

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BÜYÜK GÜÇLÜ ASENKRON MOTORLARDA TİTREŞİM ANALİZİ**  
**İLE ARIZA TEŞHİSİ**

**ABDULLAH ŞAHİN**

**KOCAELİ 2018**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BÜYÜK GÜÇLÜ ASENKRON MOTORLARDA TİTREŞİM**  
**ANALİZİ İLE ARIZA TEŞHİSİ**

**ABDULLAH ŞAHİN**

**Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR**  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
**Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
**Doç. Dr. Murat KALE**  
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi


**Tezin Savunulduğu Tarih: 08.01.2017**

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Endüstride asenkron elektrik motorları, düşük kurulum maliyetleri, sağlam fiziki yapıları, hızlı tedarik edilebilirliği, güvenli işleme bilirligi, kolay kontrol edilebilirliği ve az bakım ihtiyacı nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptirler. Günümüzde artan üretim ihtiyaçlarına bağlı olarak, endüstride asenkron elektrik motor kullanımı fazlasıyla artmıştır. Bu sayının artmasıyla beraber tesislerde meydana gelen zamansız motor arızaları, üretim hatlarını ve tesis bütünlüğünü olumsuz yönde etkilemektedir.

Dünya standartlarında bakıma istekli şirketler, kendi endüstriyel tesisleri içerisindeki yüksek sermaye yatırımını korumak, makina maliyetlerini düşürmek, makinaların verimliliğini yükselterek kullanılabilirliğini artırmak ve böylece tesis performansını optimize etme felsefesini, bakım stratejisinin bir parçası olarak kabul etmişlerdir. Bilimsel araştırmacılar; endüstriyel tesislerde motor kaynaklı arızaların önceden tespitine yönelik yeni teknolojiler, arıza görüntüleme yöntemleri ve tanı teorileri üzerine çalışmaktadırlar. Yapılan bu çalışmaların bir kısmının temelini oluşturan titreşim analizinin kullanımı, arıza teşhisinde önem arz etmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, büyük güçlü asenkron bir motorda titreşim analizi yapılarak, arıza teşhisi konusunda yapılan araştırmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın yönetilmesinde değerli fikirleri ve tecrübesi ile bana yol gösteren danışmanım, saygı değer hocam, sayın Prof. Dr. Engin Özdemir'e sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca maddi ve manevi desteğini hep yanımda hissettiğim değerli aileme, özellikle eşim, Nuray Şahin'e sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak – 2018

Abdullah ŞAHİN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
GİRİŞ .....	1
1. ASENKRON ALTERNATİF AKIM MOTORLARI .....	9
1.1. Asenkron AC Motor Bileşenleri .....	10
1.2. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi.....	12
1.3. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi.....	14
1.4. Asenkron Motor Arızaları.....	15
1.4.1. Balanssızlık.....	16
1.4.2. Hizasızlık .....	18
1.4.3. Mekanik gevşeklik.....	20
1.4.4. Rulman hasarları.....	22
1.4.5. Elektriksel problemler .....	23
1.4.6. Rotor problemleri .....	24
1.4.7. Stator problemleri.....	25
1.5. Asenkron Motor Arıza Tespit Metotları .....	26
2. TİTREŞİM TEORİSİ .....	28
2.1. Yer Değiştirme (Deplasman) .....	30
2.2. Hız.....	30
2.3. İvme .....	30
2.4. Dalga Formu Oluşumu Ve Temelleri .....	30
2.5. Çevrim.....	32
2.6. Frekans (f).....	32
2.7. Periyot (T).....	32
2.8. Dalga Boyu ( $\lambda$ ).....	32
2.9. Faz ( $\phi$ ).....	32
2.10. Genlik.....	33
3. TİTREŞİM PARAMETRELERİ, VERİ TOPLAMA VE SİNYAL İŞLEME .....	34
3.1. Titreşim Parametreleri .....	36
3.2. Genlik Parametreleri .....	36
3.3. Genlik Birimleri .....	37
3.4. Titreşim Parametrelerinin Seçimi .....	37
3.5. Veri Toplama .....	38
3.6. Ölçüm Pozisyonları Ve Yönü .....	38
3.7. Sinyal İşleme.....	39
3.8. Zaman Tabanlı Analiz.....	39

3.9. Frekans Tabanlı (Spektrum) Analiz.....	40
3.10. Fourier Dönüşümü .....	41
4. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	43
4.1. Ölçümü Yapılan AC Motor Özellikleri .....	43
4.2. Sensör Özellikleri.....	44
4.3. Veri Toplama Sistemi .....	45
4.4. Motor Titreşim Ölçümleri.....	46
4.5. Sinyal İşleme Prosedürü .....	47
5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	48
5.1. Zaman Tabanlı Titreşim Analizi.....	48
5.2. Frekans Tabanlı Titreşim Analizi (Spektral Analiz).....	49
5.2.1. Motor arka yatak.....	49
5.2.2. Motor ön yatak .....	50
5.2.3. Motor ön yatak .....	51
5.2.4. Motor ön yatak .....	52
5.2.5. Arıza Teşhisi.....	53
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	55
KAYNAKLAR .....	57
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	61
ÖZGEÇMİŞ .....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı tip elektrik motorlarının sınıflandırılması .....	9
Şekil 1.2. Bir asenkron motorun iç yapısı .....	10
Şekil 1.3. Bir sincap kafes asenkron motorun rotoru .....	11
Şekil 1.4. Bir sincap kafes asenkron motorun statoru .....	11
Şekil 1.5. Bir sincap kafes iki kutuplu asenkron motor şeması .....	12
Şekil 1.6. Bir sincap kafes üç fazlı asenkron motor faz şeması .....	13
Şekil 1.7. Asenkron motor stator eşdeğer devresi .....	14
Şekil 1.8. Asenkron motor rotor eşdeğer devresi .....	15
Şekil 1.9. Asenkron motorun komple bir faz eşdeğer devresi .....	15
Şekil 1.10. Balanssızlık gösterimi .....	17
Şekil 1.11. Spektrum grafiğinde balanssızlığın tespiti .....	18
Şekil 1.12. Hizasızlık gösterimi .....	19
Şekil 1.13. Spektrum grafiğinde hizasızlığın tespiti .....	20
Şekil 1.14. Mekanik gevşeklik gösterimi .....	21
Şekil 1.15. Spektrum grafiğinde mekanik gevşekliğin tespiti .....	22
Şekil 1.16. Rulman hasarları gösterimi .....	22
Şekil 1.17. Spektrum grafiğinde rulman hasalarının tespiti .....	23
Şekil 1.18. Spektrum grafiğinde rotor problemi tespiti .....	25
Şekil 1.19. Spektrum grafiğinde stator problemi tespiti .....	26
Şekil 2.1. Kütle yay sistemi (titreşimin fiziksel gösterimi) .....	28
Şekil 2.2. Yay-kütle hareketinin zamana göre hareketi .....	29
Şekil 2.3. Kütlenin ivme, hız ve yer değiştirme dalga formu .....	31
Şekil 2.4. Farklı genliklere sahip dalga formlarının karşılaştırılması .....	31
Şekil 2.5. İki benzer dalga arasındaki faz ilişkisi .....	33
Şekil 3.1. Bir sinyalin blok diyagram ile gösterimi .....	34
Şekil 3.2. Bir makinede üretilen karmaşık dalga formları .....	35
Şekil 3.3. Gerçek zaman dalga formu .....	35
Şekil 3.4. Genlik parametrelerinin gösterimi .....	36
Şekil 3.5. Titreşim parametrelerinin seçimi .....	37
Şekil 3.6. Veri toplayıcı ile ham veri toplama .....	38
Şekil 3.7. Ölçüm pozisyonları ve yönü .....	39
Şekil 3.8. Zaman tabanında dalga formu gösterimi .....	40
Şekil 3.9. Frekans ve zaman tabanlı spektrumların gösterimi .....	40
Şekil 4.1. Ölçüm düzeneği .....	43
Şekil 4.2. İvmeölçer yapısının gösterimi .....	45
Şekil 4.3. Veri toplayıcısının gösterimi .....	46
Şekil 4.4. Titreşim ölçüm noktalarının gösterimi .....	47
Şekil 5.2. Spektral grafik (motor arka yatak-yatay) .....	49
Şekil 5.3. Toplam vibrasyon değeri (motor arka yatak-yatay) .....	49
Şekil 5.4. Spektral grafik (motor ön yatak-yatay) .....	50
Şekil 5.5. Toplam vibrasyon değeri (motor ön yatak-yatay) .....	50
Şekil 5.6. Spektral grafik (motor ön yatak-dikey) .....	51
Şekil 5.7. Toplam vibrasyon değeri (motor ön yatak-dikey) .....	51

Şekil 5.8. Spektral grafik (motor ön yatak-eksenel) .....	52
Şekil 5.9. Toplam vibrasyon değeri (motor ön yatak-eksenel) .....	52



## **TABLÖLAR DİZİNİ**

Tablo 4.1. Ölçümde kullanılan elektrik motorunun teknik özellikleri.....	44
Tablo 4.2. Ölçümde kullanılan sensörün teknik özellikleri .....	45
Tablo 4.3. Ölçümde kullanılan veri toplayıcının teknik özellikleri .....	46
Tablo 5.1. Bulgular sayısal değerler listesi .....	53





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$a(t)$	: Zamana göre doğrusal ivme
$E_{r0}$	: Durma anında rotor sargılarında indüklenen gerilim
$E_r$	: Herhangi bir kayma anında rotorda indüklenen gerilim
$F$	: Kuvvet, (N)
$f$	: Frekans, (Hz)
$g$	: Yerçekimi, ( $m/s^2$ )
$k$	: Yay sabiti
$\lambda$	: Dalga boyu, (mm)
$M$	: Kütle, (kg)
$n$	: Motor devri, (d/d)
$s$	: Kayma
$T$	: Periyot, (sn)
$t$	: Zaman, (sn)
$X_{r10}$	: Durma anında rotor sargılarındaki kaçak reaktans
$X_{r1}$	: Herhangi bir kayma anında rotorun kaçak reaktansı
$v(t)$	: Zamana göre doğrusal hız
$x$	: Yer değiştirme, (mm)
$x(t)$	: Her hangi bir $t$ anında yer değiştirme, (mm)
$x_0$	: Maximum yer değiştirme, (mm)
$Y(f)$	: Frekans tabanında sinyal
$y(t)$	: Zaman tabanında sinyal
$\varphi$	: Faz, (Derece)
$\omega$	: Açısal hız, (rad/s)

## Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
CPM	: Cycles Per Minute (Dakikadaki çevrim sayısı)
dB	: Decibel (Desibel)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
ICP	: Integrated Circuit Piezoelectric (Entegre Devre Piezoelektrik)
RMS	: Root Mean Square (Ortalama Karekök)
RPM	: Revolution Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)

# **BÜYÜK GÜÇLÜ ASENKRON MOTORLARDA TİTREŞİM ANALİZİ İLE ARIZA TEŞHİSİ**

## **ÖZET**

Bu çalışmada, titreşim analiz yöntemi ile endüstriyel tesislerin çalışma koşullarında büyük güçlü asenkron elektrik motorlarının mekanik ve elektrik kısımlarında oluşabilecek arızaların teşhisi ve konumlandırılması ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Bu yöntemin uygulaması, sinyallerin edinilmesi ve işlenmesiyle motor arıza teşhisi konusu, bir örnek durum olarak sunulmuştur. İlk olarak endüstride kullanımı yaygın olan elektrik motorları sınıflandırılmış, sincap kafesli asenkron motorların içyapısı ile beraber bu motorlarda karşılaşılabilecek olası mekanik ve elektrik kaynaklı arızaların genel özellikleri kapsamlı anlatılmıştır. Daha sonra titreşimin fiziksel dayanağı ve titreşim teorisi ele alınarak arıza teşhisinde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ardından özel bir yazılım ortamında titreşim ölçümü yapılacak bir asenkron motor için, titreşim ve ölçüm değişkenleri tanımlanmış, mobil veri toplama cihazına aktarılmıştır. Vibrasyon analizi için gerekli ham titreşim verileri, motor miline ait arka yataktan radyal (milye göre yatay) yönde, ön yataktan ise hem radyal (milye göre yatay ve dikey) yönde hem de eksenel yönde hız sensörü vasıtasıyla toplanmıştır. Ölçüm değişkenlerinin tanımlandığı aynı yazılım yardımıyla, elde edilen verilerin zaman tabanlı dalga form analizi, frekans tabanlı spektral analizi ve toplam vibrasyon değerleri endüstriyel uygulamalarda kabul görmüş, uluslararası çizelgeler ve tablolar ait değerler ile karşılaştırılarak vibrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada örnek durum olarak sunulan elektrik motorunun titreşim ölçümü ile, titreşim analizinin önemli temelleri, analiz için gerekli titreşim verilerinin toplanması, titreşim sinyallerinin işlenmesi ve titreşim analizi ile elektrik motoru arızalarının, arıza meydana gelmeden evvel hızlı bir şekilde teşhis edilebilirliği gösterilerek yapılan bilimsel ve teknolojik çalışmalara katkı sağlaması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelime:** Analiz, Arıza, Elektrik Motoru, Titreşim, Sinyal İşleme

## **FAULT DIAGNOSIS WITH VIBRATION ANALYSIS OF LARGE ASYNCHRONOUS MOTORS**

### **ABSTRACT**

In this study, the vibration analysis method has been shown in detail to detect and locate faults that can occur in the mechanical and electrical parts of high voltage asynchronous electric motors in operating conditions of industrial plants. The application of this method is presented as an example of engine fault diagnostics with the acquisition and processing of signals. First, electric motors which are widely used in the industry have been classified, the general features of possible mechanical and electrical source faults encountered in these motors as well as the internal structure of asynchronous motors with squirrel cage were explained together widely. Then, the physical base & theory of vibration have been taken into consideration and demonstrated its applicability in fault diagnosis. Afterthat vibration & measurement variables have been defined for an asynchronous motor to take vibration measurement in a special software and transferred to the mobile data acquisition device. The raw vibration data required for the vibration analysis has been collected by means of a speed sensor at the radial (horizontal with respect to the motor shaft) direction on non drive side bearing of motor and at the both radial and axial (horizontal, vertical & axial with respect to the motor shaft) direction on drive side bearing of motor. With the same software defined in the measurement variables, the time-base waveform analysis, frequency-based spectral analysis and total vibration values of the obtained data were performed by comparing them with the values of international schedules and tables in accepted industrial applications. It is aimed with the vibration measurement of the electric motor presented as case stud, showing the important bases of the vibration analysis, the collection of the vibration data necessary for the analysis, the processing of the vibration signals and vibration analysis to quickly diagnose electrical motor failures before they ocur contribute to scientific and technological studies.

**Keyword:** Analysis, Fault, Electric Motor, Vibration, Signal Processing

## GİRİŞ

Asenkron motorlar; endüstride elektrik enerjisinden mekanik enerji elde edilmesinde kullanılan basit elektro-mekanik cihazlardır. Bu tür motorlar yalnızca genel amaçlar için değil, aynı zamanda tehlikeli bölgelerde ve ağır sanayi ortamlarında kullanılan sağlam yapılı motorlardır. Asenkron motorların genel amaçlı uygulamaları pompalar, konveyörler, takım tezgâhları, merkezkaç makinaları, asansörler ve ambalajlama makinalarını içerir. Öte yandan, tehlikeli bölgelerdeki uygulamaları ise petrokimya ve doğalgaz tesislerini kapsar. Bunlara ek olarak, asenkron motorlar son derece güvenilir, düşük bakım gerektirir ve nispeten yüksek bir verimlilik sağlamaktadır. Dahası, yüzlerce watt'tan, megavatta kadar olan asenkron motorlarının geniş güç aralığı, çoğu endüstriyel üretim ihtiyaçlarını karşılar. Fakat asenkron motorlar, endüstriyel uygulamalarda fazlasıyla kullanıldığından mekanik ve elektriksel arızalar ile karşılaşılması muhtemeldir. Başlangıç aşamasında belirlenemeyen bir motor arızası felaket ile sonuçlanabilir ve asenkron motor ciddi hasar görebilir. Böylece, tespit edilmemiş hatalar motorun arıza yapmasına neden olabilir. Bu da üretim duruşlarına neden olabilir. Bu tür duruşlar, üretim süresinin artması, bakım maliyetleri ve boşa harcanmış hammaddeler açısından maliyetlidir.

Motor arızaları mekanik ve elektriksel kısımlardan kaynaklanmaktadır. Mekanik arızalar, aşırı yüklenmeler ve ani yük değişiklikleri nedeniyle meydana gelir, bu da rulman arızaları ve rotor bar kırılmasına neden olabilir. Öte yandan, elektriksel arızalar genellikle güç kaynağıyla ilişkilendirilir. Asenkron motorları, sabit frekanslı sinüzoidal güç kaynaklarından veya ayarlanabilir AC sürücüler yardımıyla sürülebilir. Bununla birlikte, asenkron motorlar, AC sürücüler ile sürülen motorlar arızaya daha duyarlıdır. Bunun nedeni; stator sarımlarında, yüksek frekanslı stator akım bileşenlerinde ve yatak kaynaklı akımlarda AC sürücülerden kaynaklanan aşırı gerilimdir. Buna ek olarak, motorda ve AC sürücüsü arasındaki kablo bağlantılarının

uzunluğu nedeniyle motor aşırı gerilimler oluşabilir. Bu son etki dalgalı gerilim geçişi nedeniyledir [1]. Bu tür elektriksel etkiler, stator sargıların da kısa devreler oluşturabilir ve komple bir motor arızasına neden olabilir. Yayınlanan araştırmalara göre, asenkron motor arızaları; rulman arızalarını, stator bobinleri kısa kırılmış rotor çubuklarını ve uç ring arızalarını içerir. Rulman arızaları, tüm arızaların yaklaşık beşte ikisine tekabül eder. Stator sargılarındaki kısa devreler ise, tespit edilen arızaların yaklaşık üçte birini temsil eder. Kırık rotor çubukları ve uç ring arızaları, asenkron motor arızalarının yaklaşık yüzde onunu oluşturur [2, 3].

Motor güvenilirlik çalışma grubu tarafından 114 adet motor [2] ve elektrik enerjisi araştırma enstitüsü tarafından 6312 adet motor üzerinde yapılan çalışma gösteriyor ki [3] rulman, sargı ve rotor arıza grupları en çok karşılaşılan arıza türleridir.

Endüstride, bu arıza gruplarından asenkron motorlara ciddi hasar gelmesini önlemek ve beklenmedik üretim duruşlarını önlemek için çeşitli alternatifler bakım yöntemleri kullanılmıştır. Örneğin; motorların bütünlüğünü, anormal titreşimleri, yağlama sorunlarını, rulman durumlarını, stator sarımlarını ve rotor kafesi durumunu denetlemek için sıklıkla takvimsel bakım çizelgesi uygulanmıştır. Bu tür bakımlar, motoru servis dışı bırakılarak yapılır, bu da üretim durdurma anlamına gelmektedir. Genellikle, büyük şirketler, bakım işlemleri için üretiminin durdurulduğu yıllık bakımları tercih eder.

Bu tezde titreşim analiz yöntemi ile motor arızalarını, hasar veren testlere veya tesis duruşlarına gerek kalmadan tespit edilebilirliği gösterilmektedir. Özellikle, rotor yataklarındaki bozulmalar ve bilhassa rotor şaftına dışarıdan etki eden dinamik kuvvetlerin motor yataklarına tahrip edici etkisi sunulmaktadır. Dahası, sunulan titreşim izleme yöntemi, çalışır durumundaki asenkron motorları sürekli olarak izleme imkânı sağlamakta, böylece ilgili operatör tarafından, motor arızalarını tespit esnasında oluşabilecek insani yanılma hatalarını minimum seviyeye düşürmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan yüksek gerilimli asenkron motorlarda meydana gelen elektriksel ve mekanik arızalar, ileri arıza tanı teknikleri ile tespit edilebilmektedir. Bu motorlar üzerinde arıza teşhisi ile ilgili yapılan farklı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Sönmez (2013) çalışmasında, kullandığı titreşim verisini The University of Tennessee- Knoxville (UTK) / Amerika Birleşik Devletleri, bakım ve güvenilirlik merkezinde kurulmuş olan deney düzeneğinden almıştır. Bu düzende asenkron motorlar için hızlandırılmış yedi aşamalı yapay bir yaşlandırma süreci oluşturulmuştur. Bu sürecin her çevriminde motorlara; elektriksel, ısıl ve kimyasal bozucu etkiler uygulanarak, motor performans düzeneği ile motorlardan elektriksel, mekanik ve ısıl ölçümler değerleri ile bir veri kümesi meydana getirilmiştir [4].

Buna göre sadece motor titreşim işaretleri üzerinden inceleme yapmıştır. Toplam altı adet ivmeölçer veri kümesinden, etkin değerleri dikkate alınarak yapılan seçimde, sadece bir ivmeölçerin (motor mil tarafı, saat 2 konumu) ilettiği titreşim işaretleri ile analizler yürütmüştür. Titreşim işaretlerinin analiz edilmesi için öncelikle zaman ve frekans tanım bölgelerinde genlik değişimleri incelemiştir. Buna göre ivmeölçerden alınan titreşim işaretlerinin her yaşlandırma çevriminden sonraki grafik incelemesinde, hem zaman hem de frekans tanım bölgelerinde bozulmaya bağlı olarak işaret genliğinde artma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca güç spektrum yoğunlukları ile yapılan spektral inceleme; özellikle yüksek frekans bölgesinde genlik artışı tespit etmiş, yüksek frekans bandına daha çok yoğunlaşabilmek için yüksek geçiren bir bant filtre uygulamıştır. Yüksek geçiren bant filtre ile koşullandırılan titreşim işaretleri tekrar zaman ve frekans tanım bölgelerinde incelemiş ve öncekine benzer genlik artışlarını tespit etmiştir. Sonraki aşamada ise titreşim işaretlerini istatistiksel olarak incelemiş ve her yaşlandırma çevriminde elde edilen titreşim veri kümesinde veri dağılımına ait istatistiksel parametreleri hesaplamıştır. Bunlar; ortalama değer, standart sapma, çarpıklık ve basıklıktır. Her çevrime ait istatistiksel parametreleri karşılaştırıldığı zaman bunlar arasında en büyük değişimi standart sapma değeri olarak kaydetmiştir. Ayrıca filtre uygulamadan önceki, sağlam durum ile arızalı (son yaşlandırma adımı) duruma ait standart sapma değerlerinin arasındaki oran ile filtrelenmiş işaret ile belirgin bir değerde arttığı gözlemlenmiştir. Buna göre de, uygulanan filtrenin yapılan analizi kolaylaştırdığı değerlendirilmiştir.

