

**HAVA ARAÇLARINDA DÖNEL MAKİNELERİN  
TİTREŞİMİ ve ÖNEMİ**

Önder ALTUNTAŞ  
Yüksek Lisans Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Ağustos-2007

## JÜRİ ve ENSTİTÜ ONAYI

Önder Altuntaş'ın “**Hava Araçlarında Dönel Makinaların Titreşimi ve Önemi**” başlıklı **Sivil Havacılık Anabilim** Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 02.07.2007 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. T. HİKMET KARAKOÇ	.....
Üye (Tez Danışmanı) :	Dr. İBRAHİM H. ÇAĞLAYAN	.....
Üye	: Prof. Dr. MUSTAFA CAVCAR	.....
Üye	: Yar. Doç. Dr. NECATİ MAHİR	.....
Üye	: Yar. Doç. Dr. DİLEK TURAN	.....

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### HAVA ARAÇLARINDA DÖNEL MAKİNALARIN TİTREŞİMİ VE ÖNEMİ

Önder ALTUNTAŞ

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

II. Danışman : Dr. İbrahim H. ÇAĞLAYAN

2007, 79 sayfa

Bu çalışmada, dönel makinalar ve hava araçlarında oluşan titreşimler ve bu titreşimlerin nasıl analiz edileceği üzerine genel bir inceleme yapılmıştır.

Bakım maliyetlerinin azaltılması için hava aracı üzerinde oluşabilecek arızanın önceden belirlenmesi büyük önem taşır. Bu da ancak kestirimci bakım yöntemlerinin doğru bir şekilde işleyişi ile gerçekleşebilir. Dönel makina ya da hava aracı üzerinde meydana gelen titreşimler bir arıza habercisi olarak yorumlanabilir. Bu nedenle kestirimci bakım yöntemlerinden biri olan titreşim analizi yöntemi, oluşabilecek titreşimlerin yol açabileceği arızaların önceden belirlenmesinde kesin sonuç elde edilmesini sağlar. Ayrıca hava araçları üretiminde görülen teknolojik ilerlemelere paralel olarak titreşim analiz yöntemlerinin bakımın yanında imalat süreçlerinde de kullanılacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak titreşim analiz yöntemlerinin havacılıkta kullanımının hem üretim hem de bakım planlamasına yardımcı olacak güçlü bir araç olacağı öngörülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşim, Titreşim analizi, Bakım, Arıza tespiti, Hava araçları

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **VIBRATIONS AND IMPORTANCE OF ROTATING MACHINES IN THE AIRCRAFTS**

**Önder ALTUNTAŞ**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Aviation Program**

**Supervisor : Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ**

**Co-supervisor : Dr. İbrahim H. ÇAĞLAYAN**

**2007, 79 pages**

In this study, a general analysis over the vibrations at the rotating machines and aircrafts was performed and how this vibrations could be analysed was looked at.

The forecasting of the failures that could take place in the aircraft is a critically important factor for the diminishing of maintenance costs. This can be realized particularly by the accurate application of the predictive maintenance methods. The vibrations at the rotating machines and aircrafts could be interpreted as a precursor of the failures. Therefore, the vibrations analysis method which is one of the predictive maintenance methods, provides absolute results for pre-determining of the failures caused by vibrations. Also, in parallel with the technological developments of the aircraft manufacturing, the vibrations analysis methods that would be used at the manufacturing processes besides the meaintenance was considered.

In conclusion, it is envisaged that the using of the vibration analysis methods in aviation could be a powerful tool that supports either manufacturing and maintenance planning.

**Keywords:** Vibration, Vibration analysis, Maintenance, Diagnosis, Aircrafts

## TEŞEKKÜR

Çalışma konumun belirlenmesinde ve yaptığım çalışma süresince desteğini esirgemeyen tez danışmanlarım sayın Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ ve sayın Dr. İbrahim H. ÇAĞLAYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca titreşim ile ilgili "titreşim ansiklopedisi" adlı kitabı Türkçe'ye kazandıran ve titreşim konusuna karşı ilgi göstermemi sağlayan sayın hocam Dr. İbrahim H. ÇAĞLAYAN'a ve Çağlayan'ın kurduğu VibraTek titreşim danışmanlığı şirketine teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen ve fikirleri ile her zaman yanımda olduklarını hissettiren değerli hocalarım, Araş. Gör. İlkey ORHAN, Araş. Gör. Enis Turhan TURGUT ve Araş. Gör. Önder TURAN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca arkamda olduklarını bildiğim çok sevgili annem, babam, ablam ve abime teşekkürlerimi sunarım.

Ve hayatımın tamamı olan eşim Hülya ALTUNTAŞ'a sonsuz teşekkürler.

Önder ALTUNTAŞ

Ağustos - 2007

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TİTREŞİMLERLE İLGİLİ GENEL TANIMLAR</b> .....	<b>5</b>
2.1. Dönel Makinalardaki Titreşimler .....	5
2.2. Titreşim Teorisi .....	6
2.2.1. Periyodik hareket .....	6
2.2.2. Ölçme parametreleri .....	10
2.2.3. Gelişigüzel titreşimler .....	13
2.2.4. Fourier serileri.....	15
2.2.5. Çizgi.....	16
2.2.6. Ortalama alma.....	17
2.2.7. Bindirme .....	18
2.2.8. Yalancı veri.....	19
2.2.9. Kaçak .....	20
2.2.10. Pencereleme .....	21
2.2.11. Modülasyonlar .....	23
<b>3. TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ ve ANALİZİ</b> .....	<b>25</b>
3.1. Titreşim Analizi.....	25
3.2. Titreşim Profilleri.....	26
3.2.1. Zaman düzlemi .....	26
3.2.2. Frekans düzlemi.....	27

3.3. Titreşim sensörleri.....	28
3.3.1. Deplasman sensörü .....	28
3.3.2. Hız sensörü .....	29
3.3.3. İvme sensörü .....	30
3.3.4. Sensör seçimi .....	31
3.3.5. Sensörlerin kullandıkları yerler .....	32
3.3.6. Sensörlerin yerleştirilmesi .....	33
3.3.6.1. Elle tutma sensörler .....	35
3.3.6.2. Manyetik yerleştirme.....	35
3.3.6.3. Yapıştırıcı ile yerleştirme .....	36
3.3.6.4. Balmumu bağlantı .....	37
3.3.6.5. Saplama bağlantı .....	37
3.3.7. Sensörlerin ölçüm yönü .....	38
3.4. Titreşim analizörleri .....	38
3.5. Kablolar .....	38
3.6. Makinalarda Oluşabilecek Hasarlardan Dolayı	
Meydana Gelen Titreşimler ve Tanımları.....	39
3.6.1. Mekanik gevşeklikler.....	39
3.6.2. Ayarsızlıklar.....	41
3.6.2.1. Açısal ayarsızlık .....	42
3.6.2.2. Paralel ayarsızlık .....	42
3.6.3. Rezonans .....	43
3.6.4. Balans bozukluğu.....	44
3.6.5. Rulman arızası .....	44
3.6.6. Dişli arızaları.....	47
3.6.7. Hidrolik ve aerodinamik kuvvetler .....	47
3.6.7.1. Pal veya kanat geçişi .....	47
3.6.7.2. Akış türbülansı .....	48
3.6.7.3. Kavitasyon.....	49
3.6.8. Elektrik problemleri .....	50
3.6.8.1. DC motor problemleri .....	50
3.6.8.2. AC motor problemleri .....	51

<b>4. HAVA ARAÇLARINDA MEYDANA GELEN</b>	
<b>TİTREŞİMLERİN İNCELENMESİ.....</b>	<b>54</b>
4.1. Uçaklar .....	54
4.1.1. Güç sistemleri .....	57
4.1.1.1. Fan.....	60
4.1.1.2. Kompresör .....	61
4.1.1.3. Türbin .....	63
4.1.1.4. Dişli kutusu .....	64
4.2. Helikopterler.....	65
4.2.1. Helikopterde titreşim analizi.....	68
4.2.1.1. Düşük frekanslı titreşimler .....	69
4.2.1.2. Orta frekanslı titreşimler .....	70
4.2.1.3. Yüksek Frekanslı Titreşimler .....	71
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>72</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>75</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

2.1. Bir kütlelinin yaya bağlanarak sabit bir şekilde salınımı sonucunda oluşan basit harmonik hareketinin grafiksel gösterimi.....	7
2.2. Harmonik hareketin grafiksel gösterimi .....	8
2.3. Aralarında $\phi$ faz açısı olan iki harmonik hareket .....	9
2.4. Harmonik olmayan periyodik hareket .....	10
2.5. Basit dalga formu.....	12
2.6. Gelişigüzel titreşimin grafiksel gösterimi.....	14
2.7. Gelişigüzel titreşimin ayrışması .....	14
2.8. FFT dönüşümü.....	16
2.9. Çizgi Spektrumu .....	17
2.10. Bindirme .....	19
2.11. Yalancı veri.....	20
2.12. Kaçak .....	21
2.13. Pencereleme yardımıyla kaçakların silinmesi .....	22
2.14. Kutu ve Hanning pencerelerin karşılaştırılması .....	23
3.1. Titreşim analiz şeması .....	25
3.2. Zaman düzlemi titreşim profili .....	26
3.3. Frekans düzlemi.....	27
3.4. Hız sensörünün şematiği.....	29
3.5. Sıkıştırma tip ivme metrenin yapısı.....	31
3.6. Yerleştirilmiş sensörlerin doğal frekansları.....	34
3.7. Manyetik tip yerleştirme yöntemi.....	36
3.8. Yapıştırıcı ile sensör yerleştirilmesi .....	36
3.9. Saplama yöntemi ile sensörün yerleştirilmesi .....	37
3.10. Gevşeklikler sonucunda alınan sinüzoidal dalganın tepelerindeki belirgin işaret .....	40
3.11. Makinanın dönel elemanlarında boşluk bulunduğunda titreşim frekansı ve harmoniklerinin spektrum üzerinde gösterimi.....	41

3.12. Bir makina üzerinde açısız ayarsızlık ve bunun spektrum olarak gösterimi .....	42
3.13. Bir makina üzerinde paralel ayarsızlık ve bunun spektrum olarak gösterimi .....	43
3.14. Bir rulmanın içyapısı .....	45
3.15. Bir makinanın pallerinin hareketi sırasında kanat geçiş frekansı spektrumu.....	48
3.16. Sistemde akışın türbülanslı oluşundan kaynaklanan gelişigüzel tepelerin spektrumda gösterimi .....	49
3.17. Kaviteleşmenin spektrum üzerinde gösterilmesi.....	50
3.18. DC motor probleminin spektrum üzerinde gösterilmesi .....	50
3.19. Senkron motorların spektrum olarak gösterilmesi.....	51
3.20. Statorda oluşan bir problemin spektrum üzerinde görülmesi.....	52
3.21. Rotorlarda eksen kaçıklığı olduğunda oluşan grafiklerin spektrum üzerinde gösterimi .....	53
3.22. Rotorda oluşan kırık ve çatlakların spektrumlarında görülmesi.....	53
4.1. Basit bir profil üzerinde oluşan türbülansın yarattığı kuvvet etkisi.....	56
4.2. Genel hali ile turbofan motor yapısı .....	58
4.3. Kanata yerleştirilmiş motorlardaki dönme balans bozukluğu nedeni ile oluşan yapısal titreşimin yayılımı .....	59
4.4. Kırılan fan kantçıklarının.....	61
4.5. CFM 56-5B motorunun 1 nolu yatak üzerine yerleştiren ivme metre düzeneği şekli .....	62
4.6. CFM 56-5B motorunda bulunan türbin arka gövde titreşim sensörü.....	64
4.7. TH-55 Osege, askeri amaçla kullanılan bir helikopter tipi .....	67
4.8. Yer çalıştırmaları sırasında yer rezonansının oluşması sonucunda parçalanmış TH-55 tipi helikopter.....	67
4.9. Akıllı parça dizayn yöntemi ile helikopter rotorlarının imalatı.....	68

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

3.1. 100 mv/g ivme metre için yaklaşık frekans uzunlukları.....	33
---	----

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CPM	: Dakikadaki çevrim sayısı
cps	: Saniyedeki çevrim sayısı
FFT	: Fast Fourier Transformer
HPC	: Yüksek Basınç Kompresörü
HPT	: Yüksek Basınç Türbini
rms	: Kareköklerinin karesi
RPM	: Dakikadaki devir sayısı
KGF	: Kanat Geçiş Frekansı
LPC	: Düşük Basınç Kompresörü
LPT	: Düşük Basınç Türbini
VPM	: Dakikadaki Titreşim Miktarı
$\phi$	: Faz açısı
$\omega$	: Radyan
dB	: Desibel
Hz	: Hertz
A	: Salınımın deplasmanı
N	: Mil
X	: Deplasman
T	: Periyod
a	: İvme
f	: Frekans
0-p	: Tepe
p-p	: Tepeden tepeye
v	: Hız

### Alt ve üst indisler

L	: Şebeke
P	: Kutup

## 1. GİRİŞ

Titreşim, Türk Dil Kurumuna göre, “bir noktanın gözün göremeyeceği kadar kısaca kıvılcığı, ihtizaz” olarak tanımlanmıştır [1].<sup>(1)</sup>

Mekanik anlamda bakılacak olunursa titreşim, referans bir noktaya göre mekanik salınım olarak adlandırılabilir. Titreşim, insanların evde, iş yerinde ve ulaşım yolunda, gün içerisinde her an karşılaştığı bir fenomendir. Binilen bir vasitanın durması, kalkması ve seyahat esnasındaki salınımı titreşimin en basit örnekleridir.

Titreşimler çoğu zaman hasar verici ve etkileyici olurlar. Fakat bazı işlerin yapılması için gereklidir. Örneğin, harç çırpma makinası ve beton delme aleti gibi aletlerde titreşim aranan özelliştir.

Genel olarak makinalarda, titreşimlerin belirlenmesi ve takip edilmesi istenir. Bu konuda da bir kestirimci bakım türü olan titreşim analizi devreye girer. Titreşim analizi kestirimci bakım sınıfına dahil olsa da, dönel makinalarda belirli aralıklarda yapılan programlı bakım içerisinde, bir parçanın veya bölgenin kontrolü amacıyla uygulanabilir.

Bir dönel makina sınıfına giren hava araçlarına bakılırsa, çok fazla hareketli aksama sahip olduğu belirgindir. Oluşabilecek bir arızanın önceden tespiti ve arızalı parçanın değiştirilmesi istenilen bir durumdur. Yani, parçaların bakım öncesi takibi son derece yararlıdır. Çünkü arızalı parçaların ücretleri, oluşabilecek bir arıza sonucundaki maliyetin yanında çok küçük bir miktar olarak kalabilir.

Genel olarak bakıldığında bir hava aracının bakım ve onarım giderleri, doğrudan işletim giderlerinin yaklaşık % 15-20'sidir. Uçağın ömrü boyunca (yaklaşık 25 yıl) yapılan bakımlar için harcanan toplam bakım gideri tutarı, uçağın satın alma fiyatının yaklaşık 1-1.5 katıdır [2]. Bu durumda oluşabilecek arızaların önceden tespit edilmesi havayolu şirketi için büyük maliyet kazancı sağlayacaktır.

---

<sup>(1)</sup> Dr. İbrahim H. Çağlayan'a göre titreşim olayının olması için sadece gözle görülmemesi şartı yoktur. Dr. İbrahim H. Çağlayan hazırladığı “Titreşim Mühendisliği” adlı ansiklopedik sözlükte titreşimi “bir cismin bir nokta etrafındaki çevrimsel hareketi” olarak tanımlamıştır.

Hangi tür olursa olsun bir makina günümüzde insan hayatının yarısından fazlasında kullanılmaktadır. Bu nedenle, kullanılan makinanın ömrünün uzun olması ve kullanılabilirliğinin kolay olması istenir. Makinanın ömrünün uzun tutulabilmesi için bakım işlemlerinin uygun bir şekilde yerine getirilmesi gereklidir.

Bakımdan söz edebilmek için tanımının yapılması şarttır. Genel olarak bakım, bir parçanın yenilenmesi veya çalışılabilir durumda tutulması için yapılan tamir, modifikasyon ve revizyon gibi işlemlerden oluşan faaliyetler şeklinde tanımlanabilir [3].

Makinalarda uygulanan bakım yöntemleri üç sınıfa ayrılır. Bunlar; programsız, programlı ve kestirimci bakımdır.

Arıza bakımı olarak ta tanımlanan programsız bakım, genel bir bakım gerektirmez. Arızadan kaynaklanan bir durma olmadığı sürece makinanın çalışmasına izin verilebilir. Programsız bakım işlemi sadece arıza oluştuğu zaman yapılır.

Birçok makinanın bakım işlemleri bu yöntemle gerçekleştirilse de, programsız bakım birçok dezavantaja sahiptir. Bunlardan birincisi, arızanın oluşma zamanı belli değildir ve arızanın giderilmesi için gerekli alet, personel ve değişecek parçaların acele olarak temini sağlanmalıdır. Bir diğer dezavantaj ise, eğer problem erkenden belirlenip doğrulanamazsa makinalar gerektiğinden daha uzun bir bakıma maruz kalabilir. Bazı arızalar makinanın tümünün değiştirilebileceği kadar ciddi durumlara sebep olabilir. Bu tip bakımdan kaynaklanan ortalama ücret tahmini olarak, normal bir zamanda yapılan bakımdaki ücretin üç katıdır. Makina arızaları atölye çalışanları için emniyet problemini ortaya çıkarabilir ve makina servis dışı iken oluşan kayıp üretimin ücretine ek olarak eklenir [4].

Önleyici bakım olarak da tanımlanan programlı bakımda, yapılacak olan bakımların belirli bir program içerisine konulmasından dolayı bir düzen sağlamış olur. Programlı bakım altında, her bir kritik makina, çalışmasının özel bir periyodunda durdurulur ve kısmen ya da tamamen kontrol gerçekleştirilerek gerekli parçalar değiştirilir. Makina bakımının bu yaklaşımı da dezavantajlara sahiptir. Bunlardan birisi, teçhizat üzerindeki her bir kritik parçanın periyodik

olarak sökülmesi pahalı olabilir ve zaman kaybettirebilir. Bir diğer dezavantaj ise, periyodik bakımlar arasındaki zaman aralığını tahmin etmek zordur. Zaman aralığının çok kısa tutulduğu programlamalarda mekanik arıza oluşturulmayacak kadar başarılı olunur. Fakat bu durumda, gereksiz yere sistem durdurulup bakım yapıldığı için para ve zaman çöpe atılmış olur. Eğer zaman aralığı çok uzun olursa, zamandan kazanç olurken maliyetten kaynaklanan kayıplar oluşur.

Kestirimci bakım ise, arıza veya uzun süreli hasar oluşmadan önce gelişmekte olan problemlerin belirlenmesidir. Bu bakım tipi, makina performans parametrelerinin analizi ve bu analizlerin devamlılığının takip edilmesini içerir. Online belirleme ve problemlerin çözümü makina bakımları için en çok istenilen yöntemdir [5]. Genel olarak, kestirimci bakım gelişmekte olan problemlerin belirlenmesi için kullanılır.

Birçok kestirimci bakım tekniği, çeşitli işlerdeki kritik ekipmanın ya da sistemin analizini ve izlenmesini sağlar. Bunlar titreşim analizi, ultrasonik kontrol, termografi, triboloji, iş takibi, görsel kontrol ve diğer hasarsız analiz teknikleri olabilir. Bu tekniklerden titreşim analizi, bakım yönetim programlarında kullanılan en kararlı kestirimci bakım tekniğidir.

Günümüzde, kestirimci bakım yöntemi, mekanizmaların titreşim karakteristiklerinin izlenmesi ile aynı anlama gelmeye başlamıştır. Fakat, elektrik ekipmanlarının, ısı kaybının olduğu bölgelerin, yağlama yağının durumunun belirlenmesi gibi durumlarda sadece titreşim analizi yöntemi ile istenilen veriler sağlanamamaktadır. Bu nedenle, yalnızca tek bir yöntemle değil birçok tekniğe sahip olan toplam teçhizat kestirimci bakım programı uygulanmalıdır.

Titreşim analizinin kullanımı kestirimci bakım için sınırlayıcı değildir. Bu teknik, teşhis ve tanı uygulamaları için uygundur. Titreşim izleme ve analizi, imalat üretimi için kullanışlı olan birçok mekanik sistemin birincil teşhis yöntemi olarak kullanılır [6].

Bu çalışmada titreşim tanımları yapılarak, makinalarda oluşan titreşim arızaları tanımlanacaktır. Büyük bir dönel makinaya sahip olan hava araçlarında oluşan titreşimler vurgulanarak, hava araçlarında oluşan titreşimlerin önlenebilmesi için yapılabilecek uygulamalar açıklanacaktır. Bu açıklamalar, hava

aracı bakım personelinin yetiştirildiği bir okulda titreşim analizinin temelini oluşturması için yapılmıştır.



## 2. TİTREŞİMLERLE İLGİLİ GENEL TANIMLAR

Bu çalışmanın daha iyi anlaşılabilmesi için titreşimin temelini oluşturan teorinin ve genel tanımların bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu bölümde temel ifadelerin daha iyi anlaşılabilmesi için teori üzerinden ifadeler açıklanacaktır. Daha sonra titreşim mühendisliğinde kullanılan bazı ifadeler açıklanacaktır.

### 2.1. Dönel Makinalardaki Titreşimler

Sistem içerisinde hareketli parçalardan oluşmuş ve dönme işlemini gerçekleştiren makinalara dönel makina denir.

Hava araçlarında bulunan güç sistemleri, içerisinde bulunan alt sistemlerden dolayı dönel makinalar grubuna girerler. Bu alt sistemler, türbin, kompresör, fan veya dişli kutusudur.

Titreşim, hareketli parçaları olan makinalarda ve makinaya bağlı olan yapılarda dinamik kuvvetlerin sonucu oluşur. Makinanın farklı parçaları çeşitli frekans ve genlikte titretebilir. Oluşan titreşimlerin sonucunda, aşınma ve hasar oluşabilir. Bu durum, çoğu zaman makinanın uzun süre durmasına neden olur [7].

İnsanlar endüstriyel alanda makinaları kullanmaya ve özellikle motorlar bu sistemlere güç sağlamaya başladığından itibaren, titreşim problemlerinin azaltılması ve önlenmesi öncelikli araştırma konuları arasına girmiştir.

Aşamalı olarak, titreşim izolasyonu ve azaltma teknikleri makina dizaynının bir parçası olmaya başlamasıyla, kesin ölçüm ihtiyacı ve mekanik titreşimin analizi gelişmiştir [8].

Pratikte, titreşimden kaçınmak oldukça zordur. Titreşimler, makina parçaları ile dönen veya ileri geri karşılıklı hareket eden parçalar arasındaki dinamik etkiler sonucunda oluşmaktadır. Genellikle çok küçük boyuttaki titreşimler rezonansı oluştururken, büyük boyuttaki titreşimler ise gürültüye neden olmaktadır. Sonuçta, makinalarda oluşan titreşimler mutlaka yapı üzerinde bir etkiye neden olurlar.

## 2.2. Titreşim Teorisi

Çalışmanın bu bölümünde teori ele alınarak, tanımlar matematiksel olarak ifade edilecektir.

Uygulamalarda, titreşim sonucunda oluşan toplam deplasman miktarı hesaplanır. Bulunan bu deplasman miktarı matematiksel formüller yardımıyla hız veya ivmenin belirlenmesi için kullanılır.

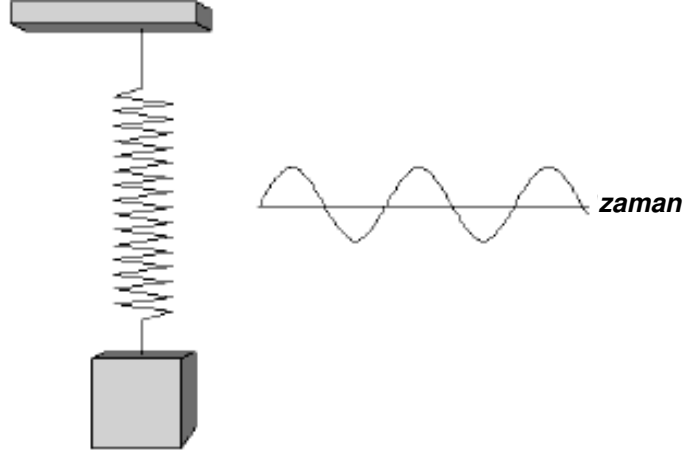
Eğer makinadaki anormal titreşimlerin doğrulanması ve izole edilmesi isteniyorsa, bu değerlere ihtiyaç vardır [9].

### 2.2.1. Periyodik hareket

Fizikte, çok veya az düzenli olarak eski halini alan ve zamana bağlı olarak kendini tekrarlayan olguya periyodik hareket denir. Bu terim salınım olarak da tanımlanabilir. Titreşimin periyodik hareketle olan ilgisi, belirli bir zaman aralığında kendi kendine tekrarlanan periyodik bir hareket olmasından kaynaklanır [10].

İki tip periyodik hareket vardır. Bunlar; harmonik ve harmonik olmayan hareketlerdir.

*Harmonik hareket*, en basit formdaki harekettir. Hareketin eşit t zaman aralıklarında tekrarlamasına harmonik hareket denir. Harmonik hareket, dönel elemanın ya da bir tam dönümünü tamamlamış makina parçasının her bir zaman için tekrarıdır [11]. Şekil 2.1’de yaya bağlanmış kütlenin yaptığı basit harmonik hareketin oluşturduğu sinüzoidal dalga görülmektedir.



**Şekil 2.1.** Bir kütlenin yaya bağlanarak sabit bir şekilde salınımı sonucunda oluşan basit harmonik hareketinin grafiksel gösterimi [9]

Harmonik hareket için deplasman ile zaman arasındaki denklemler

$$X = A \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $X$ , deplasman ve  $A$  genlik olarak gösterilen, salınımın deplasman değeridir.

Periyot ( $T$ ), genellikle saniye olarak ölçülür. Periyodun tersi, titreşimin frekansını verir. Frekans her bir dakikadaki çevrim (CPM) ya da Hertz (Hz) olarak ölçülür. Buna göre frekansın genel denklemi;

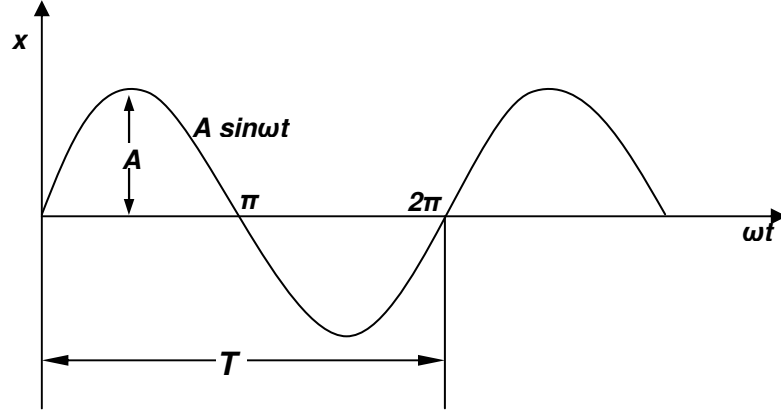
$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır.

