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Bakım personeli tarafından geliştirilmiş ve basitçe uygulanabilecek bir penetrasyon yöntemi de, tebeşir metodudur. Burada kontrol edilecek yüzey iyice temizlenir ve gaz yağı ile iyice sıvanır. Bu şekilde yüzey kurutulur. Kurumuş ve kontrol edilecek yüzey boşluk kalmayınca kadar beyaz renkli bir tebeşir ile boyanır. Bir plastik çekiç ile yüzeye zarar vermeyecek şekilde darbe vurularak yüzey titreştirilir. Eğer yüzeyde bir çatlak varsa, buraya nüfuz etmiş gazyağı titreşimle çıkacak ve tebeşiri ıslatacaktır. Bu şekilde beliren tebeşir çatlaklar hakkında fikir verecektir [45].

### 2.7.7. Endoskopik yöntem

Bu yöntem makinelerin ulaşılması mümkün olmayan bölgelerine (türbin kanatçıkları, dişli kutuları, pompa çarkı vb.) onları sökmeden ulaşmaya yarayan teleskobik cihazlar olup, en basit yöntemi çubuklu aynadır. Gelişmiş modellerinde ise yönlendirilerek ulaşılması zor noktaların (birkaç mm'lik bölgeler) görüntülerini makine dışındaki kişilere taşıyabilen ve hatta yapabilen özellikleri vardır. Bunlar fiberscope, borescope ve videoimagescope gibi ticari isimler altında pazarlanmaktadır. Aynı yöntemler modern tıpta, kalp damarlarının (anjiyo işlemi) ve diğer organların kontrolünün, cerrahi müdahale olmadan yapılmasını sağlamaktadır.

## 2.8. Sistem Değişkenlerinin Analizi

Önceki maddelerde bahsedilen kestirimci bakım yöntemlerinin dışında, manyetik akı analizi, başta direnç ve empedans olmak üzere elektrik testleri, güç faktörü izleme, ayırıcı zamanlama testleri, termodinamik testler, gerilim testleri, akustik emisyon gibi birçok gelişmiş yöntemin yanında gözle kontrol gibi çok basit ve temel yöntemler de durum izleme için kullanılabilirlerdir.

Kestirimci bakım için kullanılan ilk yöntem, tahmin edeceğimiz gibi, gözle muayene yöntemidir. Bu yöntem halen kullanılmaktadır ve ortak kanaate göre verimli bir

önleyici bakım programında, diğer yöntemlere destek olarak yer almaya devam etmelidir. Tekniklerin uygulanmasında sektörel açıdan özel bir tercih veya zorunluluk olmamasına rağmen otomasyonun ve sürekli veri kaydının yapılabildiği teknolojilerin kullanıldığı yerlerde daha kolay ve daha etkili olduğu görülebilir. Diğer yandan, akıllı sistemler kullanılarak oluşturulacak bir otomatik karar verme mekanizmasının da bizzat otomasyonun bir unsuru olduğuna dikkat etmek gerekir. Akıllı sistemler aracılığıyla durum izleme sürekli hale getirilmiş olur [46].

## **BÖLÜM 3. SANAYİDE KULLANILAN KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMASI ÖRNEKLERİ**

### **3.1. Titreşim Analizi Uygulaması**

Günümüzde sanayide kullanılan makinelerin büyük çoğunluğu dönme hareketi ile iş yapmaktadırlar. Bu makinelerin, görevini aksatmadan yapabilmesi için oluşacak arızaların başlangıç aşamasında iken belirlenmesi ve bakımı yapılarak arızanın giderilmesi gerekmektedir. Bu iş için titreşim analizi en uygun metottur. Dönen makinelerde oluşan arızaların sebep olduğu titreşimler iyi anlaşılırsa arızaları belirlemek kolay olmaktadır. Makinelerde çalışan parçalar arasındaki boşluğun artması, parçalardaki aşınma, çatlak oluşması ve benzeri nedenler titreşime neden olurlar.

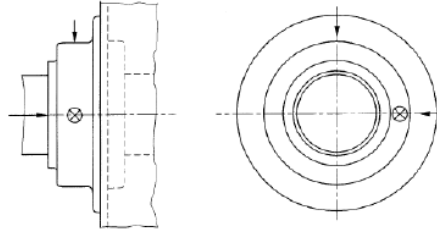
Tıpkı insan vücudunda herhangi bir yer rahatsızlandığı zaman bir ağrının oluşması gibi, makinede de bir arıza oluştuğunda titreşim seviyesinde bir artış olmaktadır. Bu özellikten faydalanılarak dönen makinelerde oluşan arızalar ile titreşim arasındaki ilişki belirlenmiştir. Dönen makinelerde bir çok arıza meydana gelmesine rağmen sık karşılaşılan en önemli arızalar dengesizlik, eksen kaçıklığı, gevşeklik ve rulman arızalarıdır. Bu arızaların neden olduğu titreşimlerin etkisi dönen elemanlar vasıtası ile yataklara aktarılır. Yataklardan titreşim ölçülmesi ile makinenin iç yapısında meydana gelen gelişmeler kolayca belirlenebilir. Bir algılayıcı ile ölçülen titreşim değerleri zaman ve frekans ortamına ayrıştırılır. Makinenin zaman ve frekans ortamındaki davranışı bu yolla belirlenir. Farklı arızaların oluşturduğu titreşimin frekansları da farklı olduğu için titreşim değerlerinin analizi ile, makinede oluşan bir arıza belirlenebilir.

İşletmede, SKF Microlog CMVA 60 model vibrasyon ölçüm ve analiz cihazı kullanılarak önemli tüm motor ve redüktörlerin titreşim analizleri yapılmış, çıkan

analiz sonuçlarına göre de sorun tespit edilen motor ve redüktörler yapılan bakım programıyla sırasıyla bakıma alınmıştır. Titreşim ölçümleri sırasında, ölçüm yapılan noktalar ve ölçüm frekanslarına ait bilgiler Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Uygulamada kullanılan titreşim ölçüm cihazı ve titreşim ölçüm sensörü



Ölçüm Noktaları	
POINT name	
m1h	Motor Arka Yatay 60000CPM
m1h.	Motor Arka Yatay 180000CPM
m1env	Motor Arka Rulman
m1v	Motor Arka Dikey
m1ax	Motor Arka Eksenele
m2h	Motor Ön Yatay 60000CPM
m2h.	Motor Ön Yatay 180000CPM
m2env	Motor Ön Rulman
m2v	Motor Ön Dikey
m2ax	Motor Ön Eksenele
k3h	Redüktör Ön Yatay
k3env	Redüktör Ön Rulman
k3v	Redüktör Ön Dikey
k3ax	Redüktör Ön Eksenele
k4h	Redüktör Arka Yatay
k4env	Redüktör Arka Rulman
k4v	Redüktör Arka Dikey
k4ax	Redüktör Arka Eksenele
DCA	Tetikleme Akımı

Şekil 3.2. Titreşim ölçüm noktaları

### 3.1.1. Titreşim ölçümlerinin alınması

Titreşim analizine konu olan motor daha önceden de belirttiğimiz gibi alternatif akımla çalışıyor olup 750 RPM değerinde çalışıp 339 KW güç üretmektedir.

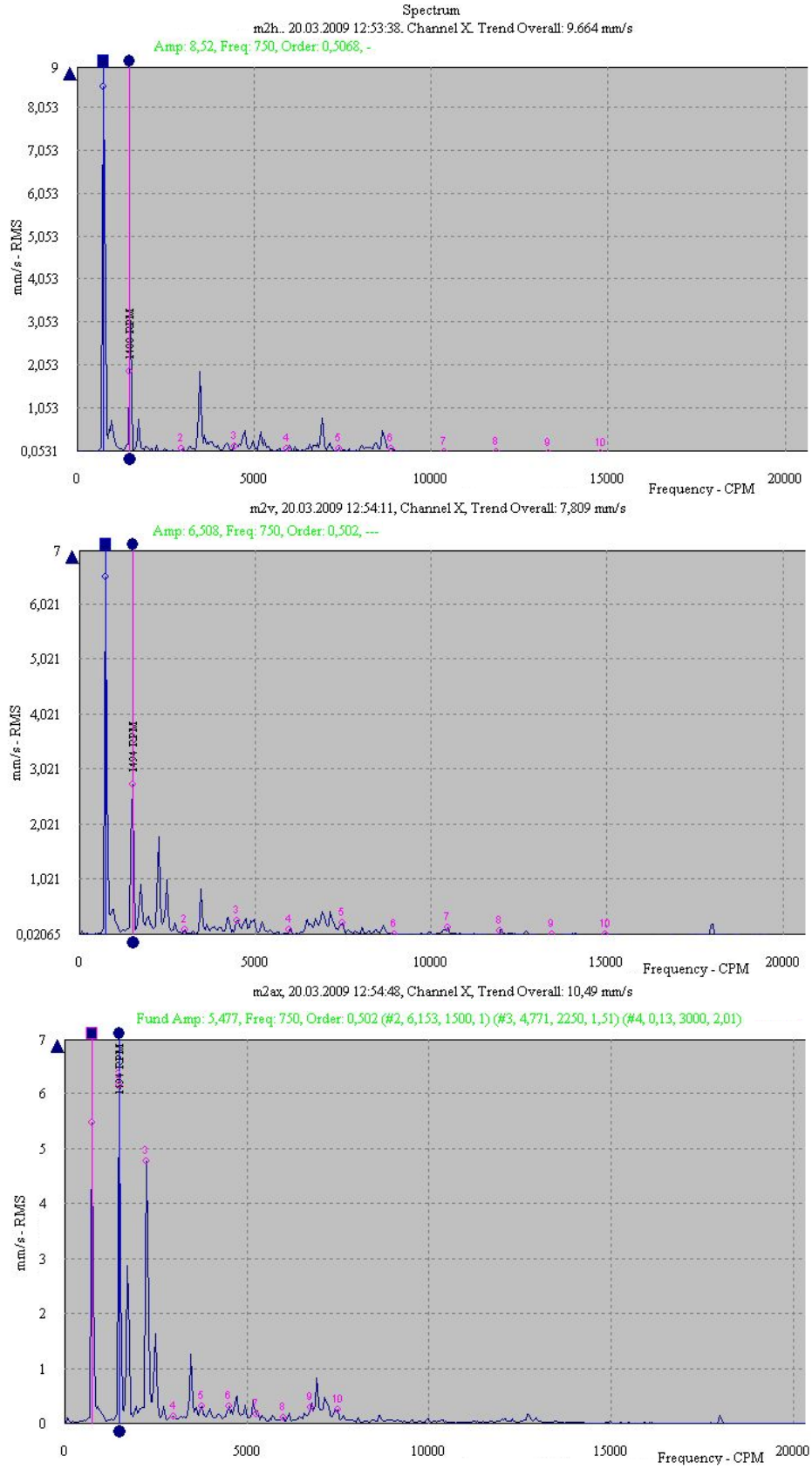


Şekil 3.3. Motor ön yatay titreşim ölçümü

Şekil 3.2'de belirtilen titreşim ölçüm noktalarına mıknatıslı titreşim sensörü konularak titreşim ölçümleri yapılmıştır.