İstatistiksel bakımdan, baskın parametre olarak belirlenen standart sapma değeri, aynı zamanda arıza teşhis işlemlerine uyarlanan Entropi tanımında karşılaşılan olasılık değerinin hesaplanması için de kullanmıştır. Shannon Entropi olarak da

bilinen bu kavram, rastlantısal bir olaydaki belirsizlik seviyesinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Böylece yaşlandırma sürecinde her çevrim için yapılan Entropi hesabı ile rulman arızasının gelişimi, hesaplanan belirsizlik seviyesine bağlı olarak belirlenmeye çalışmıştır. Sonuç olarak ise yaşlandırma sürecindeki bir motorun rulmanındaki bozulmanın derecesi, mevcut motor titreşim işaretlerine üç aşamada işaret analiz yöntemlerinin uygulanması ile incelemiş ve bu şekilde rulman arızasının gelişimi takip etmiştir [4].

Kayaalp (2007) çalışmasında, veri madenciliği tekniği aracılığıyla üç fazlı asenkron motordaki sargılarında kısa devre, yalıtım bozuklukları ve motor milindeki dengesizlik hatalarının tespitini ele alınmıştır. Bu tip motorlarda oluşan hataların erken safhada tespit edilmesi maliyet açısından önemli bir kazanç, olduğunu belirtilmiştir. Veri madenciliği büyük miktarlardaki ham verinin içinden kaliteli ve yararlı bilgilerin bilgisayar programları aracılığıyla aranması ve analizidir. Bu amaçla özel bir veri madenciliği yazılımı kullanmıştır. Bu yazılıma 3 faz akım ve gerilim ile sol ve sağ bant için bant geçiren filtre uygulanmış, akım değerleri giriş parametresi olarak verilmiş, bu giriş parametrelerine yazılımda sınıflandırma tekniklerinden karar ağacı algoritmaları uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda karar ağacının ürettiği kuralların geçerliliği ispatlanmıştır. Elde edilen bu kurallara göre asenkron motorlarda yukarıda adı geçen hataların bulunması için tek faz akımı yeterli olmaktadır [5].

Jeffali ve diğerleri (2015) çalışmasında, asenkron motorlarda arıza tespiti için termal kamera ile görüntülemeye dayanan bir metodolojiyi, motor gövdesinde ısınmaya neden olan hizalanmamış kaplin ile oluşan mekanik arızaların, kızılötesi teknoloji ile tespitini ve bu arızaların üretim zinciri boyunca yankılarını sunmuşlardır. Bu çalışmada için asenkron motor, kaplin ve rulmanlardan oluşan uygun bir test düzeneği oluşturmuşlardır. Düzenek üzerinde kaplin hizalama açılarının değiştirilmesi sonucu; rulmanların daha fazla strese ve sürtünmeye maruz kaldığını, ortalama tork değerinin azaldığını, verimliliğin düştüğünü ve motor gövdesinde metal sıcaklığının arttığını tespit etmişlerdir. Dönen kısımların sıcaklık değişimini izlemek, ilgili kısımların kalan kullanım ömürlerinin tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir [6].

İngenç ve diğerleri (2014) asenkron motorlarda eksenden kaçıklığı, stator ile rotor arasında dengesiz hava aralığı olarak tanımlamış ve bu hava aralığında meydana gelen dengesiz manyetik çekim sebebiyle; faz akımları, moment ve hızda salınım oluştuğunu ayrıca ilave bileşenlerin üretildiğini ileri sürmüşlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle asenkron motor modellemiş, sağlam ve 2 faklı seviyedeki statik eksenden kaçıklık arızası durumu için motor akım, hız ve tork sinyallerinin yüksüz ve tam yük değerlerini karşılaştırmışlardır. Eksenden kaçıklık arızasının motor hız ve tork sinyallerinde oluşturduğu salınımlar arıza miktarı ile arttığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte bu arıza başlangıç safhasında tespit edilemezse, rotorun statora sürtmesi ile daha büyük arızaların meydana gelebileceğini buna ek olarak hız ve tork değerinde oluşan salınımların hava aralığında oluşturduğu düzensiz manyetik çekimlerin, motorun daha gürültülü çalışmasına sebep olacağını belirtmişlerdir [7].

Othman ve diğerleri (2015) asenkron motor da yıkıcı hasarlara neden olan rulman hatalarını tespit için kullanılan titreşim ve akustik yayılım yöntemlerini birbiri ile mukayeselerini yapmışlar, zaman tabanlı domain etkinliği ile frekans tabanlı domain arasında karşılaştırmayı elde edilen grafikler ile değerlendirmişlerdir. İstatistiksel incelemede değişkenleri zaman tabanlı domain için RMS, krest faktör ve basıklık olarak seçmişlerdir. Ayrıca normal ve zarflama tekniği ile frekans domain için ise “Hilbert” dönüşümü uygulamışlardır. Buldukları sonuçlara mahsuben, titreşim ve akustik yayılım sinyallerinin hem zaman tabanlı hem de frekans tabanlı domain de motor rulman arızasını saptamak için etkili olduğunu ortaya koymuşlardır [8].

Orman ve diğerleri (2013) gürültülü endüstriyel çevrelerde kullanılan elektrik motorlarının akustik analiz yöntemi ile makinalar üzerinde arıza konum tespitini araştırmışlardır. Bu çerçevede statik eksenden kaçık ve gevşek ayak hatalarını bulunduran asenkron motor ile sağlam başka bir asenkron motoru gözlemlemişlerdir. Yapısında 48 adet mikrofon dizisi bulunan ve ses kaynağının yerinin belirlenmesini sağlayan akustik kamera ile ses ölçümlerini, piezoelektrik ivmeölçerler ile de vibrasyon ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Durum izlemede kullanılan vibrasyon analiz sonuçlarını, akustik ölçüm değerlerinin değerlendirilmesinde referans olarak kullanmışlardır. Elde ettiği sonuçlara istinaden gürültülü ortamlarda akustik analiz ile elektrik motorlarının durum gözleminde başarılı bir şekilde kullanılabilceğini,



herhangi bir akustik güç çevirici, makine üzerine montajlanmamasının akustik analiz yöntemini güç kıldığı ifade etmişlerdir [9].

Hulugappa ve diğerleri (2012) çalışmalarında, titreşim, stator akımı, akustik yayınım, şok darbe ve yüzey analiz ölçümlerini, asenkron motor da bulunan hasarlı rulman üzerinde farklı yükler ve hızlar uygulayarak karşılaştırmışlardır. Asenkron motor, kayış kasnak ve yük sisteminden hazırlanan test düzeneği, motor tahrik tarafında bulunan hasarlı rulmanın durumu gözlemlemek için oluşturulmuştur. Vibrasyon ölçümü için piezoelektrik ivmeölçer ve FFT analizörü, stator akım ölçümü için akım toplayıcı ve FFT analizörü, akustik yayınım ölçümü için güç çevirici, amplifikatör ve bazı filtreler, şok darbe ölçümü için el tipi darbe ölçerler kullanmışlardır. Çıkarılan sonuçlara göre hasarlı rulman arızasının tespitinde ölçüm yöntemlerin etkinliğini sırasıyla akustik yayınım, şok darbe, titreşim, stator akımı ölçümleri olarak ifade etmişlerdir. Bununla birlikte stator akım ölçümü minimum teçhizat gerektiren bir teknik olarak avantajlı olduğunu bildirmişlerdir [10].

Chaudhary ve diğerleri (2015) çalışmalarında, asenkron motorlarda arızaya neden olan titreşim kaynaklarını mekaniksel ve elektriksel olarak tasnif etmişler, meydana gelebilecek arıza tiplerinin tespitinde farklı durum izleme yöntemleri içinde, titreşim ölçümünün en güçlü yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Vibrasyon ölçüm prosedürünü gerçekleştirmek için ivme ölçer, FFT analizörü ve özel bir software kullanarak, ham verileri toplamışlardır. Dalga formunu inceleyerek döner makinaların arıza durumunu değerlendirmişlerdir [11].

Rızvan (2015) çalışmasında, düşük güç ve devir değerlerine sahip endüstride çalışan bir asenkron motorun periyodik ölçümlerden toplanan ham verilerin, frekans tabanlı spektral analizini gerçekleştirmiştir. 4-5 g değerlerine ulaşan 1. ve 2. rotor geçiş piklerini analiz etmiştir. Ayrıca 0-60.000 CPM aralığında motor devrinin ilk 4 kat katı değerlendirilerek, motor yataklarında gevşeklik olduğunu tespit etmiştir. Motor bakım için sökümü yapıldığında ise; rotor ve statorda sürtünmeden kaynaklı hasarların mevcudiyeti, yataklarda mekanik gevşekliğin olduğu gözlemlenmiştir. Bakım aktivitelerinin ardından yapılan vibrasyon ölçümlerde toplam ivme değerlerinin 0,2 g değerine gerilediği belirtilmiştir [12].

Misra ve Agarwal, (2015) çalışmalarında, on-line akım trendini izleyerek asenkron motorlarda oluşan arızaların tespitini ve tanısını araştırmışlardır. Ölçümlerde, sinyali algılamak için kullanılan akım transformatörü, akım transformatörünün çıkışına bağlanan dirençli şönt ve akım sinyallerini işleyen spektrum analizörü kullanmışlardır. Bu kapsamda endüstriyel uygulamalarda arıza tespiti için kullanılan motor akım sinyal analiz tekniğini içeren iki adet örnek sunmuşlardır. Verilen örneklerde bir adet sağlam ve bir adet arızalı asenkron motor kullanmışlardır. Ham veriler motor yataklarında toplandıktan sonra, spektrum analizörü ile frekans tabanlı akım spektrum grafiğine dönüştürülerek sinyalleri işlenmiştir. Arızalı motorun aynı frekans tabanında akım şiddetinin dB cinsinden değerinin sağlam motora göre arttığını tespit etmişlerdir. Bu bağlamda akım sinyal analiz tekniğinin önceden arıza teşhisinde fayda sağladığını belirtmişlerdir [13].

Udayakumar ve Khanan, (2013) çalışmalarında, asenkron motor tahrikli ünitelerinin kablosuz donanım ve yazılım tasarımını içeren durum gözleme sistemini incelemişlerdir. Motor mekanik arızalarını saptamak için titreşim sinyallerini analiz etmişlerdir. Rotor dengesizlik göstergesi, önleyici bakımın çok yararlı bir parçası olan şiddet seviyesinin aralığını tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Kablosuz durum izleme sistemi çeşitli çalışma koşullarında test etmişler ve tatminkâr şekilde çalıştığını bildirmişlerdir [14].

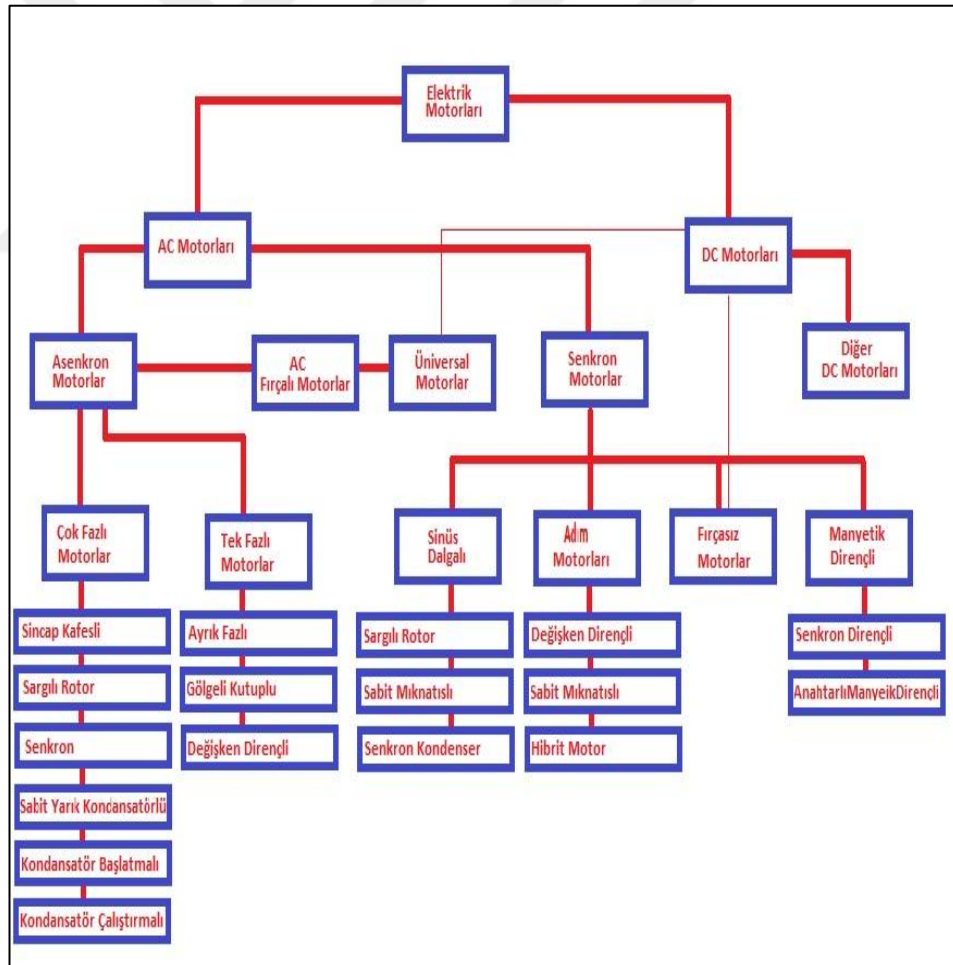
Kumar ve diğerleri (2016) çalışmalarında, tehlikeli endüstriyel senaryoda çalışan asenkron motorların durumunun etkin bir biçimde izlenmesi için kullanılan çeşitli parametrelerin kısa bir çalışmasını açıklamışlardır. Bu bağlamda, bugüne kadar kullanılan etkin durum izleme ve arıza analizi için kullanılan asenkron motor parametrelerinin ayrıntılı bir incelemesini sunmuşlardır. Yaptıkları ayrıntılı araştırmalara istinaden, titreşim ölçümünün tüm mevcut durum izleme tekniklerinin birleşimi olduğunu ortaya koymuşlardır. Asenkron motorlarda oluşan mekanik arızaların daha etkili bir şekilde teşhisi için, uygun parametre olarak titreşimin seçilmesini göstermişlerdir. Vibrasyon görüntüleme tahribatsız muayene tekniğidir fakat konumlandırma için özel sensörler gerektirir. Bu görüntüleme, kısmi boşalma tekniği ve eksenel kaçak akışı denetimi ile karşılaştırıldığında, çok güvenilir olduğu için, dönen elektrikli makinelerde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca elektrikli makinelerde arızaların kök sebebinin tespitinde istenen mekanik ve

elektromanyetik uyarıcı kuvvetler arasında, ayırım yapabilme kabiliyeti sunar. Üstün ve dijital olarak örneklenmiş mekanik titreşim verilerinin kullanılabilirliği, asenkron motorlarda daha iyi ve verimli on-line görüntüleme imkânı verir. Çalışmalarını farklı yazarların çeşitli yayınlarından alınan ilgili aritmetik denklemler, sonuçlar ve farklı arıza tespit parametreleriyle ilgili temel kavramlarla birlikte detaylandırmışlardır. Gelecekteki araştırmacılara, yaptıkları araştırmanın kuşbakışı bir bakış açısı sunacak ve bir bakışta araştırma alanını anlamaya yardımcı olacağı sonucuna varılacaktır [15].



## 1. ASENKRON ALTERNATİF AKIM MOTORLARI

Asenkron motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için endüstriyel üretim hatlarında dünya çapında kullanılan uygulaması kolay elektromekanik cihazlardır [16]. Bu motorlar; pompalar, fanlar, hava kompresörleri, takım tezgâhları, karıştırıcılar ve konveyör bantları gibi pek çok endüstriyel uygulama için sağlam, kolay kurulum, kontrol ve uyarlanabilir olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Dahası, asenkron motorlar, doğrudan bir sabit frekanslı sinüzoidal güç kaynağından veya bir AC değişken frekanslı sürücü ile tedarik edilebilir. Farklı tipteki elektrik motorları sınıflandırılması Şekil 1.1.'de gösterilmektedir [17].

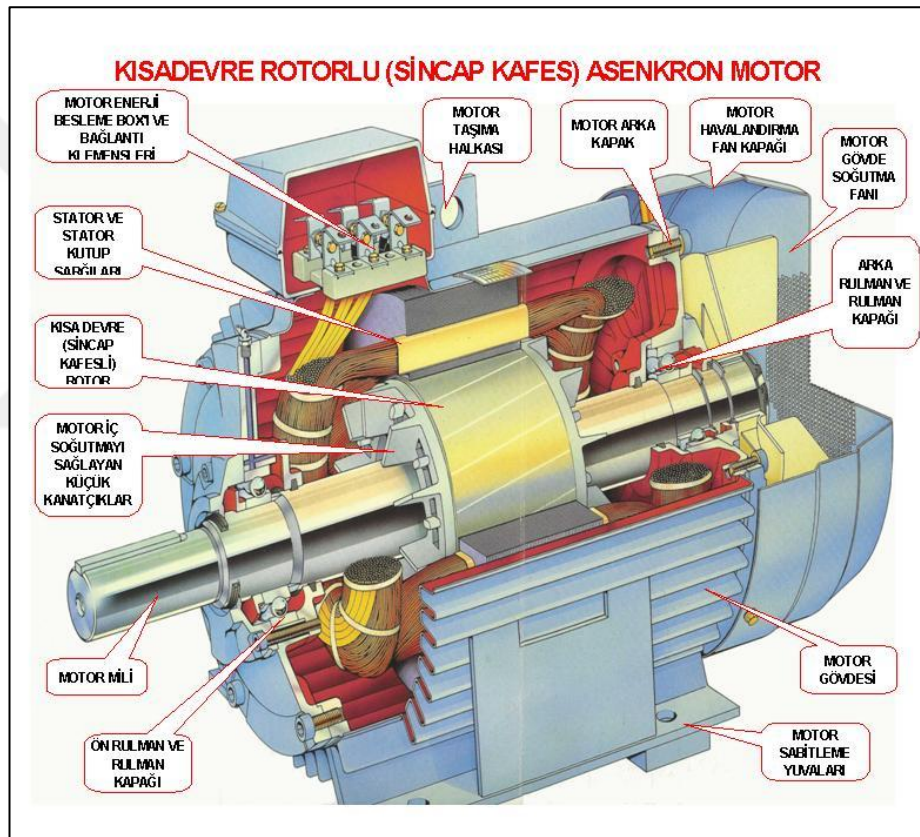


Şekil 1.1. Farklı tip elektrik motorlarının sınıflandırılması

Elektrik motorlarının çeşitleri ve uygulamaları geniş kapsamlı olduğundan, bu tez konusunda büyük güçte asenkron alternatif akım motorlarına odaklanılmaktadır. Literatürde yaygın olarak görüldüğü üzere, üç fazlı sincap kafesli motorlara bu tez boyunca asenkron motor denilecektir.

### 1.1. Asenkron AC Motor Bileşenleri

Bir asenkron motor Şekil 1.2'de gösterildiği gibi çeşitli parçalara sahip olmakla birlikte, esas itibarıyla bir sincap kafes rotoru ve bir sargı statorundan oluşmaktadır [18].



Şekil 1.2. Bir asenkron motorun iç yapısı [18]

Asenkron motora ait sincap kafesli rotor; bir mil ve plakalar istifinden oluşur [18]. Rotorun ana kısmı barlardan ve iki uç halkadan oluşan sincap kafestir. İletken rotor çubukları, uç halkalar tarafından her iki taraftan kısa devre yaptırılmıştır. Böylece, elektrik akımı sincap kafesin bir tarafından diğer yanına dolaşır. Çubuklar, rotora stator sargılarından gelen manyetik akımı yoğunlaştıran lamine demir çekirdeği ile sarılır. Plakalar rotor mili mekanik olarak destekler. Rotor milinin her iki tarafındaki rulmanlar, rotorun stator içerisinde serbestçe sürtünmeden dönmesine ve mil üzerine

etki eden yüklerin motor üzerinde dağılımına izin verir. Şekil 1.3 asenkron motorda bulunan sincap kafesli rotoru göstermektedir.



Şekil 1.3. Bir sincap kafesli asenkron motorun rotoru [18]

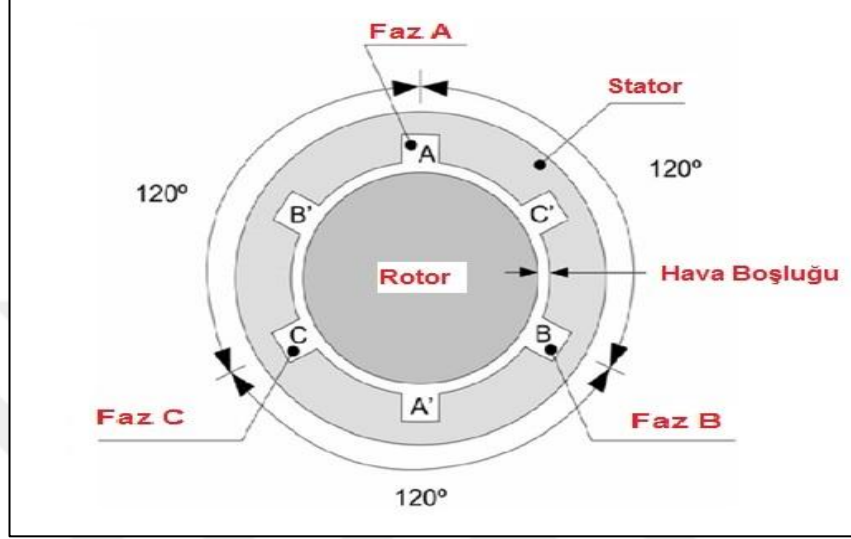
Stator, asenkron motorun duran kısmıdır. Silisyumlu saçlardan meydana gelir. Döner manyetik alan bu kısımda oluşur. Güç kaynağına sadece stator bağlıdır. Rotorun enerjisi, stator manyetik alanının asenkron dönüşü ile indüklenerek iletilir. Dolayısıyla "indüksiyon motoru" adı bu tabirden türetilir. Stator ile rotor arasında hava boşluğu adı verilen bir boşluk bulunduğu dikkat edilmelidir. Şekil 1.4'te tipik bir sincap kafesli asenkron motorun stator bileşenlerini gösterilmektedir [18].