Frekansın diğer bir ölçü birimi ise dairesel frekanstır ve  $\omega$  ile gösterilir. Her bir dakikadaki radyan ile ölçülür. Tam bir çevrim ( $\omega t$ ) Şekil 2.2'deki grafikte görüldüğü gibi 360 derece ve  $2\pi$  radyan olur. Tam bu noktada yeni bir çevrim oluşmaya başlar. Dönüşünü  $2\pi$  radyan'da tamamladığı için denklemler;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır.



**Şekil 2.2.** Harmonik hareketin grafiksel gösterimi. y-ekseninde X; deplasman, x-ekseninde  $\omega t$  vardır. Her bir periyot  $2\pi$  ile hareketini tamamlar ve oluşan dalga  $A \sin \omega t$  eğrisidir

Dönel makinalar için frekans, dakikadaki titreşim (VPM) olarak ifade edilir [9]. Dakikadaki titreşim Denklem (2.4)'deki gibi yazılır.

$$VPM = \frac{\omega}{\pi} \quad (2.4)$$

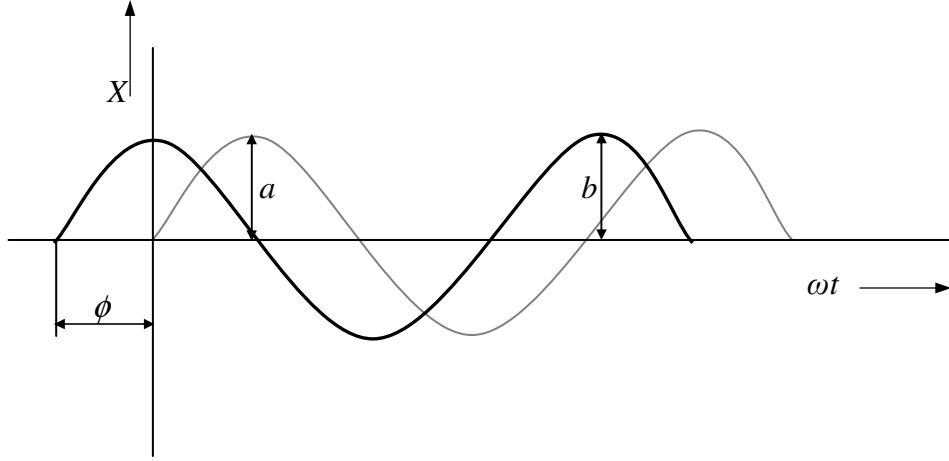
Zamana göre Denklem (2.1)'deki formülün türevi alınır hız elde edilir. Buna göre hız, Denklem (2.5)'deki gibi yazılır.

$$v = \frac{dX}{dt} = \dot{X} = \omega A \cos(\omega t) = \omega A \sin(\omega t + \pi/2) \quad (2.5)$$

Eğer deplasman maksimum  $-\omega A$  genliğinde ise, bağıntı hızı verir. Denklem (2.6)'ya göre ivme deplasmanın zaman'a göre ikinci türevidir.

$$a = \frac{d^2 X}{dt^2} = \ddot{X} = -\omega^2 A \sin(\omega t) = \omega^2 A \sin(\omega t + \pi) \quad (2.6)$$

Denklem (2.1)'e göre,  $X_1 = a \sin(\omega t)$  ve  $X_2 = b \sin(\omega t + \phi)$  denklemleri tarafından verilen iki tane frekans Şekil 2.3'te gösterilmektedir.  $X_2$  için olan denklemdeki  $\phi$  miktarı iki frekans arasındaki faz açısı olarak bilinmektedir. Bu fark Şekil 2.3'te görülmektedir.  $\phi$  sebebiyle, iki frekans maksimum deplasmanlarına aynı zamanda gelemez. Biri diğerinin  $\frac{\phi}{\omega}$  saniye kadar ötesinde olur. Bu iki hareket, aynı frekansa sahiptir. Faz açısı sadece aynı frekanstaki iki hareket için söz konusudur.



**Şekil 2.3.** Aralarında  $\phi$  faz açısı olan iki harmonik hareket. x-ekseninde  $\omega t$  ve y-ekseninde X, deplasman vardır

Diğer periyodik hareket ise *Harmonik olmayan hareket* olarak adlandırılır. Birçok makinada oluşan titreşimlerin kaynağı harmonik olmayan harekettir. Tüm harmonik hareketler periyodik olmasına rağmen, her periyodik hareket harmonik değildir.

Şekil 2.4'de farklı frekanslara sahip iki frekansın sinüs dalgalarının üst üste gelmesi görülmektedir. Bu eğrilerin denklemleri

$$X_1 = a \sin(\omega_1 t) \quad (2.7)$$

$$X_2 = b \sin(\omega_2 t) \quad (2.8)$$

şeklinde yazılır.

Toplam titreşim koyu çizgilerle gösterilmektedir. Denklem (2.9) ise toplam titreşimin denklemdir.

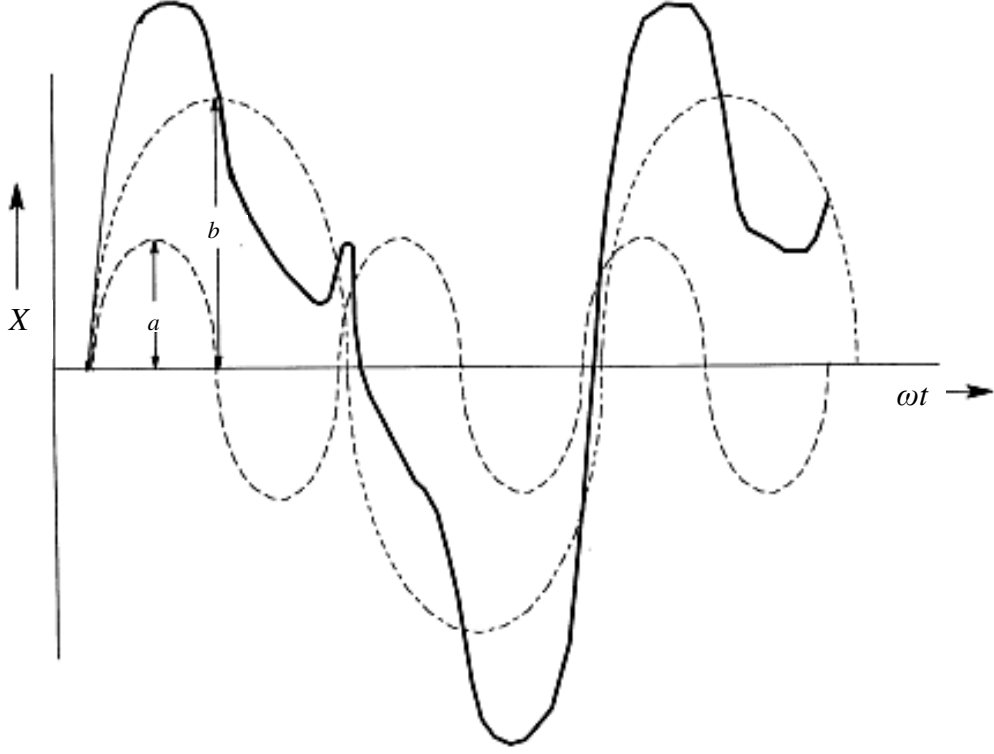
$$X = X_1 + X_2 = a \sin(\omega_1 t) + b \sin(\omega_2 t) \quad (2.9)$$

Herhangi bir periyodik fonksiyon  $\omega$ ,  $2\omega$ ,  $3\omega$ , gibi frekansların sinüs fonksiyonlarının bir serisi olarak gösterilebilir.

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega t + \phi_2) + A_3 \sin(\omega t + \phi_3) + \dots \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da zamanın ya da  $f(t)$ 'nin fonksiyonu olan Fourier serisi olarak bilinir. Farklı titreşimlerin genlikleri ve faz açıları, fonksiyonun değeri bilindiği sürece matematiksel olarak hesaplanabilir. Böylece, verinin bir dönüştürücü ve taşınabilir titreşim analizörde kullanılması sağlanabilir.

$2\omega$  ve  $3\omega$  terimleri,  $\omega$  ilk frekansının harmonikleridir. Birçok titreşim işaretinde, ilk frekans unsuru makinanın çalışma hızının belirtir (1X ya da  $1\omega$ ). Ek olarak, işaretleme bir ya da daha fazla harmoniklerin belirtilmesi ile olabilir. Örneğin; ilk çalışma hızının iki katı (2X), üç katı (3X) ve diğer çarpımları olarak gösterilebilir [9].



**Şekil 2.4.** Harmonik olmayan periyodik hareket. a ve b tepe değerli iki tane sinüzoidal dalganın birleşimiyle koyu renkle çizilmiş yeni dalga ortaya çıkar. x-ekseninde  $\omega t$  ve y-ekseninde X, deplasman vardır [9]

### 2.2.2. Ölçme parametreleri

Titreşim hareketinin tanımlanması için bazı terminolojilerin bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde titreşimde kullanılan teknik ifadelerin açıklamaları yapılacaktır. Bunlardan en önemli iki terminoloji grafiklerde sinüs dalga formlarının gösterilmesine yardımcı olan frekans ve genliktir.

*Frekans*, özel kuvvet fonksiyonunun tekrarlama sayısı ya da titreşim unsuru için özel bir zaman birimi olarak tanımlanabilir. Örneğin; dört jant teli

olan bir tekerleğe ivme metre bağlanmış olsun. Mil bir turunu tamamladığında, dört telin her biri ivme metreden geçer. Buna dört zamanda denilebilir. Eğer mil 100 RPM'de dönüyorsa ivme metreden geçen tellerin frekansı 400 CPM (dakikadaki çevrim sayısı) olur.

Dakikadaki çevrim sayısına ek olarak frekans genellikle saniyedeki çevrim sayısı (cps) olarak da gösterilebilir.

*Genlik*, dönüşün ya da titreşimin maksimum değeri olarak tanımlanabilir. Yani titreşim sinyalinin büyüklüğü olarak da söylenebilir. Titreşimin genliği arızanın boyutu hakkında bilgi verir. Genlik, deplasman (mils, mm), hız (ips, mm/sn) ya da ivme (gs RMS, mm/sn<sup>2</sup>) şeklinde ölçülebilir.

*Deplasman*, bir cismin referans noktaya göre olan mesafesi ya da pozisyonundaki fiili değişimdir. Düşük frekanslardaki kararlı bir ölçümdür. Mils p-p olarak ölçülür, çünkü makina hareketleri genellikle harmonik değildir ve bu yüzden veri pozitif ve negatif tepelerde olabilir. Genellikle 600 CPM (10 Hz)'den az olan düşük frekanslardaki titreşimleri ölçmek için kullanılır.

*Hız*, deplasman değişiminin zamana oranıdır. Genellikle mm/sn ya da In./sec 0-p olarak ölçülür. 600 CPM (10 Hz)'den 60,000 CPM (1,000 Hz)'e kadar frekans aralığında makina durumunu değerlendirmede kullanılır.

*İvme*, yüksek frekanslarda kararlı ölçüm yapmak için kullanılır. Frekans 60,000 CPM (1,000 Hz)'i aştığında makina durumunun değerlendirilmesi için kullanılır [12].

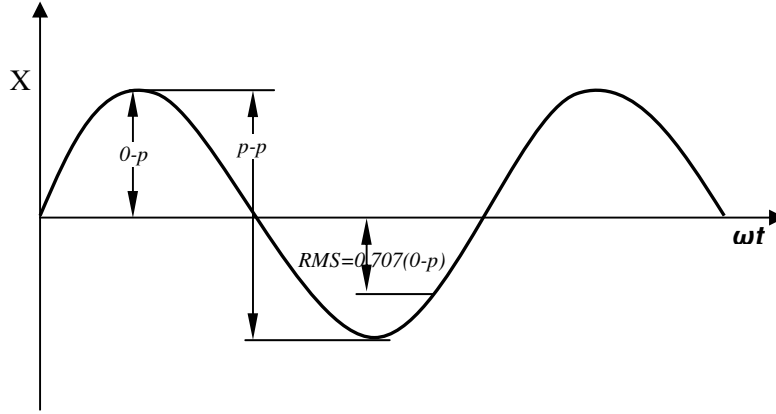
Titreşim analizinde, kayıt edilen ekran üzerinden genliğin gösterilmesi üç şekilde olur. Bunlar; geniş bant, dar bant ve unsur bazında olan gösterilmektedir.

*Geniş bant*, makina tarafından oluşan tüm titreşim unsurlarının toplam enerjisini yansıtır. Geniş bant enerjisi frekans aralığı 10 ile 10,000 Hz arasında filtrelendirilmiştir. Uyarılar, toplanmış verinin tamamında olabileceğinden, birçok titreşim grafiği geniş bant ile filtrelendirilir.

*Dar bant* tipi genlik ölçümü, kullanıcının belirlediği frekans enerjisindeki ölçüm değerini referans alır. Arızanın görüldüğü aralığın ayarlanması bu referans ile gerçekleştirilir.

*Unsur bazında* genlik ölçümü, tek bir makina parçası ya da hareketin takibinin yapılmasını sağlar. Örneğin, bir milin dönme hızının oluşturduğu enerjinin ölçülmesi bu yöntemle sağlanır.

Şekil 2.5’de, en genel hali ile bir dalga formu görülmektedir. Dalga formundaki basit terimler sırasıyla aşağıda tanımlanacaktır.



**Şekil 2.5.** Basit dalga formu. 0-p; tepe, p-p; tepe-tepe değeri, RMS; efektif titreşim seviyesi. x-ekseninde  $\omega t$  ve y-ekseninde X, deplasman vardır

*p-p* (*peak-to-peak*), makina elemanları topluluğunun ya da komponentlerinin oluşturduğu toplam genliktir. Yani düzgün salınımlı titreşimin ulaştığı en üst ve en alt nokta arasındaki mesafeye denir. *p-p*, ekrandan alınan bilgiler doğrultusunda belirlenir. Analiz yapan kişi makinanın titreşim profilinin oluşturduğu maksimum enerji ya da toplam deplasmanına ihtiyaç duyduğunda bu ölçü birimi kullanışlıdır.

*0-p* (*zero-to-peak*), düzgün salınımlı titreşimin ulaştığı en üst veya en alt nokta ile cismin etrafında titreştiği sıfır noktası arasındaki mesafeye denir. *p-p* değerinin yarısına eşittir. Fakat tepe noktası gelişigüzel titreşimlerde tek bir yerde ve sabit değildir. Bu yüzden en üstteki nokta referans alınır. Genelde, hız sensörü kullanılan titreşim verisi tanılarda *0-p* terimi kullanılmaktadır.

*RMS* (*Root-Mean-Squared*), efektif titreşim seviyesi, makina tarafından oluşturulan genliğin istatistiksel ortalamasıdır. Şekil 2.5.’te görüldüğü gibi harmonik bir harekette *0-p* değerinin 0.707 katına eşittir. RMS titreşim seviyesi, bir spektrumdaki her bir tepenin karesi alınıp, toplandıktan sonra karekökü alınarak elde edilen bir değerdir. Bundan dolayı, spektrumlarda RMS değeri en yüksek



tepenin biraz üzerinde olur. Hiçbir zaman altında olmaz. Eğer altında olursa, ölçüm ya da cihaz hatası var demektir. Aslında RMS değerinin tepenin ne kadar üzerinde olduğu da önemlidir. Bu ölçüye tepe çarpanı denir.

*Tepe çarpanı*, bir zaman sinyalinin tepe değerinin RMS değerine oranıdır. Bu ölçümde maksimum tepe kullanılmalıdır. Ayrıca tepe değerleri makul dağılımlı ve biri diğerini tekrarlayıcı şekilde olduğunda mantıklıdır. Bir sinüzoidal dalga için bu değer 1.414'tür. Balans bozukluğu olan sinyallerde bu değer 1.41'e yakındır. Ancak, rulman arızası varsa, dalga formlarında sıçramalar ve vurunular yapacağı için bu değer çok daha yüksek değerlere çıkar. Bu nedenle, bazı cihaz imalatçıları bunu rulman arızalarını tanımlamada kullanırlar [13].

*Desibel*, titreşim ölçümlerinde sıkça kullanılan bir ölçü birimidir. Bir güç oranı terimi olarak tanımlanabilir. Alexander Graham Bell'in adına atfen bel adı verilen bu ölçekte büyüklükler, bir referans büyüklüğüne oranlarının 10 tabanlı logaritmasıyla tanımlanırlar. 1 bel, referansın 10 katı gibi yüksek bir düzeye karşılık geldiğinden, onda bir ölçü birimi olan desibel kullanılır [14].

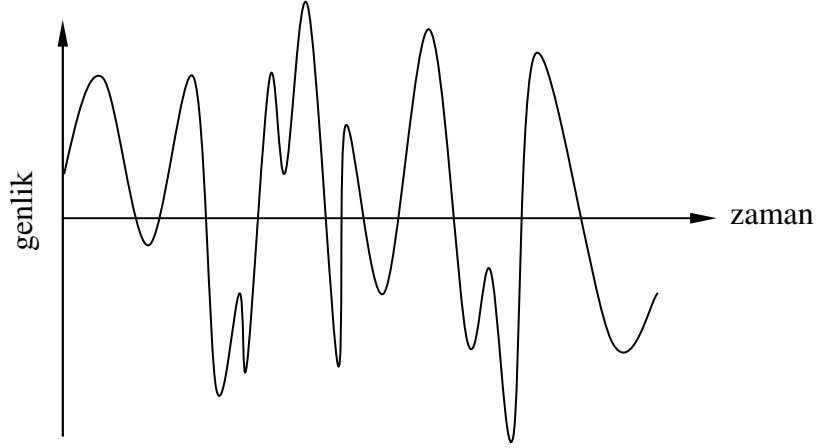
Titreşim analizinde iki tip birim sistemi kullanılır. Bunlar lineer ve logaritmik birimlerdir. Grafikselleştirilmelerde logaritmik olarak analiz yapmak daha uygundur. Çünkü bakılan arızanın tespiti daha kolay olur. Genelde logaritmik skalalı grafiklerin amacı çok geniş genlik değerlerine sahip bir eksende tüm değerleri gösterebilmektir. Bu tip grafiklerde küçük boyuttaki detaylar kolaylıkla görülebilir. Bu nedenle, birçok incelemede y-eksenindeki genlik skalası logaritmik olarak seçilir.

Örneğin, 250 kW'lık elektrik motorunda rulmanın 27 mm çapında bir çekirdeği vardır. Rulmanda hasar olduğu düşünülürse logaritmik inceleme daha uygundur. Çünkü rulman ve dişli arızalarının bulunması bu şekilde daha kolaydır.

### **2.2.3. Gelişigüzel titreşimler**

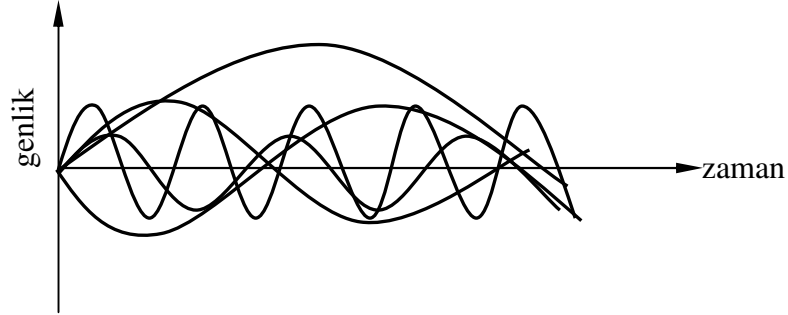
Belli bir yayın frekansı, genliği ve fazı olmayan ve herhangi bir t zamanında genliğinin ne olduğu bilinmeyen titreşimlere gelişigüzel titreşim denir. Gelişigüzel titreşim karışık bir titreşimdir. En çok gözlenen karakteristiği ise

periyodik olmayışı ve tekrarlanmayışıdır. Tipik bir gelişigüzel titreşime örnek Şekil 2.6'da verilmiştir [15].



**Şekil 2.6.** Gelişigüzel titreşimin grafiksel gösterimi. x-ekseninde zaman, y-ekseninde ivme vardır [16]

Gelişigüzel titreşimler tek bir periyodu olmamasından kaynaklanan düzensizlikler nedeniyle periyodik değildirler. Titreşim dalgasının içerisinde birçok sinüzoidal dalga barındırdığı açıktır. Bu durum Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



**Şekil 2.7.** Gelişigüzel titreşimin ayrışması. x-ekseninde zaman, y-ekseninde ivme vardır [16]

Hareketin tekrarlanamaz olması, titreşimin gelişigüzel olduğunu göstermektedir. Eğer gelişigüzel titreşim ivme ya da genlik olarak kayıt edilirse, aynı olay kayıt edilmesine rağmen iki kayıt birbirinden farklı olur.

Gelişigüzel titreşimler, 1950'li yıllarda uçaklarda motor üzerinden gelen yoğun titreşim sonucunda gövde panelinde oluşan yorulma kırıkları ve bunların büyüyüp yarılmaların oluşmasıyla sonuçlanan kazalar sonucunda dikkate

alınmaya başlandı. Bu olaylardan hemen sonra, gelişigüzel titreşim alanında çalışmalar çok hızlı gelişmeye başladı. Teorinin uygulanması, 1970'li yıllarda, dijital işleme tekniği ve FFT (Fast Fourier Transform)'nin kullanılmasının geliştirilmesiyle tamamıyla desteklenmiş oldu [16].

Gelişigüzel titreşimlere örnek verilecek olunursa [16];

- Asfalt sertliğinden dolayı yer aracı titreşimi,
- Hava türbülansı, akustik basınç ve jet motorundan dolayı hava aracı titreşimi,
- Okyanus dalgalarının akıntısıyla olan gemi titreşimi,
- Rüzgârda uzun bir yapıda ve köprüdeki titreşim,
- Depreme maruz kalan bir yapının titreşimi,

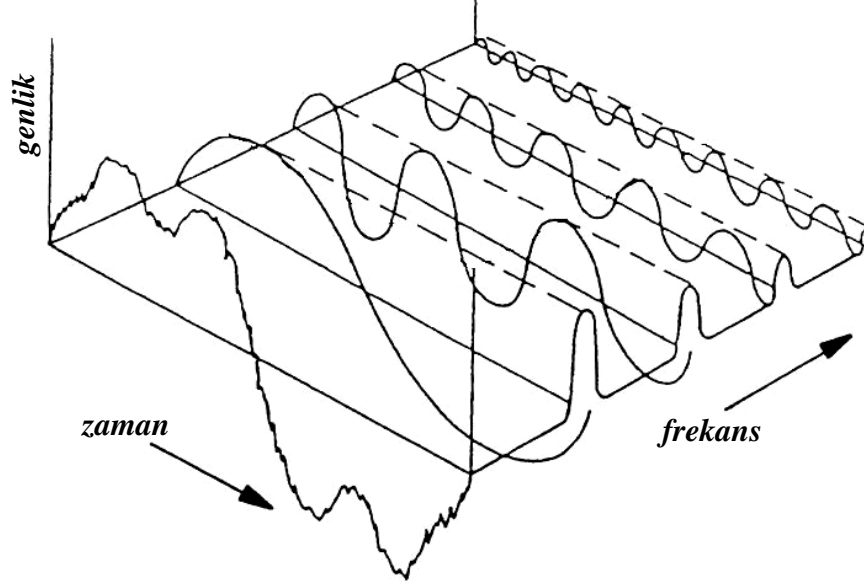
şeklinde sıralanabilir.

Gelişigüzel titreşimlere örnek taksi hareketi ya da koşturma hareketi yapan bir hava aracı verilebilir. Hava aracının tekerleklerinin yüzeye teması esnasında yolun pürüzlü olması nedeniyle oluşan gelişigüzel titreşimler hava aracının hızını değişmesine neden olur.

#### **2.2.4. Fourier serileri**

Birçok makinanın arızası, çalışma hızı frekansında ya da civarında görülür. Bu nedenle, frekansın bölümler olarak titreşim spektrumunda gösterilmesi ve analiz edilebilmesi önemli bir durumdur.

Frekans düzlem formatı, zaman kaydının takibi için gerekli olan elle kullanımı ortadan kaldırır. Bu durum, zaman kaybını ortadan kaldırır. Frekans düzlem tekniği, FFT kullanılarak zaman alanının farklı frekans bölgelerine çevrilmesiyle olur. En genel haliyle FFT, matematiksel olarak zaman kaydını frekans bölümlerine çevirir. Frekans düzlem grafiğinde, x-ekseninde frekans, y-ekseninde deplasman, hız ya da ivmenin genliği vardır. Şekil 2.8'de zaman ve frekans arasındaki ilişki basit olarak gösterilmektedir [9].



Şekil 2.8. FFT dönüşümü [9]

Karışık bir makinanın her bir parçasının ayrı ayrı durumunun görülebilmesi, frekans düzlem grafiği analizinin bir avantajıdır. Buna ek olarak frekans düzlem izleme metodu ile titreşim harmoniklerinin faz ilişkisinin takibi sağlanmış olur.

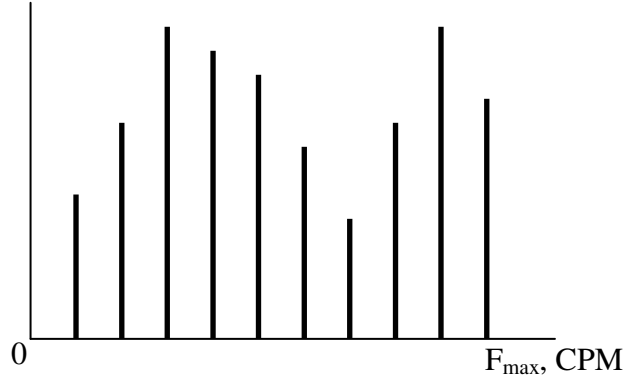
Fourier dönüşümü, çoğunlukla sinyal ve sistem analizinde kullanılır. En çok tercih edilen görüşlerinden birisi düzlem dönüşümlerinin fiziksel açıklamalarıdır. Zaman düzlem sinyallerinin frekans düzlemine dönüştürülmesi gibi yerlerde kullanılır. Bu dönüşümün, başka bir avantajı da bilgisayar işlemlerine rahatlıkla dönüştürülebiliyor olmasıdır. Bu özelliğe, son yıllarda en çok kullanılan sinyal işlemenin esası olan FFT denir [18].

FFT, her birisi farklı çözümü olan algoritmaların geniş bir yapısı olarak da tanımlanabilir. Frekans-zaman dalgalarını, genlik-frekans dalgalarına çevirmek için en genel haliyle FFT kullanılır.

