

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNELERDE TİTREŞİM ANALİZİ  
YÖNTEMİYLE UYARICI BAKIM

129025

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Cemil Yiğit

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALATI  
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Recep KAZAN

T.C. YÜKSEK LİSANS  
DOKÜMANI

EYLÜL 2002

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKİNELERDE TİTREŞİM ANALİZİ  
YÖNTEMİYLE UYARICI BAKIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. Cemil YİĞİT**

123025

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALATI

Bu tez 25/09/2000 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Doç. Dr. Recep Kazon

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Ö. Kadir Morgül

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Cemil Öz

## ÖNSÖZ

Küçülen Dünya piyasalarında işletmelerin kendilerini kabul ettirebilmeleri, gelişen teknolojiye ayak uydurmalarıyla olur. Uyarıcı bakım yöntemiyle bakım işlerinin planlaması da çağımızın gereğidir. Bu tezde, uyarıcı bakım yöntemlerinden birisi olan titreşim analizinin üstünlükleri ve uygulama şekli anlatılacaktır.

Tezimin hazırlanışının her safhasında, yapmış olduğu yönlendirmelerle yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım sayın Doç. Dr. Recep KAZAN ( SAÜ ) hocama,bana sürekli destek olan ve bir ferdi olduğum için her zaman gurur duyduğum aileme, titreşim ölçümlerinin alınması safhasında teknik yardımlarda bulunan sayın Yük. Mak. Müh. Recep KILIÇ'a ( İSKİ ), Yakın arkadaşlarım A. Gör. Hüseyin PEHLİVAN ( SAÜ ) ve A. Gör. Aysun EĞRİSÖĞÜT TIRYAKİ ( SAÜ ), Sakarya Üniversitesi'ndeki mesai arkadaşlarıma ve bana olan inançlarından dolayı Sakarya Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

### BÖLÜM 2.

#### MAKİNELERİN BAKIMI VE ÇAĞIMIZDA BAKIMCILIK KAVRAMI

2.1. Giriş.....	2
2.2. Makinelerin Bakımı.....	2
2.3. Bakım Teknikleri.....	3
2.3.1. Arıza olduğunda yapılan bakım.....	5
2.3.2. Periyodik ( Koruyucu ) Bakım.....	5
2.3.3. Proaktif ( Önleyici ) Bakım.....	6
2.3.3.1. Önleyici bakımın hedefleri.....	7
2.3.4. Uyarıcı ( Kestirimci ) Bakım.....	9
2.3.5. Duruma Göre Bakım.....	9

### BÖLÜM 3.

#### UYARICI ( KESTİRİMCİ ) BAKIM

3.1. Giriş.....	12
3.2. Uyarıcı Bakım.....	13

3.2.1. Uyarıcı bakım döngüsü.....	15
3.3. Makinelerin Ölümü.....	16
3.4. İşletme Şartlarında Limitlerin Tanımlanması.....	19
3.4.1. Algılama organlarının kullandığı testler.....	21
3.4.2. İşletme parametrelerinin ölçümüne dayalı testler.....	21
3.5. Uygulanacak Bakım Yönteminin Belirlenmesi.....	23
3.6. Uyarıcı Bakım Yönteminin Uygulanması.....	24
3.7. Uyarıcı Bakım Uygulamasında Kullanılan Ölçüm Parametreleri.....	27
3.8. Bakım Teknikleri ve Karşılaştırılması.....	28

## BÖLÜM 4.

### TİTREŞİM TERMINOLOJİSİ

4.1. Giriş.....	31
4.2. Titreşim Kinematiği.....	31
4.3. Sinüzoidal Titreşimler.....	33
4.4. Basit Harmonik Hareket ( BHH ).....	34
4.5. Dönme Vektörüyle Basit Harmonik Hareket.....	35
4.6. Tek Serbestlik Dereceli Sistem.....	36
4.6.1. Sönümsüz serbest titreşimler.....	39
4.6.2. Sönümlü serbest titreşimler.....	42
4.6.3. Zorlanmış titreşimler.....	42
4.7. Rezonans.....	43
4.8. Mıllerde Kritik Hız.....	45
4.9. Yüzen Cisimlerin Titreşimleri.....	46
4.10. Titreşim Mühendisliğinde Kullanılan Terimler.....	49
4.11. Hızlı Fourier Dönüşümü ( FFT ).....	51
4.11.1. Fourier dönüşümünün formları.....	52
4.11.2. Fourier serileri.....	52
4.11.2.1. Fourier katsayıları.....	54
4.11.3. Direkt fourier dönüşümü.....	54

4.11.4. Kesin fourier dönüşümü.....	56
4.12. Analog Dijital Dönüşümü.....	56
4.13. Kaçak ( Leakage ).....	57
4.13.1. Hanning penceresi.....	58
4.14. Overlap İşlemi.....	62
4.15. Tahta Parmaklık Etkisi ( The Picket Fence Effect ).....	64
4.16. Ortalama ( Averaging ).....	64
4.17. FFT İçerisindeki Tuzaklar.....	65

## BÖLÜM 5.

### UYARICI BAKIM TEKNİĞİNDE TİTREŞİM ANALİZİ YÖNTEMİ

5.1. Giriş.....	67
5.2. Mühendislikte İstatistik.....	67
5.2.1. Makine sağlığının izleneceği parametrelerin belirlenmesi.....	67
5.2.1.1. Titreşimin makine sağlığıyla ilişkisi.....	68
5.3. Titreşim Analizi ve Ölçüm Cihazlarının Çahşma Prensibi.....	68
5.3.1. Spektrum analizörleri.....	71
5.3.1.1. Titreşim ölçüm problemleri ( Akselerometre ).....	73
5.3.2. Frekans düzlemi.....	76
5.4. Titreşim Ölçüm Cihazlarının Seçimi.....	76
5.5. Titreşim Analizi Yöntemiyle Arıza Tanımı.....	78
5.5.1. Dalgaform grafiklerinin karşılaştırılması.....	81
5.5.2. Spektrum grafiklerinin karşılaştırılması.....	82
5.6. Üç Eksende Titreşim Analizi.....	84
5.7. Makine ve Ölçüm Noktalarının Seçimi.....	88
5.8. Ölçüm Periyotlarının Seçimi.....	88

## BÖLÜM 6.

### UYARICI BAKIM TEKNİĞİNDE TİTREŞİM ANALİZİNİN UYGULAMALARI

6.1. Giriş.....	90
-----------------	----

6.2. Arıza frekansı ( Fault Frequency ).....	90
6.3. Elektrik motorlarındaki Arızalar.....	91
6.4. Dişli hasarları.....	96
6.5. Eksenel Kaçıklık ( Kaplin Ayarsızlığı ).....	99
6.5.1. Açısal kaçıklık.....	99
6.5.2. Paralel eksen kaçıklığı.....	100
6.6. Mekanik Gevşeklik.....	101
6.7. Balanssızlık ( Dengesizlik ).....	102
6.8. Rulman Arızaları.....	106
6.8.1. İvme zarfı ( Acceleration enveloping ) tekniği.....	111
6.9. Örnek Uygulamalar.....	116
<b>BÖLÜM 7.</b>	
<b>SONUÇLAR</b> .....	121
<b>BÖLÜM 8.</b>	
<b>TARTIŞMA VE ÖNERİLER</b> .....	122
<b>KAYNAKLAR</b> .....	123
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	126

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	Titreşim Genliği
a	İvme
C	Kondansatör
c	Sönüm Katsayısı
$D_b$	İç Bilezik Çapı
$D_p$	Bölüm Dairesi Çapı
E	Elastikiyet Modülü
$\varepsilon$	Başlangıç Faz Açısı
$E_T$	Toplam Mekanik Enerji
F	Kuvvet
$F_0$	Tatbik Edilen Dış Kuvvetin Şiddeti
$F_t$	Arızalar Arası Ortalama Süre
f	Frekans
$f_n$	Tabii Frekans
$\varphi$	Yay Disk Sisteminde Konum Koordinatı
g	Yerçekimi İvmesi
h	Yükseklik
I	Kesit Alanı Elastikiyet Modülü
j	Kütlesel Atalet Momenti
K	Geri getirici Tesir Kuvveti
k	Yay Katsayısı
m	Kütle
N	Bilye Sayısı
v	Hız
P	t Zamanında Arızalanma İhtimali
R	Direnç



$\rho$	Yoğunluk
$\delta_n$	Ağırlık Etkisi Altında Alınan Yol
T	Periyot
t	Zaman
$\theta$	Faz Açısı
$\phi$	Temas açısı
$w$	Dairesel Frekans
$w_n$	Tabii Dairesel Frekans
$w_d$	Sönümlü Tabii Dairesel Frekans
$\omega$	Açısal Hız
x	Yol
$x_c$	Serbest Hareketin Genliği
$x_p$	Düzensiz Titreşim Hareketinin Genliği
$\zeta$	Sönüm Faktörü

BDB	Bilgisayar Destekli Bakım
BHH	Basit Harmonik Hareket
CPM	Devir / Dakika
CPS	Devir / Saniye
dB	desibell
DÇF	Dişli Çalışma Frekansı
DFT	Devamsız Fourier Dönüşümü
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
Hz	Hertz
mV	Mili Volt
MTBF	Arızalar Arası Ortalama Süre
Order	Dönme Devrinin katları

<b>O – P</b>	<b>Maksimum Tepe</b>
<b>P – P</b>	<b>Maksimum Üst tepeden Alt Tepeye Genlik</b>
<b>RBGF</b>	<b>Rotor Barı Geçme Frekansı</b>
<b>RMS</b>	<b>Efektif Değer</b>
<b>RPM</b>	<b>Denme Devri</b>
<b>UBD</b>	<b>Uyarıcı Bakım Döngüsü</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	İşletme karı ve bakım masraflarının yıllık ciroya oranı (%).....	3
Şekil 2.2	Bakım sistemleri.....	4
Şekil 2.3	Kirliliğin, yağ özellikleri ve makine sağlığı üzerine etkisi.....	8
Şekil 2.4	Koruyucu ve uyarıcı bakım sistemlerinin entegrasyonu.....	10
Şekil 2.5	Uyarıcı bakım ve önleyici bakımın entegrasyonu.....	11
Şekil 3.1	Uyarıcı bakım döngüsü.....	16
Şekil 3.2	Banyo küveti eğrisi.....	16
Şekil 3.3	Küvet eğrisinde bazı arızalanma süreçleri.....	17
Şekil 3.4	Uyarıcı bakım uygulamasının basit bir şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.5	Üç bakım türünün maliyet açısından karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.1	Titreşim hareketi.....	31
Şekil 4.2	Periyodik titreşim.....	32
Şekil 4.3	Basit harmonik hareket.....	34
Şekil 4.4	Harmonik hareketin dönen vektörle gösterilmesi.....	36
Şekil 4.5	Tek serbestlik dereceli sistemler.....	36
Şekil 4.6	Lineer karakteristikli sistem, (b)Non-lineer karakteristikli sistem.....	37
Şekil 4.7	Kütle-yay sistemi.....	39
Şekil 4.8	Elektrik motoru.....	41
Şekil 4.9	Değişken frekans ve sabit genlikli bir dış kuvvet için $\zeta$ (Büyütme çarpanı) değerine karşılık periyodik dış kuvvetin frekansının bir fonksiyonu olarak genlik.....	43
Şekil 4.10	Basit bir yay-damper-kütle sistemi.....	44
Şekil 4.11	İki tip fan gösterimi.....	45
Şekil 4.12	Normal yüzme konumundan ayrıldığında düşey olarak titreşme kabiliyetine sahip bir hidrometre.....	47
Şekil 4.13	Aşırı abartılı çizilmiş gemi strüktürel hareketleri ve dalgalar.....	48
Şekil 4.14	Sinüzoidal olarak salınan bir kütleinin titreşimi.....	49

Şekil 4.15	Algoritma ile bir denklemin çözümü.....	51
Şekil 4.16	Rasgele titreşim fonksiyonu $f(t)$ .....	52
Şekil 4.17	Sonsuz sayıda değişik frekans, genlik ve fazda sinüzoidal titreşimler.....	53
Şekil 4.18	Dalga frekansında yalancı data ( Aliasing ).....	55
Şekil 4.19	Analog dijital dönüşümü.....	57
Şekil 4.20	Zaman sinyalleri işlenirken oluşan kaçak.....	57
Şekil 4.21	Kaçığın meydana getirdiği frekans düzlemindeki pik.....	58
Şekil 4.22	Hanning penceresi.....	58
Şekil 4.23	Hanning penceresiyle oluşan biçim bozukluğu.....	59
Şekil 4.24	Hanning ağırlıklandırması.....	60
Şekil 4.25	Hamming penceresi.....	61
Şekil 4.26	Overlap tipleri.....	62
Şekil 4.27	FFT'yi etkileyen örnekleme oranı, örnek miktarı, zaman ve frekans çözünürlüğü arasındaki ilişki.....	63
Şekil 4.28	Tahta parmaklık etkisi.....	64
Şekil 4.29	Ortalamaların sinyal üzerindeki etkisi.....	65
Şekil 5.1	Spektrum grafiğine bir örnek.....	69
Şekil 5.2	Dalgaform grafiğine bir örnek.....	70
Şekil 5.3	FFT ile sinyal işlenmesi.....	70
Şekil 5.4	Tek kanallı spektrum analizörünün bağlantı uygulaması.....	71
Şekil 5.5	Değişik kanallı analizör bağlantıları.....	72
Şekil 5.6	Barkod.....	73
Şekil 5.7	Akselerometre.....	74
Şekil 5.8	Akselerometre kristali.....	74
Şekil 5.9	Eddy akımı.....	75
Şekil 5.10	Eddy akımı deplasman probu.....	75
Şekil 5.11	Çeşitli frekanslardaki titreşimler.....	76
Şekil 5.12	Trend grafiğine bir örnek.....	80
Şekil 5.13	Birden fazla parametre trendine bir örnek.....	80

Şekil 5.14	Çoklu dalgaform grafiği.....	81
Şekil 5.15	Çoklu spektrum grafiği.....	83
Şekil 5.16	Yatay bir makinede üç eksenin gösterilmesi.....	84
Şekil 5.17	Dikey bir makinede üç eksenin gösterilmesi.....	85
Şekil 5.18	Yatay bir pompada titreşim vektörlerinin gösterilmesi.....	86
Şekil 6.1	Arıza frekansları.....	91
Şekil 6.2	Motor arızalarının genel sebeplerinin yüzdeleri.....	92
Şekil 6.3	Empedans dengesizliği ve sıcaklık artışı.....	92
Şekil 6.4	Asenkron motor.....	93
Şekil 6.5	1X, 2X, 3X şebeke frekanslarında $F_p$ yan bantları.....	94
Şekil 6.6	Rotor çubuk frekansı.....	94
Şekil 6.7	Harmonikler.....	95
Şekil 6.8	RBGF etrafındaki $2F_L$ yan bantlar.....	95
Şekil 6.9	Kırık rotor çubuğu arızası spektrumu.....	96
Şekil 6.10	Rotor çubuğu.....	96
Şekil 6.11	Hasarlı dişli spektrumu.....	97
Şekil 6.12	Hasarlı dişli spektrumunda DÇF etrafındaki yan bantlar.....	97
Şekil 6.13	Hasarlı dişli görüntüsü.....	98
Şekil 6.14	Açısal kaçıklık.....	99
Şekil 6.15	Paralel eksen kaçıklığı.....	100
Şekil 6.17	Mekanik gevşeklik spektrumu.....	101
Şekil 6.18	Titreşim dalgaformu genliği dengesizlik artıkça artar.....	102
Şekil 6.19	Rotor üzerinde statik balanssızlığın gösterimi.....	103
Şekil 6.20	Statik balanssızlık.....	103
Şekil 6.21	Eş kuvvet çiftli balanssızlık.....	104
Şekil 6.22	Farklı kuvvet çiftli balanssızlık.....	104
Şekil 6.23	Ankastre rotor.....	105
Şekil 6.24	Balans bozukluğu spektrumu.....	105
Şekil 6.25	Balans bozukluğu spektrum grafiği.....	106
Şekil 6.26	Temas açısı.....	107

Şekil 6.27 Rulman arızalarının ve harmoniklerinin ortaya çıktığı frekans aralıkları.....	108
Şekil 6.28 Rulman arıza frekansı harmonikleri.....	108
Şekil 6.29 İlerlemiş rulman hasar frekansı.....	109
Şekil 6.30 Dış bilezik arıza frekansı ve harmonikleri.....	109
Şekil 6.31 Hasarlı bir rulmanın spektrum grafiği.....	110
Şekil 6.32 Hasarlı rulman.....	110
Şekil 6.33 Birbirini değişime uğratmış iki titreşim sinyali.....	111
Şekil 6.34 Demodülasyon devresi.....	111
Şekil 6.35 Bilyenin yuvarlanma yolunda çarptığı çukur.....	112
Şekil 6.36 Melek balığı deseni.....	112
Şekil 6.37 Rulman arıza titreşiminin zaman düzlemindeki eğilimi.....	113
Şekil 6.38 Düşük ve yüksek frekans seviyeleri.....	113
Şekil 6.39 İvme zarfı yöntemi süreci.....	114
Şekil 6.40 Yanlış montaj nedeniyle hasara uğramış rulman.....	114
Şekil 6.41 Kirlenme nedeniyle deformasyona uğramış bir rulman.....	115
Şekil 6.42 Hatalı yağlamadan deforme olmuş bir rulman.....	115
Şekil 6.43 Yorulma nedeniyle deforme olmuş bir rulman.....	115
Şekil 6.44 Pompa milinden alınan spektrum grafiği.....	116
Şekil 6.45 Pompa milinden alınan dalgaform grafiği.....	116
Şekil 6.46 Pompa mili üzerindeki rulmandan alınan spektrum grafiği.....	117
Şekil 6.47 Pompa mili üzerindeki rulmandan alınan dalgaform grafiği.....	117
Şekil 6.48 Motor yatağından alınan birinci spektrum grafiği.....	118
Şekil 6.49 Motor yatağından alınan ikinci spektrum grafiği.....	119
Şekil 6.50 Pompanın rulmanından alınan spektrum grafiği.....	119
Şekil 6.51 Pompanın rulmanından alınan dalgaform grafiği.....	120

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1	Döner ekipmanlar için bazı limit değerler.....	19
Tablo 3.2	Değişik ölçüm parametreleri ile tanımlanabilecek arıza tipleri.....	22
Tablo 3.3	Ekipman tipine ve hata moduna göre uygulanacak arama metodu....	24
Tablo 3.4	Ekipman tipine göre kullanılabilir ölçüm parametresi.....	27
Tablo 3.5	Bakım yöntemlerinin karşılaştırılması.....	29
Tablo 4.1	Sönümlü titreşimlerin rezonans parametreleri.....	44
Tablo 5.1	Dönme devrindeki ( 1X ) titreşim seviyeleri.....	87
Tablo 5.2	Titreşim analizi sonuçları.....	87

## ÖZET

**Anahtar kelimeler:** Titreşim analizi, Uyarıcı bakım

Sanayiinin gelişmesiyle insanların hayallerini süsleyen idealler gerçekleşmeye başlamıştır. Ancak buda beraberinde bazı sorunları getirdi. İlk zamanlar, tecrübeli işletme mühendisleri, bir makinenin düzgün çalışıp çalışmadığını ve arızaların meydana çıkıp çıkmadığını, dokunarak ve işiterek anlayabilirlerdi. Günümüzde bu şekilde yapılan kontrollere güvenilemez. Çünkü, işin içine insan faktörü girdiği zaman hata yapma riski her zaman yüksek bir orandadır ve modern makinelerin meydana çıkardıkları titreşimler yüksek frekansta olduklarından, bunların ölçülmesinde ve meydana çıkarılmasında aygıtlara gereksinim vardır. Bilindiği üzere titreşim, aşınmayı arttıran ve kırılmayı hızlandıran, makinenin içinden gelen enerjinin yıkıcı bir ürünüdür. Pek çok makine için, titreşim tipik bir seviyeye sahiptir ve makine normal şartlarda çalıştığı zaman, titreşimin frekans spektrumunun da karakteristik bir şekli vardır. Bu frekans spektrumu makinenin titreşim kaydı olarak bilinir. Arızalar gelişmeye başladığı zaman, dinamik proses içerisindeki makine parçaları üzerinde temsil edilen enerjinin bir kısmı da değişme gösterir. Bu münasebetle, titreşim spektrumunun şekli ve titreşim seviyesi de değişir. Bu bulgudan hareketle yapılabilecek çalışma, makinenin düzgün çalışması esnasında ve bilinçli olarak meydana çıkarılan hatalar esnasındaki titreşim verilerini toplamaktır. Bu veriler bir paket program içerisinde kullanıldığı takdirde, ileride meydana çıkabilecek sorunlarda, arıza oluşmadan anlaşılabilir ve kısa bir sürede giderilebilir. Böylece, makinenin bakım süresi ve masrafları aşağıya düşürülebileceği gibi beklentilere de, daha çabuk bir şekilde cevap verilebilir.

Günümüzde artan piyasa rekabeti, işletmelerin üretim ve hizmet araçlarının tasarım ve onarımında önemli değişimlere yol açmıştır. Ağırlaşan işletme koşullarında, üretimde sıfır hataya ulaşmak ve devre dışı kalan sistemlerin neden olabileceği doğrudan ve dolaylı zararları en aza indirebilmek için bakım işlemine yeni bir boyut kazandırılmaya çalışılmıştır. Artık, bakım, arıza baş gösterdikten sonra sorunu gidermeye yönelik değil de, arızaya neden olabilecek kaynakları incelemek ve sorunlar ortaya çıkmadan erken teşhiste bulunabilmek için kullanılmaya başlanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için, makine üzerinden alınan fiziksel parametre ölçümlerinin zaman içindeki eğilimleri izlenmiştir. Böylelikle, sistem devre dışı kalmadan bakım işlemi yapılabilmektedir. Sistemi, çalışır durumda tutmanın maliyet açısından çok büyük önemi vardır. Örneğin; binlerce abonenin aynı anda üzerinden iletişim sağladığı radyo-link hattının devre dışı kalmasının maliyeti, milyonlarca dolar mertebesinde olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, bakım çabaları, onarım anlayışının çok ötesinde bir konuma gelmiştir.

Bu çalışmada, makine performansının titreşim izleme yöntemiyle nasıl belirleneceği anlatılmaya çalışılmıştır.



# **PREDICTIVE MAINTENANCE BY VIBRATION ANALYSIS METHOD FOR MACHINES**

## **SUMMARY**

**KEYWORDS:** Vibration Analysis, Predictive Maintenance

With the improvement of industry, the ideals in the dreams of people started to become realities. However, this has caused some problems. In the past, experienced engineers used to understand whether a machine is running properly ( or causing any problems ) by touching and hearing. Nowadays, that kind of measurement is not reliable. Because, when there is human factor, the risk of making mistakes is always high and there is the need for devices measure and find vibration, as the vibration caused by machines has high frequencies. It is well known that vibration is the destroyer product of machine energy, which increases wear and speeds breaking. For most machines, vibration has a typical level and when it is being operated under normal conditions the frequency spectrum of the machine has a characteristic shape. This frequency spectrum is known as the vibration record of the machine. When breakdowns begin, the energy on the machine parts inside the dynamic process shows some changes. So, the shape and vibration level of the vibration spectrum change, too. Knowing this, work can be done by collecting vibration data during the normal operation conditions and the failures caused on purpose. In case of evaluating these data in a packaged software, the breakdowns may be identified before they occur and repaired in short periods. So, both the maintenance period and cost of the machine is decreased and it serves better.

Nowadays the increasing market competition caused important changes in design and repairs of production of service tools in factories. To reach zero mistakes in the process and minimize the direct and indirect losses caused by out of use systems in difficult process conditions, maintenance understanding has been developed. Now, maintenance is not used to eliminate the problem after a breakdown appears but to investigate the possible breakdown resources and find out the problems before they occur. The bends in time of the physical parameter measurements were traced to be able to perform this. So, maintenance can be done before the system is out of use. From a cost perspective, it is very important to keep the system running. For example, the cost of an out of use radio-link, which provides communication to thousands of subscribers, may be million of dollars. Therefore, maintenance efforts have become much more important than repair efforts.

In this study, it has been tried to explain how a machine performance can be traced by vibration method.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

21. yy'da artan piyasa rekabeti, Avrupa Ekonomik Topluluğu, Gümrük Birliği gibi konseptlerin karşısında ayakta kalabilmek ve en önemlisi gelişen teknolojinin gerekleri, imalat ve hizmet araçlarının tasarım ve onarımında radikal değişikliklere yol açmıştır.

Bu değişikliklerden biri de bakım kavramında olmuştur. Ağırlaşan işletme koşullarında maksimum verime ulaşmak için bakım masraflarının kısılması ve makinelerin daha fazla sistemde kalmaları gerekmektedir. Çünkü, gelişen teknoloji nedeniyle devre dışı kalan sistemlerin yol açabileceği zararlar artmaktadır. Örneğin; binlerce kişinin iletişim sağladığı radyo-link hattının devre dışı kalmasının maliyeti, milyonlarca dolar mertebesinde olabilmektedir. İşte bunlara bağlı olarak makine performansının izlenmesine dayalı bakım sistemleri gelişmiştir. Artık, bakım arıza baş gösterdikten sonra sorunu gidermeye yönelik değil de, arızaya neden olabilecek kaynakları incelemek ve sorunlar ortaya çıkmadan, parametrelerin uygun olarak seçildiği teknik ekipmanlar kullanılarak toplanan verilerin değerlendirilmesi suretiyle, erken teşhiste bulunabilmek için kullanılmaya başlanmıştır. Değerlendirme işlemi, makine üzerinden alınan fiziksel parametre ölçümlerinin zaman içindeki eğilimleri izlenerek yapılmaktadır. Böylelikle, sistem devre dışı kalmadan bakım işlemi yapılabilmektedir. Anlaşılacağı üzere, günümüzdeki bakım çabaları onarım anlayışının çok ötesinde bir konuma gelmiştir.

Bu çalışmada, uyarıcı bakım uygulamalarından bir tanesi olan titreşim analizi yönteminin, makine performansı üzerindeki olumlu veya olumsuz etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

İkinci bölümde, makinelerin bakımı, bakım türleri ve çağımızda bakımçılık kavramı üzerinde durulacaktır.

## **BÖLÜM 2. MAKİNELERİN BAKIMI VE ÇAĞIMIZDA BAKIMCILIK KAVRAMI**

### **2.1. Giriş**

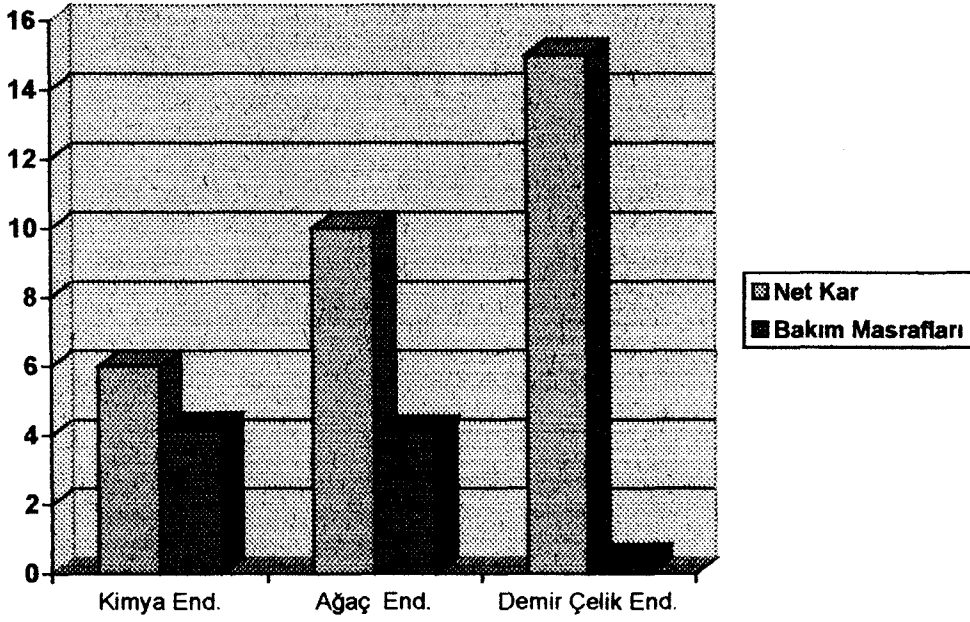
Bir işletmede yanlış kullanım, çevre koşulları ve aşırı yükleme gibi nedenlerle, makinelerde daha önceden hesaplanmamış problemlerin çıkması muhtemeldir. İşte bu noktada bakım kavramı ön plana çıkar. Ancak, buradaki düşünce, 1950'li yılların öncesinde olduğu gibi "Ben çalıştırırım, sen onarırım" biçiminde olmamalıdır. Artık 2000'li yıllardayız ve pek çok kavram gibi bakım kavramının da değişmesi gerekiyordu. Nitekim, bu da oldu. Arızalara neden olan etkenler incelenmeye başlandı. Böylelikle sorunlar meydana çıkmadan önlemler alınmaya çalışıldı.

### **2.2. Makinelerin Bakımı**

Yapılan araştırmalara göre, ülkemizde ve gelişmekte olan çoğu ülkede, mevcut tesis ve makinelerden nominal düzeyde yararlanılabildiği ortaya koyulmuştur.

Makinenin performansını düşüren nedenlerin başında arızalar gelmektedir. Düşük performansta çalışan bir makineden de, hızlı ve kaliteli üretim beklemek hayal olur. Ancak, planlı bir bakım programı uygulamak büyük ölçüde verimi arttıracaktır. Amerika Birleşik devletlerinde bazı sektörlerde yapılan incelemelerden elde edilen sonuçlar şekil 2.1'de gösterilmiştir [1].

Bakımın, uzun vadede ihmalinin önemli problemlere yol açacağını unutmamak gerekir. Uygulanacak bakım programının uzun vadeli ve disiplinli bir program olması işletmenin yararına olacaktır. Endüstrileşmiş ülkeler, bakımın ihmal edilmesinin ileride ekonomik kayıplara neden olduğunu günümüzde fark etmeye başlamıştır. Bu, gelişmekte olan ülkeler için değerli bir ders olarak alınmalıdır.



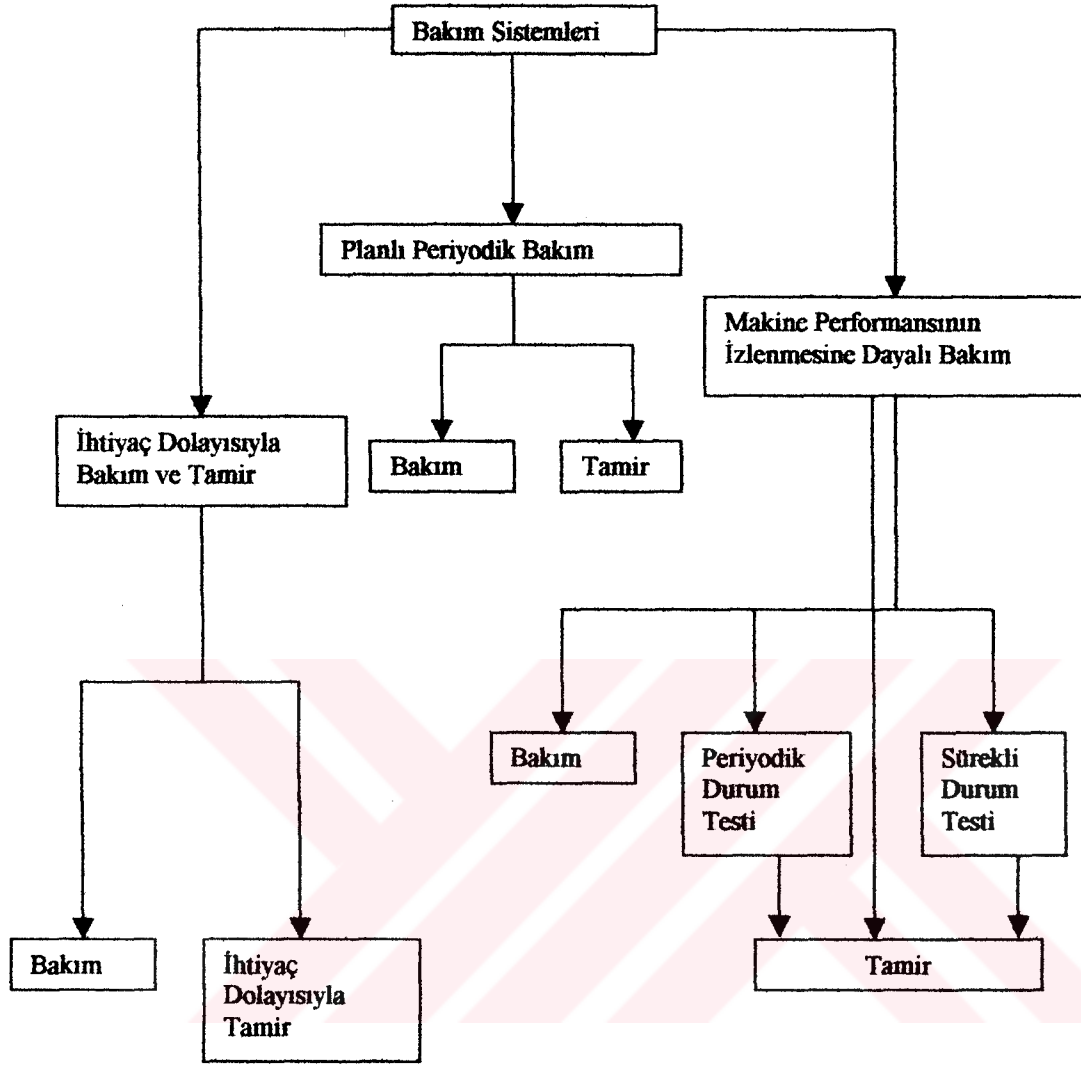
Şekil 2.1 İşletme karı ve bakım masraflarının yıllık ciroya oranı (%)

Bir bakım planlama sisteminin kurulmasının gerekliliği şöyle özetlenebilir[1].

- Yatırımda söz konusu olan makine ve tesislerin uygun ve yeterli bakımlarının yapılmasını projelendirmek,
- Duruşları asgari düzeyde tutarak makinelerden azami yararlanmaya sağlamak,
- Bakım iş gücünü teminat altında tutmak,
- Bakım bölümünde ekonomiyi sağlamak,
- İşçi ve diğer kaynaklardan azami düzeyde yararlanmak,
- Bakım için gerekli teknik bilgileri temin etmek.

### 2.3. 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 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Bakım sistemleri

Bakım tekniğinin hedefi; yüksek güvenilirlik, kısa durma süreleri ve minimum bakım masrafı ile gerekli faaliyetlerin gerçekleştirilmesidir [2].

Bakım işleminin başladığı buhar makineleri devrinden günümüze kadar pek çok bakım tekniği gelişmiştir. Bunların belli başlıcalarını şöyle sıralayabiliriz.

- Arıza olduğunda yapılan bakım
- Periyodik ( Koruyucu ) bakım
- Proaktif ( Önleyici ) bakım
- Uyarıcı bakım

### 2.3.1. Arıza olduğunda yapılan 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 ulaşmamış işletmelerde kullanılan bir yöntemdir.

Sistemin tek avantajı, makinenin ya da parçanın tamamıyla aşınmasından yani faydalı ömrün bitişinden sonra servisten çıkarılmasıdır. Makinenin arızalanması durumunda yedeğini bulundurmamak hem işletmeye maddi bir yük getirecek, hem de depolama sorunu oluşturacaktır. Hasarın ne zaman, hangi ekipmanda meydana geleceği bilinmediğinden, arıza anında gerekli yedek ekipman stokunun fazla olması beklenemez. Böylelikle, tamir için gereken duruşlar genellikle uzun olur. Bu nedenle, sağlıklı bir üretim organizasyonu veya iş planlaması mümkün olmayacaktır. En vahim olanı da, makine arızalarına durum felaket düzeyini alıncaya kadar bakmayan bu sistemde, çok ufak bir rulman arızası yüzünden çok büyük ve pahalı bir motorun kaybedildiği bile görülmektedir [3].

Bu nedenlerden ötürü, büyük makinelerle çalışan büyük işletmeler bu yöntemi terk etmiştir.

### 2.3.2. Periyodik ( Koruyucu ) 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 tek başına cevap veremeyecek bir bakım tekniği olduğu görülebilir.

Merkezi yönetime sahip her endüstriyel kuruluşta, bakım faaliyetleri, bir bakım sistemi esas alınarak yapılır [1]. Planlı periyodik bakım yöntemi, imalatçının verdiği

bakım periyotları içinde, makineler arıza yapsın yapmasın durdurulup tamir ve bakımını önerir. Aynı şekilde, verilen ömür dolduğunda makine parçaları arızalı olsun olmasın değiştirilir. En uygun bakım aralığının tespiti oldukça güç olmasına rağmen, uygulama açısından en kolay yöntemdir. Uygulama ve organizasyon bakımından çok fazla masrafa neden olmamaları en önemli tercih sebepleridir.

Planlı periyodik bakım sisteminin ana amacı, üretim hattında kullanılan makinelerin sürekli olarak aynı güvenilirlikte kalmalarını sağlamaktır. Düzenli ve sürekli bakım organizasyonu sağlanması, beklenmeyen arızaların ortaya çıkma sıklığını azaltması, makine ve ekipmanların faydalı kullanım ömürlerini arttırması sistemin olumlu yönleridir. Bu yöntem, her ne kadar bozulunca bakımdan daha ileri bir yöntem ise de, en büyük zaafi, makineleri bazen, belki de çoğu kez arıza olmaksızın durdurmayı öngörmesidir. İşletmelerde, en büyük maddi zararlardan birinin duruşlardan ötürü kaybolan üretimden geldiği düşünülürse, bu yöntemin maliyet açısından bazen gereksiz zararlara yol açabileceği görülebilir.

Ayrıca, pek çok makine elemanı için tayin edilen ömür, laboratuvar şartlarında yapılmış ortalama hesaplara dayanır. Ancak, gerçek işletme şartlarında bazı parçalar, bu verilen ömürden çok önce kullanılamaz hale gelebileceği gibi, bir çoğu da bu ömrü aşarak çok daha uzun süre kullanılabilir. Bu nedenle, beklenmeyen arızalardan kaynaklanabilecek üretim kayıpları tam olarak engellenemez.

### **2.3.3. Proaktif ( Önleyici ) 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 tanınması ve giderilmesi işlemine önleyici ( Proaktif ) bakım denir [4].

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, arızaların ortaya çıktığı an belirlenmeli ve makine ciddi bir şekilde arızalanmadan gereğinin yapılması sağlanmalıdır. Bu yöntem de, uyarıcı bakım olarak bilinmektedir.

Stratejik olarak, her iki bakım türü de birden uygulanmalıdır. Bu iki yöntemin birlikte uygulanması işletmede makine arızalarını, dolayısıyla beklenmeyen duruşları ciddi olarak azaltacak, o oranda da üretim ve verimliliği arttıracaktır. Zaten, uyarıcı bakım işletmede yerini aldığı ve sistem olarak oturduğunda otomatik olarak önleyici bakım gündeme gelmekte ve uygulamaya geçilmektedir [4].

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

### **2.3.3.1. Önleyici bakımın hedefleri**

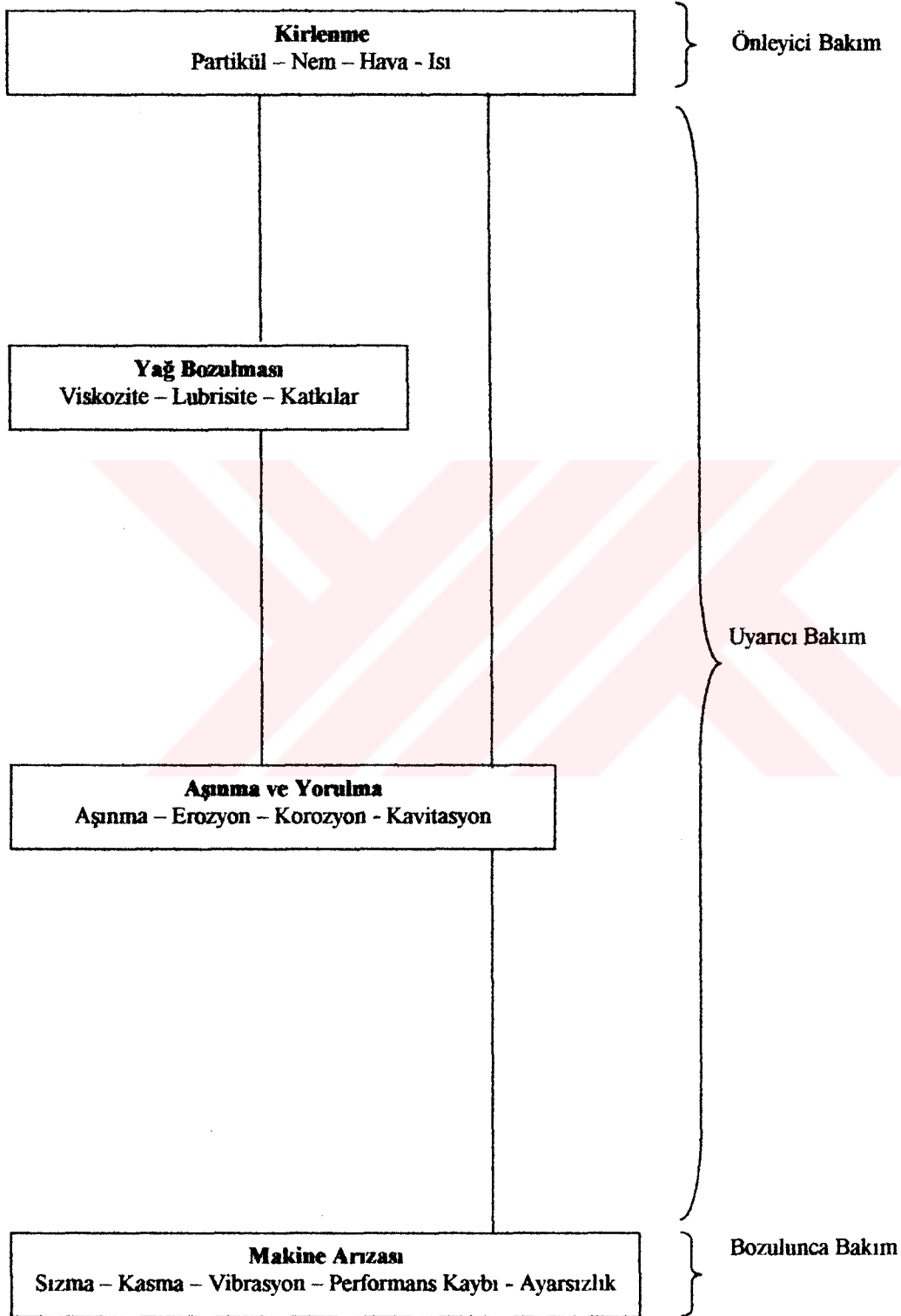
Önleyici bakımın ilk hedefi, makinenin çalışma ömrünü uzatmaktır. Koruyucu bakımın da hedefi makinenin ömrünü uzatmak olmasına rağmen iki bakım yöntemi arasında büyük bir fark görülmektedir. Koruyucu bakım uygulamasında işlemlerin tahmini periyotlarla yapılmasına karşın önleyici bakım da, makine arızalarına neden olan faktörler ortadan kaldırılarak makine sağlam bir duruma getirilmeye çalışılır. Örneğin; rutubet metal yüzeylerde korozyona neden olacağından, sistemde nem miktarı sürekli olarak kontrol edilip bu limitler aşıldığında gerekli önlemler alınırsa, arızaya neden olabilecek bu durum ortadan kalkar.

Görüleceği üzere, önleyici bakım bir bakım iş emri çıkarmamaktadır. Sadece, arızaya neden olabilecek bir durumun ortadan kaldırılmasını istemektedir. Bu da, bakım ve tamiratla karşılaştırıldığında maliyeti çok daha ucuz bir yöntemdir.

İlginç bir nokta da, uyarıcı bakım yöntemleri olarak düşünülen kaplin ayarı ve balans alma, aslında önleyici bakım yöntemleridir. Ayrıca, önleyici bakım yöntemleri arasında, yağ kirliliği izlenmesi de önemli bir yer tutar. Bilimsel araştırmalar, yağlama yağı ve hidrolik yağında bulunan kirlilik partiküllerini, makine arızalarının en önemli nedenlerinden biri olarak tanımlamıştır. Şekil 2.3'de görüleceği üzere,



kirlilik, yağ özelliklerini değiştirebildiği gibi direkt olarak yüzeylerle temasa geçerek aşınmaya da neden olmaktadır.



Şekil 2.3 Kirliliğin, yağ özellikleri ve makine sağlığı üzerine etkisi

#### 2.3.4. Uyarıcı ( Kestirimci ) Bakım

Uyarıcı ( Kestirimci ) bakım, bilgisayar ve çağdaş elektronik teknolojisinin titreşim mühendisliği ile birleşmesinden doğan bir yöntemdir [5]. Bu bakım sisteminin esası, sistem tarafından üretilen birtakım parametrelerin belli periyotlarla ölçülmesi ve referans değerlerle karşılaştırılıp olabilecek arızaları önceden haber vererek uyarmandır. Bu parametrelerin içerisinde arıza tanımlamada en fazla bilgiyi veren titreşimdir. Bu nedenle uyarıcı bakım uygulamasının temelini titreşim analizi teşkil eder. Uyarıcı bakım konusuna bölüm 3'de değinilecektir.