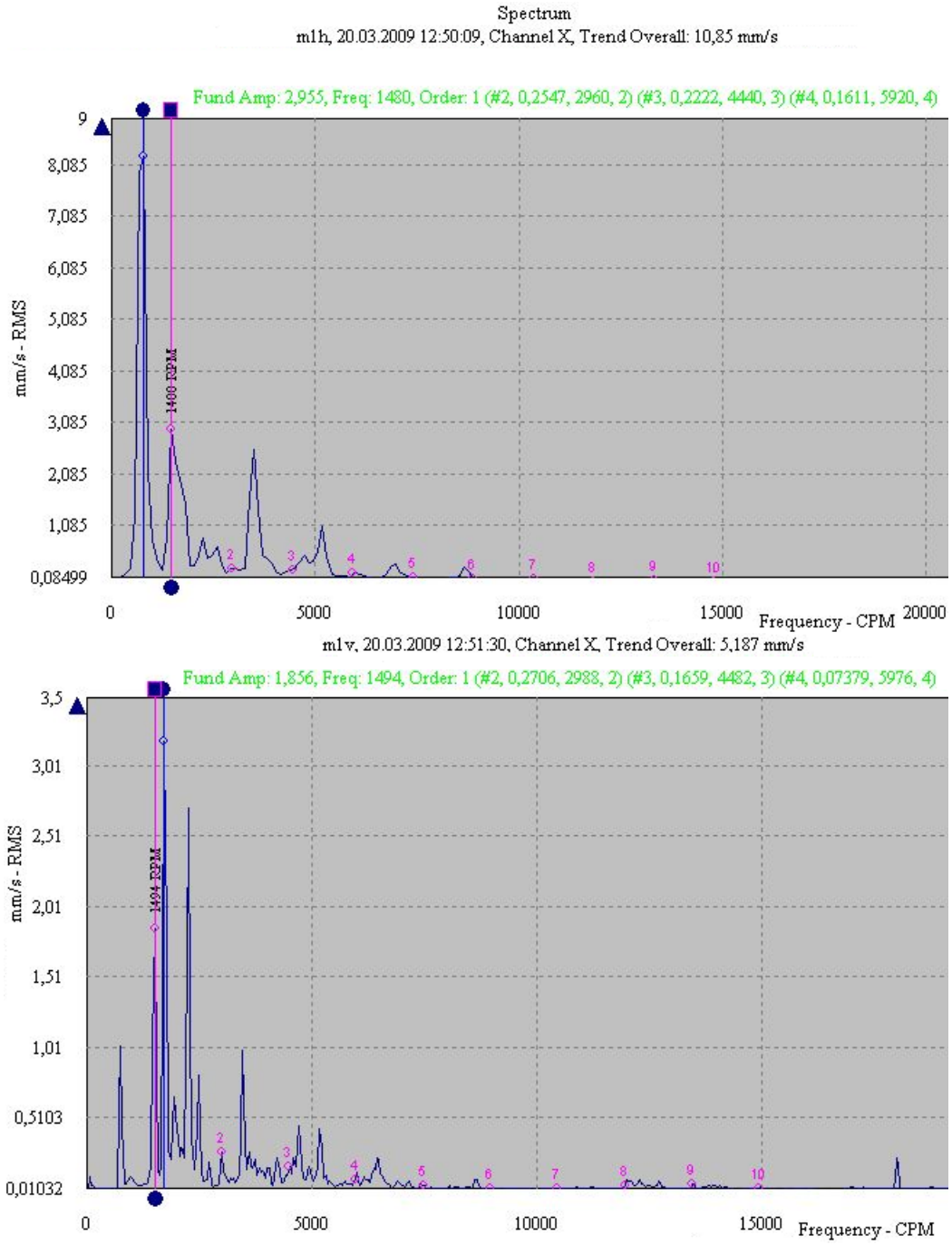
### 3.1.2. Titreşim sonuçlarının alınması ve yorumlanması

Gerekli ölçüm noktalarından ölçümlerin alınmasından sonra, titreşim ölçüm cihazı bilgisayara bağlanarak verilerin bilgisayar ortamını aktarılması sağlanmıştır. Titreşim ölçümleri sırasında titreşim sensörünün, Şekil 3.2'de de gösterildiği gibi motorun orta eksenine ile çakışacağı şekilde konumlandırılmasına dikkat edilmiştir. Aşağıda sırasıyla titreşim ölçümü yapılan noktalara ait oluşturulan spektrum grafikleri bulunmaktadır.

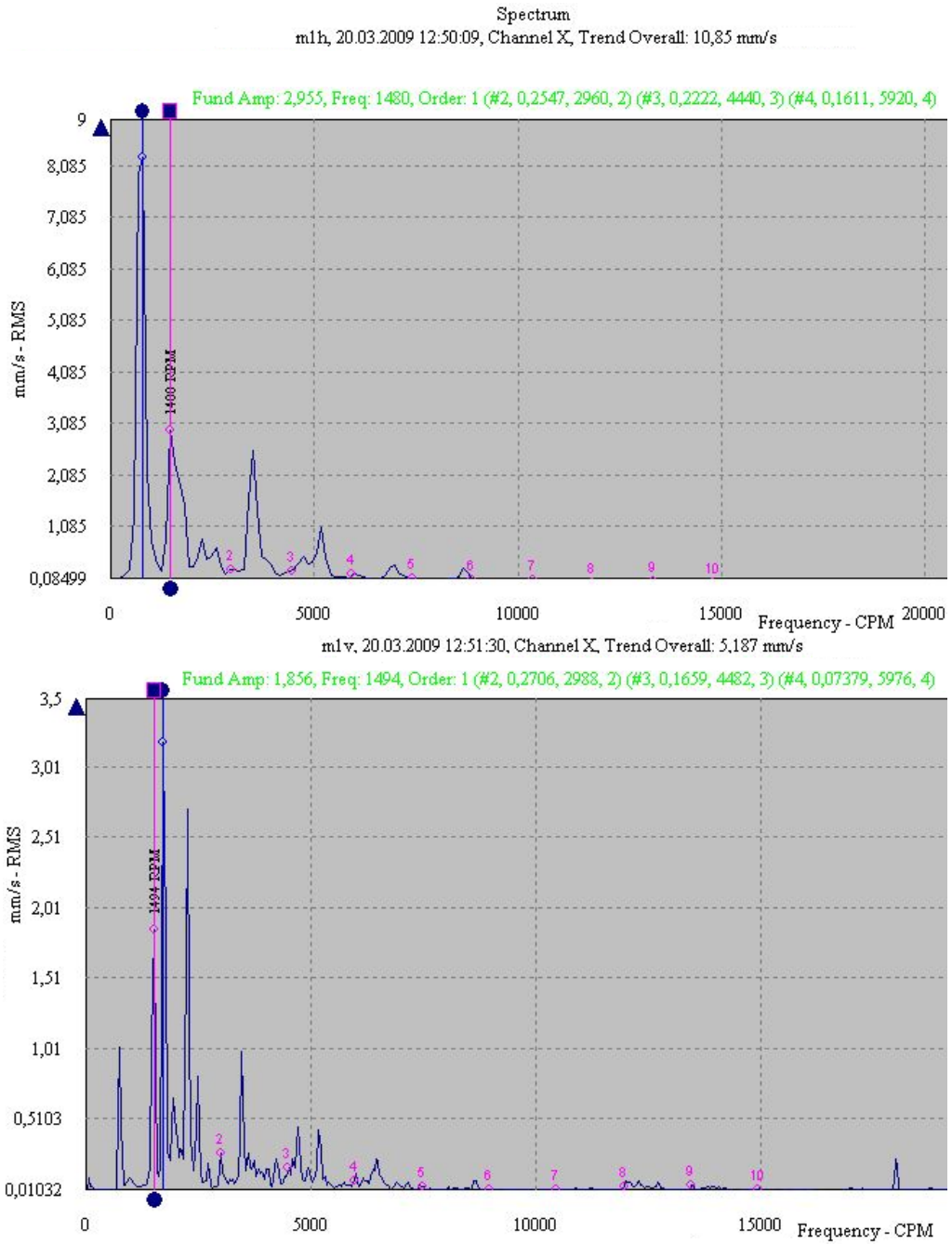


Şekil 3.4. Motor ön yatay – dikey – aksenal titreşim ölçümlerinin spektrum grafikleri





Şekil 3.5. Motor arka yatay - dikey titreşim ölçümlerinin spektrum grafikleri



Şekil 3.6. Motor arka ön - arka rulman titreşim ölçümlerinin spektrum grafikleri

Motor titreşimine ait spektrum grafikleri tek tek incelendiğinde; motor ön yatay ve dikey ölçümde ilk tepe noktalarının 750 CPM değerinde (1xRPM) yani motorun çalışma devrinde olduğu görülmektedir. Ön yatay ölçümde 750 CPM'e karşılık gelen tepe noktasındaki hız değeri 8,52 mm/s'dir. Ön dikey ölçümde ise tepe ilk tepe noktasına karşılık gelen değer 6,508 mm/s'dir.

Motor arka yatay ölçümünde de ilk tepe noktası 750 CPM'de oluşmakta ve buradaki tepe noktasına denk gelen hız değeri 8,23 mm/s olarak okunmaktadır. Arka dikey ölçüme ait spektrum grafiği incelendiğinde ise baskın tepe noktasının 1494 CPM değerinde oluştuğunu görmekteyiz ki bu değer (2xRPM) motor devrinin 2 katına karşılık gelmektedir. Bu noktadaki tepe değere karşılık gelen hız 3,17 mm/s'dir. Yatay ve dikey yönde yapılan ölçümlerde motorun devrinin 1. katlarında oluşan tepe noktalarına karşılık gelen hız değerlerinin yüksek çıkması , 2. bölümde de bahsedildiği gibi balanssızlığın belirtisi olarak yorumlanmaktadır. Fakat kesin bir neticeye varılabilmesi için eksenel yönde yapılan ölçümler de göz önünde bulundurulmalıdır.

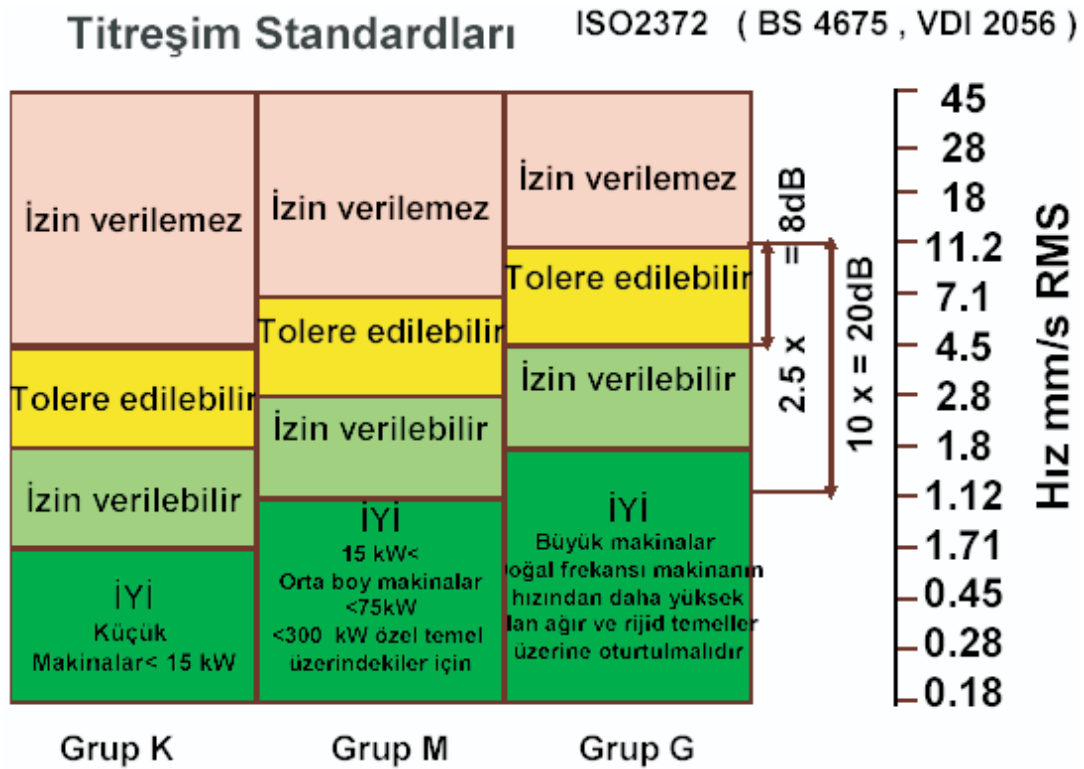
Motor ön eksenel ölçüm değerine bakıldığında ise baskın tepe noktasının 1494 CPM değerinde oluştuğu görülmektedir ki bu değer 2xCPM'e karşılık gelmektedir. Eksenel yönde motor çalışma devrinin 2. katında baskın tepe noktasının oluşması bizi balanssızlıktan ziyade kaplin ayarsızlığına yöneltmektedir.