### 2.2.5. Çizgi

Çizgi (line) spektrum gösterimlerinde ekranda görünen her bir dik bölgedir. Bu bölgeleri kaç çizgiye ayrılacağı önceden belirlenmelidir. Günümüzdeki teknoloji ile 25,600 bölgeye ayrılma yapılmaktadır. Genellikle 800

çizgi titreşim ölçülüyorsa, 800 tane sinüzoidal dalga vardır. Her bir görülen çizginin arkasında bir sinüzoidal dalga mevcuttur. Şekil 2.9'daki grafikte bu sinüzoidal dalgalarının tepeleri yani çizgi spektrumu gösterilmektedir [13].



**Şekil 2.9.** Çizgi spektrumu. Fmax; gösterim için alınan ölçüm aralığını gösterir

Ölçüm yapılan bir makinada normal koşullarda, sadece bir tane çizgi görülür. Bu çizgi balans olarak adlandırılır ve sıfır olamaz. Çünkü balanssız hiç bir şey yoktur. Ayrıca 1X'te; eksen kaçıklığı, mil eğikliği, gevşeklik, rezonans ve elektrik problemleri gibi diğer arızalarda kendisini gösterir [4].

### 2.2.6. Ortalama alma

Genellikle tüm makinalar periyodik olarak tekrarlanmayan gelişigüzel titreşimlere maruz kalırlar. Bu nedenle, toplanan sinyallerden sahte olanlar elenerek diğerlerinin ortalamasının alınması tavsiye edilir. Sadece devamlı sinyaller tutulduğu sürece ortalama alma, verinin devamlılığını sağlar [10].

Ortalama için minimum üç örnek toplanmalıdır. İyi bir istatistik için genellikle 3-4 örnek alınmalıdır.

Titreşim ölçüm cihazları, özellikle spektrum analizörleri, veri alırken seçilen çizgi sayısına bağlı olarak belli sayıda ölçüm yaparlar. Örneğin; 400 çizgili bir spektrum alınacağı zaman analizör 1,024 adet veri alır ve bu verilerden 512 adedi spektrum noktası oluşturur. Daha sonra baştan ve sondan toplamda 112 adet veriyi atar ve sonunda 400 çizgili bir spektrum elde edilmiş olur. Ancak cihazlar bu işlemi yeterli görmediği için, aynı işlemi istenilen sayıda tekrarlar ve

elde edilen verilerin ortalamasını alıp sonucu öyle verirler. Örneğin; 8 ortalama seçilmişse, veri alma işlemi 8 defa tekrarlanır. Sonuç olarak alınan spektrum ayrı ayrı alınan değerlerin ortalamasıyla ortaya çıkan spektrumdur [13]. Genellikle ölçümlerde 4 ya da 6 ortalama alınır. Yani veri toplama işlemi 4 veya 6 kere tekrarlanır. Günümüzdeki makinalarda 16 ortalama alınır. 16 ortalamadan daha fazlasının olmasını istemek gereksizdir [17].

### 2.2.7. Bindirme

Bindirme (overlap), titreşim ölçümlerinde ölçüm süresini kısaltmak için kullanılır. Ayrı ayrı t zaman aralıklarında değer almaktansa, ölçüm alınan  $t_1$ 'in son bölümü ile  $t_2$ 'nin ilk bölümünden yeni bir t oluşturulur. Böylelikle zamandan bir kazanç sağlanmış olur. Bindirme oranı  $t_2$ 'nin  $t_1$  üzerine ne kadar bineceğini gösteren % şeklinde belirtilir [13]. Şekil 2.10'da bindirme işlemi gösterilmektedir.

Bindirme, oranlarına göre tanımlanırsa [19];

% 0; Bindirme yoktur. Bu oranla, istenilen verinin frekans aralığı işlenen değerler ile yönetilir.

% 25; Bir önceki örneğin son % 25'i işlem başlamadan önce yeni örneğe eklenir. Bu nedenle, her bir örneğin % 75'i yenidir. Yeni verinin her bir bloğunun % 75'i yakalandığında % 25 veri kazancı elde edilir. Sonuç olarak, doğruluk her bir veri ayarı için % 25 kadar azalır.

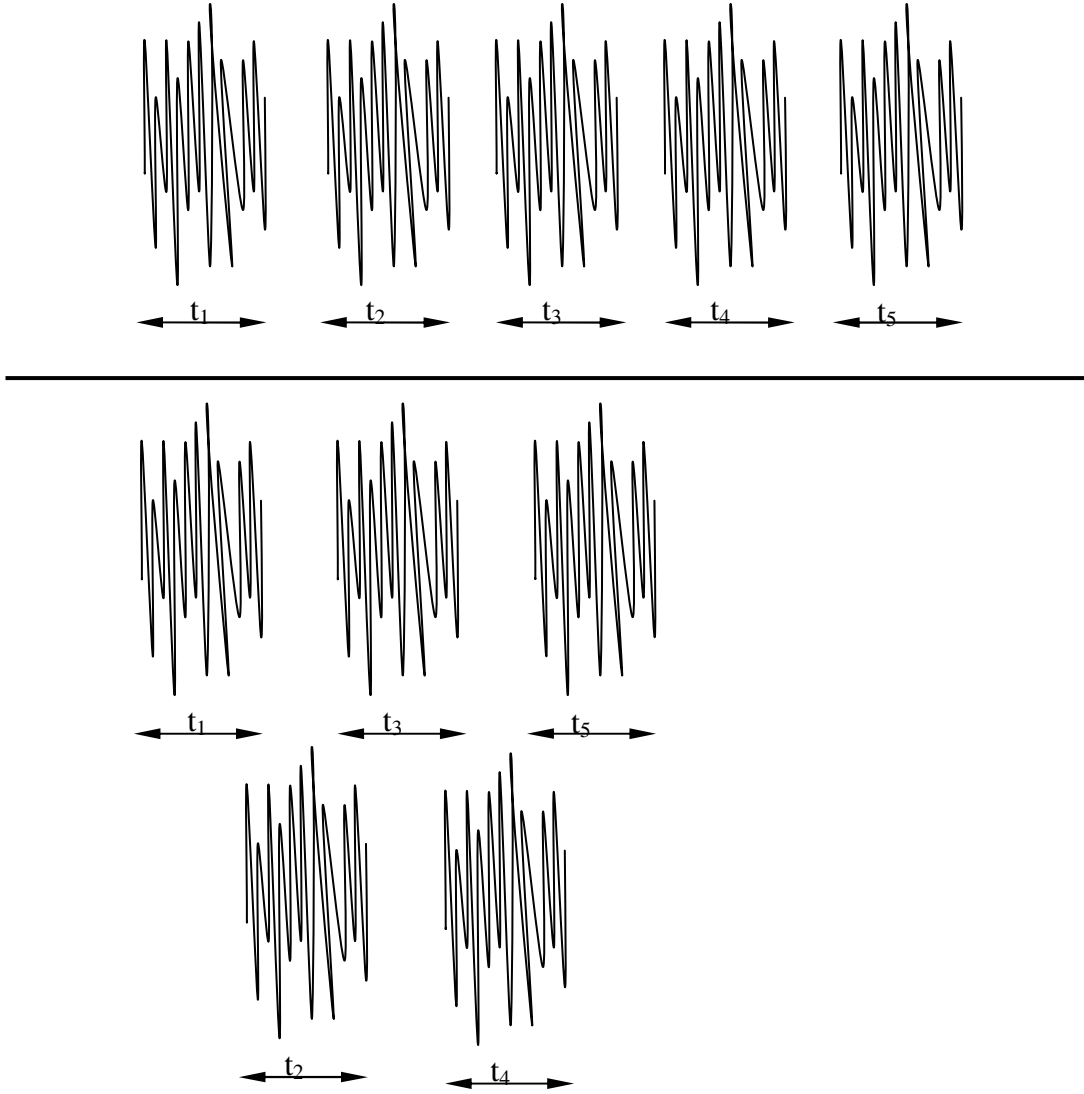
% 50; Önceki bloğun son % 50'sine her bir örnek için yeni verinin % 50'si eklenir. Doğruluk % 50 olarak azalır.

% 75; Verinin her bir bloğu % 25 yeni veriyle sınırlandırılır ve önceki bloğun % 75'i alınır. Doğruluk %25'e kadar azalır.

% 90; Her bir blok % 10 yeni veri ve önceki bloğun % 90'ını içerir. % 90 bindirme kullanılan ortalama verinin doğruluğu belirsizdir. % 90 bindirmede elde edilen sonuç, makina tarafından yapılan gerçek titreşimi temsil edemez.

Genellikle ideal bindirme oranı % 50'dir. Verinin kalitesinde bir problem olmaz. Bu uygulama ile çözüm süresi yarıya iner.

Ölçü aletinden aynı noktadan ölçmesi istenildiğinde, 6 değer almaktadır. 3 ortalama için 6 sn gereklidir. 800 çizgi için 2,048 veri, yani 6,000 sn gereklidir.

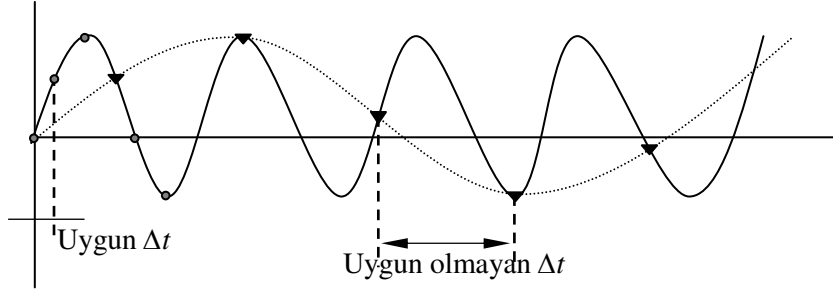


Şekil 2.10. Bindirme

### 2.2.8. Yalancı veri

İnsan gözü 24 Hz'in üzeri geçişleri hareketli olarak görmektedir. Bu değerın altında ise, geçişleri ayrı ayrı resim olarak görebilir. Arabanın yolda giderken tekerleklerin geri gitmesi örnek olarak gösterilebilir. Yani yalancı veri (aliasing), titreşim frekansının uygun olmayan veri örnekleme zaman aralığına bağlı olarak hatalı verinin tespit edilmesidir [17].

Hassasiyetin yüksek olması isteniyorsa Şekil 2.11'de görüldüğü gibi ölçme aralığı daha küçük alınmalıdır. En uygun  $\Delta t$  aralığı belirlenip ölçüme geçilir.



**Şekil 2.11.** Yalancı veri. Yuvarlak işaretli noktalarda yapılan ölçümlerde kesin sonuç alınır. Üçgen şekilli noktalarda yapılan ölçümlerde ise çok farklı bir eğrinin oluşuna neden olur ve yanlış ölçüm yapılır

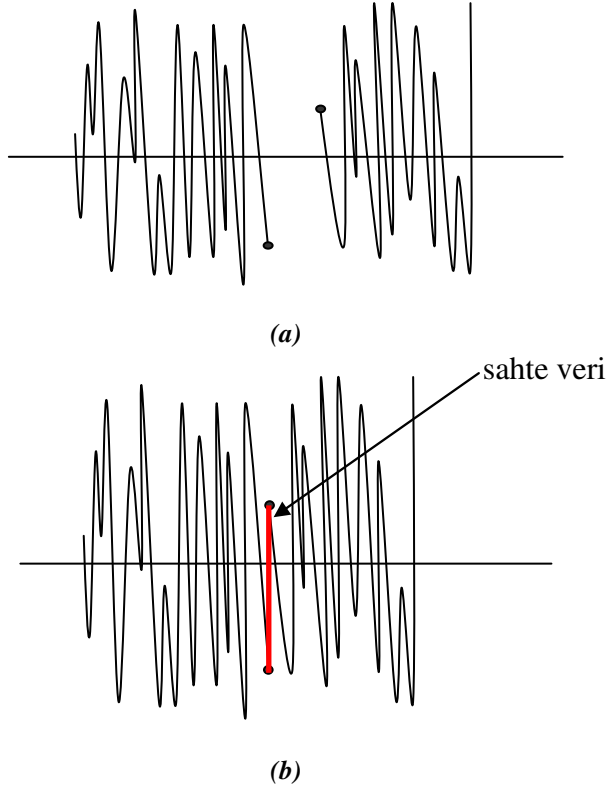
Veri toplama frekansı spektrum frekansından iki kat fazla olması istenir. Aksi takdirde olmayan frekans değeri tepe olarak görülür. Günümüz teknolojisinde kullanılan tüm makinalarda bu tür problemler görülmemektedir. Çünkü cihazlar otomatik olarak bu hataları düzeltmektedirler. Örneğin, ölçülecek en yüksek frekans 1,500 Hz ise verinin 3,250 Hz alınması durumunda yalancı veri olmayacaktır [13].

### 2.2.9. Kaçak

Veri, zaman spektrum analizöründe, sinyal alınarak bloklar halinde hafızada işlenmek üzere saklanır. Bloklar birbirine senkronize olmadığı için verinin başladığı ve bittiği noktalarda kesintiler meydana gelir. Bu kesinti noktaları frekans düzlemine çevrilirse, frekans spektrumunda aslında olmayan ancak matematiksel olarak üretilen tepeler meydana gelir.

Hafızaya alınmış zaman verileri birbirleriyle birleştirildiklerinde, bunların baş ve sonları farklı genliktedir. Bundan dolayı, bu noktalarda sıçrama meydana gelir. Zaman düzlemindeki bu sıçramalar, frekans düzleminde ayrı tepeler şeklinde sahte veriler olarak görülür. Bu duruma kaçak (Leakage) denir. Bir veri üzerinde oluşan kesinti ve kesinti sonucundaki sahte veri Şekil 2.12’de gösterilmektedir [13].



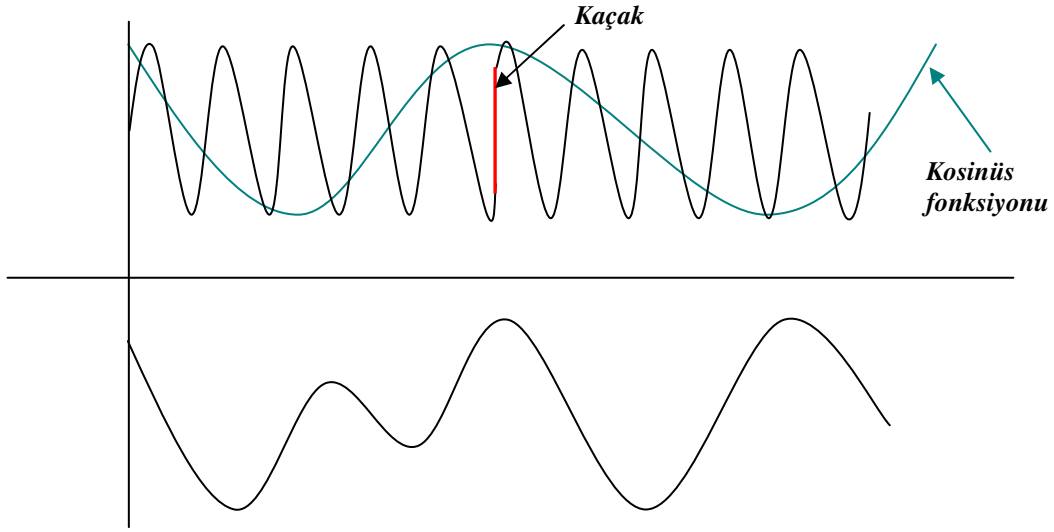


Şekil 2.12. Kaçak; (a) veriler arasındaki boşluk, (b) verilerin birleştirilmesi

### 2.2.10. Pencereleme

Zaman düzleminde veri bloklarındaki birleştirme noktalarının düzgünleştirilmesi amacı ile kosinüs çarpanı kullanılır. Bunun sonucunda verinin tamamında devamsızlığın engellenmesi sağlanır. Kaçak sonucunda elde edilen spektrumlarda, gerçekte hiç olmayan harmonikler pencereleme ile engellenmiş olur. Bu işlem Şekil 2.13'te görülmektedir.

Her iki veri bloğunun kosinüs fonksiyonu ile çarpılması sonucunda bütün uçlar sıfırlanmış olur. Böylece belirtilmiş veri blokları arasında atlama olmaz [13,17].



Şekil 2.13. Pencereleme yardımıyla kaçakların silinmesi

Titreşim ölçümü yapılmadan önce, ölçüm cihazı veya programının ayarları yapılmalıdır. Bunun içinde, bir pencere seçilmesi gerekir. En çok tavsiye edilen ve kullanılan fonksiyon Hanning penceresidir.

Doğal frekans ölçümü için ise; dikdörtgen (rectangular) pencere veya kutu aralık (flattop) penceresi kullanılır [17].

Bazı durumlarda sinyal uçlarının yuvarlanarak sıfırlama işlemi yapılamaz. Böyle durumlarda *dikdörtgen pencere* kullanılır. Aslında böyle bir pencere yoktur. Çünkü pencere kullanılmaması işlemine dikdörtgen pencere adı verilir. Bu işlem, örneğin doğal frekansını ölçmek için kullanılan rezonans test yöntemi ile ölçmede kullanılır [13].

*Hanning pencere* fonksiyonu, bir FFT analiz cihazı ile örneklenen sinyallerin dijital işlenmesi sırasında, zaman düzlemindeki kaydın başlangıç ve bitiş titreşim değerlerini sıfır olmaya zorlar. Bu sayede sinyal kesikliklerinde derece derece bir geçiş olmasını sağlar. Bu FFT algoritmasında doğal bir hataya sebep olur. Bu hata belli frekanslardaki enerjinin tam olarak ortaya çıkması yerine dağılmasına neden olur. Hanning pencere, zaman düzlemindeki sinyallerde düzgünlük bozukluklarını azaltır. Bu azaltma nedeni ile analiz yapma işlemi kolaylaştırılmış olur [17].

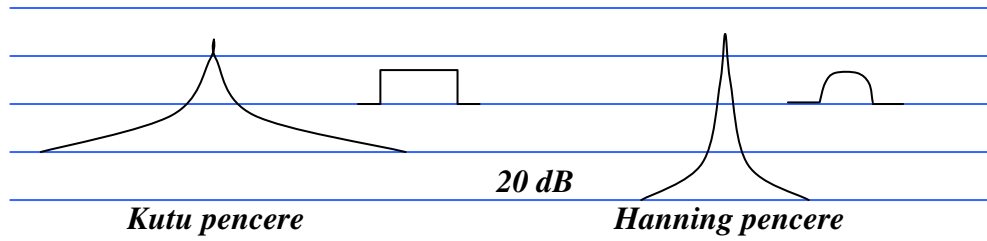
*Hamming pencere*, hanning pencerenin küçük dikdörtgen bir tabana oturtulmuş şeklindedir. Çalışma prensibi hanning pencereninkiyle aynıdır. Hamming pencere yüksek sinyallere karşı daha iyi seçicidir. Ama diğer tüm yan lobların

yüksek oluşu dezavantajdır. Hamming penceresinin, FFT analizöründeki dinamik aralığın sadece 50 dB olduğu zamanlarda belli avantajları vardır. Aslında günümüzde bu pencereleme yönteminin modası geçmiştir ve kullanılmamaktadır [13].

*Kutu aralık pencere*, aralıklar içinde 3.9 dB ile en yüksek genlik hatası oranına sahiptir. Bu nedenle, titreşim ölçümlerinde kullanılmaz. Ancak, genliğin değil frekansın önemli olduğu rezonans ölçümlerinde bu aralık türü frekansta herhangi bir değişiklik yapmadığı ve özellikle geçici titreşimleri de içerdiği için kullanılır.

Kutu aralığın matematiksel işlemlerde ürettiği gürültü miktarı 1.00 iken hanning pencere’de 1.50’dir. Bu nedenle işlem sonrasında genlikte ayarlama yapılması zorunludur [13].

Şekil 2.14’te 80 dB dinamik aralığı için kutu ve hanning aralıklarının karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Kutu ve Hanning pencerelerin karşılaştırılması

### 2.2.11. Modülasyonlar

Bir frekanstaki titreşimin, diğer frekanstaki titreşimle etkileşerek şekil değiştirmesine modülasyon denir.

Modülasyon iki titreşim kaynağının birbiri ile etkileştiğini gösterir. Örneğin, üzerinde kırık bir dişli bulunan bir çarkta dönme devri ile dişli çalışma frekansı genellikle modüle olur. Arıza kaynağını bulmak için kullanılan bir teknik olan demodülasyon yoluyla, modüle olmuş iki sinyal birbirinden ayrılarak arıza kaynağı bulunur.

Modülasyon, genlik ve frekans modülasyonu olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

*Genlik modülasyonu*, iki farklı olayın birbirini etkilemesi sonucunda genliğinin değişmesi olayıdır. Eğer, farklı olaylar nedeni ile oluşan iki farklı titreşimin frekansı birbirine yakın olursa bu frekanslar birbirleri ile etkileşirler. Böylece ortaya çıkan titreşimin genliği de değişir. Vuru, bir genlik modülasyonudur. Bu tür genlik modülasyonlarına uğramış titreşimler, spektrumlarda yan bant olarak görülürler.

Özellikle rulman arızaları ve dişli arızalarında, rulman arıza frekansları ve dişli arıza frekansları arızalı rulmanın veya arızalı dişli çarkın üzerinde bulunduğu milin dönme devri frekansı tarafından modüle edilir. Bu durumda, spektruma bakılırsa arıza frekansının sağında ve solunda mil dönme devri frekansı kadar uzakta tepeler görülür. Çünkü bu tepeler genlik modülasyonu sonucu ortaya çıkmış olan yan bantlardır [13].

Modüle edilen sinyale taşıyıcı denir. Taşıyıcının frekansı modüle edilene oranla daha yüksektir.

*Frekans modülasyonu*, iki sinyalin birbirinin frekansını etkilemesini ve frekansın değişmesini ifade eder. Özellikle; radyo ve televizyon yayıncılığında kullanılan bu yöntem kaliteli sinyalin dinleyiciye iletilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Frekans modülasyonu da genlik modülasyonu gibi yan bant oluşturur.

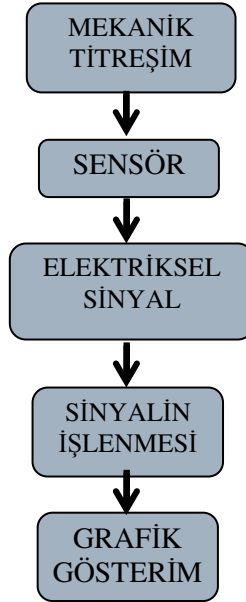
### 3. TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ ve ANALİZİ

#### 3.1. Titreşim Analizi

Doğru ve tekrarlanabilir titreşim analizinin kullanılması kestirimci bakım programları için önemlidir. Titreşim analizinde sensörlerin tipi ve kalitesi önemlidir. Buna ek olarak ölçüm noktası, yönü ve sensör yerleştirme tekniği olmak üzere üç anahtar parametre daha vardır.

Kestirimci bakımda anahtar parametrelerin geçmişinin uygun bir şekilde kayıt altında tutulması oldukça önemlidir. Ölçüm yapılmak istenen yer, ölçüm noktası ve yönü, her zaman için uygun durumda olmalıdır. Ayrıca her bir ölçümde sensöre gelen yük ve kuvvetlerin aynı olmasına özen gösterilmelidir [9].

Titreşim ölçümü, sistematik olarak Şekil 3.1'deki şemada gösterilmektedir. Şekil 3.1'de de görüleceği gibi makinalardaki mekanik titreşimler sensörler yardımıyla algılanır. Sensörlerden çıkan elektrik sinyali bir analizör tarafından işlenerek grafik gösterimi haline çevrilir.



Şekil 3.1. Titreşim analiz şeması

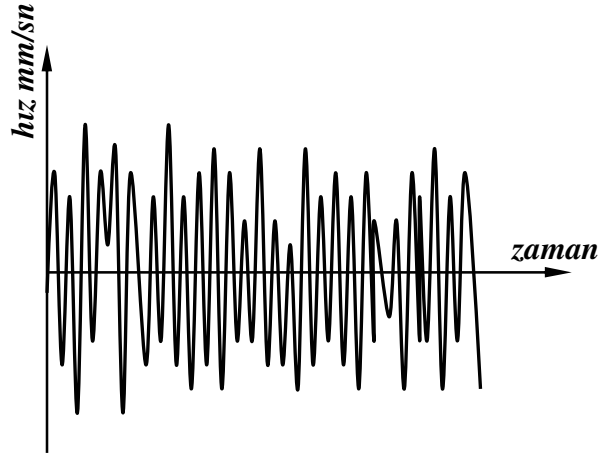
### 3.2. Titreşim Profilleri

Teorik olarak, basit bir titreşim eğrisi gösterilmesine karşın titreşim analizinin sonucunda alınan titreşim eğrileri çok karışık bir yapıya sahiptir. Bunun sebebi, titreşim kaynağının birden fazla olmasıdır. Her bir titreşim kaynağı kendisine ait bir eğri oluşturur. Bu eğriler de birbirini etkileyerek yeni bir eğri oluşur. Meydana gelen bu eğrileri göstermek için ise zaman düzlemi ve frekans düzlemi olmak üzere iki format kullanılır.

#### 3.2.1. Zaman düzlemi

Zaman düzlemi titreşimin zamana bağlı olarak ne kadar değiştiğini gösterir. Şekil 3.2’de hız dalga formuyla ilgili bir örnek grafik vardır. Burada  $x$ -ekseninde zaman ve  $y$ -ekseninde ise hız, deplasman ya da ivme vardır.

Dalga formundaki bilginin sayısı, grafiğin çözünürlüğü ve sürekliliğine, sürekliliği ise toplam zaman periyoduna bağlıdır. Dalga formunun çözünürlüğü veri nokta sayısı tarafından belirlenir. Bu nedenden dolayı, ne kadar çok örnek olursa o kadar detay oluşur [20].



