



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ASENKRON MOTORLARDA RULMAN
ARIZASININ VE EKSEN KAÇIKLIĞININ
TANISI VE ANALİZİ**

Enes YÜCEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Enes YÜCEL tarafından hazırlanan “Asenkron Motorlarda Rulman Arızasının ve Eksen Kaçıklığının Tanısı ve Analizi” adlı tez çalışması 19/11/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç Dr. Bayram AKDEMİR

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Mustafa YAĞCI

Üye

Dr. Öğretim Üyesi Mümtaz MUTLUER

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet AVCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Enes YÜCEL

Tarih: 17.12.2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZASININ VE EKSEN KAÇIKLIĞININ TANISI VE ANALİZİ

Enes YÜCEL

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞCI

2018, 64 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Bayram AKDEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞCI
Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

Asenkron motorlar endüstriyel tesislerin hemen hemen hepsinde bulunan oldukça önem taşıyan ekipmanlardır. Asenkron motorlarda oluşacak hatalar sanayide istenmeyen duruşlara sebep olacaktır. Bu duruşlar zaman kayıplarının yanı sıra maddi kayıplara da neden olacaktır. Bu kayıpların önüne geçmek için titreşim analiziyle durum izleme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu şekilde motorun çalışma durumu takip edilerek arızalar duruş yaşanmadan tespit edilir.

Bu çalışmada ilk olarak bakım tekniklerinden ele alınmıştır. Bakım metotları arasındaki farklar gösterilerek titreşim analizinin önemi vurgulanmıştır. İkinci aşamada titreşim terimleri üzerinde durularak titreşim terminolojisi kavramları ortaya çıkarılmıştır. En son aşamada ise uygulama çalışmasına yer verilmiştir.

Elektrik motorlarında oluşan arızalar eksen kaçıklığı, rulman arızası, kırık rotor çubuğu, sargı hataları ve dengesiz rotor şaftı olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında, arızaların %40'ını oluşturan eksen kaçıklığı ve rulman arızaları derinlemesine ele alınmıştır. Elde edilen titreşim ölçüm sonuçları analiz edilerek arıza bulma teknikleriyle kestirimci bakım yapılmıştır. Böylece arıza duruşa sebep olmadan müdahale edilmiştir. Ayrıca elde edilen saha sonuçlarının teorik hesaplamalarla uyum içinde olduğu da tespit edilmiştir.

Bu çalışmada örnek olarak sunulan elektrik motorunun titreşim ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerin sonucunda titreşim analizinin kavramları, titreşim verilerinin sağlanması, titreşim sinyallerinin yazılımda işlenmesi ve titreşim analizi ile elektrik motorlarında meydana gelecek arızaların önceden teşhisini mümkün kılan çalışmalara katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Motoru, Rulman, Vibrasyon, Eksen Kaçıklığı

ABSTRACT

MS THESIS

**IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF BEARING DAMAGE AND
ECCENTRICITY IN INDUCTION MOTORS**

Enes YUCEL

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI

2018, 64 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Bayram AKDEMİR

Asst. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI

Asst. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER

Asynchronous motors are very important equipment in almost all industrial plants. Failures in asynchronous motors will cause unwanted stops in the industry. These downtimes will result in financial losses as well as time losses. In order to prevent these losses, situation monitoring methods are applied by vibration analysis. In this way, the working condition of the motor is monitored and the malfunctions are determined without stopping.

In this study, firstly, maintenance techniques are discussed. The importance of vibration analysis is emphasized by showing the differences between maintenance methods. In the second stage, the concepts of vibration terminology were emphasized. At the last stage, the application work is included.

Faults in electric motors can be listed as axis misalignment, bearing failure, broken rotor rod, winding errors and unbalanced rotor shaft. In this thesis, 40% of the faults, axis misalignment and bearing failures are discussed in depth. The results of vibration measurement were analyzed and predictive maintenance was performed with fault finding techniques. Thus, the intervention was interrupted without stopping. It was also determined that the obtained field results were in agreement with the theoretical calculations.

In this study, vibration measurement of the electric motor presented as an example was performed. As a result of these measurements, the concepts of vibration analysis, providing vibration data, processing of vibration signals in the software and vibration analysis are aimed to contribute to the studies that enable the pre-diagnosis of faults that will occur in electric motors.

Keywords: Electric Motor, Bearing, Vibration, Axis Fugitive

ÖNSÖZ

Asenkron motorlar günümüzde başlıca konveyör bantları, pompalar, fanlar, hava kompresörleri, karıştırıcılar gibi birçok endüstriyel uygulama da kullanılmaktadır. Asenkron motorların bu denli sık kullanılması endüstriyel tesislerin işleyişini direkt etkilemektedir. Bu yüzden bu çalışmada, sanayide kullanılan iki adet asenkron motorda titreşim analizi yapılarak, arıza teşhisi konusunda yapılan araştırmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanmasında fikirleri ve tecrübesi ile desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yağcı'ya sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca her türlü desteği ile her daim yanımda yer alan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Enes YÜCEL
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. BAKIM ÇEŞİTLERİ.....	2
2.1. Arızalanma Sonrası Yapılan Bakım Çalışması.....	2
2.2. Önleyici veya Periyodik Bakım	3
2.3. Kestirimci Bakım	5
2.4. Proaktif Bakım	5
2.5. Titreşim Analizi – Kestirimci Bakım Tekniği için Bir Çözüm Yöntemi.....	6
2.5.1. Titreşim Analizi (Tespit etme modu).....	6
2.5.2. Titreşim Analizi (Teşhis modu)	7
2.5.3. Titreşim Analizinin Faydaları	8
3. TİTREŞİM TERİMLERİ	9
3.1. Yer Değiştirme (Deplasman) Tanımı	11
3.2. Hız Tanımı	11
3.3. İvme Tanımı.....	11
3.4. Dalga Formu Tanımı.....	12
3.5. Çevrim Tanımı	13
3.6. Frekans (f) Tanımı	13
3.7. Periyot (T) Tanımı	13
3.8. Dalga Boyu (λ) Tanımı	13
3.9. Faz Tanımı	14
3.10. Genlik Terimleri	14
4. SİNYAL İŞLEME SÜRECİ.....	15
4.1. Titreşimi Tanımlayan Parametreler	16
4.2. Genliği Tanımlayan Parametreler	17
4.3. Genlik için Kullanılan Birimler	17
4.4. Titreşim Parametrelerinin Belirlenmesi	18
4.5. Ham Titreşim Verilerinin Toplanması.....	19
4.6. Ölçüm Noktaları	19
4.7. Ölçülen Verileri İşleme.....	20
4.8. Zaman Tabanlı Analiz	20
4.9. Frekans Tabanlı (Spektrum) Analiz.....	21

4.10. Fourier Dönüşümü	21
4.11. Zaman ve Frekans Tabanlı Titreşim Analizi	22
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
5.1. Ölçümü Yapılan AC Motorlarının Özellikleri.....	23
5.2. Sensör Özellikleri	25
5.3. Titreşim Analizi ve Veri Yönetimi Cihazı.....	26
5.4. Motor Titreşim Ölçümleri.....	28
5.5. Sinyal İşleme Aşaması.....	28
5.6. Rota Oluşturma Aşaması	29
5.6.1. Rulman Tanımlama.....	29
5.6.2. Grafik Tipi Belirleme.....	30
5.6.3. Frekans Limit Değeri Belirleme	31
5.6.4. Alarm Limit Değeri Belirleme.....	32
5.6.5. Frekans Bantları Oluşturma	32
5.7. Ölçümlerin Değerlendirilmesi ve Arıza Tanımları	33
5.8. Rulman Arızası	34
5.9. Rulman Arıza Frekansı Hesaplama	37
5.10. Eksen Kaçıklığı Arızası	38
5.10.1. Açısal Hizasızlık	39
5.10.2. Paralel Hizasızlık	40
5.10.3. Statik Eksen Kaçıklığı	40
5.10.4. Dinamik Eksen Kaçıklığı.....	40
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	42
6.1. Türbin Soğutma suyu pompası elektrik motoru eksen kaçıklığı arızası	42
6.2. Şerbet Pompası Elektrik motorunun rulman hasarı	44
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a(t)	: Zamana göre doğrusal ivme
F	: Kuvvet, (N)
f	: Frekans, (Hz)
I	: Akım, (A)
g	: Yerçekimi, (m/s ²)
k	: Yay sabiti
λ	: Dalga boyu, (mm)
M	: Kütle, (kg)
n	: Motor devri, (d/d)
s	: Kayma
T	: Periyot, (sn)
t	: Zaman, (sn)
v(t)	: Zamana göre doğrusal hız
r	: Yarıçap
S	: Yüzey
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
ω	: Açısal hız, (rad/s)

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
CPM	: Cycles Per Minute (Dakikadaki çevrim sayısı)
kCPM	: Kilo Cycles Per Minute (Dakikadaki çevrim sayısı)
dB	: Decibel (Desibel)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
SEK	: Statik Eksen Kaçıklığı
DEK	: Dinamik Eksen Kaçıklığı
RMS	: Root Mean Square (Ortalama Karekök)
RPM	: Revolution Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)

1. GİRİŞ

Sanayide çoğu iş, döner hareket sağlayan asenkron motorlar vasıtası ile yapılmaktadır. Pompa, kompresör, konveyör, türbin, fan bu makinelerin en çok kullanılanlarıdır. Çeşitli faktörlerin etkisiyle çalışma sürelerince zamanla bu makinelerin sağlıklı çalışma durumları bozulur, istenmeyen arızalar ortaya çıkar. Bu arızalar makinenin görevini düzgün olarak yapamamasına, daha sonraki süreçlerde ise tamamen arızalanıp kullanım dışı kalmasına sebebiyet vermektedir. Döner makinelerde sıklıkla rastlanılan arızalardan iki tanesi dengesizlik ve rulman arızasıdır. Bu arızaları engellemenin en iyi yolu, başlangıç aşamasında iken henüz tehlikeli bir konuma gelmeden ve makina da herhangi bir duruşa neden olmadan arızayı belirlemektir. Titreşim analizi ile kestirimci bakım günümüzde mevcut metotlar arasında en sağlıklı olanıdır. (S. Orhan, 2002)

Bu çalışmada, bir motorda oluşan rulman arızası ve eksen kaçıklığı problemleri ele alınmıştır. Rulman hasarı sonucu hasarın dış bilezikten iç bileziğe tesir etmesi ve arızanın genel süreci titreşim sonuçlarından elde edilen spektrumlarla analiz edilmiştir. Eksen Kaçıklığı probleminde ise hasarın grafikte periyodik olarak izlenmesi takip edilerek hasar önceden tespit edilmiştir.

1.1. Kaynak Araştırması

Rulmanlar döner hareket yapan makinaların yataklanmasında kullanılan önemli makine elemanlarıdır. Makinenin gövde yükünü taşırlar ve zemine olan irtibatı sağlarlar. Rulmanda meydana gelecek bir hasar makinenin çalışmasında istenilen verimi ortadan kaldıracaktır. Eğer rulman arızası kestirimci bakım dahilinde önceden tespit edilip çözüm bulunamazsa, bu arıza başka tür arızalara sebebiyet verecektir. Bu bakım yönteminde motorların periyodik olarak yapılan ölçümlerdeki titreşim analizleri incelenir. Bu titreşim analizleri yoluyla, oluşan arızanın sebebi ve hangi seviyede olduğu makineye zarar vermeden tahmin edilebilir. Elde edilen titreşim değerleri ISO 10816-1 v.b. standartlarda belirtilen veya imalatçı firmanın önerdiği değerlerle karşılaştırılarak arızanın şiddeti ve bakım takvimi belirlenebilir (T.Belek, 1988; H.Dal ve diğ., 2006; H.Dal ve diğ., 2007).

Bu tür problemlerden kurtulmak için gerek dengesizlik arızasının, gerekse rulman arızasının alarm durumuna gelmeden önce tespit edilip gerekli bakımı yapılmalı, bu arızalar giderilmelidir. Bu amaç dahilinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. (S. Orhan,

2003) dönen makinelerde sürekli karşı karşıya kalınan dengesizlik, mekanik gevşeklik, eksen kaçıklığı, rulman arızalarının vibrasyon ölçümü ve spektrum grafiklerinin analizi ile nasıl belirlenebileceğini açıklamıştır. Bu çalışmalar ışığında ölçüm detaylarına ve bileşenlerine ışık tutulmuş, endüstride önem taşıyan bir ekipman için zamanında giderilmeyen mekanik gevşeklik arızasının rulmanın yüzeyinde oluşturduğu aşınmaya odaklanılarak arıza teşhisi örneklendirilmeye çalışılmıştır. Bir başka çalışmada (S.Orhan ve diğ., 2006) bilyalı rulmanların dış bileziklerinde meydana gelen hasarın titreşim analizi sonucu nasıl tespit edilebileceği detaylı olarak anlatılmıştır. M.F. Karahan, demir-çelik sanayisinde kullanılan makinelerde titreşim analizi yöntemiyle kestirimci bakım uygulamasını gerçekleştirmiştir (M.F. Karahan, 2005).