Yatay yönde titreşim ölçümlerinin 180000 CPM'de de yapılması, 2. bölümde de bahsedildiği üzere rulman arızalarının yüksek frekanslarda ortaya çıkması sebebiyledir. Ayrıca rulmanlara ait ivme ölçümü sonuçları da (Şekil 3.6) incelenerek rulman arızalarına ait daha kesin bilgilere de ulaşılmaktadır.

### **3.1.3. Titreşim ölçümü sonucunda alınması gereken önlemler**

Titreşim ölçümlerinde motordan kaplin ayarsızlığı ve balanssızlık olduğu yönünde sinyaller alınmıştır. Balanssızlığın kontrolü ve düzeltilmesi için motorun yerinden sökülmesi gerekmektedir. Ayrıca kaplin ayarsızlığının olma olasılığının daha yüksek olduğu, yapılan eksenel ölçüm neticende görülmektedir. Bu sebeple motor bakıma alındığında kaplin ayarı kontrol edilmelidir. Hassas ayar için lazerli kaplin cihazıyla ayar yapılmasında fayda vardır. Ayrıca eksenel yönde yapılan ölçüm kaplinde problem olabileceğini de göstermektedir. Bu sebeple kaplin ayarıyla birlikte kaplin yüzeyinde de problem olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Kaplin ayarı yapıldıktan sonra yapılacak yeni titreşim ölçümü verilerine göre, tekrar balanssızlık sinyali alınıyorsa, motor sökülerek balanssızlığın giderilmesi

sağlanmalıdır. Ayrıca ölçülen motor vibrasyon değerleri Şekil 3.7'deki verilerle kıyaslanacak olursa oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu sebeple bu motorun titreşim ölçüm sıklığının arttırılmasında ve vibrasyon değerinin artması durumunda ise acilen bakıma alınmasında fayda vardır.



Şekil 3.7. Titreşim standartları

Ayrıca kaplin ayarlarının bozulması ve balanssızlığın oluşması önlem alınmazsa kaplinin deforme olmasına, gürültülü çalışmaya ayrıca problemler giderilmediği takdirde de mekanik gevşeklik oluşmasına sebep olabilecektir.

Kestirimci bakım yönteminin temelinde yatan prensip makinenin arızalanmasından önce problemlerin tespit edilmesi ve arızanın ciddiyetine göre karşı önlemler alınmasıdır. Bu bağlamda yapılan titreşim analizi sayesinde motordaki mevcut sorunlar tespit edilmiş olup, problemin aciliyetine göre hazırlanan bakım programı bünyesinde motor bakıma alınacak, beklenmedik arızalardan dolayı oluşabilecek zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçilmiş olacaktır.

### 3.2. Yağ Analizi Uygulaması

Yağ analizi, kullanılmakta olan yağın fiziksel ve kimyasal testlere tabi tutularak, makine ve yağ sağlığı hakkında bilgi sahibi olunmasını amaçlar. Tesisteki yağ analizi kanalıyla kestirimci bakım yapılacak makineler belirlendikten ve numuneler alındıktan sonra, bunlar yağın satın alındığı firmaya gönderilerek yağ analizleri yaptırılabilir. Daha önceden makine imalatçısı tarafından bir sınır değeri verildi ise veya kendi edindiğimiz yağ analiz referans değerleri ile laboratuvar sonuçları kıyas yapılarak değerlendirme yapılır.

İşletmede yaptığımız kestirimci bakım uygulamasında, önemli birçok redüktör ve hidrolik presten yağ numuneleri alarak analize gönderdik.

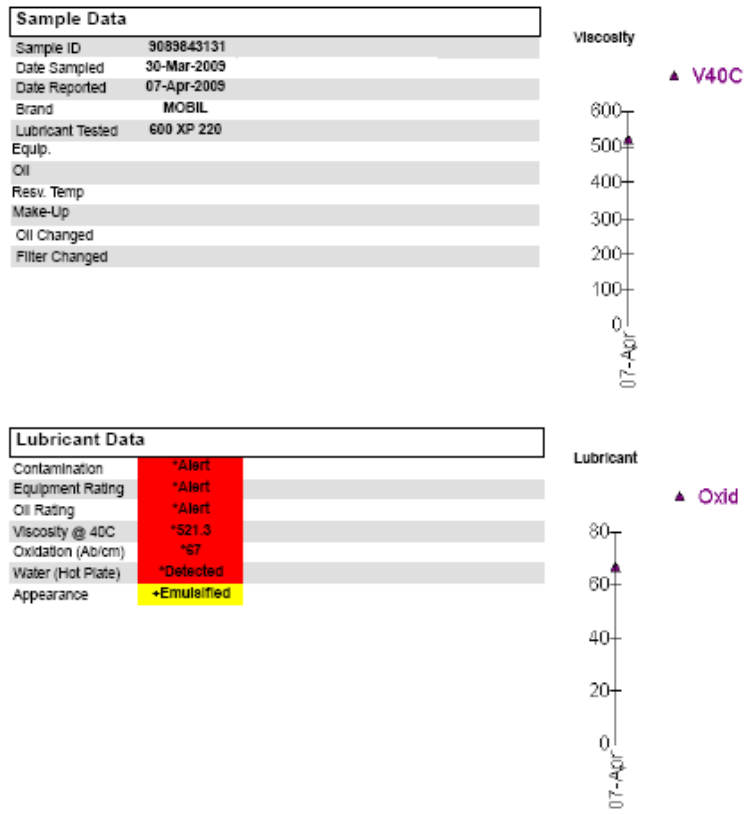


Şekil 3.8. Redüktörden yağ numunesi alınması

Yapılan analizler sonuçları, bazı redüktörlerde problemlerin olduğunu gösteriyordu. Aşağıdaki yağ analiz sonucu, yukarıdaki fotoğrafta yağ numunesi alınırken görünen, işletmedeki hayati öneme sahip redüktörlerden birini göstermektedir.

#### 3.2.1. Yağ analizi sonuçları ve alınması gereken önlemler

Yağ analizlerinin sonucunda Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'daki veriler elde edilmiştir.

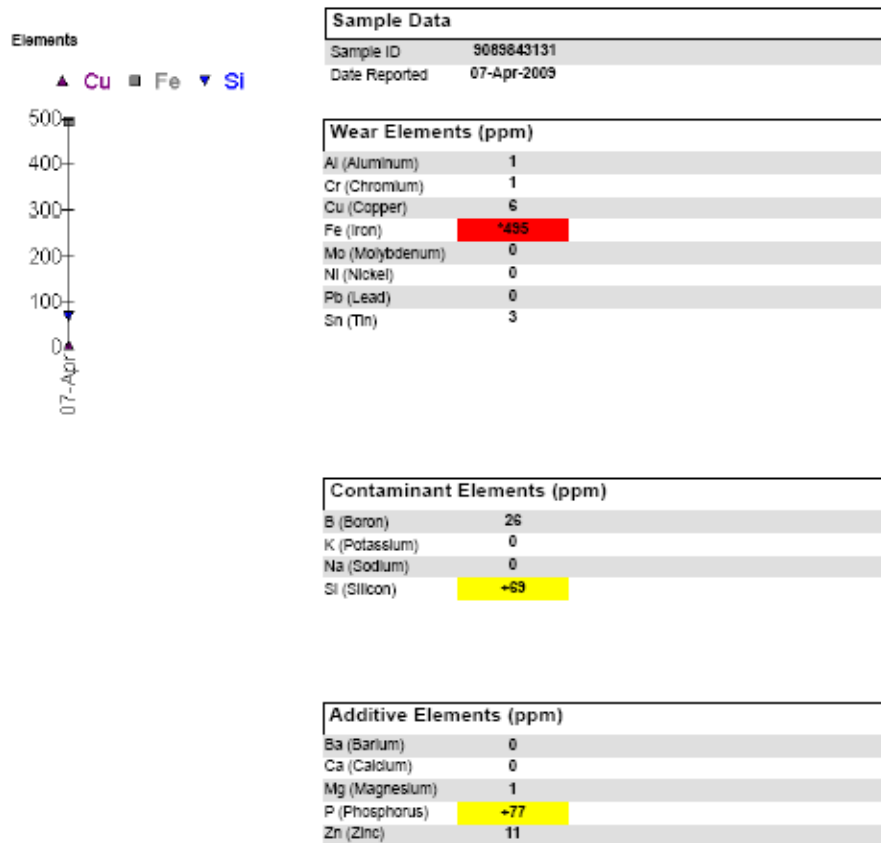


Şekil 3.9. Yağ analiz sonucu 1

Yağdaki oksidasyon miktarı yüksek çıkmıştır. Oksidasyon yağın yüksek sıcaklıklarda bozulmasıdır ve olası sebepleri; yüksek yağ sıcaklığı, yağ hizmet süresinin aşırı uzatılması, bölgesel yüksek sıcaklıkta noktalar, düşük yağ seviyesinde çalışma ve yetersiz yağ dolaşımı olabilir.

Yüksek oranda yağ viskozitesi tespit edilmiştir. Yağ kullandıkça kalınlaşmakta yani viskozitesi artış göstermektedir. Yağın viskozitesinin yükselmesi oksidasyona veya yağın partikül konsantrasyonuna da bağlı olabilir. Yüksek viskozite, yüksek iç sürtünmeden dolayı yüksek enerji tüketimi ve yüksek sıcaklık oluşumunu sağlamaktadır. Ayrıca viskozitenin gereğinden yüksek olması zor akış özelliğinden dolayı bazı yağlama noktalarına ulaşmakta güçlük sağlayabilir. Dişli kutularında viskozite değişimi %25'e kadar kabul edilebilir. Yüksek viskozitenin olası sebepleri; daha yüksek viskoziteli bir yağın bulaşması veya kullanılması, yüksek oksidasyon yağ bozulması/kirlenmesi, aşırı çökelti, çamurlaşmaya sebep olan soğutucu sıvı kirlenmesi olabilir.