Şekil 3.2. Zaman düzlemi titreşim profili

Zaman düzlemi kullanmanın bazı avantajları vardır. Bunlar [21,22];

- 100 RPM’in altındaki düşük hız uygulamalarında kullanılabilir,

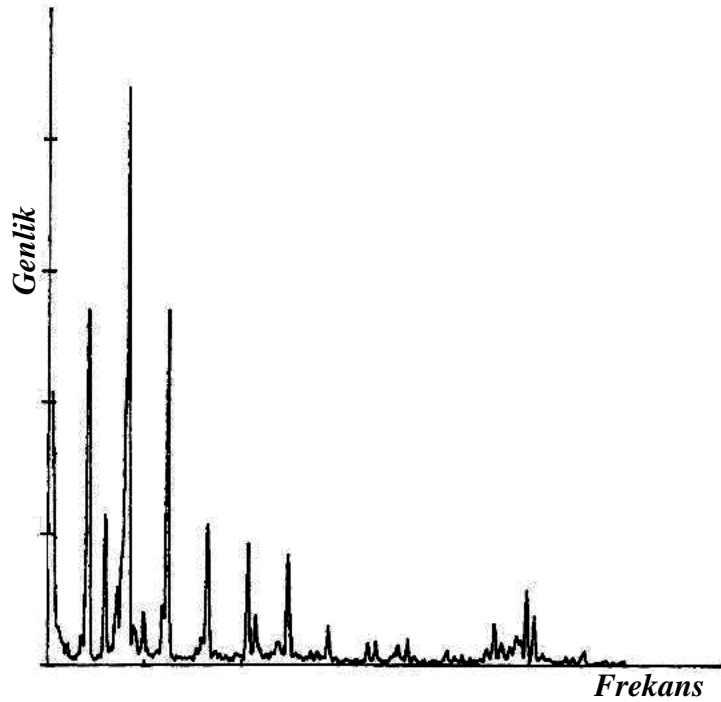
- Yataklarda oluşan darbelerin o anki durumuna göre gerçek genliği belirlenebilir,
- Dişlilerde kullanılabilir,
- 2 kanallı X-Y sensör ile kaymalı yatak makinalarında kullanılabilir,
- Boşluk, sürtünme ve vurular kolayca görülebilir,

olması şeklinde sıralanabilir.

Normal hızda çalışan bir makinadaki balanssızlığı ve ayar kaçıklığını belirlemede, genellikle frekans düzlem grafiği tercih edilir. Çünkü, oluşan anlık değişimler daha net bir şekilde görülmektedir [21].

### 3.2.2. Frekans düzlemi

Bir fonksiyonun değişkeni frekans ise bu fonksiyon frekans düzleminde ifade edilmiştir. Frekans düzlemi titreşim mühendisliği açısından yorumlandığında, titreşim genliklerinin bir frekans aralığında frekanslara göre dağılımını gösteren grafik anlamında kullanılmaktadır. Frekans düzlemi, fonksiyonun karakterlerini gösterir [13].



Şekil 3.3. Frekans düzlemi

Bir makinanın normalde sadece bir tane çalışma frekansı vardır. Ancak çalışma frekansı ve harmoniklerine ek olarak frekans düzleminde, oluşan düzensizliklerin frekansları da görülür. Böylece oluşan problemler kendisini tepeler şeklinde gösterir.

Genellikle matematiksel işlemler yardımıyla zaman düzlemi frekans düzlemine dönüştürülür.

Frekans düzlem grafiği veya titreşim işareti örneği Şekil 3.3'te görülmektedir.

Titreşim verilerinin elde edilmesi için makinanın uygun yerine monte edilmiş bir sensöre ve buradan gelen bilgileri analiz edebilen bir analizöre ihtiyaç vardır. Sensörler ve analizörler aşağıdaki bölümlerde tanımlanmaktadır.

### **3.3. Titreşim sensörleri**

Sensörler, mekanik iletileri elektrik sinyallerine çevirirler. Bu aletler, makina durumunu izlemek, arızayı tespit etmek ve parametreleri belirlemek için gerekli olan bilgiyi saptarlar. Sensörler, iki sinyal arasındaki büyüklük, frekans ve faz değerlendirmeleri için kullanılır. Kullanılacak yere uygun sensör seçimine dikkat edilmelidir. Sensör seçimi; hassasiyet, ölçüm yeri boyutu, ölçüm için istenilen parametreler, frekans cevabı ve makina hızına bağlıdır [12].

Özel olarak makinanın mekanik durumunu izleyen titreşim sensörleri üç tiptir. Bunlar; deplasman sensörü, hız sensörleri ve ivme sensörleridir. Her birinin kullanım alanı sınırlıdır ve bazı alanlarda kendilerine özel kullanım şekilleri de vardır.

#### **3.3.1. Deplasman sensörü**

Mekanik deplasman girişini, elektrik çıkışına dönüştüren sensör tipidir. Veri, *p-p mils* birimi cinsinden kayıt edilir. Bu değer makina milinin maksimum tepeler arasındaki deplasmanını gösterir. Deplasman sensörleri için uygun frekans aralığı 10 – 1,000 Hz'dir (600 – 60,000 RPM arasındadır). Bu sınırın altında veya



üzerindeki frekans değerleri için ölçüm biçimi bozulabilir. Bu, makina durumunu belirlemek için güvenli değildir.

Kullanılacak olan sensörlerin, ölçüm yapılacak olan teçhizatın, değer alınabilecek anahtar noktalarına monte edilmesi gerekmektedir. Ancak sabit yerleştirilmiş deplasman sensörleri ile doğru veri toplanması sağlanabilir. [9].

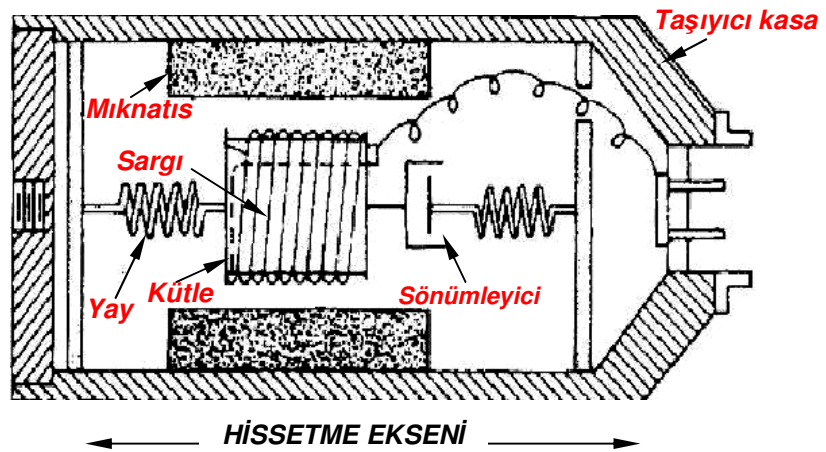
Deplasman sensörünün net bir kalibrasyonunun zor olması, kendisi için bir dezavantajdır [15]. Bu tip sensörlerin diğer bir dezavantajı ise titreşen yüzeyin elektriksel olarak iletken olmasının istenmesidir [14].

### 3.3.2. Hız sensörü

Hız sensörü, deplasman sensörlerine benzememektedir. Çünkü hareketin uzaklığı yerine deplasmanın hızı ölçülür. Genellikle, ips birimi cinsinden ölçümünü gerçekleştirir. Etkin olduğu frekans aralığı 10 – 1,000 Hz'dir.

Hız sensörlerinin ana sınırları, mekanik ve termal hassasiyetleridir. Normal kullanım, kalibrasyon kaybına neden olabilir ve bu nedenle veri kaybını önlemek için kesin kalibrasyon programlarına ihtiyaç vardır. Minimum olarak titreşim sensörleri her 6 ayda bir kalibrasyon yapılmalıdır [9].

Hız sensörleri kullanılmaya başlanılan ilk sensörlerdendir. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, hız sensörleri sarıli bir bobin ve mıknatıstan oluşur.



Şekil 3.4. Hız sensörünün şematiği [9]

Basit olarak çalışması, manyetik alanın bobini indüklemesi prensibine dayanır. Eğer gövde hareket ederse, mıknatıs ataleti nedeniyle elektromanyetik alan oluşturur. Manyetik alan ile bobin arasındaki bağıl hareket ise hareketin hızına orantılı olarak bir akım oluşturur. Yani, oluşan sarsıntı kadar bir akım elde edilmiş olur. Bu akım ne kadarlık bir sarsıntı olduğunu gösterir. Dışarıdan hiçbir elektronik yardımcıya ihtiyaç olmadan ölçüm işleminin gerçekleşmiş olması bir avantajdır. Fakat bu avantajının yanında ağır, karışık bir yapıda ve pahalı olması da dezavantajlarıdır [23].

### 3.3.3. İvme sensörü

İvme sensörü, mekanik titreşimlerdeki kuvvet etkilerini belirleyen en iyi sensör tipidir. İvme sensörlerinin genel kullanım adı ivme metre'dir. Bu çalışmada genellikle ivme metre ifadesi kullanılacaktır.

İvme metreler, mekanik enerjiyi elektrik sinyaline çevirmek için piezoelektrik kristalleri ya da filmlerini kullanırlar. Piezoelektrik malzeme, kuvvete maruz kaldığında elektriksel yük üreten bir malzemedir. Değişik özelliklere sahip birçok çeşit piezoelektrik malzeme vardır.

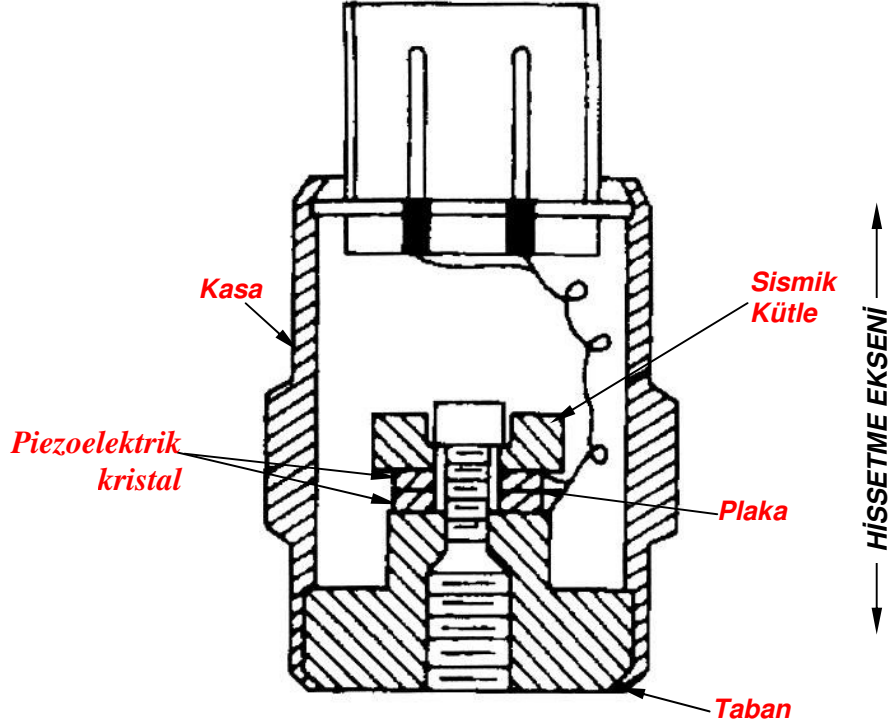
İvme metrelerin ölçü birimi, yer çekim sabiti olan g's inç'tir. Genel amaçlı ivme metrelerin etki aralığı 1 – 10,000 Hz arasındadır. Genelde 1,000 Hz üzerinde titreşim verisi alınır ve ivme olarak analiz edilir.

Temel olarak ivme metreler sıkıştırma, kesme ve kiriş tip olmak üzere üç gruba ayrılırlar [15].

*Sıkıştırma tipi ivme metreler* Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, piezoelektrik kristaller, sismik bir kütle ve kasadan oluşur.

Piezoelektrik kristaller, ivme metrelerin tabanındadır ve piezoelektrik kristallerin arasına sıkıştırılmış bir plaka vardır. İvme metre oluşan sarsıntı nedeniyle titreştiğinde sismik kütle piezoelektrik kristalleri ezer. Arada bulunan plaka üzerinde bir akım meydana gelir. Bu akım toplayıcı plaka kasaya bağlıdır ve üzerinde oluşan akımları ivme metre içerisinde bulunan bir dirence iletir. Oluşan bu akım dirençten geçtiğinde bir gerilim oluşur. Oluşan bu gerilim ölçüm cihazı

tarafından kolaylıkla ölçülebilir [17]. Böylece mekanik titreşimlerin seviyesi ölçülmüş olunur.



Şekil 3.5. Sıkıştırma tip ivme metrenin yapısı [9]

*Kesme tip ivme metreler*, tasarım olarak sıkıştırma tip ivme metrelerden çok farklı değildir. Bu tipte, kristal iki kütle arasında düşey konumdadır ve buna ezme kuvveti değil kesme kuvveti uygulanır. Çalışma prensibi sıkıştırma tipi ivme metreler ile aynıdır [13].

*Kiriş tip (beam-type) ivme metre*, tipik olarak sıkıştırma tipi ivme metre'ye benzer benzer. Birbirini büken doğrultuda birleştirilmiş iki tane piezoelektrik tabakadan oluşmaktadır. Kiriş esnedikçe, piezoelektrik tabakalar birbirine basınç uygular ve bu basınç sonucunda bir akım elde edilir. Böylece, titreşim sonucunda bir gerilim üretilmiş olur [15].

#### 3.3.4. Sensör seçimi

Sensör seçiminde birçok önemli faktör etkili olmaktadır. Sensör seçimindeki bu önemli faktörler; cevap frekansı, sensörün hassasiyeti ve

ölçülmeye başlanan sinyalin uzunluğu şeklinde sıralanabilir. Sensörlerin hissedeceği frekans aralığı makinanın parçaları tarafından üretilen frekanslar ile uygun olmalıdır. Uygun olmadığı zaman, başka bir sensör seçilmeli ve sinyal uygun ölçüye çevrilmelidir [12].

Sensör seçimindeki önemli faktörlerin her birisi uygulanacak işlem seçiminde de önemlidir. Örneğin, piezoelektrik sensörlerin seçiminde hassasiyet ve kütle belirleyici iki parametredir. Büyük boyutta sensör seçilirse genellikle hassasiyette artış olur. Ancak bunun yanında, küçük boyutta sensör seçimi ağırlığın minimize edilmesine neden olur. Bu nedenle, küçük boyutta bir sensör kullanımı avantajlıdır. Fakat, ek kütle eklenmeye başladığından itibaren yapının doğal frekansında değişimler oluşmaya başlar. Bu durum hassasiyeti etkilemeye başlar. Bu noktada ise hassasiyeti yüksek sensör tercih edilir [15].

### **3.3.5. Sensörlerin kullandıkları yerler**

Sensörler ivme ölçümlerinde, yüksek sinyal çıkışlarını sağlayan ivme ölçümlerinin olduğu yüksek frekanslarda, kuvvetlerin, yüklerin ve gerilmelerin analiz edilmesi gerektiği yerlerde ve küçük boyut ve kütleli sensörlerin istendiği yerlerde kullanılırlar.

Hız ölçümleri, titreşim ölçümlerinin akustik ölçümlerle ilişkili olduğu yerlerde, orta boyuttaki frekanslarda, yaygın olarak, hem deplasman hem de ivme spektrallarından daha düzgün olan hız spektrumlu makinalardaki ölçümlerde ve şekle ait gerilme ile ilişkili olan çınlayan yapılardaki titreşim ölçümünün olacağı yerlerde kullanılırlar.

Deplasman ölçümleri, deplasmanın genliğinin önemli olduğu yerlerde, ölçüm yapılan alandaki deplasmanın büyük olduğu yerlerde, düşük frekanslarda ve dönel gövde ve makina yapısı arasındaki bağıl hareketin ölçülmesinde kullanılırlar [15].

### 3.3.6. Sensörlerin yerleştirilmesi

Kesin titreşim ölçümü için, makinanın durumuna en uygun olan noktaya sensör yerleştirilmelidir. Örneğin rulman ölçümlerinde yerleştirme işlemi, her ne kadar yataklar, kaplin korumaları ve fan kaplamaları gibi bazı komponentler tarafından kısıtlanırsa da mümkün olduğunca rulmana yakın bir yer tercih edilmelidir [17].

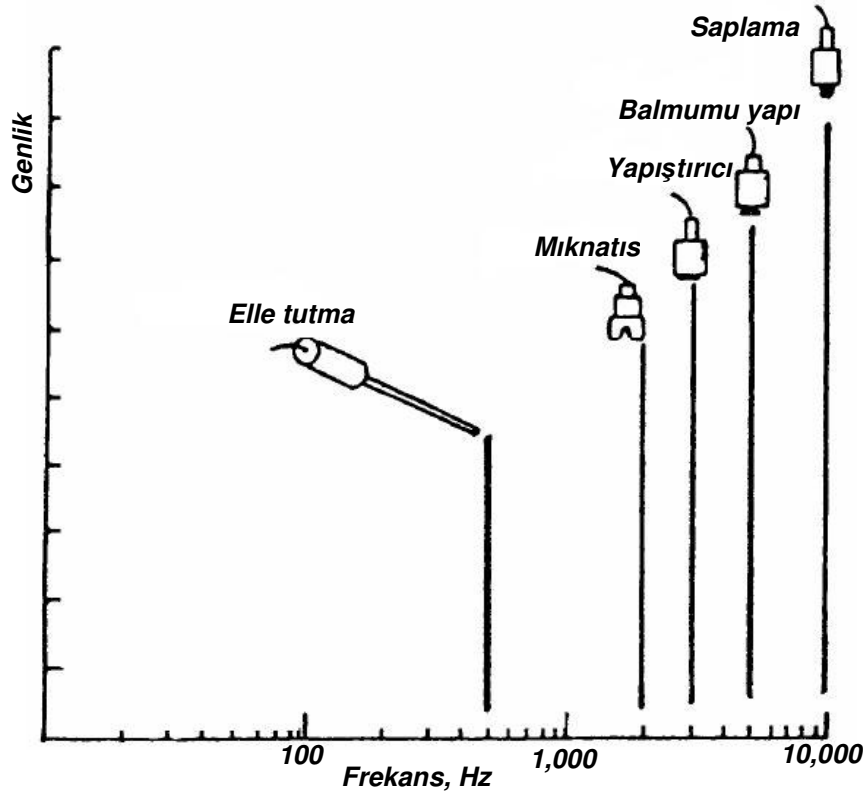
Titreşim sensörlerini yerleştirmek için kullanılan yöntemler cevap frekanslarından etkilenebilirler. Çünkü ivme metrenin doğal frekansı, yerleştirme yöntemine bağlı olarak azalabilir. Bundan dolayı yerleştirme yöntemi seçiminde, çalışmaya başlanılan frekans aralığı boyunca düz cevap frekansının sağlanmasına dikkat edilmelidir [12].

Ölçüm yapılacak olan yüzeye sensörlerin yerleştirilmesi için birçok yöntem vardır. Bunlar, elle tutma, manyetik, yapıştırıcı, balmumu ve saplama yöntemleridir. Şekil 3.6’da bu yöntemler ve hassasiyetleri gösterilmektedir.

Sensör yerleştirme tiplerinin frekans aralıkları Çizelge 3.1’de gösterilmektedir. Çizelge 3.1 ve Şekil 3.6’da gösterildiği gibi, en yüksek cevap frekansını sağlayan yöntem, iyi bir bitiş ile temiz, düz yüzeye saplama tipi yerleştirmedir.

**Çizelge 3.1.** 100 mv/g ivme metre için yaklaşık frekans uzunlukları. Uygulanan metoda göre frekans aralıkları [12]

<i>Metot</i>	<i>Frekans Limiti</i>
Elle Tutmak	500 Hz
Mıknatıs	2,000 Hz
Yapıştırıcı	2,500 Hz – 4,000 Hz
Balmumu	5,000 Hz
Saplama	6,000 Hz – 10,000 Hz



Şekil 3.6. Yerleştirilmiş sensörlerin doğal frekansları [12]

Yerleştirme yöntemleri rezonans frekansına ve buna bağlı olarak da sensörün kullanılabilir frekansına etki eder. Bu nedenle ölçüm yapılmadan önce, frekans alımının uygun olduğu frekans cevabından emin olunmalıdır. Kullanılan tüm metotların avantaj ve dezavantajları vardır. Uygulanacak olan yerleştirme yöntemlerinde birçok problem ortaya çıkmaktadır. Bunlar [24];

- Sensörün uygun frekans aralığında yerleştirilmesinin etkisi,
- Test yüzeyinde sensör yerleştirilmesine kütle yükünün etkisi,
- Maksimum titreşim seviyesi,
- Maksimum çalışma sıcaklığı,
- Ölçüm doğruluğu,
- Ölçümün tekrarlanabilir olması,
- Geçen zamana göre bağlantının sabit kalması,
- Ölçüm yapılacak yüzeyin vidalama veya diğer yöntemler esnasında zarar görmemesi,
- Sensörün elektrik yalıtkanlığının olması,

- Ölçüm yapılacak yüzeyde yeterli zamanın olmaması,
- Yerleştirme yönteminin maliyeti,
- Toz, yağ ve atıklar gibi çevre problemleri

şeklinde sıralanabilir.

#### **3.3.6.1. Elle tutma sensörler**

Ölçüm yapılacak yüzeyin üzerine sensörün elle tutularak, ölçümün yapıldığı sensör tipidir.

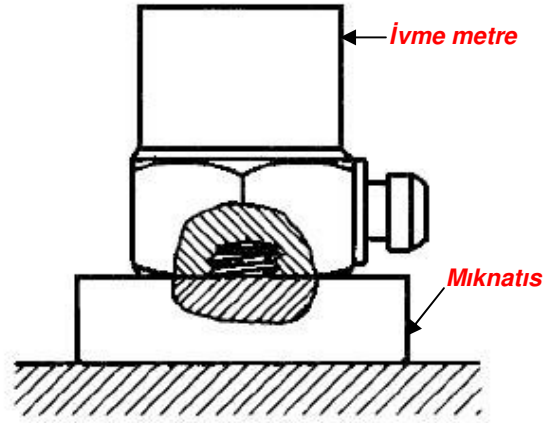
Yapılan ölçüm sonucunda oldukça düşük performanslar elde edilir. Ancak ölçüm yapılacak noktanın sürekli olarak değiştiği gibi bazı durumlarda yararlı bir ölçüm tekniği olarak kullanılabilir [15].

Bir noktadan üst üste veri alınmak istenildiği zaman en düşük hassasiyete sahip sensör tipidir. Burada ölçüm tekrarlanamaz [17].

#### **3.3.6.2. Manyetik yerleştirme**

Manyetik yerleştirme, 100 Hz'den daha düşük frekanslarda kullanılan bir yöntemdir ve sensör makinaya manyetik bir etki yardımı ile yerleştirilir. Manyetik sensörün doğal frekansı veriyi bozmaya çalışır. Bu yüzden manyetik olarak yerleştirilmek istenilen sensörlerin seçimi ve montajına önem verilmelidir [9].

Şekil 3.7'de, manyetik yerleştirme gösterilmektedir. Manyetik yerleştirmede, yüzeyin temiz, pürüzsüz ve ferromanyetik olması gerekmektedir. Sensörün yüzeye kolayca yerleştirilip sökülebilir olması makinanın arıza takibi için aranan bir özelliktir. Böylelikle, çok kolay bir şekilde bir noktadan diğerine geçerek sağlam sonuçlar ölçülebilir [24].

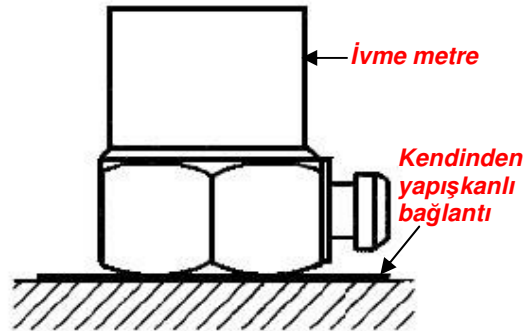


**Şekil 3.7.** Manyetik tip yerleştirme yöntemi. Bu yerleştirmede sensör manyetik bir parçaya saplama ile bağlı olarak yüzeye monte edilir [15]

### 3.3.6.3. Yapıştırıcı ile yerleştirme

Bu yöntemde hem sensörün yüzeyine, hem de ölçüm yapılacak bölgenin yüzeyine yapıştırıcı sürülür. Yapıştırıcı film, düz ve temiz yüzeylere küçük boyuttaki sensörlerin yerleştirilmesi için kullanılır. Uygulaması kolay ve hızlı bir yöntemdir.

Şekil 3.8’de basit olarak sensörün yapıştırıcı ile ölçüm yapılacak yüzeye bağlantısı gösterilmiştir.



**Şekil 3.8.** Yapıştırıcı ile sensör yerleştirilmesi. Sensör yüzeye çift taraflı yapışkan bir bağlantı ile bağlanır [15]

Yapıştırıcı ile yerleştirme yönteminde, sensör ile yüzey arasında bir yalıtkanlık oluşturulur. Ölçüm yapılacak alana yerleştirmek için delme işleminin yapılmasına gerek yoktur [9].



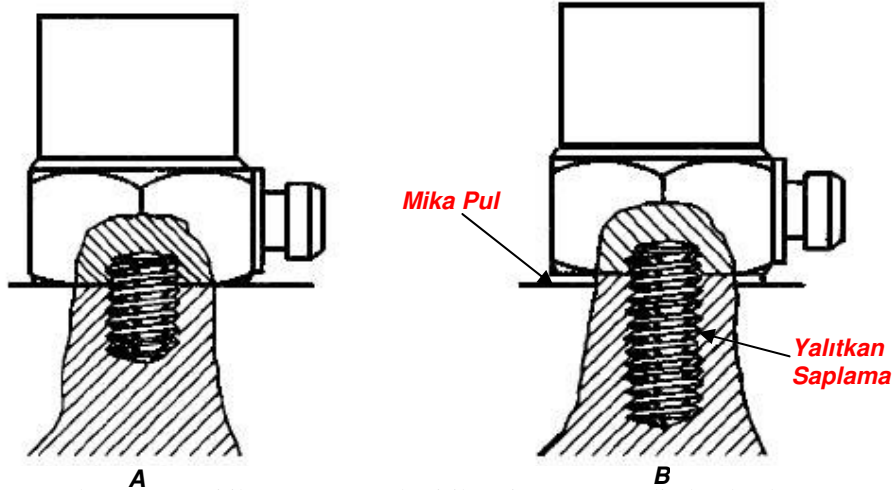
### 3.3.6.4. Balmumu bağlantı

Balmumu bağlantı yöntemi, doğal arı balmumu ya da petrol özlü balmumları kullanılarak, sensörlerin ölçüm yapılacak yüzeye yerleştirilişidir. Eğer ölçüm yapılacak yüzey ince ve düzgün değilse, ince bir balmumu yapıya gerek vardır ve doğal frekans normal ölçümlerden daha düşük ölçülür [12].

### 3.3.6.5. Saplama bağlantı

Saplama bağlantı en çok tercih edilen bağlama yöntemidir. Şekil 3.9-a’da basit bir saplama ile bağlama yöntemi gösterilmektedir.

Bağlanan yüzeydeki saplamanın yalıtılmış şekli ise Şekil 3.9-b’de gösterilmektedir. Buradaki tek fark, sensör ile yüzey arasına ek bir mika pul yerleştirilmesidir. Sensör yerleştirilmeden önce tüm yüzeyinin ölçüm yapılacak yüzeye temas ettiğinden emin olunmalıdır ve saplamanın uzunluğu kullanılan yerin boyutuna göre uygun bir şekilde seçilmelidir [15].