2. BAKIM ÇEŞİTLERİ

Farklı işletmelerin bakım yöntemlerini ele aldığımızda işletmelerin çalışma prensiplerinin birbirinden çok farklı olsa da bakım felsefeleri birbirine benzer. Bu bakım felsefeleri çoğunlukla dört ayrı gruba ayrılır:

- Arızalanma sonrası yapılan bakım çalışması
- Önleyici veya periyodik bakım
- Kestirimci bakım
- Proaktif bakım
-

Bu kategorilere Şekil 1.1 'de yer verilmiştir. (C.Sheffer ve P.Girdhar, 2004)

2.1. Arızalanma Sonrası Yapılan Bakım Çalışması

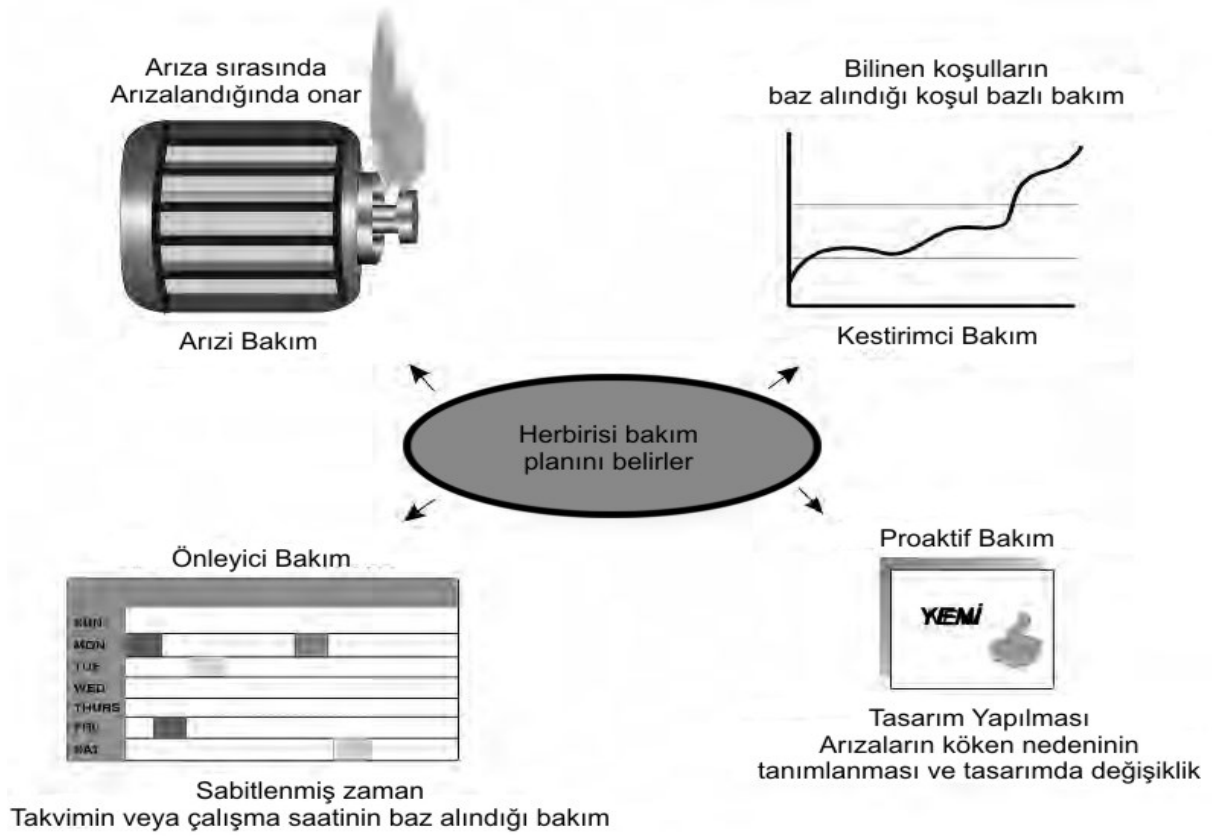
Arızanın akabinde yaşanan duruştan sonraki bakımının temel nedeni ekipmanın arızalanana kadar çalışmasına müsaade etmek ve sadece ekipman tamamen duracak duruma geldiğinde veya gelmeden hemen önce hasarlanan parçaların onarılmasıdır. Bu bakım şekli eğer ekipmanın durması üretimi belirli oranda etkilemiyor, işçi ve malzeme maliyetleri açısından bir problem oluşturmuyorsa işe yarayabilir.

Bu bakım şeklinin negatif tarafı, bakım biriminin çoğunlukla plansız bir şekilde kriz modunda çalışmasına sebep olur. Üretimde ani duraksamalar oluştuğunda anında bakımın yapılabilmesi bütün yedek parçalara gereksinim duyulmaktadır. Şüphesiz bu, üretim yapan bir tesis için bakım yapmanın en verimli olmayan yoludur. Maliyeti azaltmak için daha ucuz yedek parçaların temin edilmesi ve kalifiye olmayan işçilerin kullanılması problemi daha da olumsuz bir noktaya getirir.

Çoğunlukla bu gibi durumlarda ekstra mesai gerekeceğinden, her gün bitmemiş iş listesi ile karşılaşmaktan ve muhtemel olarak gece boyunca yeni beklenmedik işler çıkacağından dolayı bakım personelinin morali düşüktür.

2.2. Önleyici veya Periyodik Bakım

Kestirimci bakımın temel mantığı daha önceden planlanan zaman aralıklarında belirli bir takvimi ve ekipmanların çalışma saatlerini baz alarak bakım çalışmasının programlanmasıdır. Burada en kritik nokta, hasarlı ekipmanın onarılması veya değiştirilmesi arıza açık olarak ortaya çıkmadan önce yapılmaktadır. Bu felsefe ekipman devamlı olarak çalışmıyorsa ve bakım personeli yeterli ölçüde kalifiye değil ise ve önleyici bakımın yapılması için yeterli vakit yok ise faydalıdır.



Şekil 1.1 Bakım felsefeleri (C.Sheffer ve P.Girdhar, 2004)

Bu felsefenin en kötü tarafı planlanan bakım faaliyetlerinin ya çok erken ya da çok geç yapıldığı durumlardır. Ekipman belirli bir süre çalıştıktan sonra bakım programına alınabilir. Burada herhangi bir elle tutulur bir arıza kanıtına rastlanılmasa da makine bileşenlerinin halen çalışma ömürleri olmasına rağmen yenisi ile değiştirilmektedir. Muhtemel bir problem ise gereğinden fazla bakım yapılmasından dolayı üretimde azalma ihtimali ortaya çıkar. Birçok durumda doğru olmayan onarım çalışmasından dolayı performansın düşmesi söz konusudur. Bazı durumlarda hiçbir sorunu olmayan ekipmanlar sökülür, bunların sağlam parçaları çıkarılır, sonrasında ise soruna neden olacak şekilde yeni parça montajı yapılması bu bakım çeşidinin muhtemel problemlerinden birisidir.

2.3. Kestirimci Bakım

Bu bakım türü sadece işlevsel bir arıza tespit edildiğinde bakım faaliyetlerinin programlanmasından ibarettir. Çalışma koşulları düzenli aralıklarla izlenmeli ve sağlıklı olmayan çalışma tespit edildiğinde ekipmandaki sorunlu parçalar bulunmalı ve bakım için programı yapılmalıdır. Daha sonra ekipman en uygun zamanda durdurularak sorunlu parçalar sağlamları ile değiştirilmelidir. Eğer bu durum göz ardı edilirse bu arızalar maliyeti daha yüksek olan başka hasarlara sebebiyet verecektir.

Bu bakım yönteminin avantajlarından birisi de bakım faaliyetlerinin düzenli olarak planlanabilmesidir. Bu yöntem gerekli bakım için yedek parçaların satın alınmasında daha tedarik için süre kazandırmaktadır. Bu sayede stokta daha düşük miktara yedek parça depolanması sağlanmaktadır. Bakım işi sadece gerekli görüldüğü zaman yapıldığı için ayrıca üretim kapasitesini engelleyecek bir düşüş olmamaktadır.

Arızalı ekipmanların doğru tespit edilemeyip bakım işlerinin artması ise bu yöntemin muhtemel bir kötü yanısıdır. Ekipman titreşiminde, sıcaklığında veya yağlamadaki sorunların olduğunun bulunması için bu sorunların tespitinde özel cihazlar ve kalifiye personel kullanılmalıdır.

2.4. Proaktif Bakım

Bu felsefe bütün arızaların kendi kökeninin nedenine yakalanmasına dayanmaktadır. Her bir arıza analiz edilmiştir ve anlık ölçümler alınarak bu arızaların tekrar yaşanmayacağından emin olunmuştur. Yukarıda incelenen kestirimci/önleyici bakım yöntemlerinin tümü köken sebepli arıza türüdür. Köken sebepli bakım türünün en büyük avantajı uygun bir kurulum ve bakım tekniği geliştirmeyi sağlamasıdır. Buna ilave olarak bu tip problemlerin yaşanmasını önlemek için ekipmanın yeniden dizayn edilmesini veya bazı değişimler yapılması gerektiğini gündeme getirir.

Kestirimci bakıma benzer şekilde ekipmanların düzenli bir program dahilinde bakımlarının yapılması mümkündür. Fakat kronik olarak oluşan potansiyel problemlerin azaltılması veya tamamen giderilmesi için yapılması gereken revizyonlar ek iş ve personel gücü ile yapılabilmektedir.

Arıza tekrarı, düzenli bakım yapmak için gerekli olan stoklama ve parçaların temin edilmesinde biraz daha zaman kazandırmaktadır. Bu sayede yedek olarak daha az malzeme tutulması sağlanmaktadır. Çünkü bakım onarım faaliyetleri sadece gerçekten ihtiyaç duyulduğunda yapılmaktadır. Arızanın nedeninin bulunmasında ve makinanın güvenilirliğinin arttırılmasında planlama yapılması ek güç sarf edilmesine neden olur. Fakat sonuç olarak üretim kapasitesinde ciddi boyutta artış sağlanmış olur.

2.5. Titreşim Analizi – Kestirimci Bakım Tekniği için Bir Çözüm Yöntemi

Titreşim analizi yaparak ani duruşların öne geçilebileceği gibi dizayn hatası olan ekipmanlar içinde yenilikçi çözümler geliştirilebilir.

2.5.1. Titreşim Analizi (Tespit etme modu)

Titreşim analizi ekipmanın çalışma ve mekaniksel koşulunun belirlenmesi için kullanılır. Bunun en büyük avantajlarından birisi titreşim analiziyle problemler gelişirken çok ciddi bir hale gelmeden ve programsız bir duruşa neden olmadan önce tanımlanabilmesidir. Bu iş ekipmanın ya sürekli olarak ya da belirlenmiş zaman aralıkları ile titreşiminin düzenli olarak izlenmesiyle yapılabilir.

Titreşimin düzenli olarak izlenmesiyle arızalar veya arızalı yataklar, mekaniksel boşluklar ve aşınmış veya kırılmış dişliler tespit edilebilir. Ayrıca titreşim analiziyle kaplin ayarsızlıkları ve dengesizlikler yatakta ve milde bir hasara neden olmadan önce tespit edilebilir.

Titreşim seviyelerindeki eğilim rulmanın yanlış olarak monte edilmesi ve değiştirilmesi, mil ayarının hassas yapılmaması veya rotor balansının doğru yapılamaması gibi kötü bakım tekniklerini tanımlayabilir.

Dönen tüm ekipmanlar dönen parçaların ayarlanması ve dengelenmesi gibi ekipman dinamiğinin bir fonksiyonu olan titreşimler meydana getirirler. Belirli frekanslarda titreşim genliğinin ölçülmesi milin ayarı ve balansın doğruluğu, rulmanların veya dişlilerin durumu ve yataklar, borulama ve diğer yapılardan kaynaklanan rezonanstan dolayı ekipman üzerindeki etkisi hakkında değerli bilgiler verebilir.

Titreşim ölçümü, ekipmanın koşunun devreye alma, devreden çıkarma ve normal çalışma süresince izlenmesi için kullanılabilir etkili ve kullanışlı bir yöntemdir. Titreşim analizi daha çok buhar ve gaz türbinleri, pompalar, motorlar, kompresörler, kağıt makineleri, hadde makineleri, takım tezgahları ve dişli kutuları gibi dönen ekipmanlar için yapılmaktadır.

Son yıllarda teknolojideki gelişmeler ile büyük dizel motorlar ve pistonlu kompresörler gibi pistonlu ekipmanlarda sınırlı olarak titreşim analizi yapılabilmektedir. Ayrıca bu ekipmanlar çalışmalarının tamamen izlenmesi için diğer tekniklere de ihtiyaç duymaktadır.

Titreşim analizi yapabilen bir sistem genellikle;

1. Sinyali alıcı birim (transdüktör)
2. Sinyali analiz eden birim
3. Analiz yazılımı
4. Veri analizleri ve depolama

Bu temel parçalar sürekli açık bir sistemin oluşturulması, taşınabilir ekipman kullanılarak sistemin periyodik olarak analizi veya bir önceden tayin edilmiş zaman aralıklarında bir dizi transdüktörün örnekleme yaptığı çoklu bir sistem olarak düzenlenebilir.

Kablo ile bağlanan ve çoklu sistemler her ölçüm pozisyonu için çok pahalıdır. Hangi düzenlemenin daha pratik ve uygun olduğu ekipmanın kritik doğasına ve özel uygulamalar için sürekli veya yarı sürekli ölçüm verilerine de bağlıdır.

2.5.2. Titreşim Analizi (Teşhis modu)

Operatörler ve teknisyenler genellikle günlük olarak çalıştıkları yerlerde alışılmadık gürültüler ve titreşimler tespit ederler. Gerçekten ciddi bir problem olup olmadığını anlaşılması için titreşim analizi istemektedirler. Eğer problem anlaşılırsa problemin doğru olarak tanımlanması ve ekipmanın ciddi bir arıza göstermeden önce daha ne kadar çalışabileceğinin tahmin edilmesi için ek spektral analiz yapılabilir.

Analiz (teşhis) modunda alınan titreşim ölçümleri daha az kritik olan ekipmanlarda daha az maliyetle yapılabilir. Bu durum özellikle bütçe ve insan gücü sınırlı ise artı puan oluşturmaktadır. Bunun verimliliği daha çok birisinin alışılmadık gürültüleri ve titreşim seviyelerini tespit etmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım maalesef büyük ve karmaşık ve işletmede gürültü seviyesinin yüksek olduğu yerlerde bulunan ekipmanlar için geçerli değildir. Bunun dışında problem belirli bir zaman sonra fark edildiğinde ise büyük miktarda arıza veya hasar meydana gelebilir.