Yüksek oranda su tespit edilmiştir. Su, yağ içinde istenmeyen bir kirlenmedir zira suyun yük taşıma kapasitesi yoktur. Yağ içine değişik yollarla girebilen nem burada çözünmüş, emisyon halinde veya bağımsız halde bulunabilir. Nem yoğunluğu yağı bulanık ve bulutlu bir yapıda gösterebilir. Su tanecikleri iki yüzeyin birbirine temasını engelleyen filmin kopmasına daha doğrusu stabil olmasına engeldir ve yağlama kalitesini düşürür. Nem ayrıca oksidasyona ve pasa neden olur. Bazı yağlama özelliklerini de katıkları etkileyerek bozar. Yağ su karışımı çamurumsu bir yapıda olduğundan hassas filtreleri tıkeleyebilir. Nemin en önemli etkisi rulmanlardır ve ömürlerini inanılmaz derecede kısaltır [47]. Yağda su bulunmasının olası sebepleri, sızıntı yapan sızdırmazlık elemanları, düşük işletme sıcaklığı veya uzun süreli duruştan dolayı yoğuşma, harici kirlenmeler, yağ soğutucusundaki sızdırmazlık problemi olabilir.



Şekil 3.10. Yağ analiz sonucu 2

Yağ analizinde aşınma elemanlarına bakıldığında, yüksek oranda demir aşınması tespit edilmiştir. Yağ içerisinde 100 ppm değerinin üzerinde demir bulunması

istenilmeyen bir durumdur. Yağ analizinde yağın içinde demir bulunmasının olası sebepleri; yağlanan parçaların aşınması, bir önceki yağ ile bulaşma ve aşırı uzun süreli değiştirilmeden yağ kullanılması olabilir.

Yağ analizinde yüksek çıkan bir başka değer silisyuma aittir. Silisyumun olası kaynakları arasında; metalik olmayan kavramaların aşınması, silikonlu kauçuk ya da sızdırmazlık bileşenlerine yağın teması, silikonlu köpük önleyicilerin teması veya numuneye kir girmesi gibi sebepler olabilir.

Ayrıca yağa katkı maddesi olarak konulan fosforun miktarı sınır değerde çıkmıştır. Fosfor krozyon engelleme katıdır. Korozyon oksijen ve asidik yapıların metalik yüzeylere saldırması ile gerçekleşir. Bu oluşumu nem hızlandırır. Fosfor asidik oluşumunu nötrleştirerek, koruyucu bir tabaka sağlar. Ayrıca baryum, kalsiyum ve magnezyum bütün sistem boyunca çökeltme oluşumunu kontrol ederek, makine parçalarını temiz tutup metal yüzeylerde koruma etkisi yapmaya, çinko ise anti oksidan görevinde olup, yağın yaşlanma etkilerini geciktirmeye ve oksijenin yağ molekülleri ile reaksiyona girmesini yavaşlatmaya fayda sağlamaktadır [47].

Yapılan yağ analizi testleri sonucunda aciliyet sırası ve olası problemler göz önünde bulundurularak işletmede bakım programları düzenlenmiştir. Yukarıda yağ analizi verilen redüktör ile ilgili yapılan ilk çalışma, yağın kullanım ömrünü doldurmuş olması ve yağlayıcı özelliğinin kaybolmaya başlaması sebebiyle, redüktör içerisindeki yağın tamamıyla boşaltılması ve redüktörün tamamen temizlenmesinden sonra yeni yağın konulması olmuştur. Bakım çalışması yapılanaya kadar redüktörden her ay yağ numuneleri alınarak tekrardan analize gönderilecektir ve redüktörün durumu yakından takip edilecektir. Dişli kutusunu durdurarak sökmek ve içini kontrol etmek süre alıcı bir çalışmadır. Ayrıca yağ analizlerinde sürekli izleme, analiz sonuçlarındaki artışlar belirleyici olduğundan ilk adım olarak uzun süredir üzerine ekleme yapılarak kullanılan yağın değişimi yapılmıştır. Yapılacak yağ analiz sonuçlarında çıkacak neticeler ve her analiz sonucunda bu değerler üzerindeki farklar bakım programı için izlenecek yolu belirleyecektir. Tüm analiz sonuçlarında yüksek demir konsantrasyonu olursa, dişli aşınmasının üzerinde durulacak, silikonun sürekli fazla çıkması durumunda ise sisteme toz girişi gibi olası ihtimaller göz önünde



bulundurularak bakım çalışması yapılacaktır. Ayrıca yağ analiz sonuçlarını titreşim analiz sonuçları ile birlikte ele almakta fayda vardır. İki analiz sonucunda da veriler aynı problemi işaret ediyorsa vakit kaybetmeden sisteme müdahale etmekte fayda olup, makinede oluşabilecek zaman ve maliyet kayıplarını asgari düzeye indirecek bakım çalışması bir an önce yapılmalıdır.

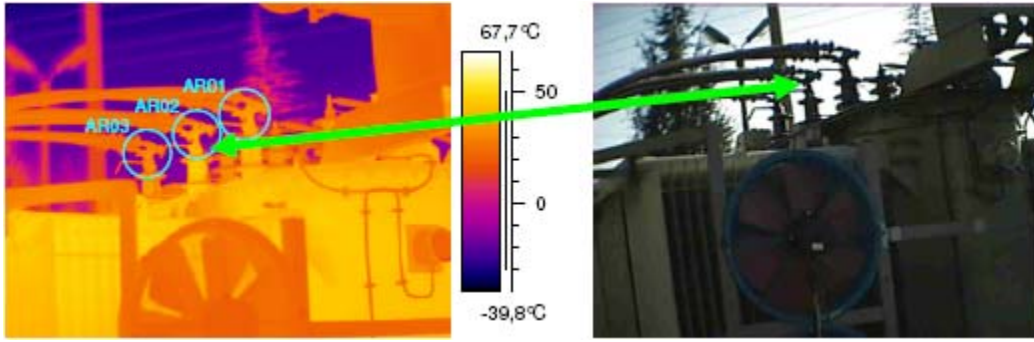
### **3.3. Termal Kamera Analizi Uygulamaları**

Termal kamera analizi, enerji hatları, gerilim panoları ve trafolarında uygulanan en etkili kestirimci bakım tekniğidir. Termal kamera ile çekilen ısı fotoğrafları, çok sıcak noktaları açık renkte, soğuk noktaları ise koyu renkle göstererek problemin kaynağını kolayca bulmaya yardımcı olur. Yangın riskleri ve çalışan ekipmanlardaki oluşabilecek çok önemli elektriksel arızalar başlangıç aşamasında yakalanır, bu sayede gerekli onarım ve müdahaleler problem ortaya çıkmadan yapılabilir.

İşletmede yapılan termal kamera analizi ile, elektrik panolarındaki noktalar kontrol edilerek bakımlarının yapılması gereken noktaların tespiti yapılmış, trafoların ve akülerin fotoğrafları ve bu noktalara ait sıcaklık dağılım grafikleri elde edilerek sorunlu bölgelerin tespiti gerçekleştirilmiştir.

#### **3.3.1. Trafo termal kamera ölçümü**

İşletmede bir trafoda yapılan termal kamera analizine ait veriler aşağıdaki gibidir.

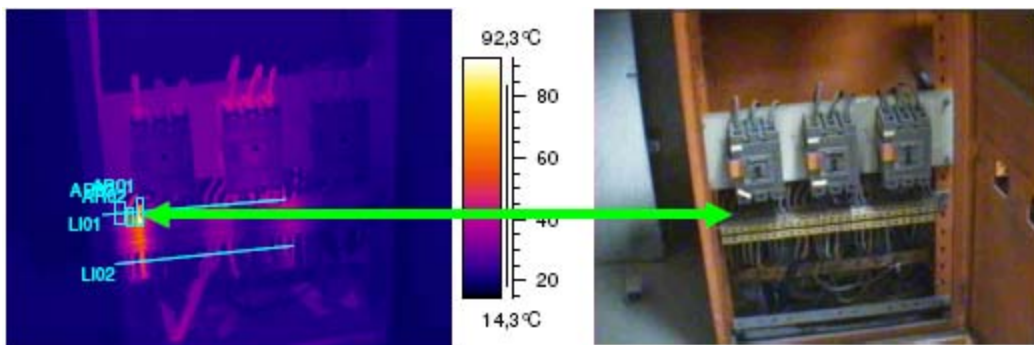


Şekil 3.11. Trafonun termal kamera ile fotoğraflanması

Trafonun termal kamera ile görüntülenmesi sonucunda AR01 bağlantısındaki maksimum sıcaklık 39,3 °C, AR02 ile gösterilen bağlantıdaki maksimum sıcaklık 42,7 °C çıkmış olup, AR03 bağlantısının 33,5 °C'lik ölçülen maksimum sıcaklık değerinden fazla çıkmışlardır. Bu sıcaklık farkından hareketle yapılan bakım çalışmasında AR01 ve AR02 bağlantılarının gevşek olduğu görülmüş ve gevşeklikler sıkılarak problem çözülmüştür.

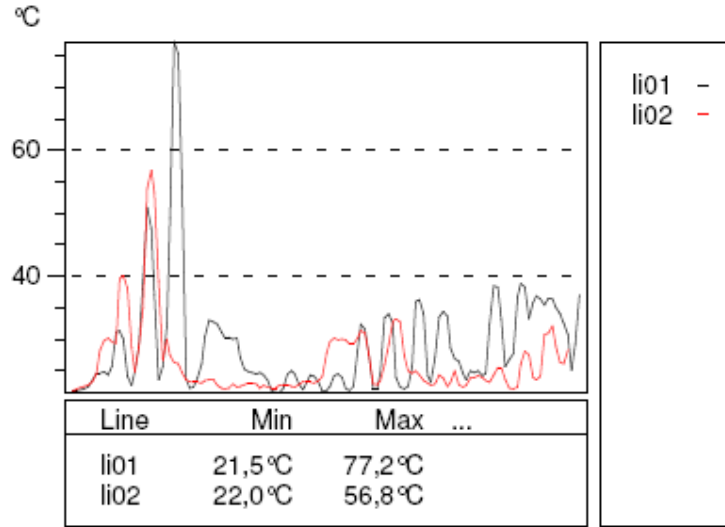
### 3.3.2. Trafo panosu termal kamera ölçümü

İşletmede trafo panolarının da termal kamera ile ölçümleri yapılmış olup aşağıda problem tespit edilen bir pano hücresine ait ölçüm sonuçları yer almaktadır.



Şekil 3.12. Trafonun panosunun termal kamera ile fotoğraflanması

Termal kamera analizinin verilerine göre pano üzerindeki sıcaklık dağılımı grafiksel olarak da tespit edilebilmektedir.

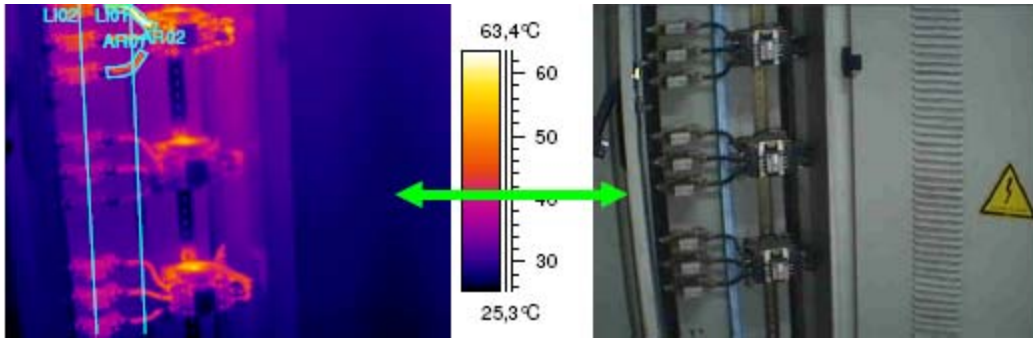


Şekil 3.13. Trafo panosu üzerinde LI01 ve LI02 doğruları boyunca sıcaklık dağılımı

AR01 bağlantısındaki maksimum sıcaklık 96,6 °C, AR02 ile gösterilen bağlantıdaki maksimum sıcaklık 62,2 °C çıkmış olup, AR03 bağlantısının 38,9 °C'lik ölçülen maksimum sıcaklık değerinden fazla çıkmışlardır. Bu sıcaklık farkından hareketle yapılan bakım çalışmasında AR01 ve AR02 bağlantılarının gevşek olduğu görülmüş ve gevşeklikler sıkılarak problem çözülmüştür.