Şekil 1.4. Bir sincap kafesli asenkron motorun statoru [18]

## 1.2. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi

Bir asenkron motorun çalışma prensibi eş zamanlı olarak dönen manyetik alana dayalıdır. Stator, Şekil 1,5'te gösterildiği gibi  $120^\circ$  elektriksel olarak kaydırılan üç sargıdan oluşur. Üç sargı, üç fazlı bir AC güç kaynağına bağlıdır [19].



Şekil 1.5. Bir sincap kafes iki kutuplu asenkron motor şeması [19]

Bir akım, bir bobin içinden geçtiğinde, bu bobinde iki kutuplu (kuzey ve güney) manyetik bir alanı oluşturur. Oluşan manyetik alan  $H$ , akım  $I$  ile orantılıdır.  $H$  manyetik alanı bir sinüzoidal mekânsal dağılım karakteristiğine sahiptir ve kutupları  $180^\circ$ 'e kadar tersine çevirir. Böylece, stator sargılarına üç fazlı stator akımı  $I_A$ ,  $I_B$  ve  $I_C$  uygulandığında üç manyetik alan,  $H_A$ ,  $H_B$  ve  $H_C$  üretilir. Üç fazlı stator akımlarının  $120^\circ$ 'lik faz kayması,  $H_A$ ,  $H_B$  ve  $H_C$  olmak üzere üç manyetik alan üzerinde,  $120^\circ$ 'lik faz kaydırma sağlar. Manyetik akımın yolu ise, rotor ve stator içinden geçmektedir.

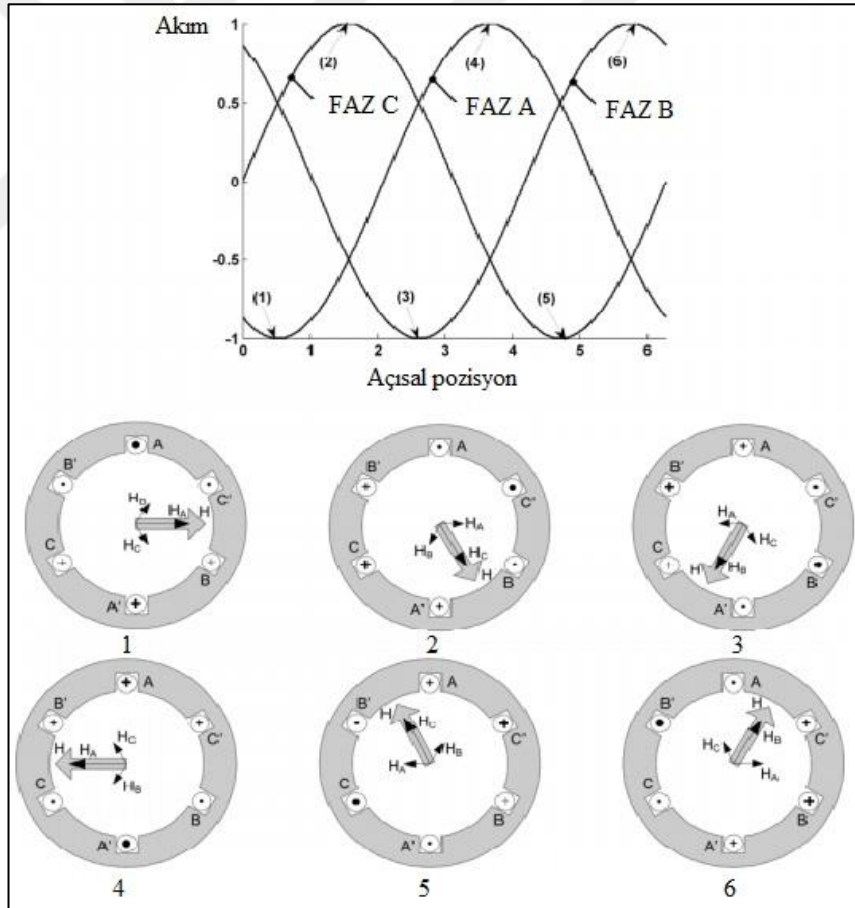
Anlık meydana gelen toplam manyetik alan, aynı anda  $H_A$ ,  $H_B$  ve  $H_C$  manyetik alanlarının toplamına eş değerdir. Ortaya çıkan manyetik alan, Şekil 1,6'da gösterildiği gibi döner. Bu şekilde gösterilen üç fazlı stator akımının (1) numaralı anı; Faz akımı A'nın tepe değeri ve maksimum değer yarısına eşit genlik değerine sahip manyetik alan  $H_B$  ve  $H_C$  nedeni ile maksimum manyetik alan  $H_A$ 'yı verir. Bu anlık manyetik alan,  $H_A$  yönüne de olur. Benzer şekilde, aynı süreç (2)'den (6)'ya kadar olan durumlar için eş zamanlı olarak dönen sabit genlikli manyetik alan verecek biçimde tekrarlanır. Böylece, stator bobinlerine uygulanan üç fazlı akımlar



tarafından üretilen bu dönen manyetik alan, statorun gelen manyetik akı, rotor çubukları tarafından kesildiğinde, rotor çubuklarında elektrik akımı oluşturur.

Rotor akımları, statora göre zıt polariteye sahip rotor üzerinde bir manyetik alan oluşturur. Karşı kutuplar, statorun dönen manyetik alanını takip eden rotora çektiğinden, rotorun dönüşü statorun dönen manyetik alanından biraz daha yavaş olur.

Statorun ve rotor çubuklarının dönen alanları arasındaki dönüş hızındaki bu fark, kayma hızı olarak adlandırılır. İki kutuplu asenkron motorun dönen manyetik alanı. Koyu noktalar ve koyu artı işaretleri, en yüksek noktalar arasındaki faz akımlarını temsil eder. Normal noktalar ve artı işaretleri, zirve değerinin yarısına eşit olan genliklere sahip faz akımlarını temsil eder [20].



Şekil 1.6. Bir sincap kafes üç fazlı asenkron motor faz şeması [19]



### 1.3. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

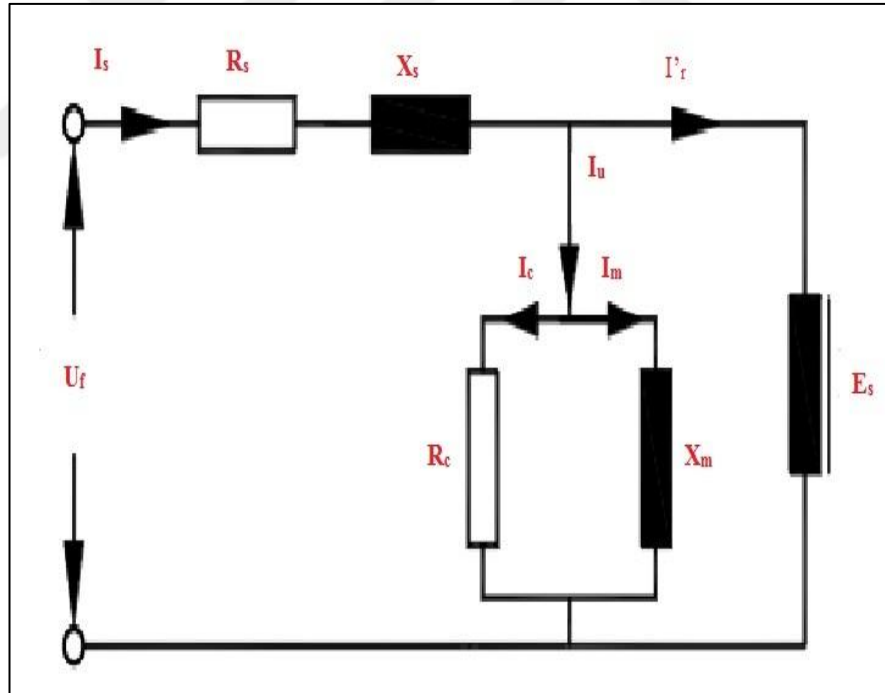
Asenkron motor sargıları üzerinde oluşan manyetik alanın büyük bir kısmı nüve üzerinden devresini tamamlarken, küçük bir kısmı hava yoluyla devresini tamamlar.

Kaçak akıdan dolayı oluşan reaktans  $X_{sl}$  ile bobin iç direnci  $R_s$  birbirine seri olarak bağlanır. Ayrıca sargılarda indüklenen gerilim  $E_s$ , uygulanan gerilim  $U$  ile stator direnç ve reaktansın da düşen gerilimlerin farkına eşittir. Bu ifadeler Denklem (1.1) ve (1.2)'de gösterilmiştir [45].

$$E_s = U_s + I_s (R_s + jX_s) \quad (1.1)$$

$$E_s = U_s - I_s \sqrt{(R_s)^2 + (X_s)^2} \quad (1.2)$$

Rotor ve manyetik devreden akımı karşılayan  $I_s$  akımı  $I_r$  ve  $I_u$  olmak üzere iki ye ayrılır. Dolayısıyla stator devresinin eş değeri aşağıdaki gibi olur [45].



Şekil 1.7. Asenkron motor stator eşdeğer devresi

Rotor devresi ise, kaymaya bağlı olarak rotor empedansı değişir. Kaymayla ilişkili olan  $E_r$  ve  $E_{r1}$  değerleri aşağıdaki gibi ifade edilir. Bu kapsamda; ilgili eşitlikler, rotor eşdeğer devresi ve motorun komple bir faz devresi aşağıdaki gibi çizilir [45].



kapsarken, yapısal bozukluklar ise, zamanla motor iç ve dış parçalarında meydana gelen korozyon, motor şasesinde oluşan fiziki deformasyonlar ve üretim kaynaklı hatalar yapısal bozuklukları tanımlar.

Yukarıda bahsedilen durumların birinin veya birkaçının beraber oluşmasına bağlı olmakla beraber, asenkron motor arızaları mekanik ve elektromekanik olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

Mekanik kaynaklı arızalar, tüm dönen makinelerde karşılaşılan genel arıza tipleridir.

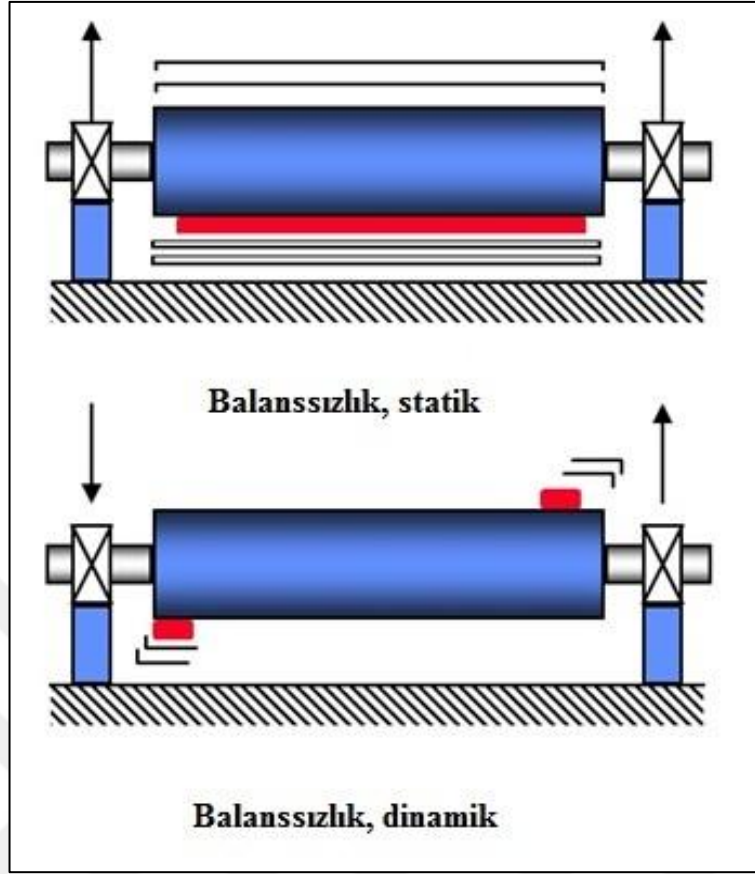
Elektromanyetik arızalar ise, elektrik motorlarına özgü ve özellikle asenkron motorları kapsayan arıza tipleridir. Sıklıkla karşılaşılan bu arıza tipleri motor ömrünü kısaltmak ile beraber, üretim kayıplarına da neden olmaktadır. Aşağıda bu arıza tipleri kısaca açıklanmıştır.

Mekanik temelli arızalar; balanssızlık, hizasızlık, mekanik gevşeklik, rulman problemleri, arızalardır.

Elektromanyetik temelli arızalar; radyal ve teğetsel kuvvetlerin bir fonksiyonu olarak sonuçlanan ve daimi olarak motor iç ve dış bileşenlerinde oluşan elektromanyetik kuvvet bütünsüzlüğü nedeni ile oluşan arızalardır. Bunlar rotor problemleri ve stator problemleridir [21].

#### **1.4.1. Balanssızlık**

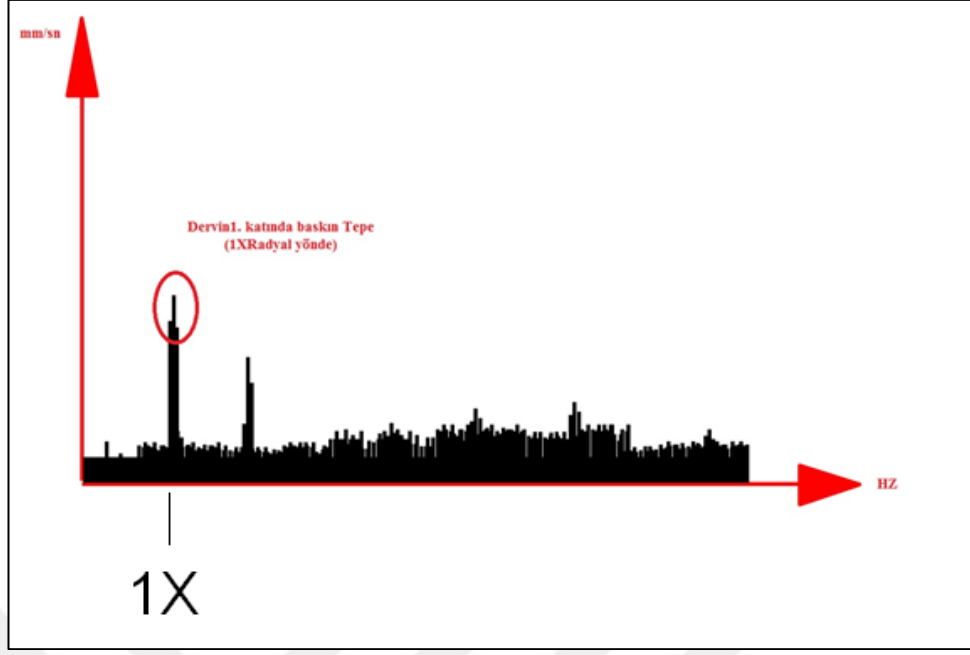
Balanssızlık; bir dönen aksamda, dönme merkezindeki kütle merkezinin düzensiz dağılımıdır. Kullanılan iki terminoloji vardır. Dönme merkezi ve geometrik merkez. Bu iki merkez birbiri ile çakıştığında, rotor dengede olacaktır. Asenkron motorlarda balanssızlık, rotor geometrik merkezi (kütle merkezi) ile manyetik alan dönme merkezinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkar. Statik ve dinamik olmak üzere iki tip balanssızlık vardır. Şekil 1.10. çok yaygın bir şekilde karşımıza çıkan statik ve dinamik balanssızlığı göstermektedir. Statik balanssızlık; rotor ağırlık merkezinin dönme eksenine üzerinde olmayıp, dönme eksenine paralel olması durumudur. Dinamik balanssızlık; rotor ağırlık merkezinin dönme eksenine üzerinde olup, dönme eksenine paralel olmaması durumudur. Rotorun üzerinde dairesel olarak gösterilen ağırlık merkezi, dönme ekseninde değildir fakat dönme eksenine paralel durumdadır.



Şekil 1.10. Balanssızlık gösterimi

Balanssızlık probleminin kaynağı; hatalı montaj, yapışmalar, aşınma, kırılan ya da düşen parçalar olabilir. Rotorun belirli açılarla belirli noktalarına ağırlıklar konularak balanssızlık giderilir [22].

Balanssızlık; frekans tabanlı spektrum grafiğinde daima radyal yönde, devrin birinci katında, baskın tepe şeklinde kendini gösterir. Aşağıdaki şekil, tipik balanssızlık tanısının titreşim analizi ile frekans tabanlı-hız grafiği ile gösterimidir [23].

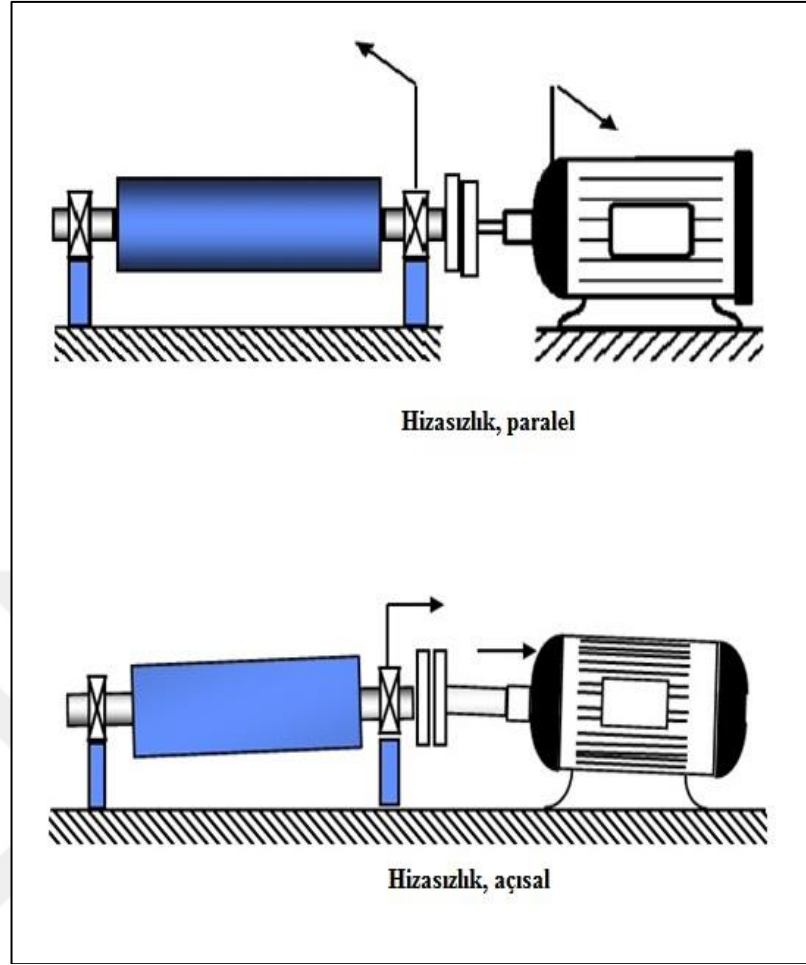


Şekil 1.11. Spektrum grafiğinde balanssızlığın tespiti

#### 1.4.2. Hizasızlık

Hizasızlık; bir ünite üzerinde dönen iki şaftın, merkez eksenlerinin bir birlerini karşılamaması durumdur. Tahrik ünitesi ile tahrik olunan ünite arasında geometrik hiza ekseni birbiri ile çakıştığında, ünite hizalı olacaktır. Şayet bu geometrik hiza bozulacak olursa, hizasızlık meydana gelecektir.

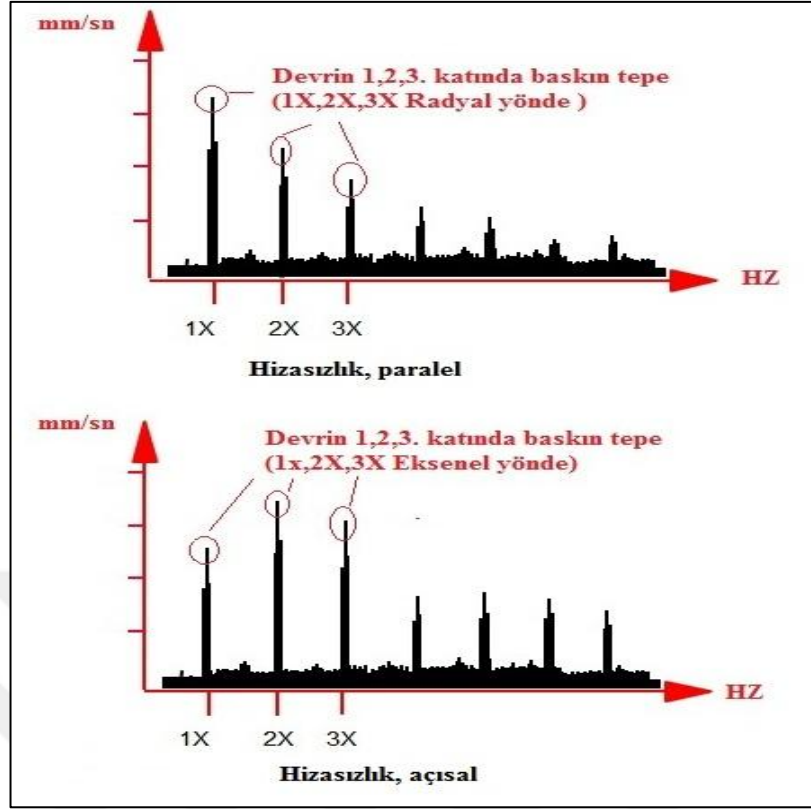
Paralel ve açısal olarak iki tür hizasızlık vardır. Şekil 1.12. çok yaygın bir şekilde karşımıza çıkan paralel ve açısal hizasızlığı göstermektedir. Şaft eksenleri birbirlerine paralel fakat birbirlerini aynı noktada karşılamıyor ise paralel hizasızlık olarak adlandırılır. Şaft eksenleri aynı noktada birbirlerini karşılıyor fakat şaft eksenleri paralel değilse bu tür hizasızlık ise açısal hizasızlık olarak adlandırılır.



Şekil 1.12. Hizasızlık gösterimi

Hizasızlık problemlerinin kaynağı; geometrik hizanın herhangi bir neden ile kaybolması, hatalı montaj, eğilme - burulma gibi kuvvetlerin sebep olduğu gerilmeler, sıcaklık farkları, mekanik titreşimler, bağlantı gevşekliği vb. durumlar sayılabilir [27].