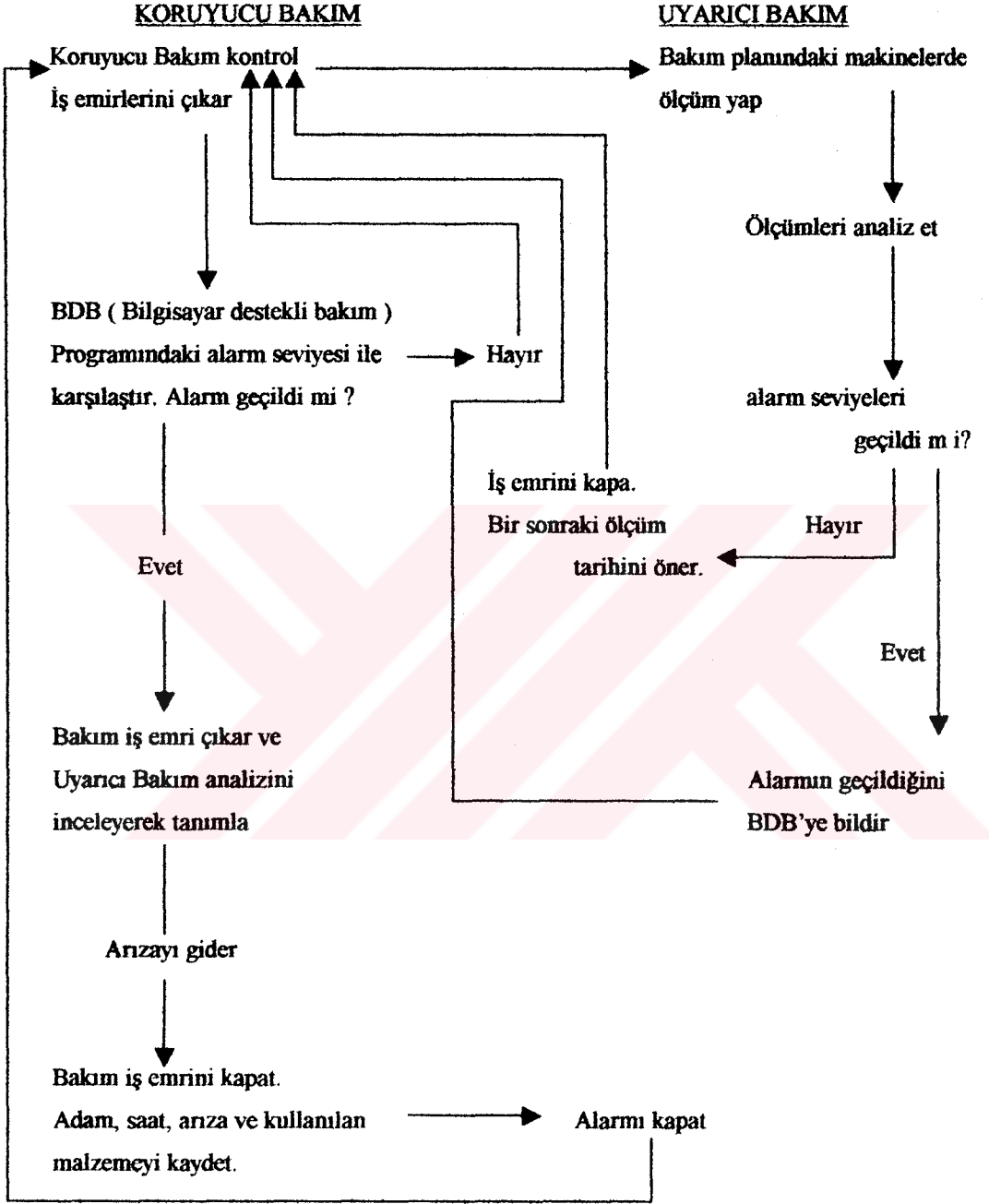
#### 2.3.5. Duruma Göre Bakım

Aslında tercih edilen, anlatılan bu bakım yöntemlerinin işletmelerde bir arada kullanılmasıdır. Ancak bu uygulamada ağırlık uyarıcı ve koruyucu bakıma verilmelidir. Düşünülecek olursa, ne kadar çağdaş bakım yöntemleri uygulanırsa uygulansın, her işletmede beklenmedik arızalar meydana gelir. Ancak, amaç sürpriz arızaları minimuma indirmekse, uyarıcı ve koruyucu bakımın amacı da bu sürpriz arızaları minimuma indirmektir. Bu nedenle yapılacak bakım programının temelini bu iki bakım uygulaması oluşturmalıdır.

Planlı bakım programı çerçevesinde, arıza tespiti uyarıcı bakım yöntemleriyle yapıldıktan sonra bu arızaların giderilmesi koruyucu bakım yaklaşımıyla gerçekleştirilir ve programa önleyici bakım yöntemi de eklenerek arızalara neden olan faktörler ortadan kaldırılır. Bu müşterek çalışmada temel, uyarıcı bakım yöntemleri ile elde edilen verilerin diğer bakım yöntemlerine girilmesi, dolayısıyla bu sistemlerin entegrasyonudur. Bu nedenle, sistem ayarı yapılırken birbirine uyumlu sistem seçilmesinin çok büyük önemi vardır.

Bu entegrasyon ( Birleşme ) da amaç, yapılan ölçümlerin planlı bakım uygulamasına girilerek iş emirleri çıkartılmasıdır. Bu da en verimli şekilde bilgisayar destekli koruyucu bakım sisteminin bilgisayar destekli uyarıcı bakım sistemi ile birlikte çalışmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntem, bütün bakım sistemleri içerisinde en

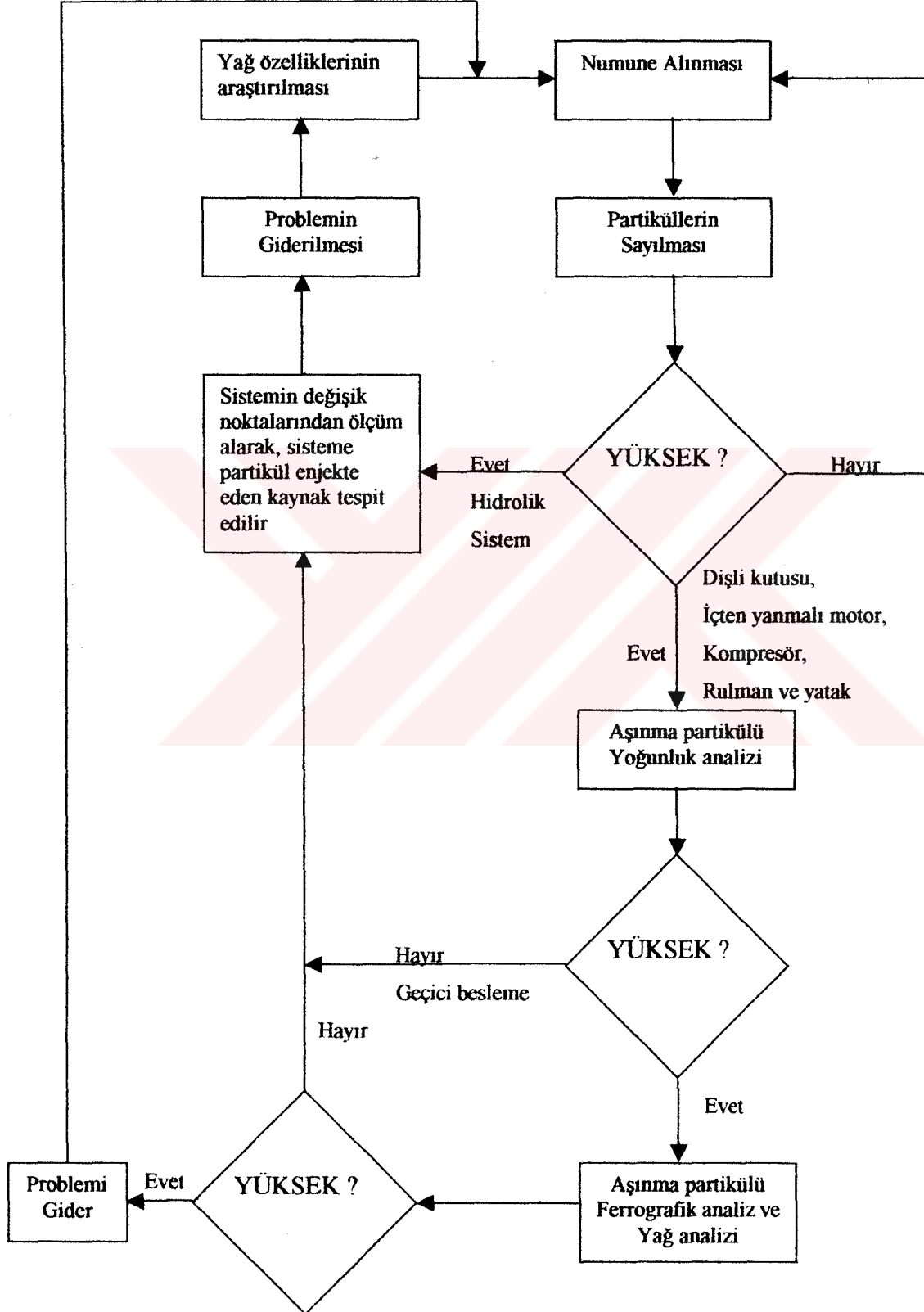
gelişmiş ve en çağdaş olan yöntemlerden biridir. Şekil 2.4'de koruyucu bakım ve uyarıcı bakım sistemlerinin entegrasyonu gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Koruyucu ve uyarıcı bakım sistemlerinin entegrasyonu

Kirlilik izlenmesi de, arıza tanımlamada kullanılan bir parametredir. Makine arızaları genellikle içerdiği yağa aşınma partikülleri salarlar. Arızaların önüne geçilmesi, bu

partiküllerin izlenmesi ile mümkün olabilir. Partikül sayımı, uyarıcı bakım ve önleyici bakım uygulamalarına şekil 2.5'deki gibi entegre edilebilir.



Şekil 2.5 Uyarıcı bakım ve önleyici bakımın entegrasyonu

## **BÖLÜM 3. UYARICI ( KESTİRİMCİ ) BAKIM**

### **3.1. Giriş**

Uyarıcı bakım ( Bazı çevrelerce kestirimci bakım olarak da kullanılmaktadır ) 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 yıla kalmıştır. Özellikle bu yıllarda gelişen bilgisayar ve mikroişlemci sistemlerinin sayesinde büyük bir atılım gerçekleştirmiştir.

Günümüzde hem cihazın ebadı küçülmüş, hem fiyatı 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 dünyada sadece Türkiye ve Güney Afrika'da uyarıcı bakım teknolojisi ülkeye çimento sektörüyle girmiştir [6] ). 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.

Makinelerin ilk dönmeye başladığı günden beri bilinen bir arıza göstergesi olan titreşim, artık sadece makineye dayatılan bir çubukla hissedilmemekte, bu duyma ve değerlendirme işlemi bilgisayar tarafından yapılmaktadır. Bu gelişme bakımı bir yöntem olmaktan çıkarmış, bir bilim haline dönüştürmüştür. Çünkü, uyarıcı bakımın ve bilimin temelinde ölçme vardır [7].

### 3.2. Uyarıcı Bakım

Uyarıcı 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 şeklindeki çabalar bütünü olarak tanımlanabilir [8]

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. Uyarıcı bakım mantığı ise, her arızanın en az bir habercisi olduğu varsayımına dayanmaktadır. Dolayısıyla, tüm ekipmanı muayene etmek yerine önceki cümlede 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 ( Uyarıcı ) yaklaşım titreşim, sıcaklık, basınç, gerilim veya direnç gibi fiziksel parametrelerin ölçülebildiği tüm ekipmanların sorunlarının önlenmesinde kullanılabilir. Ancak, ekipmanların bu değerlerinin ölçülmesi tek başına yeterli olmaz. Ölçümlerin yorumlanabilmesi için mihenk taşlarının, yani kriterlerin

bulunması gerekir. Kriterler, uyarıcı bakım terminolojisi içerisinde mühendislik limitleri olarak bilinirler. Tüm fiziksel parametrelere ilişkin genel mühendislik limitlerinin bulunmasına karşın her ekipmanın özgün ( Kendine özgü ) koşulları nedeniyle bunların 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.

Makineyi oluşturan her parçanın faydalı ömrü sayısız faktörlerden ( Parçanın üretim kalitesi, görmüş olduğu tamir işlemi, değişken tesis-ortam koşulları, hatalı montaj-demontaj vs. ) etkilenir. Bu nedenle, yapısal özellikleri tam olarak bilinmeyen malzemelerden imal edilen parçaların faydalı ömürlerini tahmin etmekte çok güçtür. Uyarıcı bakım yönteminde makine elemanlarının maksimum ömürlerine kadar kullanılması mümkün olur [5].

Uyarıcı bakım yönteminde, diğer bakım yöntemlerinin tersine, belli aralıklarla makinede ölçmeler yapılarak makine performansı kontrol edilir. Önce, periyodik olarak yapılacak ölçümler için program hazırlanır, daha sonra, bu programa göre makinelerin titreşim izleri ölçülür. Bu ölçümlerin incelenmesi ve analizinden sonra, hata teşhisi yapılır. Bu teşhise dayanarak, belli bir süre sonra değişmesi gereken parçaların siparişi verilir. Bakım günü programlanır ve vakti geldiğinde makine durdurularak bakım yapılır. Böylece, makine bakım için periyodik değil, gerektiğinde devreden çıkarılmış olur. Buda, bakım maliyetinin düşmesi, kararlılığın da o ölçüde artması demektir. Özellikle, üretimin bakım için bile olsa, durmasının gerek ekonomik gerekse sistem yönünden sakıncalı olduğu tesislerde, bu yöntemin uygulanması zorunlu bir hal almıştır. Bunlara elektrik santralleri, çimento, cam, kağıt ve petrokimya sanayii gibi tesisler örnek olarak gösterilebilir [2].

Sistematik olarak izleme, verilerin depolanması ( Dokümantasyon ) ve değerlendirilmesi, hasar kaynağının nedeni, ilerleme hızı ve gerekli tamir işlerinin ne zaman uygulanacağı hakkında daha doğru bir tahmin yapmaya olanak sağlar. Buda, parçalardaki hasar oluşma hızının belirlenmesine bağlı olarak gerekli yedek

parçaların zamanında teminine ve işletmenin en uygun stok miktarı ile çalışmasına olanak sağlar.

Uyarıcı bakımı diğer yöntemlerden ayıran bir diğer özellik de, bunun bir duruma cevap verme yönteminden öte, sonu olan ve rasyonel bir ölçüm tabanına dayanılarak makine sağlığının izlendiği bir süreç olmasıdır.

Servis sürecindeki ekipmanların performansının sistematik olarak izlenmesi ve analiz edilmesi prensibine dayanan bu bakım sistemi ekonomik olmakla birlikte, sistemin ekonomikliği kullanılan teşhis metotlarına ve yapılan teşhisin doğruluk derecesine bağlıdır [1].

Bu bakım yönetiminin uygulanabilmesi için gerekli yatırımlar;

- Makinelerin tanımlanması, ölçme konumlarının ve limitlerinin belirlenmesi için araştırmalar,
- Gerekli aletlerin seçilmesi ve alınması,
- Konu ile ilgili personelin eğitimidir.

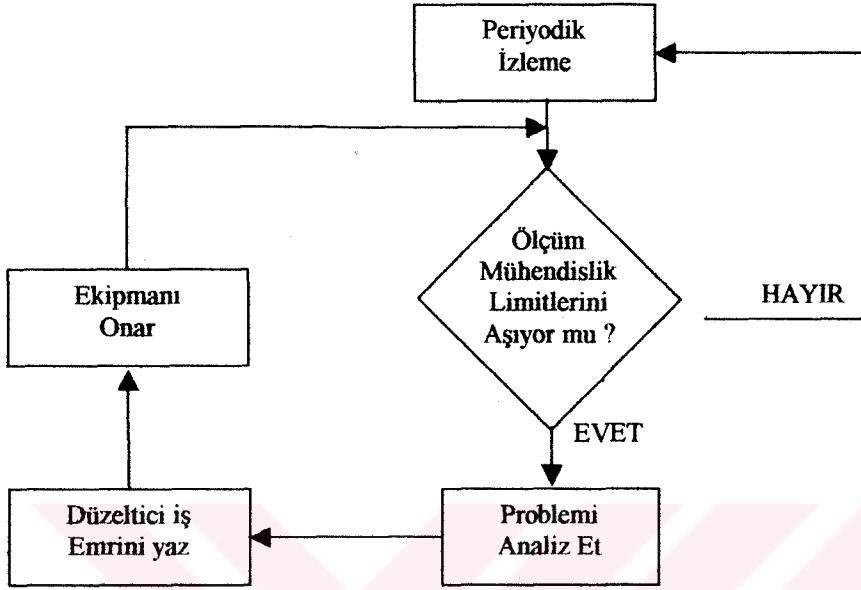
### 3.2.1 Uyarıcı bakım döngüsü

Bir tesise kritik kategorisine giren yeni bir ekipman geldiğinde şekil 3.1’de grafik olarak gösterilen uyarıcı bakım döngüsü ( UBD ) kapsamına alınır. Saptanan parametreler periyodik ( Aylık, haftalık, günlük ) veya kritik noktalarda 24 saat boyunca ölçülür. Ölçülen değer önceden saptanmış olan mühendislik limitlerini aşıyorsa, analiz edilmesi gerekir. Analiz işlemi problemin kaynağını anlamak amacıyla yapılır ve çok çeşitli şekillerde olabilir. Örneğin; bir dönen ekipmandan gelen titreşim sinyalleri eşik değeri aştığında yanlış ayarlama yapılmış olup olmadığına, balansın bozulup bozulmadığına bakılabilir veya rezonansın araştırılmasına karar verilebilir.

Problemin kaynağı saptandığında sıra en uygun düzeltme faaliyetinin seçilmesine gelir. Eğer, mühendislik limitleri yeteri kadar düşük seçilmişse, problem fazla zarar



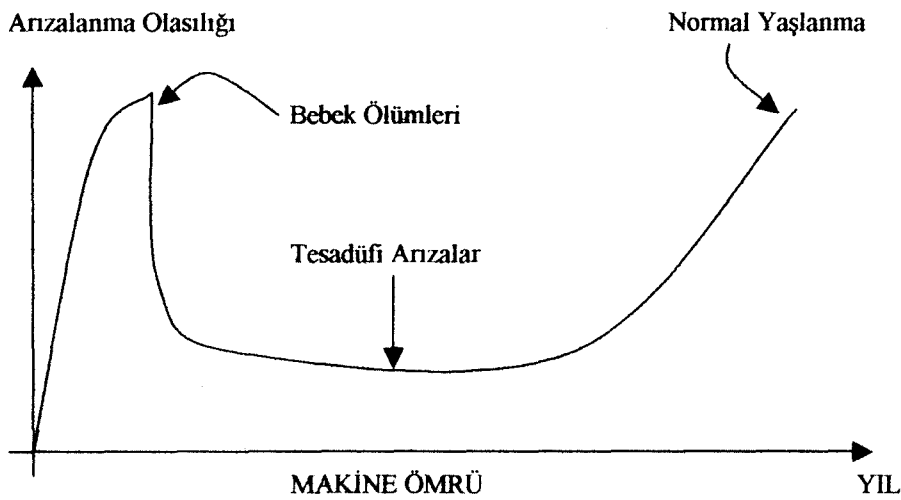
yaratmadan önlenebilecek zaman rahatlıkla bulunur. Ancak, işletmede problemin kök nedeninin belirlenmesi ve çözümü için hangi çalışmanın yapılacağı firma çalışanlarının sorumluluğundadır.



Şekil 3.1 Uyarıcı bakım döngüsü

### 3.3. Makinelerin Ölümü

Makinelerin ölümleri belirli bir desene uyar. Bu desen pratikte, şekil 3.2'de gösterildiği gibi banyo küveti eğrisi şeklindedir [8].



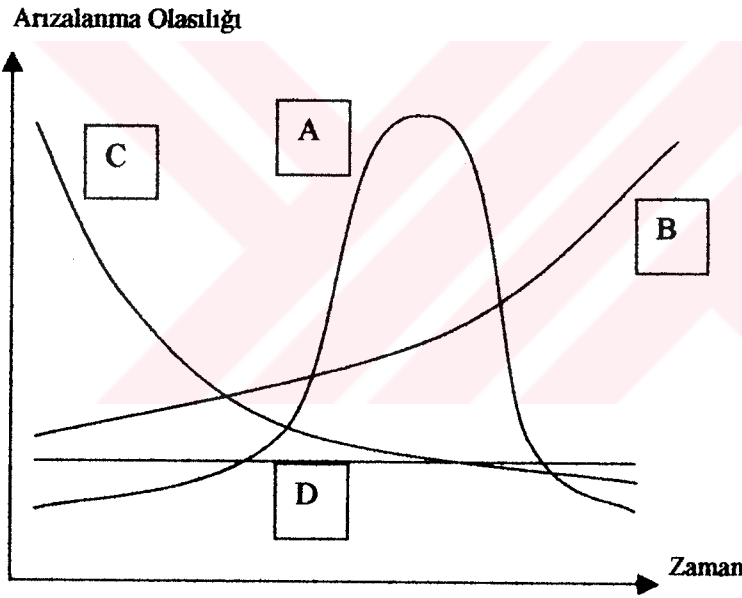
Şekil 3.2 Banyo küveti eğrisi

Eğriden görüldüğü gibi ekipmanların yeni kullanıma alındığı zamanlarda bebek ölümleri olarak adlandırılan yüksek oranda, büyük ve ciddi arızalara rastlanır. Pek çok ekipman bu dönemi atlatır, ancak onlar içinde kaçınılmaz son günün birinde gelir. Bu eğri Poisson dağılımına göre hesaplanmıştır;  $P = 1 - e^{-Ft/t}$

$P$  = Bir makinenin veya makine elemanının  $t$  zamanında arızalanma ihtimali

$F_t$  = Arızalar arası ortalama süre ( MTBF )

eğer, bu genel makine arızalanma yapısı daha detaylı olarak incelenirse, birkaç değişik arızalanma süreci ortaya çıkar.



Şekil 3.3 Kıtvet eğrisinde bazı arızalanma süreçleri

A arızalanma tipi olan makineler veya makine elemanları, belli ömür süresi için dizayn edilmişlerdir; örneğin triger kayışı. Triger kayışları ortalama 90 000 km için dizayn edilirler.

B arızalanma tipi olan makineler veya makine elemanları, genellikle imalat kriterleri artık belli bir düzeyde olduğu için ölü doğum sergilemeyip, zaman içinde aşınma ile arızalanan makine veya makine elemanlarıdır. Örneğin; rulman gibi.

C arızalanma tipi olan makineler veya makine elemanları ise, yüksek ölü doğum oranına, imalat veya montaj nedeniyle sahip olabilirler. Ancak, ilk dönemi atlattuktan sonra sorunsuz çalışırlar. Örneğin; elektronik parçalar.

D arızalanma tipi olan makine veya makine elemanları, genellikle sorunsuz elemanlardır, ancak kullanım veya bakım sırasında kazara arızalanırlar.

Arıza analizinde makine mühendisliği, titreşim mühendisliği, yağ mühendisliği, elektrik mühendisliği, inşaat mühendisliği ve metalürji mühendisliği gibi mühendislik branşlarının bilgilerini harmanlamak gerekebilir. Bu nedenle, arıza analizi, kolektif bir çalışma gerektirir [9].

Bir makinenin ölümü bir canlının ölümü gibi değildir. Ölen makineler her zaman hurdalığa atılmazlar. Bazı parçalarının değiştirilmesi suretiyle kullanılmaya devam edilebilirler. Orijinal parçalarının büyük bir oranını kaybetmiş, diğer bir deyişle yenileri ile değiştirilmiş bir makine gerçekte başka bir makine olduğundan teorik olarak ilk makine ölmüş kabul edilebilir.

Banyo küveti eğrisinin son kısmında görülen arızalar tanımlanabilir fiziksel olaylar (Fenomenler) nedeniyle oluşur. Makinenin karmaşıklığına bağlı olarak her bir parçanın çok çeşitli yaşlanma prosesine uğrayacağı çalışma türleri bulunur. Bu prosesler malzemenin özelliklerine ve makinenin nasıl kullanıldığına bağlıdır. Malzemenin fiziksel özellikleri teoriden veya deneylerden bulunabilmektedir. Ancak, arızaların nasıl öngörüldüğünün anlaşılabilmesi için makine ölümlerinin parametrelerinin bulunmalarının da anlaşılması gerekir. Arıza kestirmede kullanılacak pek çok parametre deneysel araştırmalardan ve fiili arızalar üzerinde yapılan istatistiksel etütlerden bulunabilir. Örneğin; 1930'larda yapılan deneyler, yataklar üzerine etkiyen kuvvetlerin değerinin, makinenin çalışması sırasındaki toplam hareket mesafesinin ölçümü ve bu hareketin hızı ile birlikte ele alınarak bulunabileceğini ortaya çıkarmıştır. Bu hareket, titreşimdir. Dolayısıyla, yataklara binen kuvvet, yatakların üzerinde veya yakınındaki titreşim ölçülerek belirlenebilmektedir [8].

### 3.4. İşletme Şartlarında Limitlerin Tanımlaması

Fiziksel parametrelerin kendi başlarına ölçümü, onun makine yada süreç içerisindeki yıkıcı etkilerini anlamaya yetmez. Bu etkileri kavrayabilmek için parametrenin zararlı olacağı limit değerinin veya değişme hızının da bilinmesi gerekir. Limit saptamak için kullanılacak bir metot, daha önceki arıza bulgularını inceleyerek istatistiksel olarak güvenli bir değeri ortaya çıkarmaktır. Bu değer herkesin anlayabileceği objektiflikte ve rutin izleme sırasında kolayca görülebileceği bir durumda olmalıdır. Aynı zamanda, bulunan bu limit değerinin test edilmesi ve bu sırada diğer faktörlerin izlenmesinde fayda vardır. Mümkün olduğunca, üzerinde test çalışması yapılan ekipman durdurularak ilgili arıza modu incelenmelidir. İdeal limit değeri, onarılamaz yada maliyeti yüksek kusurların meydana çıktığı noktanın tam altındaki ölçülebilir değerdir. Uyarıcı mantık gereği arızanın oluşması zaten önlenmeye çalışılmaktadır. Ancak, yapılacak düzeltici çalışmaların da düşük maliyette olası gerekmektedir. Bunun için, ideal limit değerleri bu kriter göz önünde tutularak seçilmelidir.

Esasında çoğu imalatçı, ekipmanlarını mühendislik limitlerini saptamış olarak satar. Bazı profesyonel kurumlar ve endüstri grupları da, genel limit değerlerini, önerme niteliğinde kamuoyuna açıklayıcı yayınlar yaparlar. Örneğin; Vibration Institute'un döner makineler için yapmış olduğu bu türden bir çalışma tablo 3.1'de gösterilmektedir. Tablodaki değerler sadeleştirilmiş olup 600-3600 rpm arası değerlerde çalışan makineler içindir. ( ips; inç / saniye )

**Tablo 3.1** Döner ekipmanlar için bazı limit değerler

DEĞER	TİTREŞİM DÜZEYİ	GEREKLİ EYLEM
İYİ	15 ips'ten az	İzlemeye devam
ORTA	15 ips.....30 ips	İzlemeye devam
KÖTÜ	30 ips'ten fazla	Analiz ve Düzeltme

Pek çok döner ekipman için 0,3 ips'in altındaki titreşim seviyesi kabul edilebilir bir düzeydir. Ancak, bazı proses ve operasyonlar için yeterli değildir. Buradaki yetersizlik, bakım açısından değil, imal edilen ürün kalitesi açısındandır. Örneğin;

pek çok plastik enjeksiyon döküm işleminde 0,2 ips titreşim düzeyi hidrolik pompalarda arızaya neden olmaz ama ürün kalitesinin düşmesine yol açar. Normal yapılmış hidrolik pompa kanatları bu titreşim düzeyinde aşınmaya başlar. Aşınma ilerledikçe kanatlar ile yuva arasındaki açıklık artar. Bu durum titreşimin artmasına neden olur. Ancak daha önemlisi çıkış basıncında dalgalanmalara yol açar. Dalgalanan hidrolik basınç, bazı plastik kalıplarının yetersiz kapanmasına neden olur. Sonuç, spesifikasyonları tutmayan ( Belirtilen şartlara uymayan) ürünlerdir. Bunların bir kısmı fireye giderken kalanı da aşırı rötuş gerektirir. Titreşim hızı 0,2 ips'e eriştiğinde pompanın yeniden yapılması firenin azalmasına ve tekrarlı bir ürün serisinin imalatına olanak verir [8].

Başka bir örnek de, hassas uçak ve otomobil parçalarının imalatında kullanılan CNC tezgahlardır. Bu makinelere normal titreşim limitleri uygulanamaz. Geçmişte yapılan kontrol işlemlerinde, pürüzlülük ve dalgalık gibi fiziksel parametrelerin ölçümünde lazer ışık geyçleri kullanılmaktaydı. Daha sonra, alınan bu ölçümler imalat ve müşteri kılavuzlarıyla karşılaştırılarak, parça veya parça grubu standartların altına düşünce tezgahın milinin yeniden yapılandırılması istenirdi. Bu çalışma şeklinde sorun ortaya çıkmadan değil çıktıktan sonra müdahale yapılmaktaydı ve hem maliyet hem de zaman yönünden büyük kayıplar verilmekteydi. Ancak, daha sonraları, işlenen parçanın yüzey kalitesi ve makine milinin titreşimi arasında bir bağlantı olduğu fark edildi. Bugün, CNC tezgahlarda fireleri ve yeniden işlemleri azaltmak amacıyla titreşim ölçen sensörler imalat aşamasında kullanılmakta ve doğru limitler aşıldığında operatörler uyarılmaktadır.

Makineyi oluşturan parça veya parçalarda meydana gelebilecek aşınmalar, makine performansını olumsuz yönde etkileyebileceği gibi makinenin servisten çıkmasına neden olabilecek düzeyde arızalara da neden olabilir. Çalışma performansının olumsuz yönde etkilenmesi, üretim parametrelerini, makine ayar değerlerini, dolayısıyla makinenin üretim güvenilirliğini etkiler. Bu nedenle hasar oluşmadan önce ( Aşınma, mekanik boşluk vs.) titreşim, sıcaklık gibi parametrelerin değişimlerinin izlenmesi ve arıza kaynağı olması muhtemel makine elemanlarının tanımlanması gerekir. Buda ancak, servis sürecindeki ekipman performansının çeşitli algılama organları ve ekipmanları ile takip edilmesi sayesinde mümkün olabilir [1].

### 3.4.1. Algılama organlarının kullandığı testler

Bu testler duyu organları vasıtasıyla yapılır. Korozyona bağlı aşınmalar, koruyucu kaplamalardaki süreksizlikler gibi çeşitli hasarlar çıplak gözle fark edilebileceği gibi, görülmesi güç olan hasarların incelenmesinde de büyüteç yada daha derin çatlaklar için endoskopiden yararlanılabilir.

Rulmanlı yataklar ve dişli çarklar gibi mekanik bağlantı elemanlarında meydana gelen hasarlar, ses dinleme teknikleri ile belirli bir aşamada tespit edilebilir. Çıplak kulakla dinlemeyen seslerde de stetoskop kullanmak gerekir. Stetoskop kullanırken, bir alıcı prob dinlenecek makine üzerine temas ettirilerek, makine elemanından alınan titreşim kuvvetlendirilip dinleyicinin kulağına iletilir. Ancak, temasla dinlenemeyen tanklardaki gaz veya sıvı kaçağı gibi durumlarda, bir ultrasonik mikrofona yada kaçağı duyarlı bir algılama elemanının kullanılması uygun olur. Kimyasal reaksiyonlar veya aşırı ısınma sonucu yağ, gres veya elektrik izolasyon maddelerinin yanmasından ortaya çıkan kokular kolaylıkla fark edilebilir. Aynı şekilde, dokunmak suretiyle bir rulmanlı yatağın sıcaklığı ve titreşimi konusunda bir fikir edinilebilir.

### 3.4.2. İşletme parametrelerinin ölçümüne dayalı testler

Uyarıcı bakımın temelini ölçüm oluşturmaktadır. Bu ölçülecek nicelikler, makinenin içinde bulunduğu durumu belirleyebilecek parametreler arasından seçilmelidir. Parametrelerin izlenmesi sırasında makinenin herhangi bir parçasının sökülmesi gerekmez.

İşletme parametrelerinin ölçümüne dayalı testler, algılama organlarının kullanıldığı testlere kıyasla daha gerçekçi ve güvenilirdir. Çünkü, değerlendirmeler şahıstan şahısa değişen yargılara göre değil, ölçüm teknolojisi kullanılarak mutlak ve tekrarlanabilir parametrelere bağlıdır.

Genellikle izlenen işletme parametreleri ısı, ses, basınç, hız, yağlama yağında aşınma partikülleri, kullanılan akışkanın giriş-çıkış debisi ve titreşimdir. Bu parametrelerin

herhangi birini esas alarak ölçüm yapan çok çeşitli ekipmanlar kullanılmaktadır. Hangi makine arızasının, hangi parametrelerle tespit edilebileceği tablo 3.2’de gösterilmiştir [10].

**Tablo 3.2.** Değişik ölçüm parametreleri ile tanımlanabilecek arıza tipleri

Makinedeki Arıza Tipi	PARAMETRELER				
	Titreşim	Yağ analizi	Isı	Basınç	Sızdırma
Balans bozukluğu	+	-	-	-	-
Eksen kaçıklığı	+	-	-	-	-
Rulman arızası	+	+	+	-	-
Kaymalı yatak	+	+	+	+	+
Dişli arızası	+	+	-	-	-
Boşluk, gevşeme	+	+	-	-	-

Sıcak olan her cisim kızılötesi ışınlar yayar. Bu gerçekten hareketle kızılötesi ışın, yüksek sıcaklığın, ekipman performansını bozacağı tüm sistemlerde bir haberci olarak kabul edilebilir [8]. Ancak, insan gözü kızılötesi ışınları algılayamadığından bunun için bir araç kullanmak gerekir. Bu araç termal kameradır. Termal kameralar uzun bir süredir insanlığın hizmetindedirler. İlk uygulamaları askeri amaçlı olmakla beraber günümüz endüstrisinde, özellikle bakım çalışmalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. İlk örnekleri sıvı nitrojen içeren ve bulanık görüntüler veren termal kameralar artık yüksek çözünürlüklü, hafif ve güvenilir aygıtlar halini almıştır. Örneğin, sistemde kullanılan yağın, servis suyunun ya da çalışan bir rulmanlı yatağın sıcaklığının dijital termometre veya bir termal kamera yardımıyla ölçülmesi mümkündür [1].

Termal kamera ile izleme yönteminde, sıcaklığı ölçülen parçanın yüzeyinden yayılan enfraruj radyasyonunun dalga boyunun ölçülmesi esas alınır. Yayılan radyasyonun şiddetine bağlı olarak kamera monitöründe siyah ve beyaz renklerin tonları şeklinde görüntüler elde edilir. Aynı renk tonlarına bağlı noktaların sıcaklıkları birbirine eşittir. Eğer renkli monitör kullanıldıysa, açık renkte görünen noktaların sıcaklıkları, koyu renkte görünen noktaların sıcaklıklarından daha yüksektir [1].

Bilindiği gibi bir iletkenin sıcaklığı yükselirse direnci de yükselir. Bunun tersi de doğrudur. Elektriksel problemlerin pek çoğu, uygun bir biçimde sıkılmayan bağlantılardan; temassızlıktan veya parçanın bağlantı noktalarına uygun bir biçimde yerleştirilmemesinden doğmaktadır [8]. Gevşek bağlantılar, elektrik akımının geçeceği yüzeyi; kesiti küçültür ve temas direncinin artmasına, dolayısıyla bölgenin ısınmasına yol açar. Temas yüzeyinin okside olması da direnci artırıp ısınmaya yol açan diğer bir nedendir. Bütün bu sorunlu bölgeler termal kameralar tarafından kolaylıkla saptanabilmektedir. Gevşek ve kirli bağlantılar en yaygın arıza nedeni olmakla beraber vahim sonuçlar veren arızaların büyük bir kısmı da aşırı yüklü devrelerden kaynaklanmaktadır. Aşırı yük; devredeki bir makine parçasının diğerlerinden daha zayıf olduğu, bu nedenle de devrenin akımına direnç oluşturarak sınırladığı ve ısındığı durumlarda oluşur. Ancak, bu durum termal kamera yardımıyla gözlem altında tutularak olumsuz bir sonuç doğmadan önlem almak olanak dahilindedir.

Uygun biçimde uygulandığında kızılötesi ışınla arama yöntemi emniyetli, güvenilir ve hızlıdır. Bu yöntemde termal kameranın temassız oluşu büyük bir avantajdır ve muayeneler her hangi bir anda tesisi durdurmadan yapılabilir. Elektriksel, mekanik prosesler, yüksek fırınlar ve refrakter malzeme kullanılan imalat türleri doğru bir kamera ve eğitilmiş bir kameramanla etkin bir biçimde muayene edilebilir. Muayene sürecinde dikkat edilmesi gereken bir noktada, cisimler farklı sıcaklıklarda farklı kızılötesi ışınları yansıttıklarından kullanılacak termal kameranın kullanım amacına uygun bir şekilde seçilmesine dikkat edilmesidir.

### **3.5. Uygulanacak Bakım Yönteminin Belirlenmesi**

Bir işletmede uygulanacak bakım yönteminin belirlenmesinde, sistemin karmaşıklığına ve kullanılan makinelerin işlevlerine dikkat edilmesi gerekir [11].

Kısa sürede tamir edilebilen ve arıza anında üretimi fazla etkilemeyen basit makinelerin kullanıldığı tesislerde, makinelerin bakımı için arıza olduğunda yapılan bakım yönteminin seçilmesi hem ekonomik hem de uygulama açısından yeterli olacaktır [12]. Ancak, arıza esnasında ekonomik açıdan büyük üretim kayıplarına



neden olabilecek, kompleks makine ve ekipmanların kullanıldığı işletmelerde ise uyarıcı bakım sisteminin seçilmesi uygun olacaktır. Tabii ki, sadece uyarıcı bakım sistemini seçmek yeterli olmaz, aynı zamanda bakım yönetiminin de iyi uygulanması gerekir. Tablo 3.3’de endüstriyel uygulama alanı bulunan uyarıcı bakım seçenekleri gösterilmektedir.

**Tablo 3.3 Ekipman tipine ve hata moduna göre uygulanacak arama metodu**

EKİPMAN KATEGORİSİ	EKİPMAN TİPİ	HATA MODU	HATA SEBEBİ	ARAMA METODU
Döner Makine	Pompa, Motor, Kompresör, Fan	Erken yatak aşınması	Aşırı kuvvet	Titreşim ve yağ analizi
Döner Makine	Pompa, Motor, Kompresör, blövir	Yağlama hatası	Yanlış / eksik yağ, ısı, nem	Spektrografik ve ferrografik analiz, yağ kimyasının değişimi analizi
Elektrik Ekipmanları	Motor, Kablo, Starter, Transformatör	Yalıtım hatası	Isı , nem	Zaman/direnç testi Kızılötesi tarama Yağ analizi
Elektrik Ekipmanları	Motor, Kablo, Starter, Transformatör	Korona deşarjı	Nem, bağlantı hataları	Kızılötesi tarama Ultrason
Isı transfer Ekipmanları	Eşanjör Kondanser	Kir, çökelti	Temizlik eksikliği, Değiştirme hatası	Isı transfer hesapları
Saklama ve Transfer ekipmanları	Tank, Boru hataları Reaktör	Korozyon	Kimyasal atık	Korozyon ölçümü, Kalınlık ölçümü
Saklama ve Transfer ekipmanları	Tank, Boru hataları Reaktör	Çatlaklar	Metal yorulması	Akustik emisyon

### 3.6. Uyarıcı Bakım Yönetiminin Uygulanması

Türkiye’de uyarıcı bakım, ekseriyetle iki şekilde uygulanmaktadır. Bunlardan bir tanesi, hizmet satın alma yoluyla müşavir firma kullanımıdır. Kalkınmış ülkelerde çok popüler olan bir teknolojik uygulama yöntemi de bilgi danışmanlığıdır. Diğer bir deyişle, işletmeler bütün bilgiyi ellerinde bulundurmanın çok pahalıya mal olacağını

düşünerek, gerektiğinde o bilgiyi konunun uzmanı olan kuruluşlardan satın alırlar. Çünkü, dışarıdaki bir firmadan alınacak bilgi düzeyindeki bir bilgi havuzunun işletmede oluşturulması için meydana getirilecek kadronun maaş, sigorta, ikramiye vs. gibi maliyetleri birbirine eklendiğinde ve bu maliyetin o ekibin bilgi düzeyinin dışarıdaki uzman kuruluş seviyesine gelene kadar geçecek zaman içindeki maliyeti de hesaplandığında, neden kalkınmış ülkelerde danışman kullanımının yaygın olduğu ortaya çıkar. Diğer bir uyarıcı bakım uygulaması ise, cihaz satın alma yoluyla dahili ekipman kullanımınıdır. Bu yöntem ülkemizde diğerine nazaran daha geniş bir uygulama alanı bulmaktadır [6].

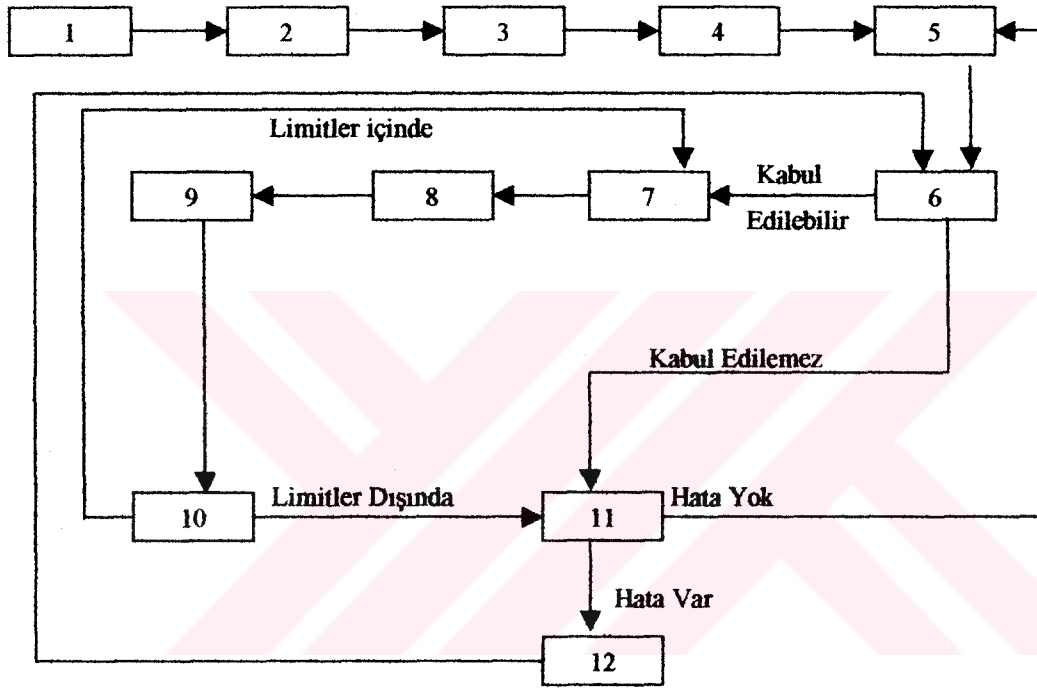
Uyarıcı bakım yönteminin uygulanacağı işletmelerde ilk iş olarak bakım programına alınacak makineler seçilmelidir. Bunu yaparken de, işletmenin sahip olduğu makinelerin üretim hattındaki önemlerine göre sınıflandırılması gerekir. Uygulama, bu listenin başından seçilecek uygun sayıda makine üzerinde başlatılır ve bakım planına alınan makine sayısı kademeli olarak artırılır. Belli bir süre sonra, tüm makineler bakım programına dahil edilir. Böylelikle, çok sayıda makineyi bir anda bakım programına alarak uygulamanın aksamasına hatta boğulmasına neden olabilecek etkiler ortadan kaldırılmış olur [7]. Makineler, buldukları bölgeye, üretim için önem derecesine ve ölçüm periyoduna bağlı olarak gruplandırılabilirler.

Makinelerin önem derecesine göre sınıflandırılmasında dikkat edilecek hususlar;

- Arızalandığında üretimi uzun süre durdurabilecek ana ünite elemanı,
- Arızalandığında üretimi kısa süreli durdurabilecek ana ünite elemanı,
- Arızalandığında uzun süre durarak esas üretimi durdurabilecek yan ünite elemanı,
- Arızalandığında kısa sürede bakımı yapılabilecek yan ünite elemanı,
- Arızalandığında üretimi etkilemeyecek eleman.

Türkiye’de bu uygulamalarda görülmekte olan aksak yönler de konunun işletmeye giriş şekli ile ilgilidir. Uyarıcı bakım yöntemini uygulayacak işletmenin yeterli bilgi temeline, deneyimli personele sahip olması gerekir. Bu uygulamaya geçiş sadece titreşim ölçüm cihazını satın almak demek değildir.

Ayrıca, satıcı firmanın da konuyu sadece satış yapacak kadar değil, gerektiğinde destek verecek kadar bilmesi gerekir. Buna örnek olarak EKG ( Elektro-kardiyografi) cihazını gösterirsek, EKG cihazlarının satıcılarının bu konuda uzman olmaları gerekmektedir. Zira, bütün tıp fakültelerinde konu enine boyuna anlatılmaktadır. Aynı derecede dikkat ve hassasiyet isteyen uyarıcı bakım uygulamasında da satıcı firmanın konuyu çok iyi bilmesi gerekmektedir. Şekil 3.4'de şematik olarak uyarıcı bakım uygulaması gösterilmektedir.