Titreşim analizi için bir diğer uygulama ise ekipmanın onarımının doğru olarak yapılıp yapılmadığının anlaşılması için yapılan kabul testidir. Bu analiz ekipman üzerinde doğru rulman ve dişlinin kullanılıp kullanılmadığını veya kaplin ayarı veya balansın gerekli toleranslar dâhilinde yapılıp yapılmadığının belirlenmesi için kullanılabilir. Ekipmanın haftada veya ayda bir gibi periyodik olarak ekipmanın izlenmesiyle ek bilgiler elde edilebilir. Periyodik analiz ve titreşim seviyelerinin eğilimi rulman veya dişli arızasının daha kolay belirlenmesini ve personelin yakın gelecekte ekipmanın koşulunun ne olacağı hakkında bilgi edinmesine izin verir. Bunun içeriğinde ekipman onarımlarının programsız duruşa neden olacak şekilde bir arızaya meydan vermeden, ekipmanın normal duruşları süresince planlı olarak başlanması bulunmaktadır.

2.5.3. Titreşim Analizinin Faydaları

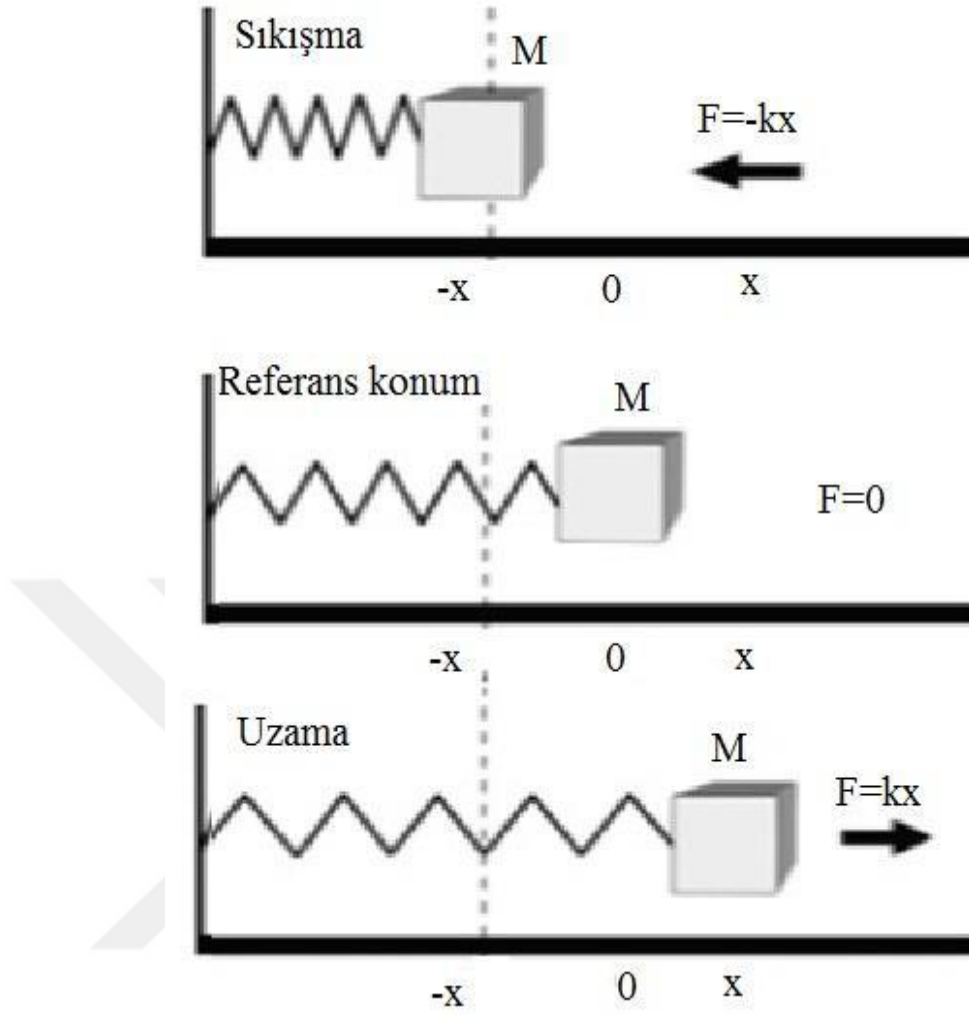
Titreşim analizi doğru yapılmayan bakımı veya onarım işlerini tanımlayabilir. Bunların içerisinde rulmanın yanlış olarak monte edilmesi ve değiştirilmesi, mil ayarının hassas yapılmaması veya rotor balansının yanlış olmasını da bulunmaktadır. Dönen ekipman problemlerinin yaklaşık olarak %80 'i kaplin ayarsızlığı ve balanssızlık ile ilgilidir. Bu sorunların ve tekrar eden ekipman problemlerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması için titreşim analizi önemli bir araç olmaktadır.

Eğilim gösteren titreşim seviyeleri ekipmanın tasarım özelliklerinin ötesinde (daha yüksek sıcaklık, devir ve yükte çalıştırılması) kullanılması gibi işletme hatalarının da ortaya çıkmasını sağlayabilir. Bu eğilimler farklı üreticilere ait benzer ekipmanların tasarımlarının karşılaştırılması veya arızaların performanslarını nasıl etkilediğinin belirlenmesi için de kullanılabilir.

Son olarak titreşim analizi ekipman güvenilirliğinin büyük oranda artırılması için tüm programın bir parçası olarak kullanılabilir. Bu analiz işletmedeki ekipmanın daha hassas kaplin ayarı ve balans, montaj ve onarımların daha kaliteli yapılması ve ortalama titreşim seviyelerinin sürekli olarak aşağıya çekilmesini sağlayabilir. (C.Sheffer ve P.Girdhar, 2004)

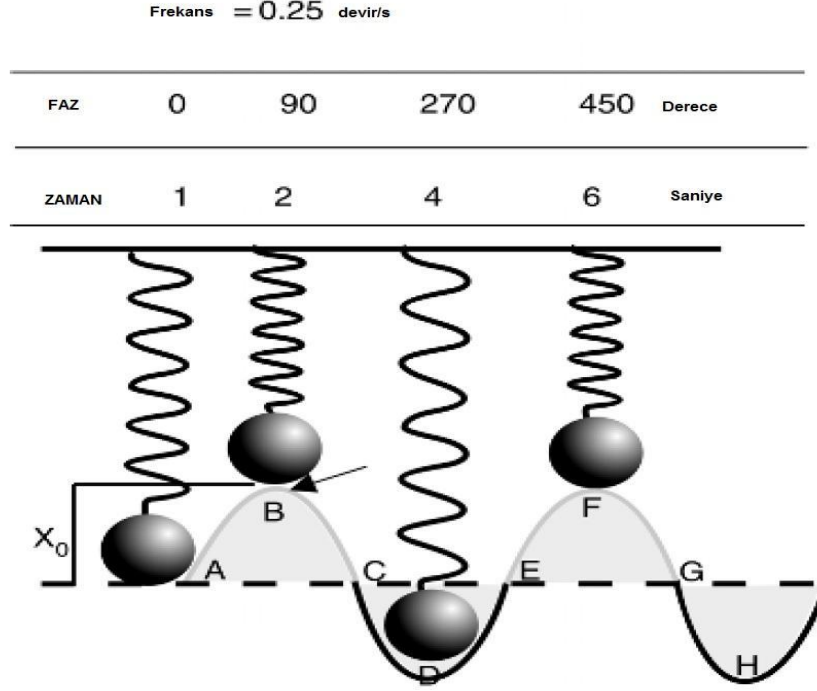
3. TİTREŞİM TERİMLERİ

Titreşim temel olarak, bir sistemin referans eksene göre gerçekleştirmiş olduğu ve belirli bir süre sonra kendini tekrarlayan periyodik hareket olarak ifade edilir. 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 etki edene kadar, herhangi bir hareket ve titreşim yoktur. M kütesine dışarıdan zorlayıcı bir F kuvvet’i uygulandığında ise, yayı sıkıştırır ve kütle sol tarafa doğru hareket eder. Kütle serbest bırakıldığında, ters yönde hareket edip ilk pozisyonuna ulaştıktan sonra, yay gerginliği kütleyle müsaade ettiği kadar sağ tarafa hareket eder. Teorik olarak sonsuza kadar sürecek olan bu hareket, ancak sönümlenme veya sürtünme gibi dış etkiler olduğunda sona erer (Girdhar P. ve Scheffer C., 2004).



Şekil 3.1. Kütle yay sistemi (titreşimin fiziksel gösterimi) (Girdhar P. ve Scheffer C., 2004)

Kütlenin ilk konumundan tepe noktaya, oradan en dip noktaya ve sonunda tekrar ilk konumuna kadar geçen hareketine bir çevrim denir. Kendini tekrar eden ve basit harmonik hareket olarak isimlendirilen bu çevrim, sistemin titreşim değerini (genliği) tespit etmek için gereken tüm bilgileri içerir. Matematiksel olarak bir çevrim hareketi; Bir hareketin yer değiştirmesi ve zaman arasındaki değişen ilişki kullanılarak, sinüzoidal bir grafik formunda ifade edilebilir (Girdhar P. ve Scheffer C., 2004).



Şekil 3.2. Yay-kütle hareketinin zaman göre hareketi (Girdhar P. ve Scheffer C., 2004).

3.1. Yer Değiştirme (Deplasman) Tanımı

Bir kütle için başlangıç konumuna göre ilk noktası ile son noktası arasındaki konum farkına, yer değiştirme denir (Girdhar P. ve Scheffer C.,2004).

3.2. Hız Tanımı

Birim zamanda gerçekleştirilen yer değiştirme miktarıdır. Hız denklemini ifade etmek için yer değiştirme değerinin birinci türevi alınmalıdır (Girdhar P. ve Scheffer C.,2004).

3.3. İvme Tanımı

Birim zamanda gerçekleşen hız değişim miktarıdır. İvme denklemini elde etmek için yer değiştirmenin ikinci türevi alınmalıdır (Girdhar P. ve Scheffer C., 2004).

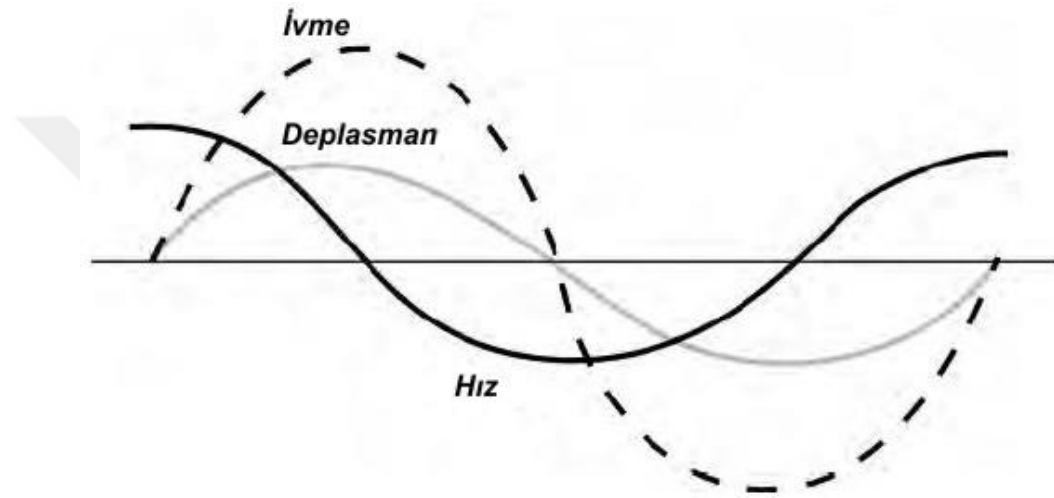
3.4. Dalga Formu Tanımı

En basit titreşim tanımlamak için temel olarak basit harmonik hareket kurallarından yararlanır. Yer değiştirme, hız ve ivme arasındaki dalga form grafiği aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Girdhar P. ve Scheffer C., 2004).

Yer değiştirme : sinüs eğrisi ile temsil edilir.

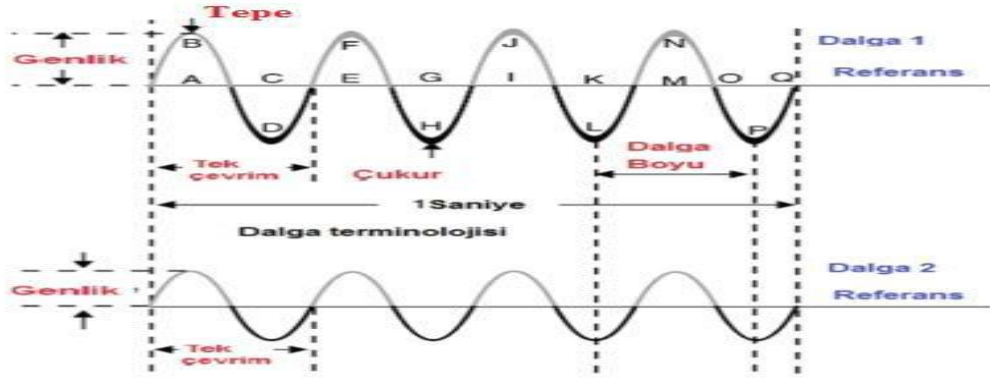
Hız : kosinüs eğrisi ile temsil edilir.

İvme : sinüs eğrisi ile temsil edilir.



Şekil 3.3. Kütlenin ivme, hız ve yer değiştirme dalga formu (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004)

Dalga formları tanımlanırken çevrim, frekans, dalga boyu, genlik ve faz gibi terimler devamlı kullanılır. Makine arıza teşhis etmekte yararlandığımız, vibrasyon analizine bağlı olarak harmonik tespiti ve sonucunda fourier dönüşümü gibi tanımlamalar aşağıda anlatılacaktır.