Hizasızlık; frekans tabanlı spektrum grafiğinde ağırlıklı olarak aksel yönde, devrin birinci, ikinci ve üçüncü katlarında, baskın tepeler şeklinde kendini gösterir. Artan titreşimle beraber radyal yöndeki titreşim değerlerinde de artış gösterir. Aşağıdaki şekil, tipik hizasızlık tanısının titreşim analizi de frekans tabanlı-hız grafiği ile gösterimidir [23].

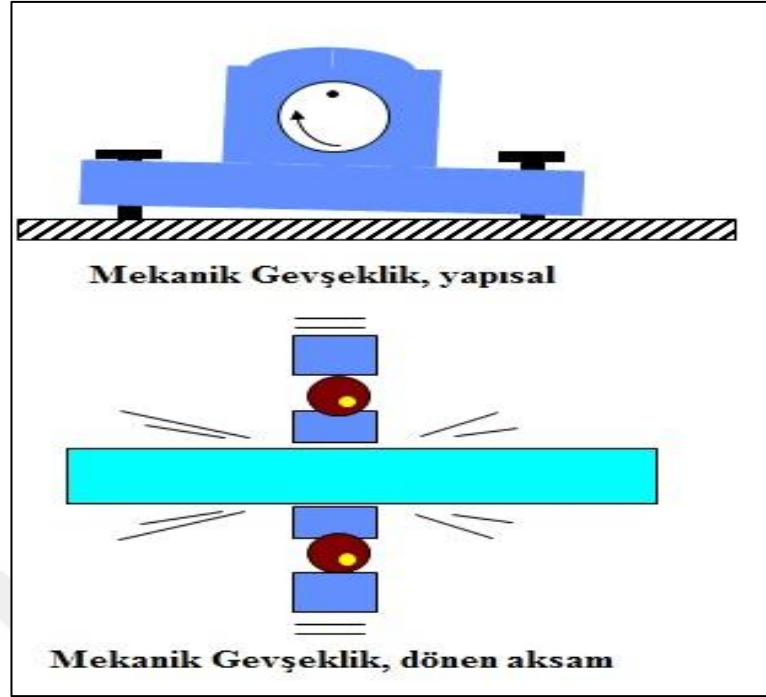


Şekil 1.13. Spektrum grafiğinde hizasızlığın tespiti

#### 1.4.3. Mekanik gevşeklik

Mekanik gevşeklik; bir üniteyi oluşturan iç ve dış elemanların bileşim noktalarında dinamik kuvvetler vasıtasıyla zamanla meydana gelen gevşemelerdir.

Yapısal ve dönen aksam olmak üzere iki tür mekanik gevşeklik vardır. Şekil 1.14. çok yaygın bir şekilde karşımıza çıkan mekanik gevşeklik türlerini göstermektedir. Makine ile makinenin sabitlendiği temel arasındaki bağlantı zayıflığına yapısal gevşeklik adı verilirken, sabit elemanlar ile dönen elemanlar arasındaki aşırı aralık nedeniyle meydana gelen gevşekliğe dönen aksan gevşekliği adı verilir [28].

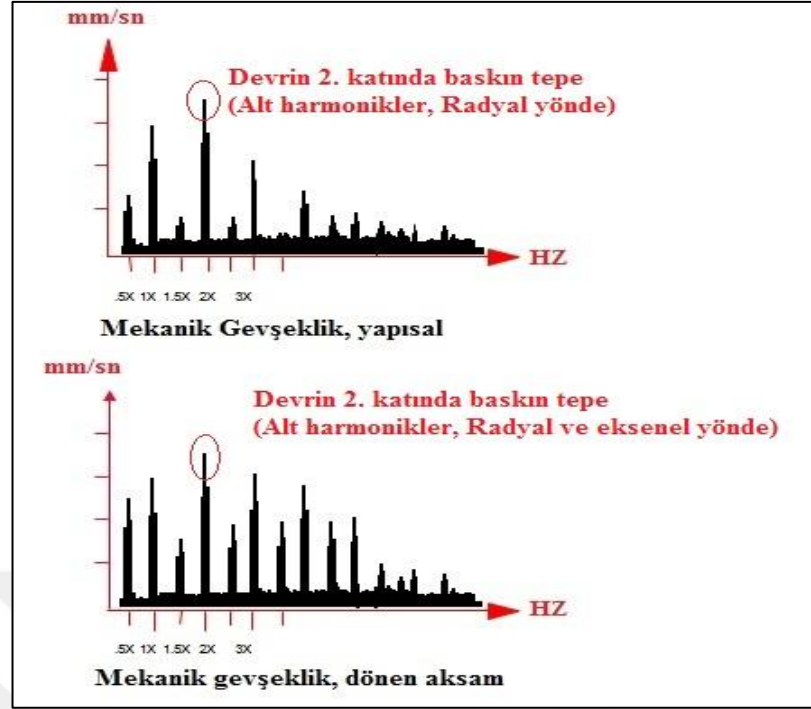


Şekil 1.14. Mekanik gevşeklik gösterimi

Gevşeklik problemlerinin kaynağı; bağlantı elemanlarının ekonomik ömrünü tamamlaması, hatalı montaj, deformasyon, aşırı zorlayıcı kuvvetlerin sebep olduğu gerilmeler, mekanik titreşimler vb. durumlar sayılabilir [27].

Mekanik gevşeklik; frekans tabanlı spektrum grafiğinde özellikle devrin ikinci katı baskın olmak kaydıyla devrin katları ve devir katlarının alt harmonikleri şeklinde kendini gösterir. Artan titreşimle beraber tüm yönlerde titreşim değerlerinde de artış gözlemlenir. Aşağıdaki şekil, tipik mekanik gevşeklik tanısının titreşim analizi de frekans tabanlı-hız grafiği ile gösterimidir [23].

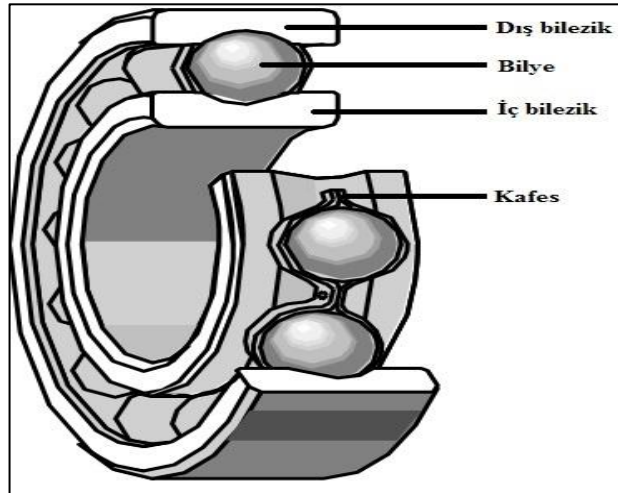




Şekil 1.15. Spektrum grafiğinde mekanik gevşekliğin tespiti

#### 1.4.4. Rulman hasarları

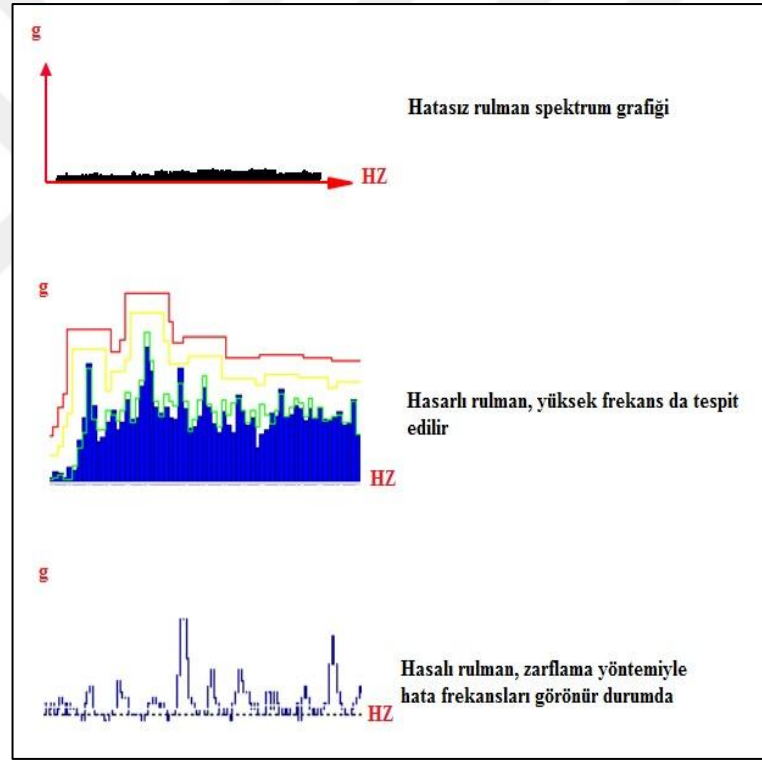
Rulman hasarları; dönen mili destekleyen ve sabitleyen rulmanlarda (yataklar) rulman yük taşıma kapasitesini aşan yük ile yüklendiğinde rulmanların deforme olup görevlerini yapmamasıdır. Dış bilezik, iç bilezik, bilye ve bilyeleri tutan kafeste oluşan hasarlar, rulman hasarları olarak isimlendirilir. Şekil 1.15. rulmanlarda gerçekleşen hasar konumları gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Rulman hasarları gösterimi

Rulman hasarlarının kaynağı; yetersiz yağlama, aşırı yağlama, yetersiz hizalama, balanssızlık, mekanik gevşeklik vb. durumlar neticesinde yataklara hem eksenel yönde, hem de radyal yönde dinamik kuvvetlerin yansımalarıdır. Sonucunda ise çatlak ve korozyon gibi hasarların rulmanın her hangi bir parçasında dağınık veya bölgesel oluşmasıdır [29].

Rulman hasarları; hasarsız rulmanlara ait frekans tabanlı spektrum grafiğinde düz ve düşük genlik değerleri mevcuttur. Hasarlı rulmanlara ait spektrumda karmaşık ve yüksek genliklere sahip tepeler daima yüksek frekanslarda kendini gösterir. Zarflama yöntemi ile bu genlikler daha belirgin duruma getirilir. Aşağıdaki şekil, tipik rulman hasar tanısının titreşim analizi de frekans tabanlı-hız grafiği ile gösterimidir [23].



Şekil 1.17. Spektrum grafiğinde rulman hasalarının tespiti

#### 1.4.5. Elektriksel problemler

Asenkron elektrik motorla arızaları genellikle mekanik veya elektriksel nitelikte olur. En yaygın mekanik problemleri şuna kadar tartışıldı. Elektriksel nitelikteki problemler de mekanik problemler gibi titreşim spektrumunda izlenebilir.

Elektriksel problemlerin sebep olduğu titreşimin en büyük kaynağı rotor ve stator arasında eşit olarak dağılmamış manyetik kuvvetlerdir. Eşit olmayan manyetik kuvvetlerin nedenleri aşağıda sıralanmıştır [31].

- Kırık rotor
- Dengesiz fazlar
- Rotor stator eksenel ayarsızlığı
- Eşit olmayan hava boşluğu

#### **1.4.6. Rotor problemleri**

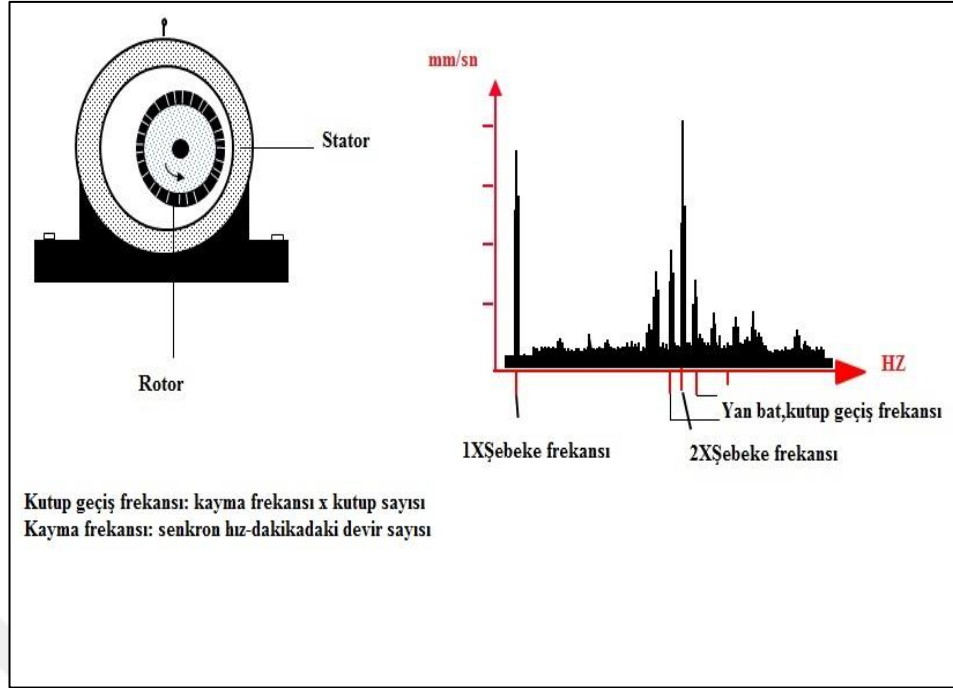
Basit ve kararlı yapılarından dolayı çoğu endüstriyel tesisin hayati uygulamalarında tahrik ünitesi olarak kullanılan asenkron motor arızaları, tesislerin kullanım şartlarına göre zaman içinde ağırlıkla rotor kısımlarında karşımıza çıkmaktadır. Oluşan bu arızaların en önemli sebepleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Çubuklarda korozyondan dolayı oluşan çukurcuklar
- Termal genişmeden dolayı meydana gelen kayıplar
- Manyetik alan düzensizliği nedeniyle oluşan titreşim ve gürültü
- Üretici hataları
- Yetersiz parça birleşim işlemleri
- Aşırı kir, yağ ve pas gibi bileşiklerin motor yapısında birikmesi

Bu negatif etkiler rotor üzerinde toplandığında, rotor problemleri kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir. Bu kapsamda rotor arızaları aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

- Kırık rotor barları
- Kısa veya açık sargılar
- Eğik rotor
- Eksantrik rotor

Yukarıda sayılan rotor problemleri, alternatif akım motorlarında değişen bir kuvvetle titreşime sebep olduğundan zaman dalga formu genlik modülasyonu şeklinde ortaya çıkacaktır. Daha önemlisi frekans tabanlı spektrum grafiğinde ise şebeke frekansının 2. katında ve bu frekansta bulunan tepenin her iki tarafında motor kutup geçiş frekansına ait tepeler oluşacaktır. Aşağıdaki şekil, tipik rotor arıza tanısının titreşim analizi de frekans tabanlı-hız grafiği ile gösterimidir [23, 32].



Şekil 1.18. Spektrum grafiğinde rotor problemi tespiti

#### 1.4.7. Stator problemleri

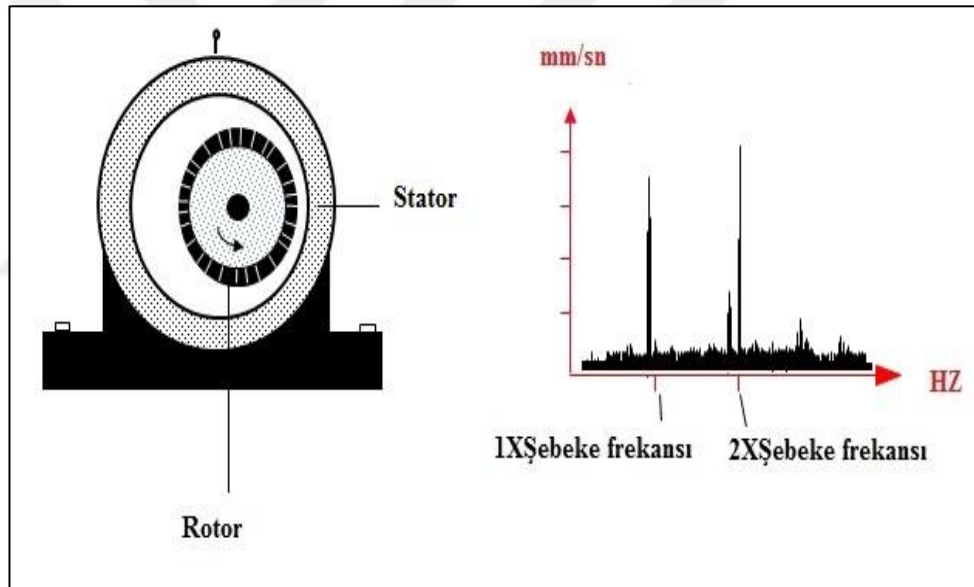
Olumsuz çalışma koşulları (elektrik, mekanik veya çevresel) bir stator bobininin ömrünü önemli ölçüde kısaltabilir. Stator bobinlerinde meydana gelen problemlerin başında, sargılardaki yalıtım malzemesinin bozulmasıdır. Bu tip yalıtım hatası tipik olarak kirleticiler, aşınma, titreşim veya gerilim artışından kaynaklanır. Bu kapsamda stator problemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Gerilim dalgalanmaları
- Dengesiz gerilim
- Aşırı yük
- Kısa devre (fazlar arasında, sargı dönüşlerde, bağlantı noktalarında)
- Yuva içinde topaklanmış sargı yığınları
- Rotor kilitlenmesiyle meydana gelen hasarlar

Herhangi bir asenkron motorun stator sargılarında meydana gelebilecek en ufak bir deformasyon, başlangıç seviyelerde dengesiz akım çekilmesine, ardından motor mil yataklarına aşırı dinamik yüklerin yüklenmesine neden olacaktır. Belirtileri bu şekilde başlayan stator arızaları, stator sargılarının tamamen yanmasına kadar gidecektir. Çoğunlukla aniden meydana geldiği düşünülen bu problemler, aslında uzun bir sürecin sonucunda, motoru servis dışı bırakacaktır.

Asenkron motorlarda meydana gelen bu tür stator problemlerinin büyük bölümü, titreşim görüntüleme sistemleri ile kolayca takip edilebilir. Bunun için; statorda alternatif kuvvetlere neden olan manyetik alan, termal, elektriksel, mekanik ve stresten kaynaklı bir sorun ile tetiklendiğinde, manyetik alanın dönme hızına ait frekans 'ta titreşim meydana gelir Bu duruma ait veriler mobil durum izleme cihazları toplanabilir ve spektrum grafiklerinde arıza nedenleri kolayca analiz edilebilir [33].

Stator problemleri, rotor problemlerinin tespitinde olduğu gibi aynı tanı yaklaşımı yapılır. Sadece şebeke frekansının 2. katına herhangi bir yan bant oluşmaz. Aşağıdaki şekil, tipik rotor arıza tanısının titreşim analizi de frekans tabanlı-hız grafiği ile gösterimidir [23].



Şekil 1.19. Spektrum grafiğinde stator problemi tespiti

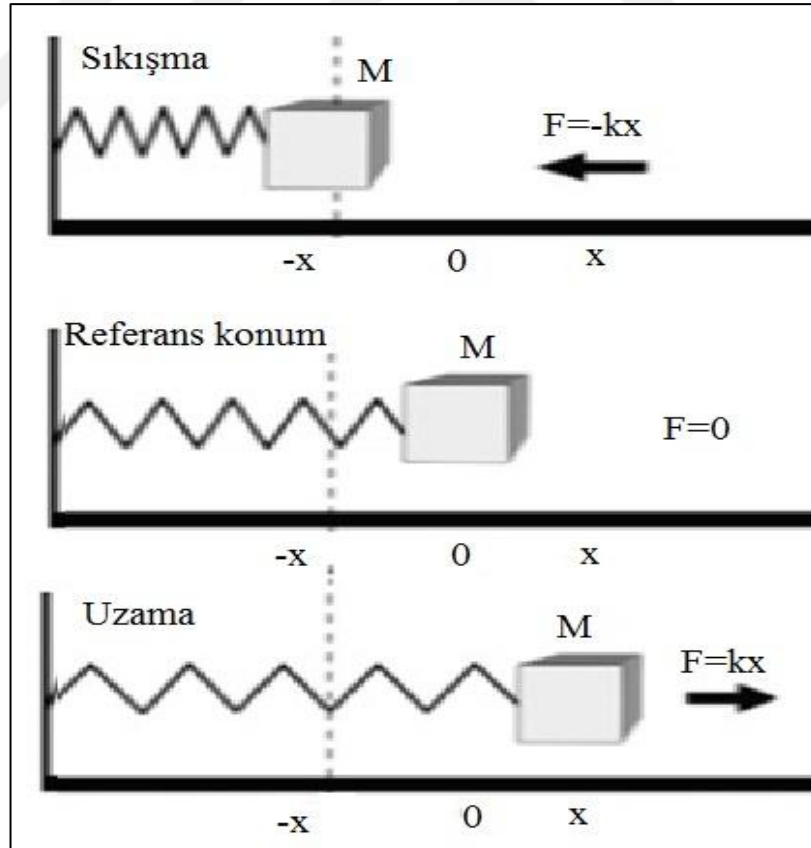
### 1.5. Asenkron Motor Arıza Tespit Metotları

Endüstriyel uygulamalarda asenkron motorların arıza teşhisi durum izleme yöntemleri ile yapılmaktadır. Durum izleme, motorun sürekli ya da periyodik olarak çalışma fonksiyonlarının incelenmesi demektir. İzleme altındaki parametrelerdeki ani veya beklenmedik değişiklikler, motorun durumundaki önemli değişiklikleri gösterir. Motor arıza teşhis aracı olarak kullanılan yöntemler aşağıda belirtilmektedir [24, 25, 26].