Şekil 3.9. Saplama yöntemi ile sensörün yerleştirilmesi. (a) Sensör direkt olarak yüzeye saplama yardımıyla bağlanır. (b) Şekil (a)'daki yöntemin aynısı fakat üretim esnasında sensör ile yüzey arasına mika pul yerleştirilir [15]

Saplama bağlantısını tercih etmenin nedenleri [12],

- Çok yüksek rezonans frekansı sağlar. 100 kHz'den daha yüksek değerlere ulaşabilir.

- Sensörün ölçüm yapılacak yüzeyden gevşemeden çok yüksek titreşimdeki ölçümlere izin verir.
- Ölçüm gerçekleştirilirken maksimum çalışma sıcaklığını azaltmaz.
- Ölçüm noktasının her seferinde doğru ve garantili olmasını sağlar.

şeklinde sınıflandırılır.

### **3.3.7. Sensörlerin ölçüm yönü**

Sensörün yerleştirildiği noktadan üç eksende ölçüm yapılır. Bunlar, yatay, radyal ve eksenel yönlerdir. Makinanın durumuna uygun olan eksen veya eksenlerde ölçüm alınır.

Dönel makinalarda doğru bir arıza tespiti gerçekleştirmek için her üç ekseninden de ölçüm yapılması gerekmektedir. Çünkü arıza kendisini sadece bir ekseninde göstermeyebilir. Günümüzde kullanılan sensörler her üç ekseninde de ölçüm gerçekleştirebilir. Bundan dolayı sadece bir tane sensör kullanılarak üç ekseninden değer alımı sağlanmaktadır [26].

## **3.4. Titreşim analizörleri**

Sensörler, makina üzerinden hissettikleri mekanik titreşimleri sinyale dönüştürdükten sonra analizöre gönderirler. Analizör gelen sinyali işledikten sonra uygun aletlerle grafiksel olarak bir ekranda gösterir. Genellikle, taşınabilir titreşim analizörleri tercih edilir. Çünkü ölçüm yapılacak olan yerde alet bırakılmaması ve taşınması kolay olmasından dolayı tercih edilir.

Günümüzde en son model analizörler bilgisayara bağlanabilen bir kart okuyucu şeklindedir. Bu şekilde olması analiz yapan kişi için çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Sadece bu kartın taşınması, titreşim ölçümü yapılmasına yardımcı olabilir [17].

## **3.5. Kablolar**

Kablolar, sensörler ile analizör arasındaki iletişimi sağlar.

Kablonun esneme özelliği ve ölçüm yapılabilecek her yere rahat uzatılabilme özelliğine sahip olması istenir. Sensörlere bağlantısı olan ve en çok tercih edilen kablo türü kıvrımlı kablolardır.

Kıvrımlı kablolar, düşük hızdaki uygulamalarda, örneğin 300 RPM'in altındaki uygulamalar ya da güçlü elektromanyetik alanın olduğu yerlerde uygun değildir. Çünkü kıvrımlı kablolar doğası gereği her zaman gevşek halini almaya çalışacağı için, bu hareketi sırasında makinanın değerine denk düşük seviyeli frekanslar üretebilir. Böylece, bu salınım frekansı makinanın gerçek frekansını örtebilir [9].

Ayrıca güçlü bir elektromanyetik alan kablo salınımını ivmelendirebilir ve kablo tarafından üretilen titreşim gerçek makina titreşimini örtebilir.

Kıvrımlı kabloların sakıncalı olduğu durumlarda eşksenli kablolar kullanılır. Taşınabilir sistemlerde kullanımı zor olsa da düşük hız ve elektromanyetik alan uygulamalarında kesinlikle bu kablo türü tercih edilir.

### **3.6. Makinalarda Oluşabilecek Hasarlardan Dolayı Meydana Gelen Titreşimler ve Tanımlanmaları**

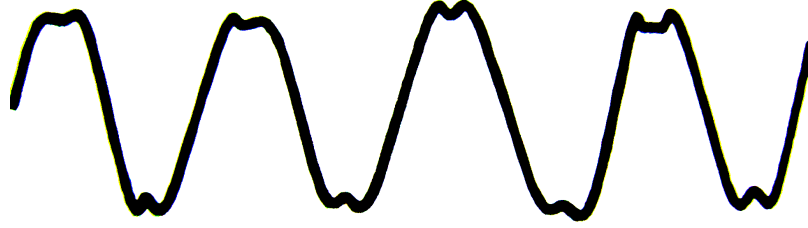
Makinalarda, titreşim oluşumları kendini göstermeye başladıktan sonra, spektrumlarda tepeler problemi gösterir. Arızalar genellikle 1X diye adlandırılan motor devir hızının altında (Subharmonic–Harmonikaltı), katlarında (Harmonic–Harmonikler) ve harmonik dışı (Nonharmonic) frekanslarında görülürler. Bu oluşan tepe değerlerini okumak ve karar vermek önemli bir ihtisas gerektirmektedir. Bu noktada genel olarak bir makina için oluşabilecek arızalar ve bunların spektrumlar üzerinde nasıl görülebileceği diğer bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmaktadır [27].

#### **3.6.1. Mekanik gevşeklikler**

Mekanik gevşeklik, herhangi bir nedenle çözülen bağlantılar nedeniyle, makinanın çalışması sırasında sinüzoidal salınımın tepelerinin çarpma sonucu kesilmesi sonucunda ortaya çıkmasıyla kendini gösterir. Spektral görünümü

itibariyle en kolay teşhis edilen arıza tipidir; ama, arızanın hangi elemanlardaki boşluktan kaynaklandığını bulmak zordur ve genellikle muayene sonucu bulunur.

Yatak bağlantı civataları gevşemiş bir rulman yatağı en güzel örnektir. Yataktaki titreşimler, düzgün bir sinüzoidal yerine Şekil 3.10'da gösterildiği gibi dönüşlerdeki sinüzoidalın üst ve alt tepeleri tıraşlanmış olarak görülür [13].



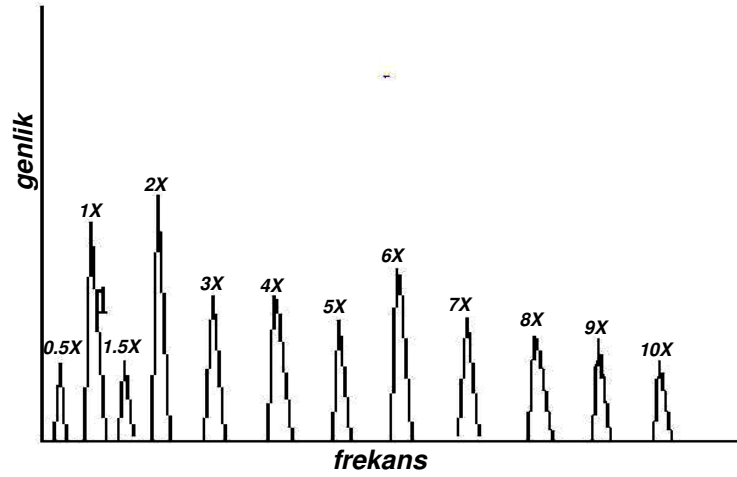
**Şekil 3.10.** Gevşeklikler sonucunda alınan sinüzoidal dalganın tepelerindeki belirgin işaret

Genellikle dönme devri 1X harmoniklerinde görülürler. Bağlantı yeri ile olan boşluk arttıkça dönme devrinin 1/2, 1/3 ve 1/4 katlarında, yani 1/2X, 1/3X ve 1/4X harmoniklerin de görülmeye başlanır.

Bir makinanın bağlantı ayakları, bir altlık ile monte edilmiş ise oluşan gevşekliklerde, analiz grafiğinde dönme devrinin 1X harmonikleri şeklinde görülür.

Dönme devrinin 1X harmoniğinin çevresinde 1/2X harmoniklerinin görülmesi ise, genellikle bağlantı elemanlarında veya yapıda boşluğun arttığının göstergesidir.

Eğer 1X harmoniğinin ardından dönme devrinin katları şeklinde diğer harmonikler görülüyorsa, mekanik gevşeklik ya da boşluk bulunduğu işaretler. Şekil 3.11'de genel olarak bağlantıda bir gevşeklik olduğunda oluşan grafik gösterilmektedir [28].



Şekil 3.11. Makinanın dönel elemanlarında boşluk bulunduğunda titreşim frekansı ve harmoniklerinin spektrum üzerinde gösterimi

### 3.6.2. Ayarsızlıklar

Ayarsızlık, birbirine bir ara parça (örneğin kaplin gibi) ile bağlanan millerin uzayda tek bir doğru eksen üzerinde olmama durumudur. Ayar kaçıklığı olarak da isimlendirilir.

Spektrum okumalarında ayarsızlıklar motor dönme devri 1X ve harmonikleri olan 2X ve 3X olarak görülür. Fakat orta frekanslarda ve ileri seviyelerde ayarsızlıklar var ise 2X ve 3X frekanslarında da görülürler. Ayarsızlık nedeni ile oluşan harmoniklerin büyüklükleri ve konumları sistemin çalışma sıcaklığı ile değişim gösterirler [29].

Dönel makinalarda, makinaların düzensiz dönmesi nedeni ile ayarsızlıklar oluşur. Bu ayarsızlıklar makina üzerine aşırı titreşim yüklerinin binmesine neden olur. Oluşan bu titreşimler, analiz grafiklerinde 1X ve 2X frekansında tepeler olarak ortaya çıkar [30].

Ayarsızlığa etki eden faktörler [31],

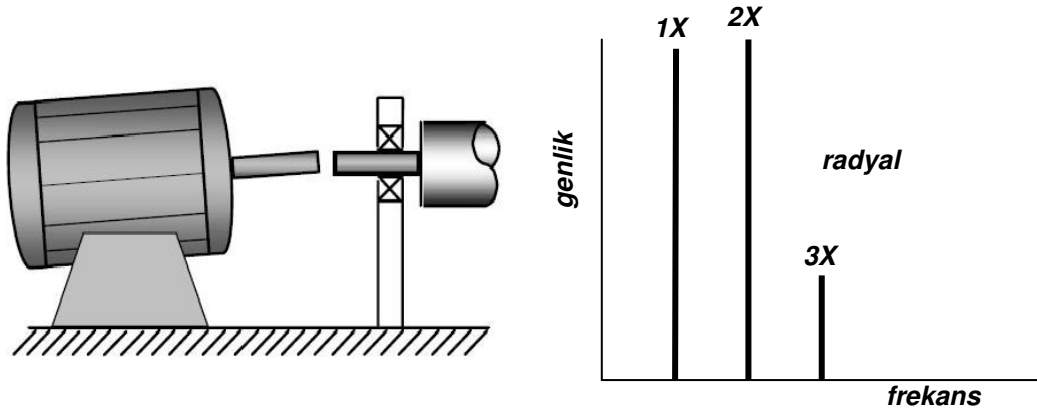
- Yataklardaki aşırı aksel ve radyal kuvvetler,
- İki farklı makinanın birleşme noktasında çakışma olmaması,
- Kaplindeki aşınmanın artması,
- Aksak ayak,
- Şimleme hatası,
- Şase çarpıklıkları,

- Dönüsel nedenlerle oluşabilecek mil hataları,
  - Makina gövdesi, yatakları ve rotorlarındaki titreşim seviyesinin artması,
  - Erken oluşan yatak, conta, mil ya da kaplin arızaları,
- şeklinde sıralanabilir.

Ayarsızlık iki sınıfa ayrılır. Bunlar, açısall ve paralel ayarsızlıklardır. Bir makinada çoğu zaman, her iki arıza da aynı anda ortaya çıkmaktadır.

### 3.6.2.1. Açısall ayarsızlık

Açısall ayarsızlıklar yüksek açılı titreşimlere neden olur. Tipik olarak, 1X ve 2X harmoniklerinde kendisini gösterir. Dönme devri 1X, 2X harmoniğine göre çok yüksek bir tepe oluşur. Bu tepe de ayarsızlığın en büyük işaretçisidir. Genellikle bu şekilde olan gösterimler kaplin ayarsızlığını işaret eder [32].



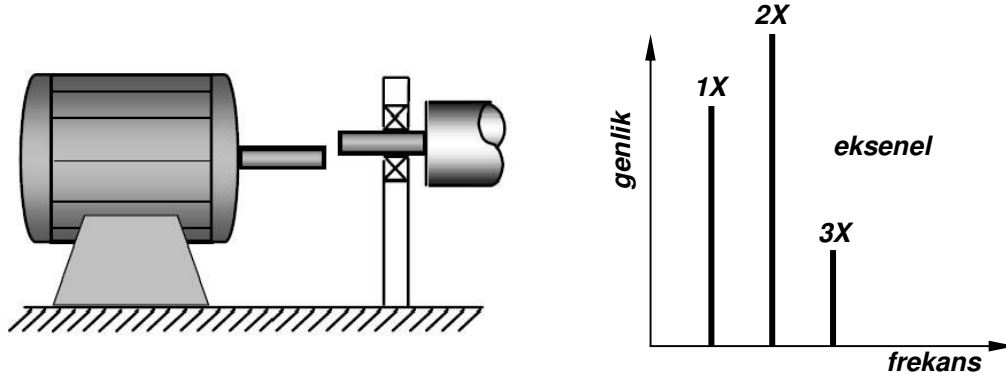
Şekil 3.12. Bir makina üzerinde açısall ayarsızlık ve bunun spektrum olarak gösterimi [20]

Şekil 3.12’de bir makinada oluşabilecek açısall ayarsızlık ve bunun spektrumdaki izlenimi verilmektedir.

### 3.6.2.2. Paralel ayarsızlık

Paralel ayarsızlık, açısall ayarsızlıkla benzer özellikler gösterir. Fakat açısall ayarsızlıklara karşın çok yüksek radyal titreşimler gösterir. 2X harmoniği genelde

1X harmoniğinden büyüktür. Fakat yüksekliği kaplin tipi ve yapısını tanımlayan 1X harmoniğine bağlıdır. Genellikle, kaplinin yapısı oluşan spektrumu etkiler [27]. Şekil 3.13'te bir makinada oluşabilecek paralel ayarsızlık ve bunun spektrumdaki izlenimi verilmektedir.



Şekil 3.13. Bir makina üzerinde paralel ayarsızlık ve bunun spektrum olarak gösterimi [20]

### 3.6.3. Rezonans

Rezonans, bir cismin doğal frekansında uyarılma durumudur. Her cismin kendisine ait bir doğal frekansı vardır. Hava aracı sistemlerinde gövde ve kanatlarda genellikle doğal frekans oldukça düşük frekanslardadır. Cisim dış veya iç etkilerle doğal frekansında uyarılırlarsa çok yüksek titreşim seviyelerinde titrer. Eğer sönümlenme düşük, uyarı uzun süreli olursa cisim tamamen tahrip olabilir [13].

Rezonans, doğal frekansa ve kuvvet frekanslarının çalışmasına bağlıdır. Bu nedenle, dönel makineler üzerinde rezonans testleri yapılmaktadır. Yapılan testin amacı, makine veya sistemin dinamik kararlılığı hakkında bilgi sahibi olmayı sağlamaktır. Bir makinenin doğal frekansını bilmek, makinenin genel yapısı ve önemli parçalarının arıza tespiti için önemlidir. Çünkü rezonans testi, makinenin doğal frekansının belirlenmesini sağlar [33].

Makinada rezonans nedeniyle oluşan titreşimi tespit etmek oldukça kolaydır. Çünkü çalışma hızı arttırıldığında ya da azaltıldığında, seviyelerde gözle görülür bir düşme veya yükselme olur. Spektrumlarda özellikle rezonans titreşimlerini belirlemek için kullanışlıdır. Çünkü, dönme hızına bağlı olan rezonans kendisini gösterir.

Örneğin, borularda çok karşılaşılan bir problem de rezonanstır. Çevreden boruya etkiyen uyarıların frekansı borunun doğal frekansına denk geldiğinde, ortaya çıkan titreşim çok yüksektir ve iki boru arasında ya da boru ile makina arasında erken bir arıza oluşumuna neden olur. En mantıksal yaklaşım üretim aşamasında iken boruların doğal frekanslarının tespit edilip, gerekirse değiştirilmesidir [32].

Hava araçlarında rezonans önemlidir. Helikopterde yer rezonansı vardır. Helikopterlerde bu yer rezonansları önemli bir etkidir ve herhangi bir problem gözlenildiğinde yer rezonansları ile ilgili analiz ve testlerin yapılması gerekmektedir. Problemler noktalar belirlenip, hatalar uygun bakım ve tasarım değişiklikleri ile düzeltilir [34]. Yer rezonansları ile ilgili bilgi ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak verilecektir.

#### **3.6.4. Balans bozukluğu**

Balans bozukluğu, belirli bir eksen etrafında dönen bir cisimde, cismin ağırlık merkezinin dönme eksenine ile çakışmaması durumudur [13].

Rotor balans bozukluğu, tüm makinalarda bir derecede mutlaka vardır ve kendisini her zaman dönme devri olan  $1X$ 'de gösterir. Balans bozukluğu genellikle kendisini aşırı bir titreşim şeklinde gösterir. Bu titreşimler birçok arızaya da neden olmaktadır.

Balans bozukluğu nedeni ile oluşan titreşimin ana karakteristikleri [32],

- Motor dönme devri  $1X$ 'te tepe olarak kendisini göstermesi,
- Hız ile beraber genliğinin artması,

şeklinde sıralanabilir.

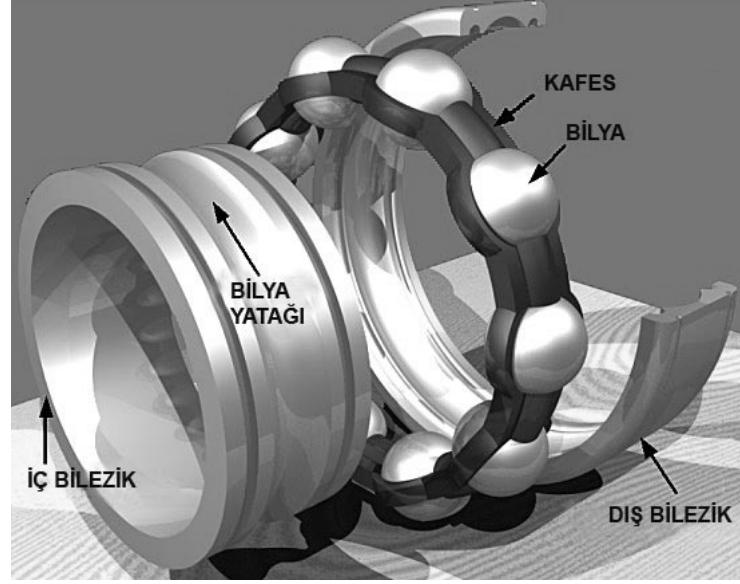
Balans bozuklukları kaplin, rotor eksenlerinden kaçıklık ve mil eğilmeleri sonucunda da görülmektedir.

#### **3.6.5. Rulman arızası**

Rulmanlar, hava araçlarında genelde tekerleklerin iniş takımlarına bağlandığı yerlerde ve dönen millerin yatakları yerlerde kullanılır.



Bir rulman yapısı Şekil 3.14'te görüldüğü gibi dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilyalardan oluşur. Bu parçaların biri veya hepsine bağlı olarak arızalar oluşabilir.



**Şekil 3.14.** Bir rulmanın içyapısı. Bilya yatağı, iç bilezik, dış bilezik ve kafesler içerisinde duran bilyalardan oluşur [36]

Rulmanlı yatakların durum izleme çalışmalarında en sık kullanılan yöntem titreşim analizidir. Titreşim analizi ile rulmanlı yatak gövdesinden alınan titreşim sinyalleri, zaman veya frekans düzleminde analiz edilerek sağlıklı bir rulmanın sahip olduğu bilgilerden sapma derecesine göre, rulman arızalı veya arızasız olarak nitelendirilmektedir. Uygulamada tercih edilen, muhtemel arızaların henüz başlangıç aşamasında tespit edilmesidir. Bu amaçla, son zamanlarda gelişmiş birleşik zaman frekans analizleri kullanılmakta olup yeni yöntemler de geliştirilmektedir [35].

Rulman arızaları, rulman elemanlarında değişik şekillerde ortaya çıkar. Rulman arızalarının ortaya çıkma nedenleri;

- Kaplin ayarsızlığı,
- Balans bozukluğu,
- Yağ veya greste kirlilik,
- Hatalı montaj,
- Hatalı imalat,

- Aşırı yük,
- Aşırı sıcaklık,
- Korozyon,

şeklinde sıralanabilir.

Rulman arızalanmaya başlayınca, değişik frekans gruplarında titreşim yayar. Bu frekanslar, ultrasonik, dönmeye bağlı, doğal ve toplama-çıkarma şeklinde dört ayrı şekilde oluşur [13].

Rulmanlar arızalanmaya başlamadan önce, yuvarlanma yollarında mikro seviyelerde kristal düzeyde kopmalar olur. Bu kopmaların enerji seviyelerindeki değişimlerinden dolayı çevresine titreşim yayarlar. Bu titreşim seviyeleri ultrasonik frekanslardır.

Dönmeye bağlı frekanslar, rulman üretiminde üretici firma tarafından üretim aşamasında deneylerle belirlenen değerlerdir.

Doğal frekanslar, rulman elemanlarının kendi doğal frekanslarında uyarılması sonucu ortaya çıkar. Bir titreşim spektrumunda doğal frekansların hangi aralıkta ortaya çıkacağı, özel bir çalışma yapılmadıkça belirlenemez.

Toplama-çıkarma frekansları modülasyon sonucu ortaya çıkarlar. Spektrumlarda kendini yan bant olarak gösterirler.

Rulmanda oluşan arızaların gelişimi zaman içinde dört safha halinde incelenir [17].

Birinci safhada ses duyulmaz, sıcaklık normaldir, sadece ultrasonik enerji vardır. Mikro düzeylerde olan titreşim ölçülemeyecek seviyelerdedir. Bakım açısından bu safhanın önemi yoktur.

İkinci safhada, hafif ses duyulmaya başlanır. Ultrasonik enerji artmaya başladığından titreşim eşiği yükselmiştir, dolayısıyla da logaritmik grafiklerde görülmeye başlanır.

Üçüncü safhada, rulman sesi duyulmaya başlanır. Buna paralel olarak sıcaklık artmaya başlar. Oluşan titreşimler, arıza frekanslarında, harmoniklerinde ve yan bantlarda görülmeye başlanır.

Dördüncü safhada, ses seviyesi tiz olmaya başlar ve sıcaklık yükselir. Gürültü seviyesi oldukça artar, ultrasonik enerji azalmaya başlar. Titreşim yüksek frekanslarda görülmeye başlanır. Bu safhada rulman dağılmaya başlar.

### **3.6.6. Dişli arızaları**

Dişliler, makina sistemlerindeki sistemler arasında hareketi ve gücü iletmeye yarayan elemanlardır. Bir makinanın düzgün bir şekilde çalışması için sistemler arasındaki iletimin yani dişli sistemlerinin düzgün çalışması gerekmektedir. Günümüzde yapılan çalışmalar oluşan dişli hatalarının frekans analiz yöntemi ile belirlenip, erken tanı sağlanması üzerinedir [37].

Dişli problemleri, titreşim spektrumlarında tanımlamak kolaydır. Ancak, yorum yapabilmek zordur. Bu zorluk iki faktöre bağlıdır. Bu faktörler, probleme en yakın noktaya sensör yerleştirme zorluğu ve titreşim kaynaklarının fazla olmasıdır [32].

Dişli uyarı frekansları, dişli çalışma frekansı, doğal frekanslar ve yan bantlar olmak üzere üç sınıfa ayrılır.

Dişli çalışma frekansı, dişlinin diş sayısı ve dönüşüne bağlı olarak ürettiği frekans türüdür. Tek başına bir arıza habercisi olmayıp, başka habercilerinin de olması aranır. Örneğin, dişlinin üretiminde deneylerle belirlenmiş olan doğal frekansı gerekebilir. Doğal frekans, dişli çalışma frekansı sabit olduğu sürece arıza teşhisi için uygundur. Doğal frekanslar ile dişli aşınması, artan diş boşluğu ve kırık diş tespit edilir. Yan bantlar görüldüğü zaman diş kırığı veya çatlağı ya da ayarsızlık olduğu belirlenir.

Dişli arızalarında zaman eğrilerinin incelenmesi daha uygundur. Çünkü arızalı dişin çarpması zaman grafiğinde çok daha net görülür. Bu durumda kırık ancak zaman eğrisinde görülür [17].

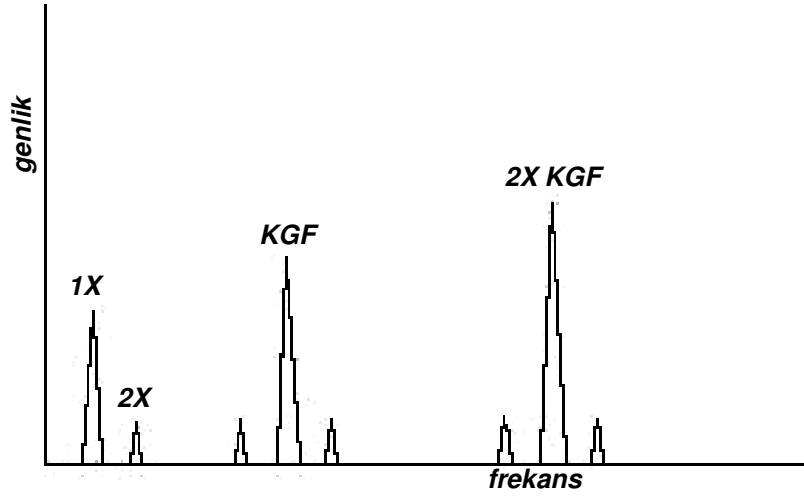
### **3.6.7. Hidrolik ve aerodinamik kuvvetler**

#### **3.6.7.1. Pal veya kanat geçişi**

Genel olarak kanatlar, türbin, kompresör ya da fanların elemanlarıdır. Sistem üzerindeki kanat sayısı oldukça önemlidir.

Kanat geçiş frekansı, devir ile pal sayısının çarpımına eşittir. Kanat geçiş frekansı pompa, fan ya da kompresörlerin doğasında vardır ve normalde bir

problem oluşturmazlar. Ancak, dönen kanatlar ile zarf arasındaki boşluk tüm yol boyunca eşit olmazsa, pompada geniş genlikli kanat geçiş frekansı ve harmonikleri oluşur. Aynı zamanda bazı durumlarda kanat geçiş frekansı ya da harmonikleri yüksek titreşimler nedeniyle sistem doğal frekansı ile çakışık olur [28].