Şekil 3.4. Farklı genliklere sahip dalga formlarının karşılaştırılması (Şahin A., 2018)

3.5. Çevrim Tanımı

Bir çevrim, bir tepe noktasından ve bir çukur noktasından oluşur. Örneğin E noktası bir çevrimi ifade eder. Burada F noktası pozitif tepe noktasını ve H noktası negatif çukur noktasına tekabül etmektedir (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

3.6. Frekans (f) Tanımı

Saniyede gerçekleşen çevrim sayısı olarak ifade edilir. Dalga 1 ve 2, bir saniye içinde dört çevrim tamamladığı için bunların frekans değeri 4'tür. Birimi devir/sn – hertz – Hz' dir. Sembölü f harfidir (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

3.7. Periyot (T) Tanımı

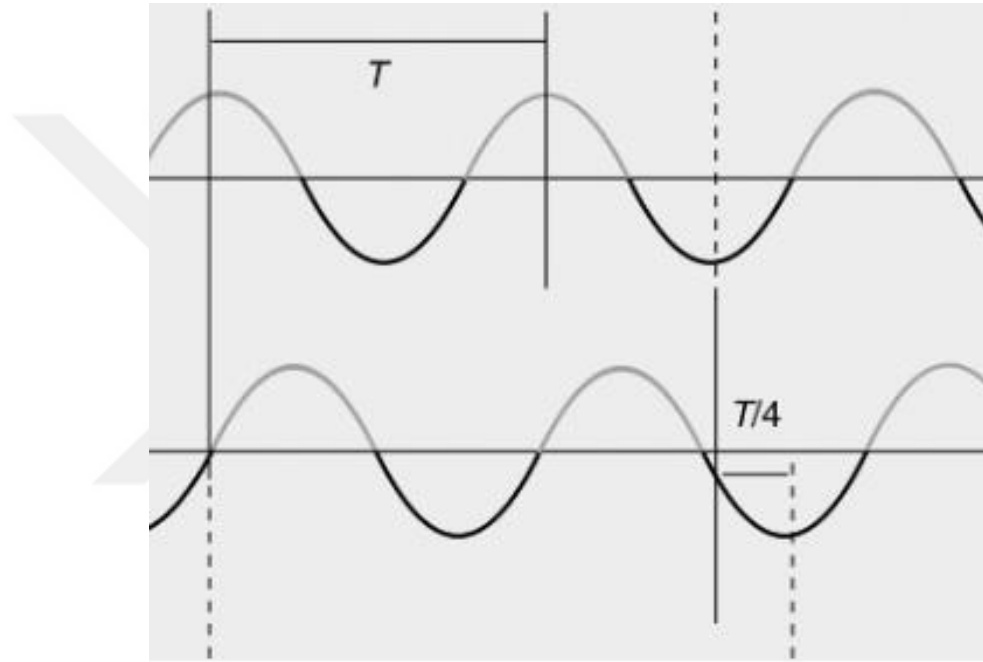
Bir çevrimin oluşabilmesi için geçen süredir. Birimi saniyedir. Sembölü T harfidir (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

3.8. Dalga Boyu (λ) Tanımı

Bir dalga örtüsünün aynı noktasal birimleri arasındaki uzaklıktır. Örneğin D-H noktaları arasındaki uzaklık dalga boyunu göstermektedir. Dalga boyu ile frekans ters orantı vardır. λ ile gösterilir (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

3.9. Faz Tanımı

Şekil 2.4'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. $0-360^\circ$ veya $0-2\pi$ arasında değerler alır. T kadar gecikme 360° 'lik bir faz açısıdır, bu nedenle $T / 4$ kadar gecikme 90° 'lik bir faz açısı olacaktır. Bu durumda iki dalga arasında 90° 'lik faz farkı var denir (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).



Şekil 2.5. İki benzer dalga arasındaki faz ilişkisi (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

Faz açısı hesaplanarak eksen kaçıklığı, mekaniksel gevşeklik gibi arızaların bulunması kolaylaşır. Ayrıca balanssızlık içeren döner bir cisimde kütlenin tam yerinin belirlenmesini sağlar (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

3.10. Genlik Terimleri

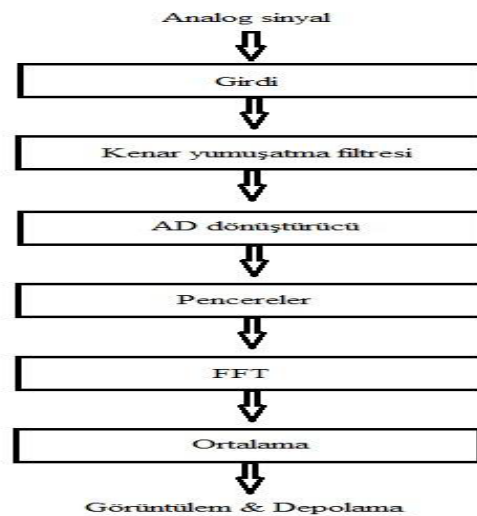
Referans olarak belirlenen çevrimin başladığı çizgi ile çevrimin en tepe noktası arasındaki mesafe genlik olarak tanımlanır. Bu Şekil 2.4'te görülmektedir. Bir dalganın genliğinin tanımı yapılacak olursa dalganın büyüklüğü veya aktardığı enerji

denilebilmektedir. Vibrasyon terminolojisinde en çok kullanılan genlik terimleri aşağıdaki 4 şekilde adlandırılır (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).

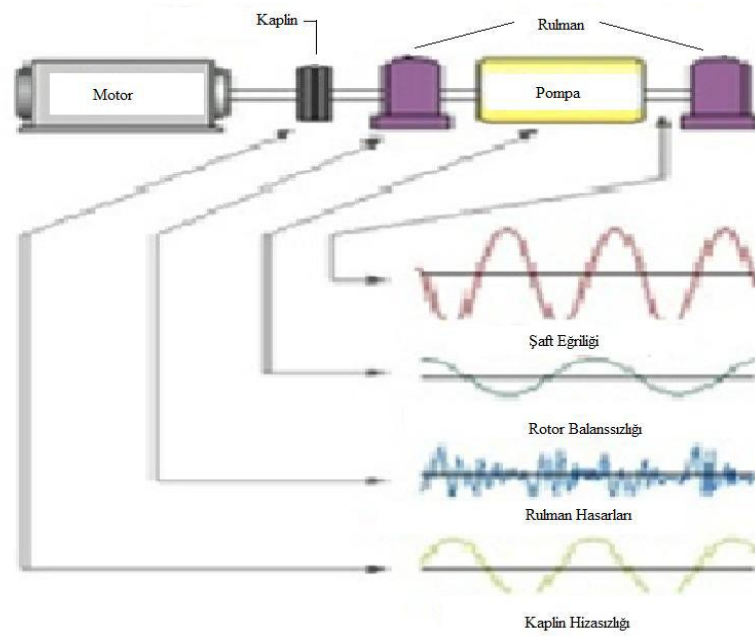
- Tepe : maximum tepe değeri
- Tepe-Tepe : pozitif tepe ve negatif çukur bölgelerdeki uç noktalar arası değer
- Ortalama : genliğin her hangi iki zaman arasındaki aritmetik ortalama değeri
- RMS : ortalama karekök değeri

4. SİNYAL İŞLEME SÜRECİ

Titreşim sinyali, dikey ekseninde genlik ve yatay ekseninde de zaman cinsinden gerçek bir sinüs dalgasına benzeyen “zaman sinyali” (time domain) olarak ölçülür. Titreşim sinyali, bir dönüştürücü veya sensör yardımıyla üretilir. Farklı genliklere ve farklı frekanslara sahip, kendi içerisinde karmaşık sinüs dalgalarını içeren ve değişik kaynaklarda üretilen zaman sinyali şeklindedir. Yani endüstrideki çalışan makinelerden elde edilen vibrasyon sinyalleri oldukça karmaşık fakat sinüzoidal bir yapıya sahiptir. Sinyallerin analiz sürecinde bu titreşim sinyalleri, ileri teknolojik yapıdaki sinyal işleyen cihazlara aktarılır. Böylece karmaşık dalga formları üretilmesi ve bunun matematiksel yöntemlerle birbirine aktarılışı mümkündür (Harris C. M., Piersol A. G., 2002)



Şekil 4.1. Bir sinyalin blok diagramı ile gösterimi (Şahin A., 2018)



Şekil 4.2. Bir makinede üretilen karmaşık dalga formları (Şahin A., 2018)

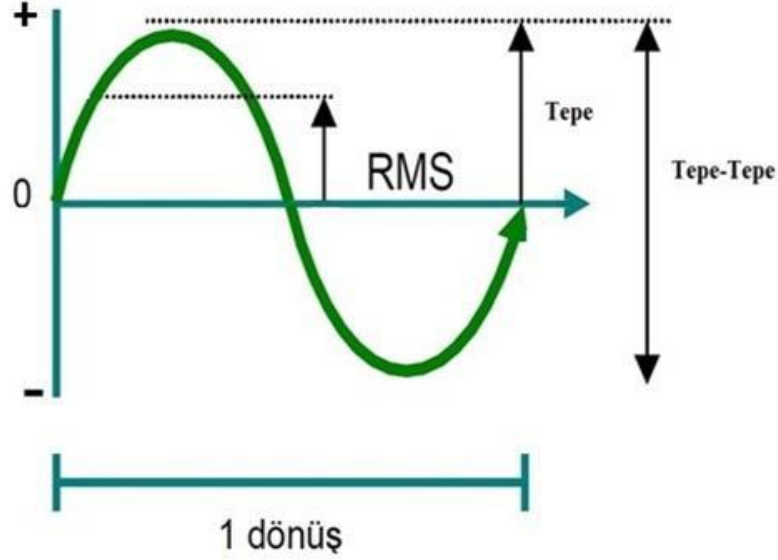
4.1. Titreşimi Tanımlayan Parametreler

Titreşim üç ölçülebilir parametreyle ifade edilir. Titreşim genliğini tanımlamak için bunlardan herhangi biri kullanılır. Seçtiğimiz genlik parametrelerine göre titreşim değerini frekans tabanlı bir spektrum grafiğinde tanımlayabiliriz. Bu yüzden aşağıdaki genlik parametrelerinden birini seçmemiz ve ifade etmemiz gerekmektedir (Mellor A., 2006)

- Yer değiştirme : Sinyal ne kadar yer değiştiriyor? Sorusunun cevabıdır.
- Hız : Sinyal hangi hızla yer değiştiriyor? Sorusunun cevabıdır.
- İvme : Sinyal hızı ne kadar çabuklukta değişiyor? Sorusunun cevabıdır.

4.2. Genliği Tanımlayan Parametreler

Parametre seçimi için kullanılan üç genlik birimi aşağıdaki gibidir (Köse R. K., 2003)



Şekil 4.3. Genlik parametrelerinin gösterimi (Köse R. K., 2003)

- Tepe-Tepe (Deplasman, Yer değiştirme için), $Tepe-Tepe = 2 \times Tepe$
- Tepe (Hız için)
- RMS (Hız ve ivme için), $RMS = 0.707 \times Tepe$

4.3. Genlik için Kullanılan Birimler

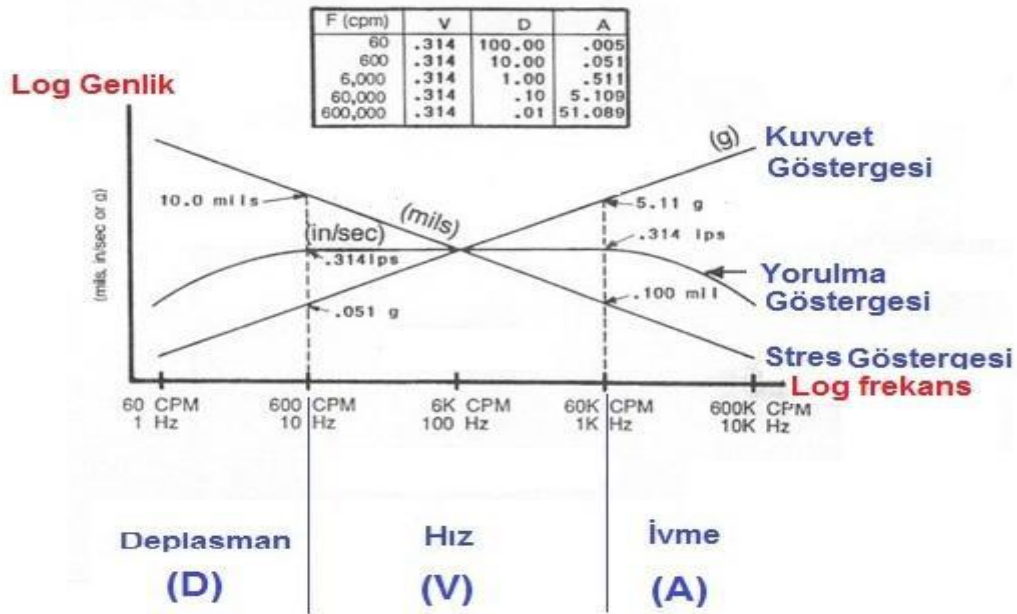
Kullanılacak genlik birimi “imperial” birim sistemi yerine “metrik” birim sistemidir. Çünkü yer değiştirme, hız ve ivmeyi ifade ederken genlik birimleri de hesaba katılmalıdır. Bu yüzden normal uygulamalarda “imperial” birim sistemi yerine “metrik” birim sistemi kullanılır (Köse R. K., 2003)

- Yer değiştirme : mikron, (μm)
- Hız : milimetre/sn, (mm/s)
- İvme : milimetre/saniye², (mm/s²) & g's (1 g 9,81m/s²)

4.4. Titreşim Parametrelerinin Belirlenmesi

Titreşim genlik parametre seçimini yaptıktan sonra, bir sonraki adımda; hangi parametre ne tür makinedeki titreşimi ölçmek için kullanılabilir sorusunu sormalıyız. Bu aşamada endüstriyel standartlar ile pratik uygulamalar da aşağıdaki titreşim parametre seçim grafiği kullanılmaktadır (Mellor A., 2006). Dolayısıyla aşağıdaki belirtilen frekans aralıklarında ilgili makinaların devir sayılarına göre vibrasyon parametreleri seçilir. Sonuç olarak düşük devirli dönen makinalarda yer değiştirme, orta devirli dönen makinalarda hız ve son olarak yüksek hızlı dönen makinalarda ivme parametreleri seçilir (Mellor A., 2006).