### 3.3.3. Kompanzasyon panosu termal kamera ölçümü

İşletmede trafolardan birisine ait kompanzasyon panosunda yapılan termal kamera ölçümü sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

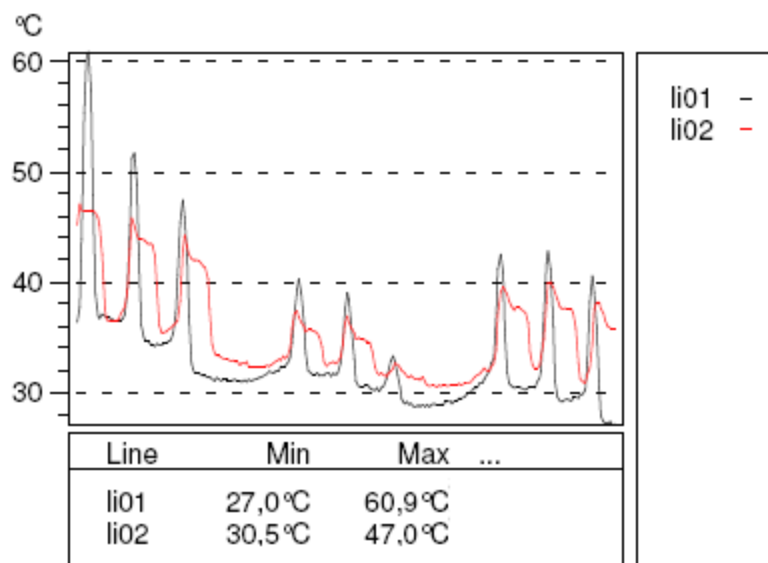


Şekil 3.14. Kompanzasyon panosunun termal kamera ile fotoğraflanması

Termal kamera analizinin verilerine göre kompanzasyon panosunun üzerindeki sıcaklık değerleri aşağıdaki gibidir.

Label	Value
LI01 : max	60,9°C
LI02 : max	47,0°C
AR01 : max	65,4°C
AR02 : max	48,7°C

Şekil 3.15. Kompanzasyon panosu üzerinde ölçülen sıcaklık değerleri



Şekil 3.16. Kompanzasyon panosu üzerinde LI01 ve LI02 doğruları boyunca sıcaklık dağılımı

AR01 ile gösterilen bağlantı diğer bağlantılara göre daha fazla ısınmış olup buradaki maksimum sıcaklık 65,4 °C çıkmıştır. Diğer bağlantılara kıyasla bu bağlantıda sıcaklığın yüksek olması sebebiyle yapılan bakım çalışmasında, bağlantı noktasında gevşeklik tespit edilmiş ve gevşek bağlantı sıkılarak düzeltilmiştir.

### 3.3.4. Termal kamera analizinin faydaları

Alçak gerilim, orta gerilim, yüksek gerilimde kullanılan ayırıcı, şalter kesici, birleşme noktaları, klemens grubu, anahtar, kontaktör, şalter bara bağlantı noktaları panolar kablolar gibi elemanlar kendi üzerlerinde taşıyabilecekleri akım sınırlarını aşma durumlarında ısınmalara sebep olurlar. Diğer bir ısınma sebebi ise bahsedilen noktalardaki sıcaklık artışının iyi yapılmamış yada sonradan oluşan gevşek bağlantılardır. Başlangıçta çok iyi bir şekilde montaj edilmiş olsalar da elektrik akımı ile ısınan bu elemanların bağlantı noktalarının çok az dahi olsa genleşmeleri zamanla kontak noktalarında gevşekliğe sebep olurlar. Bu gevşek bağlantı noktaları ise yüksek direnç göstererek dağıtım problemlerine sebep olur, yangın riskini artırır, verimi düşürür ve istenmeyen açma yada devre dışı kalmalara sebep olurlar.

Arıza aramalarında kızılötesi tekniğinin kullanılmasının pek çok nedeni vardır. Kızılötesi teknoloji, termal performansı elde etmeye ve görselleştirmeye yarayan tek arıza arama teknolojisidir. Kızılötesi kameralar termal problemleri gösterir, bu ölçümleri doğrudan temas gerektirmeyen sıcaklık ölçümleri ile nitelendirir. Güç kullanan ve/veya güç transfer eden hemen her şey arızalanmadan önce ısınır. Elektriksel ve mekanik sistemlerin güvenilirliğinin sağlanmasında uygun maliyetli güç yönetimi oldukça önemli bir konudur. Günümüzde, kızılötesi termografinin, arızalara ilişkin problemlerin hızlı, güvenli ve tam olarak tespit edilmesinde kullanılan kanıtlanmış en etkili önleyici bakım teknolojisi olduğunu herkes kabul etmektedir. Zayıf elektrik bağlantılarının, bir bileşen arızalanmadan önce bulunması ve onarılması, sistemde imalatın durdurulması, üretim kayıpları, güç kesintileri, yangın ve doğal afetlerden doğacak daha büyük sorunlardan korur. Gerçekte, hassas sıcaklık ölçümleri yapan bir kızılötesi kamera, elektrik bağlantılarının durumu veya mekanik parçaların aşınması hakkında çok fazla bilgi verir. Kontrol sonuçlarını analiz ve rapor etmenin basit ve hızlı bir yolu olan kızılötesi çalışmasıyla, uygun

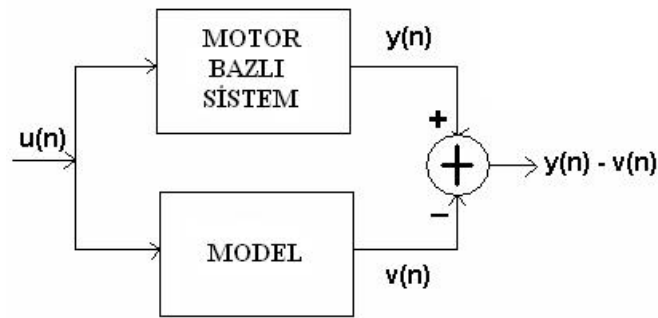
tamir kararları vermek veya ekipmanlara ilişkin problemler yaratabilecek bu sorunlu bölgeleri belirleme ve ayırma işlemlerini yapmak mümkün olur [48].

### 3.4. Motor Durum İzleme Sistemi

MDİ (Motor Durum İzleme), alternatif akımla çalışan jeneratörler, elektrik motorları, transformatörler gibi üç fazlı sistemlerin ve motorlar tarafından sürülen ekipman veya sürecin kestirimci bakımı için kullanılan bir üründür. Sadece kritik ekipmana giden üç faz gerilim ve akım sinyallerini ölçerek ve bu sinyalleri sürekli izleyerek olması yakın gelişmeye başlayan elektriksel ve mekanik arızaları erken safhalarında tespit ederek bakım yapılmasını sağlayan, beklenmedik duruşları önleyen bir kestirimci bakım cihazdır.

#### 3.4.1. Motor durum izleme sisteminin çalışma prensibi

Bu teknikte, üç fazlı sistemin beklenen dinamik davranışı (model) ile gerçekleşen (ölçülen) dinamik davranışı karşılaştırılır. Bu karşılaştırmada dikkati çeken farklılıklar varsa bir arıza gelişmeye başlamıştır sonucuna varılır. MDİ önce bir süre boyunca sistemden gerçek zamanlı veri alarak ve bunu işleyerek sistemi öğrenir. Beklenen dinamik davranış ve model parametrelerinin hesaplanması için, sistem tanıma algoritmaları kullanılarak veriler işlenir. Sistemin parametrelerindeki değişiklikler sistemde gelişen arızaları gösterir. Bir adım ileri gidilerek bu parametreler hata teşhisi için kullanılır.



Şekil 3.17. Matematiksel Modelin Gerçek Sistemle Karşılaştırılması

Şekil 3.17’de ,  $u(n)$  matematiksel modele ve gerçek motor bazlı sisteme giriş gerilimleridir.  $y(n)$  motor bazlı sistemin çıktısına (akım) karşılık gelir. Diğer yandan,  $v(n)$ , model tarafından hesaplanan akımlardır.  $y(n)-v(n)$  ölçülen ve hesaplanan akımlar arasındaki farktır. Model, motorun elektro mekaniksel davranışını açıklayan bir grup diferansiyel denklemden oluşur. Sistemden elde edilen gerçek zamanlı veriler, model parametrelerinin hesaplanması için sistem tanıma algoritmaları tarafından işlenir. Motoru, jeneratörü süren mekanizma veya süreç sensör olarak kullanılır. Motorların yanında, motor bazlı sistemde gelişen arızalar veya sistemin çalışmasını etkileyen beklenmedik durumlar da model parametrelerini etkiler [49].

MDİ bir süre motor verilerini toplayarak ve işleyerek motor bazlı sistemi öğrenir. İşlenen verilerin sonuçları veritabanında saklanır ve bir referans model oluşturulur. Bu referans model temel olarak model parametreleri, ortalama değerleri ve standart sapmalarından oluşur. Daha sonra, MDİ elde edilen motor verilerini işler ve sonuçları veritabanında saklanan sonuçlarla karşılaştırır. Elde edilen verilerden bulunan sonuçlar referans modelden önemli ölçüde farklıysa, MDİ bir arıza seviyesini gösterir. Seviye, farkın büyüklüğü ve süresi göz önüne alarak belirlenir.

Toplamda MDİ 22 farklı parametreyi (model parametreleri) izler ve karşılaştırır. Bu parametreler üç gruba ayrılır. Birinci grupta elektriksel parametreler denilen 8 parametre vardır. Bu parametreler karakteristik parametreleridir ve endüktanslar, dirençler, vs gibi motorun fiziksel parametreleriyle ilişkilidirler. Parametreler motorda gelişen elektriksel arızalara karşı son derece hassastırlar. MDİ, model parametrelerinin herhangi bir andaki değeriyle, aynı parametrelerin öğrenme aşamasında elde edilen ortalama değeri arasındaki farkı analiz eder ve değerlendirir. Bu farklar öğrenme aşamasında elde edilen standart sapmalarına göre normalize edilir. Bu yüzden değerler, öğrenme aşamasında elde edilen ortalama değerlerden kaç standart sapma uzak olduklarını gösterir. Bu değerler MDİ tarafından oluşturulan eşik değerleri geçerse bir alarm verilir. Bunların değerlerindeki değişim sistemde gelişmekte olan arızalarla ilişkilidir. Örnek olarak sargıdaki bir izolasyon veya kısmi deşarj problemi dirençlerle ilişkili tüm parametreleri etkileyecektir. Bunların değişimi MDİ’ nin izolasyon veya kısmi deşarj problemini erken bir safhada tespit etmesini sağlayacaktır. Öncelikle elektriksel problemleri tespit etmek için

kullanılsalarda, mekanik problemleri de gösterebilirler. Örnek olarak, bir balanssızlık veya dişli problemi hava aralığında dinamik eksantrikliğe neden olur. Bu eksen kaçıklığı endüksiyon parametrelerinde ve bu yüzden model parametrelerinde bir değişime neden olur. Bu model parametrelerindeki değişim izlenerek balans sorunu erken bir safhada tespit edilebilir. Bu balanssızlık zamanla rulmanı etkiler ve bozulmasına sebep olur. Bu yüzden bunun erken bir safhada tespiti rulman bozulmasını önleyebilir [49].