- Performans izleme
- Titreşim denetimi
- Şok darbesi denetimi
- Akustik yayılım izleme
- Hız dalgalanmaları denetimi
- Akım izleme
- Hava boşluğu tork'u izlenmesi
- Ani stator güç kontrolü
- Aşırı gerilim testi sargı teşhisi
- Doğru akım yüksek potansiyel testler
- Yüksek frekans dalgalanması test
- Kısmideşarj denetimi
- Kaçak akışı (uç sarım kaçak akı ve aksenel akış) izleme
- Sıcaklık kontrolü
- Yağ parçacık izleme
- Gözle muayene

## 2. TİTREŞİM TEORİSİ

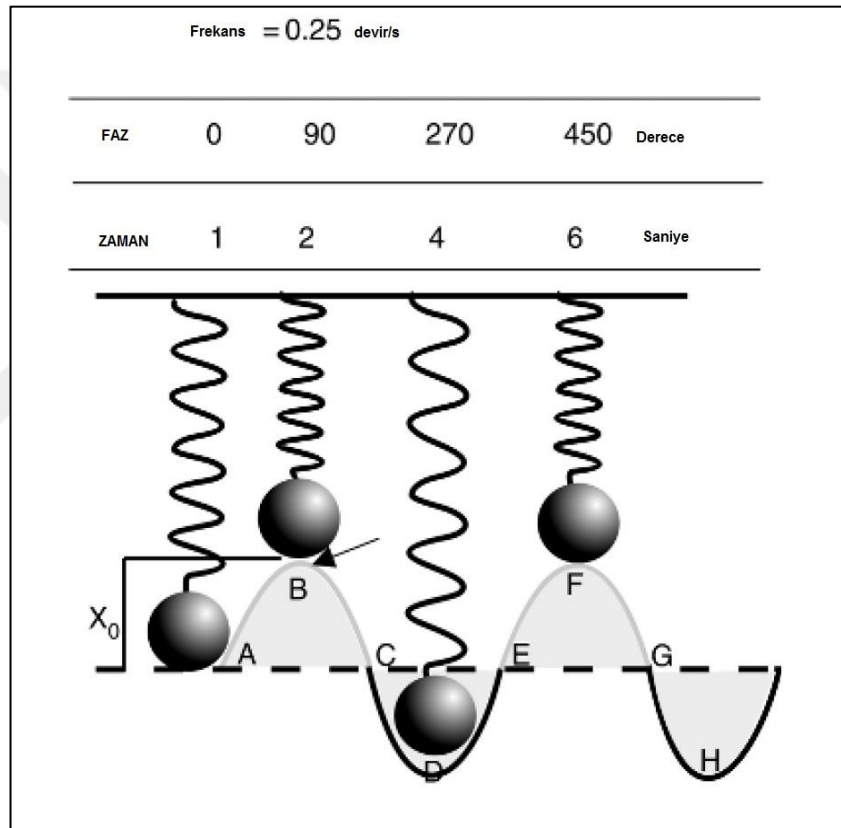
Titreşim basitçe, bir sistemin referans eksenine göre yapmış olduğu ve belirli bir süre sonra kendini tekrarlayan periyodik hareket olarak tanımlanır. Titreşim nedeni; yönü, büyüklüğü veya her ikisi birden değişen dinamik kuvvetlerdir. Şekil 2.1’de gösterilen örnekte,  $M$  kütesine ve  $k$  sabitine sahip bir yay-kütle sisteminde harici bir  $F$  kuvveti uygulanana kadar, herhangi bir hareket ve titreşim söz konusu değildir.  $M$  kütesine zorlayıcı bir  $F$  kuvvet’i uygulandığında ise, yayı sıkıştırır ve kütle sola doğru hareket eder. Kütle serbest bırakıldığında, geri hareket edip referans pozisyonuna döndükten sonra, yay gerginliği kütle’ye izin verdiği kadar sağ’a hareket eder. Sistemde bu hareketin tekrarı sönümlenme veya sürtünme gibi dış etkiler yok ise, teorik olarak sonsuza dek sürebilir [22,34].



Şekil 2.1. Kütle yay sistemi (titreşimin fiziksel gösterimi) [22]

Şekil 2.1’ de gösterilen kütle-yay sistemini ele aldığımızda, zamana göre kütle nin hareketini Şekil 2.2’de gösterildiği gibi çizerek titreşim özelliklerini çalışabiliriz.

Kütlenin başlangıç konumundan tepe noktaya, oradan çukur noktaya ve sonunda başlangıç konumuna değin geçen hareketine bir çevrim denir. Kendini tekrarlayan ve basit harmonik hareket olarak adlandırılan bu çevrim, sistemin titreşim büyüklüğünü (genliği) tespit etmek için gereken tüm bilgileri içerir. Matematiksel olarak bir çevrim hareketi; yer değişimi ve zaman arasındaki ilişki kullanılarak, sinüzoidal bir eşitlik formunda ifade edilebilir [22,34].



Şekil 2.2. Yay-kütle hareketinin zamana göre hareketi [22]



### 2.1. Yer Değiştirme (Deplasman)

Bir kütlenin başlangıç noktasına göre ilk konumu ile son konumu arasındaki değişim miktarına, yer değişimine denir [22].

$$x(t)=x_0\sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$\omega=2\pi f \quad (2.2)$$

### 2.2. Hız

Birim zamandaki yer değişim miktarıdır. Yer değiştirmenin birinci türevi ile hız denklemi oluşturulur [22].

$$\dot{x}(t)=\frac{dx}{dt}=v(t) = x_0 \cdot \omega \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

### 2.3. İvme

Birim zamandaki hız değişim miktarıdır yer değiştirmenin ikinci türevi ile ivme denklemi oluşturulur [22].

$$\ddot{x}(t)=\frac{d^2x}{dt^2}=a(t)=-x_0\omega^2\sin(\omega t) \quad (2.4)$$

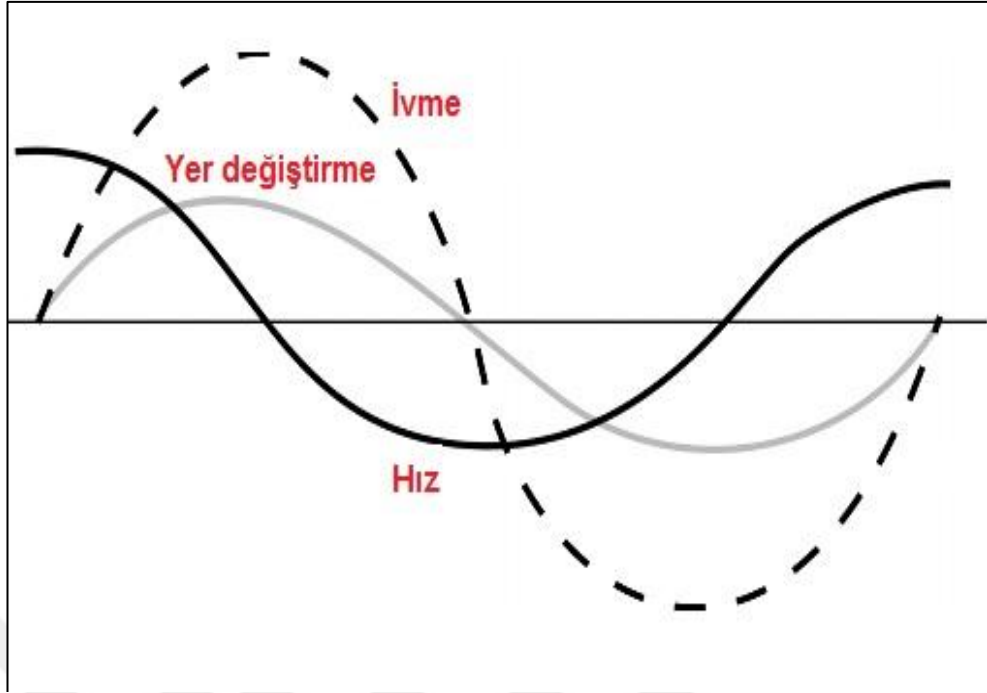
### 2.4. Dalga Formu Oluşumu Ve Temelleri

En basit titreşim basit harmonik hareket ile ifade edilir. Harmonik harekette yer değiştirme, hız ve ivme arasındaki ilişki aşağıdaki dalga form grafiğinde gösterilmiştir [22,35].

Yer değiştirme : sinüs eğrisi ile temsil edilir.

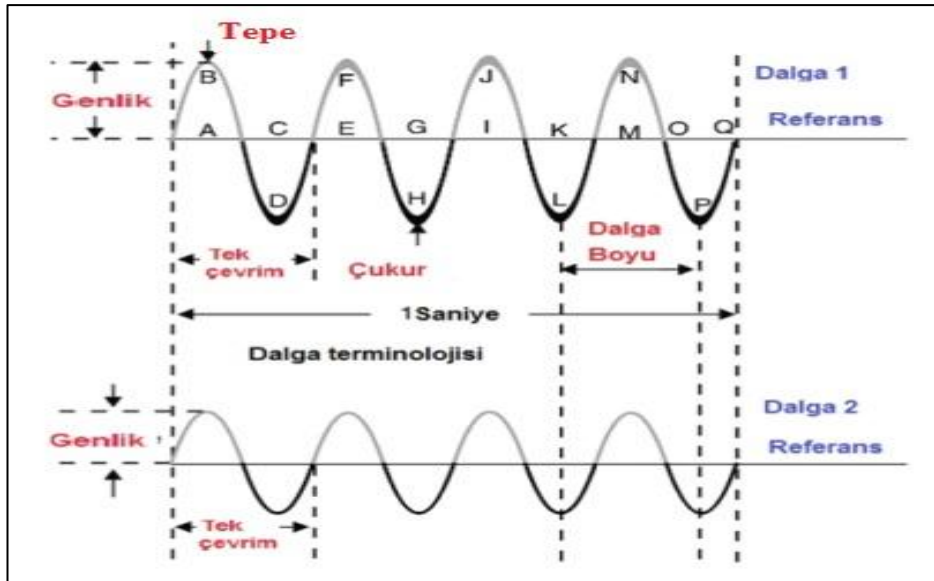
Hız : kosinüs eğrisi ile temsil edilir.

İvme : sinüs eğrisi ile temsil edilir.



Şekil 2.3. Kütlenin ivme, hız ve yer değiştirme dalga formu [22]

Bu çerçevede dalga formları tanımlanırken çevrim, frekans, dalga boyu, genlik ve faz gibi ifadeler sıklıkla kullanılır. Ayrıca bu ifadeler ilaveten vibrasyon dalga yayılımını tanımlamak için kullanılan vibrasyon analizi kullanılarak makina arıza teşhisine bağlı harmonikler, fourier dönüşümleri gibi terimler aşağıda ayrıntılı olarak detaylandırılmıştır.



Şekil 2.4. Farklı genliklere sahip dalga formlarının karşılaştırılması [22]

## 2.5. Çevrim

E, I ve M noktaları sırasıyla 1., 2. ve 3. çevrimleri ifade eder. B noktası pozitif değişimin tepe noktasını ve D noktası negatif değişimin çukur noktasını göstermektedir. Bu yüzden bir çevrim bir tepe ve bir çukurdan oluşur [22].

## 2.6. Frekans (f)

Saniyedeki çevrim sayısı olarak tanımlanır. Dalga 1 ve 2 için frekans değeri 4'tür. Birimi devir/sn – hertz – Hz' dir. Küçük f harfi ile gösterilir [22].

## 2.7. Periyot (T)

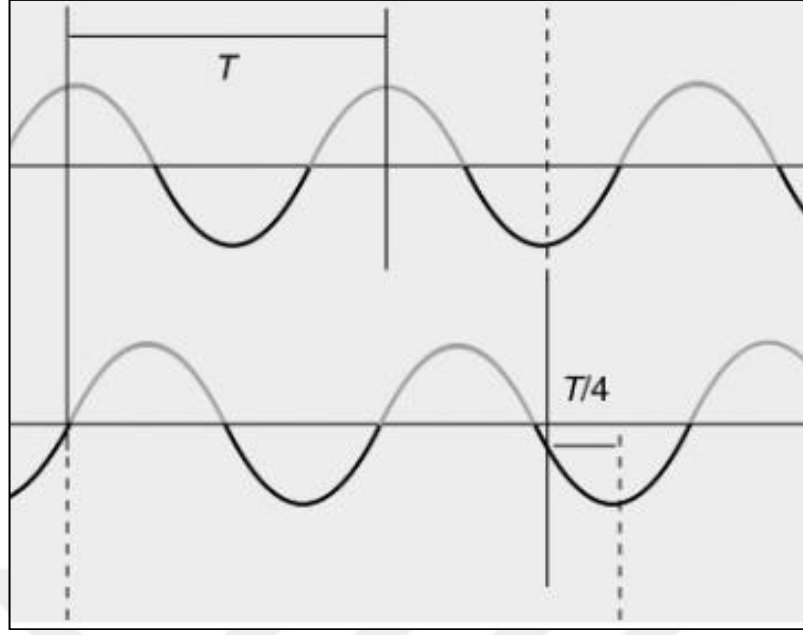
Bir çevrimin meydana gelebilmesi için geçen süredir. Birimi saniyedir. T ile gösterilir [22].

## 2.8. Dalga Boyu ( $\lambda$ )

Bir dalga örtüsünün tekrarlanan birimleri arasındaki mesafedir. Örneğin L-P noktaları arasındaki mesafe dalga boyunu göstermektedir. Dalga boyu ile frekans ters orantılıdır.  $\lambda$  ile gösterilir [22].

## 2.9. Faz ( $\phi$ )

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi iki adet dalganın genlik ve frekansları özdeş olduğu halde tepe değerlerinde T/4 kadar kayma (gecikme) olduğu gösterilmiştir. Bu gecikme, faz açısı olarak adlandırılır. Birimi derece veya radyandır.  $0-360^0$  veya  $0-2\pi$  arasında değerler alır. T kadar gecikme  $360^\circ$  'lik bir faz açısıdır, bu nedenle T / 4 kadar gecikme  $90^\circ$  'lik bir faz açısı olacaktır. Bu durumda iki dalga arasında  $90^\circ$  'lik faz farkı var denir [22].



Şekil 2.5. İki benzer dalga arasındaki faz ilişkisi [22]

Dönen cisimlerde faz açısı hesaplanırken, referans noktasından itibaren dönüş yönünün tersi pozitif yön olarak ifade edilir. Faz, dengesiz bir rotorda yerleştirilecek kütlelerin yerinin belirlenmesinde, dengesizlik, eksen kaçıklığı, gevşeklik ve diğer makina arızalarının birbirlerinden ayırt edilmesinde önemli rol oynamaktadır [22].

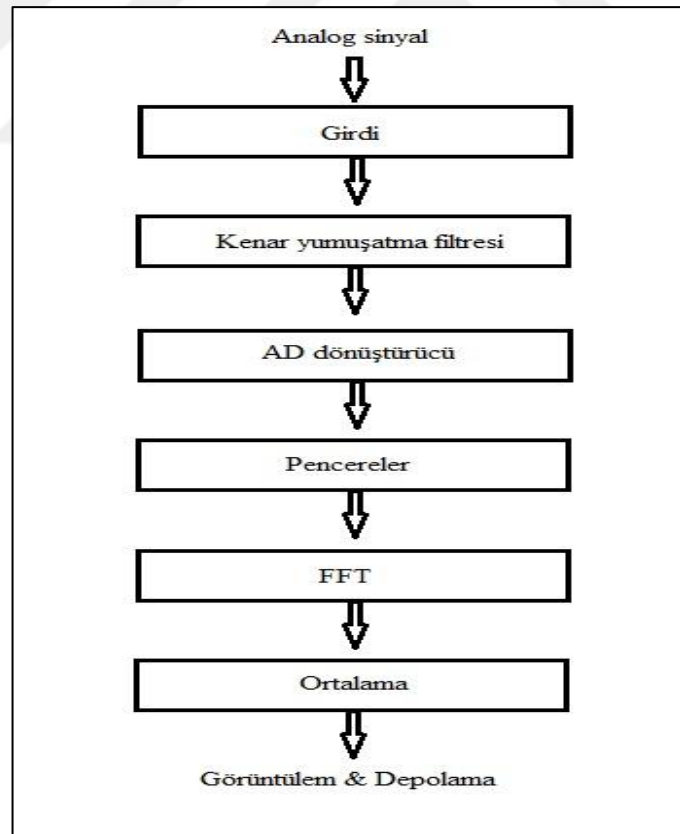
### 2.10. Genlik

Şekil 4.2’te görüldüğü gibi referans çizgi ile en tepe nokta arasındaki mesafedir. Bir dalganın genliği, dalganın iletği enerjinin miktarını belirtir. Genlik 4 farklı şekilde adlandırılır [22].

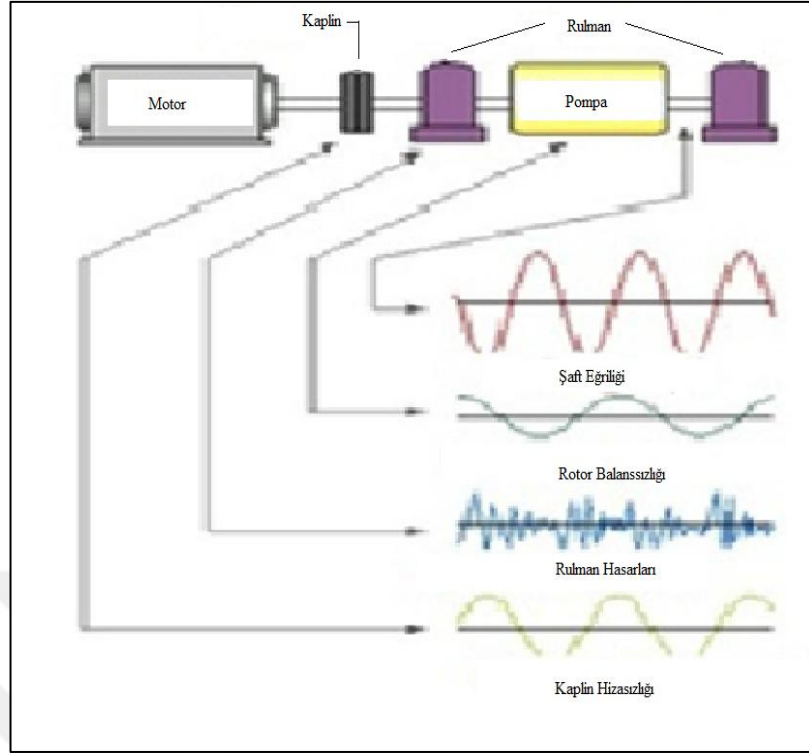
- Tepe : maximum tepe değeri
- Tepe-Tepe : pozitif ve negatif bölgelerdeki tepeler arası değer
- Ortalama : genliğin iki zaman aralığındaki aritmetik ortalama değeri
- RMS : ortalama karekök değeri

### 3. TİTREŞİM PARAMETRELERİ, VERİ TOPLAMA VE SİNYAL İŞLEME

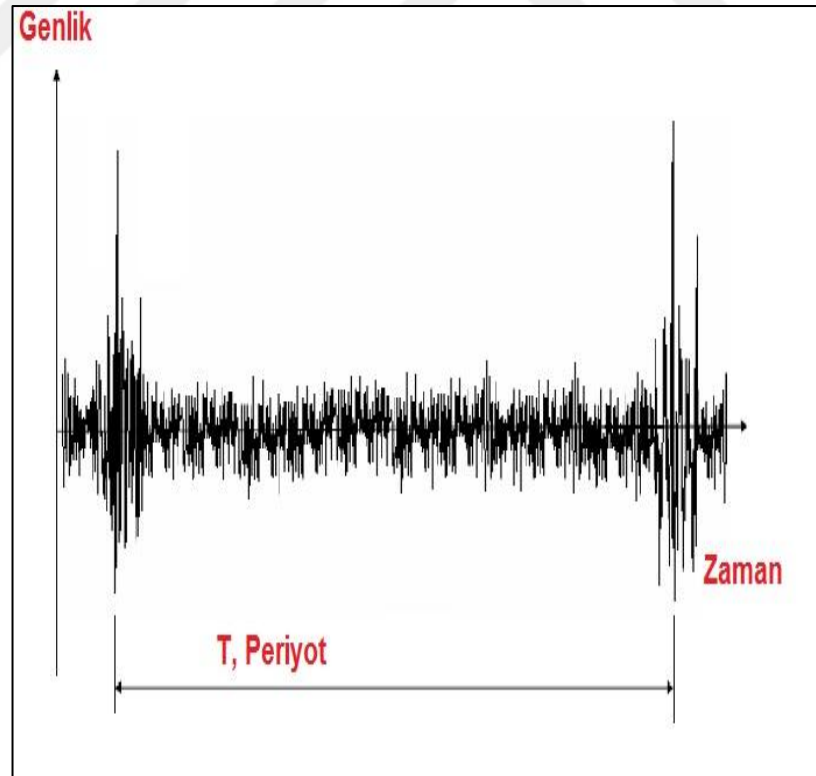
Titreşim sinyali, dikey ekseninde genlik ve yatay ekseninde de zaman cinsinden gerçek bir sinüs dalgasına benzeyen “zaman sinyali” (time domain) olarak ölçülür. Gerçek titreşim sinyali, bir dönüştürücü veya sensör yardımıyla farklı genliklere ve frekanslara sahip, çok daha karmaşık sinüs dalgalarını içeren ve farklı kaynaklarda üretilen zaman sinyali şeklindedir. Yani endüstrideki makinelerden elde edilen titreşim sinyalleri çok ama çok karmaşık fakat sinüzoidaldir. Bu sinyallerin bir titreşim ölçüm aletine girilmesinden, analiz yapılmaya kadar süreçte çeşitli teknolojik seçenekler mümkündür. Aşağıda gösterildiği gibi, teknolojik bir cihazdaki tipik bir sinyal’in yolculuğu, makine bileşenlerinden üretilen karmaşık dalga formları ve gerçek zaman dalga formu gösterilmiştir [36].



Şekil 3.1. Bir sinyalin blok diyagram ile gösterimi



Şekil 3.2. Bir makinede üretilen karmaşık dalga formları



Şekil 3.3. Gerçek zaman dalga formu

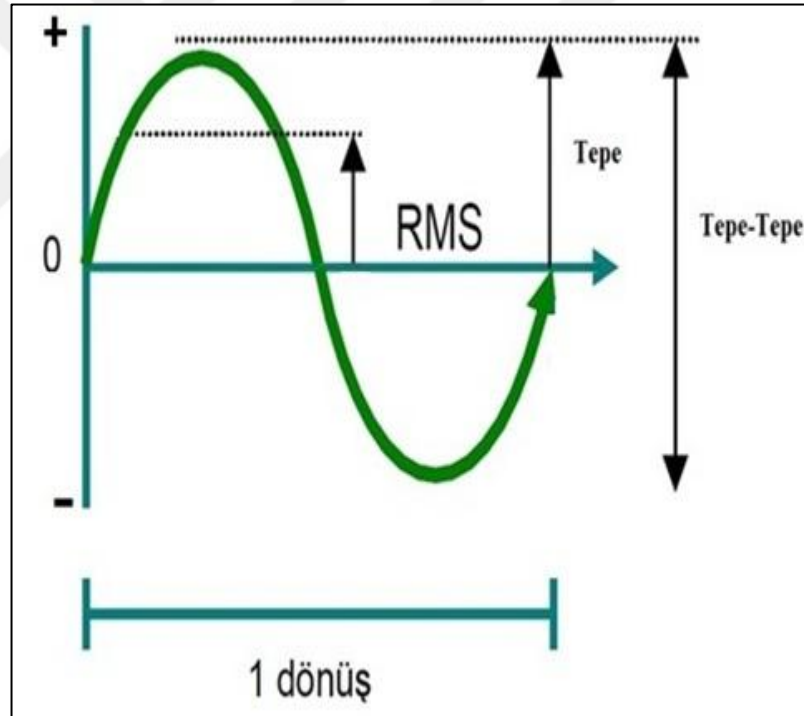
### 3.1. Titreşim Parametreleri

Aşağıda sıralandığı gibi titreşimin üç temel ölçülebilir parametresi vardır. Bunların herhangi biri titreşim genliğini tanımlamak için kullanılır. Titreşim değerini frekans tabanlı bir spektrum grafiğinde ifade edebilmemiz için genlik parametrelerini seçmemiz ve tanımlamamız gerekmektedir [37].