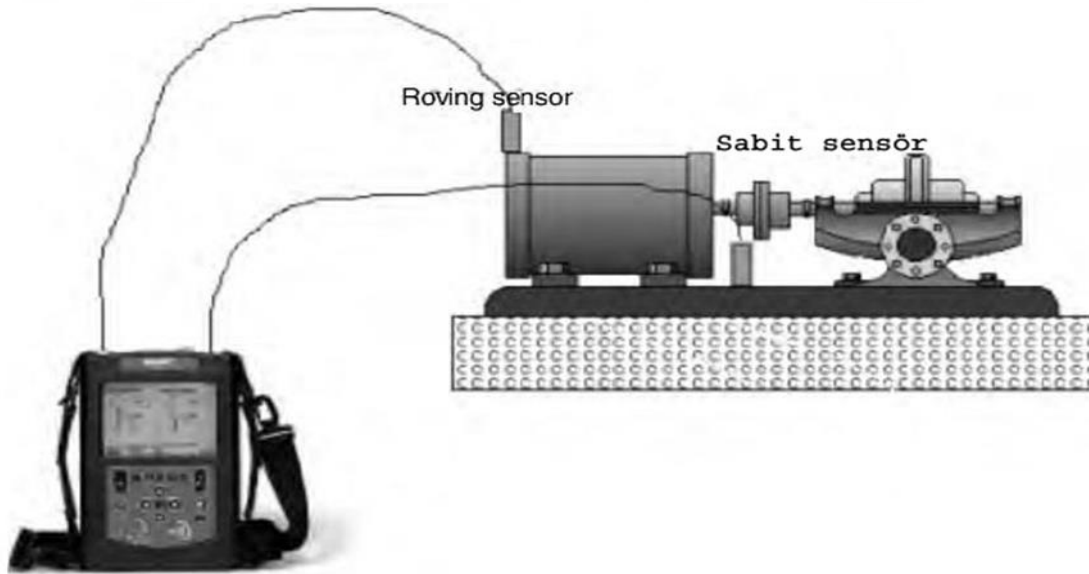
- 1 Hz-10Hz : Deplasman
- 10Hz-1KHz : Hız
- 1KHz-10KHz : İvme



Şekil 4.4. Titreşim parametrelerinin seçimi (Mellor A., 2006)

4.5. Ham Titreşim Verilerinin Toplanması

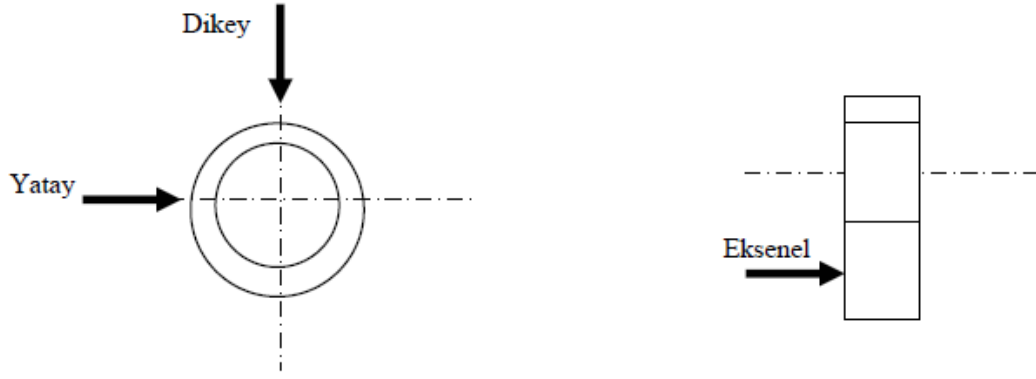
Ham titreşim verileri; bir bilgisayar ve titreşim analizör özelliklerine sahip bir veri toplayıcı veya bir diğer adıyla FFT (Fast-Fourier Transform) analizörü diye isimlendirilen özel bir cihaz ve sensörler (yer değiştirme-hız-ivme) kullanılarak elde edilir. Dönen motorda meydana gelen titreşim hareketi, sensörler aracılığıyla yakalanır ve bu titreşim hareketleri elektrik sinyalleri formuna dönüştürülür. Bu elektrik sinyalleri ise; analog sinyali, dijital sinyale örnekleyen, depo eden, görüntüleyen özetle elektrik sinyallerini işleyen taşınabilir veya motor üzerindeki on-line yapıdaki veri toplayıcılar cihazlarda'da depolanır (Petters J. D., 2008).



Şekil 4.5. Veri toplayıcı ile ham veri toplama (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004)

4.6. Ölçüm Noktaları

Mekanik titreşim verilerinin değişmeden bir araya getirilmesi kritik bir aşamadır. Titreşim hareket eden makine parçalarının dinamik kuvvetlerinden oluşur. Dönen makinelerde, üzerinde durduğumuz kuvvetlerin bir çoğu, dönen aksamlar, yani miller ve rotorlar üzerine etkilidir. Bu yüzden rulmanların üzerinden motorun gövdesine en yakın noktadan yapılan ölçümler, makinenin arıza durumunun en sağlıklı gösterimini sağlayacaktır. Genel olarak uygulanan metot her bir yatak için yatay ve dikey olmak üzere iki ölçüm, ayrıca mil başına bir aksenal yönde ölçüm yapılmasıdır (Mobley R. K., 2009)



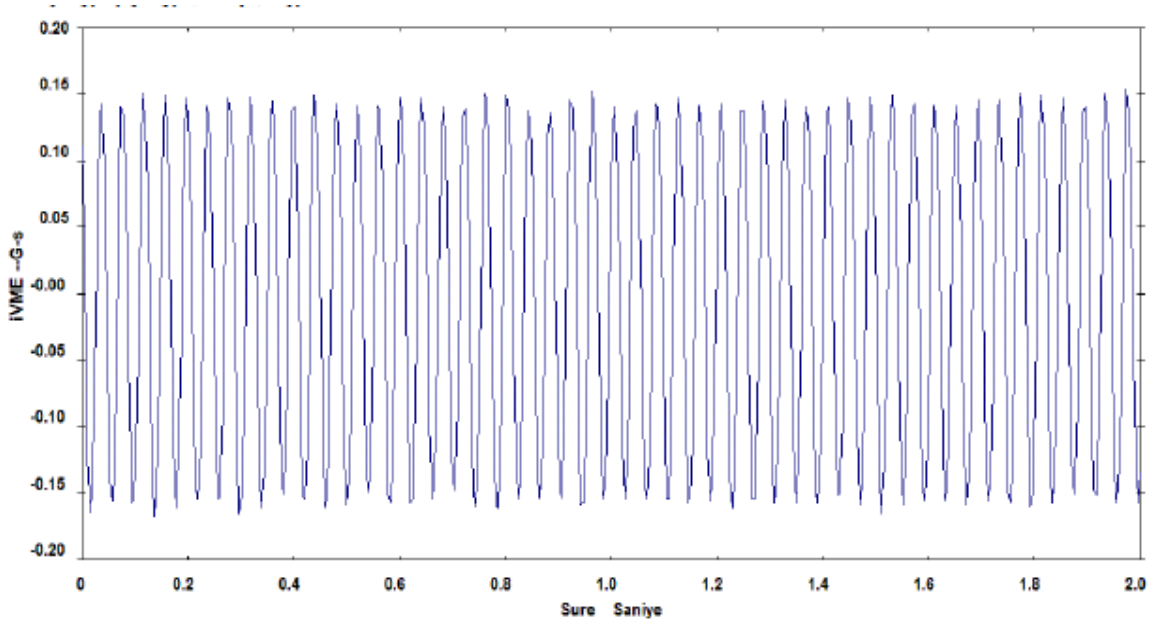
Şekil 4.6. Ölçüm pozisyonları ve yönü (Köse R. K., 2003)

4.7. Ölçülen Verileri İşleme

Veri toplayıcı cihazı sadece belli bir sınıra kadar verileri toplayabilir ve depo edebilir. Bu yüzden, geçmişte ölçülmüş titreşim verilerinin karşılaştırmak için, genel vibrasyon değerlerinin takip ederek arıza teşhisi için bilgisayara yüklenmiş ölçüm cihazına özel yazılımlar kullanılır. Ham verileri attığımız bu yazılımlar; arıza tespitinde kullanacağımız zaman tabanlı dalga formu grafiklerini, frekans tabanlı spektrum grafiklerini, yüksek frekanslarda oluşan rulman arızalarını önceden tespit edebileceğimiz zarflama yöntemini ve geçmiş ölçümlerle kıyas etmemizi sağlayan genel titreşim değerlerini kapsayan ara yüzler ile dijital sinyalleri değerlendirip işlememizi sağlar (Hammond J., Shin K., 2008).

4.8. Zaman Tabanlı Analiz

Bir ünitenin veya sistemin tepkisi hem zaman hem de frekans tabanında da, genlikleri yer değiştirme-hız ve ivme ile ifade edilir. Zaman tabanındaki grafikler, zamana göre değişen değişik form ve genliklerden oluşan sinüs dalgalarından meydana gelir. Çoğunlukla ham veriyi zaman tabanında değerlendirmek oldukça zordur. Şekil 3.7'de zaman tabanında dalga sinyalleri grafiği, zaman fonksiyonuna bağlı, ivme genliği değerini vermek için gösterilmiştir. Zaman tabanlı analiz ile arıza teşhisi filtrelemeyle dalga formlarını birbirinden ayrı tutarak veya toplam değerler yorumlanarak yapılır (Alfred M., 1999).



Şekil 4.7. Zaman tabanında dalga formunun örnek gösterimi (S.Orhan, 2011)

4.9. Frekans Tabanlı (Spektrum) Analiz

Hata teşhisinde sıklıkla tercih edilen diğer önemli bir analiz yöntemi frekans izleme tekniğidir. Bu yöntemle büyük genlikli baskın frekanslar tespit edilerek motorun durumu hakkında yorum yapılabilir. Rulman arızaları, rulmanın geometrisi ve mil dönme devrine bağlı olan formüllerle hesaplanan arıza frekansları ile ölçüm sonucu elde edilen titreşim frekanslarının karşılaştırılması ile belirlenir. Arıza olan elemanın titreşim frekanslarında bu elemanın arıza frekansları, bunun katları, bazı durumlarda mil dönme devri ile oluşturduğu yan bant frekansları bulunur. Spektral analiz yardımıyla arıza öncesi ve sonrası durumların karşılaştırılması ve hata teşhisi daha kolay yapılabilir. (Yılmaz M.S., 2008)

4.10. Fourier Dönüşümü

Fourier Dönüşümü bir dalga formunu sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının bir kombinasyonu olarak ifade etmek üzere yapılan matematiksel işleme verilen isimdir. Neredeyse her şey (zamana bağlı bir fonksiyon ya da sinyal, elektromanyetik dalgalar, ses dalgaları, hisse senetlerinin fiyat değişimi gibi) bir dalga formu şeklinde

tanımlanabilir. Fourier Dönüşümü bu formlarla işlem ve değerlendirme yapmak üzere kullanılan oldukça güçlü bir araçtır.

4.11. Zaman ve Frekans Tabanlı Titreşim Analizi

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.

Deneysel çalışmada 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.

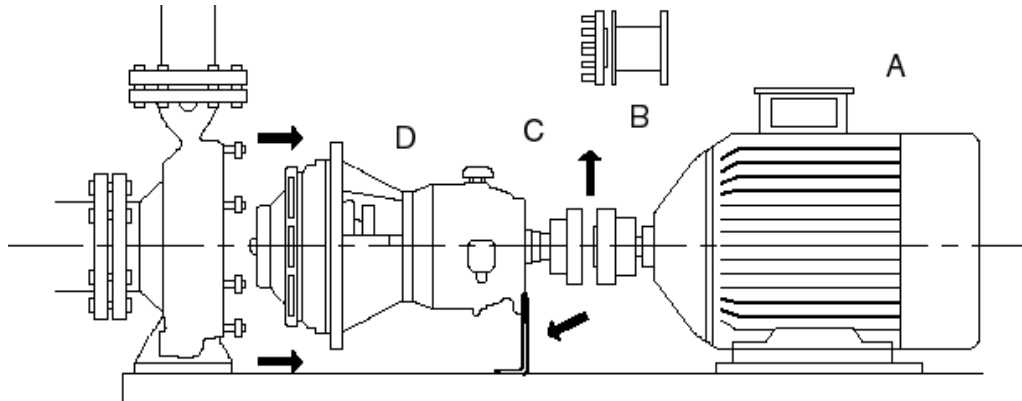
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada büyük bir şeker fabrikası endüstriyel tesisinde kullanılan türbin soğutma suyu pompalarını tahrik eden 110 kw bir motorun eksen kaçıklığı analizi ve 90 kw bir motorun rulman arızası analizi yapılacaktır. Elektrik motorlarının yapısı ve yapılan ölçüm çalışmalarının detayları aktarılmıştır. Bu pompaların ölçüm çalışmasının bileşenleri AC motor, sensör, veri toplama sistemi ve veri işleme (spektral analiz) için kullanılan özel bir yazılımdan oluşmaktadır.