1. İşletme genel analizi
2. Makine seçimi
3. Uygun ölçüm tekniklerinin belirlenmesi
4. Uyarıcı bakım sisteminin oluşturulması
5. Geçerli kontrol limitlerinin belirlenmesi
6. Kontrol limitlerinin makine çalışma özellikleriyle karşılaştırılması
7. Durum ölçümü
8. Veri toplama
9. Verilerin kaydedilmesi
10. Gidiş değerlendirilmesi ile hata tespiti
11. Durum analizi
12. Hatanın düzeltilmesi

Şekil 3.4 Uyarıcı bakım uygulamasının basit bir şematik gösterimi

### 3.7. Uyarıcı Bakım Uygulamasında Kullanılan Ölçüm Parametreleri

Uyarıcı bakım uygulamasında değişik ekipmanlardaki hataları ölçmek için değişik parametreler kullanılmaktadır. Tablo 3.4’de hangi tip ekipmanda hangi ölçüm parametresinin kullanılabilceği gösterilmiştir [13].

Tablo 3.4. Ekipman tipine göre kullanılabilcek ölçüm parametresi

EKİPMAN	Titreşim	Yağ Analizi	Malzeme Kalınlığı	Ultrason	Enfraruj (Kızılötesi)
<b>Döner Aksamı</b>					
Pompa	+	+	-	+	-
Motor	+	+	-	-	+
Türbin	+	+	-	+	+
Jeneratör	+	+	-	-	+
Redüktör	+	+	-	-	-
Döner Fırın	+	-	+	-	+
Kırıcı	+	-	+	-	-
Kompresör	+	+	-	+	+
Fan	+	+	-	-	-
Rulman ve Yatak	+	+	-	+	+
<b>Kazan ve Buhar</b>					
Boru	-	-	+	-	-
Separatör	-	-	+	-	-
Stim trep	-	-	-	-	+
İzolasyon	-	-	-	-	+
Kaçaklar	-	-	-	+	-
<b>Elektrik Sistemleri</b>					
Motor Kontrolleri	-	-	-	-	+
Tablolar	-	-	-	-	+
Trafoalar	-	-	-	-	+
Sigortalar	-	-	-	-	+
<b>Isı Eşanjörleri</b>					
Kondenserler	-	-	+	-	-
Soğutucular	-	-	+	-	-
Radyatörler	-	-	+	-	-
Tanklar	-	-	+	-	-
Ekipman Kabul	+	-	-	-	+

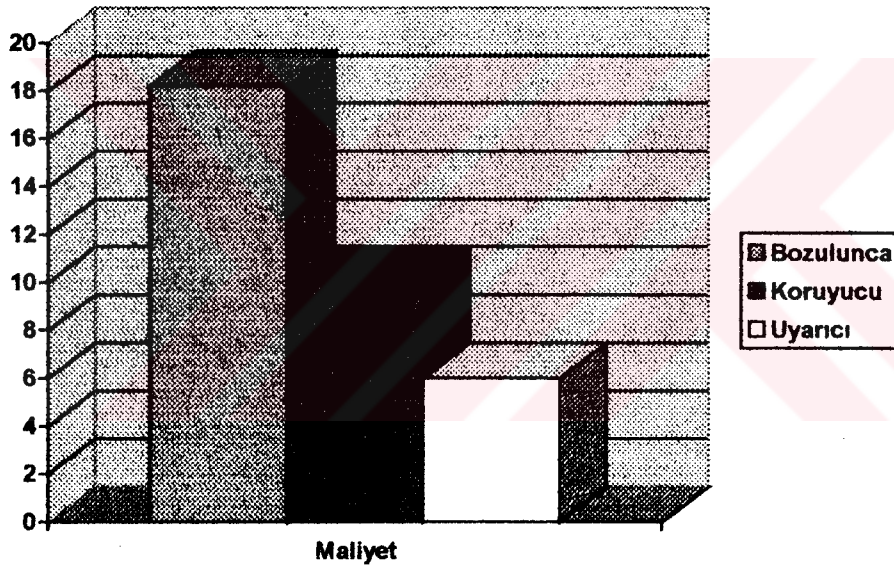
### 3.8. Bakım Teknikleri ve Karşılaştırılması

Bozulunca bakım, koruyucu bakım ve uyarıcı bakım yöntemleri karşılaştırıldığında, pek çok yönüyle uyarıcı bakım yönteminin daha verimli olduğu ortaya çıkmaktadır. Uyarıcı bakım yönteminin avantajları [10];

- Makine performansının izlenmesi, arızaların daha doğuş safhasında tanımlanmasını sağlayarak giderilmesine olanak sağlar. Arızalar daha kısa zamanda daha ucuza giderilir.
- Uyarıcı bakım sistemi, cihazları ve verilen eğitimle arıza tanımını daha başarılı yapacaktır. Cihazlar çoğu kez arızanın nerede olduğunu gösterebildiğinden gereksiz işlemler yapılmayacak, arızasız parçalar değiştirilmeyecektir.
- Sürpriz arızalar azalacağından, bu arızalara karşı hazır bulundurulmuş malzeme ambarını daha az miktarda stokla donatmak ve stoklama giderlerini azaltmak mümkün olacaktır.
- Teşhis edilmemiş problemlerin üretim hattında neden olacağı duruşlar azalacağından, üretimin artması sağlanır.
- Ufak hataların teşhis edilmemesinden kaynaklanan daha pahalı ve önemli sonuçlar doğuran ikincil arızalar azalır ve böylelikle makine ömrü uzatılmış olur.
- Makine performansı izleneceği için mümkün olan yerlerde üretim hızı artırılır.
- İmalat sanayiinde, fazla titreşimle üretilen mamuller kaliteli olmaz. Oysa, titreşim kaynakları uyarıcı bakım yöntemiyle belirlenip giderileceğinden, üretim kalitesi artar.

Bütün bu avantajların yanı sıra, uyarıcı bakım yöntemi, kuruyucu bakım ile birlikte de kullanılabilir. Böylelikle, belli bir bakım planı içerisinde periyodik kontrolleri yapılan makineler yine periyodik olarak uygulanmakta olan uyarıcı bakım yöntemi ile durdurulmadan koruyucu bakım uygulamasına gerek olup olmadığı anlaşılabilir. Örneğin; makinedeki bir rulman 3000 saatte değiştirilecekse ve uyarıcı bakım uygulaması bu rulmanda her hangi bir problem olmadığını tespit etmişse, o zaman bu rulman için gerekli koruyucu bakım süresi kontrollü olarak uzatılır. Böylece, makine elemanlarının maksimum ömürlerine kadar kullanılmaları mümkün olur.

Bozulunca bakım, koruyucu bakım ve uyarıcı bakım yöntemlerinin maliyet cinsinden karşılaştırılması şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Üç bakım türünün maliyet açısından karşılaştırılması

Tablo 3.5 Bakım yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Teknik	İnsan Sağlığı Analogisi
Önleyici Bakım	Ana problemin izlenip giderilmesi, örneğin yağ kirlenmesi	Diyetle kolesterol ve tansiyonun kontrol altında tutulması
Uyarıcı Bakım	Titreşim, ısı vs. nin ölçülüp izlenmesi	EKG ile kalp hastalığının tanımlanması
Koruyucu Bakım	Periyodik parça değişimi	By-pass veya organ nakli
Bozulunca Bakım	Büyük bakım bütçesi	Kalp krizi veya inme

Önleyici ( Proaktif ) bakım, uyarıcı bakım, koruyucu bakım ve bozulunca bakım yöntemlerinin insan sağlığı analogisi ( Benzeşimi ) ile karşılaştırılması da, tablo 3.5’de gösterilmektedir.

Tarihten gelen yanlış inanışlardan biri ekipman arızalarının öngörülemediği idi. Oysa ki, uyarıcı bakım teknolojisi çok sayıda ekipman arızasının öngörülebileceğini ortaya koymuş ve bir kısmı, bu bölümde ifade edilen çok sayıda yöntemi endüstrinin kullanımına sunmuştur.

Günümüzde, bilindiği gibi çeşitli bakım yaklaşımları, örneğin; düzeltici bakım, önleyici bakım kavramları bulunmaktadır. Ancak en fazla popülerite kazanmış olan felsefe doğru yerde, doğru zamanda, doğru müdahale olanağı vermesi nedeniyle uyarıcı bakım felsefesidir.

Dördüncü bölümde titreşim konusuna değinilecektir.

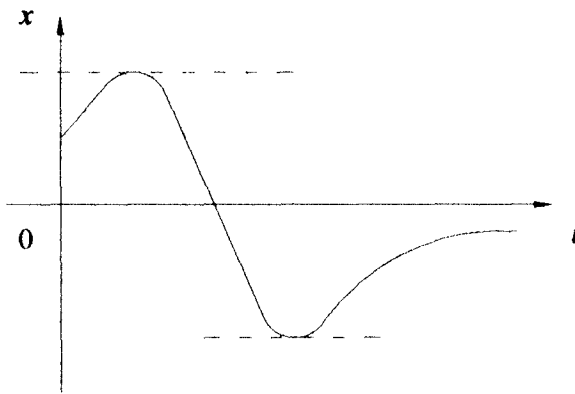
## BÖLÜM 4 TİTREŞİM TERMİNOLOJİSİ

### 4.1. Giriş

Kütle ve elastisite şartlarına sahip mühendislik sistemlerinin hareketi, verilen zaman aralığından sonra tekrarlanıyorsa, böyle bir hareket titreşim olarak tarif edilebilir. Mekanik sistemlerin salınım ve titreşim hareketleri fizikte önemli bir yer tutar. Her sistem, titreşim yeteneğine sahiptir ve çoğu sistem değişik şekillerde titreşim hareketi yapar. Küçük cisimler hızlı titreşimler üretirken, bunlara nazaran daha büyük cisimler daha yavaş titreşimler üretebilirler. Örneğin; bir sivri sineğin kanatları saniyede yüzlerce kez titreşirken, yer yüzünde meydana gelen bir depremden sonra bile zemin, ortalama saatte bir titreşim üretmeye devam edebilir. İnsan vücudunun kendisi de titreşim olayı için zengin bir hazinedir. Bir yazar, bu olayı şu şekilde ortaya koymaktadır;

“Kalbimiz vuru, ciğerlerimiz salınım hareketi yaparken üşüdüğümüz zaman titreriz. Gırtlığımız titreştiği zaman horlar, kulak zarımız titreştiği için duyarız. Görmemizi sağlayan ışık dalgaları da titreşimi gerektirir[14].”

### 4.2. Titreşim Kinematığı



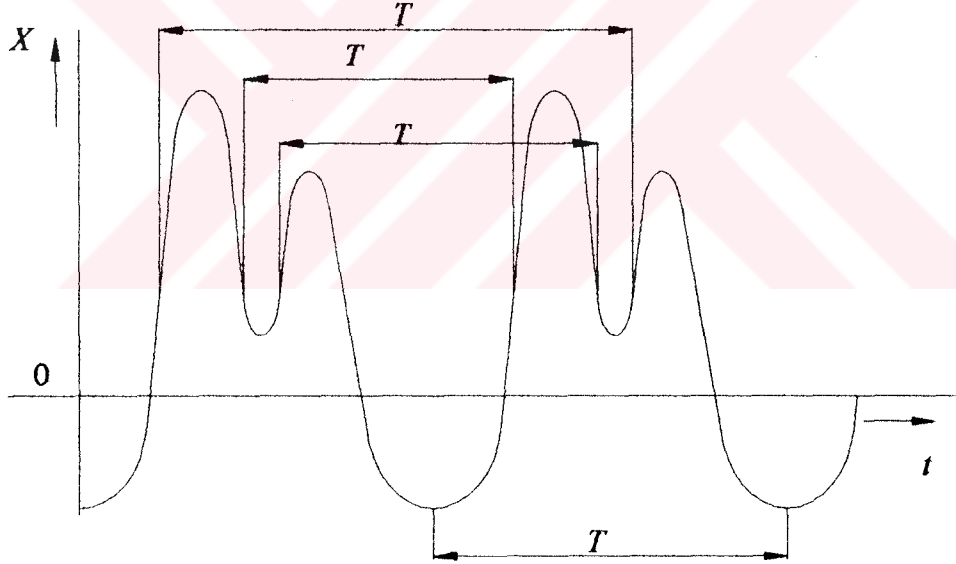
Şekil 4.1 Titreşim hareketi



Literatürde yapılan titreşim terimlerinden hareketle, titreşim dendiğinde akla periyodik hareket gelmektedir. Ancak, her titreşim mutlaka periyodik olacaktır diye bir şart yoktur. Klotter'e göre, yönünü bir defadan fazla değiştiren harekete titreşim denir. Bu kanaate, sönümlü serbest titreşimler incelendikten sonra varılmıştır.

Şekil 4.1'de,  $x$  konum koordinatı olmak üzere, bir titreşim hareketinin  $x-t$  diyagramı gösterilmektedir.

Bu bilgilerden hareketle titreşimler, aperiodyk ve periyodik olarak ikiye ayrılabilir. Periyodik titreşimlerin özelliklerinin incelenmesi, aperiodyk titreşimler için de çok faydalı olmuştur. Belirli ve eşit zaman aralıklarında, bütün özellikleriyle aynen tekrarlanan titreşime periyodik titreşim denir. Şekil 4.2'de bir periyodik titreşim gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Periyodik titreşim

Bunun matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$x(t+T) = x(t) \quad (4.1)$$

$(T)$ : Titreşim periyodu,  $\left(f = \frac{1}{T}\right)$ : Titreşim frekansını ifade etmektedir.

$T$  periyodu, saniye olarak ölçülürse,  $f$  frekansının birimi  $[1/s]$  veya [titreşim/s] olmaktadır. Bu da, Hertz olarak ifade edilir [15].

Periyot, hareketin kendini tekrarlaması için gerekli olan zaman ve frekans da, birim zamanda hareketin tekrarlanma sayısı olarak tanımlanabilir. Tabii frekans ise, sistemin sürtünmesiz serbest titreşimi esnasındaki frekansıdır [16].

### 4.3. Sinüzoidal Titreşimler

Sinüzoidal titreşimler, küçük titreşimlerde ortaya çıkar ve aynı zamanda, gerçek hareketle iyi bir benzerlik içindedirler. Sinüzoidal titreşimlerin, fiziksel ve matematiksel olmak üzere iki nedeni vardır. Fiziksel neden, bu titreşimlerin çok geniş mekanik sistemlerde meydana gelmesi ve denge konumundan itibaren yer değiştirme ile orantılı olarak ortaya çıkan geri çağırıcı kuvvetler yüzündendir [14]. Örneğin; her biri farklı uzunluklarda yer değiştiren değişik özelliklerde  $n$  kadar yaydan oluşmuş bir cismin denge konumundan  $x$  kadar yer değiştirmesi sonucunda cisme etkiyen geri çağırıcı kuvvet;

$$F(x) = -(k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_nx^n) \quad (4.2)$$

şeklindedir. Buradaki  $k_1, k_2, k_3$  gibi terimler sabit katsayılardır. Cismin kütlesi  $m$  olmak üzere, yayın kütlesi ihmal edilirse, homojen bir sistemin hareket denklemi,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -k_1x \quad (4.3)$$

şeklindedir. Bu denklemin çözümü de, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (4.4)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \quad (4.5)$$

Saf sinüzoidal titreşimlerin matematiksel nedeni, 1807 yılında J.B. Fourier teoreminde yatar. Bu teoreme göre,  $T$  periyodu ile kendini tekrar eden herhangi bir bozulma, seçilen genliklerle birlikte,  $T, T/2, T/3, \dots$  periyotlu saf sinüzoidal titreşimlerin bir kümesi şeklinde yazılabilir [14]. Örneğin; bir temel titreşim frekansı ve onun tüm harmoniklerinden meydana gelen bir sonsuz seriler gibi.

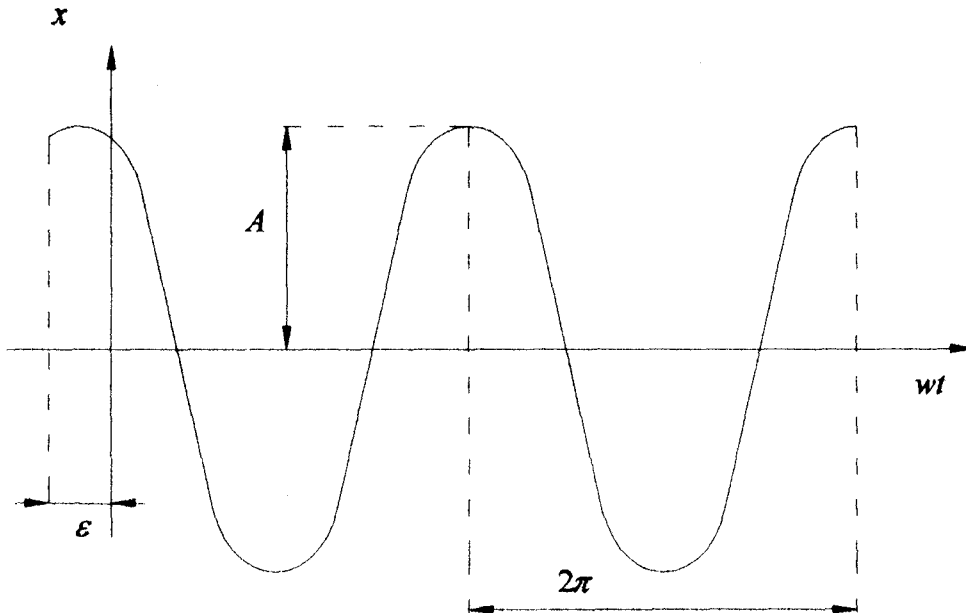
#### 4.4. Basit Harmonik Hareket ( BHH )

Her periyodik fonksiyonun bir Fourier serisi ile gösterilebileceği matematikten bilinmektedir. Fourier serisi ise, birbirinden farklı katsayı ve frekanslara sahip harmonik titreşimlerden ibarettir [15]. Bu nedenle harmonik hareket, titreşimin esas yapı taşıdır.

Genel olarak harmonik hareket,  $A$ ,  $\omega$  ve  $\varepsilon$  sabitler olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$x = A \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.6)$$

Buna ait hareket diyagramı şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Basit harmonik hareket

$A$ : Orta konumdan itibaren maksimum sapmayı göstermekte olup, genlik adını alır. Titreşimin cinsine göre uzunluk veya açı ile ifade edilir.

$w$ : Dairesel frekans [ $rad/s$ ]

$\varepsilon$ : Başlangıç faz açısı veya faz açısı. Hareketin başlangıç şartlarını belirler, karakterine tesir etmez.

Şekil 4.3'den, hareketin  $2\pi$  büyüklüğündeki periyotlar içerisinde tekrarlanacağı görülmektedir.  $t$  zamanına göre periyot,

$$w(t+T) + \varepsilon = (wt + \varepsilon) + 2\pi$$

$$T = \frac{2\pi}{w} \quad (4.7)$$

olarak bulunur. Buradan da titreşim frekansı;

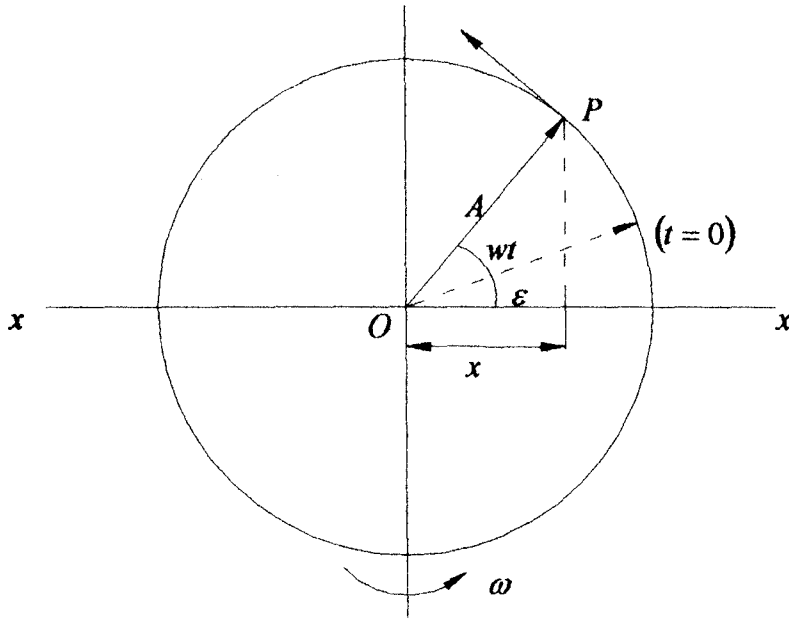
$$f = \frac{1}{T} = \frac{w}{2\pi} \quad (4.8)$$

olur. Denklem 4.8'den dairesel frekans aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$w = 2\pi f \quad (4.9)$$

#### 4.5. Dönme Vektörüyle Basit Harmonik Hareket

Şekil 4.4'de görüleceği üzere,  $t = 0$  anında x-x eksenini ile  $\varepsilon$  açısı yapan ve şiddeti  $A$  olan bir vektör  $\omega$  açısal hızıyla O noktası etrafında döndüğünde, bu vektörün x-x eksenini üzerindeki izdüşümü;  $x = A \cos(wt + \varepsilon)$  şeklinde yazılabilir. Bu suretle, basit harmonik harekete, düzgün dairesel hareketin geometrik izdüşümü olarak bakılabilir (  $\omega$  açısal hızıyla dönen bir vektörün ucunun bir eksen üzerindeki izdüşümünün hareketi ).

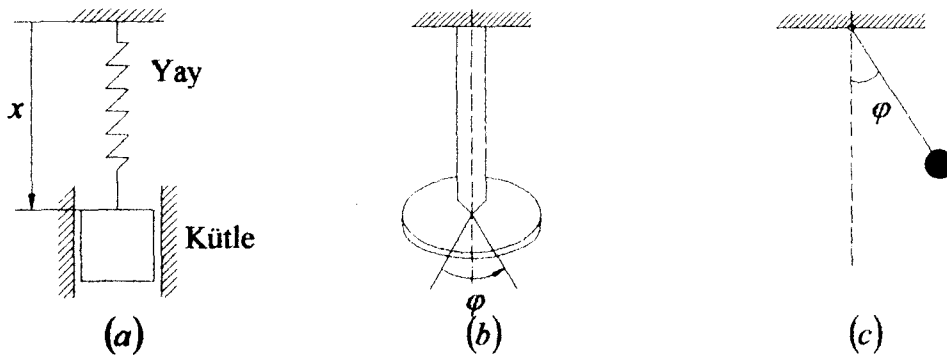


Şekil 4.4 Harmonik hareketin dönen vektörle gösterilmesi

#### 4.6 Tek Serbestlik Dereceli Sistem

Pek çok sistem, birden fazla şekil ve doğrultuda titreşebilir. Eğer sistem, sadece bir tek mod ve tarzda titreşmeye şartlandırılırsa veya sistemin kütesinin, uzayda geometrik yerini tayin etmek için, bir tane bağımsız değişkene ihtiyaç varsa, bu şekildeki sisteme, tek serbestlik dereceli sistem denir [16].

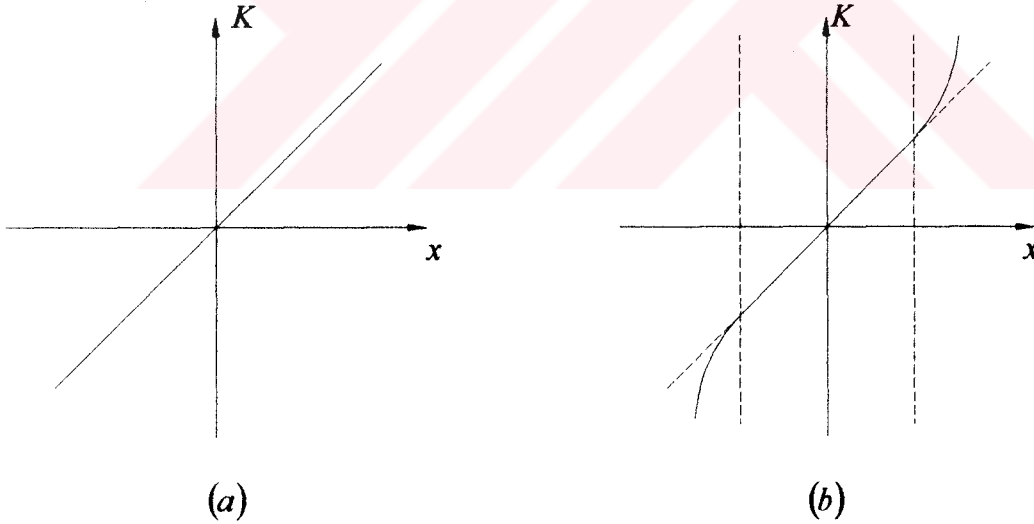
Tek serbestlik dereceli sistemler, matematik model bakımından en basit titreşim sistemleri olmakla beraber, makine mühendisliğinde rastlanan çok sayıdaki titreşim olayının anlaşılmasına ışık tutmaktadırlar.



Şekil 4.5 Tek serbestlik dereceli sistemler

Bir titreşim sistemini diğer mekanik sistemlerden ayıran karakteristik özellik, titreşim sistemi denge konumundan ayrıldığı zaman sistemi denge konumuna gelmeye zorlayan bir geri getirici tesirin ( Kuvvet veya moment ) doğmasıdır [15]. Bu tesir çok farklı olmakla beraber, en çok rastlanan geri getirici tesir, sistemde bulunan cisimlerin elastik özelliklerinden kaynaklanan tesirdir. Buna örnek olarak yay gösterilebilir. Titreşim yapan cisimlerin kendi ağırlığı veya merkezkaç kuvvetleri de geri getirici tesirin kaynağı olabilir. Şekil 4.5'de bu üç titreşim sistemine birer örnek gösterilmektedir.

Geri getirici tesir  $K$ , konum koordinatı  $x$  ise,  $K = K(x)$  fonksiyonunun  $x$ - $K$  düzlemindeki grafiğine titreşim sisteminin karakteristiği adı verilir [15]. Eğer geri getirici tesir, bir yay vasıtasıyla sağlanmakta ise, buna yay karakteristiği de denilebilir. Bu karakteristik, orijinden geçen bir doğruysa, ( $K = Kx$ ) lineer karakteristikli sistem, aksi halde non-lineer karakteristikli sistem söz konusudur. Bu iki sistem şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 (a) Lineer karakteristikli sistem, (b) non-lineer karakteristikli sistem

Şekil 4.6'daki  $x$  konum koordinatı uzunluk boyutunda ise  $K$  geri getirici tesirinin boyutu kuvvet,  $x$  konum koordinatı açısal bir büyüklük ise  $K$  geri getirici tesirinin boyutu momenttir. Buna göre  $k$  yay katsayısı,  $x$  konum koordinatı metre ile ölçülürse  $[N/m]$  birimine,  $x$  konum koordinatı radyan ile ölçülürse  $[Nm/rd]$  birimine sahip olur. Pek çok sistem non-lineer karakteristiğe sahip olmasına karşın, şekil 4.6 (b)'de

görüreceği üzere titreşim genliğinin belirli sınırlar içerisinde kalması şartıyla, lineer gibi işleme tabi tutulabilir.

Şekil 4.5.a'da gösterilen kütle-yay sistemlerinde kütle, denge konumundan itibaren meydana gelen yer değiştirme ile  $k$  yay sabitinin çarpımı kadar bir geri getirici kuvvet etki etmektedir. Hook kanunu göz önüne alındığında, denge konumundan itibaren cismin yer değiştirmesinin karesiyle orantılı bir potansiyel enerji ve sistemin bütün ataletinin yayın ucundaki kütlede toplandığı düşünülerek  $(1/2)mv^2$ 'ye eşit bir kinetik enerji ifadesi yazılabilir [14]. Buradaki  $v$ , cismin hızıdır. Newton'un hareket kanunundan hareketle  $(\sum F = m \cdot a)$ ,

$$-kx = ma \quad (4.10)$$

ve toplam mekanik enerjinin korunumundan hareketle;

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E_T \quad (4.11)$$

yazılabilir. İkinci ifade birinci ifadenin  $x$  yer değiştirmesine göre entegralidir. Bunların her ikisi de, sistemin hareketinin diferansiyel denklemleridir. Daha açık olarak bu iki ifade,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{2}m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E_T \quad (4.13)$$

şekindedir. Üstteki denklemlerin her ikisinin de çözümü  $x = A \cos(\omega t + \varepsilon)$  şeklindedir.

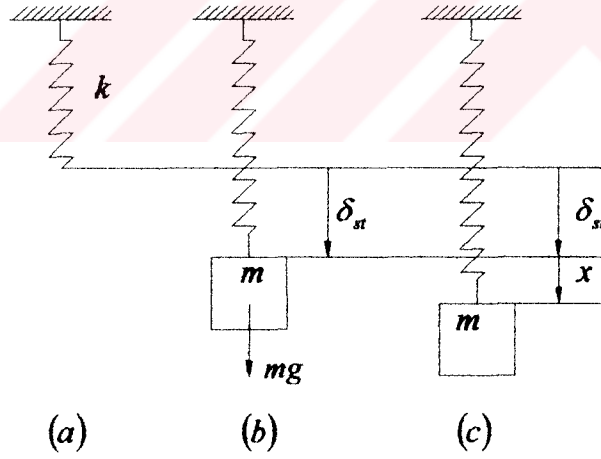
Bir mekanik sistemin titreşimleri, serbest titreşimler ve zorlanmış titreşimler olarak iki gruba ayrılabilir. Serbest titreşimler, sistemin statik denge konumundan

uzaklaştırılıp bırakılması halinde yaptığı periyodik harekettir [16]. Tanımdan da anlaşılacağı gibi serbest titreşimler, titreşim sisteminin denge konumundan ayrıldıktan sonra belirli bir ilk hızla veya hızsız olarak kendi halinde bırakılması sonunda ve geri getirici tesir altında doğarlar.

Titreşim sisteminde bu suretle doğan serbest titreşimlere karşı sürtünme gibi bir direnç mevcut değilse, teoride bu titreşimler sonsuz kadar devam ederler ve sönümsüz serbest titreşimler adını alırlar. Ancak, gerçek sistemlerde harekete karşı koyan bir direnç her zaman vardır.

Denge konumundan ayrıldıktan sonra kendi halinde bırakılmış titreşim sisteminde, sistemin yapısından dolayı kendiliğinden veya sisteme sonradan ilave edilmiş sönüm kuvvetleri varsa, serbest titreşimlerin genliği zamanla azalır ve bu titreşimler sönümlü serbest titreşimler adını alırlar.

#### 4.6.1. Sönümsüz serbest titreşimler



Şekil 4.7 Kütle-yay sistemi

Şekil 4.7 (a)'da gösterilen lineer yayın serbest ucuna, bir  $m$  kütlesi asılırsa, kütlenin ağırlığı etkisi altında yay  $\delta_{st}$  kadar uzayarak kütle denge konumuna gelir (Şekil 4.7.b).  $m$  kütlesi denge konumundan ayrıldıktan sonra belirli bir hızla veya hızsız olarak kendi haline bırakılırsa,  $m$  kütlesi aşağı yukarı gidip gelmeye, bir titreşim hareketi yapmaya başlar. Titreşim hareketini teşvik eden bir dış etken ve bu harekete



karşı koyan bir sönüm olmadığından, meydana gelen titreşime, daha önce de ifade edildiği gibi sönümsüz serbest titreşim denir.

Bu titreşime ait diferansiyel denklem, şekil 4.7'deki işaret ve yönler referans alınarak Newton kanununa göre;

$$m\ddot{x} = mg - (\delta_{st} + x) \cdot k \quad (4.14)$$

şeklinde yazılabilir. Statik denge şartından  $mg = k \delta_{st}$  olacağından, denklem 4.14 aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (4.15)$$

Dairesel frekansı denklem 4.5'den  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  olarak gösterirsek, sistemin tabii frekansı denklem 4.7'den,

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [1/s] \quad (4.16)$$

olarak yazılabilir. Sistemin periyodu ise denklem 4.6'dan aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [s] \quad (4.17)$$

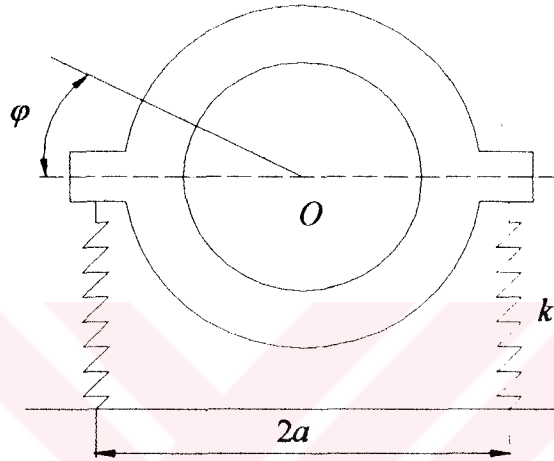
Yay-disk sistemine uyum sağlaması amacıyla, konum koordinatı  $x$ ,  $\varphi$  ile gösterilebilir. Bu durumda geri getirici tesir moment olacağından yay katsayısı  $k_b$  ile ifade edilebilir. Diskin mil eksenine göre kütleli atalet momentini ise  $J$  ile gösterirsek denklem 4.15'deki titreşime ait diferansiyel denklem aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$J\ddot{\varphi} + k_b\varphi = 0 \quad (4.18)$$

Sönümsüz serbest titreşimlerin dairesel tabii frekansı da,

$$w_n = \sqrt{\frac{k_b}{m}} \quad (4.19).$$

şeklinde elde edilir.



Şekil 4.8 Elektrik motoru

Şekil 4.8'deki motor gövdesi dönme hareketi yaptığı zaman motorun ağırlığı altında yaylar bir miktar kasılır ve sistem statik denge konumuna gelir [15]. Bu durumda motorun mil eksenini O konumunda bulunur. Her birinin yay katsayısı k olan dört yay üzerine oturtulmuş bu elektrik motorunun tabii frekansı bulunmak istendiğinde, aşağıdaki yol izlenmelidir.

Denklem 4.18'den  $J_0 \cdot \ddot{\varphi} + \underbrace{4a^2k}_{k_b} \cdot \varphi = 0$

Denklem 4.19'dan  $w_n = \sqrt{\frac{4a^2 \cdot k}{J_0}} = 2a \sqrt{\frac{k}{J_0}}$

Denklem 4.16'dan  $f_n = \frac{a}{\pi} \sqrt{\frac{k}{J_0}}$

#### 4.6.2. Sönümlü serbest titreşimler

Serbest titreşim, sistemin statik denge konumundan uzaklaştırılıp bırakılması halinde yaptığı periyodik harekettir. Sistemde, sürtünme olması halinde titreşim zamanla azalır. Bu durum, kısa süreli ( Geçici ) hareket olarak adlandırılabilir. Sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [16].

$$x_c = e^{-\zeta \omega_n t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) \quad (4.20)$$

Burada;

- $x_c$  : Serbest hareketin genliği
- $\zeta$  : Sönüm faktörü
- $\omega_n$  : Tabii dairesel frekans
- $\omega_d$  : Sönümlü tabii dairesel frekans
- A, B : Keyfi sabitler

#### 4.6.3. Zorlanmış titreşimler

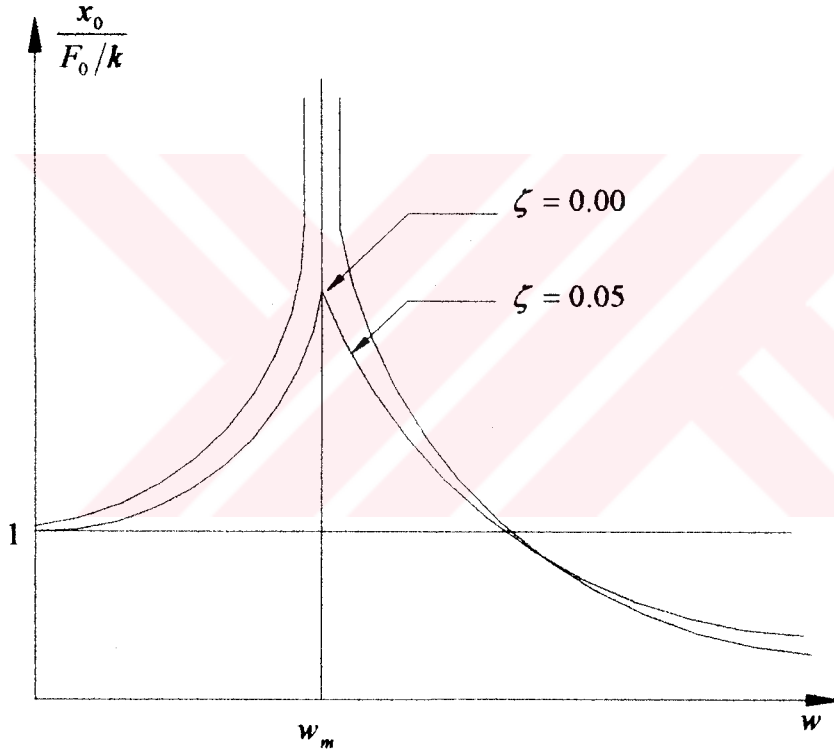
Genellikle  $F(t) = F_0 \sin \omega t$  veya  $F_0 \cos \omega t$  şeklindeki dış kuvvetlerin sisteme etkimesi halinde, titreşim hareketi zorlanmış titreşim olarak tarif edilir. Zorlanmış titreşim hareketinde, sistem kendi tabii frekansında olduğu kadar, tatbik edilen dış kuvvetin frekansı ile de titreşmeye zorlanır. Sürtünme olması halinde, hareketin tatbik edilen sinüzoidal dış kuvvetin ihtiva ettiği bölümü zamanla söner. Neticede sistem, ilk şartlardan ve kendi tabii frekansından bağımsız olarak, tatbik edilen dış kuvvetin frekansı ile titreşir. Dış kuvvetin tesirinde meydana gelen titreşime, düzgün titreşim hali veya tepki denir [16]. Bu durumda sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$x_p = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi) \quad (4.21)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \quad (4.22)$$

Burada;  $x_p$  : Düzgün titreşim hareketinin genliği  
 $F_0$  : Tatbik edilen dış kuvvetin şiddeti  
 $k$  : Yay katsayısı  
 $m$  : Sistemin kütlesi  
 $c$  : Sönüm katsayısı  
 $w$  : Tatbik edilen dış kuvvetin frekansı  
 $\phi$  : Faz açısı

#### 4.7. Rezonans



Şekil 4.9 Değişken frekans ve sabit genlikli bir dış kuvvet için  $\zeta$  (Büyütme çarpanı) değerine karşılık periyodik dış kuvvetin frekansının bir fonksiyonu olarak genlik

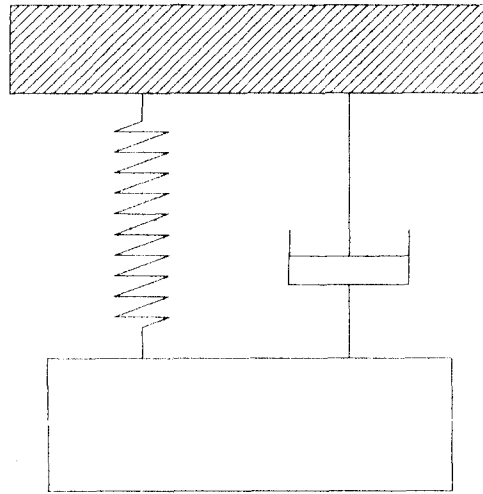
Uygulanan dış kuvvetin frekansının, sistemin tabii frekansına eşit olması durumunda rezonans meydana gelir. Şekil 4.9'da görüleceği üzere, rezonans olduğu zaman sistemin genliği sınırsız olarak artar. Bu durum, sisteme sönüm elemanı eklenerek kontrol altında tutulabilir. Rezonans, titreşimin meydana geldiği sistemlerde istenmeyen bir durumdur.

**Tablo 4.1** Sönümlü titreşimlerin rezonans parametreleri

$\zeta$	$w_m/w_0$	$A_m/A_0$
$1/\sqrt{2}$	0	1
1	0.707	1.15
2	0.935	2.06
3	0.973	3.04
5	0.990	5.03
$\zeta \gg 1$	$1 - \frac{1}{4\zeta^2}$	$\zeta \left[ 1 + \frac{1}{8\zeta^2} \right]$

Rezonans frekansında tahrike dilen bir sistem, en ufak bir uyarıya çok yüksek genlikte cevap verir; bu durum rezonansın özelliğidir. Şekil 4.10'daki yay\_damper\_kütle sisteminde, titreşim genliğinin uyarı kuvveti genliğine oranı denklem 4.23'deki gibidir.

$$\frac{x_0}{F_0} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[ \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 - 4\zeta^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right]}} \quad (4.23)$$

**Şekil 4.10** Basit bir yay-damper-kütle sistemi

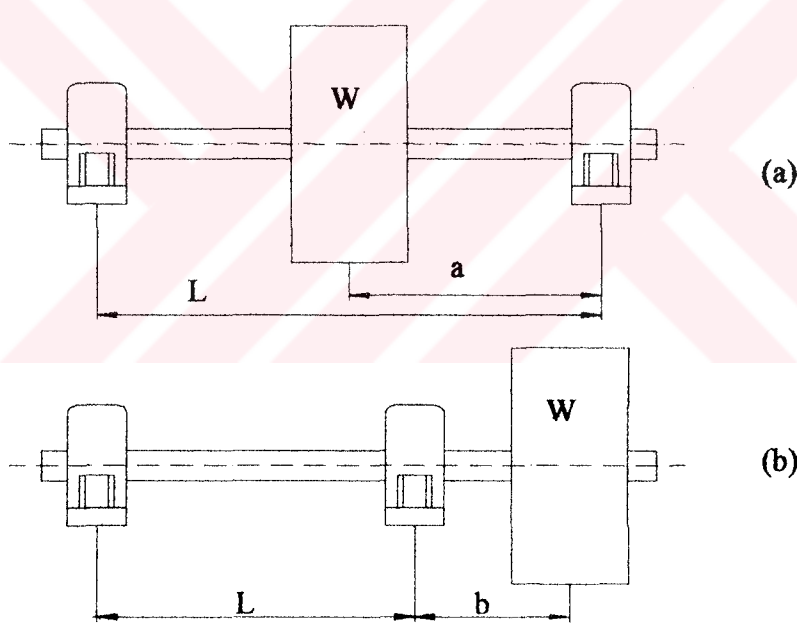
Denklemler 4.23'deki;

$$\frac{1}{\sqrt{\left[ \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 - 4\zeta^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right]}} \quad (4.24)$$

ifadesi büyütme çarpanı olarak bilinir.

#### 4.8 Mollerde Kritik Hız

Bir şaftın, rezonans frekansına eşit dönme devrine kritik hız denir. Kritik hız, makinelerde, fanlarda ve türbinlerde büyük bir önem arz etmektedir.



Şekil 4.11 İki tip fan gösterimi

Şekil 4.11.a'daki fan için kritik hız aşağıdaki gibidir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3EIgL}{Wa^4} \left[ \frac{1}{\left( \frac{L}{a} - 1 \right)^2} \right]} \quad (4.25)$$

Şekil 4.11.b'deki fan için kritik hız aşağıdaki gibidir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3EIgL}{Wb^3} \left[ \frac{1}{\left(\frac{L}{b}-1\right)^2} \right]} \quad (4.26)$$

Bu denklemlerde;

$E$  : Elastikiyet modülü

$I$  : Kesit alan elastikiyet modülü

$g$  : Yerçekimi ivmesi

$W$  : Rotorun ağırlığı

Görüleceği üzere denklem 4.25 ve denklem 4.26'da milin ağırlığı hesaba katılmamıştır. Milin ağırlığının da hesaba katılmasıyla elde edilebilecek doğal frekans aşağıdaki gibidir.

$$\omega \cong \frac{\omega_m \cdot \omega_n}{\sqrt{\omega_m^2 + \omega_n^2}} \quad (4.27)$$

#### 4.9. Yüzen Cisimlerin Titreşimleri

Eğer yüzen bir cisim hafifçe bastırılırsa veya denge konumundan hafifçe yukarı kaldırılırsa, bu cisme yer değiştiren sıvının ağırlığına eşit bir geri getirici kuvvet etki eder. Bu da, periyodik bir hareket oluşturur. Bu durum, eğer yüzen cismin sıvının yüzeyini kesen kısmı sabit bir kesit alanına sahip ise basit olarak hesaplanabilir.