- Yer değiştirme : Ne kadar yer değiştiriyor? Sorusunun cevabıdır.
- Hız : Hangi hızla yer değiştiriyor? Sorusunun cevabıdır.
- İvme : Hız ne kadar çabuk değişiyor? Sorusunun cevabıdır.

### 3.2. Genlik Parametreleri

Aşağıdaki şekilden görüleceği üzere, parametre seçimi için üç genlik birimi bulunmaktadır [38].



Şekil 3.4. Genlik parametrelerinin gösterimi [38]

- Tepe-Tepe (Deplasman, Yer değiştirme için),  $\text{Tepe-Tepe} = 2x \text{ Tepe}$
- Tepe (Hız için)
- RMS (Hız ve ivme için),  $\text{RMS} = 0.707 x \text{ Tepe}$

### 3.3. Genlik Birimleri

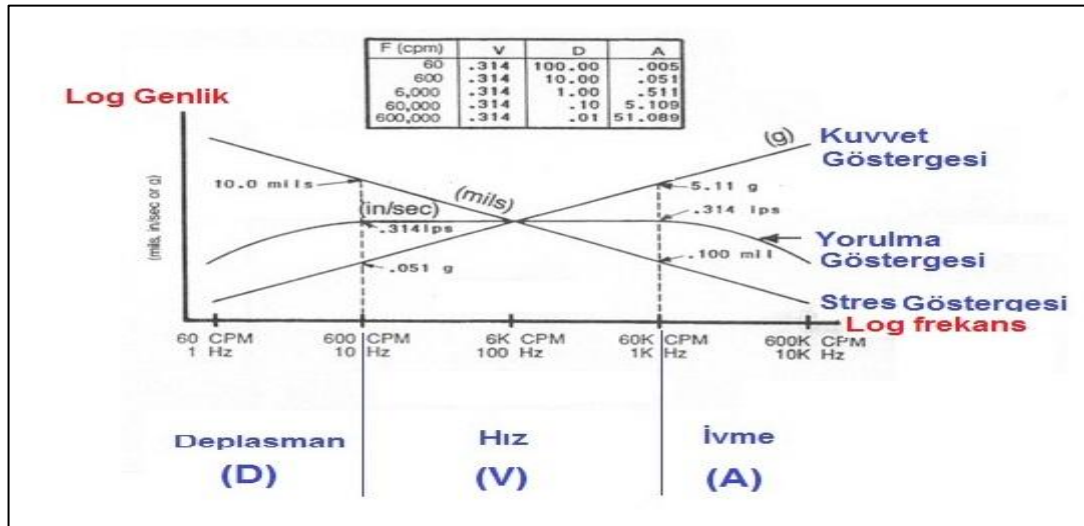
Yer değiştirme, hız ve ivmeyi tanımlarken genlik birimleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden normal uygulamalarda “imperial” birim sistemi yerine “metrik” birim sistemi kullanılır [38].

- Yer değiştirme : mikron, ( $\mu\text{m}$ )
- Hız : milimetre/sn, (mm/s)
- İvme : milimetre/saniye<sup>2</sup>, ( $\text{mm/s}^2$ ) & g's (1 g = 9,81 m/s<sup>2</sup>)

### 3.4. Titreşim Parametrelerinin Seçimi

Titreşim genlik parametre çeşitlerini tartıştıktan sonra, bir sonraki karar; hangi parametre hangi makinedeki titreşimi ölçmek için uygundur? Sorusunun cevabı verilmelidir. Endüstriyel standartlar ve pratik uygulamalar da aşağıdaki titreşim parametreleri seçim grafiği uygulanmaktadır[37]. Buna göre aşağıdaki belirtilen frekans aralıklarında ilgili makinalar için vibrasyon parametreleri seçilir. Yani düşük devirli makinalarda yer değiştirme, orta devirli makinalarda hız ve son olarak yüksek hızlı makinalarda ivme parametreleri seçilmelidir [37].

- 1 Hz-10Hz : Deplasman
- 10Hz-1KHz : Hız
- 1KHz-10KHz : İvme

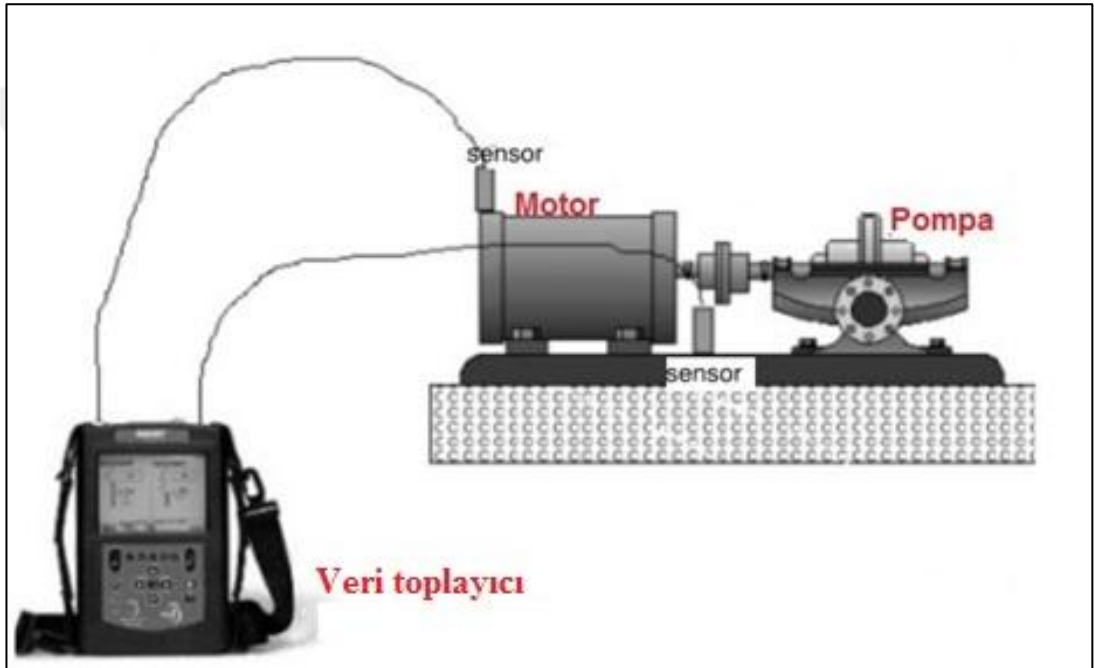


şekil 3.5. Titreşim parametrelerinin seçimi [37]



### 3.5. Veri Toplama

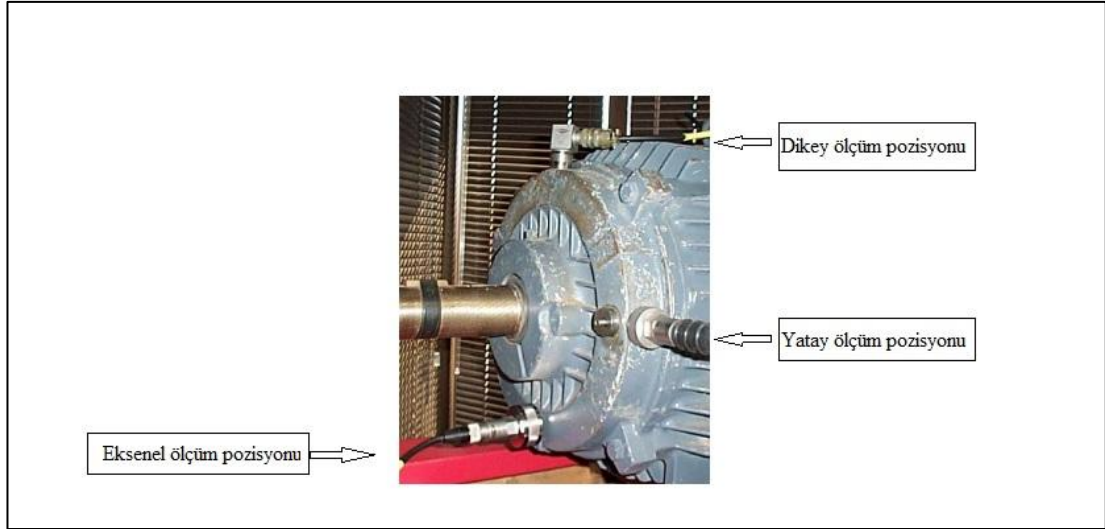
Ham titreşim verilerinin toplanması; taşınabilir bilgisayar ve titreşim analizör birleşimi özelliklerine sahip veri toplayıcı veya FFT (Fast-Fourier Transform) analizörü diye adlandırılan özel bir cihaz ve sensörler (yer değiştirme-hız-ivme) kullanılarak gerçekleştirilir. Dönen motorun titreşim hareketi, sensörler yardımıyla yakalanır ve elektrik sinyallerine dönüştürülür. Bu elektrik sinyalleri; analog sinyali, dijital sinyale örnekleyen, depolayan, görüntüleyen kısacası sinyalleri işleyen taşınabilir veya on-line yapıdaki veri toplayıcılar 'da depolanır [39].



Şekil 3.6. Veri toplayıcı ile ham veri toplama [22]

### 3.6. Ölçüm Pozisyonları Ve Yönü

Mekanik titreşim verilerinin bozulmadan toplanması çok önemli bir aşamadır. Titreşim, makine parçaları üzerinde ve bu parçalar arasında etkiyen dinamik kuvvetlerden kaynaklanır. Dönen makinelerde, ilgilendiğimiz kuvvetlerin çoğu, dönen bileşenler, yani miller ve rotorlar üzerine etkimektedir. Dolayısıyla rulmanların üzerinde gövdeye en yakın yapılan ölçümler, makinenin durumunun en iyi gösterimini sağlayacaktır. İdeal yaklaşım her bir yatakta yatay ve dikey bir ölçüm, mil başına bir eksenel yönde ölçüm yapılmaktır [40].



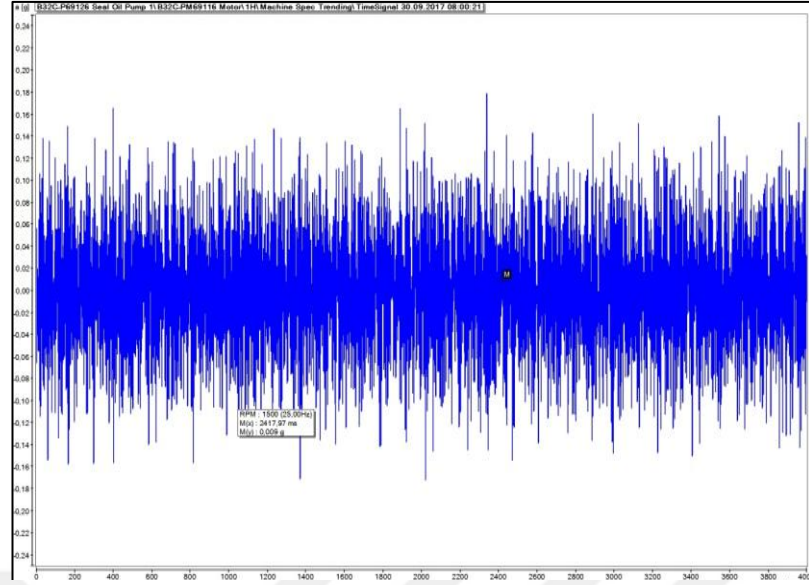
Şekil 3.7. Ölçüm pozisyonları ve yönü

### 3.7. Sinyal İşleme

Veri toplayıcı yalnızca sınırlı miktarda veri toplayabilir ve depolayabilir. Bu nedenle, geçmiş ve uzun vadeli titreşim verilerinin karşılaştırılması, toplam vibrasyon değerlerinin takibi ve arıza teşhisi için bilgisayar ortamında özel yazılımlar kullanılır. Ham verileri transfer ettiğimiz bu yazılımlar; arıza teşhisinde kullanacağımız zaman tabanlı dalga formlarını, frekans tabanlı spektrumları, yüksek frekanslarda meydana gelen rulman arızalarını önceden tespit edebileceğimiz zarflama tekniğini ve geçmiş ölçümleri karşılaştırmamızı sağlayan toplam titreşim değerlerini kapsayan ara yüzler ile dijital sinyalleri değerlendirip işlememizi sağlar [41].

### 3.8. Zaman Tabanlı Analiz

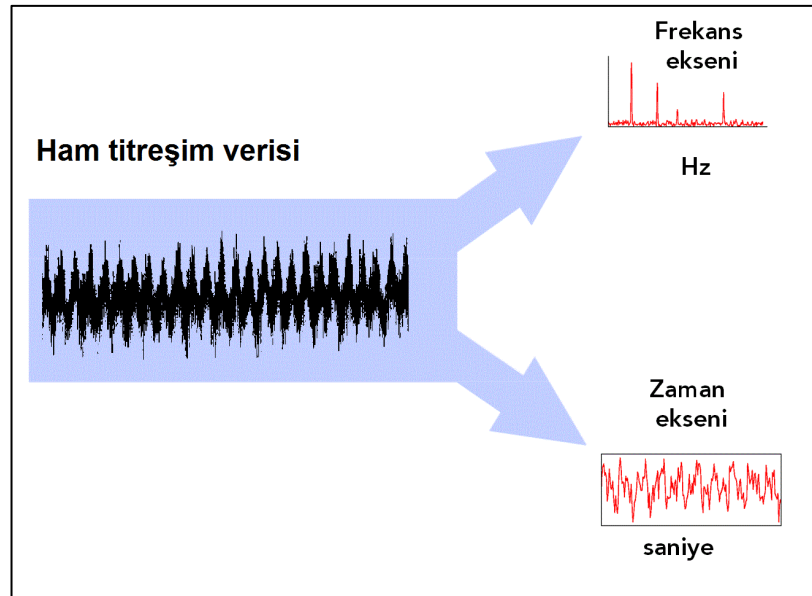
Bir ünitenin veya sistemin tepkisi hem zaman hem de frekans tabanında da, genlikleri yer değiştirme-hız ve ivme ile gösterilir. Zaman tabanındaki grafikler, zamana göre değişen farklı form ve genliklerden meydana gelen sinüs dalgalarından oluşur. Genellikle ham veriyi zaman tabanında yorumlamak oldukça zordur. Şekilde 3.8'de zaman tabanında dalga sinyalleri, zaman fonksiyonuna bağlı, ivme genliği olarak gösterilmiştir. Zaman tabanlı analiz ile arıza teşhisi filtrelemeyle dalga formlarını birbirinden ayırarak veya toplam değerler yorumlanarak yapılır [42].



Şekil 3.8. Zaman tabanında dalga formu gösterimi

### 3.9. Frekans Tabanlı (Spektrum) Analiz

Frekans tabanındaki grafikler ise yüzlerce değişik frekans ve genlikteki sinüs dalgalarının, hızlı Fourier (FFT) dönüşümünün yapılarak tek tek frekans ekseninde görüntülenmesidir. Böylece her bir sinüs dalgasının genliğini ve frekansını bilebiliriz. Alınan bu görüntüye spektrum diyoruz. Spektrumu her bir sinüs dalgasını aynı anda görüntüleyen grafik olarak da tanımlayabiliriz [42].



Şekil 3.9. Frekans ve zaman tabanlı spektrumların gösterimi

### 3.10. Fourier Dönüşümü

Fourier kuramına göre bir  $y(t)$  fonksiyonu aşağıdaki gibi sonsuz sayıda sinüs ve kosinüs terimlerinin toplamından oluşan trigonometrik bir seri ile gösterilebilmektedir.

$$y(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1(\cos\omega t) + a_2(\cos\omega t) + a_3(\cos\omega t) \dots$$
$$+ b_1(\sin\omega t) + b_2(\sin\omega t) + b_3(\sin\omega t) + \dots \quad (3.1)$$

$$y(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (3.2)$$

Bu seriye Fourier Serisi denir. Burada  $n$  indisi harmonik,  $a_0$ ,  $a_k$  ve  $b_0$ ,  $b_k$  bu harmoniklere ait Fourier katsayıları olup  $\omega$  açısal frekanstır. Verilen bir  $y(t)$  fonksiyonunun Fourier serisi açılımı analizine harmonik analizi denir. Açısal frekansı aşağıdaki gibidir.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.3)$$

Denklem (3.2) parçalanırsa;

$$y(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (c_k \cos k\omega t + \phi) \quad (3.4)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(k\omega t + \phi) dt \quad (3.5)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(k\omega t + \phi) dt \quad (3.6)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada  $c_n$  genel teriminde  $y(t)$  fonksiyonun  $k$ . harmonik fonksiyonu  $\phi$  ise faz açısı denir. Burada harmonik genliği ve faz açısı aşağıdaki gibi ifade edilir ;

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{-b_k}{a_k} \quad (3.7)$$

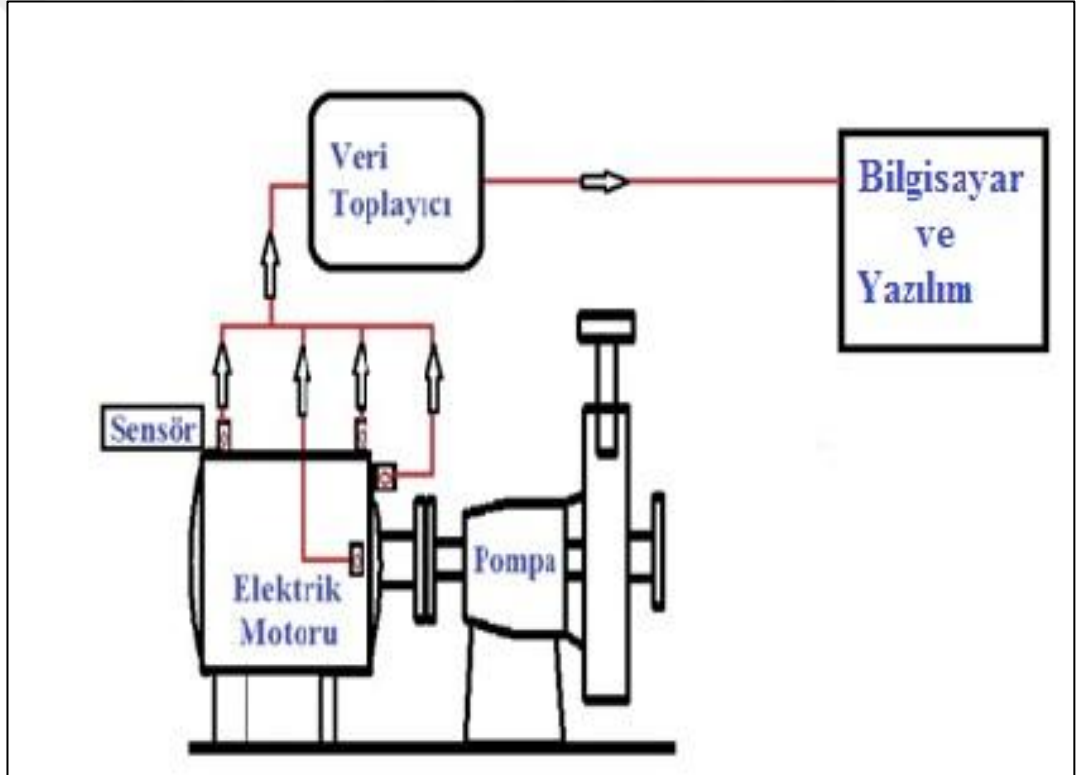
$$c_k = (a_k^2 + b_k^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Titreşim analizinde fourier dönüşümü zaman tabanında bulunan bir fonksiyonu frekans tabanına dönüştürmek için kullanılır. Fourier dönüşümü, sinüzoidal fonksiyonların toplamından oluştuğu düşünülen  $f(t)$  fonksiyonunu bileşenlerine ayırarak her bir bileşenin genlik değerinin tespitine yarar. Dolayısıyla zaman tabanındaki bir dizi genlik değeri ile ifade edilen değerin frekans tabanındaki gösterimine, genlik spektrumu denir. Bir periyodik fonksiyon, sinüzoidal bileşenlerinin toplamı olarak gösterilir. Fourier dönüşümü fourier serilerinin genelleştirilmiş halidir. Dönüşüm denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir [42, 43, 44].

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.9)$$

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde her büyük endüstriyel tesiste olması gereken yangın söndürme sistemine ait yangın söndürme suyu pompalarını tahrik eden elektrik motorunun yapısı ve yapılan ölçüm çalışmasının detayları sunulmuştur. Ölçüm çalışmasının bileşenleri AC motor, sensör, veri toplama sistemi ve veri işleme (spektral analiz) için kullanılan özel bir yazılımdan oluşmaktadır. Bu çok disiplinli çalışma aşağıdaki şematik gösterim ile sunulmuştur.



Şekil 4.1. Ölçüm düzeneği

##### 4.1. Ölçümü Yapılan AC Motor Özellikleri

Ölçüm verilerinin toplanması için doğrudan çalıştırmaya hazır 200 kW güç ve 2940 rpm etiket değerlerine sahip bir sincap kafes asenkron AC elektrik motoru seçilmiştir.

Titreşim verilerinin toplandığı motorun montaj şekli yatay ve çelik şaseye bağlantısı saplama ile yapılmıştır. Motor ön arka yatakları gres yağlamalı bilyeli rulmanlardan oluşmaktadır.