Elektriksel parametreler ayrıca iki gruba ayrılır. Bir grup elektriksel parametreler rotor, stator, sargı vs. ile ilişkili problemleri gösterirken, diğer grup akım dengesizliği, kablolama izolasyon problemi, kondansatör, motor klemesinde gevşeklik, motor terminal kutusunda gevşeklik, kontaktörün kontaklarındaki problemler vs. gibi güç kaynağı problemlerini gösterir.

İkinci gruptaki parametreler balanssızlık, aktarma elemanları veya rulman problemleri, eksen kaçıklığı gibi mekanik arızalara hassastır. Bu parametreler elektriksel sinyallerin frekans spektrumundan elde edilir. MDİ beklenen akım ve gerçek akım arasındaki farklardan elde edilen frekans spektrumunu kullanır. Bu farklar sadece motor tarafından meydana getirilen arızaları içerir. Bu nedenle, bunlar besleme gerilimdeki gürültü veya harmoniklerden bağımsızdır.

Mekanik parametreler frekans spektrumundan elde edilen 12 maksimum değere karşılık gelir. Bu parametreler teşhis amaçlı da kullanılır. Titreşim ve akım imza analizi tekniklerine benzer olarak, meydana geldikleri frekanslar arızanın tipini gösterir (Ör: balanssızlık, gevşeklik, eksen kaçıklığı, fan pervaneleri, rulmanın iç veya dış yatağı, kaplin, kavitasyon vs.) Trend izleme ve teşhis amaçları için bu parametrelere ek olarak frekans aralıkları da kullanıcıya sağlanır.

Üçüncü gruptaki, parametreler sistemin davranışındaki değişikliklere duyarlıdır. Bunlar gerçek akımlar (d fazı ve q fazı) ve modelden hesaplanan akımlar arasındaki sapmalardır. Bu parametreler eşik değerlerinin üstüne çıkarsa, sistemin öğrenme aşamasından farklı davrandığı düşünülür, sistemde bir arızanın başladığını erken safhada gösterir.



Yukarıdaki parametrelere ek olarak MDİ besleme gerilimini ve yük koşullarını (proses) da izler. Besleme gerilimi anormal şekilde değişirse, besleme geriliminin balanssızlığı veya harmonik değişimi varsa şebekenin izlenmesi yönünde alarm verir. Benzer şekilde, yük koşulları (proses) öğrenme aşamasında izlenen koşullarla benzer değilse, yükün izlenmesi yönünde alarm verir. Yükü izle ya süreçteki bir değişimi, ya da sistemde gelişmeye başlayan bir arızanın olduğunu gösterir. Kullanıcı süreçte bir değişiklik olduğuna karar verirse, MDİ'yi güncellemeli ve bu sayede bu yeni yük koşulunu öğrenme periyodundaki koşulları da sisteme eklemelidir.

Ölçülen üç faz gerilim ve akım sinyallerini kullanarak, MDİ ayrıca üç faz gerilim ve akımın rms değerleri, güç faktörü, vs. gibi bir grup fiziksel parametre de hesaplar. Bu grup ayrıca, enerji kalitesi hakkında fikir veren toplam harmonik bozulma, gelen sinyalin harmonik içeriği ve gerilim balanssızlığı gibi parametreler içerir. Bu gruptaki aktif ve reaktif güç parametreleri enerji tüketim bilgileri için kullanılabilir[49].



Şekil 3.18. MDİ – Motor durum izleme cihazı

MDİ' cihazını parametre izleme ve hata teşhis için arıza teşhis yazılımı ile kullanmak da mümkündür. Arıza teşhis yazılımı kullanıcıya arıza durumunu ve teşhisini periyodik olarak ve ayrıca alarm durumunda raporlar. Parametre izlemeye ek olarak, MDİ arıza teşhis mekanik parametrelerin frekans aralıklarını elde eder ve karşılık gelen rulman, balanssızlık, gevşeklik, vs gibi arızaları belirlemeye yardımcı olur. Enerji tüketimi için elde edilen ortalama değerler (gerilim, akım, aktif güç reaktif güç ve güç faktörü) 'e ek olarak enerji kalitesi (THD (Toplam Harmonik Distorsiyon),

harmonikler, gerilim balanssızlığı ve akım balanssızlığı) de bu sistemle görülebilmektedir.

İşletmede MDİ cihazlarından biri, 339 KW, 3300 V, 74 A ve 742 RPM çalışma verilerine sahip alternatif akımla çalışan motora bağlanmıştır.



Şekil 3.19. Motor panosunun üzerinde bulunan MDİ cihazı

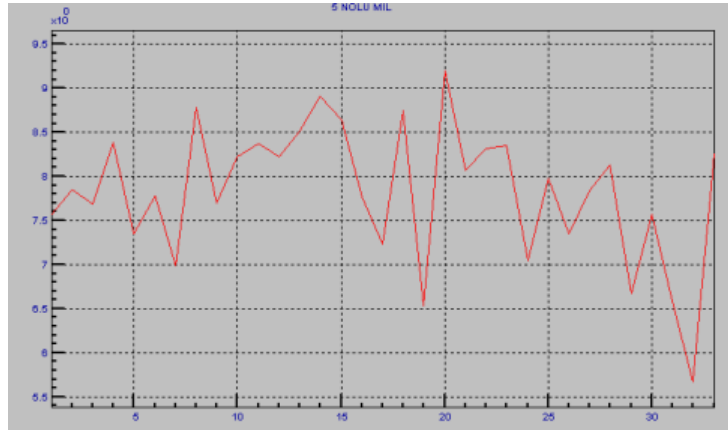
Teşhis Penceresi

HATA DURUMU		EKİPMAN BİLGİSİ	
OK	Gevşek Zemin / Komponent	Ekipman İsmi	5 NOLU MİL
OK	Balanssızlık / Eksenel Kaçıklık / Kıpın	Ekipman Tipi	Diğer
OK	Kayıp / Aktarma Elemanı / Sürülen Ekipman	Nominal Voltaj	3300
OK	Rulman	Nominal Akım	74
OK	Rotor	Motor Hızı	742
OK	Stator / Kısa Devre	MCM Adresi	2
OK	Dahili Elektriksel Hata	ELEKTRİKSEL DEĞERLER	
OK	Harici Elektriksel Hata	Güç Faktörü	0.65
OK	Diğer	Aktif Güç	157
Ekipman Durumu: Alarm		Reaktif Güç	183
İŞ EMRİ İSTEĞİ		Vrms	3110
1. Güç faktörü 0.80'in altında. Eğer motor yükte çalışıyorsa, verim düşüklüğü elektriksel arızalardan kaynaklanabilir. Kontrol ediniz.		İrms	23
2. Akım balanssızlığı %5 in üzerindedir. Stator, kısa devre, izolasyon eskimesi, kısmi deşaj vs. arızaları göz önüne alınarak inceleme yapılmalıdır.		V Balansı	0.54
Uyarı		I Balansı	5.5
Çizdir		Frekans	48
Temizle		Kazanç	0.11
Yükle		HARMONİKLER (%)	
Yardım		THD	4.0
Rapor		3th	0.90
PSD		5th	2.8
Gelişmiş		7th	1.5
Kapat		9th	0.15
		11th	1.2
		13th	0.50
		Başlangıç	03/12/2009 03:49:17
		Bitiş	03/12/2009 08:49:17
		Zaman aralığındaki veri sayısı	27
		Veritabanı aralığı	Toplam veri
		03/04/2009 - 03/12/2009	1993

Şekil 3.20. MDİ cihazında tespit edilen hataların teşhis penceresinde gösterilmesi

### 3.4.2. Arıza tespiti

MDİ cihazı çalışma sırasında tespit ettiği problemleri Şekil 3.21'de görünen teşhis penceresinde bildirmektedir. Mevcut duruma göre sistem; sürekli yaptığı izleme sayesinde elde ettiği güç faktöründeki düşüklüğü ve akımdaki balanssızlığı tespit etmekte ve bunu uyarı olarak göstermektedir. Ayrıca her bir uyarı durumuna ait zamanla olan değişimleri de grafik olarak işletmeye sunmaktadır. Durumun aciliyetine göre sistem ikaz durumunu belirlemektedir. Uyarı durumu göz önüne alınarak, belirlenen arıza en yakın bakım programında ele alınacaktır. Ya da MDİ çok acil bir arıza uyarısı verirse işletme oluşabilecek maliyet ve zaman kayıplarını önlemek adına arızaya hemen müdahale edilecektir.



Şekil 3.21. Akım balansına ait grafik

Güç faktörü; gerçek gücün , görünüşteki güce bölümüyle ortaya çıkan değerdir. Gerçek güç, bizim o işi yapmamız için gereken gücü bize belirtir ve watt ile ifade edilir. Şebekede görünen güç ise VA (volt-amper) şeklinde ifade edilir. Dalgaların düzensizliğinden dolayı, belirli miktarda güç çekmek için şebekeden daha fazla akım çekilir. Güç faktörü, 0 ile 1 arasında değişir. Güç faktörü 0 iken herhangi bir iş yapılmaz. Güç faktörü 1 iken, gerçek güç ile şebekede görünen güç aynıdır ve ideal durum budur. MDİ cihazı güç faktörü 0,8' in altına düştüğünde uyarı sinyali vermekte ve olası elektriksel arızalar göre sistemin kontrol edilmesi gerektiğini bildirmektedir. Ayrıca akım balanssızlığının %5' in üzerinde olduğunu algılayan MDİ cihazı, statör, kısa devre, izolasyon eksilmesi, kısmi deşarj gibi durumların bu

soruna yol açabileceğini işletmeye bildirerek, bu konularda bakım yapılmasının gerekli olduğunu göstermektedir. Alınan arıza sinyallerinin türü ve arızanın aciliyet durum göstergesine göre işletme ilgili ekipmana bakım yapmaktadır.

Sonuç olarak sürekli motor durumunun izlenmesi sayesinde bir çok problemin önceden tespiti yapılabilmekte ve işletme bu sayede oluşabilecek maliyet ve zaman kayıplarını asgari düzeye indirebilmektedir.

### 3.5. Busbar İzolasyon Direnci Ölçüm Uygulaması

Elektriksel izolasyon tüm elektrik sistemi için önemlidir. Elektrik izolasyon ölçümü veya yalıtım direnci ölçümü için, elektrik izolasyon direnci ölçüm cihazı kullanılır. Elektrik enerjisinin taşınması sırasında taşıyacağımız noktaya kadar, ortamdan yalıtılmış olmasını isteriz. Tüm yalıtım malzemeleri kurulduğu andan itibaren yaşlanmaya başlar. Isı, nem, mekanik stresler gibi dış etkenler ve yalıtım malzemesinin üretiminde kullanılan ham maddenin yaşlanması gibi etkenlerden dolayı zamanla izolasyonda yalıtım problemleri baş gösterir.

Basit olarak izolasyon direnci ölçümü yada yalıtım testi (kimi zaman meger testi diye de adlandırılır) tam doğrultulmuş DC gerilimin dielektrik malzemeye uygulanışı ve dielektrik malzemenin geçirdiği akımın ölçülmesi ve ohm kanununa göre hesaplanmasıdır. Burada geçen akım kaçak akımdır ve değeri çok küçüktür. İzolasyon direncinin ise megaohm mertebelerine olması beklenir. Her yalıtkan bir miktar elektrik akımı geçirir ve hiç bir yalıtkan mükemmel değildir.