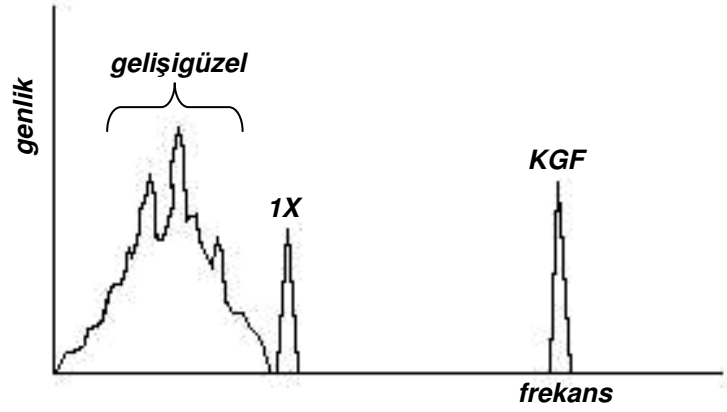


**Şekil 3.15.** Bir makinanın pallerinin hareketi sırasında kanat geçiş frekansı spektrumu. KGF; Kanat Geçiş Frekansı [28]

Bu tip arızalara, genellikle kanat geçiş frekansı görüldüğünde değil harmonikleri görülmeye başlandığı zaman rastlanır. Şekil 3.15'te kanat geçiş frekansı ve harmonikleri gösterilmektedir.

### 3.6.7.2. Akış türbülansı

Fan ya da bağlantı hatlarına doğru giden havanın hızı ya da basıncındaki değişim nedeni ile akış türbülansı genellikle köruklerde oluşur. Bu akış bozukluğu gelişigüzel düşük frekanslı titreşimleri oluşturan türbülansa neden olur. Frekans aralığı genellikle 20 – 2,000 CPM arasındadır.



**Şekil 3.16.** Sistemde akışın türbülanslı oluşundan kaynaklanan gelişigüzel tepelerin spektrumunda gösterimi. KGF; Kanat Geçiş Frekansı [28]

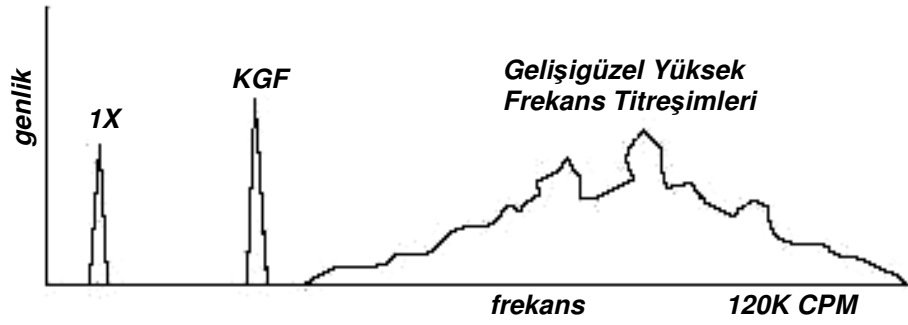
Şekil 3.16'da çalışma devri 1X'ten küçük frekanslarda gelişigüzel şekilde oluşan tepeler görülmektedir.

### 3.6.7.3. Kavitasyon

Kavitasyon, bir sıvının azalan basınç nedeniyle çok daha düşük sıcaklıklarda gaz haline dönüşmesi ve oluşan gazın basınç etkisiyle içe çökmesidir.

Kavitasyonun olduğu yerlerde normalde, yetersiz emiş basıncı ölçülür. Kavitasyon pompanın içyapısına tamamıyla zarar verir. Bu durumda bölgesel olarak kanatlar aşınabilir.

Kavitasyon, spektrum üzerinde geniş bantta bakıldığında kanat geçiş frekansı harmoniklerinin üzerine binen gelişigüzel, yüksek frekanslar olarak görülür. Şekil 3.17'de kanat geçiş frekansının üzerine binmiş şekilde, geniş bantta kendini gösteren kavitasyon arızası görülmektedir [27].

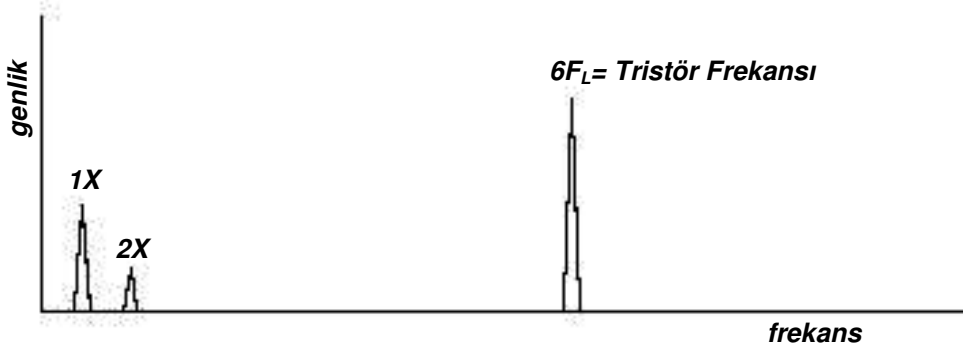


Şekil 3.17. Kaviteasyonun spektrum üzerinde gösterilmesi [28]

Bu olay, pompalarda ve gemi pervanelerinde sıkça rastlanır. Kabarcık çökmesinin ortaya çıkarttığı patlama enerjisi pervane yüzeyinde ciddi tahribatlara neden olur [13].

### 3.6.8. Elektrik problemleri

#### 3.6.8.1. DC motor problemleri



Şekil 3.18. DC motor probleminin spektrum üzerinde gösterilmesi. FL: Şebeke frekansı [28]

DC motorlarında aşırı titreşimin nedenleri, şekli bozulmuş ya da asitten karıncalanmış komütatör segmanları ile uygunsuz fırça bağlantılarıdır. Bu arıza nedenleri ile oluşan frekans, RPM'in katı olan komütatör segmentlerinin sayısındaki segment geçiş frekansında olabilir [26].

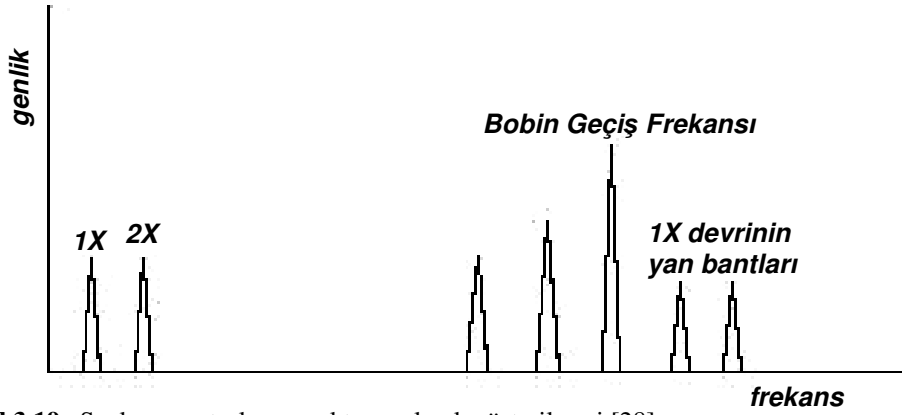
DC motor problemlerini spektrumlarında, normal genliklerinden daha büyük olan tristör frekansı ( $6F_L$ ) gösterir. Bu problemler, sistemde kısa devre, elektrik bağlantısında kayıp ya da bozuk yanma frekansı nedenlerinden kaynaklanırlar. Şekil 3.18'de oluşan tristör frekansı spektrum üzerinde gösterilmektedir.

Bu frekanslara ek olarak gevşemiş sigorta ve kısa devre kontrol kartları 1X ile 5X arasında yüksek frekans tepelerinin oluşmasına neden olur [28].

### 3.6.8.2. AC motor problemleri

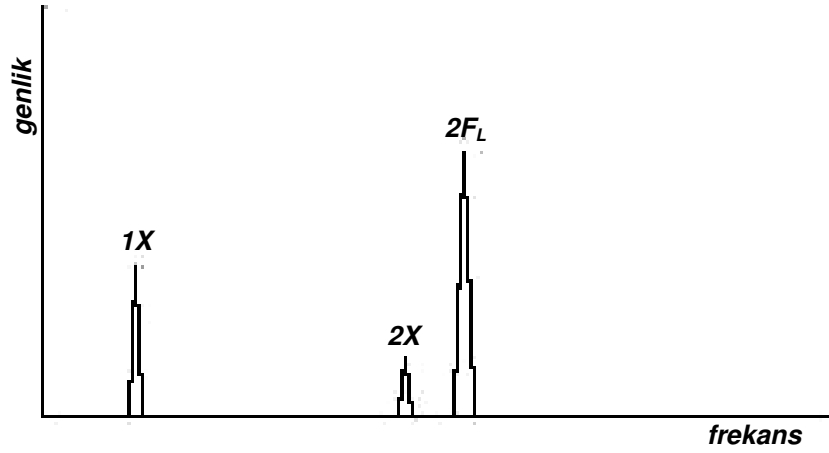
İki tip AC elektrik motoru vardır. Bunlar, tek faz ve üç faz ile çalışan senkron motorlar ve endüksiyon motorlarıdır. Senkron motorlar endüksiyon motorlarına göre daha az yaygındırlar.

Senkron motorlarındaki bobinin gevşemesi, bobin geçiş frekansında oldukça yüksek titreşimlerin oluşmasına neden olur. Bobin geçiş frekansının etrafı, 1X'in yan bantları tarafından çevrilir. Şekil 3.19'da bir senkron motorunda oluşan hata spektrum grafiğinde gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Senkron motorların spektrum olarak gösterilmesi [28]

Endüksiyon motorları manyetik tepki ile çalıştığı için itme endüksiyonlu motor olarak tanımlanabilir. Endüksiyon motorları rotor ve statorun etkileşimi ile elektrik üretirler. Stator problemleri, Şekil 3.20'de görüldüğü gibi 2X frekansından yüksek  $2F_L$  frekansları üretir.

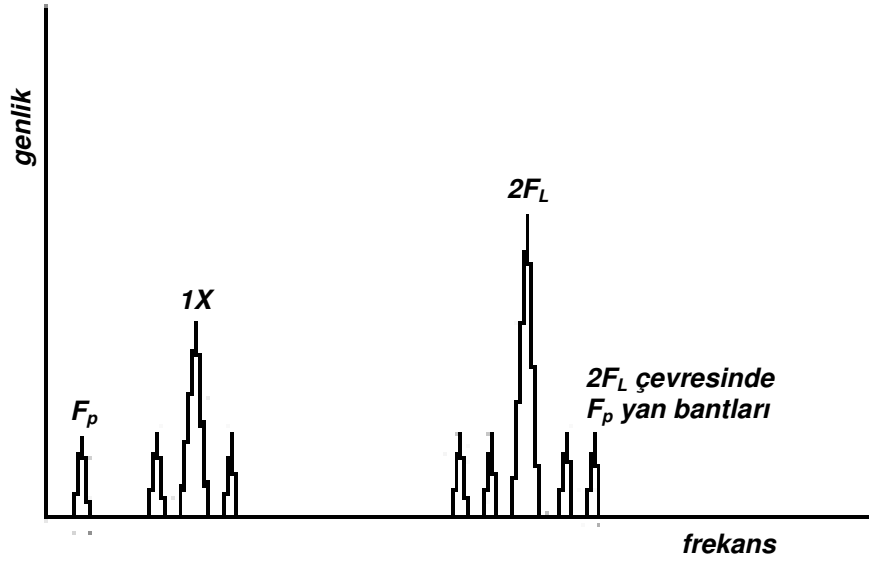


**Şekil 3.20.** Statorda oluşan bir problemin spektrum üzerinde görülmesi. FL: Şebeke frekansı (50 Hz) [28]

Stator eksantriği çok yönlü titreşim oluşturan rotor ile stator arasında hava boşluğu üretir. Hava boşluklarının arasındaki fark endüksiyon motorları için % 5, senkron motorları için % 10'u aşmamalıdır. Bu hava boşlukları şebeke frekansının 2X harmoniğinin çevresinde kutup frekans yan bantları ( $F_p$ ) oluşturur. Genellikle kutup frekansı 20 – 120 CPM (0.30 ila 2 Hz) arasındadır ve şebeke frekansının çevresinde bu frekans büyüklükleri kadar sıkırlar. Bu durumda spektrum büyütülerek daha yakından incelenmesi gerekmektedir. Şekil 3.21'de şebeke frekansının çevresinde oluşmuş kutup frekansı tepeleri görülmektedir [27].

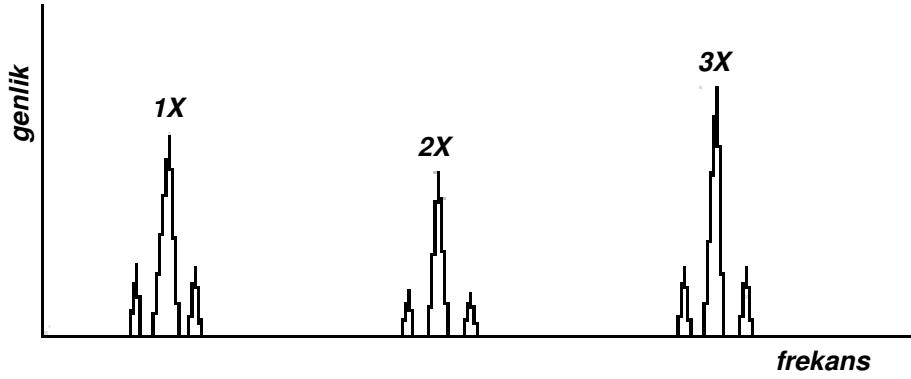
Büyük elektrik motorlarında önemli arızalardan biriside, ilk çalıştırma sırasındaki aşırı yük altında rotor kollarının ısınması ve kırılması sonucu yapıda çatlakların oluşmasıdır. İlk çalıştırma, rotor kolları üzerine en çok yükün bindiği andır. Çünkü istenilen hıza gelmek için yüksek bir akım gerekmektedir. Yüksek akım aşırı ısınmaya ve rotor kollarına aşırı yükün binmesine neden olur. Bu olay rotor kollarının bağlandığı yerlerden çatlmasına neden olur. Kısa sürede bu çatlaklar ilerler ve kırılma noktasına gelir [26].





**Şekil 3.21.** Rotorlarda eksen kaçıklığı olduğunda oluşan grafiklerin spektrum üzerinde gösterimi. FL; Şebeke frekansı, F<sub>p</sub>; Kutup frekansı [28]

Bu ölçüm sonucunda oluşan problem kendisini 1X ve harmoniklerinin çevresinde kutup frekans yan bantları olarak gösterir. Şekil 3.22’de rotorda oluşan kırık ve çatlakların spektrumları detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



**Şekil 3.22.** Rotorda oluşan kırık ve çatlakların spektrumlarında görülmesi. Burada F<sub>p</sub> kutup frekansı 1X, 2X ve 3X dönme devirlerinde yan bant olarak ortaya çıkmıştır [27]

## **4. HAVA ARAÇLARINDA MEYDANA GELEN TİTREŞİMLERİN İNCELENMESİ**

Hava araçlarında kullanılan en önemli bakım yönetim uygulaması programlı bakımlardır. Programlı bakımların içerisinde yer alan kestirimci bakım uygulamaları günümüzde bakım planlaması için önemli bir yer tutmaktadır.

Kestirimci bakım yöntemleri ile arıza oluşmadan sistem içerisinde oluşan problemler belirlenir ve bu yönde önleyici tedbirler alınır. Teknolojinin gelişmesiyle çeşitli kestirimci bakım tekniklerinin, hava aracı bakımlarındaki kullanımı giderek artmaktadır. En çok kullanılan kestirimci bakım uygulamaları yağ analizi ve hasarsız kontrol yöntemleridir.

Hava araçlarında, yapının geneline bakıldığında rijitlik söz konusu değildir. Sistemler arasındaki etkileşim sonucunda çok yüksek seviyelerde salınımlar oluşabilmektedir. Genel olarak bakıldığında, hava aracının gerçekleştireceği uçuş profilinde yapı üzerine birçok yük biner. Bu yüklerden kaynaklanan titreşimler kaçınılmazdır. Bu nedenle bir hava aracı imalat aşamasında iken, parça ve sistem bazında yapı üzerine gelecek olan kuvvetler hesaplanıp, bu doğrultuda parça seçimi yapılır.

Bu bölümde hava araçlarında oluşan titreşimler uçaklarda ve helikopterlerde olan uygulamaları olmak üzere iki sınıfta incelenecektir. İlk olarak uçak üzerinde oluşan titreşimlerin ve bunların etkilerine değinildikten sonra, dönel bir makina olan uçak motorları üzerindeki titreşim incelenecektir. Daha sonra helikopterler üzerinde oluşan titreşimlerden bahsedilecektir.

### **4.1. Uçaklar**

İmalat aşamasından sonra uçakların durumlarını izlemek için basit olarak titreşim analizi yapılmaktadır. Uçaklar üzerinde genelde motorlarda bulunan titreşim sensörleri ile motor içerisinde oluşabilecek düzensizlikler belirlenir. Böylece motor üzerinde oluşan problem uçağa zarar vermeden müdahalesinin yapılması sağlanmış olur. Günümüzdeki çalışmalar, aktif olarak uçak yapısının

genelinin model olarak oluşturulup uçuş esnasında titreşim analizinin yapılması yönündedir.

Uçaklarda kanat, gövde ve kuyruk grubu değişik modlarda (esneme ve burulma gibi) tehlikeli titreşimler oluşabilir. Bu titreşimler yapı üzerindeki en büyük etkenlerdendir. Bu nedenle her bir sistem ayrı ayrı tasarım aşamasından geçer. Sonra uçak bir bütün halinde iken yapılan testlerle üzerine binen kuvvetlere karşı dayanımı incelenir.

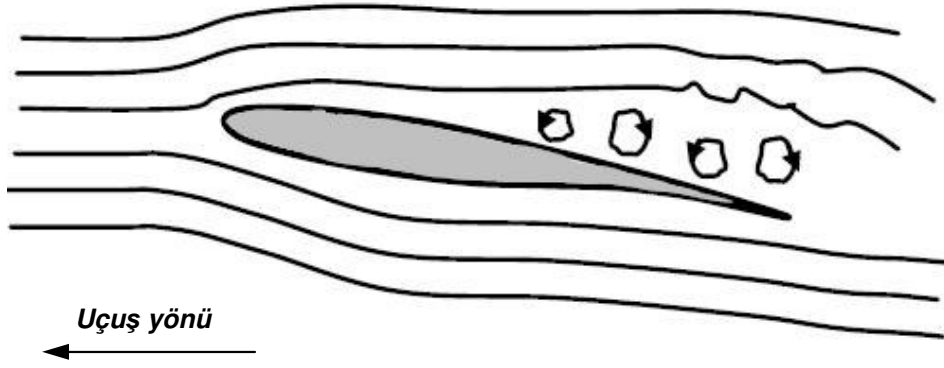
Uçakların üzerine etki eden kuvvetler, gelişigüzel titreşimlerin oluşmasına neden olur. Yapılan yer ve uçuş testlerinde uçağın aerodinamik yapısının gelişigüzel titreşimlerin oluşmasına neden olduğu görülmüş. Bu gelişigüzel titreşimler her uçuş şartı ve durumuna göre değişiklik gösterir [38,39].

Örneğin, gelişigüzel titreşimlere neden olan dış etkenlerden birisi pistin yapısıdır. Pistin yapısına bağlı olarak yerdeki hareketi sırasında oluşan titreşimler, uçakların ömrünü etkileyen en belirgin özelliştir. Bu etkiler, pistin yapısına ve uçağın hızına bağlı olarak değişiklik gösterir [40].

Tüm bu etkilerin incelenmesi ilk olarak profiller üzerinde, daha sonra kanat, kuyruk ve iniş takımı üzerinde gerçekleşir.

Uçaklardaki en kritik yapısal elemanlardan birisi kanatlardır. Kanatların fiziksel durumları uçuş sırasında uçağın güvenilirliğinin belirlenmesi için etkindir. Uçuş süresince uçakta oluşan dinamik yükler, bir çatlağa ve bunun sonucunda da kırığa neden olabilir [41].

Kanat profili aerodinamik formda imal edilir. Form olarak mükemmel olsa bile, hava akışının etkisinden dolayı kanat üzerine birçok yük biner. Şekil 4.1'de uçak profilinden geçen havanın oluşturduğu kuvvet etkisi genel olarak gösterilmektedir. Bu etki ile kanat üzerinde belli bölgelerde türbülans basıncı gelişigüzel olarak oluşur. Normal şartlarda kanat basit bir yapıya sahip olduğu için ölçümlerde sinüzoidal bir dalga ortaya çıkması gerekirken kanat üzerinde oluşan bu kuvvetler nedeniyle gelişigüzel dalgalar görülür [42].



**Şekil 4.1.** Basit bir profil üzerinde oluşan hava akışının yarattığı kuvvet etkisi [42]

Uçakların düz formunu bozan ve aşırı titreşimlere neden olan diğer sistem ise iniş takımlarıdır.

İniş takımları, iniş ve kalkış sırasında hava aracı üzerine binen yükleri karşılamasına karşın, ağırlığı nedeni ile taşımaya, yapısal bozukluğu nedeniyle de aerodinamik yapıya etki ederler [43].

Uçuş sırasında yapısal bozuklukları önlenmek için iniş takımları içeri alınacak şekilde tasarlanabilir. Fakat iniş ve kalkış esnasında, iniş takımlarının açık olması nedeniyle, üzerine binen yüklerin aşırı titreşim oluşturması kaçınılmazdır.

İniş takımlarının kanat ya da gövdeye bağlı olması, oluşan bu titreşimlerin direkt olarak uçağın tüm yapısıyla beraber sönmülmeye çalışmasına neden olur. Bunların devamında ise ilk olarak mürettebat veya yolcunun konforu bozulur. Daha sonra da yapı üzerinde düzensizlikler başlar ve kırılmalarla son bulabilir.

Uçakların pistte koşturması esnasında ne kadarlık bir kuvvete maruz kaldığı önemlidir. Bu kuvvetler ya test uçuşları ya da deneysel olarak bulunur. Farklı pist profilleri ve farklı uçaklar için iniş takımlarına etki eden kuvvetler deneysel olarak ölçülmesi, her bir değişik durum için meydana gelebilecek titreşim karakteristikleri belirlenmesinde önemlidir [44,45].

Uçaklarda bir dönel makina olan güç sistemdeki titreşimin incelemesi önemlidir. Bundan sonraki bölümde güç sistemlerinde oluşan titreşimler incelenecektir.

#### 4.1.1. Güç sistemleri

Güç sistemleri, uçağın ivmelendirilmesini ve öngörülen hızlarda uçuşmasını sağlayan sistemlerdir.

Uçaklarda bulunan motorlar üzerinde dönel parçalarının olması, sürekli bir hareket nedeni ile sistem içerisinde bir problemin olmasına neden olur. Oluşan bu problemler kendisini titreşim olarak gösterir. Uçaklar üzerinde dış ve iç etkiler nedeni ile bir çok titreşim vardır. Esas olan normal titreşim frekansları arasından arıza frekanslarının tespiti.

En genel halde uçaklar üzerinde bulunan güç sistemleri pistonlu motor ve gaz türbinli motorlar olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

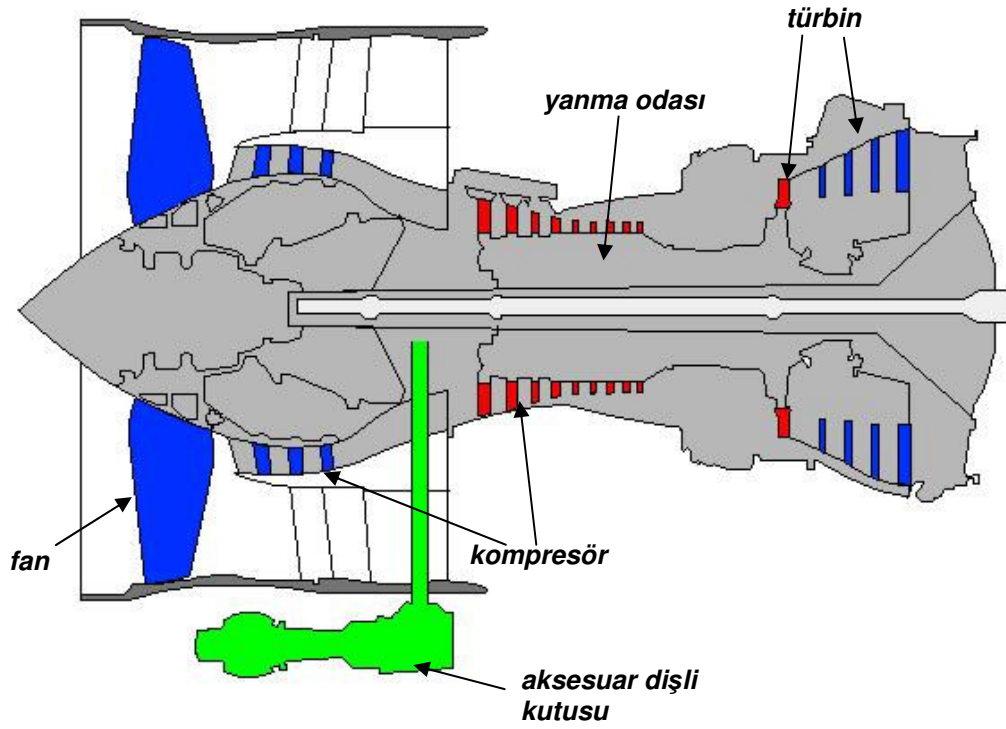
Pistonlu motorlu uçaklarda, basit bir benzinli motorda pistonların ileri geri hareketi sonucunda dönen krank miline bağlı olan pervanenin dönmesi ile bir itki sağlanmış olur.

Gaz türbinli motorlara göre pervane tahrikli pistonlu motorlar, titreşim oluşumu konusunda birçok dezavantajı vardır. Dezavantajlarından birisi, pervanedeki balanssızlık nedeni ile uçak yapısı çok yüksek seviyelerde titreşimlere maruz kalır. Diğer dezavantaj ise, pistonların ileri geri hareketi esnasında oluşturdukları aşırı titreşimler nedeni ile yapı üzerinde titreşim analizi ile arıza tespitinin zor olmasıdır.

Pistonlu motorlarda içten yanmanın yarattığı titreşimler, oluşabilecek arızalardan gelen titreşimleri bastıracağı için normal titreşim ölçüm yöntemlerinin kullanımı ile arıza tespiti zordur.

Pistonlu motorlarda, frekans spektrumu yerine zaman düzlemi incelenir. Bu incelemede grafik ekranında x-eksenine krank açısı seçilir. Bu seçimde olaylar incelendiğinde subapların zamanında ve tek darbeli olarak açılıp kapandığı, ateşlemenin zamanında gerçekleşip gerçekleşmediği gibi motorun çalışması ile ilgili hususlar kontrol edilebilir. Zaman düzleminde okunan bir değişiklikte sistem içerisinde arıza olduğu belirlenir [13].

Yapısal olarak pistonlu motorların aksine gaz türbinli motorlar ayrı birer sistem olarak incelenebilir. Gaz türbinleri, temelde Şekil 4.2’de görüldüğü gibi fan, kompresör, türbin, yanma odası ve aksesuar dişli kutusundan oluşur.