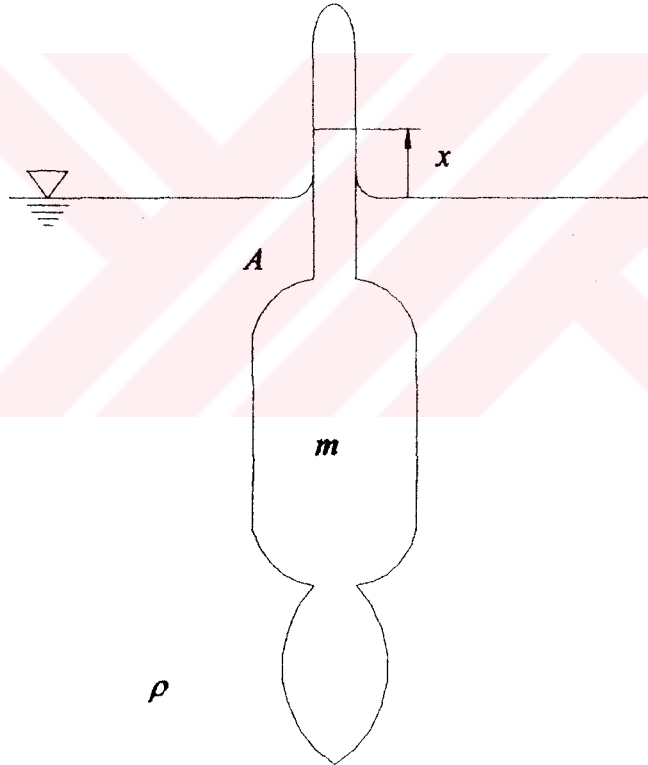
Şekil 4.12'da gösterilen hidrometrenin kütlesi  $m$ , kesit alanı  $A$  ve sıvının yoğunluğu  $\rho$  olarak alındığında, hidrometre normal yüzme seviyesinin  $x$  kadar üzerindeyse, yer değiştiren sıvının hacmi  $A \cdot x$  olur. Böylece Newton kanununa göre;

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \underbrace{\rho g A}_k x = 0 \quad (4.28)$$

yazılabilir. Buradan da, dairesel frekans ve sistemin periyodu aşağıdaki gibi bulunur.

$$w = \sqrt{\frac{\rho g A}{m}} \quad (4.29)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g A}} \quad (4.30)$$



Şekil 4.12 Normal yüzme konumundan ayrıldığında düşey olarak titreşme kabiliyetine sahip bir hidrometre

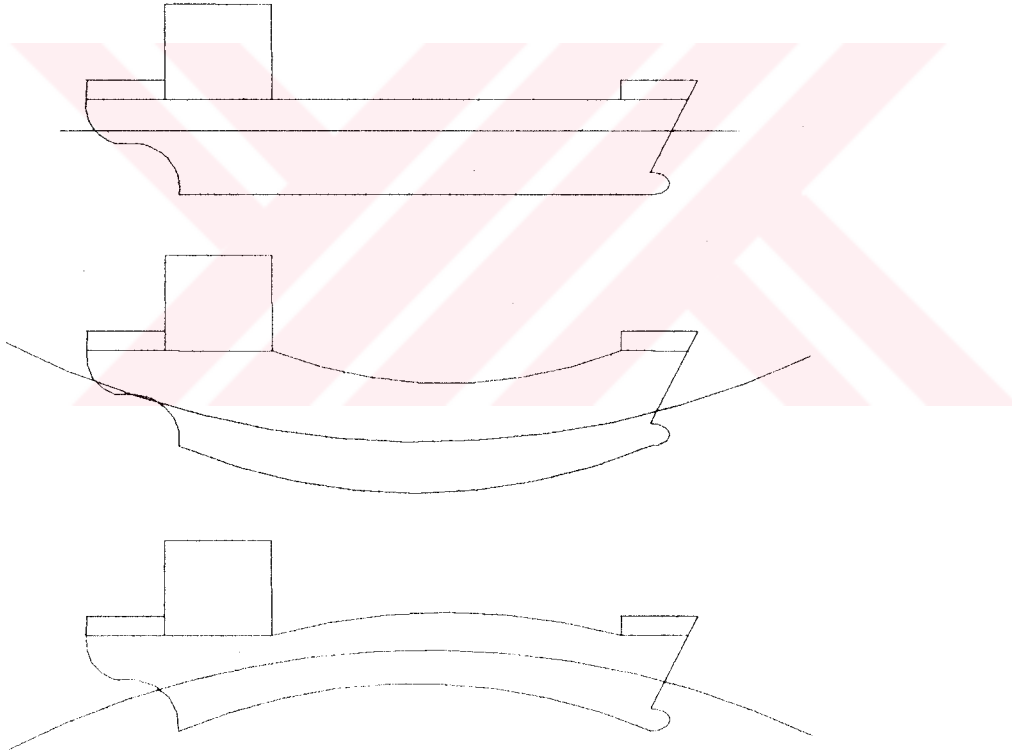
Daha geniş bir ölçekte, böyle bir olay bir gemide de ortaya çıkabilir. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken nokta, geminin batan kısmının kütlesi, suya batan kısmının yüksekliği  $h$  iken,  $m = \rho g h$  olur. Bu durumda, geminin titreşim periyodu ve tabii frekansı aşağıdaki gibi olmaktadır.



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (4.31)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (4.32)$$

Gemilerin tabii frekanslarının bilinmesi, istenmeyen hasarların engellenmesi açısından önemlidir. Çünkü, tabii frekansları dalgaların frekanslarına uyan gemilerde aşırı titreşim meydana gelir [17]. Buda, malzemenin yorulmasına, hatta plakalarda kaynakların atmasına neden olabilir. Şayet, bu durum suyla temas eden plakalarda meydana gelirse, çok vahim sonuçlar doğurabilir.



Şekil 4.13 Aşırı abartılı çizilmiş gemi strüktürel hareketleri ve dalgalar

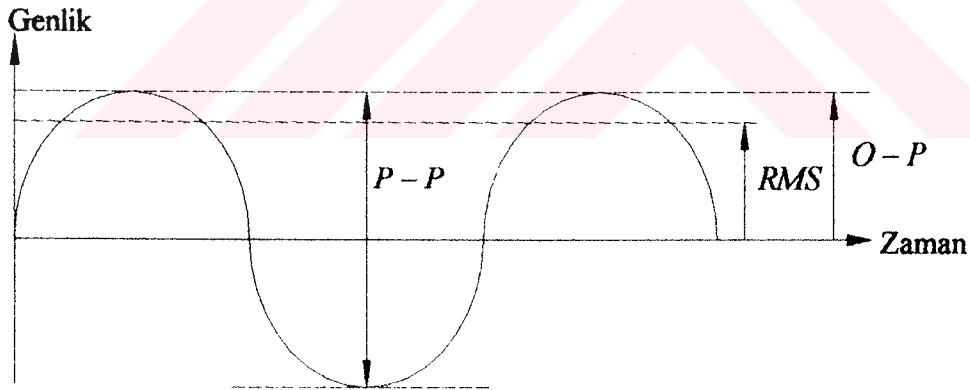
Gemi ana makinelerinde ve tahrik sistemlerinde de titreşimler meydana gelir. Bunlar, makine üzerinde genellikle düşey yönde ölçülen titreşimlerdir. Bu titreşimler akselerometre ( İvme ölçer ) olarak tanımlanan algılama aparatları ile, ivme cinsinden ölçülüp, spektrum analizörü olarak bilinen işleme aygıtları ile işlenerek

titreşim spektrumları haline dönüştürülür. Bu titreşim spektrumu grafiklerinde, dikey ekseninde titreşim hızının genliği, yatay ekseninde titreşim frekansı gösterilir. Titreşim spektrumu grafiklerinden rulman, kaplin, şase arızaları, volan-kam mili tahrik dişli grupları ile ilgili sorunlar tanımlanabilir [17]. Ancak, içten yanmalı motorlarda meydana gelen vuruntuların diğer titreşimleri örtmesi nedeniyle, yataklama ve diğer mekanik sistemle ilgili fazla bilgi elde edilemez.

Eğer, titreşim spektrumu grafiğinde, dikey eksen olarak titreşim hızının genliği, yatay eksen olarak da açısı çizilmişse, bir dizel makine ile ilgili yüksek seviyede bilgi almak mümkün olur. Ancak, bunun için arızaların hangi titreşim seviyesi ve hangi krank açısında olduğunun bilinmesi gerekir.

#### 4.10. Titreşim Mühendisliğinde Kullanılan Terimler

Titreşim mühendisliğinde kullanılan birimleri tanımlayabilmek için önce bazı tanımlar yapmak gerekmektedir.



Şekil 4.14 Sinüzoidal olarak salınan bir kütlenin titreşimi

P-P ( Peak-Peak ); maksimum, üst tepeden alt tepeye genlik,

O-P ( 0-Peak ); maksimum tepe genlik,

RMS; efektif değer.

Deplasman ( Salınım ) ( $y$ )  $\rightarrow mm$  veya  $\mu m$  ( P-P, RMS )

Hız ( $dy/dt$ )  $\rightarrow mm/s$  ( O-P, RMS )

İvme ( $d^2y/dt^2$ )  $\rightarrow$   $mm/s^2$  ( O-P, RMS )

Elektrik mühendisliğinde de çok kullanılan bu ifadeler, birbirlerine şu şekilde bağlıdır;

$$RMS = 0.7071 \times (O - P)$$

$$P - P = 2 \times (O - P)$$

Avrupa ve ISO standartlarına uyan ülkelerde titreşim genliği genellikle ( $mm/s$  RMS) kullanılarak, ABD'de ise ( $inc/s$  O - P) kullanılarak ifade edilir. Bu nedenle Amerika'da tanımlanmış bir titreşim genliğini Avrupa normlarına dönüştürmek için önce  $inc/s$ 'yi  $mm/s$ 'ye, daha sonrada O - P'yi RMS'ye çevirmek gerekecektir. Örneğin; bir Amerikan kullanma kılavuzunda, bir noktada kabul edilebilir titreşim  $0.075$  ips O - P ( ips; inch per second ) olarak verilmişse, bunun Türkiye'de kullanılan normlar bazında ifade edilmek istendiğinde aşağıdaki dönüşümlerin yapılması gerekecektir.

$$0.075 [inc/s] \times 25.4 [mm/inc] (O - P) = 1.905 [mm/s] (O - P)$$

$$1.905 [mm/s] (O - P) \times \frac{RMS}{0.7071} = 2.7 [mm/s] RMS$$

Titreşim mühendisliğinde en önemli unsurlardan biri de, bir titreşimin frekansıdır. Frekans Hz ( Hertz ), cpm ( Cycles per minute, dev/dk ), cps ( Cycles per second, dev/s ) ve order ( Çarpan, dönme devrinin katları ) frekansı tanımlamada kullanılan birimlerdir.

Hz - dev/dk dönüşümü için kullanılan tanımlar aşağıda gösterilmektedir.

$$1 Hz = 1 dev/s$$

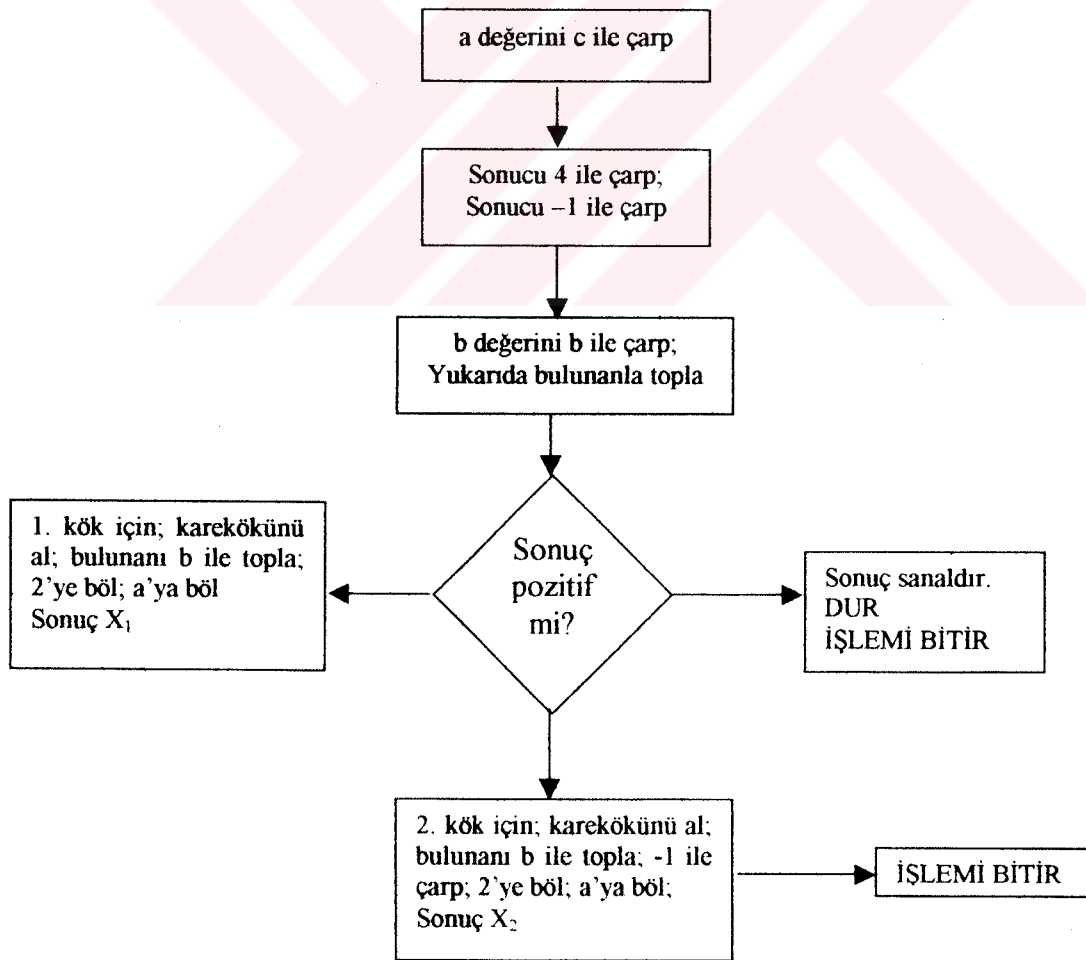
$$1 Hz = 60 dev/dk$$

#### 4.11. Hızlı Fourier Dönüşümü ( FFT )

FFT ( Fast Fourier Transform ), bir zaman eğrisini zaman düzleminden frekans düzlemine dönüştürme işlemini, dijital olarak hızlı yapabilme yeteneği olan algoritmaya verilen addır [9]. Algoritma, bir matematik problemini çözmek için takip edilen yoldur. Ancak, FFT bir matematiksel çözüm değildir. Fourier dönüşümünü bilgisayar ortamında hızlı yapmak için kullanılan bir algoritmadır. Örneğin;  $ax^2 + bx + c = 0$  denkleminin çözümü olan,

$$x_1, x_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.33)$$

değerinin hesaplanmasının algoritması şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Algoritma ile bir denklemin çözümü

Fourier dönüşümünün elle yapılması pratik olarak imkansızdır. İlk zamanlar, bilgisayarlar aracılığıyla Fourier dönüşümünün yapılması da uzun zaman alan bir işlemdi. Ancak, Tukey'in 1953'de yayınladığı bir makalede, 10,240 basamaklı bir işlemi 1.024 basamaklı bir işleme indirgeyebilen bir algoritma geliştirdiğini gösterdiğinde, Fourier dönüşümünün de önü açılmış oldu.

#### 4.11.1. Fourier dönüşümünün formları

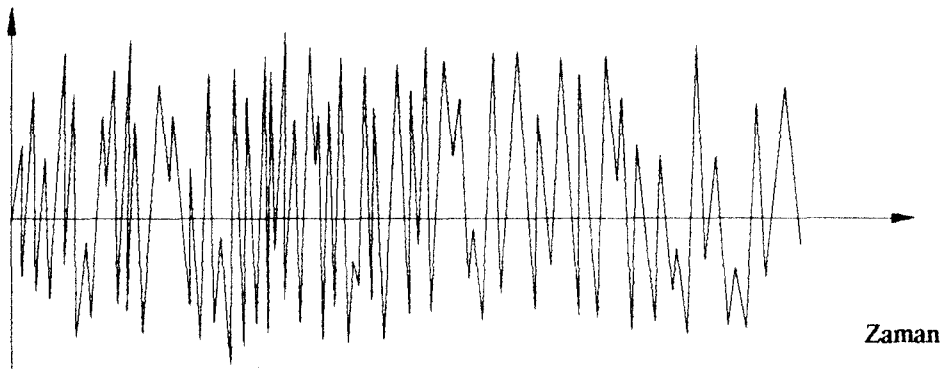
FFT, zaman içinde, fourier serileri, direkt fourier dönüşümü ve devamsız fourier dönüşümünden sonra geliştirilmiştir. Fourier dönüşümünün dört formu vardır [18].

- Fourier serileri
- Direkt Fourier dönüşümü
- Devamsız Fourier dönüşümü ( Discrete Fourier Transform )
- Hızlı Fourier dönüşümü ( Fast Fourier Transform )

#### 4.11.2. Fourier serileri

Jean Baptiste Joseph Fourier'in yapmış olduğu matematiksel buluş sayesinde, bir rasgele titreşim fonksiyonu  $f(t)$ , denklem 4.34'de gösterilen fonksiyonun reel kısmı ile tanımlanabilir.

Genlik

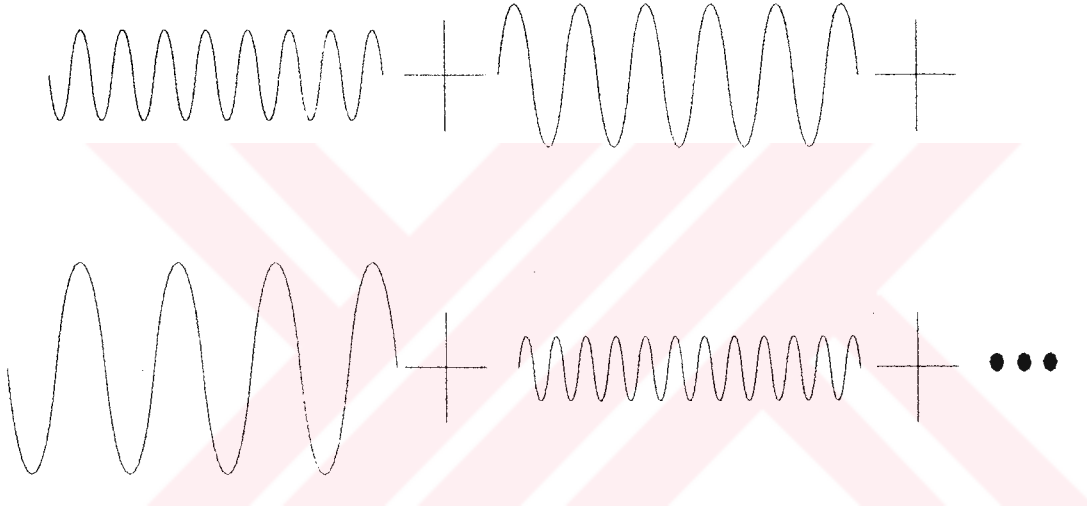


Şekil 4.16 Rasgele titreşim fonksiyonu  $f(t)$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \cdot e^{jn\omega t} \quad (4.34)$$

$$C_n = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(\zeta) \cdot e^{-jn\omega \zeta} d\zeta \quad (4.35)$$

Şekil 4.16'daki gibi bir rasgele  $f(t)$  fonksiyonu, şekil 4.17'de gösterildiği gibi sonsuz sayıda değişik frekans, genlik ve fazda sinüzoidal titreşim fonksiyonlarının toplamından oluşmaktadır.



Şekil 4.17 Sonsuz sayıda değişik frekans, genlik ve fazda sinüzoidal titreşimler

Böylece  $f(t)$ , denklem 4.36'daki gibi gösterilebilir.

$$f(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) + a_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2) + a_3 \sin(\omega_3 t + \theta_3) + \dots \quad (4.36)$$

Fourier serileri periyodik bir zaman sinyali üzerinde işlem yapar. Bu zaman sinyali, sonsuz zamanda aşırı tekrarlanan ve yinelenen dalga formundadır. Fourier, zaman sinyalinin, kosinüs ve sinüs fonksiyonlarının toplamına eşdeğer olduğunu göstermiştir. Sonuç, her hangi bir dalga şekli ne kadar uzun olursa olsun ( sonsuz değil ), harmonik bileşenlerin toplamının hesabı olarak gösterilebilir. Dalga şekli denkleme tanıtıldıysa, fourier katsayıları ve onların değerleri kolayca hesaplanabilir. Bu katsayılar aynı zamanda kendi dalga şeklinde grafik olarak da hesaplanabilir

#### 4.11.2.1. Fourier katsayıları

Fourier katsayılarının hesaplanması, zaman domeninden ( Alan ) frekans domenine bir matematiksel dönüşüm olarak tanımlanır [18]. Fourier serilerinden önemli bir gerçek ortaya çıkmaktadır. Bilgi kaybı olmaksızın frekans domeninden zaman domenine dönüşüm mümkündür ve frekans katsayılarından orijinal dalga inşa edilebilir. Fourier serileri, periyodik dalga formları üzerinde frekans analizi yapmak için uygundur.

#### 4.11.3. Direkt fourier dönüşümü

Bir  $f(t)$  fonksiyonunu, frekans düzlemine çevirmekte kullanılan temel denklem aşağıdaki gibidir.

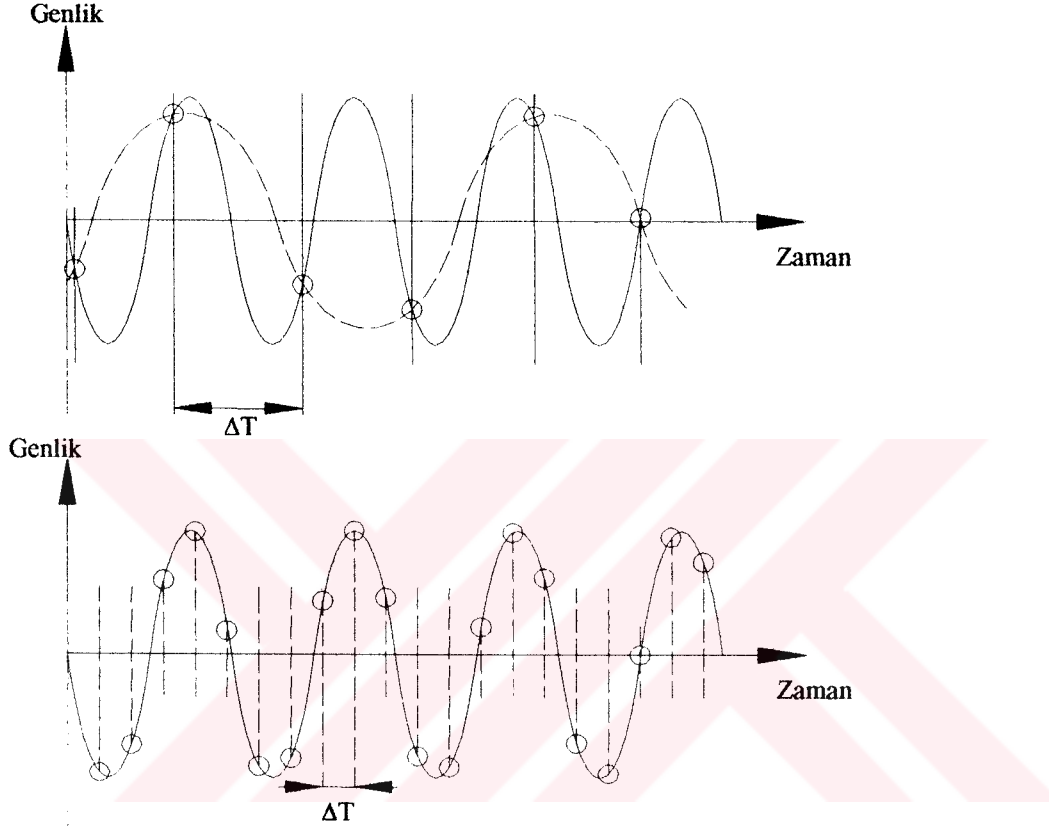
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (4.37)$$

Bu denkleme direkt fourier dönüşümü ( DFT), frekans düzleminde zaman düzlemine geri dönüş için kullanılan denkleme de ters fourier dönüşümü denir. Ters fourier dönüşümü denklem 4.38'de gösterilmiştir [9].

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (4.38)$$

Ne fourier serisi ne de fourier dönüşümü dijital bilgisayarlarla hesaba müsait değildir. Bu sorunun üstesinden gelmek için direkt fourier dönüşümü ( DFT ) geliştirilmiştir. Her ne kadar bir dijital bilgisayara sahip olmasa da, 19. yüzyılın ünlü Alman matematikçisi Wilhelm Friederich Gauss direkt fourier dönüşümünün yapılabileceğini düşünmüştür. Direkt fourier dönüşümü, zaman domeni içerisinde sinyal numunesini işler ve bu numuneden frekans domeni içerisinde spektrum üretir. Ortaya çıkan spektrum fourier serisinin gerçeğe yakın bir tahminidir. Direkt fourier dönüşümünün anahtar dalga formu numunesinin varlığıdır.

Eğer numune oranı yeterli miktardaysa ( Yeterli sayıda titreşim ölçümü yapıldıysa ), sinyalin şeklinin makul bir gösterimi sağlanabilir. Aksi halde, gerçek sinyali temsil etmeyen bir dijitalleştirme işlemi meydana gelebilir. Şekil 4.18'deki gibi sinüzoidal dalga frekansı çok farklı bir dalga olarak algılanabilir.



Şekil 4.18 Dalga frekansında yalancı data ( Aliasing )

Aliasing ( Yalancı data ) oluşumunu önlemek için, data ölçüm alma hızı (Frekansı) alınacak titreşim ölçümleri içinde mevcut olan en yüksek frekanstan daha düşük alınır, aslında data olmayan frekanslar spektrumda ( Tayf ) görünür. Nyquist kriteri olarak bilinen data ölçüm prensibi, data toplama hızının en yüksek ölçüm frekansının en az iki katından daha fazla olmasını öngörür. Birçok elektronik devrede, bu katsayı 2.56 olarak alınır. Bu işlem, modern titreşim ölçüm cihazlarında otomatik olarak yapılmaktadır. Ölçüm yaparken, önce cihaza 0 ila hangi frekans aralığında ölçüm yapılacağı girilir. Örneğin, 1465  $d/dk$  dönen bir motor üzerinde 0–250 Hz aralığında bir ölçüm alınacaksa, cihaz otomatik olarak  $250 \times 2.56$  işlemini yapıp 640 Hz bulur. Bir saniyede 640 ölçüm yapılacaksa, ölçüm aralığı  $1/640 sn$  veya



0.0015625 sn olarak bulunur. Şayet bu ölçüm aralığı yerine, örneğin, 225 Hz hızı ile ölçüm yapılmış olsaydı: 1/225 sn veya 0.004444 sn bulunurdu. Bu aralıklarla yapılacak ölçümlerde, spektrumun sağ tarafında aslında var olmayan frekanslar (Pikler ) matematiksel olarak oluşturulmuş olurdu [9].

İnsan gözünün, hareketi kesintisiz görebilmesi için ölçüm aralığının 0.042 sn olması gerekmektedir. Ancak, bu ölçüm aralığı insan gözünün görmesi için yeterli olmasına rağmen dönen bir mil için yavaş kalmaktadır. Bu nedenle, mil sanki geriye dönüyormuş gibi görünür. Titreşim ölçüm cihazlarında, ölçüm aralığının ayarlanması işlemini anti-aliasing filter denilen bir devre tarafından yapılmaktadır. Bu devre, data toplama sinyalinin yarısından daha yüksek frekansa sahip sinyalleri elimine ederek aliasing olayının önüne geçer.

#### 4.11.4. Kesin fourier dönüşümü

Fourier dönüşümünün genel ifadesi denklem 4.37'de gösterilmiştir. Bu denklemde, zamanın 0'dan başlayacağından hareketle integral 0 ila  $+\infty$  arasında alınarak, bilgisayarla hesap yapmaya uygun bir forma getirildiğinde elde edilecek denklem aşağıdaki gibi olur.

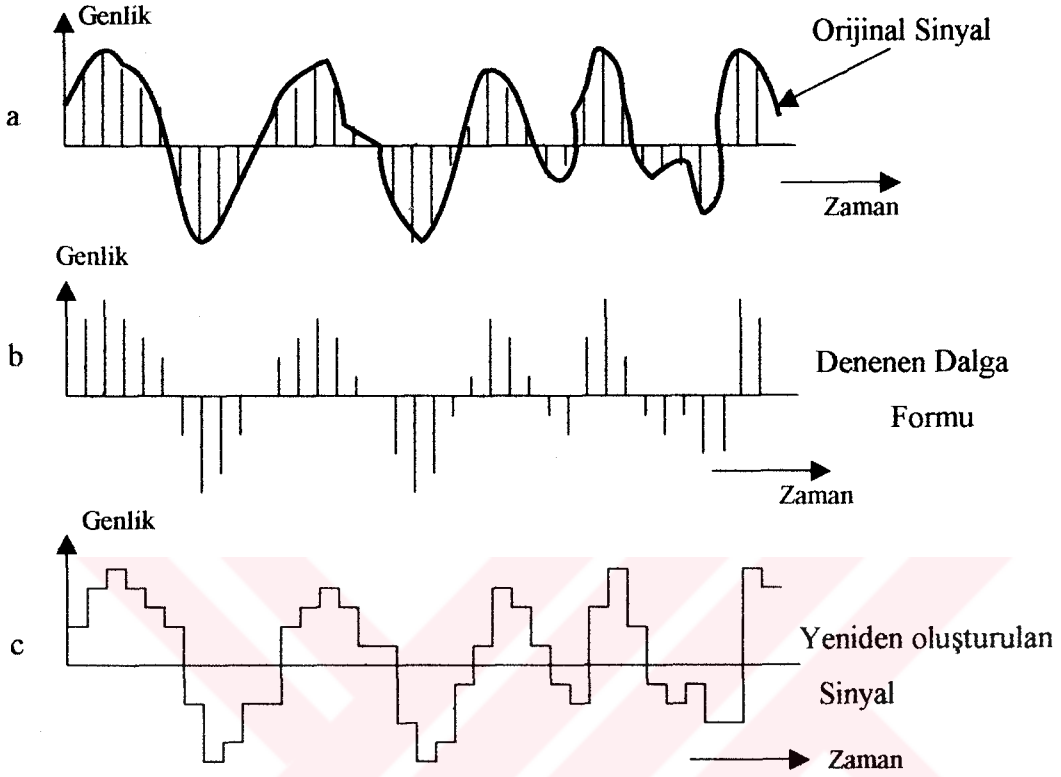
$$F(m) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-2\pi m j \cdot \Delta t \cdot n \cdot \Delta t} \quad (4.39)$$

Bu denklem,  $N$  adet tanımlanmış  $m \cdot \Delta f$  frekansında,  $x(n)$  adet tanımlanmış  $n \cdot \Delta t$  zamanında  $S(m)$  spektrum değerini verir.

#### 4.12. Analog Dijital Dönüşümü

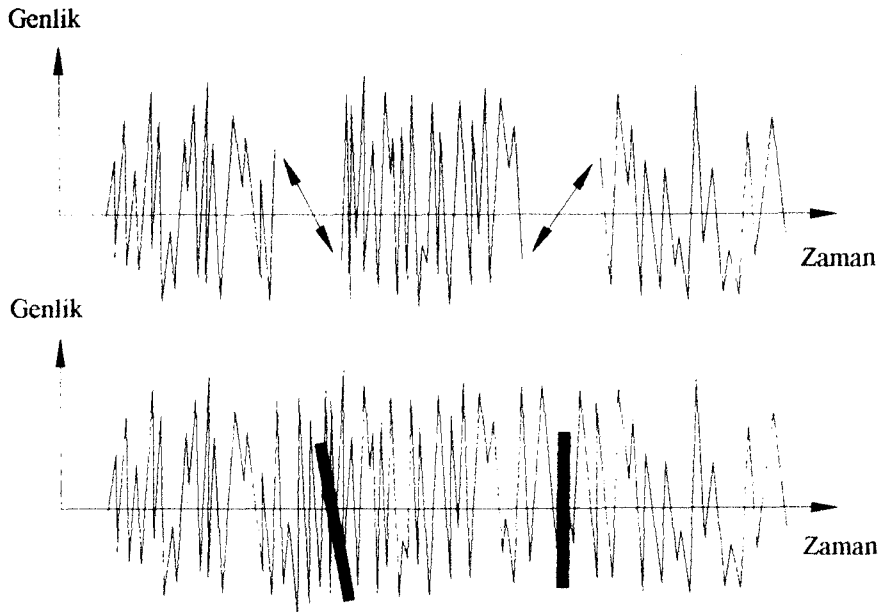
FFT analizinde birinci adım, güncel numune alma işlemidir. Alınan numuneler analogdur, dijital değildir. Bir analog sinyal şekil 4.19.a'da gösterilmektedir. Bu analog sinyal şekil 4.19.b'de de gösterildiği gibi belli zaman aralıkları data alınarak,

analog dijital dönüştürücü devresi (ADC) yardımıyla dijitalleştirilebilir. Bu yapılan işlem tamamen bir elektronik işlemdir [18].



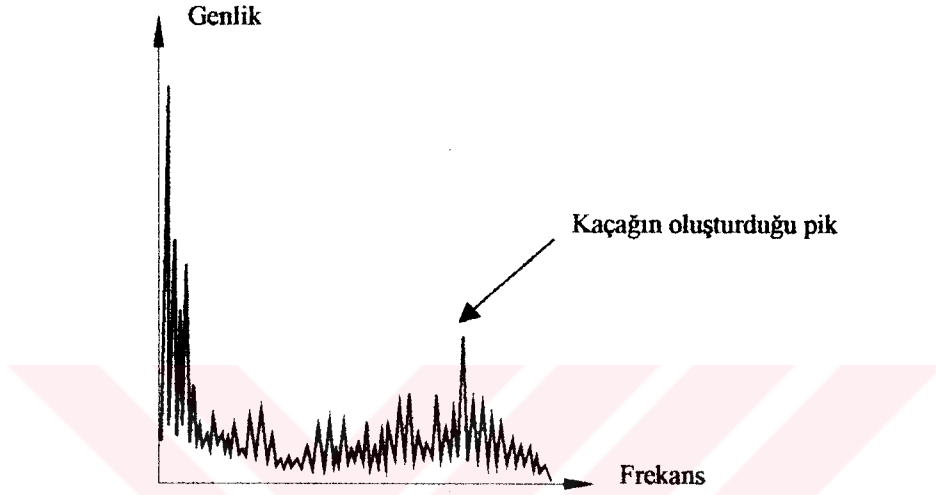
Şekil 4.19 Analog dijital dönüşümü

#### 4.13. Kaçak ( Leakage )



Şekil 4.20 Zaman sinyalleri işlenirken oluşan kaçak

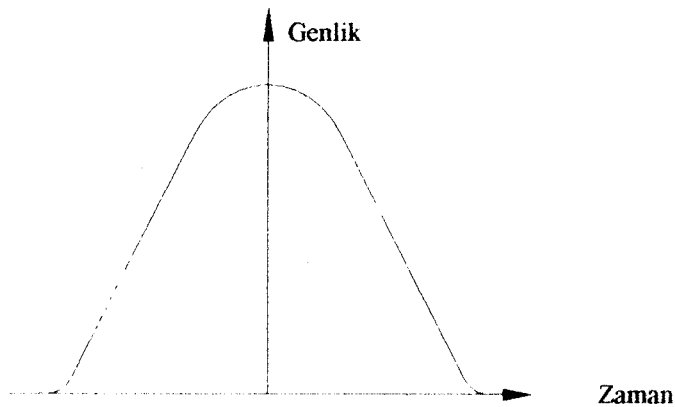
Spektrum analizörleri, bloklar halinde hafızasında sakladığı zaman sinyallerini işleyerek frekans spektrumlarını oluştururlar. Ancak, şekil 4.20.a'da da görüleceği üzere hafızada saklanan zaman sinyalleri birbirleriyle uyumlu olmadıkları için, bunlar işlenirken verilerin başlangıç ve bitiş noktalarında sıçramalar meydana gelir. Zaman düzlemindeki bu sıçramalar, frekans düzleminde aslında var olmayan pikler meydana getirirler. Buna kaçak denir.



Şekil 4.21 Kaçağın meydana getirdiği frekans düzlemindeki pik

Kaçığı önlemek veya etkisini küçültmek için, pencere aralıkları (Windowing) kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygınları, dikdörtgen pencere aralığı (Rectangular windowing) ve Hanning pencere aralığıdır. Dikdörtgen pencere aralığı, veride hiçbir kayıp oluşturmadan zaman düzleminde frekans düzlemine çevirebilir.

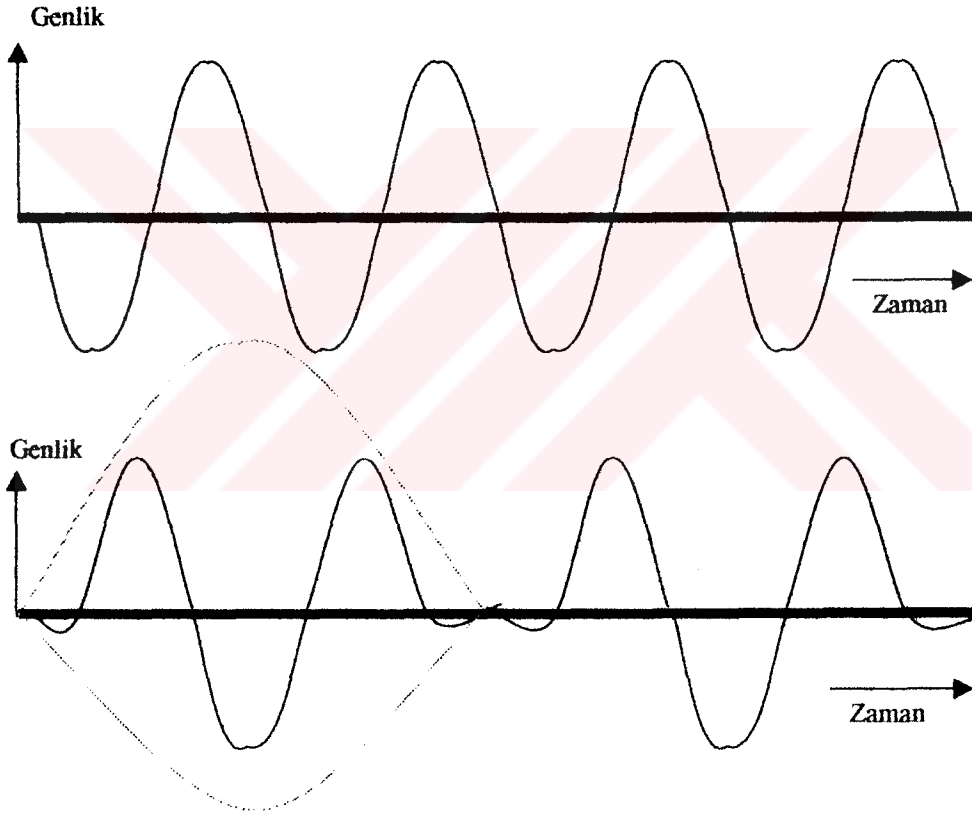
#### 4.13.1. Hanning penceresi



Şekil 4.22 Hanning penceresi

$$|1 + \cos^2 f(x)| \quad (4.40)$$

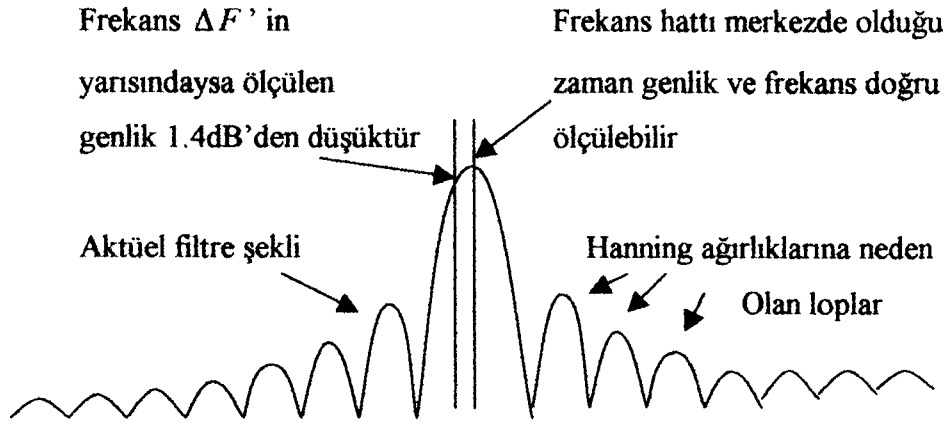
Şekil 4.22'de görülen bir kosinüs dalgası formu şeklinde olan Hanning penceresi adını mucidinden almıştır. Denklem 4.40'da gösterilen hanning pencere fonksiyonu, örneklenen sinyallerin dijital işlenmesi esnasında, zaman düzlemindeki kaydın başlangıç ve bitiş titreşimlerinin değerinin ne olduğunu göz önünde tutmaksızın sıfır olmaya zorlar. Böylelikle, sinyal kesikliklerinde derece derece bir geçiş olmasını sağlarken, belli frekanslardaki enerjinin tam olarak ortaya çıkması yerine dağılmasına neden olur. Aynı zamanda, modülasyon genliğinin formu içerisinde analiz edilen dalga formuna biçim bozuklukları da ekler.



Şekil 4.23 Hanning penceresiyle oluşan biçim bozukluğu

Spektrum içerisindeki tali bantlardaki modülasyon, analizörün frekans dağılımını %50 azaltır. Böylelikle, ağırlıklandırılan hanning sinyalinin genlik ölçümü yanlış olabilir. Çünkü, ağırlıklandırma işlemiyle sinyal seviyesinin yarısı silinir. Sinyalin genliği halini alan bu proses ölçüm alınan zaman aralıklarında sabittir. Eğer sabit olmasa, genliğin hesaplanmasında, şekil 4.24'de gösterildiği gibi hata olabilir.

Şekil 4.24'ün sol kısmında gösterilen eğri, FFT analizör ile Hanning ağırlıklandırmasının ürünü olan aktüel şekil filtresidir. FFT analizörün her hattı bu eğrinin şekline sahiptir. Ancak şekilde sadece biri gösterilmektedir.



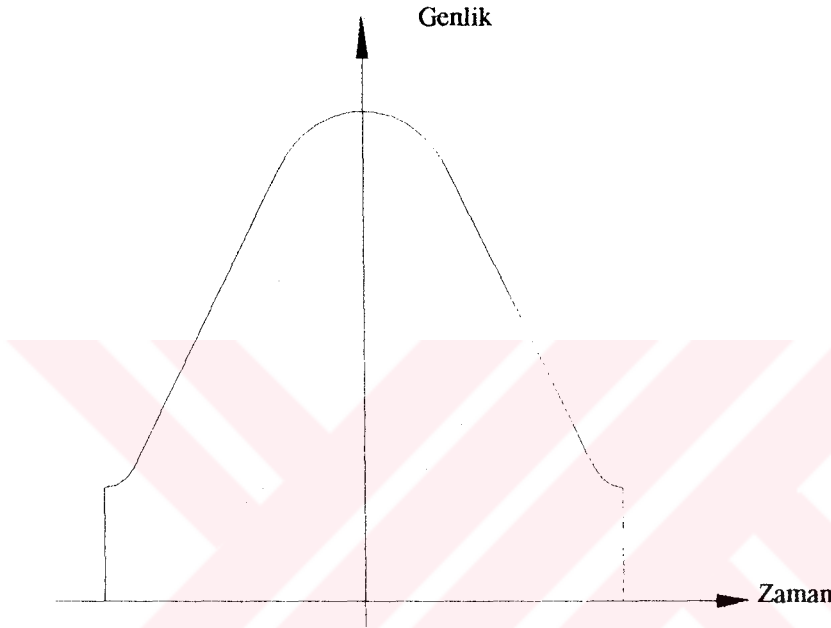
Şekil 4.24 Hanning ağırlıklandırması

Eğer bir sinyal bileşeni FFT hattının tam frekansındaysa, genliği doğru okunabilir. Fakat frekans  $\Delta F$ ' in yarısında (iki hat arasındaki mesafenin yarısı) genlik 1.4dB'den düşük okunabilir. Onların frekansına bağlı olarak, analiz edilen sinyal ile rasgele frekans miktarı 1.4dB kadar büyük genliğe sahip olabilir. Bunun nedeni, analiz yapan makinenin titreşim kaydı tuttuğu zaman nispeten yüksek çözünümde spektra kullanılmasıdır. Şekil 4.24'de ana loplardan düşük en yüksek tali loplara seviyeleri 32dB'tır.

Hanning penceresi, daima sürekli sinyallerle birlikte kullanılır. Asla süreksiz sinyallerle kullanılmamalıdır. Bunun nedeni şekil 4.24'ün sol tarafında gösterildiği gibi pencere şeklinde süreksiz sinyalin şekli bozuk olabilir. Süreksiz sinyalin frekansı ve faz miktarı onun şekliyle bağlantılıdır.

Ölçülen seviyede aynı zamanda bir bozukluk olabilir. Süreksiz sinyal Hanning penceresinin merkezinde olsa bile, Hanning ağırlıkları kullanılırken analizör uygulamaları genliği düzelttiğinden dolayı ölçülen seviye aktüel seviyenin iki katı kadar büyük olabilir.

Ağırlıklandırılmış aktüel Hanning sinyali burada sadece yarımıdır. Sinyalin diğer yarısı pencerelemeyle silinmiştir. Sinüzoidal gibi sarsıntısız ( düz ) ve devamlı bir sinyal ile problem olmaz. Fakat analiz etmek istediğimiz pek çok sinyalde makinenin titreşim kaydı muntazam değildir. Eğer zaman kaydının başında ve sonunda sinyal içerisinde küçük değişiklikler meydana gelirse, gerek en düşük seviyede analiz edilen gerekse büsbütün kayıt hatalı olabilir.



Şekil 4.25 Hamming penceresi

Hamming penceresi, hanning penceresinin bir dikdörtgen tabana oturtulmuş halidir. Çalışma prensipleri aynı olmasına karşın, frekans düzleminde hamming penceresinin ilk yan loplari 42 dB ( Desibel ) aşağı iken hanning penceresinin ilk yan loplari 32 dB aşağıdır. Böylece, hamming pencere yüksek sinyallere karşı daha iyi seçici olmaktadır. Ancak, diğer tüm yan loplari yüksek oluşu hamming penceresinin dezavantajıdır [9].