5.1. Ölçümü Yapılan AC Motorlarının Özellikleri

Deneysel ölçüm verilerinin elde edilmesi için çalıştırılmasında mahsur olmayan 110 kW ve 90 kW güç ayrıca 1481 rpm ve 1486 rpm etiket değerlerini içeren sincap kafes asenkron AC elektrik motorları seçilmiştir. Titreşim verilerinin toplandığı bu iki elektrik motorunun şaseye bağlantı montaj şekli yatay eksendedir. Motorların ön yatakları ve arka yatakları tapa içermektedir. Ayrıca gres yağlamaya uygun bilyeli rulmanlardan oluşmaktadır.

Tahrik ettiği pompa ile motor arasında aktarma elemanı olarak esnek kaplin kullanılmıştır. Kontrol ünitesi hem lokal ile ekipmanın yanından, hem de scada sistemi uzaktan bağlantı ile sağlanmıştır. Ekipmanlar sabit bir kaide üzerinde konumlanmakta olup motor ayaklarındaki şimler eşit sayıdadır. Motorların etiket bilgilerini içeren teknik özellikler aşağıda ifade edilmiştir.



Şekil 5.1. Aynı eksen üzerinde akuple pompa-motor ünitesi (URL-6)

Tablo 5.1. Uygulama-2'deki ölçümde kullanılan elektrik motorunun teknik özellikleri

Motor Üretici	ABB
Tipi	M2BAT 280 SMB 4 B4
Güç	90 kW
Hız	1481 rpm
Gerilim	400 V
Akım	162 A
Frekans	50 Hz
Güç faktörü (Cosp)	0,86
Ağırlık	890 kg

Tablo 5.2. Uygulama-1'deki ölçümde kullanılan elektrik motorunun teknik özellikleri

Motor Üretici	ABB
Tipi	M3BP 315 SMA4 B3
Güç	110 kW
Hız	1486 rpm
Gerilim	400 V
Akım	202 A
Frekans	50 Hz
Güç faktörü (Cosp)	0,87
Ağırlık	970 kg

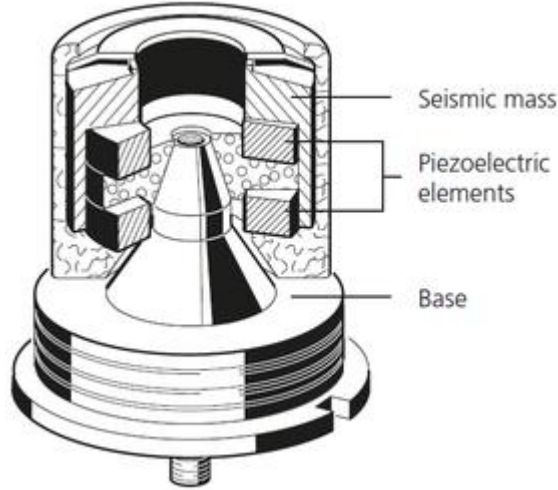
**Şekil 5.2.** Eksen Kaçıklığına sahip motor ve dıştan yatay eksnel ölçümü



Şekil 5.3. Rulmanı değiştirilmiş bakım aşamasına alınan motor

5.2. Sensör Özellikleri

İvmeölçerler mekaniksel hareketi gerilim sinyaline dönüştüren ataletle dayalı ölçüm aygıtlarıdır. Bu sinyal piezoelektrik prensibi kullanılarak elde edilen titreşimin ivmesi ile doğru orantılıdır. Ataletle dayalı ölçüm yapan aygıtlar bir kütleyle göre hareketi ölçmektedir. Bunu *Newton'un III. Prensibi* izlemektedir. Bu prensibe göre gövde üzerine bir kuvvet etki ettiği zaman bu kuvvete eşdeğer, fakat ters yönde bir tepki kuvveti oluşmaktadır. İvmeölçerler bir adet piezoelektrik kristal (kurşun zirkonat titanat ve baryum titanat gibi ferroelektrik malzemelerde yapılmış) ve koruyucu bir metal gövde içerisinde duran ufak bir kütleden oluşmaktadır. Aşağıdaki şekil ve tablo da ivmeölçer yapısı ve teknik özellikleri gösterilmiştir. (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).



Şekil 5.4. İvmeölçer yapısının gösterimi (URL-3)

Tablo 5.3. Ölçümde kullanılan sensörün teknik özellikleri (URL-4)

Üretici firma	Prüftechnik
İvme sensörü	VIB 6.135R
Sinyal Sistemi	3,5 mA kapalı akım AC sinyali
Max. ölçüm aralığı	961 m/s ² (98g)
İletim faktörü ±% 4	1.0 µA/ms ⁻² , 159 Hz, 25°C
Frekans aralığı	1 Hz - 20 kHz
Rezonans frekansı	36 kHz
Sıcaklık Aralığı	-30°C ile 135°C arası

5.3. Titreşim Analizi ve Veri Yönetimi Cihazı

Veri toplayıcı/analizörü sadece sınırlı miktarda veriyi toplayabilir ve depolayabilir. Bu yüzden toplanan veriler bilgisayara aktarılmalı ve karşılaştırma ve eğilimin belirlenmesi için ekipmana özel uzun süreli bir veri tabanı oluşturulmalıdır. Veri aktarma işinin yapılması ve kullanıcıya yardımcı olunması için ekipmanın veri analizini yapan ve yöneten veri tabanı yönetim yazılımları gerekmektedir. Ekipmanın bakımı için bu veri tabanı yönetim programları titreşim verilerini depolar ve o andaki, geçmişteki ölçümler ve önceden tanımlanmış ikaz sınırları ile karşılaştırma yapar. Alınan ölçümlerin titreşim analiz yazılımına aktarılmasıyla normal koşullardan olan sapmalar için hızlı bir araştırma yapılır. Genel titreşim seviyeleri, FFT ler, zaman dalga formları ve diğer parametreler bu titreşim değişimlerinin analiz edilmesine yardımcı olunması için oluşturulmuştur.

Hangi titreşim seviyelerinin ikaz eşik değerini geçtiğinin görülmesi için rapor oluşturulabilir. Analiz için o andaki veri, veri temeli ile karşılaştırılır ve ayrıca belirli bir zaman periyodu süresince titreşimin değişim eğilimi görülür. Eğilim çizimleri olası arızaları önceden haber verir ve onarım için en uygun zamanın programlanmasını sağlar.

Buna ek olarak yazılım verilerin toplanması için bir rotanın belirlenmesine de yardımcı olur. Verilerin toplanacağı konumlar için verimli bir şekilde yapılabilmesi için düzenlenmelidir. Bu sıra veya rota daha sonra veri toplayıcıya aktarılır ve sahada kullanıcıya yardımcı olması açısından bir sonraki ölçüm konumu ekranda gösterilir. Bu sayede gerekli tüm veriler mümkün olan en kısa zamanda ve her zaman aynı sırada toplanır.

Tur verisinin yanında ekipman koşulunun teşhis edilmesi için veri toplayıcılar/analizörler ile tur dışı titreşim ölçümleri de alınabilir, bunlar programın geçmişine kaydedilebilir ve sonuçlar eğilimin belirlenmesi ve durumun analiz edilmesi için kullanılabilir.

Böylece ham veriler toplanır. İleriki aşamada sinyal işlemeyi başlatmak için toplanan ham veriler, cihazın yazılımına tekrardan geri yüklenir. Aşağıdaki şekil ve tablo da cihazın şekli ve genel özellikleri verilmiştir. (Girdhar P. Ve Scheffer C., 2004).



Şekil 5.5. Veri toplayıcının gösterimi (URL-5)

Tablo 5.4. Ölçümde kullanılan veri toplayıcının teknik özellikleri

Üretici firma	Prüftechnik
Model	Vibxpert II Ex.
Gerilim	AC/DC, ± 30 V max.
Akım	AC/DC, ± 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	Max. 131kHz
Hafıza	2GB
Dijital Kanal	1+1 (RPM, trigger, key phaser)

5.4. Motor Titreşim Ölçümleri

Normal çalışma şartlarında çalıştırılan elektrik motoru üzerinde vibrasyon ölçümleri ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sensörlerin motorun ölçülecek noktalarına sabitlenmeleri ölçümün sıhhati açısından önemlidir. Bu yüzden sensörlerin motor yatakları üzerine sabitlemesi yapılmıştır. Veriler motor arka yatak tarafında motor gövdesine göre yataydan, motor ön yatak tarafında ise motor gövdesine göre hem radyal yönlerde (yatay ve dikey) hem de eksenel yönden toplanmıştır. Veri toplayıcı cihaz da toplanan ham veriler sonrasında bilgisayara yüklü olan cihaz analiz yazılımına aktarılmıştır. Motor üzerinde ölçüm yapılan noktalar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

5.5. Sinyal İşleme Aşaması

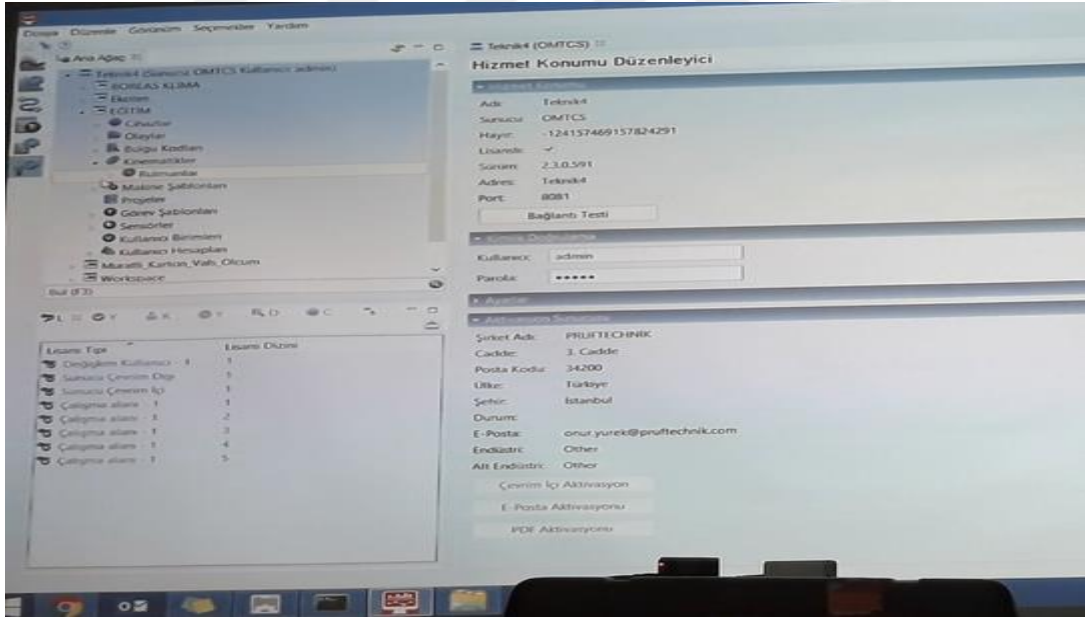
“Ham verilerin işlenmesi özel bir yazılım olan Omnitrend Center ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yapılmadan evvel, elektrik motoru ve yangın pompasının dönme hızları referans alınarak bir ölçüm güzergâhı oluşturulur. Oluşturulan güzergâhta her bir ölçüm noktası için; pozisyon, yön, ölçüm türü (hız 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.”

5.6. Rota Oluşturma Aşaması

Cihazın içerisindeki yazılım sayesinde ölçüm yapmadan önce, ölçümü yapılacak motorlar için “Rota” adı verilen dosyalar oluşturulur. Bu dosyaların içerisinde ölçümü yapılacak noktalar tanımlanmakta, ayrıca her bir nokta için makinanın devir sayısı, sensör/sinyal bilgisi, alt ve üst frekans değerleri ve birimleri, titreşim genlik birimi (hız, ivme, yer değişimi), alarm ve arıza limitleri programa tanıtılmaktadır. Bu yüzden ilk aşamada bir “rota” oluşturulmalıdır.

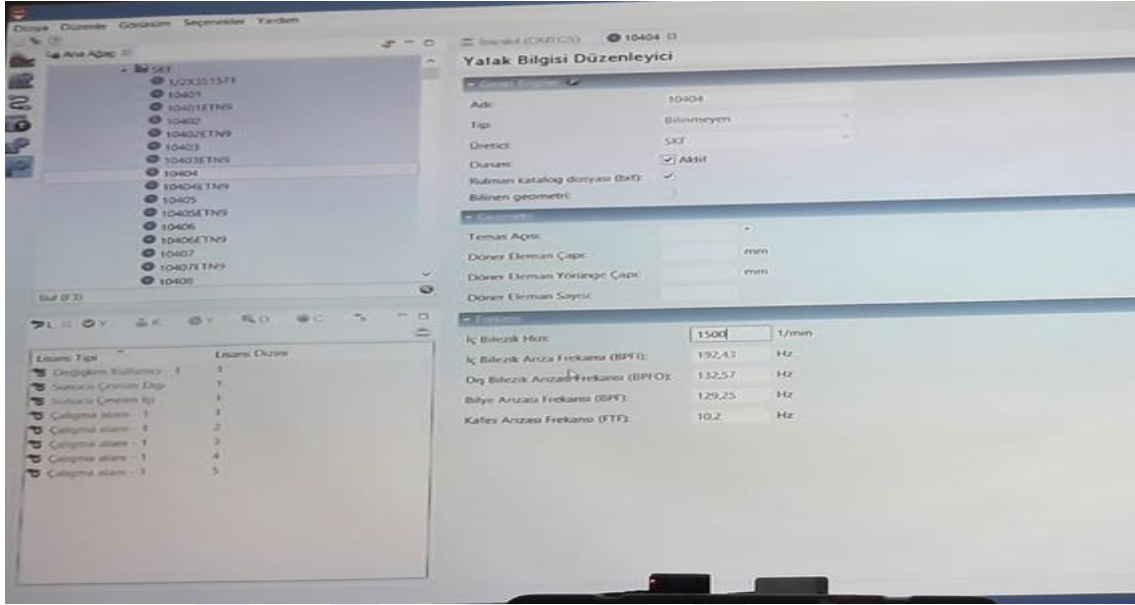
5.6.1. Rulman Tanımlama

Rulmanlar klasörünün içerisinde tanımlı yüzlerce marka ve modelde rulmandan aradığımız modeli seçip ölçeceğimiz ekipmana tanımlanmaktadır. Eğer aranılan rulman, program veri tabanında bulunmuyorsa rulman arıza frekansı formülündeki değerler tek tek girilerek rulman arıza frekansları tanıtılmalıdır.