**Şekil 4.2.** Genel hali ile turbofan motor yapısı. Mavi renkle olan kısım hareketini N1 milinden alırken kırmızı renkte olan kısım hareketini N2 milinden alır. Aksesuar dişli kutusu dönü hareketini N2 mili üzerinden alır [46]

Gaz türbinli motorlarda titreşim incelenmesine geçmeden önce çalışma prensibi anlatılmalıdır. Bir gaz türbinli motorda hava ilk olarak eğer var ise fan bölümünden içeriye alınır. Fan, hava ile ilk temas yeri olduğu için yüksek titreşim seviyesi ve gürültünün olduğu bölümdür. Bu bölümden geçen hava kompresöre gelir. Burada havanın hızı azaltılıp basıncı yükseltildikten sonra yanma odasına gönderilir. Yanma odasında yakıt hava ile karışarak yanar. Yanma sonucunda yüksek basınç oluşur ve basıncı yükselmiş olan yanmış gazlar türbinin içerisinden geçerken türbini yüksek hızlarda döndürmeye çalışır. Son olarak da yanmış gazlar yüksek hızlarda motordan dışarıya atılırlar.

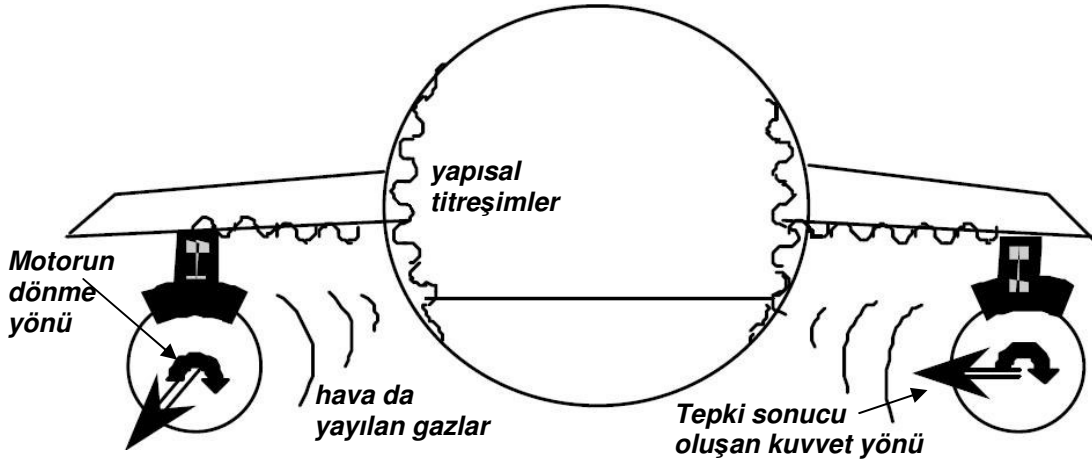
Yapısal olarak gaz türbin motorları birbiri içerisinden geçen iki ana milden oluşur. Bunlar; düşük hızlı olan N1 mili ve yüksek hızlı olan N2 milidir. Birbiri ile sadece sistem içerisinden geçen havanın etkisi ile bağlıdır.

N1 mili fan, LPC (Düşük Basınç Kompresörü) ve LPT (Düşük Basınç Türbini)'ye hareket verir. N2 mili ise HPC (Yüksek Basınç Kompresörü), HPT (Yüksek Basınç Türbini) ve aksesuar dişli kutusuna hareket verir. Aksesuar dişli

kutusu; yağ, yakıt ve hidrolik pompaları ve diğer gerekli olan sistemlere hareketlere sağlar.

Güç sistemlerinin gövde yapısı üzerine bağlanması önemlidir. Tüm motor bağlantıları sadece oluşan itki ya da tepkiyi taşımamalı, bunun yanında motor ya da pervane tarafından yapılan titreşimleri de sönmlemelidir [47].

Uçaklarda yapı üzerine monte edilmiş güç sistemleri, dönmeleri sırasında oluşan balans bozukluğu nedeni ile yapıyı sarsan bir kuvvet oluştururlar. Şekil 4.3 de gösterildiği gibi çift motorlu bir uçakta motorların dönüşündeki balans bozukluğu nedeni ile yapı üzerinde yapısal titreşimler oluşur. Oluşan bu titreşimler yapının mukavemet limitlerini zorlar. Eğer titreşim seviyeleri yapının doğal frekanslarına yaklaşırsa yapıda parçalanma söz konusu olur. Ayrıca, yapı üzerinde oluşan yapısal titreşimler kabin içerisinde gürültüye neden olur. Motor ile gövdenin birleşme noktasında titreşimlerin kabin içerisine girebileceği birçok yol vardır. Bu yollar uygun titreşim izolasyonlarıyla kontrol altına alınmalıdır [48].



Şekil 4.3. Kanata yerleştirilmiş motorlardaki dönme balans bozukluğu nedeni ile oluşan yapısal titreşimin yayılımı [48]

Genel olarak bir gaz türbin motorunun dönel aksamalarının ayrı ayrı titreşim özelliklerinin incelenmesinde yarar vardır.

#### 4.1.1.1. Fan

Turbofan motorlu uçaklarda fan bölümü motorun ön kısmında bulunur. Sistem içerisine girecek olan havanın düzenli bir şekilde dağılım göstermesine yardımcı olur. Turbofan motorlarda itki kuvvetini oluşturmak üzere motor tarafından ivmelendirilen hava fandan geçer. Fan tarafından sıkıştırılan havanın büyük bir bölümü, yanma odası ve türbin kısmından bağımsız olan fan çıkış kanallarından geçerek, itki kuvvetini oluşturur [49].

Fan, dönme hareketini motorun N1 milinden alır. Düşük basınç türbininin mili döndürmesi ile fan hareketini sağlar.

Gaz türbinli motor üzerinde oluşabilecek titreşim problemleri genellikle fan sistemi üzerinde gerçekleşir. Fan sistemi üzerinde oluşabilecek arızalar [50];

- Fan balans bozukluğu,
- Fan kanatçıklarında aşırı sürtünmeler oluşması,
- Fan rotorunda su birikmesi,
- Kanatçık arızaları,
- Fan ile rotor sistemi arasında aşırı boşluk,

şeklinde sıralanabilir.

Uçuş sırasında hissedilen bazı motor arıza titreşimlerinin, gösterge aletleri tarafından okunması zordur. Fakat, bunlar motor çalışırken ya da durduruluncaya kadar hissedilebilir. Bu büyük genlikli titreşimlere fan balanssızlığı neden olabilir. Burada oluşan frekanslar gövdenin doğal frekansına yakın frekanslardır [50].

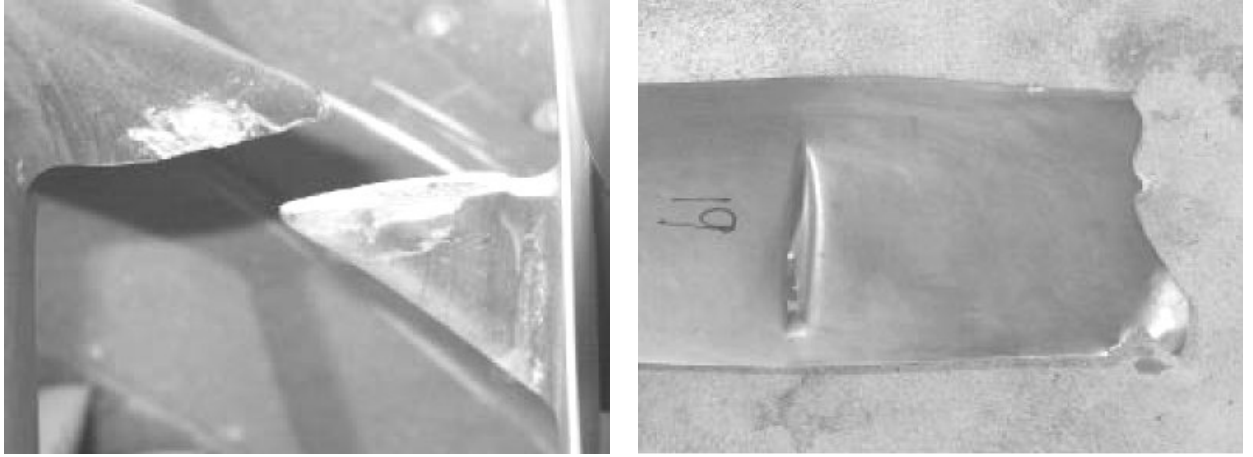
Dizayn aşamasında iken gaz türbinlerinin aerodinamik kararlılığı üretilen kanatçıklara ve fan sistemine yansıtılır. Sistem üzerinde oluşabilecek hava girişi yüklerinin nasıl azaltılabileceği belirlenir. Bu noktada oluşabilecek perdövites (stall) ve düzensizliklerin önlenmesi için açısı değişebilen giriş kanatçıklarının kullanımı tercih edilir. Uçuş hızına uygun olarak bu tip kanatçıkların açıları değiştirilir. Bu önlemin yanında çift kıvrımlı kanatçıkların kullanımı ile oluşabilecek perdövites ve dolayısıyla titreşimler önlenir [51].

Motorlarda titreşim ölçümü için kullanılan sensörler N1 milinden en iyi titreşim değerlerinin alınabileceği kompresöre yerleştirilir. Burada ölçülen



değerlerdeki faz ve deplasman verilerinden yararlanılarak fan balansı incelenir [52,53].

Örneğin fan kanatçıklarından birisinin kırılması sırasında titreşim değişiminin ölçüldüğü bir örnek vardır. Bu olay 2001 yılında Avustralya’da Boeing 767–238 tipinde bir uçakta gerçekleşmiştir. Kaza sonucunda, fan kanatçıkları, üzerinde oluşan aşırı yorgunluk nedeni ile parçalanmış. Kırılma sırasında oluşan dengesizlik kompresörün üzerinde bulunan sensörler tarafından ölçülmüş. Gösterge panelindeki titreşim seviyesinde aşırı bir yükselme görülmüş ve kırılma işlemi gerçekleşmiş. Şekil 4.4. a ve b’de kırılan kanatçık ve kırıldığı bölgede yarattığı hasar görülmektedir [54].



**Şekil 4.4.** Kırılan fan kanatçıklarının. a) Fan gövdesinde pal tarafından hasara uğratılan kısım. b) Hasarlanan parçanın karşı tarafı [54]

#### 4.1.1.2. Kompresör

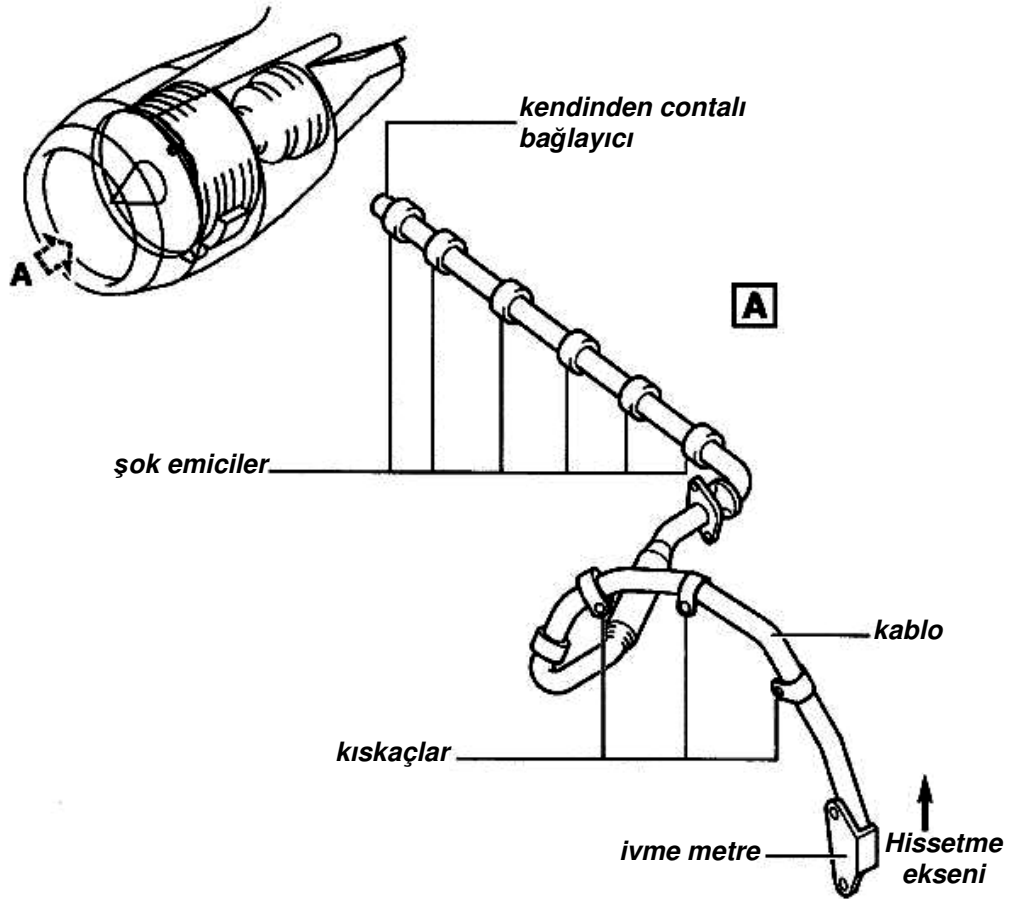
Turbojet motorlarında kullanılan kompresörlerin amacı yanma odasına büyük miktarda sıkıştırılmış havanın temin edilmesidir. Uçaklarda kullanılan iki farklı kompresör tipi vardır. Bunlar, aksenal akışlı kompresörler ve merkezkaç akışlı kompresörlerdir [55].

Merkezkaç akışlı kompresörlerde hava kanatçıklara gelir. Kanatçıklar dönerken, hava bu nedenle ivmelenir ve kompresör çıkışına doğru sıkıştırılır. Hava boşalan yerlere doğru kendisini atmaya devam ettikçe basınç artar [56].

Eksenel akışlı kompresörler, kademe adı verilen, birbirine karşı konumlu, hareketli ve sabit kanatçık dizilerinden oluşur. Hareketli kanatçıklar havanın hızını arttırırken, sabit kanatçıklar arasındaki geçiş aralıkları havanın hızını azaltıp, sıcaklık ve basıncını arttıran difüzör gibi görev yaparlar [49].

Gaz türbinli motorlarda basit olarak rotor balanssızlığını belirlemek için kullanılan titreşim ölçüm sensörlerinin birisi kompresör bölümüne ve N1 motor miline yakın olan bölüme yerleştirilmiştir. Uçaklarda ölçüm yapılacak olan frekans aralığı ve genellikle radyal ivmelenme ölçümü yapılacağı göz önünde bulundurulursa ivme metre kullanımı tercih edilir [57].

Sensör, kablolar yardımı ile fan gövdesi üzerinden geçerek sistem içersine Şekil 4.5'teki gibi bağlanır [52].



**Şekil 4.5.** CFM 56-5B motorunun 1 nolu yatak üzerine yerleştirilen ivme metre düzeninin şekli. A yönünden bakıldığı zaman motor üzerine nasıl yerleştirildiği görülmektedir [52]

N1 miline yerleştirilmiş olan sensörler çok az hassasiyette olmasına rağmen, düşük basınç türbini ve yüksek basınç türbini mil titreşimlerini de hissetmeye yarar. Bu sensörler bazen ince balans işlemlerinde de kullanılır.

İvme metre, piezoelektrik sensörlerin çalışma prensibine göre çalışarak sistemde oluşan titreşim seviye bilgisini motor titreşim izleme ünitesine gönderir. Böylece, motorun N1 mili üzerinde oluşan titreşim değişimleri incelenme altına alınmış olunur [52].

#### **4.1.1.3. Türbin**

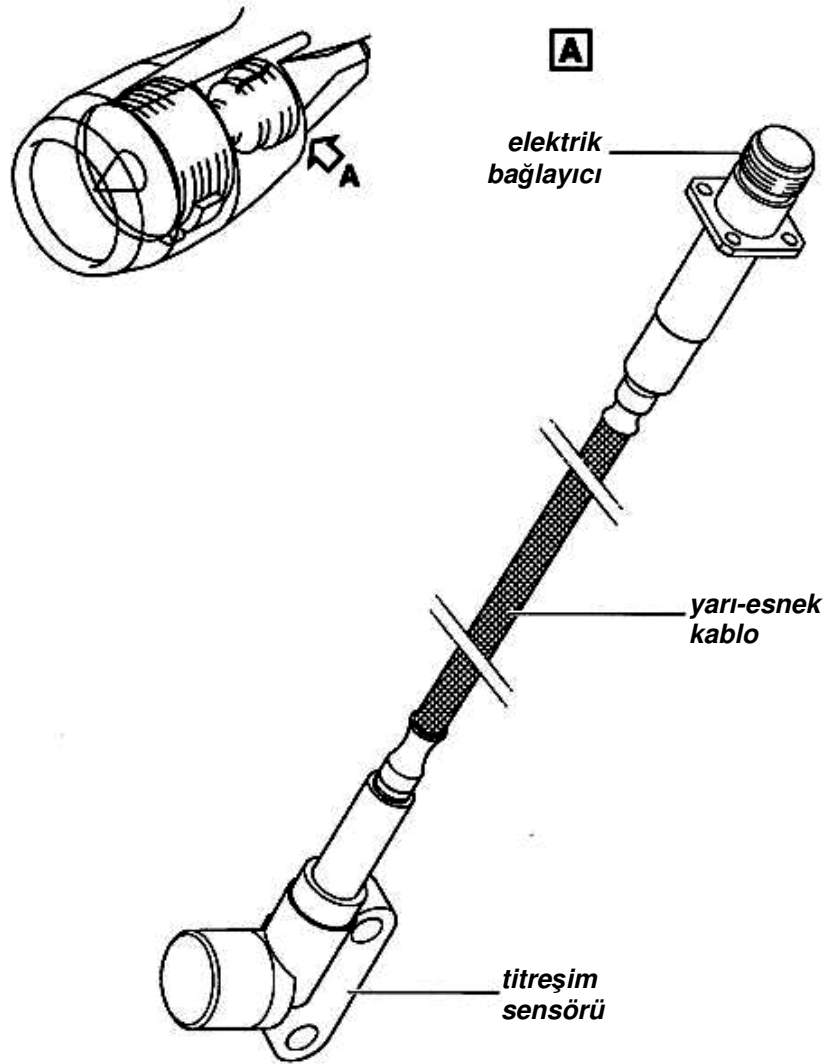
Türbin bölümünün temel amacı hem bağlı olduğu mili döndürmek hem de çıkan hava gazlarına hız kazandırarak yüksek bir itki sağlamaktır. Türbin bölümüne gelen yanmış olan gazların enerjisi çok yüksek olduğu için dış havaya bir an önce karışma isteği ile türbin kanatçıklarını hızla döndürürler. Türbinin bu dönüşü mil vasıtası ile hem giriş kısmında bulunan kompresörün dönmesini hem de aksesuar dişlisinin dönmesini sağlar.

Türbin temelde nozul ve rotor olmak üzere iki kısımdan oluşur. Türbin nozul kısmı, yanmış gazların tahliyesini temin etmeye yarayan kanatçıklardan oluşur. Türbin rotor kısmı ise, motor çerçevesine yerleştirilmiş pallerden oluşan türbin disklerinden meydana gelir. Türbin içersine giren hava, türbin nozul ve rotor kısımlarından ivmelenerek yüksek hızlarda dışarıya atılır [55].

Türbin sistemi yapısında rotor ve dönel elemanlarının olması, arıza olma ihtimalini yükseltir. Bu nedenle, motor üzerinde bulunan ikinci sensör türbin içersine yerleştirir. Sensörün bağlantısının dışarıdan görülmesi ve erişilmesi güçtür.

Bu titreşim sensörüne CFM firmasının ürettiği motorlarda, türbin arka gövde titreşim sensörü adı verilir. Türbin arka gövde titreşim sensörü kompresör üzerine yerleştirilmiş olan titreşim sensörü ile birlikte izleme amaçlı kullanılır. Eğer gerekirse balans ayar prosedürü, motor titreşim seviyesini düşürmek için uygulanır [52].

Sensör kablolar yardımı ile türbin gövdesi üzerinden geçerek sistem içersine Şekil 4.6'daki gibi bağlanır



**Şekil 4.6.** CFM 56-5B motorunda bulunan türbin arka gövde titreşim sensörü. Sensör ve bağlantı elemanlarının motor gövdesi üzerine nasıl yerleştirileceği gösterilmektedir [52]

#### 4.1.1.4. Dişli kutusu

Dişli kutusunda bulunan dişliler, aldığı hareketin hızını ve yönünü değiştirerek aksesuarlara iletirler. Uçak motorlarında bulunan dişli kutuları, yakıt pompası, yağ pompası, hidrolik pompası, jeneratör, alternatör ve diğer gerekli olan yardımcı sistemlerin çalışması için gerekli olan dönme hareketini sağlar.

Dişli kutularında ölçüm noktası, yönü ve sensör yerleştirilmesi, dişli içerisinde oluşacak arızaların belirlenebilmesi için önemlidir. Tam ve kesin ölçüm sonucunun alınabileceği uygun nokta seçimi şarttır. Birçok uygulamada birincil

ölçüm noktası, dişlileri ittirme eyleminde olan aykırı kuvvetlerin olduğu yerlerdir. Belirlenecek olan diğer nokta, ilk ölçüm noktası ile arasında 90 derece olacak şekilde seçilir. Böylece alınacak değerlerin kesin olması sağlanır. Radyal ölçümler her dişli kutusunda uygulanamayabilir. Örneğin karışık bir dişli kutusunda radyal ölçümlerin sağlanması zordur [9].

Dişli kutusu içerisindeki dişlilerde aşınma, kırılma ve benzeri durumlar olabilir. Genelde dişli kutusu içerisinde pompalara bir iletim sağlandığı için pompalarda titreşim analizinin nasıl uygulanacağını incelemek gerekir.

1987 yılında Fransa'da Centre Technique des Industries Mecaniques tarafından yapılan araştırmalarda bir makinada oluşan arızalar sıralandığında pompalarda oluşan arızalar üçüncü sırada yer almış. Bu çalışmada, pompalarda oluşan arızaların nedeni, akışlarda meydana gelen düzensizlikler olduğu belirlenmiş [58].

Pompalar, akışkan veya havayı bir yerden başka bir yere taşımaya yarayan bir sistemdir. Genel olarak bir pompa içerisinde yüksek frekanslı gelişigüzel titreşimler oluşmasının nedeni akış düzensizliğidir.

## **4.2. Helikopterler**

Helikopter, dik iniş ve kalkış yapabildiği için dar yerlerde de kullanılabilen, rotorlu bir hava aracıdır ve rotor-araç diye tabir edilen hava aracı sınıfına girerler. Helikopterler, ana rotor, kuyruk rotoru, dişli kutusu ve iletim kutusu gibi dönel sistemlere sahiptirler.

Yüksek titreşim seviyeleri pervaneli hava araçlarının uçuş performanslarını direkt olarak etkilememesine rağmen daha sonra bıraktığı izler takip edilip belirlenmesi gerekir. Bu takip için bir taraftan yapılan bakımlar nedeniyle maliyet artarken, diğer taraftan mürettebat ve yolcuların konfor ve sağlıkları etkilenmektedir. Bunu önlemek için, günümüzdeki helikopter üreticileri, tahmini titreşim problemlerinin çözümlenmesi için uygun alet ve sistemleri geliştirmektedirler [59].

Uçaklara nazaran helikopterlerde kendisine has birçok titreşim kaynağı vardır. Helikopterlerdeki en belirgin titreşim kaynağı ana rotor ve kuyruk

rotorunun aerodinamik formudur. Manevra hareketi sırasında oluşan düşük ve yüksek hız düzensizliğinden dolayı rotor göbeğinde aşırı titreşimler oluşur. Oluşan bu aşırı titreşimler nedeni ile rotor üzerinde belirgin yüklenmeler ve bunun sonucunda istenmeyen girdaplar (vortex) oluşur. Bu girdaplar aerodinamik yapının bozulmasına, dolayısıyla istenilen performansın alınamamasına neden olur.

Rotorun titreşimi ve gürültüsü yolculuğun biraz daha yorucu geçmesine neden olur. Artık yeni nesil pervaneli uçaklarda gürültü ve titreşim oranı giderek düşmektedir ve jet yolcu uçakları kadar sessiz olanları imalatı söz konusudur [59].

Helikopterlerin motor ve gövde ömürlerinin uzatılması için titreşimsiz bir uçuşa hazırlanılması şarttır. Titreşimsiz uçabilmesi için rotor pallerinin denge konumunda olması sağlanmalıdır. Bu nedenle, pallere etki eden kuvvetlerin uyum içinde olduğu gerekli kontroller ile test edilmesi gerekmektedir.

Yapı üzerinde oluşan titreşimler helikopter içerisinde yoğun bir gürültüye neden olur. Helikopter içerisinde hissedilen gürültü yaklaşık olarak 97 dB ile 100 dB arasındadır. Bu, insan sağlığı açısından istenmeyen değerlerdir. Titreşim üzerinde bir çalışma yapıldığında, öncelikle oluşan bu gürültülerin nasıl durdurulabileceği üzerinedir [60]. Ayrıca, yeni bir helikopter tasarımında oluşacak titreşimlerin testlerinin de yapılması şarttır. Bu testler bir helikopterin yerden kalkışa hazırlanırken üzerine binen titreşim yüklerinin incelenmesini içerir.

Helikopter rotorlarının yapısı bir bütün halindedir. Bu nedenle, salınım kuvvetlerinin neden olduğu balanssız dönme kuvvetlerinin ölçümlerine ihtiyaç vardır. Bu kuvvetler, kalkıştan önce oluşan tam devir hızında rotoru ivmelendiren doğal frekansı ortaya çıkartır. Bu durum rezonans tahriki olarak adlandırılır [61]. Ve yer rezonanslarının oluşma sınırı bu şekilde belirlenmiş olur.

Modern helikopterlerde yer rezonanslarından kaçınmalıdır. Yer rezonansları rotor palleri veya iniş takımları üzerinde alınan tedbirlerle önlenabilir. Örneğin iniş takımında şok sönmüleyici dikmeler kullanılabilir.