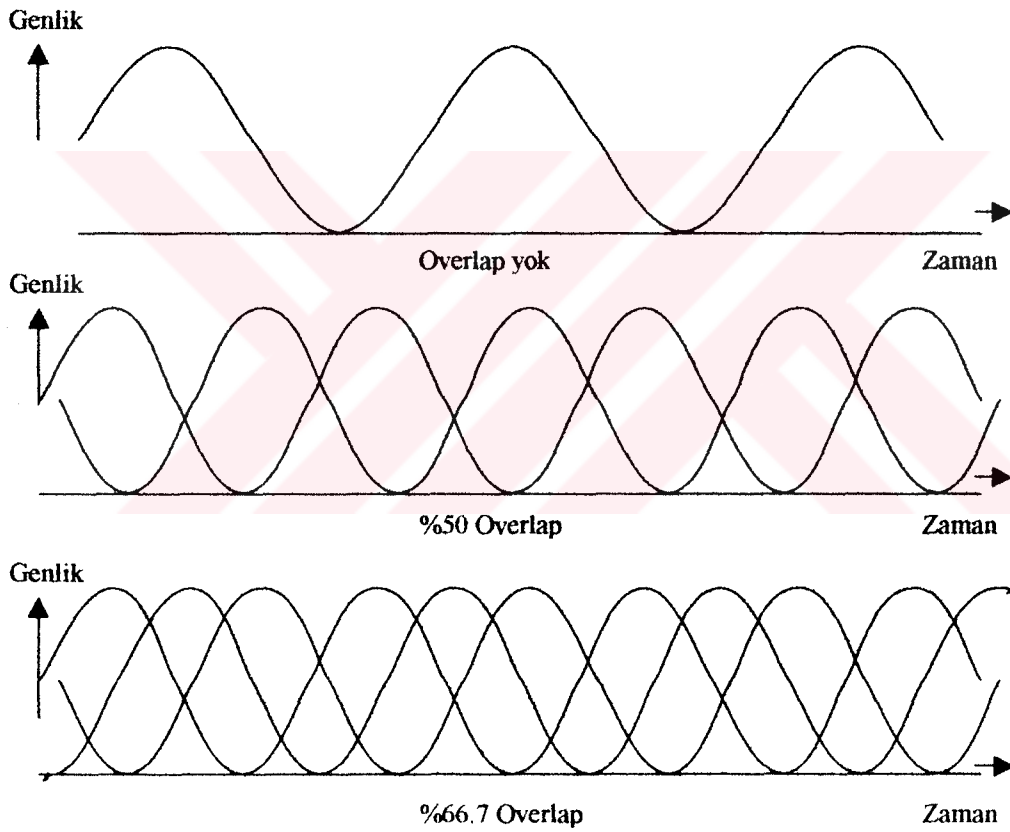
Logaritmik oran birimi olan desibel, mevcut bir güç değerinin seçilen bir referans güç değerine oranını logaritmik olarak ifade etmek için kullanılır.

$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_r} \right) \quad (4.41)$$

#### 4.14. Overlap İşlemi

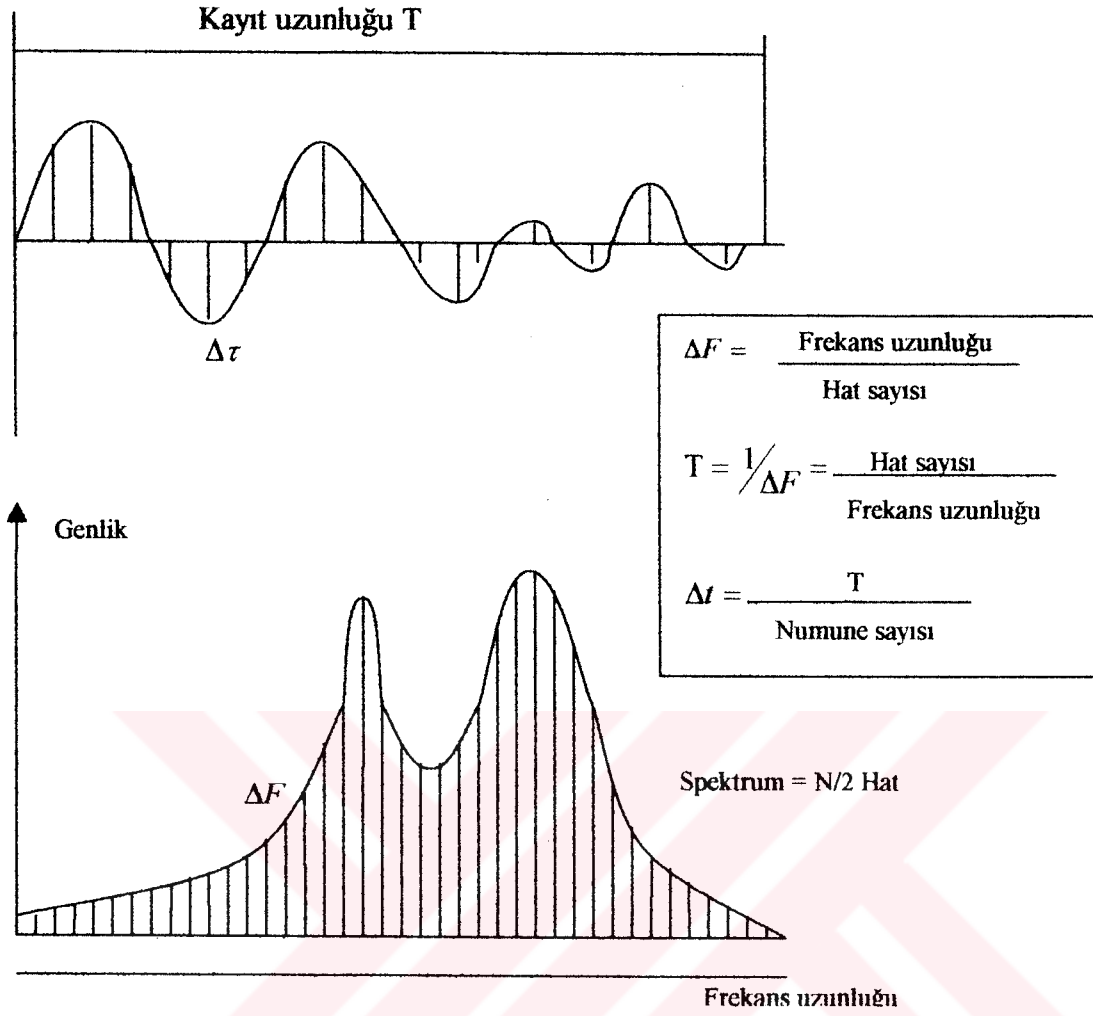
Eğer FFT hesabı için gereken zaman, zaman kaydı uzunluğundan daha kısaysa, overlap işlemi gerçekleştirilmiş olur. Eğer bu olay gerçekleşmezse, spektral hesaplarla analiz edilen sinyalin bıraktığı boşluklarda elde edilen veri geri kalacaktır.

Eğer overlap %66.7 ise, verinin tam zaman ağırlığı düz (açık) olur ve bir büyültücü overlap kullanmanın avantajı yoktur. Mekanizma analizi için toplanan veriler, uygun genlikte titreşim işi için %50 data overlapta kullanılır [18].



Şekil 4.26 Overlap tipleri

Burada, numunelerin sayısı, alınan numunenin oranıyla bağlantılıdır. Bunlar FFT'yi etkileyen, örnekleme oranı, örnek miktarı, zaman kaydı ve frekans çözünürlüğü arasındaki ilişkinin özetidir. Her saniyedeki örnek miktarı yani örnekleme oranı ile saniye olarak kayıt zamanıyla ( T saniye ) çarpılırsa, toplam örnek miktarı olan N bulunur. Bir FFT analizöründe N örnekleme miktarı,  $2^n$  olarak gösterilir.



**Şekil 4.27** FFT'yi etkileyen örnekleme oranı, örnek miktarı, zaman ve frekans çözünürlüğü arasındaki ilişki

Titreşim ölçüm cihazları, özellikle spektrum analizörleri, seçilen layn ( Line ) sayısına bağlı olarak belli sayıda ölçüm yaparlar. Örneğin, 400 laynlık bir spektrum alınacağı zaman analizör, 1024 adet data alır; bundan 512 adet spektrum noktası çıkarır; baştan ve sondan 112 adet datayı atar ve sonunda 400 laynlık bir spektrum elde edilmiş olur.

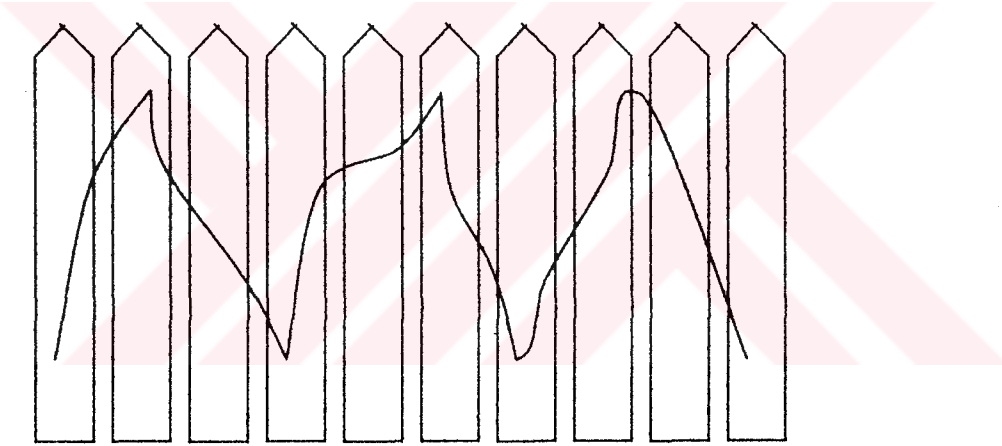
Frekans çözünürlüğü  $\Delta F$ , seçili frekans değerinin hat sayısına bölünmesiyle elde edilir. Buda  $1/T$  'ye eşittir. Aynı zamanda kayıt zamanı uzunluğu T,  $1/\Delta F$  'e eşittir. Buradan görülebilir ki, frekans çözünürlüğü arttıkça (  $\Delta F$  küçüldükçe ) kayıt zamanı uzunluğu artar. Bu sebepten dolayı yüksek çözünürlükte spektrum elde etmek için aynı oranda verinin uzun süre gözlenmesi gerekir.



#### 4.15. Tahta Parmaklık Etkisi ( The Picket Fence Effect )

FFT spektrumun, spektral seviyenin tahmininden ibaret olan özel frekanslardaki bir devamsız spektrum olduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu vesileyle, bu frekanslar belki de, FFT analizinin hatları arasında, sinyalin doğru spektrumu içerisindeki pik ( en yüksek ) noktalara ulaşabilirler. Bununla beraber, bir FFT spektrumu içerisindeki pik noktalar, olduğundan çok düşük veya çukur noktalar olduğundan daha yüksek ölçülebilir. Bu olaylar, çözünüm eğilimi hatası ( Resolution bias error ) veya genel olarak tahta parmaklık etkisi (The picket fence effect ) olarak adlandırılır.

İnterpolasyon işlemiyle, FFT'nin görünür çözünürlüğü ve doğru genliğinin artırılması mümkündür.



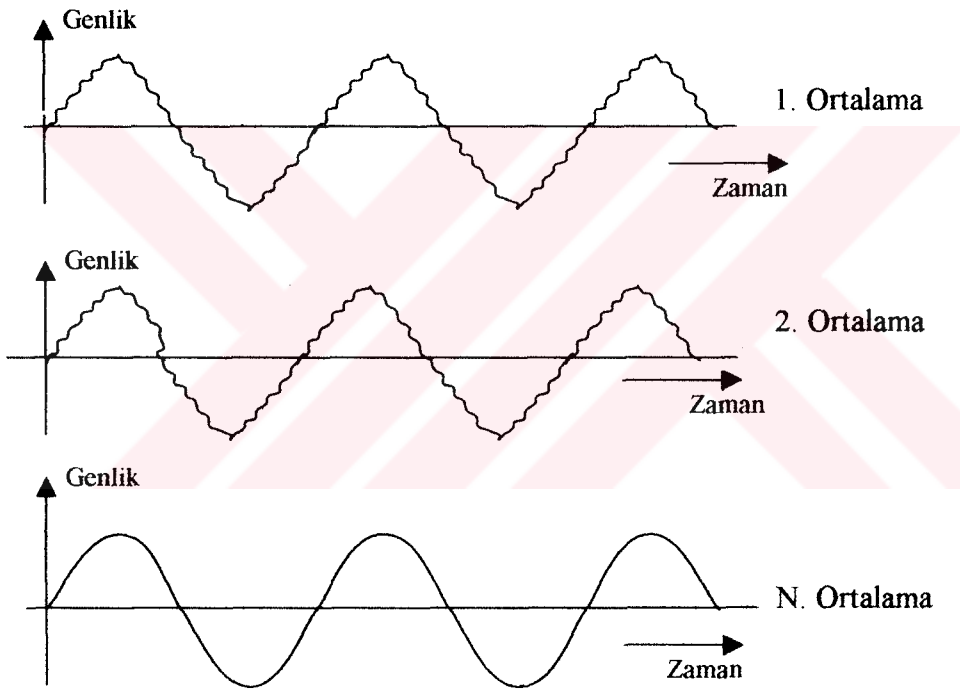
Şekil 4.28 Tahta parmaklık etkisi

#### 4.16. Ortalama ( Averaging )

FFT analizörünün önemli fonksiyonlarından bir tanesi de, artık çalışma spektrasının ortalamasını yapmaktır. Genelde, dönen bir makinenin titreşim sinyali tam olarak tespit edilemez. Çünkü makinenin üzerinde pek çok rasgele ses ( gürültü ) vardır. Gürültünün önceden ne yapacağı belli olmaz, spektrum şeklini değiştirir ve çoğu durumda ciddi olarak spektrumu bozabilir. Eğer spektranın serileri birlikte ortalanırsa, gürültü git gide düzgün bir şekil halini alacak ve sinyalin tespit edilen

kısının sayesinde spektral pikler sivrilecek ve onların seviyeleri daha doğru bir şekilde gösterilebilecektir.

FFT analizörün genel kullanımında ortalamanın iki tipi vardır. Bunlar lineer ortalama ve üslü ortalama. Lineer ortalama, spektranın numaralarını bir birine ekler ve sonra eklenen numaralar ile toplama böler. Bu, spektranın her hattı için doğrudur ve sonuç ana hat ile bir hat üzerindeki doğru bir aritmetik ortalama. Üslü ortalama bir daimi ortalama ( continuous running average ) üretir ki, son zamanlarda toplanan spektraların ortalama üzerindeki etkisi eskilerine nazaran daha fazladır. Bu, değiştirilen veri örneklerine uygun bir form sağlar.



Şekil 4.29 Ortalamaların sinyal üzerindeki etkisi

#### 4.17. FFT İçerisindeki Tuzaklar

FFT analiz içerisinde tuzakların var olması FFT analizin kötü olduğunu göstermez. Burada önemli bir gerçekte şudur ki, uygun tekniklerle FFT problemleri çözümlenirken önemsiz seviyelere indirgenmiş sürekli etkilerin varlığıdır.

- Alınan ölçüm sayısının azlığından kaynaklanan aliasing

- Zaman limitasyonunun sebep olduğu kaçak
- Spektrum hesabında devamsız frekansların sebep olduğu tahta parmaklık etkisi

Bölüm 5’de, uyarıcı bakım yönteminde titreşim analizi tekniğine değinilecektir.



## **BÖLÜM 5. UYARICI BAKIM TEKNIĞİNDE TİTREŞİM ANALİZİ YÖNTEMİ**

### **5.1. Giriş**

Uyarıcı bakım, makineler üzerinden alınan fiziksel parametre ölçümlerinin zaman içindeki eğilimlerini izleyerek, makine sağlığı hakkında geleceğe yönelik kestirimde bulunma yöntemidir.

### **5.2. Mühendislikte İstatistik**

Mühendisliğin en önemli özelliği araştırmacılığdır. Bu disiplinle, farklı branşların ürettiği kuramları uygulamaya sokar ve onu günlük yaşamın bir parçası yapar [19]. Tabi ki, bunu yaparken, yapısından ötürü istatistiki verileri kullanır.

#### **5.2.1. Makine sağlığının izleneceği parametrelerin belirlenmesi**

Uyarıcı bakım yönteminin temelinde, makine, üretim hattından çıkarılmadan, makinenin sağlığıyla ilgili ölçümlerin alınması yatar. Ancak, burada önemli olan nokta hangi fiziksel parametrenin ölçüleceğidir. Bunun için de, öncelikle arızanın ne olduğunun belirlenmesi gerekir. Ayrıca, belirlenen bu arızaya yönelik ön bilginin ve analiz verisinin, hangi ölçüm tekniğiyle alınabileceği araştırılmalıdır.

Makineler faaliyetleyken, çalışmaları engellenmeden aşağıdaki parametreler ölçülebilir;

- Titreşim,
- Gürültü,
- Kızılötesi sıcaklık,

- Akım,
- Ses ötesi kalınlık,
- Makine yapısı hareketliliği,
- Kullanılan yağın durumu,
- Devir, vb.

Örneğin, ısı eşanjöründe, giriş ve çıkış basınçları arasındaki fark, kimyasal madde aktarımında kullanılan borunun et kalınlığındaki değişiklik, bir AA ( Alternatif akım) motorunda, motorun çektiği akım, makine yatak sıcaklıkları, yalıtımdaki ısı kaçakları ve buhar kapanlarının çalışma durumları izlenebilir.

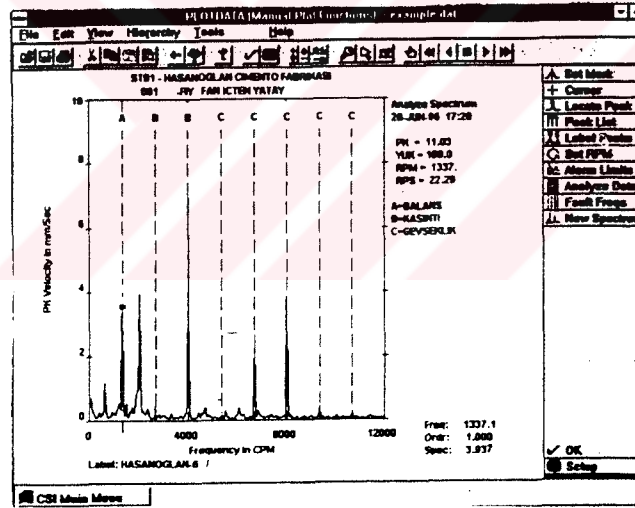
#### **5.2.1.1. Titreşimin makine sağlığıyla ilişkisi**

Döner makine elemanlarının sağlığıyla alakalı en ayrıntılı bilgi, yataklar üzerinden titreşim ölçümüyle alınır [19]. Döner makineler, bir arıza ihtiva ettikleri zaman, bu arızaya has bir titreşim üretirler. Bu durumda yapılacak işlem, uygun noktalardan, makinenin üretim hattındaki önemine ve arıza tipine göre belirlenecek periyotlarla titreşim ölçümü almaktır. Pek çok döner elemandan meydana gelen, bu tip makinelerde oluşan arızaların çoğu yataklardan kaynaklandığı için titreşim ölçümünün bu noktalardan alınmasında, yapılacak yorumun sağlığı açısından fayda vardır.

### **5.3. Titreşim Analizi ve Ölçüm Cihazlarının Çalışma Prensipleri**

Her arıza, fiziksel özelliklerine göre farklı sıklıklarda oluşmaktadır. Örneğin; nasıl her radyo kanalı farklı sıklıklarda yayın yapıyor, birbiri üzerine binme durumu çok düşük olasılıkla söz konusu oluyorsa, arıza yayınları da benzer özelliktedir [19]. Bütün makinelerin karakteristik titreşimleri vardır: Rulmanlar belli frekanslarda titreşim yayarlar, balans bozukluğundan meydana gelen titreşim ise bir başka frekansta kendini gösterir, kaplin ayarsızlığını gösteren titreşimlerde aynı kolaylıkla tanımlanabilir [20]. Böylece balanssızlık, kaplin ayarsızlığı, civata çözümleri, yatak boşlukları ve dişli arızaları gibi, bir fabrikada sık sık karşılaşılabilen arızalar, makineler durdurulmadan ve açılmadan ( Parçaları sökülmeden ) tespit edilebilir.

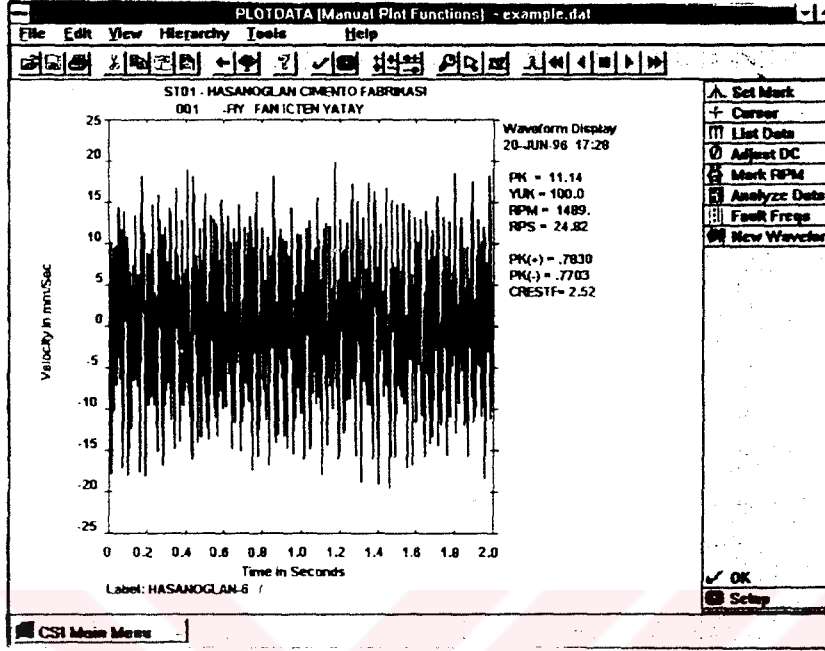
Titreşim ivme genlikleri, akselerometre denilen sensörlerle ölçülür. Bunlar, makine üzerine tercihen vidayla, bazen mıknatısla, bazen de elle tutularak tespit edildikten sonra ölçüm yapılır. Akselerometre içindeki bir kristalin, titreşim ivmesine bağlı ve orantılı olarak piezoelektrik prensibine göre ürettiği akım, voltaj olarak mili volt düzeyinde cihaza girer. Cihazdaki ilk işlem, analog ivmeyle orantılı voltaj sinyallerinin integrali alınarak, analog halde hız sinyali elde edilmesidir. Bu analog sinyaller osiloskop ekranına bakıldığı zaman, karmaşık voltaj osilasyonları olarak görünür. Bundan sonraki işlem, analog sinyallerin dijital hale getirilmesidir. Analog dijital dönüştürücü (A/C), analog sinyalleri dijital hale çevirir. Bu sinyaller daha sonra, zaman içinde akıp giden zaman düzlemi eğrilerinden( Dalgaform grafiği ), frekans düzlemi içerisindeki titreşim eğrilerine ( Spektrum grafiği ) dönüştürülür. Çünkü, zaman düzlemi eğrileri çoğu kez titreşim analizi için çok fazla bilgi sağlamaz. Oysa, frekans düzlemi eğrileri, makine sağlığı hakkında çok fazla bilgi verir ve titreşim analizinde esas olarak frekans düzlemi eğrileri kullanılır [21].



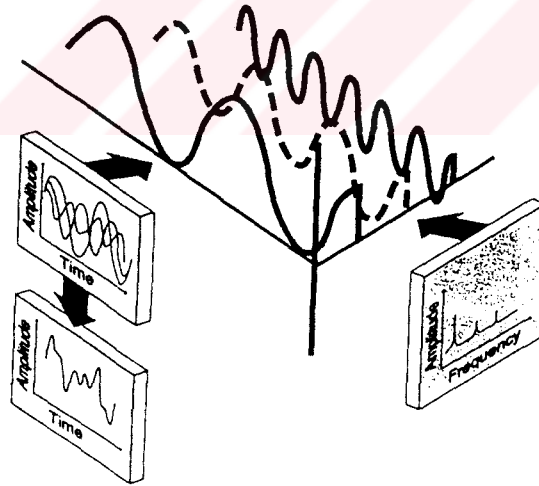
Şekil 5.1 Spektrum grafiğine bir örnek

Dinamik titreşim sinyallerinin bütünü, genlik-zaman eksenlerine sahip dalgaform grafiği ile algılanır. Bu grafik üzerine FFT ( Fast Fourier Transformation) uygulanarak, genlik-frekans eksenlerine sahip spektrum ( Tayf ) grafiği elde edilir. Konunun başında verilen örnekten benzetimle dalgaformu, tüm radyo kanallarının birbirine karıştığı bir bütünün grafiğidir. Böyle bir durumda, hangi kaynaktan geldiği

belirlenemeyen bir gürültü yumağıyla karşılaşılır. Bu, tıpkı makine başında hissedilen tüm titreşimlerin bir bütünüdür. Spektrum grafiği, bunun ayrılmış halidir.



Şekil 5.2 Dalgaform grafiğine bir örnek



Şekil 5.3 FFT ile sinyal işlenmesi

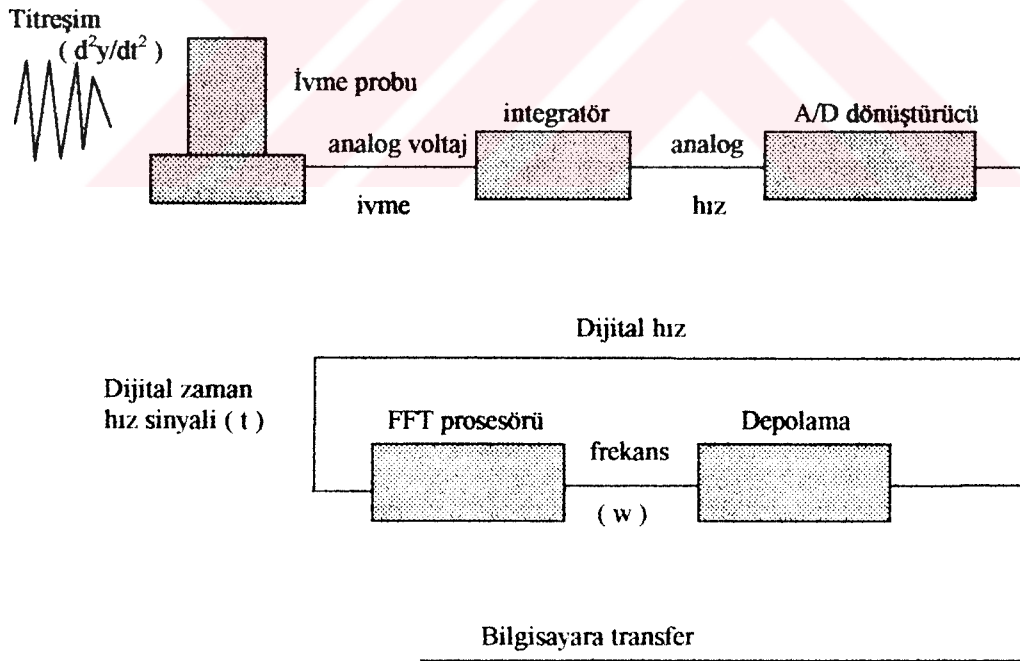
Anlaşılabacağı üzere, makine arızalarının tespitine yönelik aygıtlar, FFT yöntemiyle frekans kaynağı ilişkisini gösterebilmektedir. Bunun için de, aygıt tarafından uygulanan FFT birim dönüşümü analog yada dijital olabilir. Fourier dönüşümü, aslında matematikte de kullanılan bir yöntemdir. Oldukça karmaşık integralli bir

formülle gerçekleştirilen bu işlem, bilgisayarlar aracılığıyla çok daha kolay ve hızlı bir biçimde yapılabilmektedir. FFT, kestirme yoldan karmaşık Fourier integrali alan bir bilgisayar yöntemidir [22].

Arıza nedeniyle makinenin yapmış olduğu titreşim, birbirini tekrar eden periyotlar gösterecektir. Birbirini tekrar etmeyen yayımlar, dış etkileşimler ve süreç nedeniyle üretilebilir. Hedef, arıza kaynağını belirleyebilmek olduğundan, yapılacak şey, tekrar edilen sinyallerin ayrıştırılması ve bunların frekans ve şiddetlerinin belirlenmesidir. Bu amaç için kullanılan FFT yöntemi istatistik tabanlı bir uygulama olup, ölçülen gürültü yumağını ayrıştırır ve hangi frekansta ne derecede bir titreşimin var olduğunu belgeler [19].

Bu işlemden sonra amaca ulaşılmış olunur. Artık yapılacak tek iş, bu dönüştürülmüş veriyi hafızada tutmaktır. Titreşim ölçüm cihazlarının esas olarak yaptığı budur.

### 5.3.1. Spektrum analizörleri



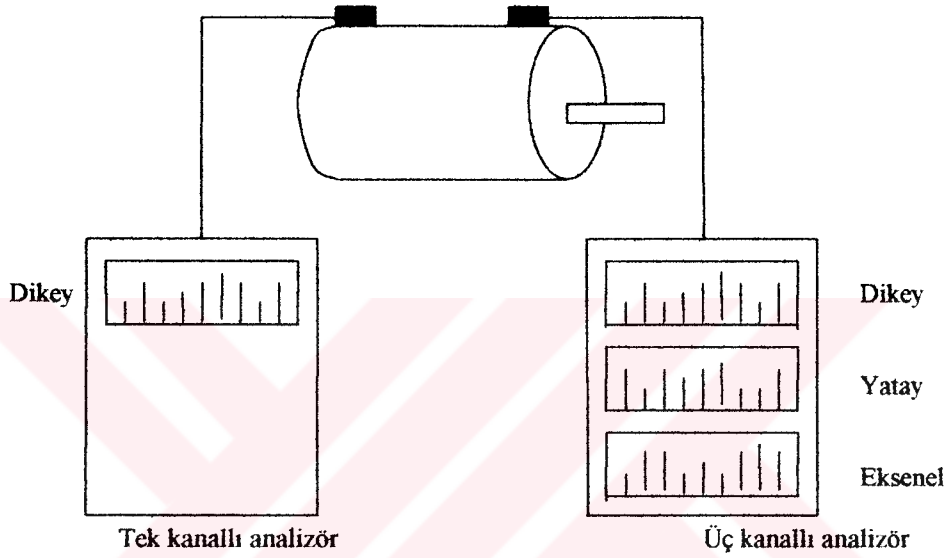
Şekil 5.4 Tek kanallı spektrum analizörünün bağlantı uygulaması

Bu cihazlar, titreşim genliğini probalar vasıtasıyla voltaj olarak ölçer ve cihazın içinde işlemlere tabi tutarak grafik haline dönüştürür. Spektrum analizörlerinin temelinde, analog olarak ölçülen titreşim sinyallerinin spektrumunu elde etmek yatar.



Portatif cihazlar, dizaynlarına bağı olarak tek kanallı veya üç kanallı olabilirler. Tek kanallı spektrum analizörleri, bir akselerometreyle ölçüm yapar. Böylelikle, akselerometrenin simetri eksenini düzlemindeki titreşimleri ölçer.

Üç kanallı spektrum analizörleri ise, problemlerinde bulunan üç ayrı akselerometre ile aynı anda birbirine dik üç ayrı ekseninde ölçüm yapar.



Şekil 5.5 Değişik kanallı analizör bağlantıları

İki kanallı spektrum analizörlerinde, genellikle bir kanala titreşim sinyali diğerine de faz hesaplarında kullanılmak üzere takometre sinyali takılır. Bu analizörler, detaylı titreşim analizi yapmak isteyen araştırma merkezlerinde veya titreşim analizi konusunda çok üst düzeylere gelmiş işletmelerde kullanılmaktadır.

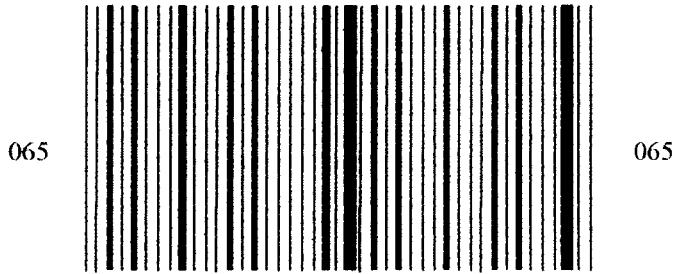
Spektrum analizörleriyle ölçüm yapılırken, makinenin hangi noktasında ölçüm yapıldığının bilinmesi gerekir. Spektrum cihazları, yaptıkları ölçümü hafızalarına atarlar. Bu veriler daha sonra bilgisayara aktarılır. İnceleme sırasında her hangi bir karışıklığa neden olmaması için ölçüm esnasında alınan titreşim sinyallerinin, ölçüm noktasının adıyla markalanması gerekir.

Ölçüm noktası tanımlamada kullanılan yöntemlerden biri rota yöntemidir. Rota yönteminde, titreşim ölçüm cihazına, ölçüm alınacak makine ve bu makine

üzerindeki ölçüm noktaları sırayla girilir. Ancak, bu yöntemde dikkat edilmesi gereken nokta, ölçümler alınırken rota sırasının bozulmaması ve atlanmamasıdır.

Kullanılan bir diğer yöntem ise barkod yöntemidir. Bu yöntemde, ölçüm yapılacak her noktaya bir barkod numarası verilir. Herhangi bir sıra ve kaide gözetmeden verilen bu numaralar daha sonra cihazın hafızasına “barkod numarası XXX.H makinesinin B noktasıdır” Şeklinde girilir. Alüminyum plakalara basılmış barkodlar, daha sonra numaralara sadık kalınarak ölçüm noktalarına yapıştırılır. Ölçümü yapacak şahıs, herhangi bir sıra gözetmeksizin titreşim ölçümünü yapmak için sahaya çıkar ve ölçüm noktasına geldiğinde probu makineye ilişirir. Kalem şeklindeki bir optik okuyucu yardımıyla, birbirini takip eden değişik kalınlıklardaki çubuklar algılandığı zaman, cihaz otomatik olarak bu kodlarla ifade edilen rakamı veya yazıyı okur. Spektrum analizörü böylelikle, hangi noktada olduğunu anlar [5]. Örneğin, bilgisayar programına 20 numarasıyla girilmiş olan 5 nolu kazan fanının motorunun serbest tarafındaki titreşim ölçüm noktası barkodda 20 olarak belirtilir. Cihaz 20 rakamını okuduğunda, 5 nolu kazanın motorunun serbest tarafındaki ölçüm noktasında olduğunu bilir ve o nokta için hafızada saklı olan parametrelere göre ölçüm yapar.

Ölçüm Noktası

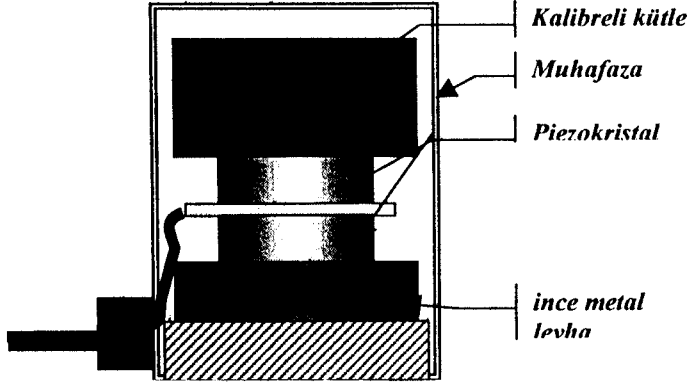


Şekil 5.6 Barkod

### 5.3.1.1. Titreşim ölçüm problemleri ( Akselerometre )

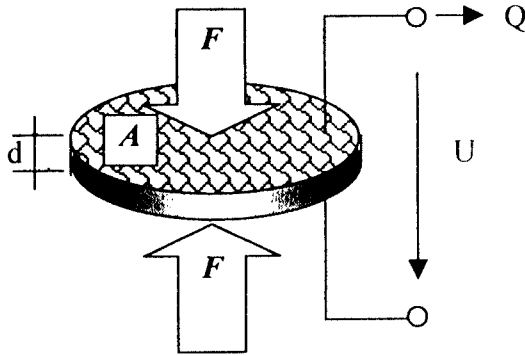
Prob, diğer bir deyişle transdüser, bir fiziki parametreyi diğer bir parametreye çeviren cihazdır. Fiziki parametreler ( Kuvvet gibi ), çoğu kez voltaja çevrilir. Titreşim problemleri, ölçtüklere parametreler bakımından üçe ayrılırlar,

- Deplasman problemleri,
- Hız problemleri,
- İvme problemleri.



Şekil 5.7 Akselerometre

Ebat olarak küçük, fiyat olarak karşılaştırıldığında daha ucuz ve en önemlisi frekans hassasiyet ranjı diğer iki tipten daha geniş olduğundan, günümüzde uygulamalarda genellikle ivme problemleri kullanılır ( Frekans ranjı, cihazın ölçebileceği frekans genişliğini ifade eder ). İvme problemleri, piezoelektrik prensiple çalışır. Esas olarak, iki kristal arasına sıkıştırılmış bir ince levhada, bu kristallerin sıkıştırılmasıyla oluşan akımın ölçülmesiyle titreşim ivmesi bulunur.



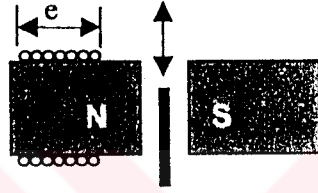
Şekil 5.8 Akselerometre kristali

Aralarında ince akım toplayıcı plaka bulunan kristaller, alt taraftan bir şaseye yapıştırılır; üst tarafa ise, çok hassas bir şekilde ağırlığı ( $W$ ) bilinen bir parça yapıştırılır. ( $W$ ) ağırlığı titreştikçe,

$$F = M \cdot A \quad (5.1)$$

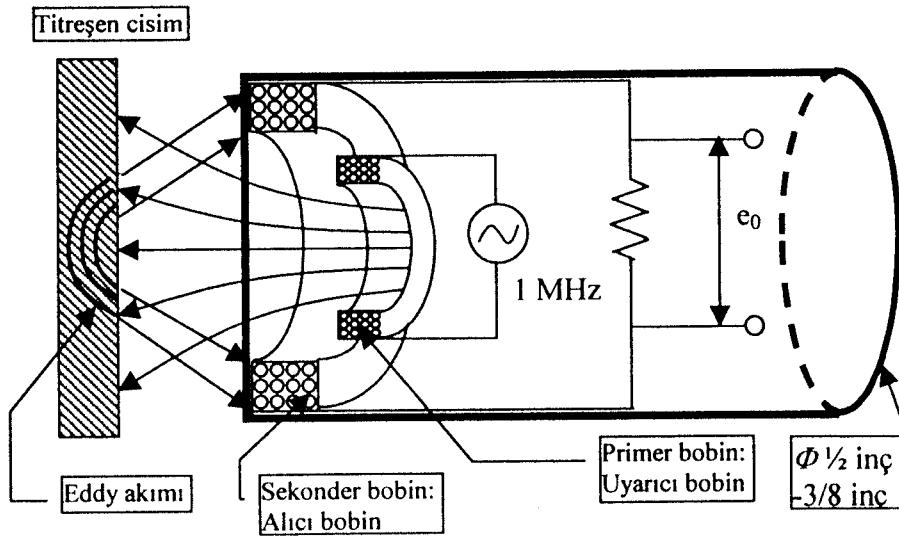
prensibine göre kendi kütleğine ve ivmesine bağlı olarak kristali ezer. Bu  $A$  ivmesiyle titreşen  $W$  ağırlığı, kristali ezince  $F$  kuvvetiyle orantılı bir akım ( $I$ ) meydana gelir. Bu akım bir dirençten geçirilirse, uygulanan kuvvetle doğru orantılı olarak voltaj ( $mV$ ) ölçülür [9].

Eddy akımı deplasman problemleri de, düşük frekanslardaki titreşimleri ölçmek için idealdir. Bu nedenle düşük devirli makinelerin titreşimlerinin ölçümünde kullanılırlar.



Şekil 5.9 Eddy akımı

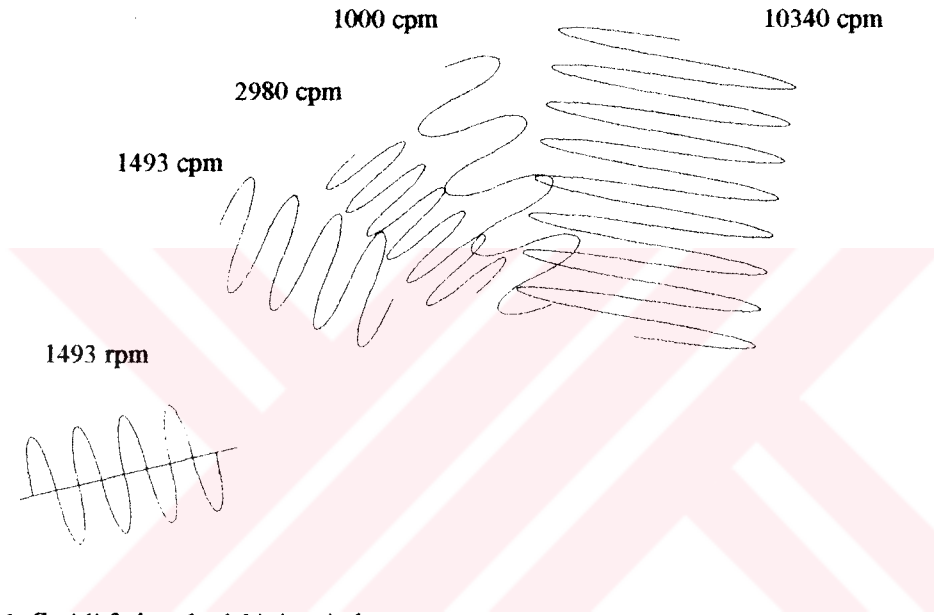
Manyetik bir alanda hareket eden bir cismin üzerinde, kendi hızıyla doğru orantılı olarak bir akım meydana gelir. Eddy ismi verilen bu akımlar, kendisini meydana getiren manyetik alana ters bir manyetik alan meydana getirir. Mıknatısların üzerine sarılı olan bobinde oluşan "e" voltajı ise eddy akımlarının zamana göre değişimiyle, dolayısıyla ortada hareket eden cismin ivmesiyle doğru orantılıdır.



Şekil 5.10 Eddy akımı deplasman probu

### 5.3.2. Frekans düzlemi

Titreşim mühendisliğinde frekans düzlemi, titreşim genliklerinin bir frekans aralığında dağılımlarını gösteren grafik anlamında kullanılmaktadır [9]. Titreşen bir makinenin üzerinden hissedilen titreşim, aslında pek çok değişik frekanslardaki titreşimlerin toplamıdır. İnsanlar, dokunma duygusuyla sadece bu titreşimlerin genliğini hissedebilir, frekanslarını hissedemez.



Şekil 5.11 Çeşitli frekanslardaki titreşimler

Benzer mantıkla, bir elektrik motoru üzerinde, sadece motorun dönme devrinde ( 2990 d/dk vs.) değil de, her frekansta titreşim vardır. Örneğin, 1350 cpm, 2540 cpm, 8530 cpm gibi. Millerin dönme devri ( Dönme frekansı ) “rpm” ( d/dk) ile bir titreşim frekansı ise “cpm” ( Çevrim/dakika) ile ifade edilir.

### 5.4. Titreşim Ölçüm Cihazlarının Seçimi

Titreşim ölçüm cihazlarının seçiminde kullanılan iki felsefe vardır. Bunlardan ilki, problemlü makineleri ve bu makinelerin sorunlarını tanımlamak. Diğeri ise, makine problemlerinin kaynağını detaylı olarak analiz etmektir. Bu amaçlara yönelik cihazlar genellikle ayrı ayrı niteliktedirler. İlk aşamada, işletmenin tercih etmesi gereken cihazlar, ekseriyetle ilk kategorideki cihazlar olmalıdır. Zira, bir problemin

varlığını tespit etmek ve detaylı olmasa da bir tanı yapabilmek, analiz tekniğinde temel bir eğitimle gerçekleştirilebilir. Oysa geniş kapsamlı analiz, bu tekniğin detaylarına akademik ve bilimsel olarak eğilmekle olur. Elbette ki, böyle bir yaklaşım için gereken cihazlar da, hem kullanım açısından daha zor olacaktır, hem de teknik hakimiyet gerektirecektir. Örneğin; bakım planlaması için titreşim grafikleri verecek bir cihaz yeterli olacakken, ikinci aşamada, iki kanallı faz ölçümleri ve ileri seviye titreşim ölçümleri yapabilen daha gelişmiş cihazların kullanılması gerekecektir.

Cihaz seçiminde göz önünde bulundurulması gereken teknik noktalar kısaca şöyle sıralanabilir;

- Yavaş dönen millerin bulunduğu işletmelerde düşük frekanslardaki titreşim seviyelerinin, rulman, dişli ve elektrikli arıza tanımlamalarında da yüksek frekanslardaki titreşim seviyelerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle ölçüm probu, yeterli frekans genişliğine sahip olmalıdır. Günümüzde, endüstride kabul edilen bant genişliği 5Hz. ile 25000Hz. ( 300 d/d ile 1 500 000 d/d ) arasındadır.
- Ölçüm probu, birbirine dik üç ayrı eksene yerleştirilmiş üç ayrı akselerometre kullanarak, aynı anda bir noktadan üç ekseninde titreşim ölçmelidir. Bu tip akselerometreler, hem kullanım kolaylığı hem de teknik üstünlükler sağlamaktadır.
- Uluslar arası standartlara göre, probun vida mekanizmasıyla ölçüm yapılacak makineye takılması gerekmektedir ( ISO 2954 ve TS 2779: “Ölçülecek cisme takılmak için tasarlanmış bir titreşim alıcısı kullanılacaksa, alıcı ucu rijit mekanik bağlantı ile takılmalıdır [7].”). Çünkü, elle tutulan problemlerle yapılan ölçümlerde, prob açısı değişebilir. Hatta rezonans, ölçüm ranjının içine düşebilir. Bu da, elde edilen grafiklerin yanlış yorumlanmasına neden olur ve belki de, arızası pek de ilerlememiş bir makineye, cihazın yetersizliğinden dolayı arızalıdır denilebilir. Elle tutulan problemlerde, ölçüm esnasında prob açısı değişirse hata oranı artar. Matematiksel olarak %hata;  $100 \times [1 - \cos(\alpha)]$  olarak

ifade edilir. Burada ( $\alpha$ ), dikey yada yatay dikten uzaklaşılacak açıdır. Böylece prob, tam dik yada yatay yerine 20 derece eğik tutulursa %6, 30 derece eğik tutulursa %13 hata yapılmış olur. İşin içine, bir de probun eğildiği yönün bir seferden ötekine değişik olacağı girerse, elle tutulan problemlerin ne derece güvenilir olacağı hakkında derin kuşkular uyanır [7]. Anlaşılacağı üzere, bu tip problemlerle yapılan ölçümlerin şahıstan şahısa değişme ihtimali çok yüksektir. Bu nedenle, titreşim analizinde kullanılacak problemlerin niteliğinin iyi araştırılması gerekmektedir.