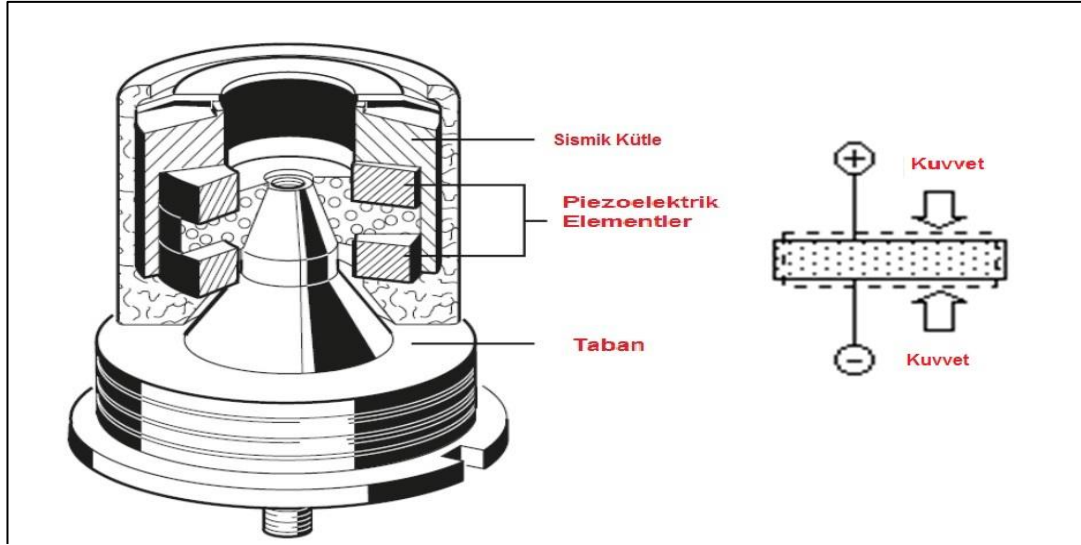
Tahrik ettiği pompa ile motor arasında aktarma organı olarak esnek kaplin kullanılmıştır. Kontrol ünitesi hem el ile yardımcı bir panel, hem de uzaktan scada sistemi ile sağlanmıştır. Vibrasyon kontrolü için titreşim takozlar motor ayaklarında mevcuttur. Motor etiket bilgilerinden elde edilen teknik özellikler aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

Tablo 4.1. Ölçümde kullanılan elektrik motorunun teknik özellikleri

Motor Üretici	Kolmer
Tipi	KS315L2-2
Güç	200kW
Hız	2975 rpm
Gerilim	400 V
Akım	331A
Frekans	50 Hz
Güç faktörü (Cosp)	0,89
Ağırlık	1190 kg
Verimlilik	93,5 %
Tork	636,9 Nm

#### 4.2. Sensör Özellikleri

Ölçümler, yapısında bütünleşmiş devre piezoelektrik elementleri (yani, mekanik stres altındayken zıt yüzler arasında potansiyel bir fark oluşturan elementler) bulunduran ivmeölçer sensörler ile gerçekleştirilmiştir. İvmeölçer hızlanmaya maruz kaldığında, kristaller üzerine kurulu sismik kütle, ataleti nedeniyle stres oluşturur. Oluşan gerilime karşı kristaller, hızlanma ile orantılı olarak yük üretirler. Bu yükler daha sonra, amplifikatörler ile gerilim değerine dolayısıyla sinyal bilgisine dönüştürülmüş olurlar. Aşağıdaki şekil ve tablo da ivmeölçer yapısı ve teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. İvmeölçer yapısının gösterimi

Tablo 4.2. Ölçümde kullanılan sensörün teknik özellikleri

Üretici firma	Prüftechnik
İvme sensörü	VIB 6.142R DEX
Sinyal Sistemi	Akım hattı sürücüsü, üst üste binmiş AC sinyali ile 3,5 mA kapalı akım
Max. ölçüm aralığı	961 m/s <sup>2</sup> (98g)
İletim faktörü ±% 4	1.0 µA/ms-2 @ 159 Hz, 25°C
Frekans aralığı	1 Hz - 20 kHz
Rezonans frekansı	36 kHz

### 4.3. Veri Toplama Sistemi

Titreşim analiz cihazlarına pratik uygulamalarda veri toplayıcı veya FFT analizörü ismi verilmektedir. Yapılan ölçümlerde 2 kanallı, 2 GB kompakt hafızası ile titreşim bilgilerini ve operasyon verilerini kesintisiz depolayabilen, universal yazılımı ile bütünleştirilmiş özel bir cihaz kullanılmıştır. Yazılım ortamında ölçümü yapılacak motorun; ölçüm pozisyonları, yönleri, titreşim parametreleri tanımlanarak oluşturulan ölçüm veri toplayıcıyla aktarıldıktan sonra, ölçüm yerine montajı yapılmış ivmeölçere bir kablo ile bağlantısı yapılır. İçinde bulunan universal yazılımın yönlendirmesi ile ölçüm güzergâhı kullanılarak ham verileri toplanır. Daha sonra sinyal işlemeyi gerçekleştirmek için toplanan ham veriler, bilgisayar ortamındaki yazılıma tekrardan geri yüklenir. Aşağıdaki şekil ve tablo da veri toplayıcı ve teknik özellikleri gösterilmiştir.





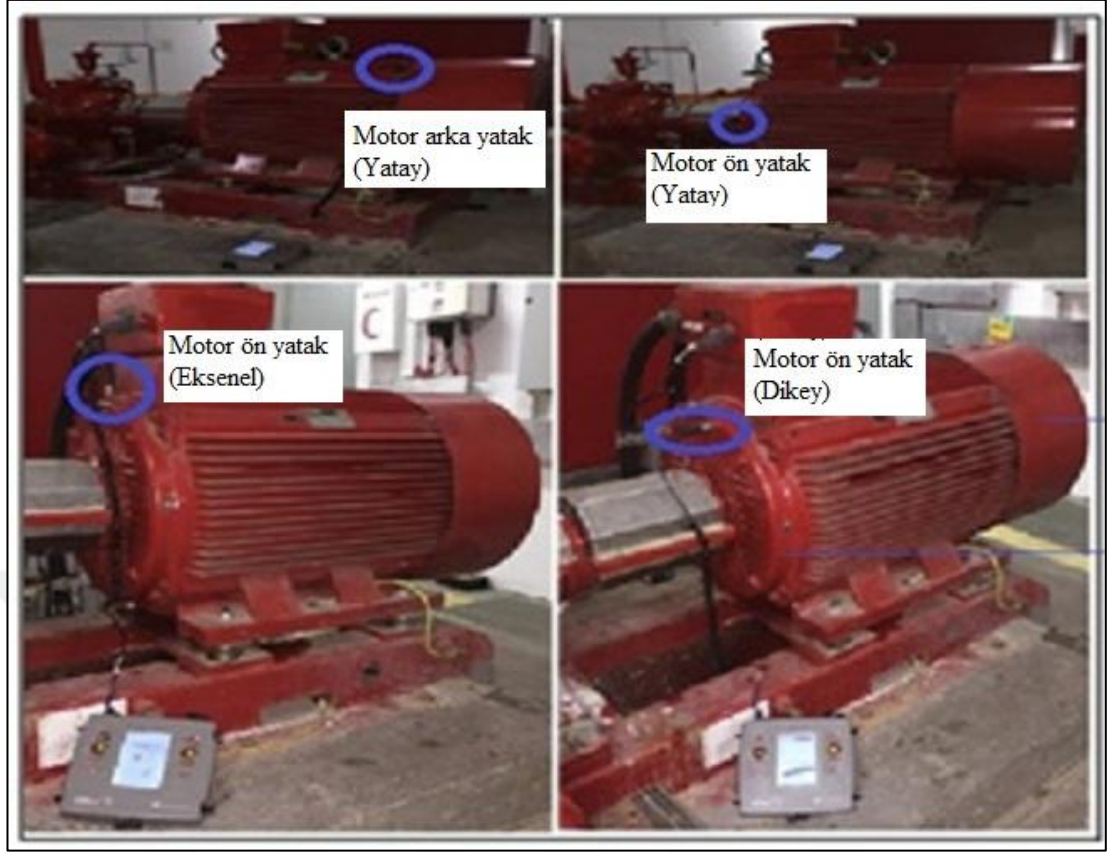
Şekil 4.3. Veri toplayıcının gösterimi

Tablo 4.3. Ölçümde kullanılan veri toplayıcının teknik özellikleri

Üretici firma	Prüftechnik
Model	Vibxpert II Ex.
Gerilim	AC/DC, $\pm 30$ V max.
Akım	AC/DC, $\pm 30$ mA max.
Sensör tipi	ICP ivmeölçer, (2 mA, 24 V max.)
Frekans aralığı	0-51.2 kHz
Dinamik aralığı	96 dB (ölçüm) / 136 dB (toplam)
Örnekleme frekansı	131kHz kadar
Hafıza	2GB
Sıcaklık aralığı	-10°C...+50°C

#### 4.4. Motor Titreşim Ölçümleri

Rutin çalışma koşullarında çalıştırılan elektrik motoru üzerinde titreşim ölçümleri mobil veri toplayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesi sensörler motor yatakları üzerine vidalı adaptör ile montajı yapılmıştır. Ham titreşim verileri motor arka yatak üzerinde motor şaftına göre yataydan, motor ön yatak üzerinde ise motor şaftına göre hem radyal yönlerde (yatay ve dikey) hem de eksenel yönden toplanmıştır. Veri toplayıcı da depolanan ham veriler daha sonra bilgisayar ortamında yazılıma yüklenmiştir. Aşağıdaki şekil ölçüm yapılan noktaları göstermektedir.



Şekil 4.4. Titreşim ölçüm noktalarının gösterimi

#### 4.5. Sinyal İşleme Prosedürü

Ham verilerin işlenmesi özel bir yazılım olan omnitrend sürüm 2.90 ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yapılmadan evvel, elektrik motoru ve yangın pompasının dönme hızları referans alınarak bir ölçüm güzergâhı oluşturulur. Oluşturulan güzergâhta her bir ölçüm noktası için; pozisyon, yön, ölçüm türü (hız veya ivme) ve uygun filtrelemeler tanımlanır. Ölçümler yapılmadan evvel ölçüm güzergâhı, veri toplayıcıya yüklenir. Bu güzergâha istinaden ham veriler toplanır, toplanan verilerin yazılıma geri yüklenmesi ile oluşturulan spektral grafikler ve zaman dalga formları motor devrinin katları temel alınarak işlenir. Spektral grafikler analiz edilirken, ölçümü yapılan makinenin ilk önce dönme devrini saptamak çok önemlidir. Çünkü hata teşhis çizelgeleri makinenin ilk devri ve katlarına göre oluşturulmuştur. Dolayısıyla hata türü makine devriyle ilgilidir.

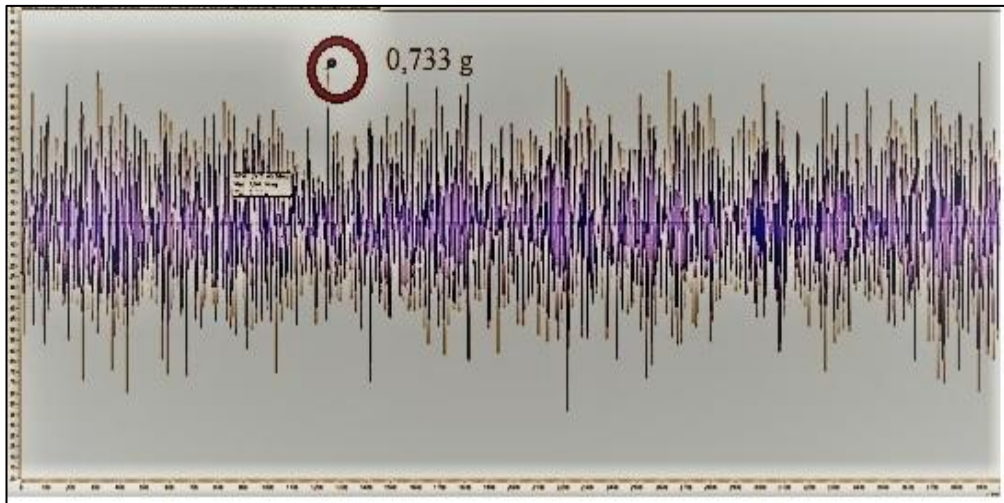
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmada elde edilen veriler eksiksiz olarak yazılıma yüklenmeli ve depolanmalıdır. Çünkü eksik veri veya yetersiz bilgi, arıza teşhisini zorlaştırarak bulguların ve değerlendirme sürecinin uzamasına ve yanlışlıkların artmasına neden olmaktadır.

Aşağıda sunulan şekillerde, elde edilen verilere ait zaman ve frekans tabanlı grafiklerin detaylandırılması gösterilmektedir. Özellikle dişli kutularında veya çok yavaş dönen makinelerde arıza teşhisi için kullanılan zaman dalga formları; arızaların gelişiminde veya arıza sonuçlandıktan sonra için yeterli olmayan frekans tabanlı grafiklerin analizinde eksik bilgilerin tamamlanması için önemli yarar sağlar.

### 5.1. Zaman Tabanlı Titreşim Analizi

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi ham veriler işlenerek zaman dalga formu elde edilmiştir. Toplam vibrasyon değeri en yüksek ve en net olan zaman dalga formuna sahip ölçüm noktası motor arka yatak yatay ölçüm pozisyonudur. Darbeler arasında kendini tekrarlayan net bir dalga formu açıkça tespit edilememiştir. Ayrıca zaman dalga formunda gösterilen maximum genlik 0,733 g değerinde gözlemlenmiştir.



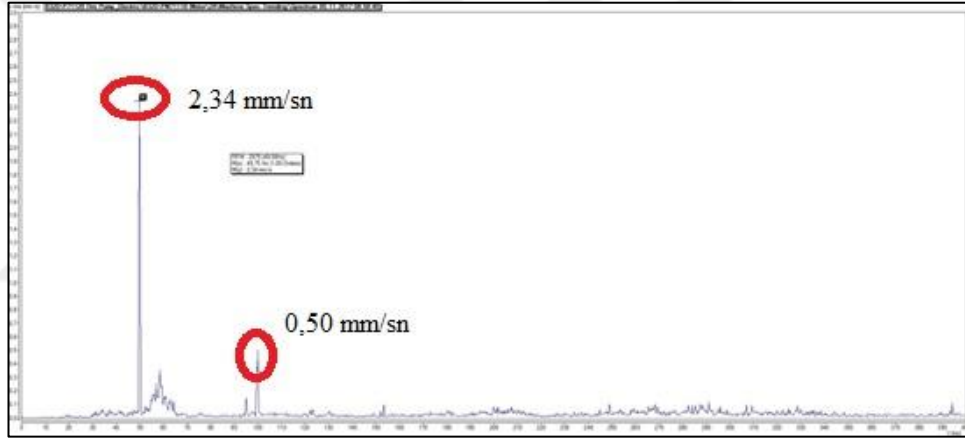
Şekil 5.1. Zaman dalga formu (motor arka yatak-yatay)

## 5.2. Frekans Tabanlı Titreşim Analizi (Spektral Analiz)

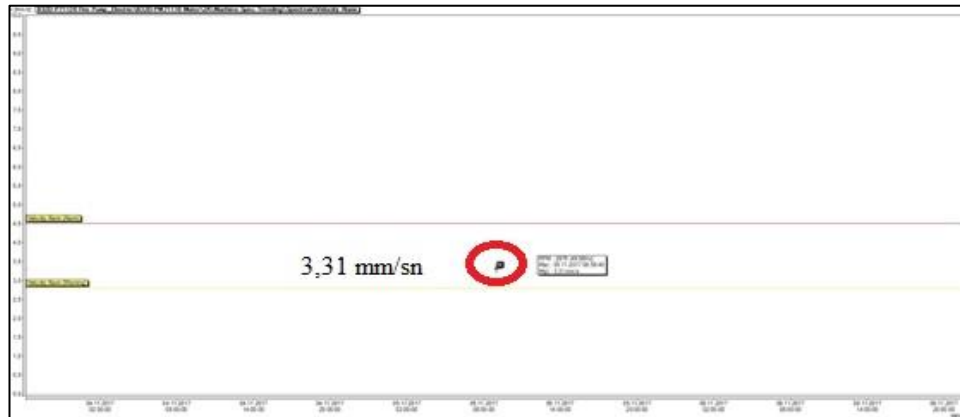
Bu kısımda, yatay konumda montajlanmış pompa-motor ünitesinin frekans tabanlı grafiklerin kullanımları açıklanacaktır. Grafiklerin tabanında yani yatay ekseninde 0-400 Hz aralığı, genliğinde yani dikeyde ekseninde hız parametreleri seçilmiştir. Yapılan analiz de sadece motor arka yatak-yatay pozisyon, ön yatak yatay-dikey-ve aksel pozisyonlardan alınan değerler kullanılmıştır.

### 5.2.1. Motor arka yatak

Motor arka yatağa ait yatay spektral grafik, toplam vibrasyon değeri 0-400 Hz arasında 3,31 mm/sn'dir. Devrin 1. katı 2,34 mm/sn genlik değeri ile dominanttır. Ayrıca 0,50 mm/sn genlik değeri ile devrin 2. katı aktif olmuştur.



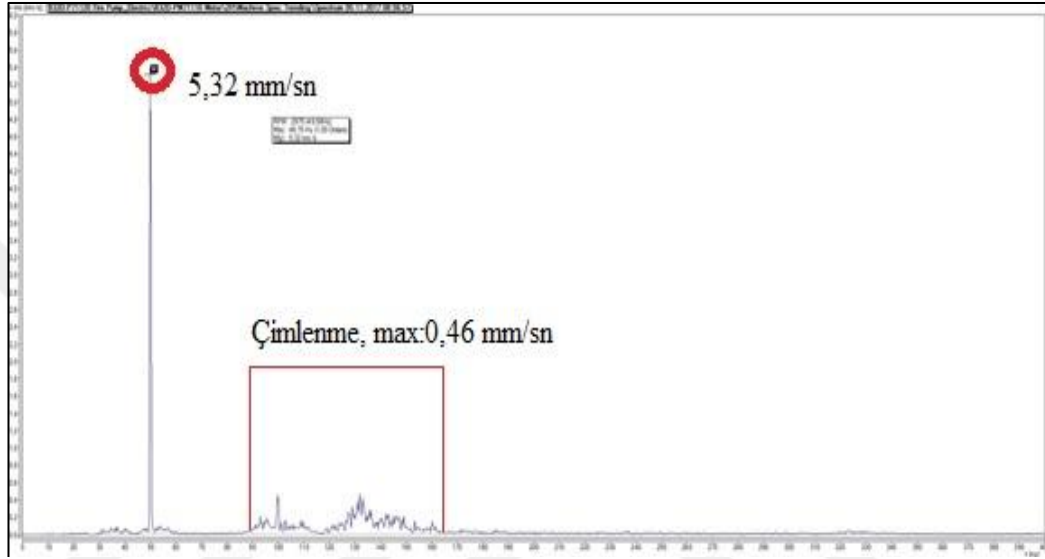
Şekil 5.2. Spektral grafik (motor arka yatak-yatay)



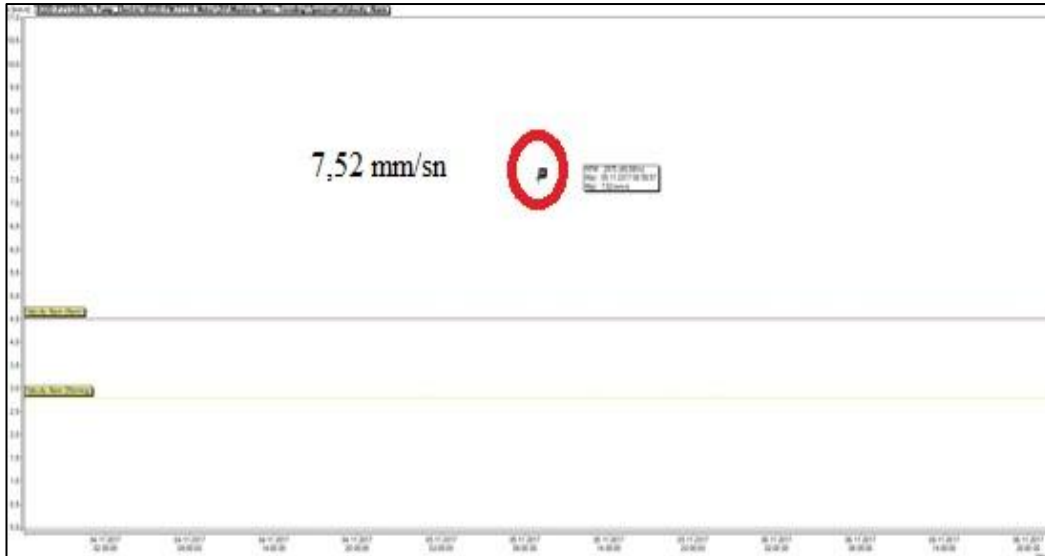
Şekil 5.3. Toplam vibrasyon değeri (motor arka yatak-yatay)

### 5.2.2. Motor ön yatak

Motor ön yatağa ait yatay spektral grafik, devrin sadece 1. katını göstermektedir. Genlik değerleri; 5,32 mm/sn'dir. Devrin ilk katı dominanttır. Ayrıca 92-162 Hz aralığında maksimum değeri 0,46 mm/sn olan çimlenme gözlemlenmiştir. Toplam vibrasyon değeri 0-400 Hz arasında 7,52 mm/sn'dir.