Yer rezonansı genellikle lastik tekerlekli iniş takımı olan ya da bütün yapı olarak imal edilmiş rotoru olan helikopterlerde gözlenen bir olgudur. Yer rezonansı, dönel rotor diskinin ağırlık merkezinin, dönmenin merkezinden

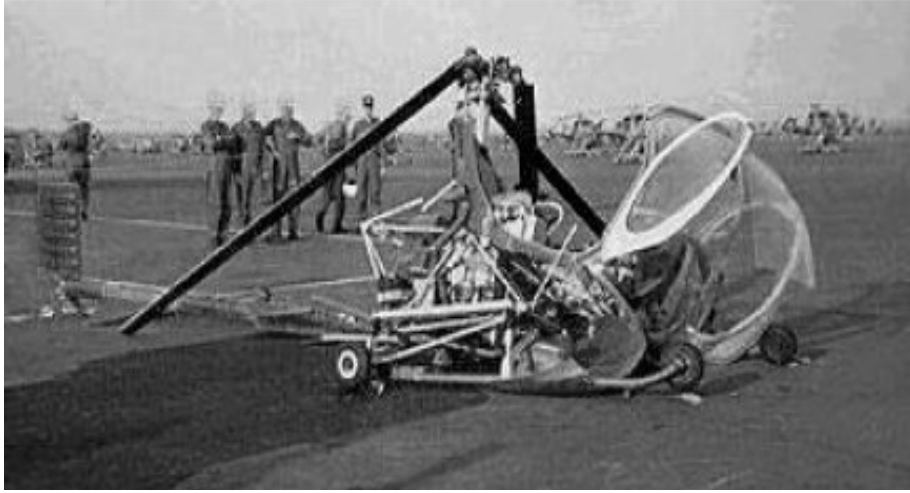
uzaklaşması sonucu oluşur. Yani düşük devirde ağırlık merkezi ve dönme merkeziyle aynı hizada bulunmadığını gösterir.

Yer rezonanslarını önlemek için helikopterlerde, ana rotor ve ana iniş takımı arasında ortak sönümlemeyi sağlayacak şekilde tasarlanabilir.

Yer rezonansının yıkıcı etkisi çok fazladır. Örneğin, 1967 yılında TH-55 tipi helikopterin normal görünüşü Şekil 4.7’de ve bu helikopterin maruz kaldığı yer rezonansı sonucunda parçalanmış hali Şekil 4.8’de görülmektedir [61].



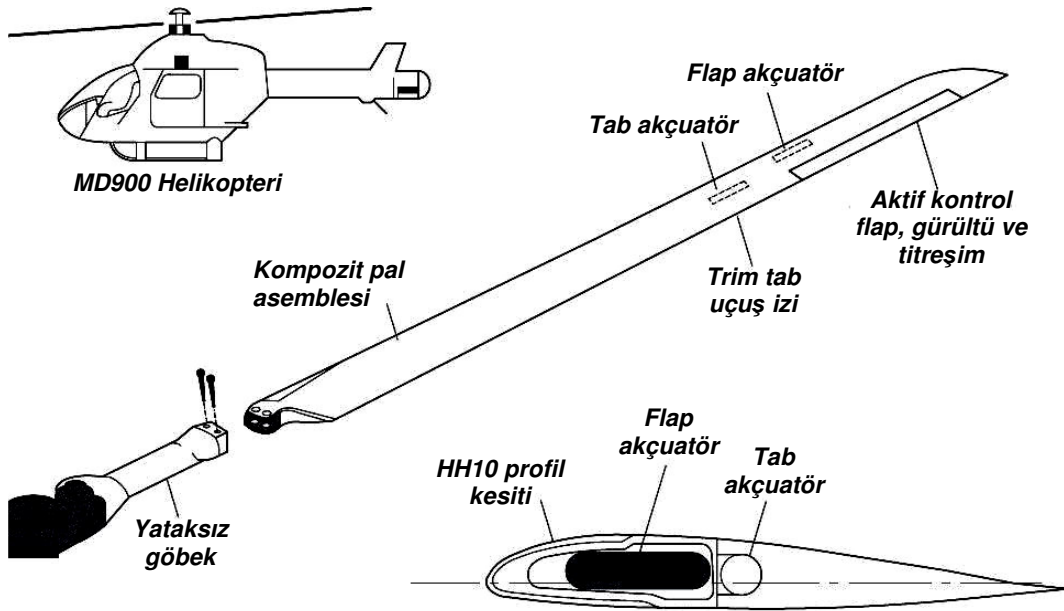
**Şekil 4.7.** TH-55 Osege, askeri amaçla kullanılan bir helikopter tipi [61]



**Şekil 4.8.** Yer çalıştırmaları sırasında yer rezonansının oluşması sonucunda parçalanan TH-55 tipi helikopter [61]

Yer rezonansı ve diğer titreşim etkilerinin haricinde helikopter rotor palleri aerodinamik etkiye de maruz kaldıklarından dolayı, imalatta farklı sistem ve malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzeme ve sistemlere akıllı malzeme

denilmektedir. Akıllı malzeme, istenilen duruma ve kullanım amacına göre tasarlanan malzemelerdir [62]. Örneğin Şekil 4.9’da gösterilen MD900 tipi helikopterin rotoru akıllı malzeme diye tabir edilen sistemlerle üretilmiştir. Dizayn edilen pal ile titreşimlerin ve gürültünün azaltılması sağlanılmıştır. Boeing firması ortaklığı ile yürütülen bu pal tasarımı çalışması ile palin ömrünün uzun olması ve kaliteli düzgün sonuçların alınması sağlanmıştır. Bu çalışma iki önemli işlemsel gereklilik için gerçekleştirilmiştir. Birincisi, uçuşta rotor izi ve balans ayarları yaparak pal titreşimlerinin azaltılması. İkincisi ise, aktif kontrollü aerodinamik yüzeyleri sayesinde titreşim ve gürültülerin azaltılmasıdır. Şekil 4.9’da görülen SMA (Shape Memory Alloys) akçuatörler tarafından kontrol edilen yavaş hareketli trim tab ile uçuşta iz ve balans kontrolü sağlanır [60].



Şekil 4.9. Akıllı parça dizayn yöntemi ile helikopter rotorlarının imalatı [60]

#### 4.2.1. Helikopterde titreşim analizi

Titreşimler, helikopterlerde az miktarda da olsa daima bulunurlar. Bu titreşimler her hangi bir nedenle arttığı zaman, sorun haline gelir. Titreşim seviyesi yok edilemeyeceği için aşırı noktaya ulaşmaması istenilen bir yaklaşımdır. Titreşimlerin başlıca kaynakları, helikopterdeki dönel veya hareket



eden parçalardır. Helikopterlerin sabit aksamındaki çeşitli arızalar mevcut sarsıntının azaltılmasını veya seviyesinin düşürülmesini olumsuz olarak etkiler ve bu olayda pilotun hissedebileceği genel sarsıntı seviyesini artırır.

Titreşimlerin çoğunun helikopterlerin normal bir karakteristiği olarak kabul edilir. Helikopterlerde daima kuyruk rotorunun neden olduğu yüksek frekanslı titreşimler vardır.

Helikopterlerin üzerinde bulunan titreşimler frekanslarına göre şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Düşük frekanslı; 100 – 400 CPM.
- Orta frekanslı; 1,000 – 2,000 CPM.
- Yüksek frekanslı; Kuyruk rotoru hızında veya daha hızlı olan titreşimler yaklaşık olarak 2,000 CPM ve üzerindeki frekanslardır.

#### **4.2.1.1. Düşük frekanslı titreşimler**

Helikopterin normal çalışmalarında, üzerine etki eden çok düşük frekanslı titreşimler vardır. Bu titreşimler genelde paylon sarsıntısı şeklindedir. Saniyede iki veya üç dönü şeklindeki paylon sarsıntısı rotor, mast ve transmisyon sisteminin doğal yapısında bulunmaktadır.

Düşük frekanslı titreşimlere ana rotorun kendisi sebep olur. Bu tip titreşimlerin yanal, yatay ve dikey olmak üzere üç esas tipi vardır.

Yanal titreşim, pilotun her iki tarafından üzerine doğru gelen titreşim tipidir.

Dikey titreşim, bir palin bir noktadan geçerken yarattığı kaldırıcı kuvvetin, diğer palin aynı noktadan geçerken yarattığı taşıyıcı kuvvetten fazla olması sonucunda oluşur. Dikey titreşimler, çoğunlukla orta süratte yapılan alçalmalarda ve ileri uçuşlarda hissedilir. Bu titreşim tipi pilota ayaklarının olduğu kısımdan tekme atılıyormuş hissini verir [63]. Dikey titreşimleri önlemek için, yerde pal kaldırma ve hatve ayarı gerçekleştirme işlemi yapılır. Çoğu zaman uçuş sırasında oluşan arızalar uçuş kumanda yüzeyleri yardımı ile önlenebilir.

Genel olarak, yatay titreşimler, rotor veya rotor parçaları balanssız olduğunda oluşur. Pilot önden arkaya doğru giden bir vuru şeklinde bu titreşimleri

hisseder. Çoğu zaman arkasından periyodik olarak bir tekme atılıyor hissi verir. Yatay titreşimler, helikopter askıda kaldığında ve orta süratte yapılan alçalmalı dönüşlerde hissedilir ve ileri uçuşlarda kaybolma yönelimindedir.

Yatay titreşimlerin boyuna ve enine olmak üzere iki tipi vardır. Boyuna balanssızlık, bir pal ve göbeğin yarısının diğer yarısından daha ağır olmasından dolayı oluşur. Yani rotorun boy eksenini boyunca balanssızlığından oluşur. Enine balanssızlık ise bir palın firar kenarının diğer palinkinden daha fazla ağır olmasından dolayı meydana gelir. Her iki tip balanssızlığa pallerin yanında ana rotor göbeği de sebep olabilir [64].

Eğer düşük frekanslı titreşimler gövde üzerinde sadece seyrisfer ya da belirli hızlarda tırmanmada oluyorsa, titreşim pallerin vurusunun sonucudur. Uçuş şartlarında bu durumdan kaçınılmalıdır.

#### **4.2.1.2. Orta frekanslı titreşimler**

Birçok helikopter tipinde, orta frekanslı titreşimler kuyruk rotorunda oluşan bir problem ile görülür. Rotor sistemlerinin doğasında genelde orta frekanslı titreşimler vardır. Orta frekanslı titreşimlere uygun olmayan kanat ayarı, balanssızlık, kusurlu paller ya da kuyruk rotorunda kötü yataklanması neden olabilir. Eğer titreşim sadece dönüşlerde oluyorsa, yanlış kuyruk rotor flaplamasının yapıldığını gösterir [63].

Bu titreşimlerin seviyelerindeki artışa gövdenin sarsıntıyı üzerine alma kapasitesindeki bir değişme neden olur. Bu değişmeye yakıt seviyesi, harici yükler, yapısal hasarlar, yapısal onarımlar, dahili yükleme veya net ağırlık neden olur [64].

Orta frekanslı titreşimlerin diğer sebepleri elevator, kontrol kapakları ve kapıdan dışarıya sarkmış emniyet kemeridir.

#### **4.2.1.3. Yüksek frekanslı titreşimler**

Yüksek frekanslı titreşimler birçok helikopterde motor ile ilişkilidir. Bununla birlikte, kuyruk rotor devri, motorun çalışma devrine eşit veya fazla olduğu zamanlarda da yüksek frekanslı titreşimlere neden olur [63].

Her üç frekans titreşiminin belirlenip tedbirlerinin alınması olası bir felaketin önlenmesinde yarar sağlar.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, dönel makinalarda oluşan arızaların titreşim analizi yöntemiyle nasıl tespit edileceği ve hava araçlarında oluşabilecek titreşimler hakkında bir derleme yapılmıştır. Derlemenin amacı, bakım okulunda ders olarak verilmesi gerekli olan bu konunun iyice anlaşılmasını sağlamak ve bir temel oluşturmaktır.

Dönel makineler, yapısı nedeniyle hareketli aksamı fazla olan sistemlerdir. Hareket halinde iken yapıdaki düzensizlikler kendisini bir sarsıntı yani titreşim olarak gösterir. Boyutu ne olursa olsun, oluşan titreşimler yapı üzerinde mutlaka bir etki yapmaktadır. Bu da en azından malzeme yorulmasıdır. Bu noktada önemli olan, oluşan titreşimlerin iyi tespit edilmesi ve doğru yorumlanmasıdır. Bu ancak iyi bir titreşim analizi yöntemiyle gerçekleştirilebilir.

Hava araçlarına bakıldığında, üzerine etki eden birçok yük nedeni ile yapısında oluşan titreşimler normaldir. Oluşan titreşimlerin aşırı seviyelere çıkmaları imalat aşamasındayken önlenmiştir. Mühim olan düşük seviyedeki titreşimlerin yapı üzerindeki devamlılığının takip edilmesidir. Sistem üzerinde oluşan bu titreşimler belirli bir zaman sonra malzemelerde yorulmalara ve bunun neticesinde hasara neden olur. Titreşimler sonucunda oluşan yorulmalar önemlidir. Bu nedenle yorulmanın malzemeler ve sistem üzerindeki etkileri çok geniş olarak çalışılmaktadır. Hava araçlarında, sistem parçaları yorulmaya dayanacak şekilde tasarlanıp imal edilmektedir.

Hava aracı üzerinde oluşan yükler, sistem bazında incelenebilir. Bunlardan ilki, hava aracının uçuş durumu ve çevre şartlarına bağlı olarak değişen iniş takımı üzerinde oluşan yüklerdir. İkincisi, hava akımının düzensiz ve aerodinamik yapının bozuk olması nedeniyle kanat, gövde ve kuyruk takımında oluşan yüklerdir. Son olarak da, kendisinde bir dönel makina olan güç sistemindeki yükler şeklinde söylenebilir.

Uçaklarda, kalkış ve iniş hareketinin pistte koşturması esnasında iniş takımları üzerinde düzensizlikler oluşur. Düzensizliklere hem uçağın kendisi hem de dış etkenler etkili olur. Bu düzensizliklerden en önemlisi simi (shimmy) olgusudur. Simi, koşturma sırasında oluşan tork ile yıkıcı titreşimlerin

kombinasyonu şeklindedir. Simi olgusu nedeniyle uçak yapısında aşırı enerji oluşur. Bu enerji kendisini uçaklar üzerinde titreşim olarak gösterir [64].

İniş takımının bu nedenleriyle oluşan titreşimler hava aracı kazasına neden olur. Bu noktada iniş takımı üzerindeki düzensizliklerin titreşim analizi yöntemiyle takip edilmesi, oluşacak arızanın önceden belirlenmesine yardımcı olacaktır.

Uçak üzerinde diğer bir etken ise güç grubudur. Yapı içerisinde bulunan dönel aksamdaki düzensizlik, sistemde ayarsızlıklara ve hasarlanmalara neden olur. Genel olarak uçak motorlarında düzensizliklerin takibi için basit bir titreşim analizi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, sarsıntının seviyesini belirleyerek oluşabilecek titreşim değişimini önceden ikaz eder. Kokpit'te pilot için basit bir titreşim seviye göstergesi vardır. İstenilen değerlerin dışında bir değer okunursa pilot motoru durdurabilir. Bu basit ikaz sistemi sayesinde en genel olarak motor üzerindeki kanatçıklarda balans, kırılma ve rulman arızası gibi durumlar tespit edilmiş olunur. Gelişmekte olunan titreşim analizi yöntemlerinin, hava araçlarında arıza tespitinde kullanılması sınırlıdır. Bu nedenle, uçak motorlarında arızanın başlangıç aşamasındayken belirleyen sistemlerin geliştirilip kullanılması şarttır. Günümüzdeki çalışmalar aktif titreşim analizi üzerinedir.

Helikopterler, ana rotor ve kuyruk rotoru yapısı nedeniyle en fazla titreşime maruz kalan hava araçlarıdır. Bu nedenle, helikopterlerde kendileri için özel üretilmiş sensörler kullanılarak oluşan titreşimlerin takibi sağlanır. Böylece rotorlarda oluşan düzensizlikler önceden belirlenerek oluşabilecek büyük çaptaki hasarlanmalar önlenmiş olunur [65].

Ayrıca helikopterlerde iniş takımları nedeniyle oluşabilecek yer rezonanslarına dikkat edilmesi şarttır. Bu noktada imalat aşamasında iken iniş takımının tüm yükleri kesin olarak belirlenmesi şarttır.

Genel olarak, tüm hava araçlarında oluşan titreşimler boyutu ne olursa olsun sistemin ömrünü etkilemektedir. Ve basit olarak oluşan bir arıza kendisini yapı üzerinde titreşim olarak göstermektedir. Oluşan arıza nedeniyle uçamadığı her dakika hava aracının sahibi olduğu havayolu şirketi için zarar demektir. Bu nedenle en uygun bakım aralıklarının belirlenmesi istenilen bir durumdur. Bu noktada da arızanın başlangıç safhasının belirlenmesi ile titreşimlerin incelenip

değerlendirilmesi en çok istenen durumdur. Arıza belirlendikten sonra en kısa sürede arıza giderilip büyük problemlerin oluşması önlenmiş olur.

Gelecekte, titreşim analizine dayalı yöntemler kullanılarak en uygun kestirimci bakım yöntemi uygulanmalıdır. Böylece istenilen kesintisiz uçuşlar sağlanmış olur.

Temel olan bu çalışmanın ardından, parça bazında ya da sistem bazında hasar takibi nasıl yapılacağı çalışılabilir. Bunun yanında, motor üzerine yerleştirilen sensörler yardımıyla yapıdaki değişiklikler incelenebilir. Bu, hava aracının bakımı öncesinde motorun komple sökülüp dağıtılmadan sistem içi incelemesi şeklinde olabilir. Böylece yapıdaki değişimler doğrultusunda sadece şüphelenilen kısmın açılması sağlanır. Tüm bunların yanında günlük hayatta hızla gelişen titreşim analizi yöntemlerini paralel olarak hava araçlarında nasıl uygulanılabileceği üzerine çalışılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Anonim, *Türkçe sözlük*, Türk Dil Kurumu Yayınları, Ankara, 2005.
- [2] Gerece, E., *Havayolu işletmelerinde direkt işletme maliyetlerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 1998.
- [3] Anonim, *General aircraft*, 2007, www.jaa.nl
- [4] Orhan, S., Aktürk, N., Çelik, V., “Bir santrifüj pompa rulmanlarının çalışabilirliğinin titreşim analizi ile belirlenmesi,” G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, **16(3)**, 543-552, 2003.
- [5] Shereve, D. H., *Introduction to vibration technology*, IRD Mechanalysis, Ohio, A.B.D., 1994.
- [6] Mobley, R.K., *Maintenance fundamentals*, Plant Engineering Maintenance Series, Boston, A.B.D., 1999.
- [7] Brüel & Kjær, *introduction to shock & vibration*, 1998, <http://www.bksv.com/lectures/BA767412.pdf>
- [8] Brüel & Kjær, *Measuring vibration*, 1982, [http://www.bksv.com/pdf/Measuring\\_Vibration.pdf](http://www.bksv.com/pdf/Measuring_Vibration.pdf)
- [9] Mobley, R.K., *Vibration fundamentals*, Plant Engineering Maintenance Series, Boston, A.B.D., 1999.
- [10] Dimoragonas, A., *Vibration for engineers*, Prentice-Hall International, New Jersey, A.B.D., 1996.
- [11] Thomson, T. W., *Theory of vibration with application*, Prentice-Hall International, New Jersey, A.B.D., 1993.
- [12] Eshleman, L. R., *Machinery vibration analysis I*, VIPress, Willowbrook, A.B.D., 1995.
- [13] Çağlayan, İ.H., *Titreşim mühendisliği ansiklopedisi*, VibraTek Ltd. Şti., Ankara, 2003.
- [14] Anonim, *Gürültü ve titreşim*, Ulusal Metroloji Enstitüsü Yayınları, Kocaeli, 1994.
- [15] Harris. M.C., Piersol. G.A., *Harris' shock and vibration handbook*, McGraw-Hill, New York, A.B.D., 2002.

- [16] Yonchang., Z., *Reliability quantification of plates subjected to random vibration and temprature loads*, Doktora Tezi, Arizona Üniversitesi, Arizona, A.B.D., 2000.
- [17] Çağlayan, İ.H., *Titreşim mühendisliği eğitimi seminer notları*, VibraTek Ltd. Şti., Ankara, 2007.
- [18] Technion, S.B., “Transform methods,” *Encyclopedia of Vibration* (Ed: Braun, S.), Academic Pres., Haifa, İsrail, 1406-1419, 2001.
- [19] Belmadhi, D.K., *Technic of maintenance*, Université Pierre and Marie Curie Library, Paris, Fransa, 2006.
- [20] Anonim, *Beginner’s guide to machine vibration*, Commets Instruments, Yeni Zelanda, 2003.
- [21] Dunton, T.A., *An introduction to time waveform analysis*, Universal Tecnologies Inc., A.B.D., 1999.
- [22] Tranter J.,” The time waveform”, Uptime Magazine, Kasım, 40-44, 2006.
- [23] Anonim, *Vibration tranducers*, Sales Technology, 1999, <http://www.stiweb.com/appnotes/accel.htm>
- [24] Anonim, *A guide for accelerometer installation*, Endevco Corp., San Juan Capistrno, A.B.D., 1999.
- [25] Brüel & Kjør, *Vibration transducers and signal conditioning*, 1998, <http://www.bksv.com/lectures/BA767512.pdf>
- [26] Lundgaard, B., “Using transducers for machinery fault detection,” *Sensors*, **5**, 53–73, 28-31 1988.
- [27] Bodre, R., *Overview of maintenance practice*, [www.dliengineering.com/vibman.htm](http://www.dliengineering.com/vibman.htm)
- [28] Stevens, D., *Machinery vibration diagnostics*, Fellow of the Institution of Diagnostic Engineers, 2001, <http://www.vibanalysis.co.uk>
- [29] Wowk V., *Machinery vibration: measurement and analysis*, Machine Dynamics. Inc., 1991.
- [30] Riley, C.M., Lin B.K., Habetler, T.G., and Schoen, R.R., "A method for sensorless on-line vibration monitoring of induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, **34(6)**, 1240-1245, 1998.



- [31] Joshi M., *Coal handling plant alignment standarts for shaft to shaft alignment*,  
<http://www.plant-maintenance.com/articles/AlignmentStandards.pdf>
- [32] Anonim, Hewlett packart application notes, *Effective machinery measurements using dynamic signal analyzers*,  
<http://www.me.ua.edu/me360/docs/HP-DSA.pdf>
- [33] Eshleman, R.L., "Resonance and critical speed testing. Part II: Resonance testing techniques," *Vibrations*, **6(4)**, 3-7, 1990.
- [34] Anonim, JAR 27 small rotorcraft, JAA, 2002, [www.jaa.nl](http://www.jaa.nl)
- [35] Kıral, Z., Karagülle H., "Rulmanlı yatak içeren yapılarda yükleme modeli geliştirilmesi ve titreşim analizi," 11.ulusal makine teorisi sempozyumu, 293-299, 2003.
- [36] Anonim, *Rulman*, Vikiped ansiklopedi, 2007,  
<http://tr.wikipedia.org/wiki/Rulman>
- [37] Orhan, S., Aktürk, N., "Aktarma organı dişlilerinde oluşan fiziksel hataların titreşim analizi ile belirlenmesi.", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **18(3)**, 97-106, 2003.
- [38] Kehoe, M.W. ve Freudinger, L.C., *Aircraft ground vibration testing at the NASA dryden flight research facility*, NASA TM-104275,1993.
- [39] Corda, S., Franz, R.J., Blanton, J.N., Vachon, M.J. ve DeBoer, J.B., *In-flight vibration environment of the NASA F-15B flight test fixture*, NASA TM-210719, 2002.
- [40] Howell, W.E., McGehee J.R. ve Daugherty, R.H., "F-106B airplane active control landing gear drop test performance", *AGARD – CP – 484* , **19**, 1-8, 1988.
- [41] Tsyfansky, S.L., Beresnevich, V.I., "Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings", *Journal of Sound and Vibration*, 2000.
- [42] Irvine, T., *An introduction to random vibration*, Vibrationdata publication, 2000.
- [43] Torenbeek, E., *Synthesis of subsonic airplane design*, Kluwer Academic Publishers, Hollanda, 1982.

- [44] Yıldırım, Ş., Taplak, H., Uzmay, İ., “Artificial radyal esaslı yapay sinir ağları kullanılarak bir savaş uçağının iniş takımı titreşim analizi”, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, **18(1-2)**, 12-17, 2002.
- [45] Su, Ş., ve Taplak, H., “Burun iniş takımının belirli hızlarda pist pürüzlülüğüne karşı dinamik davranışının analizi,” Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **4(1)**,29-36,2000.
- [46] Anonim, *Boeing aircraft computer base training*, Boeing Training CD, Seattle, A.B.D., 2002.
- [47] Anonim, *A&P technician airframe textbook*, Jeppesen Sanderson Inc., A.B.D., 1992.
- [48] DePriest, J., *Aircraft engine attachment and vibration control*, Lord Publicatios, A.B.D., 2001.
- [49] Çetinkaya, S., *Gaz türbinleri*, Nobel yayınevi, Ankara, 1999.
- [50] FAA publication, “Airplane turbofan engine operation and malfunctions - Basic familiarization for flight crews”, 2000.
- [51] Scheidler, S.G., Mundt, C., Mettenleiter, M., Hermann, J., Hiller, S.J., “Active stability control of the compression system in a twin-spool turbofan engine by air injection,” *The 10th of International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Hawaii, A.B.D., 2004.
- [52] Anonim, *Training maintenance manual Airbus 320*, Airbus press., Fransa, 2001.
- [53] Anonim, *Training maintenance manual Boeing 737-800*, Boeing press., A.B.D., 2001.
- [54] Blyth, N.R., *Analysis of a failed Pratt & Whitney JT9D-7R4 turbofan engine*, Boeing technical analysis report, No: 9/02, A.B.D., 2001.
- [55] Fowler, T.W., Markle, G.C., Swami, P., *Jet Engine Concepts*, General Electric Aircraft Engine Business Group, A.B.D., 1987.
- [56] Mobley, R.K., *Root cause failure analysis*, Plant Engineering Maintenance Series, Boston, A.B.D., 1999.
- [57] Anonim, *Jet aircraft maintenance fundamentals*, Training CD, A.B.D., 2000.
- [58] Giurgiutiu, V., “Actuators and smart structures,” *Encyclopedia of Vibration* (Ed: Braun, S.), Academic Pres., Haifa, İsrail, 58-81, 2001.

- [59] Dieterich, O., Schneide, O., Langer, H.J., Imbert, G., Hounjet, M.H.L., Riziotis, V., Cafarelli, I., Alonso, R.C., Clerc, C., Pengel, K., “Current vibration research activities”, *31st European Rotorcraft Forum*, Florence, İtalya, 2005.
- [60] Kuronen, P., *Military aviation noise*, Oulu University Press, Helsinki, Finlandiya, 2004.
- [61] Irvine, T., *Helicopter ground resonance*, Vibrationdata publication, 2005.
- [62] Kutz, M., *Handbook of material selection*, John Wiley & Sons Press., A.B.D., 2002.
- [63] Anonim, *Basic helicopter handbook*, Federal Aviation Service, Oklahoma, A.B.D., 1978.
- [64] Esmailzadeh, E., Farzaneh, K.A., “Shimmy vibration analysis of aircraft landing gear”, *Journal of Vibration and Control*, **5**, 45-56, 1999.
- [65] Anonim, *Döner kanat helikopter rotor ders kitabı*, Kara Havacılık Okul Komutanlığı, Ankara, 1992.