Şekil 5.6. Rulmanlar klasörüne giriş

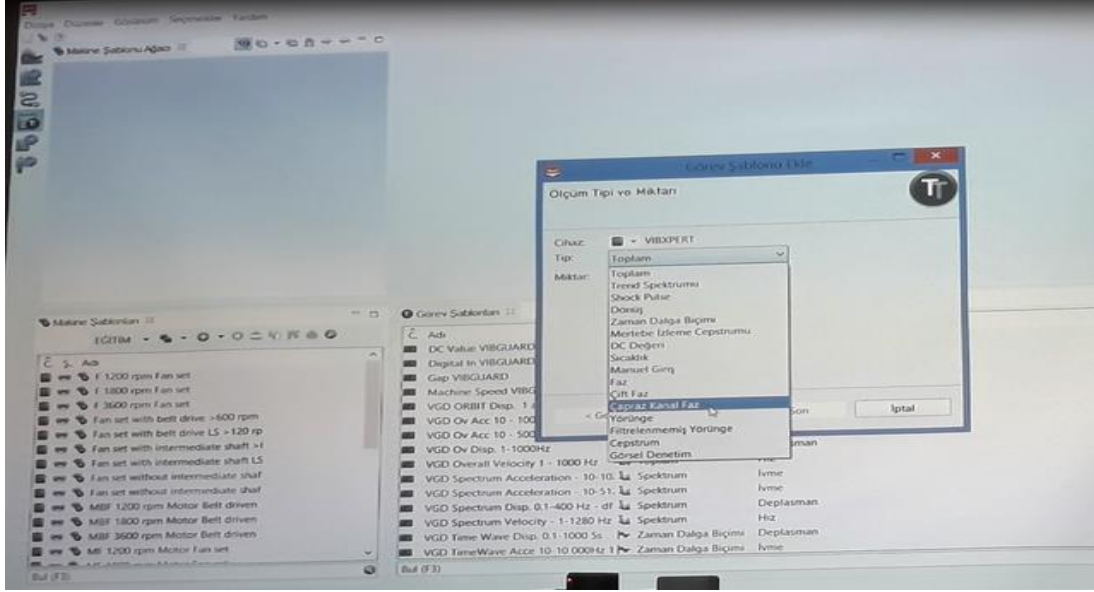
Buradan istediğimiz rulman modelini seçerek sağ tarafta arıza frekanslarını görüp programa tanıtmadan önce devir sayısı programa girilmelidir. Çünkü arıza frekansları makinanın dönüş devrine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 5.7. RPM değerini girerek rulman arıza frekanslarının oluşturulması

5.6.2. Grafik Tipi Belirleme

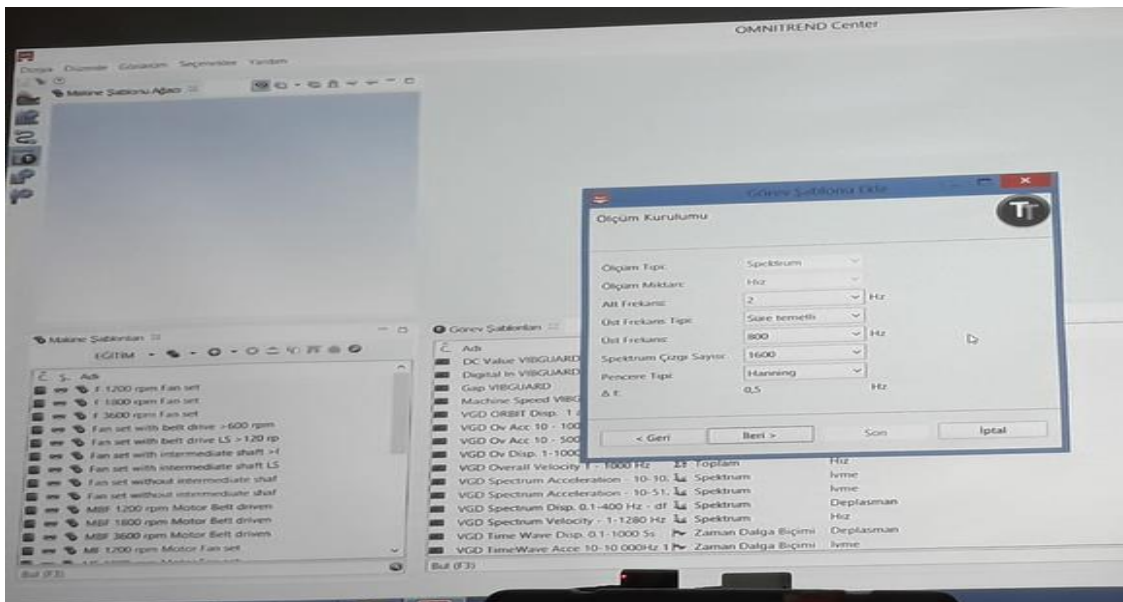
Yapılacak ölçüm sonucunda elde edilecek grafiğin formu seçilmelidir. Bu çalışmada daha detaylı bir sonuç elde etmek amacıyla zaman dalga biçimi ve trend spektrumu seçilmiştir. Dolayısıyla ölçüm yapılan noktaların titreşim grafikleri bu iki ölçüm tipinde oluşacaktır. Grafik tipini belirlerken eğer Toplam değer veya Shock Pulse grafik metodları seçilirse daha basit tarzda sonuçlar elde edilmektedir. Bu sonuçlar ile de arıza teşhisi yapılabilen fakat arızanın içeriği ve hangi aşamada olduğu konusunda net bir yorum yapılamamaktadır.



Şekil 5.8. Grafik ölçüm tipinin belirlenmesi

5.6.3. Frekans Limit Değeri Belirleme

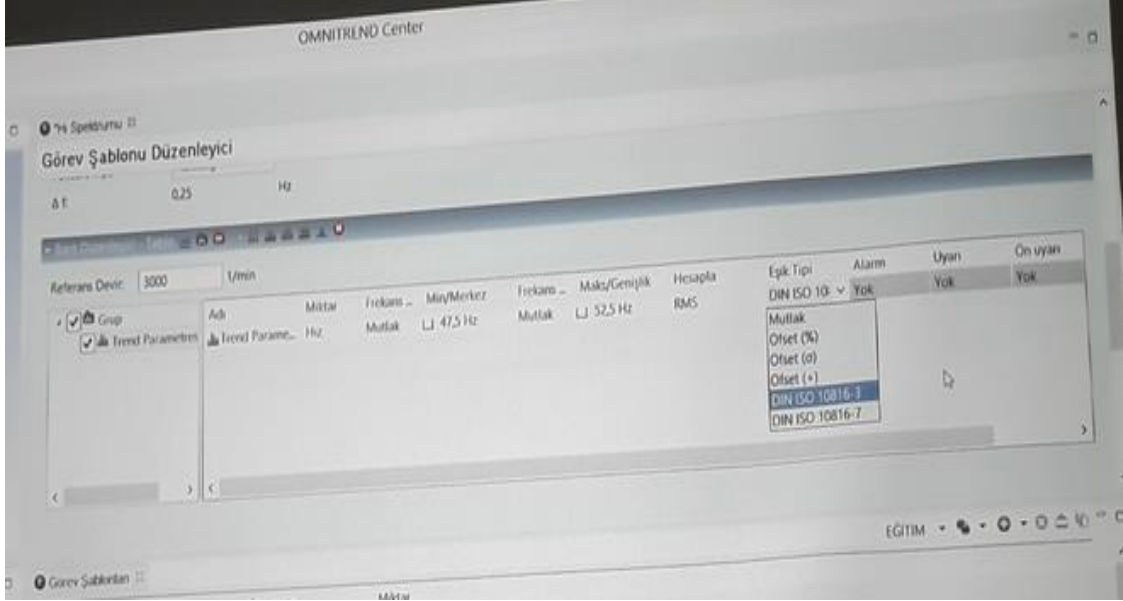
Rota oluştururken frekans limit değerleri ve bir noktada yapılacak ölçümün süresini belirleyen, titreşim grafiğinin oluşma süresi belirlenmelidir. Frekans aralıkları belirlenirken aranan arıza frekanslarının ölçüm aralığında kalmasına dikkat edilir. Min frekans için “2 Hz” max. Frekans için “arıza frekansı x bilya sayısı” seçilmesi tavsiye edilmektedir. [T.Reeves]



Şekil 5.9. Frekans limit değerlerinin belirlenmesi

5.6.4. Alarm Limit Değeri Belirleme

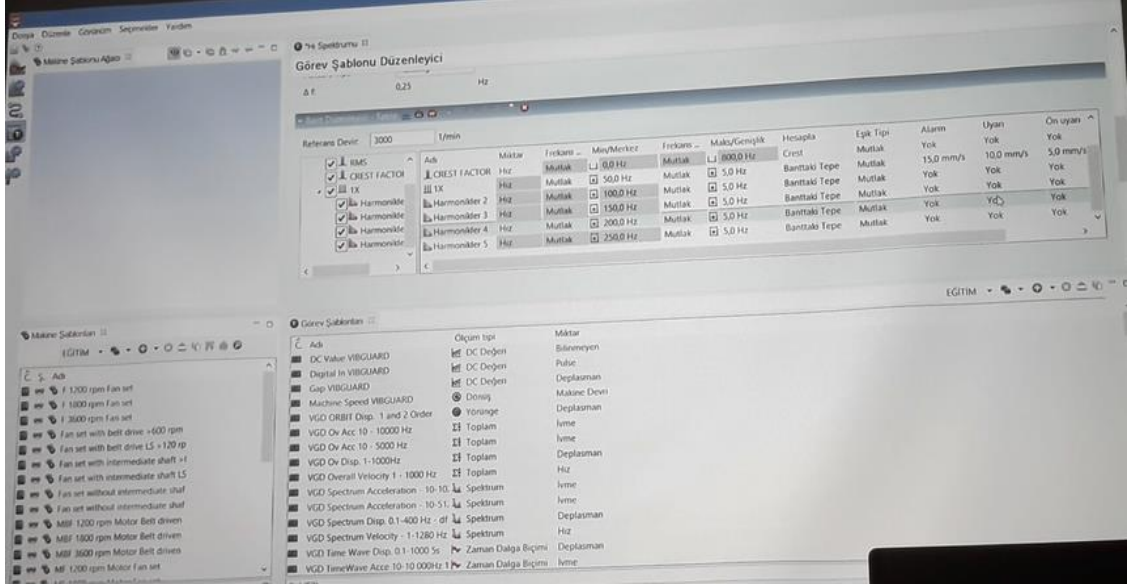
Alarm bandı dzenleyici bölümünde istenilen hız değerlerini alarm eşik sınırı olarak belirlenmelidir. Burada çeşitli uluslararası standartlar bulunsa da çoğunlukla kabul gören döner ekipmanlar için ISO 10816-3 alarm sınırı olarak kullanılmaktadır. Alarm eşik değerlerini standart dışı olarak kullanıcı da belirleme imkanına da sahiptir.



Şekil 5.10. Alarm limit değerlerinin belirlenmesi

5.6.5. Frekans Bantları Oluşturma

Dönme hızının katları olan harmonik frekansları ve bu harmoniklere alarm sınır değerleri konulabilir. Bu sayede örneğin eksen kaıklığında belirgin olan 2x harmonik genlik değerine sınır değeri konularak direk nokta atıőı arıza tespiti yapılmasına fırsat tanınmaktadır. Aynı şekilde yan bantlar da eklenerek esas hasar frekanslarına göre durumları kolayca karőılařtırılabilmektedir.



Şekil 5.11. Frekans bantları ve harmoniklerin oluşturulması

5.7. Ölçümlerin Değerlendirilmesi ve Arıza Tanımları

Hasarlı bir rulmanın neden olduğu titreşimin spektrum (genlik-frekans) grafiğinde oluşturduğu belirtiler dört aşama ile açıklanabilir (Khanaa V., Udayakumar R., 2013).

- 1. Aşama:** Hasarın ilk zamanlarında spektrum grafiğinde hasar titreşim frekansının harmonikleri oluşur. Temel hasar frekansı görülmez.
- 2. Aşama:** Spektrum grafiğinde hasar titreşim frekansının çok daha fazla harmonikleri oluşur. Bozulma devam ettiğinde hasar titreşim frekansları mil dönme hızı ile modülasyona uğrar ve yan bantlar oluşur. Yan bantların genliği esas frekansın (merkez frekans) genliğini geçerse hasarın önemli olduğu anlaşılmalıdır.
- 3. Aşama:** Spektrum grafiğinde hasar titreşim frekansı harmonikleri ve yan bantlarına ek olarak temel hasar frekansı da oluşur.
- 4. Aşama:** Rulman bozulmaya devam ettiği için rulman elemanlarının bozulmasını hızlandıran iç boşluklar artmaya başlar. Bu boşluklar rulman elemanları arasındaki çarpmaları artırır bu çarpmalar sonucu meydana gelen titreşimin spektrum grafiğinde geniş bant gürültü oluşur. Titreşimlerin genlikleri azalabilir ve geniş bant gürültüden zor ayırt edilebilirler. (Tandon, N. ve Choudhury, 1999)

Burada geçen "temel hasar frekansı" terimi ile hasarlı olan rulman elemanının ürettiği titreşim frekansının bir katına işaret edilmektedir. "Harmonik" ile de temel hasar frekansının çoklu katları kastedilmektedir. "Yan bant" farklı frekanslara sahip sinyallerden birinin diğerini modülasyona uğratarak başka bir frekansta bir sinyal oluşturmasına denir. "Esas frekans" ise sağ ve sol yanında yan bantları olan, bu yan bantların arasında bir değere sahip olan frekanstır. "Geniş bant gürültü" spektrum grafiğinde genliği düşük, fakat geniş bir aralığa yayılmış olan titreşim frekanslarıdır.