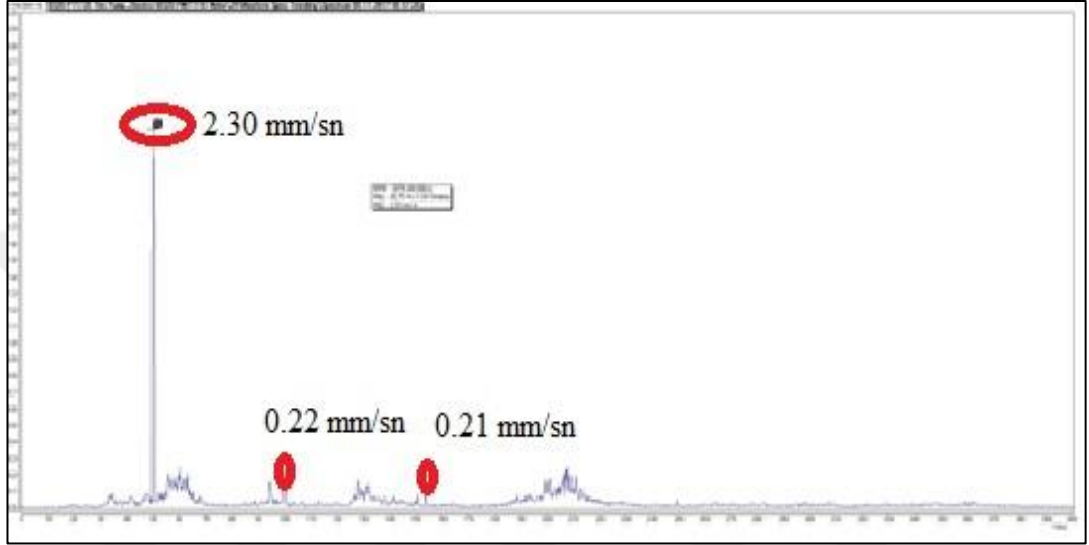
Şekil 5.4. Spektral grafik (motor ön yatak-yatay)



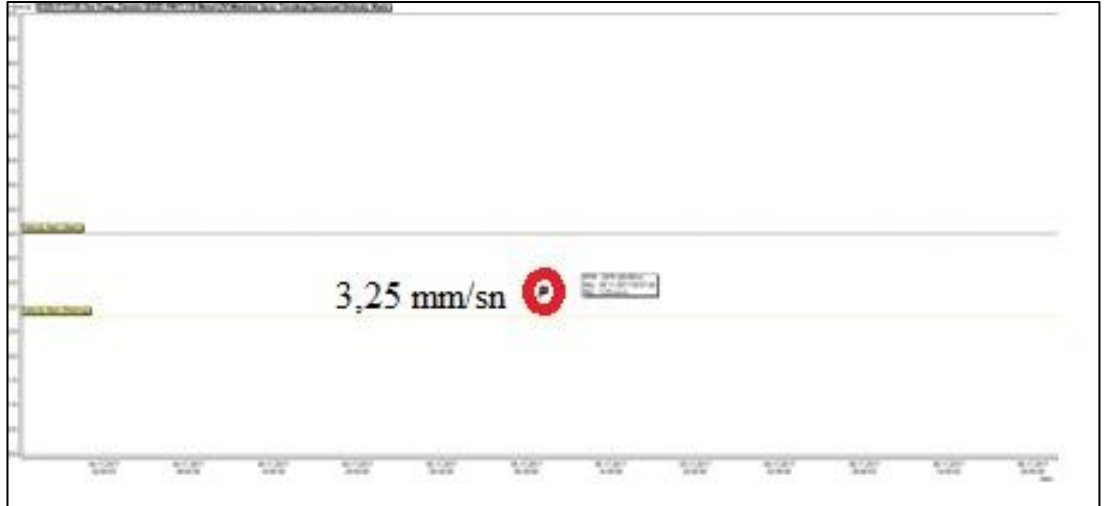
Şekil 5.5. Toplam vibrasyon değeri (motor ön yatak-yatay)

### 5.2.3. Motor ön yatak

Motor ön yatağa ait dikey spektral grafik, Arka arkaya devrin 3 katı tespit edilmiştir. Devrin 1. katı dominant fakat 2. ve 3. katlarındaki harmonik değerleri çok düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. Genlik değerleri sırasıyla; 2.30 mm/sn, 0.22 mm/sn ve 0.21 mm/sn'dir. Toplam vibrasyon değeri 0-400 Hz arasında 3,25 mm/sn'dir.



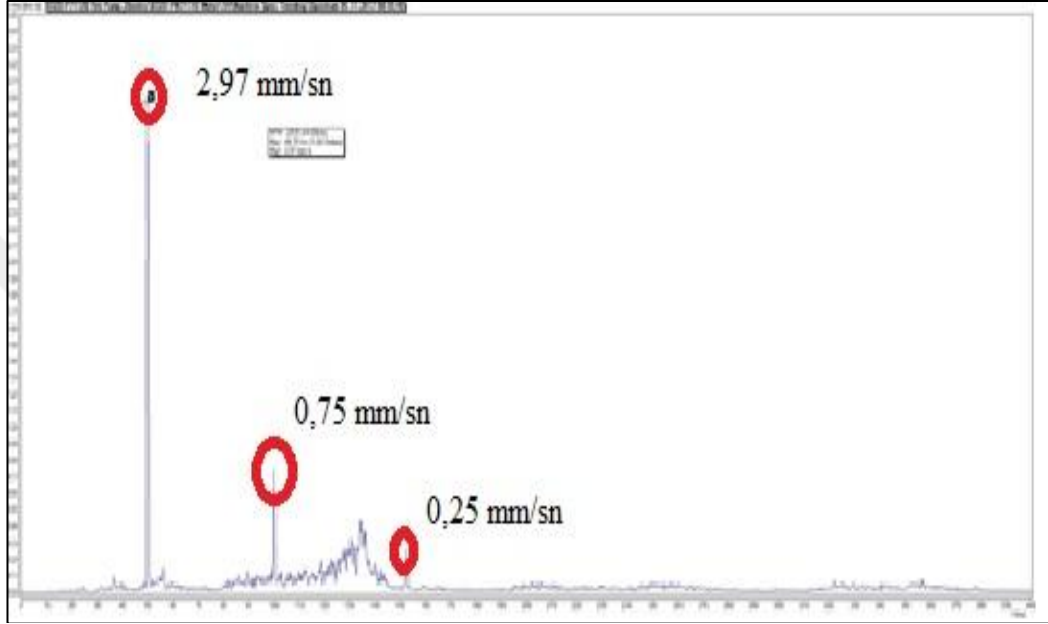
Şekil 5.6. Spektral grafik (motor ön yatak-dikey)



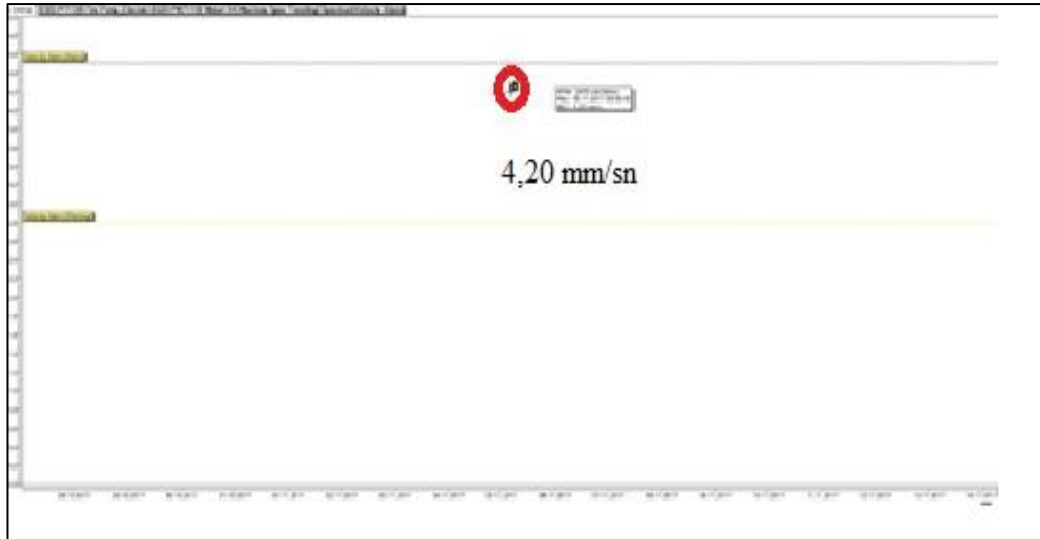
Şekil 5.7. Toplam vibrasyon değeri (motor ön yatak-dikey)

#### 5.2.4. Motor ön yatak

Motor ön yatağa ait aksel spektral grafik, devrin 1. 2. ve 3. katlarında 3 adet harmonik göstermektedir. Genlik değerleri sırasıyla; 2,97 mm/sn-0,75 mm/sn-0,25 mm/sn'dir. Devrin ilk katı dominanttır. Toplam vibrasyon değeri 0-400 Hz arasında 4,20 mm/sn'dir.



Şekil 5.8. Spektral grafik (motor ön yatak-eksenel)



Şekil 5.9. Toplam vibrasyon değeri (motor ön yatak-eksenel)

Tablo 5.1. Bulgular sayısal değerler listesi

Zaman tabanlı titreşim analiz sonuçları				
Ölçüm pozisyonu	En yüksek genlik değeri (g)			
Motor arka yatak-yatay	0,733			
Frekans tabanlı titreşim analiz sonuçları				
Ölçüm pozisyonu	1.devir (mm/sn)	2.devir (mm/sn)	3.devir (mm/sn)	Toplam (mm/sn)
Motor arka yatak-yatay	2,34	0,50	-	3,31
Motor ön yatak-yatay	5,32	-	-	5,32
Motor ön yatak-dikey	2,30	0,22	0,21	3,25
Motor ön yatak-eksenel	2,97	0,75	0,25	4,20

### 5.2.5. Arıza Teşhisi

Hata analizi kabul görmüş uluslararası çizelgeler ve ISO 10816-3, 15kW-300kW'lık güç aralığında, grup 2 kapsamında yapılmıştır. Buna göre; toplam vibrasyon verileri spektral grafikler ile beraber incelendiğinde, motor-pompa arasındaki kaplin ayarının bozulmuş olduğu tespit edilmiştir. Çünkü motor ön yatak ekstenel yöndeki spektral grafik; devrin 1, 2 ve 3. katlarındaki tepeler yüksek genlik değerleri ile beraber aktif olduğunu göstermektedir. Ayrıca kaplin den geçen dinamik kuvvetlerin fazlaşması nedeniyle, kontrolsüz yüklerin yansıması motorun ön yatağında olmuştur, dolayısıyla motor ön yatak yatay pozisyona ait spektral grafik; devrin 1. katındaki yüksek tepe değeri ve toplam vibrasyon değeri ile beraber aşırı arttığını göstermektedir. Son olarak vibrasyon değerlerindeki diğer bir artış motor arka yatakta gözlemlenmiştir. Çünkü kontrolsüz yükler, mil üzerinden motor arka yatağına aktarılmıştır. Dolayısıyla motor arka yatak yatay pozisyona ait spektral grafik; devrin 1. ve 2. katlarındaki tepe değerleri ve toplam vibrasyon değeri ile beraber ikinci önemli artışı göstermektedir. Zayıf kaplin ayarı; ekstenel bir düzlemde dönen şaft boyunca etkili olan ve genellikle ekstenel ayarsızlıktan dolayı tahrik olunan makineden tahrik ünitesine doğru dinamik kuvvetlerin geçişine imkân sağlamıştır. Ayrıca motor şaftı ile iletilen zorlayıcı kuvvetler motor ön ve arka yataklara ilave stres yüklemiş, buda motorun her iki yatağında vibrasyon değerlerini yukarı yönlü artırmıştır.



Elektrik motorlarında limitsiz uzun dönem kullanım için: 1,4-2,8 mm/sn hız değerleri aralığı kabul edilir. Kısa dönem kullanım için ise: 1,4-4,5 mm/sn hız aralığı izin verilir. Bu limitlerin üstündeki vibrasyon değerleri izin verilebilir değerler değildir. Bu çerçevede, ölçümü yapılan motora ait toplam vibrasyon değerleri izin verilebilir kısa dönem operasyonlar için geçerli vibrasyon hız limitleri içinde olduğu için, uygun bakım planında kaplin ayarı yapılmalıdır. Şayet kaplin ayarı yapılmaz ise, yataklar üzerine aktarılan stres, yataklar da yıkıcı etki doğuracak, motor kullanım ömürlerini azaltacak ve motorun aşırı akım çekerek verimsiz çalışmasına neden olacaktır. Uygun bir bakım kapsamında bakıma alınması gereklidir.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 200 kW güce sahip bir elektrik motoruna ait şaft yataklarından titreşim verileri toplanmış ve bu verilerinin frekans tabanındaki (spektrum) grafikleri ile beraber toplam vibrasyon değerleri kullanılarak titreşim analizi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara istinaden hizasızlık problemi tespit edilmiştir. Hizasızlık problemi çözülmez ise; şaftlar üzerinde hem radyal hem de eksenel yönde gerilmeler oluşacaktır. Oluşan bu gerilmeler yataklarda aşırı mekanik titreşime yol açacaktır. Eksen kaçıklığı sonucu oluşacak eksenel ve radyal yükler şafttan şafta iletilirken, dönen makine millerinde eğik şaft, yataklarda rulman deformasyonuna neden olacaktır.

Elektrik motoru şaft yataklarında hissedilen titreşimlerin büyük bir kısmı mekanik kısımdan kaynaklanırken, elektriksel kısmın yataklar üzerindeki titreşime katkısı, düşük seviyededir. Motor titreşimine neden olan arızaların kaynağı, titreşim analizi ile hızlı ve kolay bir şekilde belirlenebilmektedir.

Elektrik motorunun yapısal parçaları tarafından üretilen mekanik titreşimler, farklı genlik ve frekanslara sahip sinüzoidal eğriler şeklinde oluşur. Bu bilgi, titreşim analizi ile arıza teşhisinde, arıza yeri konumlandırılmasında ve titreşim kaynaklarının tespitinde güçlü bir araç olarak kullanılabilir. Dahası frekans tabanındaki grafiklerin değerlendirilmesini kapsayan titreşim analizi harici bir titreşim kaynağının, hangi frekans ve genlikte olduğunu yani şiddetini ortaya çıkaran çok hızlı, efektif ve uygulanabilir bir analiz yöntemi olmakla kalmaz, aynı zamanda rutin olarak yapılan ölçümler ve analizler motor çalışma durumunun takibine katkı sağlar. Bu özellik geri dönüşümsüz motor hasarlarını önlemek, endüstriyel üretim hatlarının beklenmedik şekilde kapatılmasını engellemek, üretim hatlarının duruş süresini ve maliyetini azaltmak için çok önemlidir.

Titreşim analizi ile arıza teşhisinde başarıya ulaşabilmek için, analist; beklenen arıza tiplerine uygun ölçüm türünü ve yerini seçmelidir. Ölçüm yerinde ve pozisyonlarında tutarlı olmalıdır. Titreşim ve ölçüm değişkenlerini olası arıza tipine göre dikkatli bir

şekilde belirlemelidir. Titreşim seviyeleri için kabul ve ret seviyelerini endüstriyel olarak ispatlanmış vibrasyon çizelgelerinden yararlanarak uygulamalıdır.

Titreşim analizindeki kısıtlamalar ise, yapısal bileşimi bilinmeyen makinalarda titreşim kaynağına ait frekans bilgisi hızlı bir şekilde bilinemez, bu yüzden analiz için mükerrer ölçümlere ve zamana ihtiyaç duyulur. Uygun ölçüm noktası ve pozisyonuna karar verilmez ise spektrum grafiklerde tanımsız frekans bilgisi beklenir. Ölçüm yapılırken zaman zaman elektronik parçaların verimsiz çalışmasına mahsuben veri kaybı gözlenir.



## KAYNAKLAR

- [1] Kerkman R., Leggate D., Pankau J., Schlegel D., Skibinski G., Reflected Waves and Their Associated Current, *IEEE Industry Applications Conference*, St. Louis, USA, 12-15 October 1998.
- [2] O'Donnell P., Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, **IA-21**(4), 853-872.
- [3] Albrecht B. P. F., Appiarius J. C., Sharma D. K., Assessment of The Reliability of Motors in Utility Applications-Updated, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1986, **EC-1**(1), 39-46.
- [4] Sönmez D., Asenkron Motor Rulman Arızasının Titreşim İşaretleri Üzerinden Entropi Tabanlı Analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 504002153.
- [5] Kayaalp K., Asenkron Motorlarda Veri Madenciliği ile Hata Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2007.
- [6] Delaunois F., El Kihel B., Jeffali F., Nougauoi A., Monitoring and Diagnostic Misalignment of Asynchronous Machines by Infrared Thermography, *Journal of Materials and Environmental Science*, 2015, **6**(4), 1192-1199.
- [7] Akar M., Hatık G., İngenç E., Asenkron Motorda Statik Eksenden Kaçıklık Arızasının İncelenmesi, *2<sup>nd</sup> International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Karabük, Türkiye, 18-20 Haziran 2014.
- [8] Mohamed R., Nuawi M. Z., Othman M. S., Vibration and Acoustic Emission Signal Monitoring for Detection of Induction Motor Bearing Fault, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2015, **4**(5), 924-929.
- [9] Orman M., Pinto C. T., Acoustic Analysis of Electric Motors in Noisy Industrial Environment, *12<sup>th</sup> Imko Tc 10 Workshop Technical Diagnostics New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Industrial Applications*, Florence, Italy, June 6-7 2013.
- [10] Hulugappa B., Pashab T., Ramakrishnac K. M., Condition Monitoring of Induction Motor Ball Bearing Using Monitoring Techniques, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, **2**(11), 406-413.

- [11] Chaudhary M., Danish N., Vibration Monitoring of Induction Motor by Using Accelerometer, *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology*, 2015, **4**(8), 850-852.
- [12] Rızvan O., Elektrik Motorlarında Titreşim Analizi: Rotor-Stator Arızası, *Mühendis ve Makina*, 2015, **56**(668), 29-34.
- [13] Agarwal A., Misra R., Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor: Case Study, *International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, 2015, **5**(1), 30-35.
- [14] Khanaa V., Udayakumar R., Health Monitoring System for Induction Motors, *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2013, **2**(4), 1117-1122.
- [15] Chatterjee T. K., Kumar P., Sinha A. K., An Assessment of Vibration Monitoring as an Effective Tool for Induction Motor Condition Monitoring and Fault Diagnosis: A Brief Review, *International Science Press*, 2016, **9**(41), 407-416.
- [16] Aderiano M. S., Induction Motors Fault Diagnostic and Monitoring Methods, Master Thesis, Marquette University, Electrical and Computer Engineering, Milwaukee, 2006.
- [17] Kaya D., Öztürk H., *İkincil Enerji Üretimi ve Elektrik Motorları*, Umuttepe Yayınları, 1. Baskı, Kocaeli, 2012.
- [18] TC Milli Eğitim Bakanlığı, *Elektrik Makinelerinde Mekanik Arıza Tespiti*, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, 1. Baskı, Ankara, 2011.
- [19] Bose B. K., *Modern Power Electronics and Ac Drives*, 7th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [20] Slemmon G. R., Electrical Machines for Variable-Frequency Drives, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1994, **82**(8), 1123-1139.
- [21] Tsytkin M., Induction Motors Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique - a Practical Implementation, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, Ontario, Canada, 15-18 May 2011.
- [22] Girdhar P., Scheffer C., *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2004.
- [23] Technical Associates of Charlotte Inc., *Training Manual of R0294-1*, 1st ed., Entek Ird International, USA, 1993.
- [24] Gaydon B. C., Tavner P. J., Ward D. M., Monitoring Generators and Large Motors, *Institution of Electrical Engineers*, 1986, **B-133**(3), 169-180.

- [25] Ashen. R. A., Knight. L. G., Steele M. E., Motor Condition Monitoring Methods, *Proceedings of Conference on Drives, Motors and Controls*, North Yorkshire, UK, October 1983.
- [26] Leonard. R. A., Thomsam, W. T., Vibration and Stray Flux Monitoring for Unbalanced Supply and Inter-Turn Winding Fault Diagnosis in Induction Motors, *1<sup>st</sup> UK International Conference on Condition Monitoring*, Swansea, UK, April 1984.
- [27] Gökçe M., Kılıç R., Kazan R., Eksen Kaçıklığının Motopompalar Üzerinde Oluşturduğu Titreşimlerin İzlenmesi ve Titreşim Analizi ile Tespiti, *11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 04-06 Eylül 2003.
- [28] Mobius Institute, *Ilearn Interactive Vibration Training Quick Reference*, 1st ed., Mobius Software, Victoria, 1999.
- [29] Arslan H., Aktürk N., Orhan S., Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 2003, **18**(2), 39-48.
- [30] Köse R. K., Rezonans-Krik Hız Makina Arızalarının Temel Sorunu, *Mühendis ve Makina*, 2004, **45**(538), 52-58.
- [31] Orpin P., Thomsam, W. T., Current and Vibration Monitoring for Fault Diagnosis and Root Cause Analysis of Induction Motor Drives, *31<sup>st</sup> Turbomachinery Symposium*, Houston, USA, 9-12 September 2002.
- [32] Li X., Nandi S., Toliyat H.A, Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, **20**(4), 719-729.
- [33] Bayrak M., Küçüker A., Detection of Stator Winding Fault in Induction Motor Using Instantaneous Power Signature Analysis, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2015, **23**(5), 1263–1271.
- [34] Pain J. H., *The Physics of Vibrations and Waves*, 6th ed., John Wiley & Sons, Oxford, 2005.
- [35] Köse R. K., Makina Arızası Belirlenmesinde Kullanılan Vibrasyon Analizinde Dairesel Titreşim Dalgaformu, *Mühendis ve Makina*, 2009, **50**(598), 61–65.
- [36] Harris C. M., Piersol A. G., *Shock and Vibration Handbook*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [37] Mellor A., *Vibration Monitoring Training Course Notes*, AV Technology Ltd., 1st ed., AVT Software, Cheshire, 2006.
- [38] Köse R. K., Mekanik Titreşim Analizi ile Makine Arızalarının Belirlenmesi, *11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 04-06 Eylül 2003.
- [39] Petters J. D., *Beginning Vibration Analysis Course Notes*, CTC Technology Center Inc, 1st ed., CTC Vibration Analysis Hardware, New York, 2008.

- [40] Mobley R. K., *Root Cause Failure Analysis*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, USA, 1999.
- [41] Hammond J., Shin K., *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, 1st ed., John Wiley & Sons, UK, 2008.
- [42] Alfred M., *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*, 1st. ed., John Wiley & Sons, UK, 1999.
- [43] Beranek L. L., Ver L. I., *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*, 2nd. ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- [44] Newland D. E., *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*, 3rd. ed., Dover Publication, Mineola, 2005.
- [45] <http://bozkir.hol.es/elektrik/elektrik/>, (Ziyaret tarihi: 30 Aralık 2012).

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Özdemir E., Şahin A., Pipework Structural Vibration Analysis at Pump Station in Crude Oil Pipelines, *8<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 19-22 October 2017.





## **ÖZGEÇMİŞ**

Abdullah ŞAHİN 1980 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini İzmit'te bitirdi. 1999 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında mezun oldu. 2016 yılında Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Şuan 2005 yılında göreve başladığı, Bakü-Tiflis-Ceyhan ham petrol boru hattında, korozyon kontrol ve denetleme mühendisi olarak çalışmaktadır.