- Logaritmik skalada çizilen grafikler, arızaları çok daha kolay gösterebilmektedir. Özellikle rulman arızalarında, lineer skalada alınan grafiklerde arızalar gözükmeyebilmektedir. Bu nedenle, kullanılacak cihazın frekans spektrum grafiğinde genliği logaritmik skalada verip vermediği araştırılmalıdır.
- Dişli arızası ve başlangıç safhasındaki rulman arızalarını tespit edebilmek için frekans üst bandının yüksek tutulması gerekir. Bu da, düşük frekanslardaki seviyelerin birbirine girmesine neden olur. Bu nedenle, değişik frekans limitlerinde, birden fazla grafik verebilen cihazların kullanılması gerekir [10].

Bütün bunların yanında titreşim ölçümü yapılacak cihazın seçiminde, kullanım kolaylığı, hatasız ölçümler alınabilmesi ve ölçümlerin yapana göre değişmemesine de dikkat edilmesi gerekir.

### 5.5. Titreşim Analizi Yöntemiyle Arıza Tanımı

Sürtünme olmasaydı, hareketin olmayacağı, hatta yaşamın bile mümkün olmayacağı açıktır. Ancak, uygulanan enerji sürtünme sonunda, hareket, ısı ve titreşim olarak şekil değiştirmektedir ve bu parametreler kontrol altında tutulmadığı zaman makine içerisinde yıkıcı etkilere yol açmaktadırlar.

Son yirmi beş yılda gelişen ve konunun uzmanlarının bile güçlüklerle izleyebildiği silikon teknolojisi ve mikro işlemci kullanımı, makinelerden yayılan titreşimlerin

izlenmesini ve makinelerdeki arızaların tanımlanmasını mümkün kılmıştır [20]. Böylelikle mühendisler, doktorların yıllardır yapmakta olduğu gibi elektro kardiyogramı andıran titreşim grafiklerine bakarak, makinenin hangi elemanında aşınma ve arıza olduğunu tanımlayabilmekte ve makineyi durdurmadan arızanın önüne geçebilmektedirler.

Makinelerden yayılan titreşimler, her ne kadar gelişi güzelse de, frekans bileşenlerine (Component) ayrıldığı zaman, makinenin imzası olarak tanımlanabilecek grafikler elde edilir.

Alınan spektrum grafiğinde görülecek her tepeliğin, makinenin dinamik yapısına bağlı bir vericisi olmalıdır. Yapılacak iş, ayrıştırılan sinyallerin hangi frekanslarda olduğunu incelemek ve makinenin hangi dinamik elemanının bu sinyali üretebileceğini, kaynağın ne olabileceğini analiz etmektir. Bu analizde temel referans, makinenin dönüş devri frekansıdır [5].

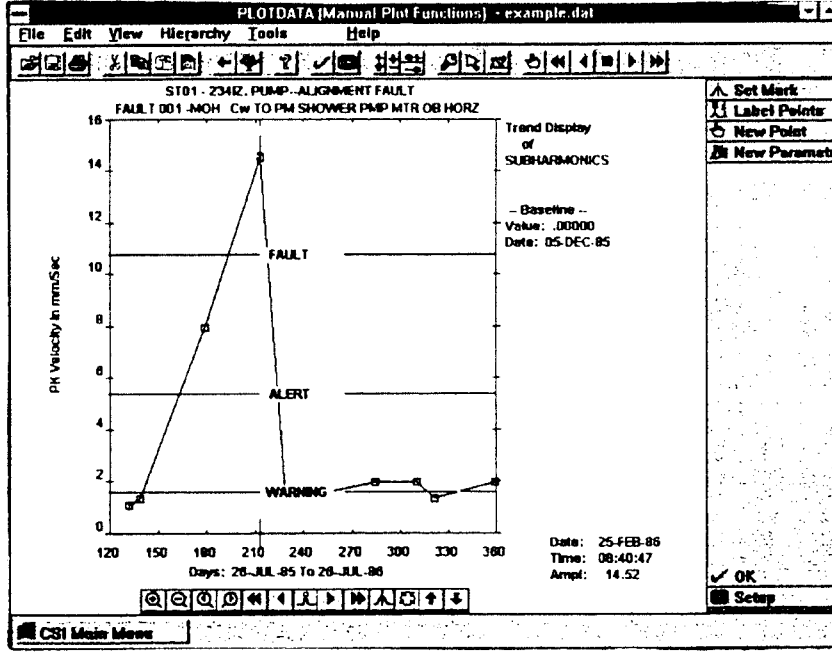
Analiz yapılırken unutulmaması gereken bir nokta da şudur ki, her makinede, arızadan meydana gelebilecek titreşimlere ek olarak, kendine has karakteristik titreşim vericileri de bulunmaktadır. Bunlar,

- Tasarım hatası,
- Üretim hatası,
- Montaj hatası,
- Uygulama hatasından kaynaklanabilir.

Bu karakteristik titreşim vericileri nedeniyle makinelerden alınan bir tek ölçüm üzerinde yorum yapmak pek sağlıklı değildir. Doğru bir yorum yapmak için ilk etap da, makinenin sağlıklı koşullarında titreşim ölçümlerinin alınması gerekir.

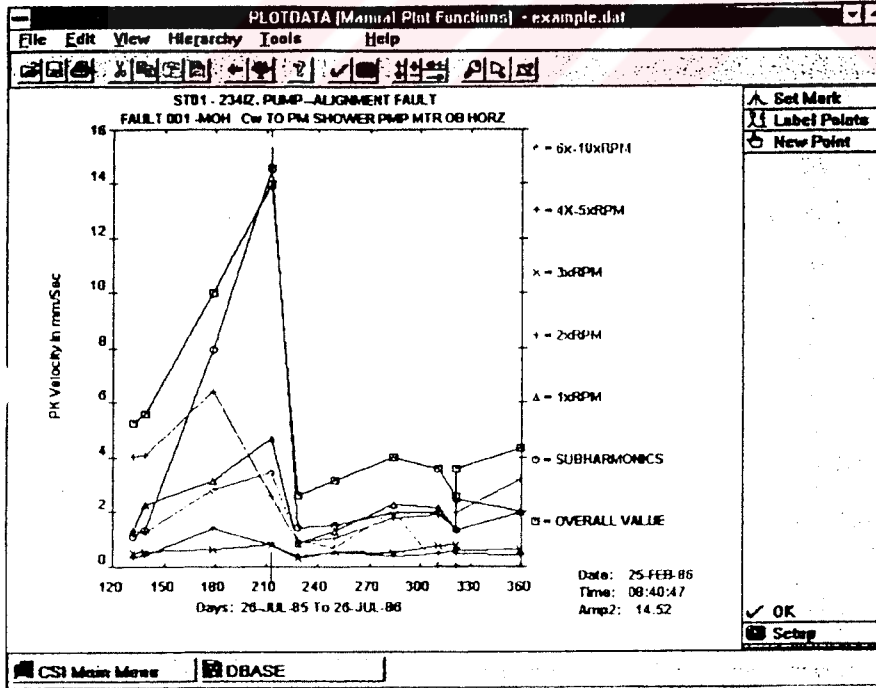
Uyarıcı bakımda öncelikli hedef arızanın belirlenmesidir. Bir arıza oluşuyorsa, alınan ölçümlerde bir artış olmalıdır. Bunu da tespit edebilmek için aynı noktadan belirli periyotlarla birden fazla ölçüm alınmalıdır.





Şekil 5.12 Trend grafiğine bir örnek

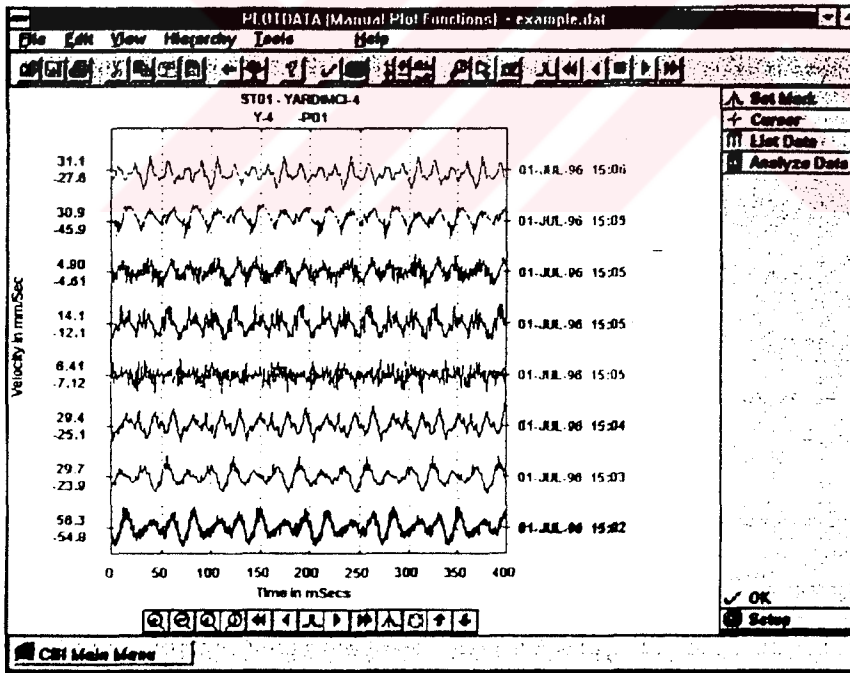
Alınan titreşim ölçümlerindeki artış, ölçüm periyodu ve ölçülen değer eksenlerinde çizilecek şekil 5.13'deki gibi eğilim izleme eğrisi ile gösterilebilir.



Şekil 5.13 Birden fazla parametre trendine bir örnek

### 5.5.1. Dalgaform grafiklerinin karşılaştırılması

Titreşim analizinin temelini dalgaform grafikleri oluşturmaktadır. Spektrum grafikleriyle karşılaştırıldıkları zaman, dalgaform grafikleri bir titreşim imzası değildir. Titreşim seviyesinin anlık durumlarını gösterirler. Bununla birlikte, bu grafikler incelendiğinde makine performansı hakkında genel bir bilgi elde edilebilir. Ancak, doğru bir teşhiste bulunabilmek için aynı noktadan aynı şartlar altında bir periyot sonra alınan dalgaform grafiğiyle ilk grafiğin karşılaştırılması gerekir. Bir önceki konuda da bahsedildiği gibi, ilk dalgaform grafiğinde belirlenebilecek sorunlar, makinenin karakteristik özelliği olabilir. Eğer, incelenen grafiklerde değişim ve artış gözleniyorsa, bir arızadan bahsedilebilir. Seviyesi yüksek olan bir titreşim, zaman içerisinde hiç değişmiyorsa, bu yüksek titreşim seviyesi o kadar da önemli bir arıza göstergesi olmayabilir. Karakteristik sorunlar, artış olmaksızın aynı özelliği tüm ölçüm periyotlarında alınan dalgaform grafiklerinde gösterirler. Ancak, bir arıza sürecine girildiğinde, arıza özelliğine yönelik değişimler dalgaform grafiğinde belirgin olarak gözlenebilir.



Şekil 5.14 Çoklu dalgaform grafiği

Uyarıcı bakım yönteminin güncellik kazandığı 1990'ların başında, dalgaformu analizleri ikinci planda kalan bir özellikti. Ancak, uygulamaların değerlendirilmesi,

ulaşılan noktalardan daha ileriye gitmek için neler yapılabileceği çerçevesindeki araştırmalar, arıza teşhisinde çoklu dalgaform grafiklerinin de kullanılması gerektiğini göstermiştir [19].

Dalgaformu analizinin temeli desen tanımadır. Arızalar, özelliklerine göre dalgaformunda değişik desenler oluştururlar. Örneğin; genlik birimi hız seçildiğinde, saf sinüs eğrisi dengesizliği, deve hörgücü aksenal kaçıklığı, dalga boylarının her dönüş periyodunda tutarsızlık göstermesi de mekanik çözünürlüğü işaret eder. Genlik birimi ivme seçildiğinde, melek balığı deseni rulman arızası işareti olacaktır. Burada, dalgaformu grafiğinin genlik birimi, kullanılan sensöre ve ölçümde aygıt tarafından uygulanan FFT birim dönüşümünün analog veya dijital olmasına bağlı olarak değişebilir [19].

Dalgaform grafikleri ekseriyetle, dişli arızası analizinde kullanılmaktadır. Çünkü, dalgaformu grafiğiyle dişli arızası, spektrum grafiğiyle tanımlanabileceğinden daha detaylı bir biçimde tanımlanabilmektedir.

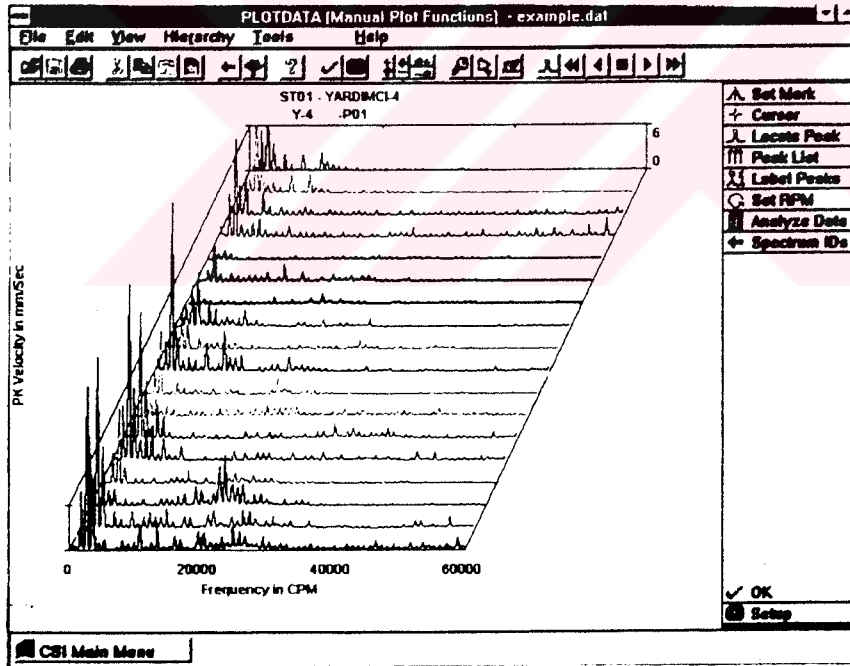
### **5.5.2. Spektrum grafiklerinin karşılaştırılması**

Uyarıcı bakım yönteminin 1980'lerin ikinci yarısından itibaren hızlı bir gelişim göstermesi, veri toplama amaçlı aygıtların FFT özelliğine kavuşmasıyla olmuştur. FFT ile erişilen ve aygıt ekranında gösterilebilen spektrum grafiği, dalgaform grafiğinde zamana göre değişiminin gösterildiği titreşim seviyesinin, daha anlaşılır bir hale getirilmesi amacıyla, bazı matematik işlemler sonunda frekansa göre değişimini ifade edecek şekilde gösteren grafiklerdir. Burada yapılan işlem, dalgaformunda tekrar edilen periyotlardaki sinyalleri frekanslarına göre ayrıştırarak, genlik şiddetleriyle frekans-genlik grafiğinde gösterilmesidir. Dalgaformu grafiğine göre daha kolay ve anlaşılır olması, önceleri karmaşıklığı nedeniyle titreşim analizine uzak kalan kesimleri de, konuya yaklaştırmıştır .

Spektrum grafiklerinin en büyük özelliği, değişik tip makine arızalarını değişik frekanslarda gösterebilmesidir. Bu da, arıza tanımının, dalgaform grafiklerine nazaran daha kolay yapılabilmesini sağlar. Arıza tanımlarken yapılması gereken

işlem, ölçüm alınan noktalarda hangi frekanslardan gelen titreşimlerin baskın olduğunu belirlemektir. Bu, spektrum grafikleriyle kolaylıkla yapılabilir. Ancak, baskın tepeciğin bir arıza işareti olup olmadığı sorusunun cevabı, tıpkı dalga form grafiğinde olduğu gibi karşılaştırmayla verilebilir. Aynı noktadan periyodik olarak alınan ölçüm grafikleri, birbiriyle karşılaştırılır ve genlik şiddetleri artmakta olan frekanslar belirlenir. Bu frekansta hangi makine elemanının arıza nedeniyle yayım yapabileceği araştırılarak daha makine çalışma koşulundayken ne tür bir arızanın gelişmekte olduğu belirlenir, ona göre plan ve ön hazırlıklar yapılarak bakım organize edilir. Karşılaştırmalı spektrum grafiğiyle elde edilen sonuç, karşılaştırmalı dalgaform grafiğiyle doğrulanır. Böylece, teşhisin güvenilirliği artırılmış olur [19].

Yapılan çalışmaların tümü kestirimdir. Bu nedenle yanılma payı olacaktır. Analizciye düşen görev, arıza teşhisine yönelik tüm parametrelerin, önceden hata yapmaksızın sisteme girilmiş olmasıdır.



Şekil 5.15 Çoklu spektrum grafiği

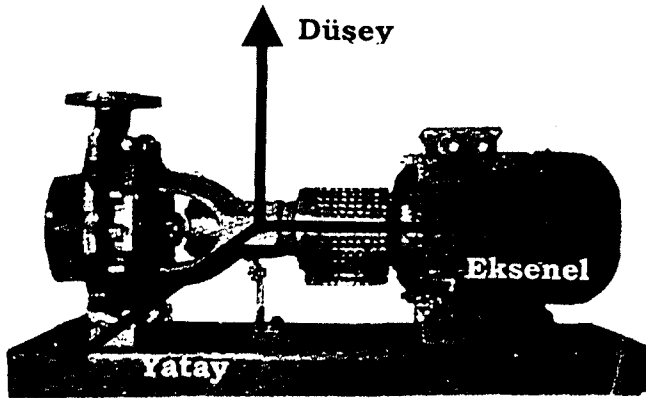
Frekans düzlemi eğrileriyle ( Spektrum grafiği ) balanssızlık, kaplin ayarsızlığı, rulman arızası vs. gibi mekanik arızalar tespit edileceği gibi, mekanik titreşimler doğuran elektrikli arızaları da tespit etmek mümkündür.

Ancak, titreşim analizi yöntemiyle arıza teşhisi yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da şudur ki, ister dalgaformu grafikleri, isterse de spektrum grafikleri kullanılsın titreşim ölçümlerinin üç eksende yapılması gerekir.

### 5.6. Üç Eksende Titreşim Analizi

Şimdiye kadar ifade edilmeye çalışıldığı gibi, titreşim analiziyle arızaların doğru ve hassas bir şekilde tespit edilebilmesinin temelinde, yapılan ölçüm ve alınan spektrumların yeterli sayıda, özellikte ve doğru alınmış olmaları yatar. Ölçüm alınacak kriter makine olduğuna göre, kaç eksende titreşim ölçümünün alınacağına da, makine göz önünde bulundurularak karar verilmelidir. Makinelerin üç doğrusal yönde hareket etme yetenekleri olduğundan, mühendislik mantığı ve fizik, üç yönden titreşim ölçümünün alınmasını zorunlu kılar. Bu üç eksen düşey, yatay ve eksenel yönlerden oluşmaktadır.

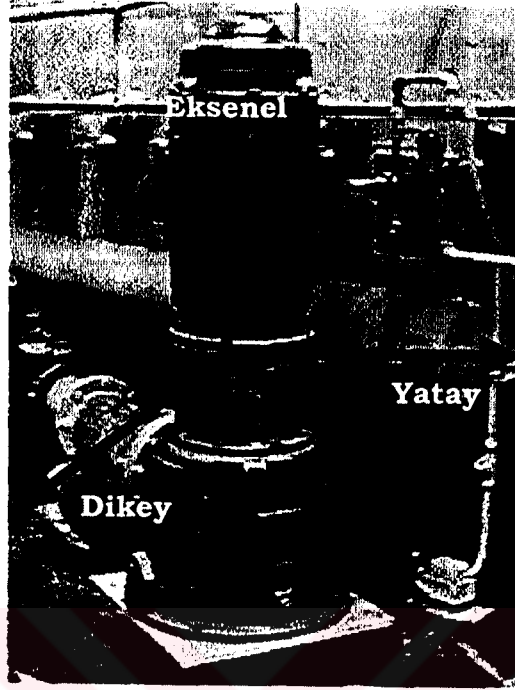
Makinelerde, motor mili ekseni doğrultusu veya buna paralel bir doğrultu eksenel yön olarak alınır. Düşey ve yatay yönler de, eksenel yön referans olarak alınarak, bu doğrultuyu dik kesecek şekilde yerleştirilir. Şekil 5.16'da, yatay bir makine üzerinde üç eksenin doğrultuları gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Yatay bir makinede üç eksenin gösterilmesi

Düşey makinelerde durum biraz farklıdır. Eksenel yön, düşey doğrultu yönündedir. Yatay makinelerde dikey olarak tanımlanan yön ise dikey yönü gösterir. Yatay yönde, bu iki yöne dik doğrultuda seçilir.

Bu yönler ( Eksenel, düşey ve yatay ) sırasıyla, A, R, T; bazıları tarafından A, V, H; bazıları tarafından ise Y, X ve Z harfleri ile tanımlanmaktadır [23].

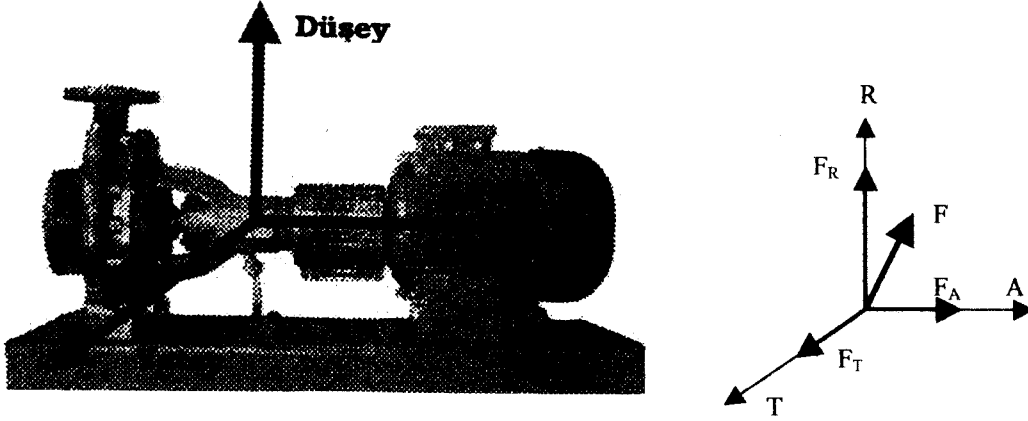


Şekil 5.17 Dikey bir makinede üç eksenin gösterilmesi

Titreşim analizinde en kolay analiz edilebilen frekans, dönme devrindeki (1X) titreşimdir. Ancak, bir eksenle titreşim analizi yapılmışsa, bir çok arıza seviyesinde yükselen bu frekansın hangi arızayı gösterdiğini bulmak, kolay görülen bu analizi zorlaştırır ve hatta bazen de arızanın yanlış tanımlanmasına neden olur. Örneğin, herhangi bir motora kaplinle bağlı bir pompada ölçülebilecek, yüksek seviyede 1X dönme devri frekansı ( 1480, 2960 d/dk vs. ) titreşimi, motorda balans bozukluğu, pompada balans bozukluğu, kaplin ayarsızlığı, motor ve pompa ayaklarında gevşeklik veya şasede ayarsızlık, rulman yuvasında boşluk ve motor soğutma fanı balans bozukluğu gibi bir çok arızayı gösterebilir. Ancak, gerçekte bu arızalardan hangisinin olduğunu tespit etmek için üç eksenle ölçüm alınması gerekir.

Titreşim, genliği ve açısı olan bir nicelik olduğundan bir vektör olarak düşünülebilir. Bu nedenle, bir noktadaki titreşimin gerçek genliğini bulmak için, titreşimin o noktadaki yatay, eksenel ve düşey yönlerdeki genliklerinin bilinmesi gerekir. Bu bileşke vektörler toplanarak orijinal vektör, yani titreşimin gerçek genliği hesaplanabilir. Bu düşünceden hareketle, şekil 5.18'da gösterilen yatay pompada,

eksenel yöndeki titreşim vektörü  $F_A$ , düşey yöndeki titreşim vektörü  $F_R$  ve yatay yöndeki titreşim vektörü  $F_T$  olarak tanımlanırsa, bileşke vektör  $F_a = F_A + F_R + F_T$  olarak hesaplanabilir.



Şekil 5.18 Yatay bir pompa titreşim vektörlerinin gösterilmesi

Şekil 5.18'dan da anlaşılacağı gibi, her üç yöndeki vektör bilinmeden, diğer bir deyişle her üç yöndeki titreşim ölçümü yapılmadan, bir noktadaki titreşimin gerçek değerini bilmek, fizik ilmi açısından mümkün değildir.

Dikey bir motor-pompa kuplesinde, motor üst yatağına yakın bir noktada bir ölçüm noktası, pompa üst yatağına yakın bir noktada da diğer bir ölçüm noktası tespit edilmiş olsun. Makinenin ankastre yapısı göz önüne alınacak olursa, motor üst yatağında okunan seviyenin, pompa üst yatağında okunan seviyenin iki katı mertebesinde olması gerekir. Ortalama seviyelerinde bunu yansıtması gerekir. Diğer bir husus da, herhangi bir balans bozukluğunun bütün makineyi sallaması gerektiğidir. Normal olarak yatay ve dikey yönlerden daha düşük değerde olması gereken düşey doğrultudaki eksenel yön, böyle sallanmalarda tam tersi bir durum arz edebilir. Dikey pompalarda bir diğer husus da, motorla pompa arasındaki kaplin bölgesine ulaşabilmek için entegre muhafaza, bir yönde açıktır. Bu da, bu yönde bir zayıflık, dolayısıyla daha yüksek titreşim oluşturur [24].

Bu gerçekler ışığında tablo 5.1'e bakıldığı zaman, yatay ve dikey yönlerdeki 10.0 mm/s'lik dönme devrindeki ( 1X ) titreşim seviyeleri, eksenel yöndeki titreşim

seviyesinden yüksektir ve motor balans bozukluğu göstermektedir. Pompada ise, sadece yatay yöndeki 1X yüksektir. Bu durumda yapılacak teşhis, motorda mevcut olan balans bozukluğu, pompa ayaklarında veya şasesinde gevşemeye yol açmıştır şeklinde olacaktır. Ancak, üç eksenle titreşim ölçümü yapılmamış olsaydı, sadece aksel ve dikey yönler ölçülmüş olsaydı, yapılacak teşhis açılmalı kaplin ayarsızlığı olacaktır. Çünkü, aksel yöndeki titreşim seviyesi hem motorda hem de pompada beklenenden yüksektir.

**Tablo 5.1** Dönme devrindeki ( 1X ) titreşim seviyeleri

Yön	MOTOR			POMPA		
	Eksenel	Dikey	Yatay	Eksenel	Dikey	Yatay
Genlik	1.5	10.0	10.0	1.5	0.6	10.0

Makinelere dönme devri 1X'te görülen arızalar çok büyük bir oranı teşkil etmekle birlikte başka frekanslarda kendini gösteren bir çok arıza vardır. Örneğin, dişli arızası, rulman arızası ve pompa arızaları gibi.

Makine arızalarının teşhisini doğru yapabilmek için üç eksenle titreşim ölçümü yapmanın gerektiğini göstermek amacıyla yapılan bir çalışmada, değişik eksen kombinasyonlarıyla makine üzerinden alınan titreşim ölçümlerinin, yapılan teşhisin doğruluğunu ne derecede etkilediği tablo 5.2'de gösterilmektedir [23].

**Tablo 5.2** Titreşim analizi sonuçları

Ölçüm noktaları ve yönleri	Teşhis edilen arıza adedi	Atlanılan arıza adedi	Arızaları doğru teşhis etme oranı
Motor Eksenel /Yatay /Dikey	97	-	%100
Pompa Eksenel /Yatay /Dikey			
Motor Eksenel /Dikey	78	19	%80
Pompa Eksenel /Dikey			
Motor Eksenel /Yatay /Dikey	64	33	%66
Pompa Eksenel /Dikey			
Motor Dikey	45	52	%46
Pompa Dikey			
Motor Yatay	45	52	%46
Pompa Yatay			



Tablo 5.2'de de görüleceği üzere, titreşim ölçümleri üç eksenle yapıldığı zaman arızaları doğru teşhis etme oranı %100 olmaktadır. Ancak, ölçümler tek eksenle yapılırsa, bu oran yaklaşık olarak yarı yarıya düşmektedir.

### 5.7. Makine ve Ölçüm Noktalarının Seçimi

Hangi makinelerin uyarıcı bakım uygulaması kapsamına alınacağı kararı verilirken göz önünde bulundurulması gereken esas, o makinenin üretim hattı içerisinde ne kadar önemli olduğudur. Bu uygulamaya yeni geçecek işletmeler için ilk etapta, bütün makinelerin uyarıcı bakım kapsamına alınması, hem analiz ekibini hem de elde edilecek sonuçlara göre bakımı yapacak ekibi boğar. Bu da, bir süre sonra sistemin yıpranmasına ve itimadın kaybolmasına neden olur. Bu nedenle uygulama, sınırlı sayıda, ancak üretim hattı için önemli makinelerde başlatılmalıdır (İlk aşamada en fazla 70-75 makinenin geçilmemesi önerilir).

Hangi makinelerin uyarıcı bakım uygulamasına dahil edileceği belirlendikten sonra, bu makinelerdeki ölçüm noktalarının yerlerinin de tayin edilmesi gerekmektedir. Ölçüm noktalarının yeterli sayıda ve rulmanlara en yakın noktada olması arzu edilir [5]. Çünkü, döner aksamın titreşimleri gövdeye ve şaseye rulmanlar üzerinden geçerek gider. Bu nedenle, özellikle çok hareket edecek esnek plakalara ölçüm noktası konulmaması, alınacak grafiğin doğruluğu açısından önem arz etmektedir.

Bununla birlikte, sağlıklı bir teşhis için her makinede en az dört noktada ölçüm yapılmalıdır.

### 5.8. Ölçüm Periyotlarının Seçimi

Ölçüm periyotları, makinelerin taşıdıkları arızalanma risklerine göre düzenlenmelidir. Arızalanma ihtimalleri yüksek makine ve makine elemanlarının 24 saat, bunlara nazaran daha düşük oranda arızalanma riski taşıyan makine elemanlarının, daha kısa süreli periyotlarla izlenmesi gerekir. Bu düzenleme, yapılacak arıza tespitinin doğruluğunun yanı sıra, hem iş gücünün ekonomik kullanılması hem de önem taşımaktadır.

Bölüm 6'de uyarıcı bakım tekniğinde titreşim analizi yönteminin, çeşitli makine elemanı üzerindeki uygulamaları incelenecektir.



## **BÖLÜM 6 UYARICI BAKIM TEKNIĞİNDE TİTREŞİM ANALİZİNİN UYGULANMASI**

### **6.1. Giriş**

Makinelere en yüksek verimi almak ve bakımdan kaynaklanan üretim kayıplarını en aza indirebilmek için bu güne kadar değişik yaklaşımlar benimsenmiştir. Bunlardan biri de, durum izlemeye dayalı bakım, başka bir deyişle uyarıcı bakımdır. Uyarıcı bakım tekniğinde titreşim analizi yöntemi kullanılarak, pek çok makine elemanında oluşabilecek arızalar tespit edilebilmektedir.

Uyarıcı bakım yönteminin en önemli aşamalarından birisi, makinelerdeki problemlerin teşhisidir. Arızalar oluşana kadar makine çeşitli belirtiler gösterir. Bunlar;

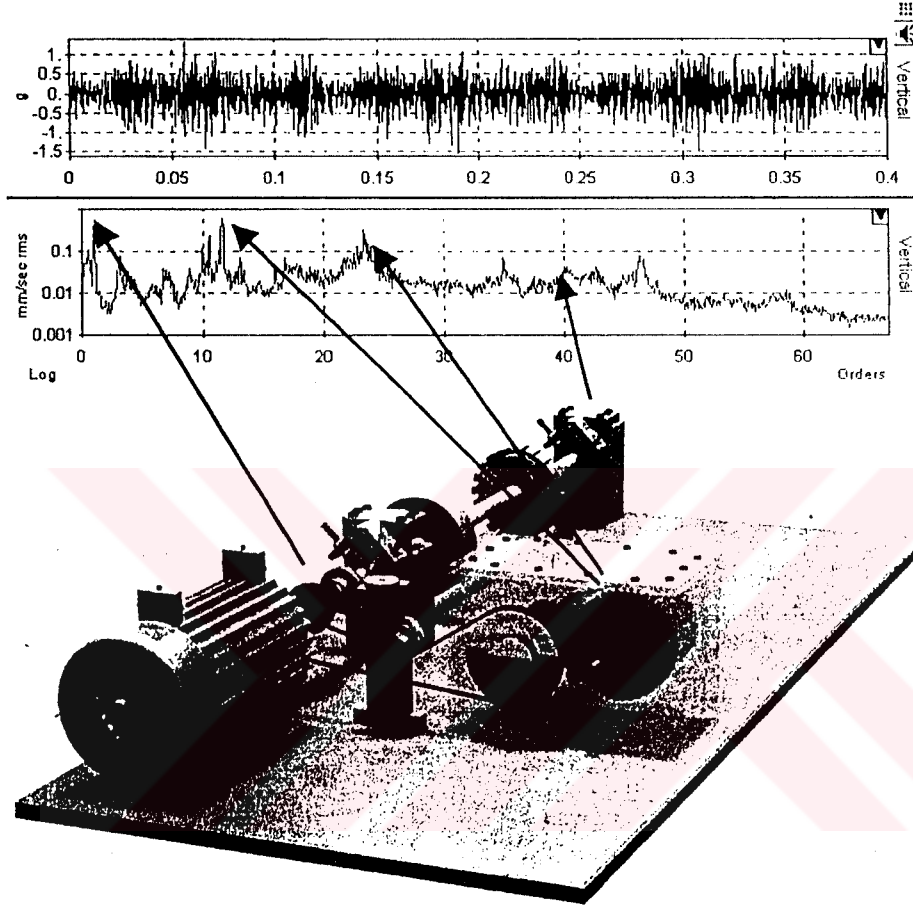
- Titreşim artışı,
- Sıcaklık artışı,
- Gürültü artışı,
- Aşırı akım vs.

Uyarıcı bakım, bu parametrelerin ölçülüp değerlendirilmesiyle arıza teşhisinin yapıldığı bir metottür.

### **6.2. Arıza Frekansı ( Fault Frequency )**

Titreşim analizinin temelinde, değişik arızaların değişik frekanslarda sinyaller ürettiği gerçeğinin yattığından bir önceki bölümde bahsedilmişti. İşte bu mantıkla, hangi arızanın hangi frekansta ve hangi titreşim seviyesinde arıza göstergesi olacağı

bilinirse, titreşim analizi yöntemiyle arıza teşhisi kolaylıkla yapılabilir. Arızaların ürettikleri sinyallere arıza sinyali denir. Örneğin, 2990 d/dk ile dönen bir rotorda balans bozukluğu olup olmadığını anlamak için spektrum grafiğinde 1xRPM (Dönme devrinin birinci katı; 2990 CPM) frekansına bakılması gerekir. Balans bozuklukları milin dönme devri frekansında görünür.



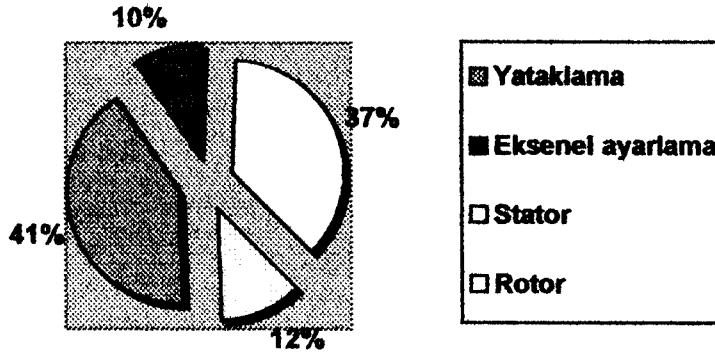
Şekil 6.1 Arıza frekansları

### 6.3. Elektrik Motorlarındaki Arızalar

Elektrik motorları da, bütün elektriksel ve mekanik ekipmanlarda olduğu gibi, arızalar baş gösterdiğine istenilen performansı gösteremezler. Elektrik motorlarında en sık rastlanan arızalar şunlardır;

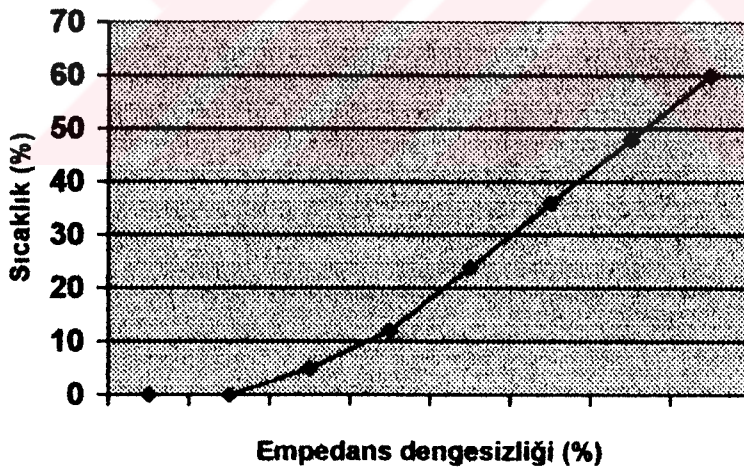
- Yataklama,
- Eksenel ayarlamalar,
- Stator sarımları

- Rotor sorunları.



Şekil 6.2 Motor arızalarının genel sebeplerinin yüzdeleri

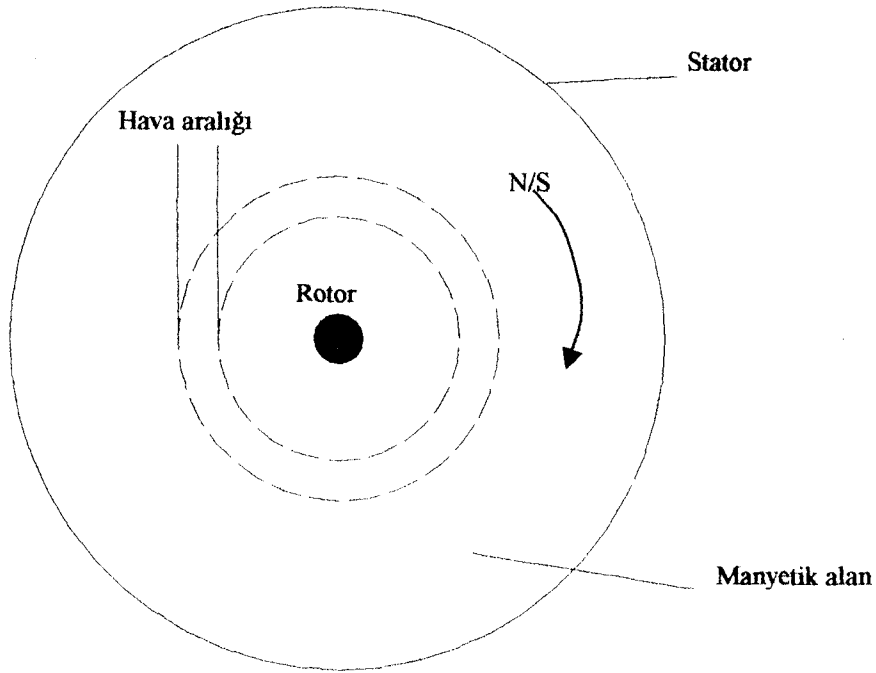
Şekil 6.2'de de görüleceği üzere, elektrik motorlarında görülen arızaların %41'ini oluşturan yataklama problemi, motorda sürtünme ve sarım kayıplarına da neden olduğundan enerji tüketimini arttırmaktadır. Bununla birlikte, yataklama problemleri aşırı ısınmaya neden olacağından sarımlarda voltaj ve empedans dengesizliğine yol açar [24].



Şekil 6.3 Empedans dengesizliği ve sıcaklık artışı

Elektrik motorları tiplerinden biri olan asenkron motorlar, statorda oluşturulan manyetik alanın rotoru çevirmesiyle çalışır. Burada rotor, denklem 6.4'de ifade edilen senkron hızla dönen manyetik alanı yakalamaya çalışmaktadır.

$$\text{Senkron hız} = 2 \times 60 \times \text{Şebeke frekansı} / \text{Kutup sayısı} \quad (6.1)$$



Şekil 6.4 Asenkron motor

Şebeke frekansı ( Hat frekansı ) Avrupa, Asya ve Afrika ülkelerinde 50 Hz. (3000 CPM), Kuzey Amerika, Japonya ve kısmen Güney Amerika'da 60 Hz.'dir. öyleyse, denklem 6.1'e göre şebeke frekansının 50 Hz. olduğu ülkelerde senkron hız;

$$\text{Senkron hız} = 6000 / \text{Kutup sayısı} \quad (6.2)$$

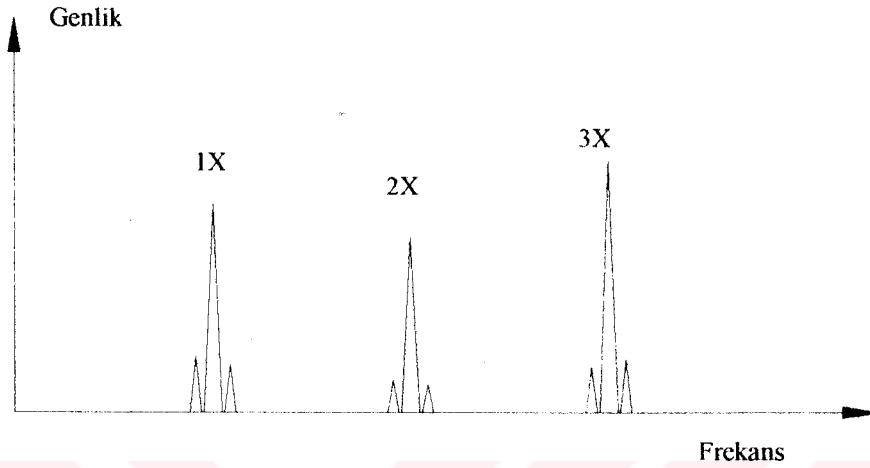
şebeke frekansının 60 Hz. olduğu ülkelerde de aşağıdaki gibi olur.

$$\text{Senkron hız} = 7200 / \text{Kutup sayısı} \quad (6.3)$$

Böylelikle, 2 kutuplu bir motorun nominal 3000 d/dk, 4 kutuplu bir motorun nominal 1500 d/dk, 6 kutuplu bir motorun nominal 1000 d/dk devriyle döneceği görülebilir. Ancak, asenkron motorlar pratikte nominal devirleriyle değil de, bundan bir miktar daha düşük bir devirde ( İdeal olarak %1 ) dönerler. Buna, asenkron hız denir.

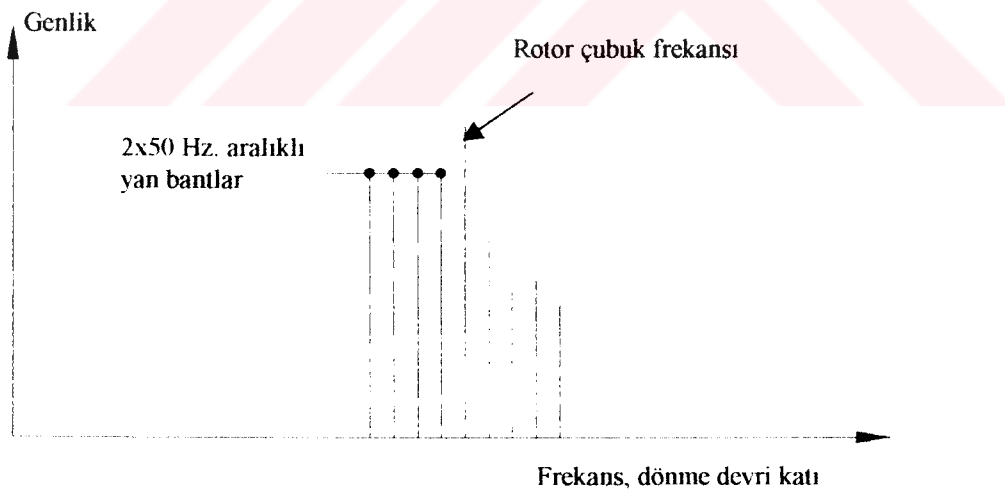
Senkron hızla asenkron hız arasındaki farka kayma denir. Örneğin; 1460 d/dk ile dönen bir motorun kayma devri ( Kayma frekansı )  $1500-1460 = 40$  d/dk veya 1 Hz 'dir [9].

Kırılmış yada çatlama rotor kısa devre çubukları, rotor çubukları ile kısa devre çubukları arasındaki hatalı bağlantılar;  $F_p$  ( Geçiş frekansı ) yan bantlarıyla birlikte dönüş hızında yüksek titreşimler oluştururlar [25].



Şekil 6.5 1X, 2X, 3X şebeke frekanslarında  $F_p$  yan bantları

Bazen de, rotor çubuk frekansı etrafında 2X şebeke frekansı yan bantları da görülür.