İzolasyon direnci ölçümünün amacı;

- a. Üretim sırasındaki kalitenin belirlenmesi
- b. Kullanılan malzemelerin standartların gerekliliklerini karşılayıp karşılamadığının tespiti
- c. Periyodik kestirimci bakım
- d. Hata tespiti
- e. İzolasyon malzemesinin zaman içerisindeki durumunun tespiti, olarak

özetleyebiliriz.

### 3.5.1. İzolasyon direnci ölçüm yöntemi

İzolasyon direnci ölçüm cihazının iki uçlu test problemlerinin izolasyon malzemesine bağlanması şeklindedir. Örnek olarak tek fazlı bir motorun izolasyon testini ele alırsak, üretim sırasında motor izolasyonu gövde ile sargılar arasındadır. Bu testte izolasyon ölçüm cihazının test problemlerinin bir ucunu motorun gövdesine diğer ucunu ise motor sargılarından birisine bağlamalıyız. Bağlantı doğru şekilde yapıldıktan sonra cihaz üzerinden test gerilimi ayarlanır ve test başlatılır.

Her malzemenin bir miktar kapasitif ve endüktif etkisi oldu için uyguladığımız DC gerilim karşısında polarize oluşu ve basitçe şarj oluşundan dolayı cihaz ekranında okuduğumuz değer ilk bir kaç saniyede değişebilir. Bu nedenden dolayı izolasyon direnci ölçümü en az 1 dk dakika süre ile yapılmalıdır. Çok büyük sistemlerde bu süre dahada büyüyebilir. Bu durumda ekrandaki değer sabit kalcağız ana kadar izolasyon direnci testini sürdürmeliyiz [50].



Şekil 3.22. Elektrik motorunda yapılan izolasyon direnci testi

### 3.5.2. Busbar sistemi

Busbar, elektrik enerjisinin dağıtım ve taşınması için tasarlanmış prefabrik ve modüler bir sistemdir. Genel yapısı metal bir gövde içerisinde, standartlara uygun olarak, alüminyum yada bakır iletkenlerin izolasyon malzemeleri ve ortamları ile birleşmesinden oluşur .



Şekil 3.23. Busbar kanalı

Busbar sistemi, elektrik taşıyıcı kalay ile kaplanmış alüminyum yada bakır bara iletkenlerinin izole edilerek metal bir gövde içerisine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Busbar sistemi muhafazası galvaniz saçtan profil makinasında şekillendirilerek birbirine kenetlenmiş ve mekanik dayanıklılığı artırılmıştır. Ayrıca kenet yerleri soğuk perçinle sıkıştırılmış böylece mekanik darbeye karşı güçlendirilmiştir. İletkenler bazı çeşitlerinde PVC izolelidir.

Büyük sanayi tesisleri, gökdelenler, tekstil ve konfeksiyon sektörü, otomotiv sektörü, tersaneler, oteller, alışveriş merkezleri, atölyeler, laboratuvarlar, asma tavanlar, yükseltilmiş döşemeler, depolar, garajlar, hipermarketler, iş merkezleri, vinç ve kreynlerde kullanılan aydınlatma ve kuvvet tesisatları ile benzeri iş yerleri ve alanlarda busbar kanal sistemleri ile kuvvet tesisatları döşenebilmektedir.

#### 3.5.2.1. Kullanım yerine göre busbar sistem çeşitleri

İletim busbar sistemleri: Elektrik enerjisinin trafodan ana pano beslemesi veya jeneratör panosu gibi bir noktadan başka bir noktaya mümkün olan en düşük gerilim

düşümü ile verimli taşınabilmesi için tasarlanmış modüler enerji iletim sistemidir.

**Enerji dağıtım busbar sistemleri:** Busbar gövdesi üzerine takılan akım alma çıkış kutuları ile enerji alınmasını sağlayan dağıtım busbar sistemleridir.

**Aydınlatma dağıtım busbar sistemleri:** Tesislerdeki aydınlatma armatürlerinin beslenmesi için tasarlanmış prefabrik aydınlatma dağıtım sistemleridir.

**Trolley busbar sistemleri:** Hareketli enerji ihtiyacı olan sistemler için geliştirilmişlerdir. Taşıma sisteminin hareketli olduğu Tavan ve duvar vinç sistemleri ile aparatların hareketli olduğu tekstil kesim masalarında enerji beslemesi amacı ile kullanılır.

### **3.5.3. Busbar izolasyon direnci testinin yapılması**

Busbar izolasyon direnci ölçümü, busbar sistemindeki izolasyonda problem olup olmadığının tespiti için önemlidir. İşletmelerin çoğu yılda en az 1 sefer bu testi yaptırmaktadır. Yapılan test sayısının, aşırı sıcaklık, nem ve kirli ortam koşullarının olduğu durumlarda fazlaştırılması önerilir. İzolasyon direnci ölçülmesi; üretim sırasındaki kalitenin belirlenmesi, kullanılan malzemelerin standartların gerekliliklerini karşılayıp karşılamadığının tespiti, periyodik kestirimci bakım, hata tespiti, izolasyon malzemesinin zaman içerisindeki durumunun tespiti gibi konularda yararlıdır. İzolasyon direnci ölçümü, sadece busbarlar için uygulanan bir yöntem olmayıp, trafolar, motorlar, şalterler, yüksek gerilim kabloları gibi uygulamaları da kullanılmaktadır. Elektrikli ekipmanın testi sonucunda izolasyonun durumu ve kalitesi tespit edilerek, gerekli bakımlar yapılır; bu sayede ileride oluşabilecek ani duruşlar ve dolayısıyla maliyet kayıpları da önlenmiş olur.



Şekil 3.24. Elektrik İzolasyon direnci ölçüm cihazı

Aşağıda 400 Volt busbar sisteminin kullanıldığı işletmede, yapılan izolasyon direnci testleri sonucunda elde edilen veriler bulunmaktadır.



Şekil 3.25. Örnekte geçen, izolasyon direnci ölçümü yapılan busbar sistemlerinden biri



### 400 VOLT BUSBAR İZOLASYON DİRENCİ TESTLERİ

02-03/01/2009

SIRA NO	BARA BİLGİLERİ					ÖLÇÜLEN İZOLASYON DİRENCİ (MEGAOHM)					
	BARA NO	MARKASI	GERİLİM (VOLT)	AKIMI (AMPER)	UZUNLUK (METRE)	R / TOPRAK	S / TOPRAK	T / TOPRAK	R / S	S / T	T / R
1	B. # 1	EAE	400	630	27	1450	1500	1300	900	1200	1350
2	B. # 2	EAE	400	630	27	77000	78000	82000	45000	56000	62000
3	B. # 3	EAE	400	400	48	950	1215	2165	1150	1270	1000
4	B. # 4	EAE	400	400		56000	70000	64000	71000	70000	71000
5	B. # 5	EAE	400	400		2415	2500	2700	2400	2450	2600
6	B. # 6	EAE	400	630		1400	1250	1200	1100	1400	1350
7	B. # 7	EAE	400	400		2400	2500	2750	2900	3000	3150
8	B. # 8	EAE	400	400	88	400	200	232	550	630	700
9	B. # 9	EAE	400	400	82	470	678	426	1300	1600	1300
10	B. # 10	EAE	400	400	117	7	180	38	100	506	112
11	B. # 11	EAE	400	400	90	390	173	518	1200	1430	860
12	B. # 12	EAE	400	400	150	1350	1760	1270	1560	1700	1600
SONUÇ	Basbarların her fazına ayrı ayrı 1000 VDC 1 dakika süreyle tatbik edilmiş olup, herhangi bir atlama veya delinme olmamıştır. Ölçülen izolasyon dirençleri yukarıda verilmiş olup, normal sınırlar dahilindedir. Busbar # 10; R ve T fazı orta faza ve diğer busbar dirençlerine göre düşük bulunmuştur.										

Şekil 3.26. İzolasyon direnci ölçüm sonuçları

#### 3.5.4. Ölçüm sonuçlarının yorumlanması

Ölçüm yapılmadan önce tüm yükler devre dışı bırakılmalı ve ölçüm yapılacak noktalar gerilim altında olmamalıdır. İzolasyon testleri en az tesisin, cihazın ya da sistemin anma gerilimine eşit bir DC gerilim uygulanarak yapılmalıdır. Ölçümler, (devrenin içerisindeki nominal voltajın türü ve büyüklüğü uyarınca seçilmesi gereken) DC voltajı ve en az 1 mA ölçüm akımı sağlayabilen bir alet, kullanılarak yapılmalıdır. 1mA değerine kadar olan kaçak akıma müsaade edilmekte olup, bu değerden yukarı çıkacak olan kaçak akım değerlerinde izolasyon problemi olduğu saptanacaktır. Bir başka deyişle test için uygulanan 1000V test gerilimi neticesinde ölçülmesi gereken en az izolasyon direnci değeri 1 megaohm olmalıdır. Tüm ölçüm değerleri 1 megaohm değerinden büyük olduğu için tüm busbar sistemleri için şimdilik bir izolasyon sorunu görünmemektedir. Fakat ileride yapılacak testlerde, en düşük izolasyon direnci ölçümü 10 numaralı busbar sistemi üzerinde elde edildiği için, bu busbar sistemi üzerinde daha fazla durulmasında fayda vardır.

İzolasyon direnci; ekipmana su basması gibi durumlar haricinde yavaş yavaş ve periyodik testler yapılırsa, birçok uyarı vererek gerçekleşir. Düzenli kontroller, ani şoklara ve sistemin devre dışı kalmasına karşı planlı bakıma olanak sağlar. Periyodik test yapılmadığı zaman tüm kusurlar ani, planlanmayan ve külfetli sonuçlar doğuracak şekilde karşımıza çıkabilir.

İlerleyen izolasyon bozulmaları, tespit edilemeden daha da ilerlerse, elektriksel şok ve hatta ölümlü kaza olma olasılığı artar, elektrik kaynaklı yangın çıkma ihtimali oluşur. Ayrıca elektriksel ekipmanların kullanım ömürlerinde azalma ve dolayısıyla işletmede umulmayan beklenmedik duruşlar ve bunun sonucu olarak da maliyet kayıpları oluşur. Bu sebeple izolasyon kalitesinin düzenli olarak ölçümü bakım programının bir parçası olup, problemi önceden kestirmede ve dolayısıyla çözmede önemli bir rol oynar [51].

## **BÖLÜM 4. SONUÇLAR**

Günümüzün rekabetçi iş ortamında ve düşük kar marjlarında, üretici bir yandan üretim maliyetlerini düşürürken diğer yandan artan üretim talebiyle karşı karşıyadır. Verimliliği düşüren en önemli etken plansız duruşlardır. İşletmelerde üretimin durması ve makinelerin beklenmedik arızaları her zaman için istenmeyen durumlardır. Bu durumun üretimin kritik olduğu yerlerde meydana gelmesi üretim kayıplarına ve bakım onarım maliyetlerinin artmasına neden olabilir.

Ayrıca bakımcıların en zorlandıkları konuların başında, arıza ile durmuş olan makinenin neden arızaya girdiğini belirlemek gelir. Deneyim ile bazı varsayımlar kullanılarak, neden makinenin arızaya girdiği belirlenebilir ancak zorluk, duran bir makinede bunu yapmaya çalışmaktır. Arızanın teşhisi için geçen süre, o makinenin o süre zarfında üretim yapamadığı anlamına gelmektedir ki, duruş süresinin optimum seviyeye indirilmesi ancak makine sağlığının periyodik ölçümler ile izlenmesiyle mümkündür.