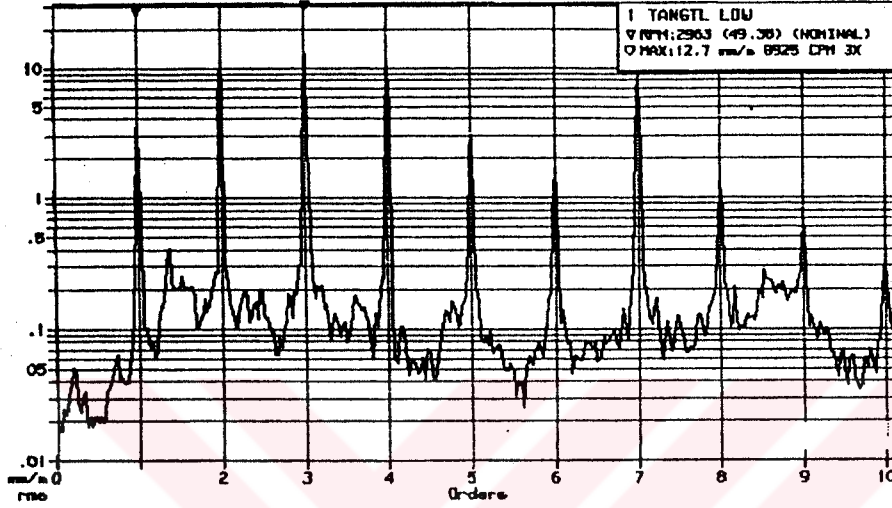


Şekil 6.6 Rotor çubuk frekansı

Kırık rotor çubuğu arızası, eğer baskın titreşim genliği radyal düzlemde  $1 \times \text{RPM}$ 'de ( $1 \times$  dönme devrinde ) ise,  $1 \times$  hat frekansı ( Şebeke frekansı ),  $5 \times$  hat frekansı ve  $7 \times$  hat frekansındaki tepecikler etrafında, kutup sayısı  $\times$  kayma frekansında oluşan yan bantlarla tespit edilir [26]. Ancak, motor boştaiken yan bant oluşmaz.

Buna ek olarak, çatlak rotor barları, çoğunlukla üçüncü, dördüncü ve beşinci dönüş hızı harmonikleri yanında  $F_p$  yan batları oluştururlar. Harmonik, bir frekansın tam sayı katlarıdır. Şekil 6.7'deki spektrum grafiğinde, dönme devrinin tam sayı katları görülmektedir. Ancak, bir frekansın harmonik olabilmesi için mutlaka dönme devrinin katı olması gerekmez.

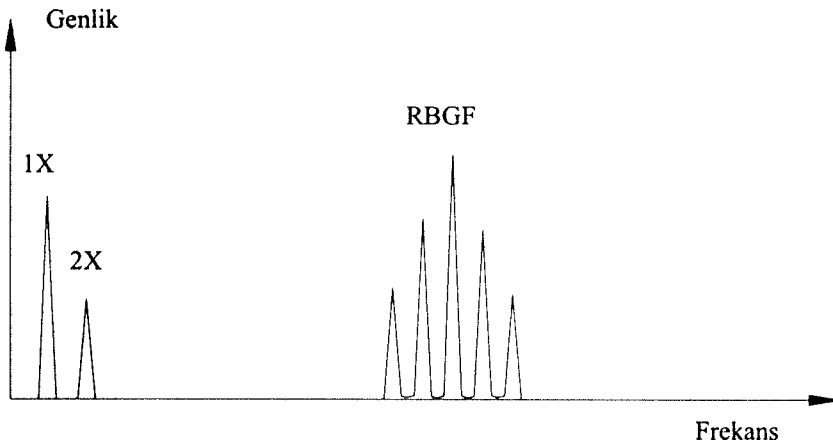
MACHINE: 6 KAZAN BESLEME POMPASI (OK) MID: 0  
 LOCATION: MOTOR SERBEST (1TL) DATE: 24 Sep 1998/09:31:46 RPM: 2963  
 FREQ: 29625 CPM ORDER: 10 X LEVEL: .337 mm/s DELTA: \_\_\_\_\_



Şekil 6.7 Harmonikler

Gevşek rotor barları, rotor barı geçme frekansı ( RBGF ) yanındaki  $2F_L$  yan bantları ile teşhis edilir. Şekil 6.8'de rotor barı geçme frekansı ( Rotor bar pass frequency ) etrafındaki  $2F_L$  yan bantları gösterilmektedir.

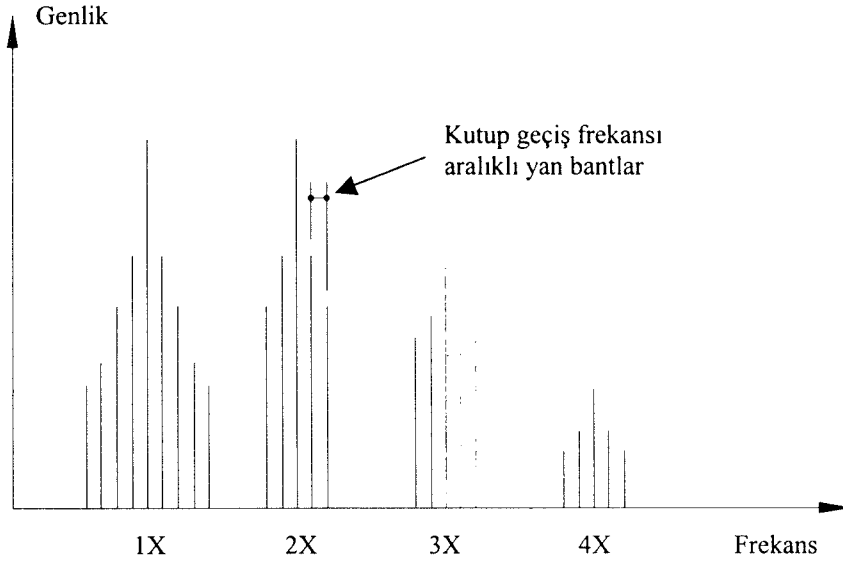
$$\text{RBGF} = \text{Çubuk sayısı} \times \text{devir / dakika} \quad (6.4)$$



Şekil 6.8 RBGF etrafındaki  $2F_L$  yan bantlar

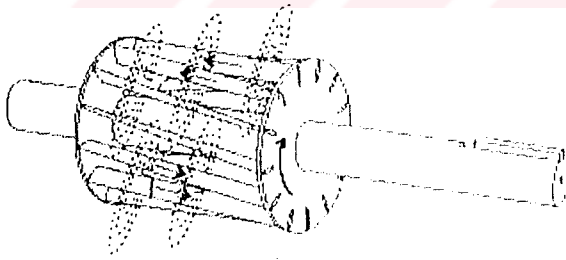


Şekil 6.9'da rotor çubuk kırılmasıyla ortaya çıkan bir çizgisel spektrum grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Kırık rotor çubuğu arızası spektrumu

Rotor kısa devre çubukları aşırı titreşimden, aşırı ısıl gerilmelerden veya döküm sırasında içinde kalmış olabilecek hava boşlukları ve yabancı maddeler nedeniyle kırılabilir.



Şekil6.10 Rotor çubuğu

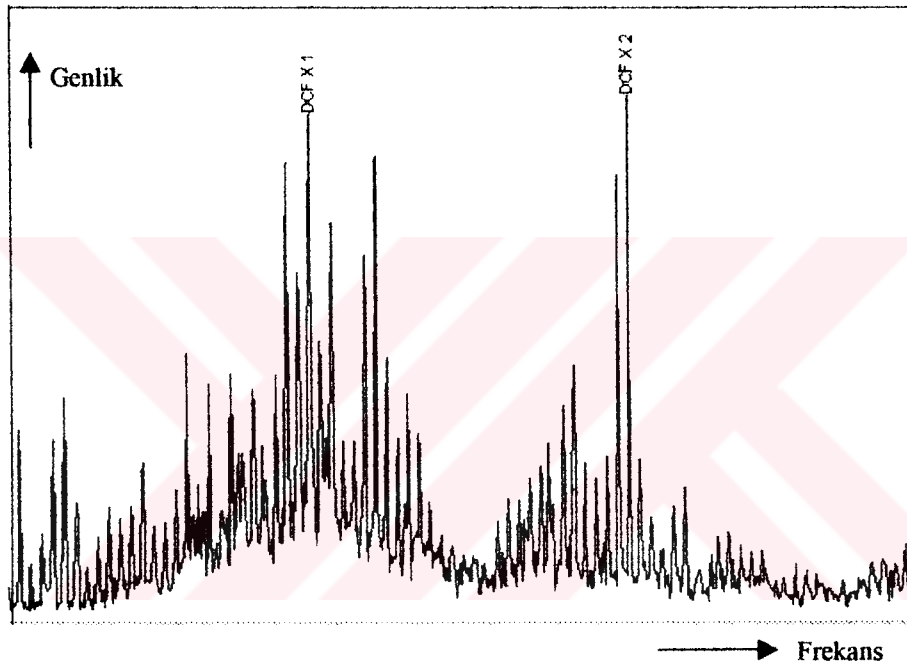
#### 6.4. Dişli Hasarları

Dişli aşınmasının göstergesi, arızalı dişlinin dönüş hızı etrafında , DÇF'nın (Dişli çalışma frekansı) yan bantlarıyla beraber uyarılmasıdır. Burada, yan bant frekansları, dişli çalışma frekansından daha iyi bir aşınma göstergesi olabilir. Çünkü, aşınma ile yan bant genlikleri arttığı halde DÇF artmayabilir. Anlaşılacağı üzere, dişli çalışma

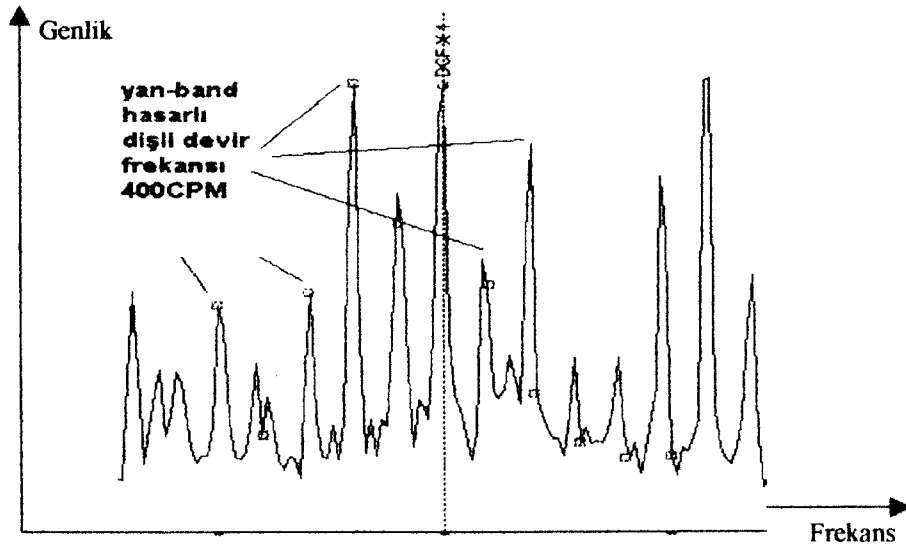
frekansı tek başına bir arıza habercisi değildir. Bir dişli takımı için, DÇF denklem 6.5'deki bağıntıyla bulunabilir.

$$\text{Dişli çalışma frekansı} = \text{Diş sayısı} \times \text{Mil devri} \quad (6.5)$$

Bu denklemden hareketle, 3000 d/dk'da ve 60 diş bulunan bir dişlinin çalışma frekansı  $3000 \times 60$  CPM'dir. Dişli çalışma frekansı, planet dişliler hariç diğer bütün dişliler için bu yöntemle hesaplanır.



Şekil 6.11 Hasarlı dişli spektrumu



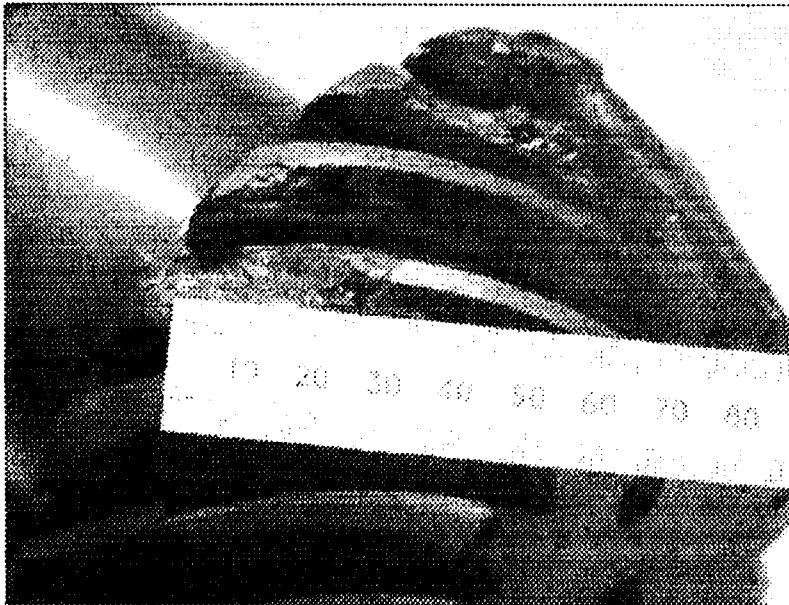
Şekil 6.12 Hasarlı dişli spektrumunda DÇF etrafındaki yan bantlar

Şekil 6.12'de de görüldüğü gibi baskın dişli çalışma frekansı ve bunun etrafındaki yan bantlar, ölçüm radyal yönde yapılmışsa düz dişlide, aksenal yönde yapılmışsa helix dişlide hatalı dişlerin varlığını gösterir. Bununla birlikte,  $1 \times \text{RPM}$ 'deki baskın titreşim dişlide balanssızlık olduğunun habercisi olabilir.

Diş yataklarında eksen kaçıklığı,  $1 \times$  ve/veya  $2 \times$ ,  $3 \times$  RPM'de baskın titreşim frekansları ile tespit edilir. Spektrum grafiğinde, DÇF ( Gear mesh frequency ) yan bantları yok ama harmonikler varsa, problem dişli ayarsızlığı veya modül uyumsuzluğu olacaktır. Eğer spektrum grafiğinde hayalet tepelikleri varsa, bu çatlama nedeniyle rezonans oluşumunu gösterir.

Hayalet frekanslar, özellikle dişlilerin çalışmasında görülebilen ve neden kaynaklandığı tam olarak bilinmeyen ve önceden hesaplanamayan frekanslardır. Bu yapılarından ötürü hayalet olarak adlandırılmışlardır.

Hayalet frekanslar, dişliler kullanıldıkça azaldığından imalattan kaynaklandıkları düşüncesi ağırlık kazanmıştır. Bu nedenle endüstride kabul edilen, dişlilerin imalatında kullanılan tezgahlardaki ayarsızlıklar ve diş açmadaki kaçıklıklardan kaynaklandıklarıdır [9].



Şekil 6.13 Hasarlı dişli görüntüsü

## 6.5. Eksenel Kaçıklık ( Kaplin Ayarsızlığı )

Kaplin, tahrik sisteminin en önemli elemanlarından biridir. Sistem içerisinde hareketin bir milden diğerine aktarılması, iki mil arasındaki açısal ve eksenel bozuklukların ayarlanması ve burulma titreşimlerinin sönmülmesi gibi işlevleri vardır.

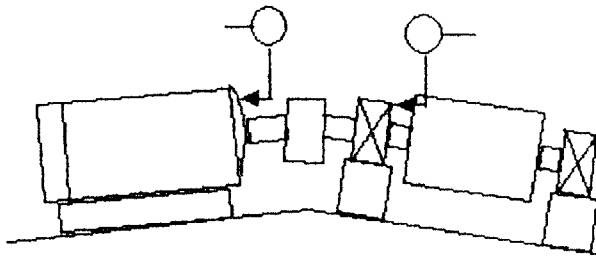
Kaplin ayarsızlığı, rulman arızalarının yaklaşık olarak %50'sine neden olmaktadır. Çünkü, ayarsızlıktan doğan kuvvetler rulmanları etkilemektedir.

Buna ek olarak, kaplin ayarsızlığı, meydana getirdiği yüksek titreşimler ve kuvvetlerle diğer makine elemanlarının da ömrünün kılmasına ve enerji kaybına da neden olmaktadır. Örneğin,  $2^\circ$ 'lik bir açısal sapmanın 200 beygirlik bir motorda meydana getirdiği yıllık enerji kaybı,  $200 \times 745.7 (W) \times \sin 2 = 5.205 kW$  'dır. Sanayi elektriğinin kW-saatinin 1.172 TL olduğu düşünülürse, günde ortalama 22 saat çalışan bir makinenin meydana getireceği yıllık enerji kaybının maddi miktarı;  $5.205 \times 22 \times 365 \times 1.172 = 48985088$  TL olur [26].

Görüleceği üzere, kaplin ayarsızlığı makine ve makine elemanlarının ömrünü ciddi bir şekilde etkilerken ilave maddi külfet getirdiğinden, bakım mühendisliğinde önemli bir yer tutmaktadır.

### 6.5.1. Açısal kaçıklık

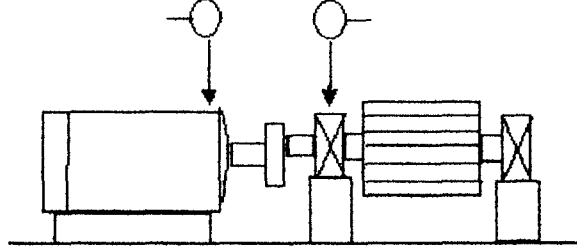
Açısal kaçıklık  $1 \times$ ,  $2 \times$  yada  $3 \times$  RPM'de yüksek eksenel titreşim ve iki tarafından  $180^\circ$  faz farkıyla kendini gösterir.



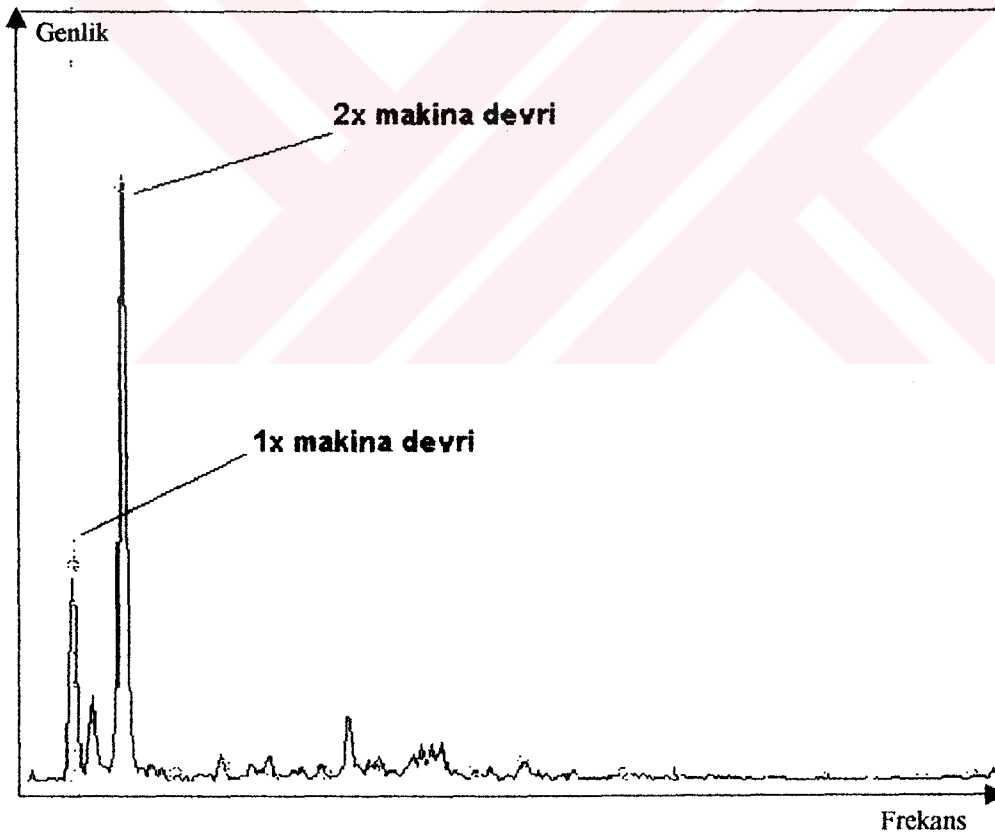
Şekil 6.14 Açısal kaçıklık

### 6.5.2. Paralel eksen kaçıklığı

Paralel eksen kaçıklığı da açılma kaçıklığına benzer olarak  $1\times$ ,  $2\times$  yada  $3\times$ RPM'de ancak faz farkı kaplinin her iki tarafında  $180^\circ$ 'ye varan radyal yönde yüksek titreşimler oluşturur.



Şekil 6.15 Paralel eksen kaçıklığı



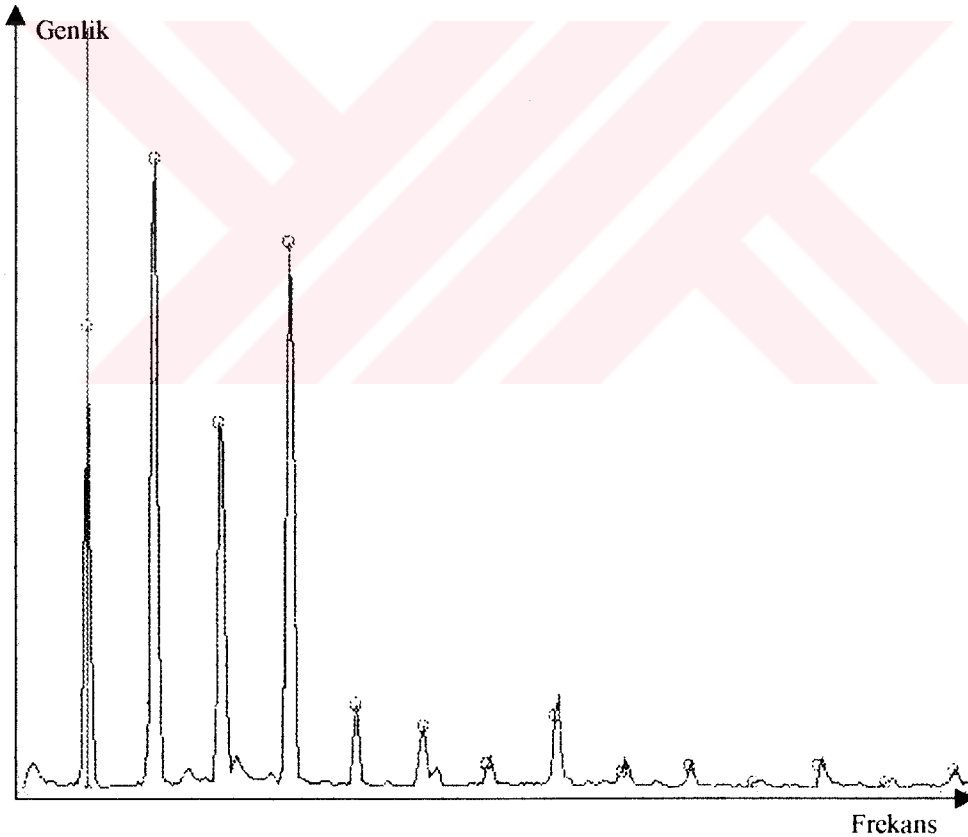
Şekil 6.16 Eksen ayarsızlığı spektrumu

Şekil 6.16'daki spektrum grafiğinde de görüldüğü gibi  $1\times$  ve  $2\times$  RPM'deki yüksek tepcikler ( Pik ) ve  $4\times$ - $10\times$  RPM frekansı aralığında düşük harmonikler, eksen ayarsızlığının göstergesidir.

## 6.6. Mekanik Gevşeklik

Bu arıza tipinde faz farkı genellikle düzensizdir. Bir ölçümden diğerine büyük miktarda değişim gösterir. Bu durum, gevşek elemanın çalıştırılması sırasında yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Rulman üzerinde  $30^\circ$ 'lik farklarla alınacak ölçümlerde büyük farklar bulunabilir [25].

Dönen kısmın üzerinde mekanik çözülme varsa, dalgaformu grafiğinde genlik seyri düzensizlik gösterir. Negatif pozitif arası hareketlilik, farklı genlik şiddetlerinde olur. Bununla birlikte, mekanik gevşeklik, alt harmoniklerde titreşimlere neden olabilir ( $1/2 \times$ ,  $1/3 \times$  RPM veya  $1/2 \times$ ,  $3/2 \times$ ,  $5/2 \times$  RPM gibi).

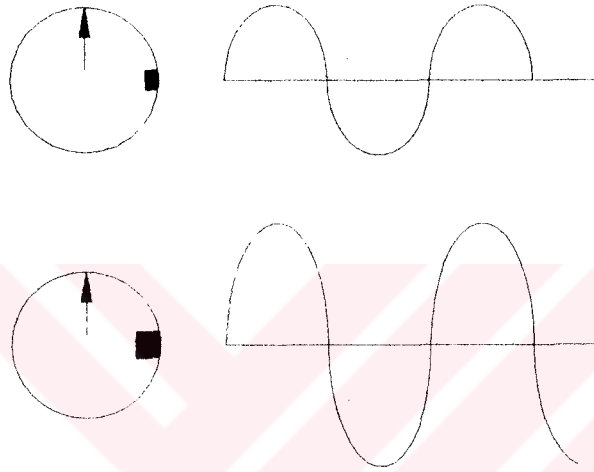


Şekil 6.17 Mekanik gevşeklik spektrumu

Şekil 6.17'deki spektrum grafiğinde de görüldüğü üzere radyal yönde yüksek titreşimler ve  $1 \times$  RPM harmoniklerinde farklı şiddette harmonikler ve yarı harmonikler bulunması mekanik gevşekliğin olduğunu gösterir.

### 6.7. Balanssızlık ( Dengesizlik )

Balans bozukluğu ( Dengesizlik ), dönel elemanların, geometrik merkez ile ağırlık merkezlerinin bir olmaması nedeniyle, öngörülen merkez dışında dönmesinden oluşur. Bu farklılık, shaftın dönme devri frekansında yüksek titreşimlere neden olur. Bu titreşimin genlik değeri, şekil 6.18'de de gösterildiği üzere dengesizlik arttıkça artar.



Şekil 6.18 Titreşim dalgaformu genliği dengesizlik arttıkça artar

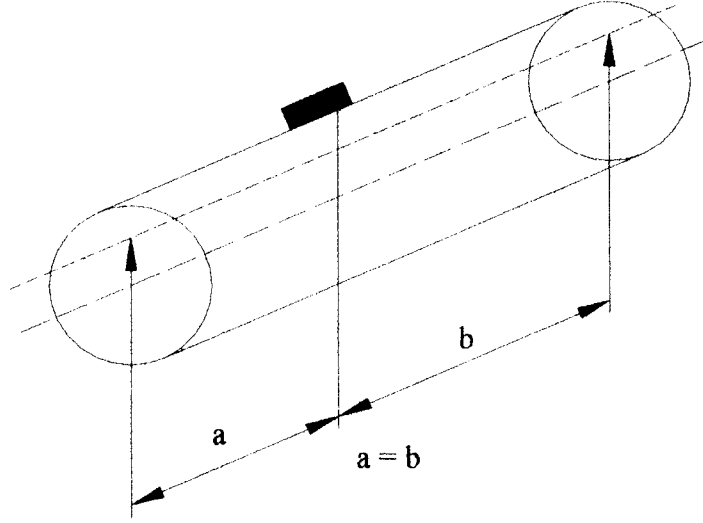
Makinelerde, normal koşullarda bulunan atalet momentleri, dönen ekipmanlarda sarsma kuvveti oluştururlar. Çeşitli nedenlerle, bu kuvvetlerde oluşacak yükselmeler, titreşim seviyelerinde de yükselme olarak kendini gösterirler. Bu titreşimler de, hareketli elemanların bağlantı noktaları olan yataklarda aşınmalara ve malzeme yorulmalarına neden olur [27].

Balans bozukluğu, denklem 6.6'da gösterildiği gibi, dengelenmemiş kütlenin ağırlığı ( $u$ ) ile bu kütleyle ait yarı çapın ( $r$ ) çarpımına eşittir.

$$U = u \times r \quad (6.6)$$

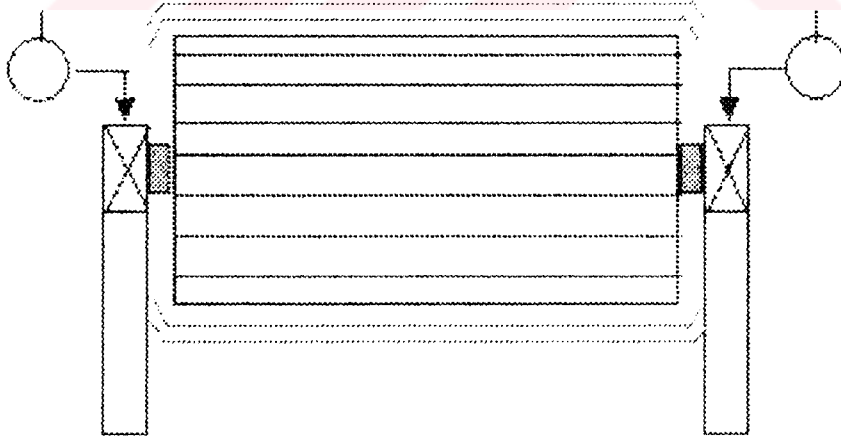
Balans bozukluğu statik ve dinamik olarak ikiye ayrılır. Sistemde ne tür bir balanssızlığın olduğu ( Statik veya dinamik ), dengesizlikten oluşan kuvvetin vuru yeri ve faz ölçümü ile belirlenir.

Statik balanssızlık, rotor dönüş ekseninin, ağırlık eksenine paralel olmama halidir. Bu durumda rotorun her iki yatağında titreşim ve faz değerleri aynı olacaktır [27].



Şekil 6.19 Rotor üzerinde statik balanssızlığın gösterimi

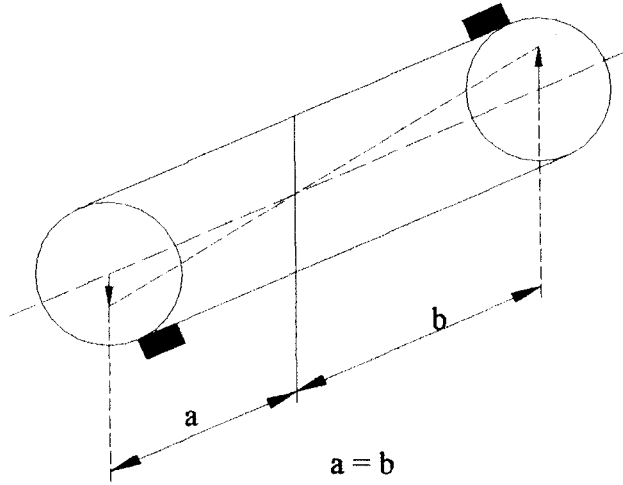
$1 \times \text{RPM}$ 'de her zaman baskın bir titreşim genliği vardır. Titreşim genliği, devrin karesiyle doğru orantılı olarak artar. Balans bozukluğu, rotor ağırlık merkezine koyulabilecek tek bir balans kütlesi ile düzeltilebilir.



Şekil 6.20 Statik balanssızlık

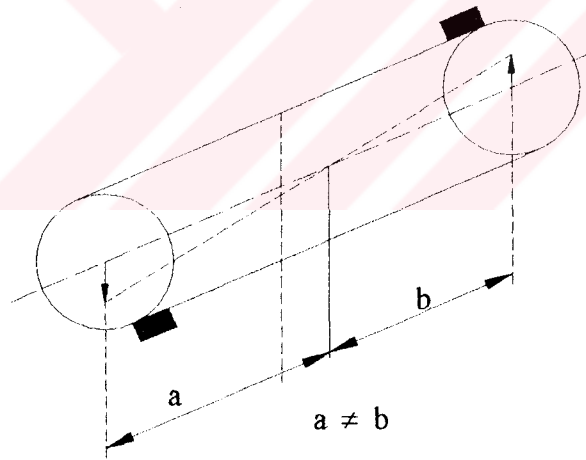
Eş kuvvet çiftli balanssızlık, ağırlık merkezi ekseninin, dönme eksenine ağırlık merkezinde kesişmesi halidir. Yataklardan alınan titreşim değerleri aynı, faz açısı  $180^\circ$  farklıdır [27].





Şekil 6.21 Eş kuvvet çiftli balanssızlık

Farklı kuvvet çiftli balanssızlık, rotor ağırlık merkezi eksenine dönme merkezinin, ağırlık merkezi dışında kesişmesi halidir. Yataklardan alınan titreşim değerleri farklı faz açısı  $180^\circ$  'dir.

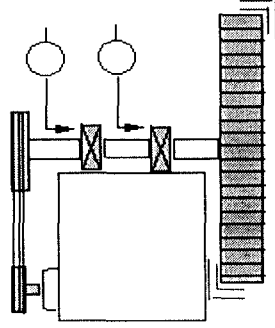


Şekil 6.22 Farklı kuvvet çiftli balanssızlık

Dinamik balanssızlık, en fazla karşılaşılan dengesizlik tipidir. Bu arıza tipinde, ağırlık merkezi eksenine dönme merkezi eksenine kesişmemektedir. Gerek faz açıları, gerekse titreşim değerleri arasında bir benzerlik yoktur.

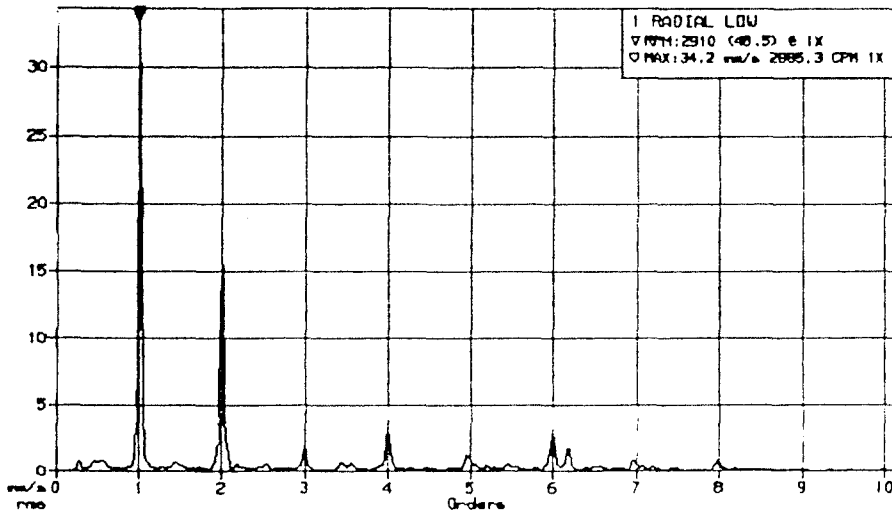
Balans bozukluğu bulunan rotorlarda hem düşey, hem de yatay yönde ve daima dönme devri frekansında ( $1 \times$ ) pik olur. Yalnız önemli bir nokta da şudur ki, her iki

taftan mesnetlenmiş bir rotorda, dönme devrinde pikin, sadece yatay ve dikey yönlerde olması beklenir. Bu tip mesnetli fanlarda merkezkaç kuvveti mil eksenine dik bir düzlemde olduğu için, sadece yatay ve dikey yönlerde kuvvet oluşmakta, mil eksenini yani eksenel yönde kuvvet oluşmamaktadır. Oysa, ankastre fanlarda, fan milin ucundan sarktığı için balans bozukluğu olduğu zaman sadece yatay ve düşey yönlerde değil, eksenel yönde de yine dönme devrinde pik meydana gelir [9].



Şekil 6.23 Ankastre rotor

Ankastre rotolarda  $1 \times \text{RPM}$ 'de hem radyal ( Yatay ve dikey ), hem de eksenel yönlerde yüksek titreşimler görülür. Eksenel titreşimler aynı fazda iken, radyal titreşimler düzensizlik gösterir. Ankastre rotolar hem dinamik, hem de statik balans bozukluğu gösterirler. Şekil 6.24'de her iki taraftan mesnetlenmiş bir rotordan alınan balans bozukluğu spektrum grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6.24 Balans bozukluğu spektrumu

Şekil 6.24'deki spektrum grafiğinde de görüldüğü gibi,  $1 \times \text{RPM}$ 'deki makine dönüş hızı arttıkça artan pik,  $2 \times \text{RPM}$  ve  $3 \times \text{RPM}$  frekanslarındaki düşük genlik seviyeleri ve düşük eksenel titreşim, rotorda balans bozukluğunun varlığını göstermektedir.

Burada unutulmaması gereken nokta,  $1 \times \text{RPM}$  frekansındaki tepelik değeri, devirdeki küçük değişikliklerle anormal miktarlarda değişiyorsa, aslında balans bozukluğu gibi görülen problem rezonanstır [28]. Aynı şekilde, balanssızlık durumundan yatay ve dikey yönlerde alınan ölçümlerde faz açısı  $90^\circ (\pm 30)$  olmalıdır. Eğer faz açıları aynı ise yada çok yakınsa, sorun balanssızlık değil de rezonans olacaktır.



Şekil 6.25 Balans bozukluğu spektrum grafiği

### 6.8. Rulman Arızaları

Rulmanlar dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilyeler olmak üzere dört elemandan oluşurlar. Kaplin ayarsızlığı, balans bozukluğu, yağ ve greste kirlilik partikülleri, hatalı montaj, hatalı imalat, aşırı yük, aşırı sıcaklık ve korozyon gibi çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilecek rulman arızaları, titreşim spektrumunda değişik frekanslarda ortaya çıkar. Örneğin; dış bilezikteki bir çatlak dış bilezik frekansında

ve yuvarlanma yolundaki bir karıncalanma o bilezikle ilgili frekansta ortaya çıkar. Rulman arıza frekansları, tamamen rulmanın geometrisine bağılı olarak, dört elemanın birbirine göre dönme devirleri sonucu ortaya çıkan ve bu elemanların hangisinde hasar olduğunu gösteren arıza frekanslarıdır. Rulman elemanlarının dönmeye bağılı frekansları aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

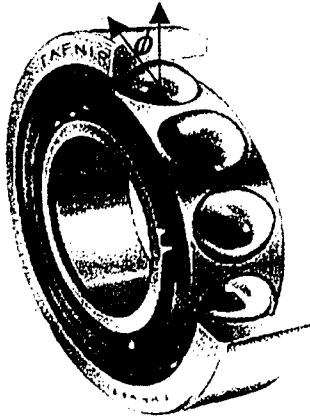
$$f_{\text{iç bilezik}} = \frac{1}{2} N \left[ 1 + \left( \frac{D_b}{D_p} \cos \phi \right) \right] \quad (6.7)$$

$$f_{\text{dış bilezik}} = \frac{1}{2} N \left[ 1 - \left( \frac{D_b}{D_p} \cos \phi \right) \right] \quad (6.8)$$

$$f_{\text{bilye}} = \frac{1}{2} \left( \frac{D_p}{D_b} \right) \left[ 1 - \left[ \left( \frac{D_b}{D_p} \right)^2 \cos^2 \phi \right] \right] \quad (6.9)$$

$$f_{\text{kafes}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{D_b}{D_p} \cos \phi \right) \right] \quad (6.10)$$

Bu denklemlerde  $D_b$  iç bilezik çapını,  $D_p$  bölüm dairesi çapını,  $N$  bilye sayısını ve  $\phi$  temas açısını temsil etmektedir.



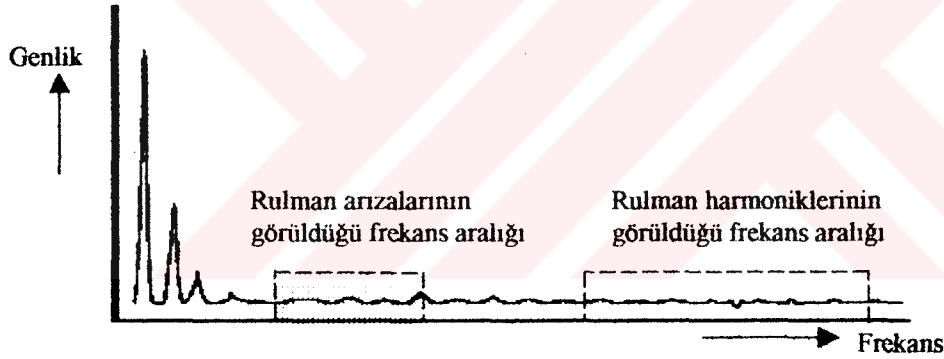
Şekil 6.26 Temas açısı

Bilyeli rulmanlarda aksel yönde de yük alabilmek için, dış bilezik yuvarlanma yolu simetrik değildir. Bilye, dış bileziğe yükü, düz rulmanlarda olduğu gibi radyal olarak değil de açıyla verir. Bu açıya temas açısı ( Dokunma açısı ) denir. Pratikte, temas açısı  $0^\circ$  olarak alınabilir. Bölüm dairesi çapı da, denklem 6.11'deki gibi bulunabilir.

$$D_p = 0.5 \times ( \text{Dış çap} + \text{İç çap} ) \quad ( 6.11 )$$

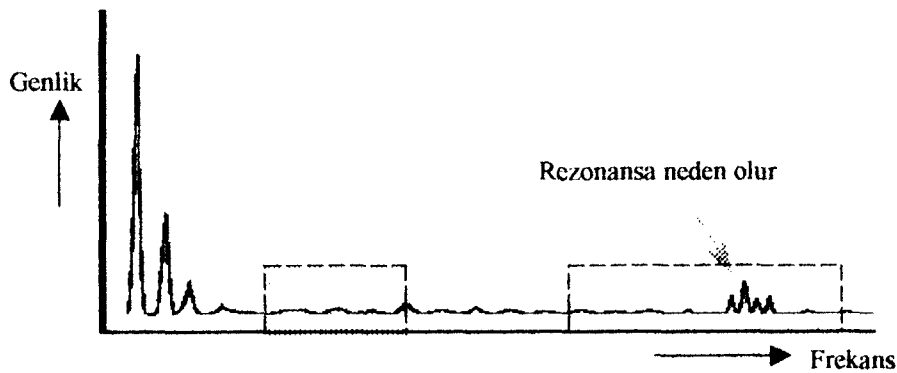
Rulmanlarda kafes frekansı, iç bileziğin bir dönüşüne karşılık bilyeleri tutan kafesin devir sayısını gösterir. Bu frekans, iç bilezik devrine oranla 0.25-0.45 arası değişir.

Rulman hasarlarının ilk belirtileri 30 000 – 60 000 RPM gibi ultrasonik frekans aralıklarında, bilyeli rulmanlarda radyal, konik rulmanlarda aksel yönde alınan spektrum grafiklerinde ortaya çıkar.



Şekil 6.27 Rulman arızalarının ve harmoniklerinin ortaya çıktığı frekans aralıkları

Özellikle, yan bant oluşumları, rulman hasar frekansına eşlik ettiği zaman hasar gözle görülür seviyeye gelmiş demektir[25].



Şekil 6.28 Rulman arıza frekansları harmonikleri

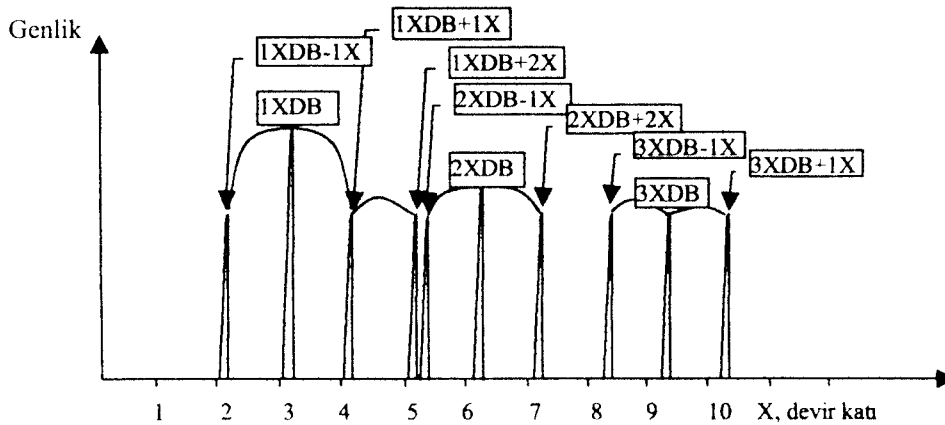
Eğer bu aşamadan sonra rulmanlar değiştirilmezse, mil devir frekansı ve harmonikleri yükselir. Rulman hasar frekansları, dağınık ve geniş bant gürültü frekansları görüntüsünü alır.



Şekil 6.29 İlerlemiş rulman hasar frekansı

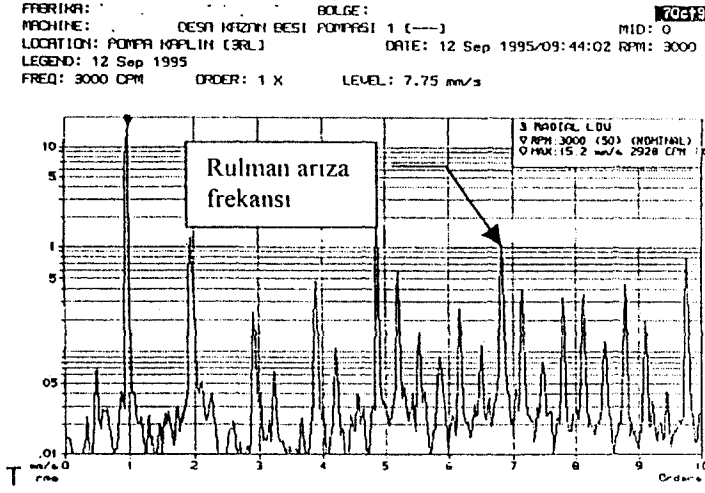
Burada unutulmaması gereken bir nokta da şudur ki, bir makinede rulmanın hasarlı olup olmadığının tespit edilebilmesi için rulman arıza frekanslarının bilinmesi gerekir.

SKF 6326 rulmanın elemanlarının dönmeye bağlı frekansları;  $f_{\text{kafes}}=0.26$ ,  $f_{\text{bilezik}}=2.20$ ,  $f_{\text{dış bilezik}}=3.13$  ve  $f_{\text{iç bilezik}}=4.87$ 'dir. Görüldüğü gibi, bu rulmanın dış bilezik arıza frekansı 3.13 RPM'dir. Diğer bir deyişle, rulman 1463 d/dk ile dönen bir mile takılırsa, dış bilezikte bir arıza olup olmadığının  $3.13 \times 1463 = 4579$  CPM frekansında aranması gerekir.



Şekil 6.30 Dış bilezik arıza frekansı ve harmonikleri

Şekil 6.30'da bir dış bilezik arıza frekansları ve bunun 1. ve 2. harmoniklerinin ortaya çıktığı frekans aralıkları gösterilmektedir. Burada,  $2 \times DB$  dış bilezik arıza frekansının 1. harmoniğini ifade etmektedir [29].



Şekil 6.31 Hasarlı bir rulmanın spektrum grafiği

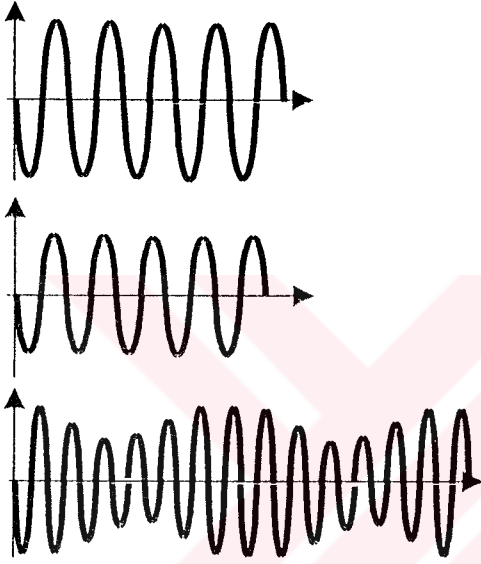
Şekil 6.31'deki spektrum grafiğine bakıldığında dış bilezik arıza frekansında görülen yüksek genlik ve harmoniklerle, yan bant oluşumları nedeniyle, burada dış bilezik arızası bulunmaktadır ( Rulman arızaları, rulmanın dönmeye bağlı frekansının yaklaşık iki katında kendini gösterir).



Şekil 6.32 Hasarlı rulman

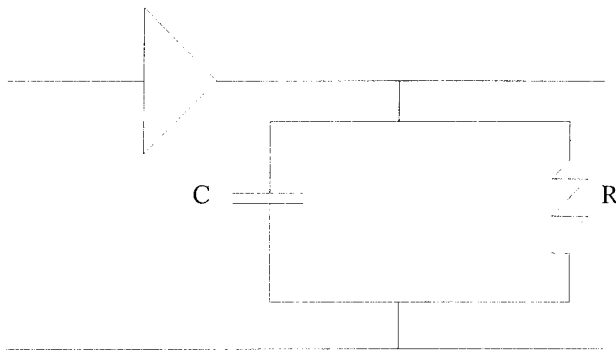
### 6.8.1. İvme zarfı ( Acceleration enveloping ) tekniği

Rulman arızası sinyalleri, üzerinde oldukları milin dönme devrindeki titreşimle modüle olurlar. Bu nedenle, makinelerde sık rastlanabilecek balanssızlık, eksen ayarsızlığı ve gevşeklik gibi sorunlar yüzünden, rulman hasar sinyalleri, rulmanlarda ciddi hasarlar meydana gelmeden, hız ölçümleriyle saptanamayabilir. Modülasyon, iki titreşim kaynağının birbirini değişime uğratmasıdır. Şekil 6.33’de modüle olmuş iki sinyal gösterilmektedir.



Şekil 6.33 Birbirini değişime uğratmış iki titreşim sinyali

Yeni başlamış rulman hasarlarını erken teşhis edebilmek için ivme zarfı denilen bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemde, modüle olmuş titreşim sinyalleri birbirinden ayrılır ( Demodülasyon ). Şekil 6.34’de basit bir demodülasyon devresi gösterilmektedir.

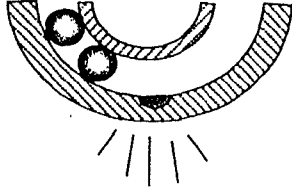


Şekil 6.34 Demodülasyon devresi



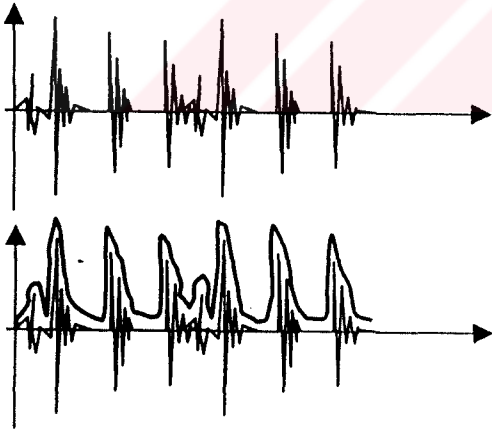
Şekil 6.34'de diyot + direnç + kondansatörden oluşan demodülasyon devresi görülmektedir. Bu devredeki, R direnç değeri ile C kondansatör değeri, devrenin kesme frekansını ( Cut – off frequency ) tespit eder [9].

$$f_{\text{kesme frekansı}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6.12)$$



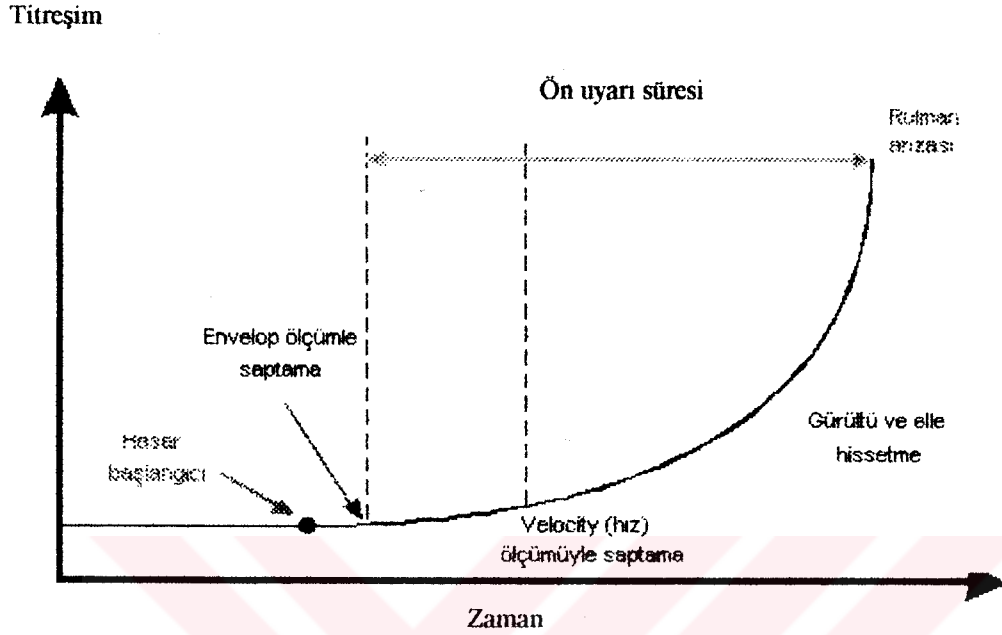
Şekil 6.35 Bilyenin yuvarlanma yolunda çarptığı çukur

Şekil 6.35'de gösterildiği gibi, yuvarlanma yolunda bir çukura çarpan bilyenin meydana getirdiği titreşim sinyaline demodülasyon işlemi uygulandıktan sonra oluşan dalgaform grafiği şekil 6.36'da gösterilmektedir. Görüntü melek balığı anımsattığından bu yapıya melek balığı deseni denir.



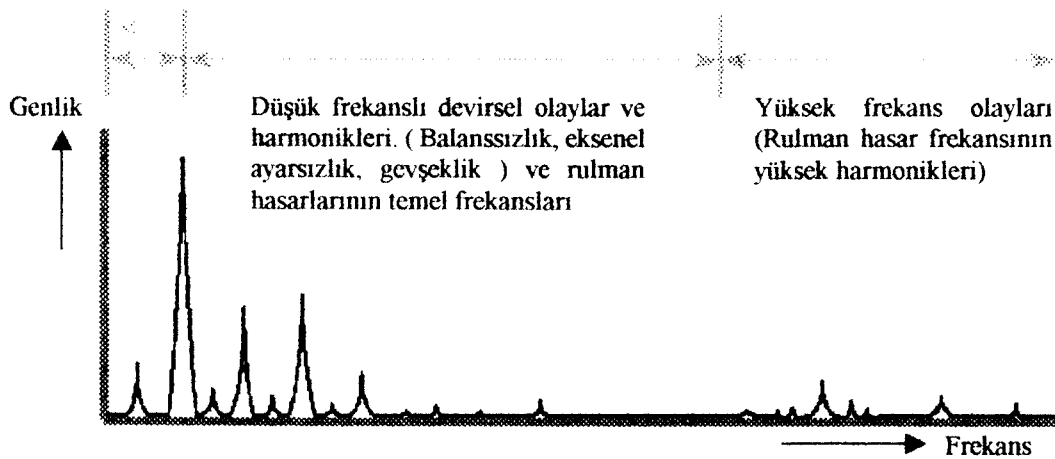
Şekil 6.36 Melek balığı deseni

$$H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot \frac{1}{t-\tau} d\tau \quad (6.13)$$



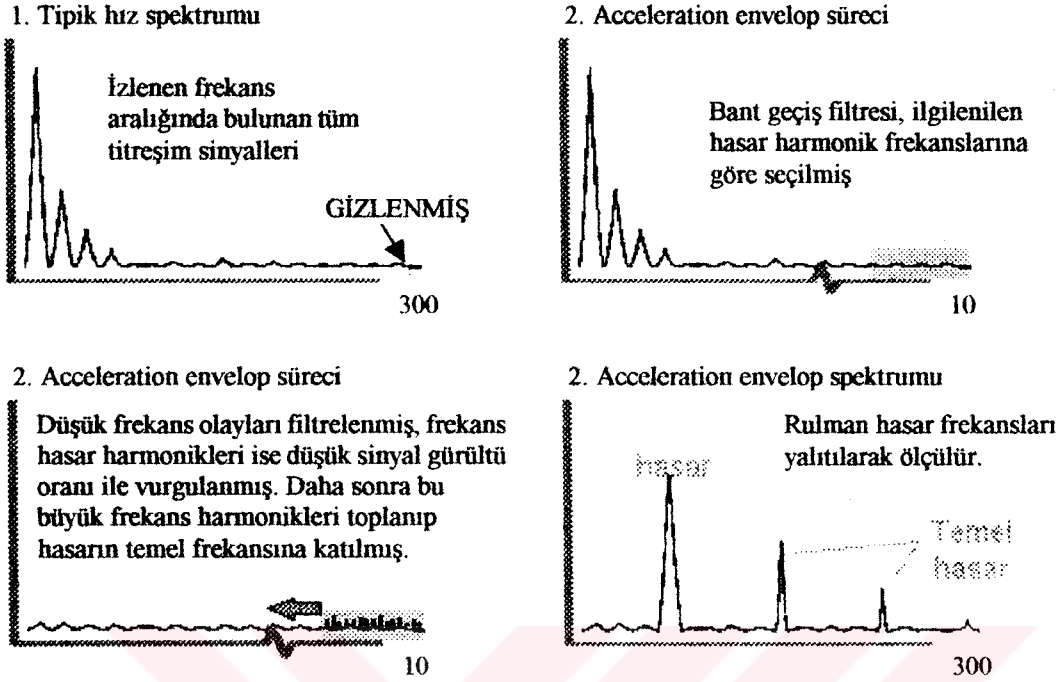
Şekil 6.37 Rulman arıza titreşiminin zaman düzlemindeki eğilimi

Şekil 6.37’de görülen hız ölçümüyle saptama noktasında, sadece rulman arıza frekansları değil, bu frekansların harmonikleri ( Tam sayı çarpan katları ) ve arıza frekansının dönme devriyle modülasyonu sonucunda meydana gelen yan bantlarla rulman arızası saptanabilir. Daha ileriki safhalarda, geniş frekans bandında titreşim seviyelerinin yükseldiği görülür.



Şekil 6.38 Düşük ve yüksek frekans seviyeleri

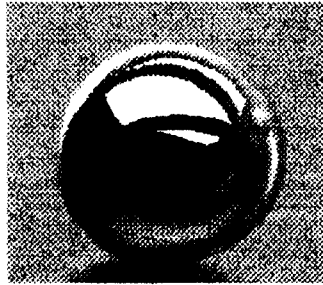
Şekil 6.39'da ivme zarfı yönteminin süreci gösterilmektedir.



Şekil 6.39 İvme zarfı yöntemi süreci

### 6.8.2. Rulman arızalarının nedenleri

Erken rulman hasarlarının % 16'sı yanlış montajdan kaynaklanmaktadır. Montaj, özel araç gereç ve teknikler kullanılarak yapılırsa, rulmanların ömrü azami ölçüde arttırılır.



Şekil 6.40 Yanlış montaj nedeniyle hasara uğramış rulman

Erken rulman hasarlarının % 14'ü yağa karışan yabancı madde (kir, su gibi) problemlerinden olur. Bir rulman, hem kendisi hem de yağ kirlilikten tamamen uzaklaştırılmadıkça verimli çalışmayacaktır [25].



Şekil 6.41 Kirlenme nedeniyle deforme olmuş bir rulman

Rulman hasarlarının % 36'sı hatalı seçilmiş yağ kullanmaktan yada rulmanlar, makinelerin en zor ulaşılabilen parçaları olduğundan, yağlamaya yeteri kadar önem verilmemesinden kaynaklanır.



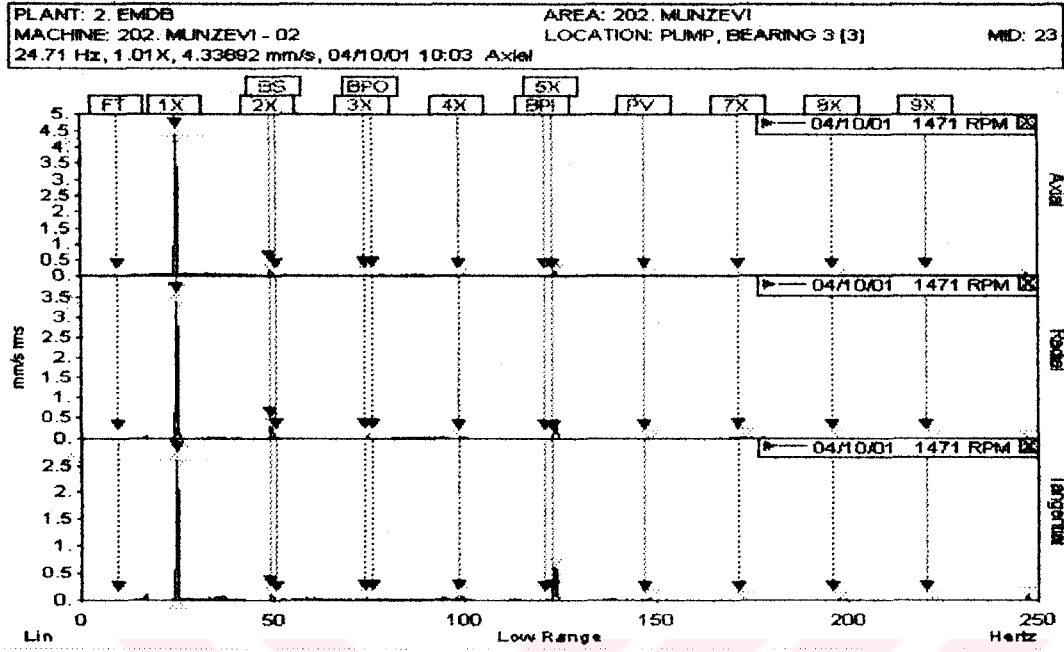
Şekil 6.42 Hatalı yağlamadan deforme olmuş bir rulman

Erken rulman hasarlarının % 34'ü aşırı yüklenmiş, yanlış bakım ya da ihmal edilmiş makineler yüzünden olur. Rulmanlar durum izlemeye bağlı bakım programları ile saptanabilen "erken uyarı" sinyalleri yaydıklarından, ani arızalar engellenebilir [25].

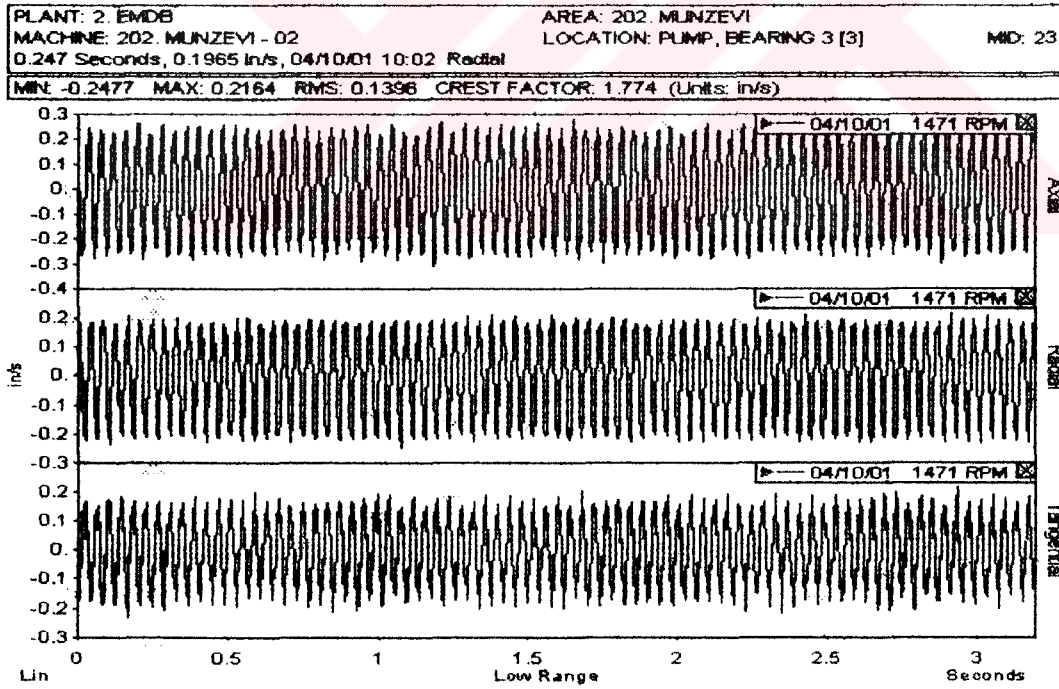


Şekil 6.43 Yorulma nedeniyle deforme olmuş bir rulman

## 6.9. Örnek Uygulamalar



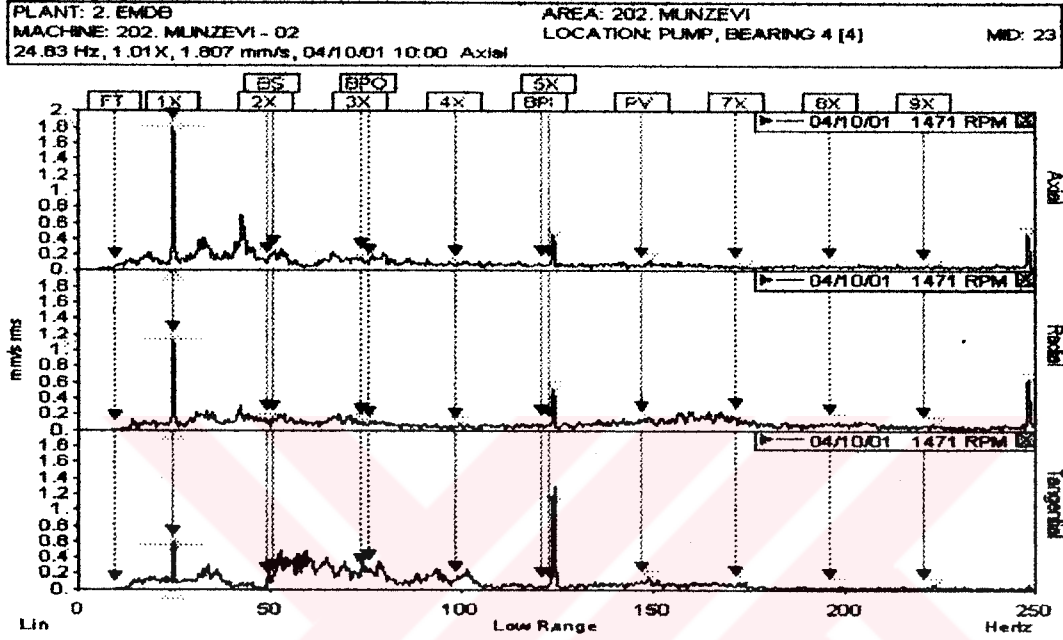
Şekil 6.44 Pompa milinden alınan spektrum grafiği



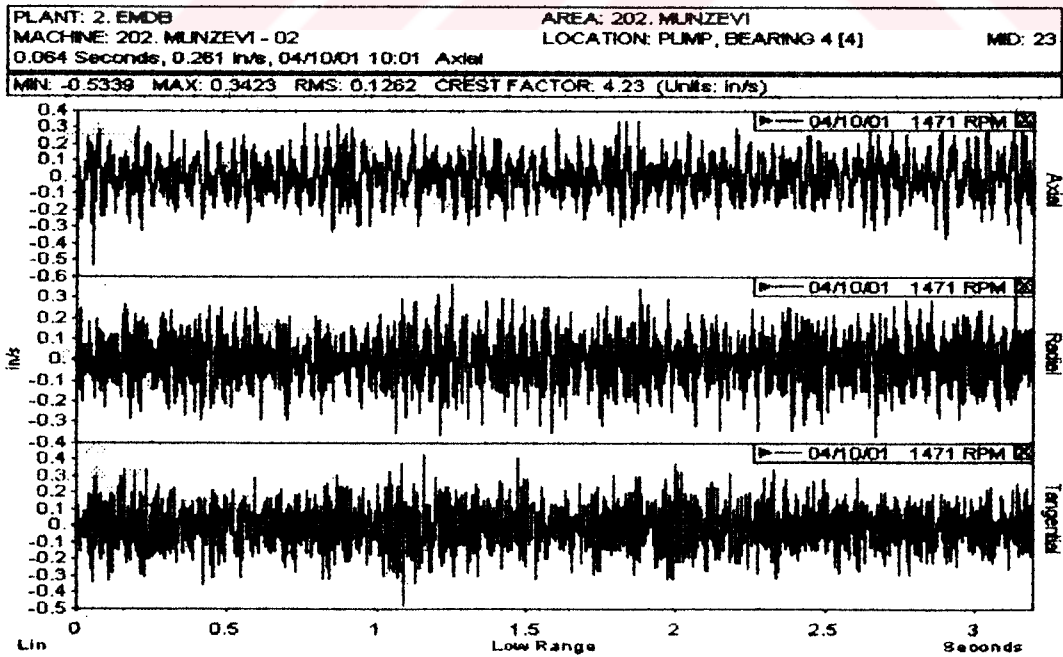
Şekil 6.45 Pompa milinden alınan dalgaform grafiği

Şekil 6.44'de görülen spektrum grafiğinde yatay, dikey ve eksenel yönde 1X dönme devrinde piklerin olduğu görülmektedir. Dönme frekansının 1. katındaki bakın

tepecikler, ölçüm alınan pompa milinde bir balanssızlığın olduğunu göstermektedir. Ancak, dikkat edilmesi gereken bir noktada şudur ki, eksenel yönde alınan ölçümde 1X dönme devrinde pik oluşmaktadır. Eğer mil, her iki ucundan da mesnetlenmiş olsaydı, sadece yatay ve dikey yönlerde ( 1X RPM'de ) baskın titreşimler oluşacaktı. Anlaşıldığı üzere, ölçüm alınan pompanın mili ankastre bir yapıya sahip.

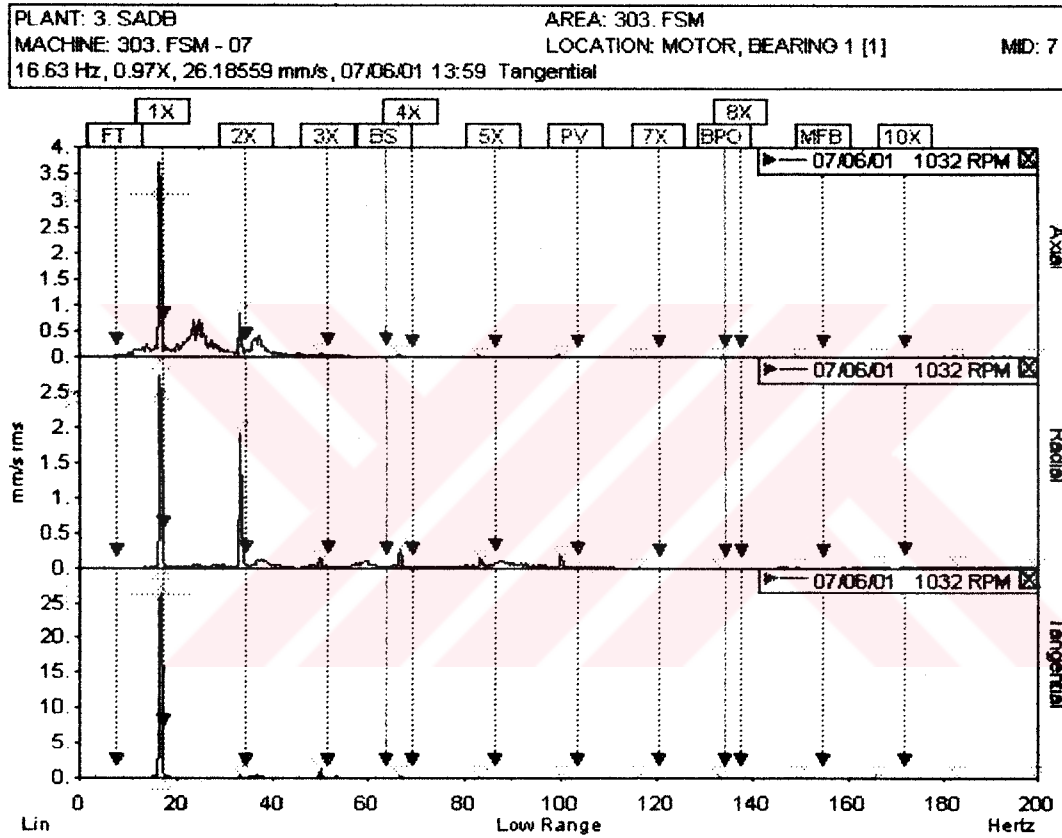


Şekil 6.46 Pompa mili üzerindeki rulmandan alınan spektrum grafiği



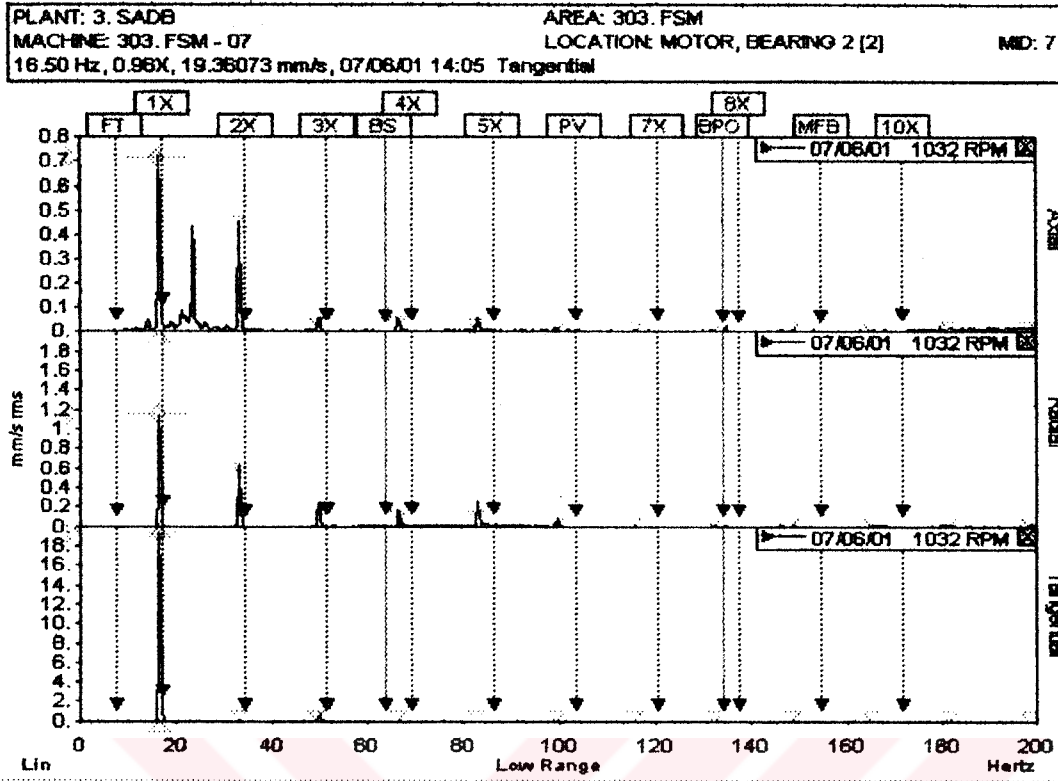
Şekil 6.47 Pompa mili üzerindeki rulmandan alınan dalgaform grafiği

Şekil 6.47'deki dalgaform grafiğindeki meler balığı deseni, ölçüm alınan pompa mili üzerindeki rulmanda hasar olduğunu göstermektedir. Şekil 6.46'daki spektrum grafiğinde radyal yöndeki yan bant oluşumları ve rulman hasar frekansındaki dağınık görüntü hasarın ilerlemiş olduğunun işaretidir. Ayrıca, bu belirtilerin radyal yönde alınmış olan grafikte ortaya çıkması, kullanılan rulmanın bilyeli rulman olduğunu gösterir. Grafiklerden hareketle, ölçüm alınan bu rulmanın bilyelerinin yuvarlanma yolunda bozulma ( Çukur v.s. ) oluştuğu söylenebilir.

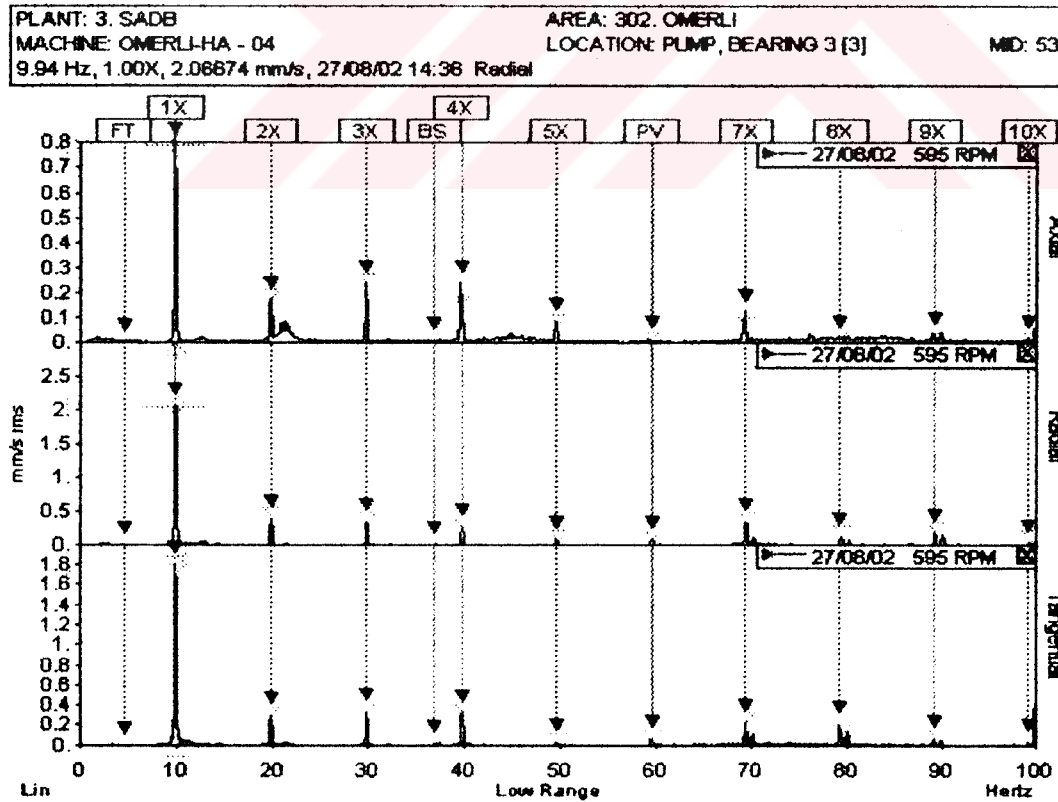


Şekil 6.48 Motor yatağından alınan birinci spektrum grafiği

Şekil 6.48 ve şekil 6.49'daki spektrum grafiklerine bakıldığında, aynı makine elemanı üzerinden alınan ölçümler arasındaki değişimler gözlemlenmektedir. Bu durum, gevşek makine elemanının çalıştırılması sırasında yer değiştirmesinden kaynaklanabilir. Bununla birlikte, radyal yöndeki yüksek titreşimler ve 1X RPM harmoniklerinde farklı şiddette görülen yarı harmonikler ve harmonikler, ayrıca 3/2X ve 5/2X RPM'de gözlenen alt harmonikler, ölçüm alınan bu makine elemanında mekanik gevşekliğin olduğunu işaret etmektedir.



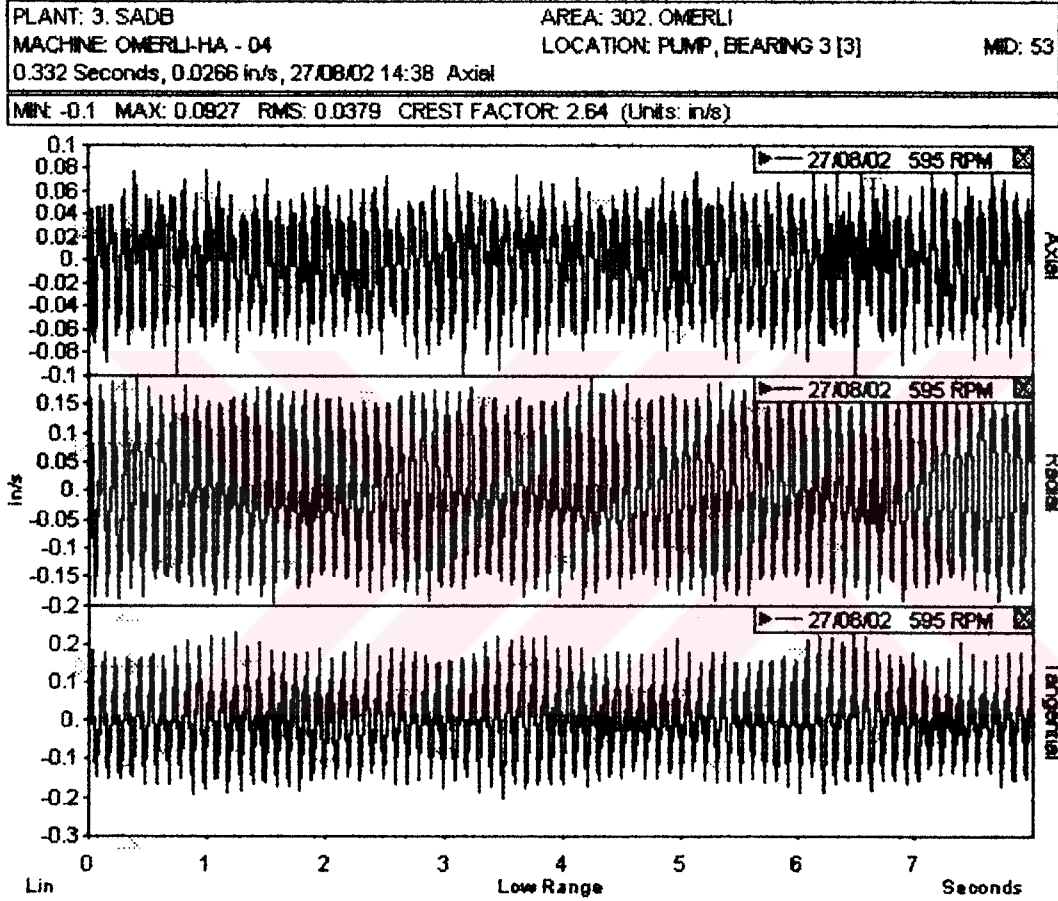
Şekil 6.49 Motor yatağından alınan ikinci spektrum grafiği



Şekil 6.50 Pompanın rulmanından alınan spektrum grafiği



Şekil 6.50'deki spektrum grafiğinde rulman arıza frekansında yüksek titreşimler ve yan bant oluşumları görülmektedir. Eksenel yönde alınan ölçümde rulman harmonikleri de oluşmaya başlamıştır. Bu belirtilerin eksenel yönde güldüğünden hareketle kullanılan rulmanın konik rulman olduğu söylenebilir. Bunların yanında, şekil 6.51'deki dalgaform grafiğindeki melek balığı deseni, ölçüm alınan bu rulmanda hasar olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.51 Pompanın rulmanından alınan dalgaform grafiği

## BÖLÜM 8 SONUÇLAR

Bir düşünür, “En büyük tehlike, beklenmeyen tehlikedir.” demiş. Bir fabrikada, beklenmeyen arızaların bakım ve onarımının çeşitli nedenlerle ( yedek parça bulunamaması gibi)uzun sürmesi ve bundan kaynaklanan üretim kayıplarıyla birlikte maliyetteki artışlar. Bu sözün ne kadar doğru olduğunu kanıtlar niteliktedir. Uyarıcı bakım, makinelerden en yüksek verimi alabilmek ve üretim kayıplarını en aza indirmek için geliştirilmiş bir yöntemdir.

Uyarıcı bakım yönteminin uygulamaya sokulduğu işletmelerde, bakım ve yedek parça maliyetlerinde yaklaşık %27, koruyucu bakım maliyetinde %74 ve toplam duruş süresinde de %40’lık bir azalma sağlanabilmektedir. Bakım giderlerinin %10-%40 mertebesinde olduğu günümüzde, titreşim izleme yöntemiyle makine performansının belirlenerek bakım maliyetinin düşürülmesinin, çetinleşen ticaret şartlarında işletmelerin rekabet güçlerini nedeni arttıracığı ortadadır.

Bir zincire benzetebileceğimiz, birbiriyle bağlantılı iş yapan makineler de bu yöntemle takip edilebilir. Böylelikle, oluşabilecek arızalar daha baş göstermeden tespit edilip gerekli önlemler alınacağından, hem iş akışı kesintiye uğramamış olur, hem de üretim kalitesi artırılmış olur.

Bütün bunların yanında, uyarıcı bakım, normalde arıza yapmadan yanına bile uğranılmayan makinelerin sürekli olarak gözlenmesini gerektirmektedir. Pek çok işin baştan savma yapıldığı işletmelerde, sırf bu yanı yüzünden faydalı bir uygulamadır.

## **BÖLÜM 8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER**

İleriye dönük bakım politikalarını daha doğru bir şekilde belirlemek için, işletmede yapılan tüm bakımlar kaydedilmeli, arıza bilgileri saklı tutulmalı ve düzenli bir şekilde takip edilmelidir. Düzenli bir bakım kaydı ve bakım planı yapılmadığı takdirde, işe ara verilerek yapılan bakımlar verimliliği düşürür.

Günümüzde yaygın olarak yapılan uygulama, makinenin muhtelif yerlerinde bilinçli olarak bazı arızalar oluşturulup, spektrum grafiklerinin toplanması ve daha sonra makine performansı tespit edilirken bu grafiklerin yorumlanması doğrudur. Ancak, bu yorumu parametreler kullanılarak eğitilmiş bir paket program yardımıyla yapmak hataları en aza indirgeyebilir.

Bir titreşim analizi uygulamasında, iş akışı üzerinde arıza riski çok olan bölgelerde 24 saat, bu riskin nispeten azaldığı bölgelerde ise daha kısa süreli periyotlarla titreşim verileri toplanmalıdır.

Uyarıcı bakım uygulamasına başlamadan önce, hangi makinelerin bakım planına dahil edileceği, hangi analiz yönteminin seçileceği ve işletme şartlarına göre hangi cihazların kullanılacağı tespit edilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] KONAÇ, B., “Makine Performansının Titreşim Analizi Metotları Yardımıyla Belirlenmesi ve Rulmanlarda Titreşim Analizi İle Hasar Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, 1996
- [2] ÖZDEMİR, Ç., “Bilgisayar Destekli Bakım Yönetimi ve Motorlu Araçlar İçin Örnek Bir Uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Mak. Mühendisliği Bölümü, 1999
- [3] YAVUZ, C., “Titreşim Esaslı Bakım”, Bitirme Tezi, SAÜ Makine Mühendisliği Bölümü, 2000
- [4] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Önleyici ( Proaktif ) Bakım Nedir? Nasıl Yapılır?”, Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-10, 1995
- [5] YİĞİT, C., KAZAN, R., “Makine Performansının Titreşim İzleme Yöntemiyle Belirlenmesi”, Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi Bildiri Kitabı, s.335-346, Konya, 02-03 Kasım 2002
- [6] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Türkiye’de Değişik Sanayi Kollarında Uyarıcı Bakım Uygulamaları ve Elde Edilen Sonuçlar”, Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-04, 1993
- [7] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Bilgisayar Destekli Uyarıcı Bakım ve Endüstride Uygulaması: Nasıl Başlamalı? Nelere Dikkat Etmeli?”, Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-01, 1993
- [8] KÖSE, R.K., “Kestirimci Bakım Yönetimini Uygulamak”, Otomasyon Dergisi, 112498, s. 81-84, 2001/12

- [9] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Titreşim Mühendisliği”, Ansiklopedik Sözlük, Cilt 1, ISBN:975-93153-0-0, 2002
- [10] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Bilgisayar Destekli Bakım Uygulaması ve Uyarıcı Bakıma Geçiş”, Vibratex Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-07, 1995
- [11] LETTNER, F., “Machine Production and Repair”, Budapest in Hungarian, 1976
- [12] ALP, E., “Günümüzde Bakım Kavramı ve Uygulamaları”, ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü,
- [13] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Bakımda Çağdaş Teknolojiler ve ISO 9000 İçin planlı Bakıma Geçiş”, Vibratex Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-14, 1995
- [14] FRENCH, A.P., “Vibration and Waves”
- [15] PASİN, F., “Mekanik Titreşimler”, Birsen Yayınevi ISBN: 975-511-264-2, İstanbul, 2000
- [16] WILLIAM, W.S., “Mechanical Vibrations” Çeviren Tuncer Toprak, Birsen Yayınevi ISBN: 975-511-174-3
- [17] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Titreşim Mühendisliğinin Gemi Mühendisliğinde Uygulanması”, Vibratex Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-15
- [18] KÖRNER, T.W., “Exercises for Fourier Analysis”, New York, USA, Cambridge University Press, 1993
- [19] KÖSE, R.K., “Kestirimci Bakım ve İstatistiksel Yöntemler”, Otomasyon Dergisi, s. 84-88, 53/96, s. 130-133, 54/96
- [20] ÇAĞLAYAN, İ.H., “Titreşim Ölçümü İle Makinelerde Arıza Tanımı ve Uyarıcı Bakım”, Vibratex Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-13, 1994

[21] STEVE, G., "Vibration Spectrum Analysis A Pratical Aproach" İTÜ Merkez Kütüphane, TJ 177.G 65, 1999

[22] YİĞİT, C., "Hızlı Fourier Dönüşümü", Seminer Notları, SAÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 2000

[23] ÇAĞLAYAN, İ.H., "Sağlıklı Titreşim Ölçümü İçin Üç Eksende Ölçüm Neden Gereklidir", Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti.

[24] ÇAĞLAYAN, İ.H., "Elektrik Motorları Arızaları ve Arıza Bulma Yöntemleri" Makinatek Dergisi, Sayı 53, s. 78-81, Mart 2002

[25] Rezonans Mühendislik, Teknik Bülten

[26] TOLGA, A., "Kaplın Ayarının Önemi ve Neden Lazerli Değil De Mekanik Kaplın Ayar Cihazı", Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti., TB-08, 1994

[27] KÖSE, R.K., "Dengesizliğin Tanımı", Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 33, Sayı 392, s. 24-29, TMMOB Yayını

[28] TOPAZ Mak. Müh. Müm. ve Tic. Ltd. Şti., "Titreşim Analizi Yönlendirme Tablosu", Ankara, 1997

[29] ÇAĞLAYAN, İ.H., "Değişik Tip Pompalarda Titreşim Ölçümü İle Arıza Tanımı", Vibratek Mühendislik ve Mümessillik Ltd. Şti.

## ÖZGEÇMİŞ

17/04/1977 yılında Almanya'nın bir kasabası olan Tiengen'de doğdu. 1982 yılında ailesiyle birlikte Türkiye'ye geldi ve Sakarya'nın Karasu ilçesine yerleşti. İlk ve orta öğrenimini Karasu'da tamamladıktan sonra, 1995 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1999 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, makine tasarım ve imalatı bilim dalında yüksek lisans programına başladı. 02-03 Kasım 2001 tarihinde, Konya'daki Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresine "Makine Performansının Titreşim İzleme Yöntemiyle Belirlenmesi" adlı bildirisıyla katıldı. 2001 yılı sonlarında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Bu enstitüdeki görevi ve yüksek lisans eğitimi halen devam etmektedir.