Makineler üzerinden, periyodik aralıklar ile alınan, kimyasal ve fiziksel parametre ölçümlerinin zaman içindeki eğilimlerini izleyerek, makine sağlığı hakkında geleceğe yönelik bir kestirimde bulunma ve arızaları oluşmadan tespit etme yöntemi olan kestirimci bakım sayesinde işletmeler beklenmedik makine arızalarından, dolayısıyla üretim zamanı ve maliyet kayıplarından mümkün olduğunca korunabilmektedirler.

Kestirimci bakım, işletmelerde karın artmasını sağlayan teknolojik bir sistemdir. Bu sebeple işletmelerin kestirimci bakıma bakış açıları çok geniş olmalı, bu bakım sistemi için işletmelerin harcadığı para, zaman ve emeğin sonucunda firmaya getirilerinin çok büyük olacağı unutulmamalıdır.

## **BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER**

Kestirimci bakımın işletmelere; toplam duruş süresi, bakım ve yedek parça maliyetleri, koruyucu bakım maliyetleri gibi konularda azalma sağlamak gibi faydaları olmakla birlikte, kendilerine uygun yöntemleri seçmemeleri durumunda beklenen faydaları beklentiler oranında sağlamaması da olasıdır.

Bir çok durumda işletmelerde, kestirimci bakım yöntemlerinden sadece bir tanesi, fazla araştırılmadan işletmeye alınıp ilgili olarak atanan personel eğitime gönderilerek kullanılmaya başlanmakta ve cihazla kullanıcılarından mucize beklenmektedir. Oysa kestirimci bakım tekniklerinden hangisi yada hangilerinin işletmeye uygun olduğu araştırılmalı ve uygun olan yöntemlerle ilgili olarak personel yeni gelişmelerin ışığında sürekli olarak eğitilmelidir. Bu sayede kestirimci bakımdan beklenen faydalar daha süratli ve eksiksiz olarak elde edilebilir.

Söylenmesi gereken çok önemli başka bir nokta; hiçbir kestirimci bakım metodu ve cihazının, bir fabrikadaki arızaların tümünü önceden belirlemesinin mümkün olmadığıdır. Yapılan yatırım sonucunda alınan kestirimci bakım cihazlarıyla tüm arızaların önceden belirleneceği ve üretimin hiç durmadan devam edeceğinin garanti altına alınması gibi ütöpik bir fikre sahip olunulmamalıdır.

Ayrıca, işletmelerde ileriye dönük bakım politikalarını daha doğru bir şekilde belirlemek için, işletmede yapılan tüm bakımların kaydedilmesi ve arıza bilgilerinin saklı tutulmasında büyük fayda vardır. Kestirimci bakım uygulamasına başlamadan önce, hangi makinenin bakım planına dahil edileceği, hangi analiz yönteminin seçileceği ve işletme şartlarına göre hangi cihazların kullanılacağı da önceden tespit edilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] KOBU, B., Üretim Yönetimi, Avcıol Basım yayın, sf. 712, İstanbul, 2003
- [2] ÇEŞTEPE, E., Eren, A., Dedektif Multimetre Arıza Erken Uyarı Sistemlerinde Uygulanabilecek En Kolay ve En Ekonomik Çözüm, [http://www.artesis.com/files/DM\\_Article\\_TR](http://www.artesis.com/files/DM_Article_TR), 12/2008
- [3] KONAC, B., Makine Performansının Titreşim Analizi Metotları Yardımıyla Belirlenmesi ve Rulmanlarda Titreşim Analizi İle Hasar Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, 1996
- [4] Maintenance Strategies and Work Practices to Reduce Costs, <http://www.plantweb.emersonprocess.com>, 02/2009
- [5] ÇAĞLAYAN, İ.H., Önleyici (Proaktif) Bakım Nedir? Nasıl Yapılır?, Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-10, 1995
- [6] SÖNMEZ, A.D. ve Baykasoğlu, A., Bilgisayar Yardımı İle Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler İçin Bakım Sistemi Planlaması, Mühendis ve Makine Dergisi, 37, sf. 17-22, 1996
- [7] ORHAN, S., ARSLAN, H. ve AKTÜRK, N., Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 18 (2), sf. 39-48, 2003
- [8] ÇAĞLAYAN, İ.H., Türkiye'de Değişik Sanayi Kollarında Uyarıcı Bakım Uygulamaları ve Elde Edilen Sonuçlar, Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-04, 1993
- [9] KÖSE, R.K., Kestirimci Bakım Yönetimini Uygulamak, Otomasyon Dergisi, 112498, sf. 81-84, 12/2001
- [10] HUBA, A. Toplam Verimli Bakım, Erisim: <http://www.ytukvk.org.tr>, 01/2009
- [11] KİRAZLILAR, B. Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri, Birsen Yayınevi, ISBN:978-975-511-463-7, sf. 636, İstanbul, 2007
- [13] FEYZULLAHOĞLU, E., Bilgisayar Destekli Kestirimci Bakım Uygulamaları, Mühendis ve Makine Dergisi, 42 (503), sf. 30-37, 2001

- [14] ORHAN, S., Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analiziyle Kestirimci Bakımı, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı, Kırıkkale, Haziran 2002.
- [15] KALYONCU, M., Titreşim Analizi İle Makine Elemanlarındaki Arızaların Belirlenmesi, Mühendis ve Makina, Cilt 47, Sayı 552, sf. 29,30
- [16] KİRAZLILAR, B. Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri, Birsen Yayınevi, ISBN:978-975-511-463-7, sf. 651, İstanbul 2007
- [17] GÜNGÖR, A. İ., Kestirimci Bakımda Titreşim Analizi, Mühendis ve Makina, Cilt : 48, Sayı: 570, sf. 27
- [18] KİRAZLILAR, B. Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri, Birsen Yayınevi, ISBN:978-975-511-463-7, sf. 669, İstanbul 2007
- [19] Proplan Ltd Şti, Yerinde Dengeleme (Balans), İstanbul, sf. 1-5, 2003
- [20] ORHAN, S., Teknoloji, Yıl 6, Sayı 3-4, sf. 41-48, 2003
- [21] LEE, Y.S., ve LEE, C. W., Modelling and Vibration Analysis of Misaligned Rotor-Ball Bearing Systems, Journal of Sound and Vibration, sf. 17-32, 1999
- [22] US, İ ., Eksen Kaçıklığı Problemleri ve Çözümleri, 2. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, sf. 113-123, Denizli, 11-14 Mayıs 2005
- [23] MOBLEY, R. K., Vibration Fundamentals, Newnes Yayınevi, USA, sf. 372 1999.
- [24] STASZEWSKI, W. J., Gearbox Vibration Diagnostics-An Overview, The 8th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, (COMADEM-96), sf. 16 -18, England, 1996
- [25] Pape, D.B. ve HOUSER, D. R., Signal Processing for the Detection of Gear Manufacturing Discrepancies, Noise-Con 85, The Ohio State University Columbus, Ohio, 3-5, sf. 305-314, USA, 1985
- [26] Why oil analysis should be performed on site,  
[http://www.mcme.nl/downloads/oil\\_analysis.pdf](http://www.mcme.nl/downloads/oil_analysis.pdf), 12/2008
- [27] KÖSE, R., K. Kestirimci Bakım, 2. Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, MMO yayın no E/2005/370, sf. 95-104, Ankara, 2005
- [28] Understanding the S·O·S Oil Analysis Tests,  
<http://www.cat.com/cda/components/securedFile/displaySecuredFileServlet>

[SSP?field=214955Qlanguageld=7](#) , 01/2009

- [29] The First Step Toward Better Oil Analysis - Taking a Proper Sample, <http://www.lubes-n-filters.com/synthetics/oil-analysis/oil-analysis3.html>, 03/2009
- [30] A Much Closer Look at Particle Contamination, [http://www.practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=781](http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=781), 03/2009
- [31] Clean Oil Sampling - How to Sample Oil Without Opening the Bottle, <http://www.noria.com>, 03/2009
- [32] JIROUTEK, S., SHEBLE, N., Dynamic Oil System Holds Quirks, InTech, sf. 53-58, Mayıs 2006
- [33] <http://www.wikipedia.com>, 04/2009
- [34] KİRAZLILAR, B. “Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri“, Birsen Yayınevi ISBN:978-975-511-463-7, sf. 706-711, İstanbul, 2007,
- [35] BROWN, A., Thermographic Predictive Maintenance For Enhanced Productivity, [www.thermoteknix.com/content/english/misc/publications/papers/documents/thermographic\\_predictive\\_maintenance.doc](http://www.thermoteknix.com/content/english/misc/publications/papers/documents/thermographic_predictive_maintenance.doc), 02/2009
- [36] MURPHY, T., J. Understanding Ultrasonic Signal Analysis, <http://www.sdtnorthamericareliabilityweb.com/tutorials.html>
- [37] KİRAZLILAR, B. “Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri“, Birsen Yayınevi ISBN:978-975-511-463-7, sf. 698-706, İstanbul, 2007
- [38] Creating an Effective Air Leak Management Program <http://www.com/apps/leakdetection.html>, 01/2009
- [39] FRIED, B., Ultrasound for Better Lubrication, Practicing Oil Analysis, 11/2004
- [40] Ultrasonic Inspection: Bearings <http://www.sdtnorthamericareliabilityweb.com/tutorials.html>, 12/2008
- [41] Testing steam traps, <http://www.sdtnorthamerica.com/apps/steam.htm>, 03/2009
- [42] AVM Ultra analysis Applications - Electrical Inspections, <http://www.ctrlsys.com/library/applications/electrical-4.php>, 02/2009
- [43] Types of Non-Pressurized Systems & Components,

<http://www.ctrlsys.com/library/applications/non-pressurized-2.php>

- [44] Ultrasonic Testing of Gearboxes,  
<http://www.ctrlsys.com/library/applications/gearboxes-3.php>, 04/2009
- [45] KİRAZLILAR, B. “Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri“, Birsen Yayınevi ISBN:978-975-511-463-7, sf. 637-639, İstanbul, 2007
- [46] ST Otomasyon Dergisi, Alternatif Yayın Grubu, sf.15, 3/2009
- [47] KİRAZLILAR, B. “Endüstriyel Bakım Kestirimci ve Önleyici Bakımın Temelleri“, Birsen Yayınevi ISBN:978-975-511-463-7, sf.108-169, İstanbul, 2007
- [48] [http://www.siemens.com.tr/web/630-2567-1-1/enerjinahtar/sayi\\_6/makaleler/termografi\\_analizleri](http://www.siemens.com.tr/web/630-2567-1-1/enerjinahtar/sayi_6/makaleler/termografi_analizleri), 03/2009
- [49] ARTESİS, Türkiye’ de Geliştirilmiş Kullanımı Kolay Modelleme Bazlı Kestirimci Bakım Ürünü ve Sürekli Durum İzleme Teknolojisi, pdf
- [50] <http://www.izolasyon-megeri.gen.tr/>, 04/2009
- [51] MEGER, A Guide To Diagnostic Insulation Testing Above 1kV, pdf, sf. 4



## ÖZGEÇMİŞ

Gürkan HANCI, 12.10.1983 de Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2001 yılında Ali Dilmen Süper Lisesi'nden mezun olduktan sonra, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2005 yılında tamamlayarak, Makine Mühendisi unvanı aldı. 2006 – 2008 yılları arasında Ural Maksan Mak. San. Tic. Ltd. Şti.' inde sırasıyla üretim ve proje müdürü olarak görev aldıktan sonra, Goodyear Lastikleri T.A.Ş.' de proje ve bakım mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevi sürdürmektedir.