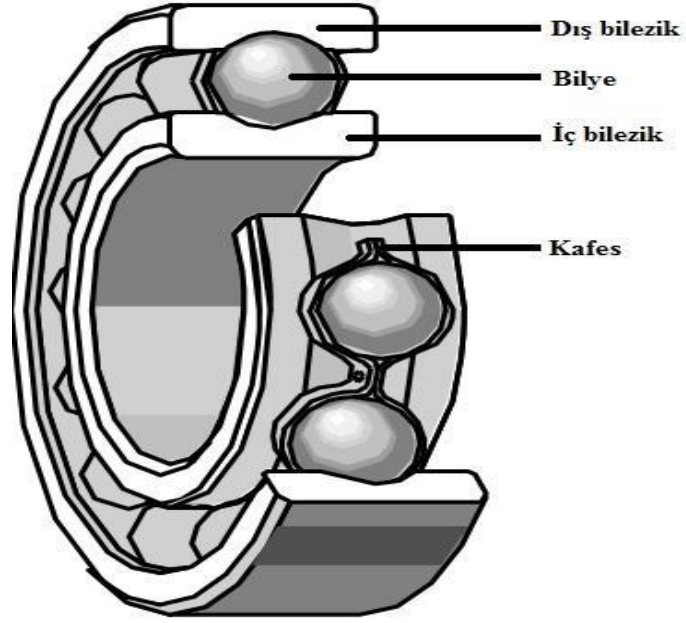
Makinalarda karşılaşılan problemlerin belirlenmesinde hasarların oluşturduğu tipik titreşim frekansları birçok çalışmada (R.K. Mobley, 1990; V.Wowk, 1991; R.Keith, 1987, A.F. Khan. 1991, R.K. Köse, 1989) tablo haline getirilerek sunulmuştur. Bu çalışmalardan derlenen hasar frekanslarına göre aşağıdaki tablo oluşmaktadır.

Tablo 5.5. Arızalar ve oluşturdukları belirgin arıza frekansları

Sebeup	Frekans	Yön	Genlik
Eksen Kaçıklığı	1x, 2x bazen 3x, 4x	Radyal veya Eksenel	Sabit
Dış Bilezik Hasarı	kx_{fbp} ; k=1, 2, 3..	Radyal veya Eksenel	Sabit
İç Bilezik Hasarı	kx_{fbpi} ; k=1, 2, 3..	Radyal veya Eksenel	Sabit

5.8. Rulman Arızası

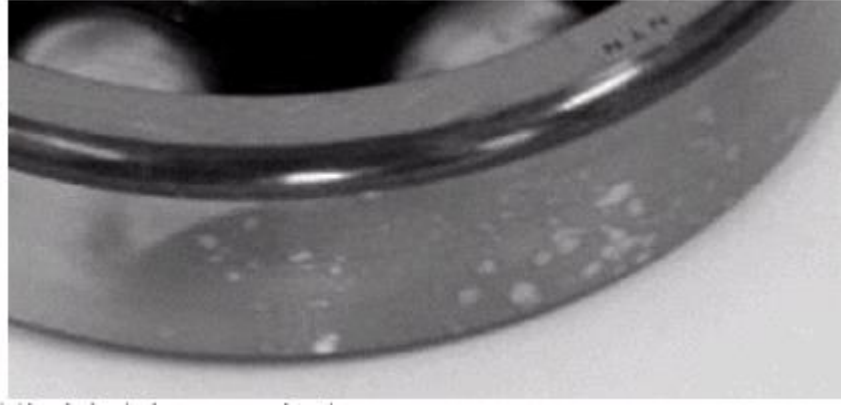
Elektrik motorlarının çoğunluğunda bilyalı rulman kullanılmaktadır. Rulman arızaları elektrik motor arızalarının yaklaşık %40'ını oluşturur. Rulman yapısı itibariyle iç bilezik ve dış bilezikten oluşmaktadır. Ayrıca iki bilezik arasında dönen bilyalardan oluşmaktadır. Bilyaları bir arada tutan kafes mevcuttur. Hatalar çoğunlukla dış kaynaklı olarak oluşmaktadır. Dış kaynaklı arızalar arasında korozyon, yanlış yağlama ve doğru yapılmayan montajdır. Doğru yapılmayan montajlarda bilyalara eksenel ve radyal ek kuvvetler gelir. Gelen kuvvetlerde rulman parçalarında ilave zorlanmalara sebep olduğu için rulman arızaları meydana gelir. Rulman arızalarına sebep olan diğer bir etken ise rulman üzerinden elektrik akımı geçmesidir. Özellikle yüksek güçlü elektrik motorlarında görülen bu olay sonucunda rulmandan küçük parçalar çıkabilir ve bu parçalarda zamanla sürtünmeyle aşınmaya neden olur. Bu elektrik akımı etkisinden korunmak için elektrik motorlarında rulmanın dış bilezik yüzeyi izoleli veya seramik kaplamalı seçilmelidir (İ. Özelgin., 2006). Aşağıdaki şekilde rulmanın iç yapısı ve elemanları gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Rulman elemanlarının gösterimi (Şahin A., 2018)

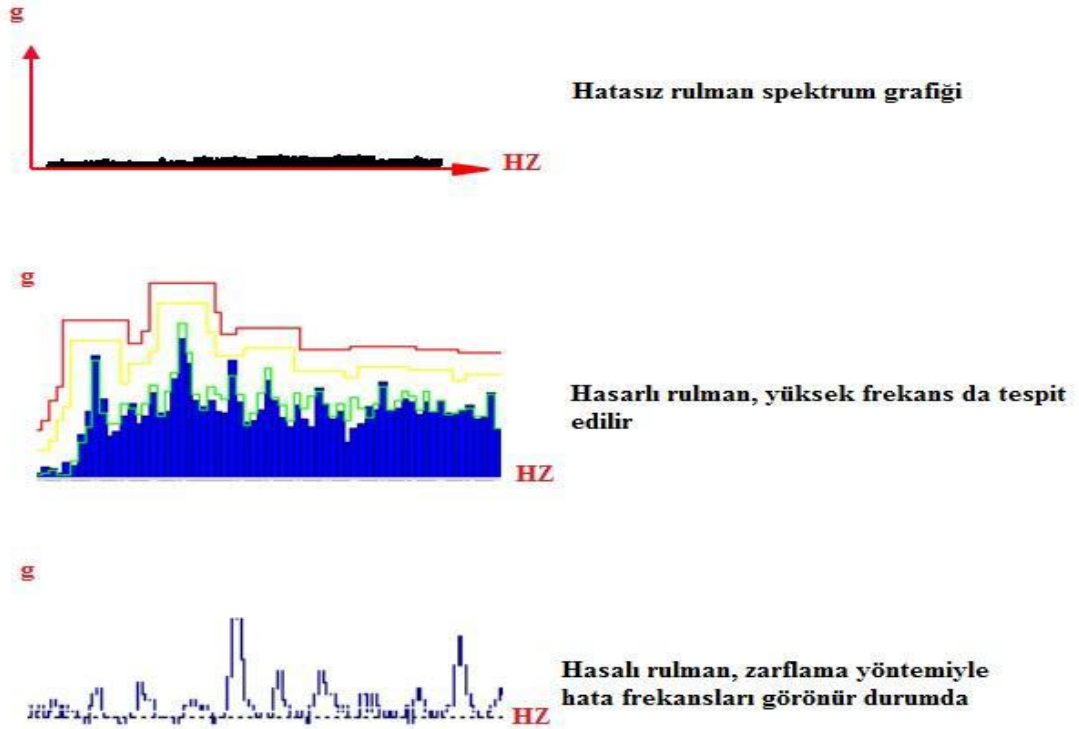
Rulmanların üretim aşamalarında yüzeylerde üretim hataları, yanlış montaj ve işletme sırasında değişik sebeplerden kaynaklanan hatalar oluşabilir (Arslan H. ve diğ., 2003). Rulmanlar normal çalışma şartlarında çeşitli yıpratıcı etkilere maruz kalırlar. Rulmanın ömrünü etkileyen ve çeşitli hasarlara neden olan etkiler aşağıda sıralanmıştır (Bonnett, 1992).

- Dinamik ve Statik Yükler
- Isıl etkiler
- Titreşim ve darbe
- Çevresel etkiler
- Elektrik akımı
- Mekanik etkiler



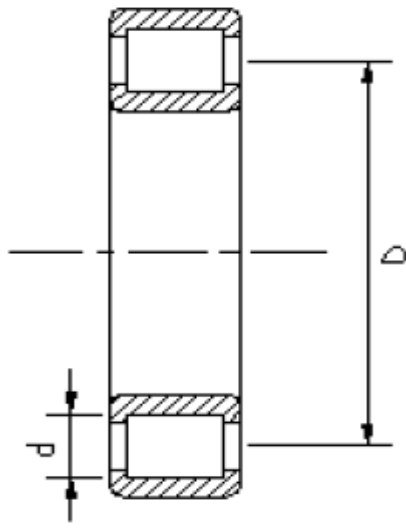
Şekil 5.13. Rulman dış bileziğinde korozyon başlangıcı (URL-2, 2003)

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. (Technical Associates of Charlotte Inc., 1993)



Şekil 5.14. Spektrum grafiğinde rulman hasalarının tespiti (Technical Associates of Charlotte Inc., 1993)

5.9. Rulman Arıza Frekansı Hesaplama



$$\omega_{bp} = n \omega_c$$

$$\omega_{bpi} = \frac{n}{2} N \left[1 + \frac{d}{D} \right]$$

$$\omega_b = \frac{N}{2} \left(\frac{D}{d} \right) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

$$\omega_c = \frac{N}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \right]$$

Şekil 5.15. Rulman geometrisi ve hasar titreşim frekansları

d		25	mm
D		52	mm
B		15	mm
d ₁	≈	34.35	mm
D ₂	≈	46.21	mm

Şekil 5.6. SKF 6205 2Z Sabit Bilyalı Rulman Katalog Bilgileri

$$\omega_{iç} = \frac{750}{2} 10 \left[1 + \frac{25}{52} \right] \text{ cpm} \quad (1.1)$$

$$\omega_{iç} = 445,75 \text{ Hz}$$

$$\omega_{dış} = \frac{750}{2} \left(\frac{52}{25} \right) \left[1 - \left(\frac{52}{25} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

$$\omega_{dış} = 270,32 \text{ Hz}$$

$$\omega_{kafes} = \frac{10}{2} \left[1 - \frac{25}{52} \right] \quad (1.3)$$

$$\omega_{kafes} = 2,6 \text{ Hz}$$

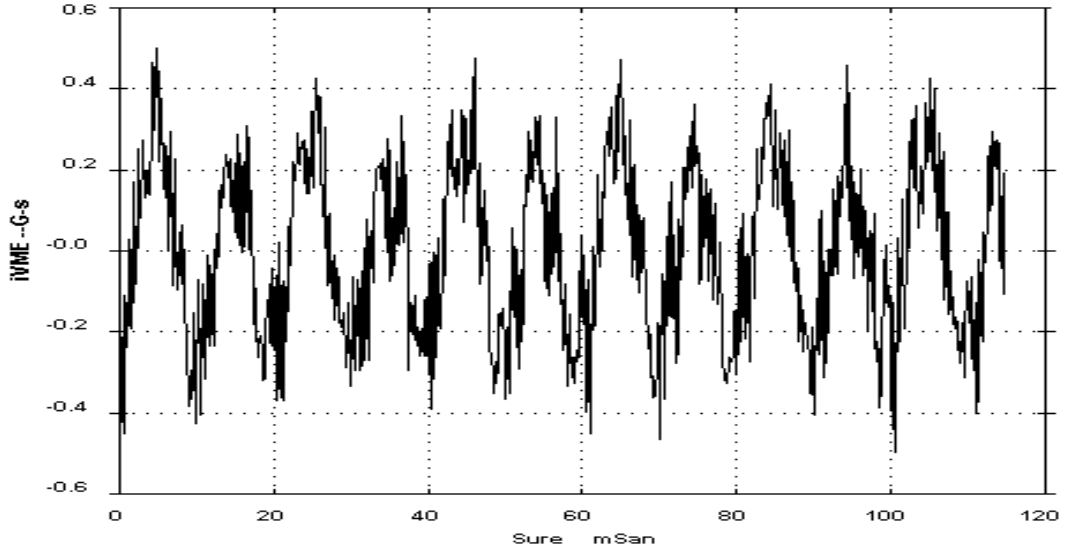
5.10. Eksen Kaçıklığı Arızası

Hizasızlık olarak da adlandırılan eksen kaçıklığı problemi; bağlı iki şaftın geometrik merkezlerinin, rotasyon eksenini boyunca aynı doğrultuda olmamasından kaynaklanır. (V. Wowk, 1991). Tahrik ekipmanı ile tahrik olunan ekipman arasında geometrik hiza eksenini birbiri ile aynı noktada bulduğunda, ekipman eksenleri hizalı konuma gelecektir.

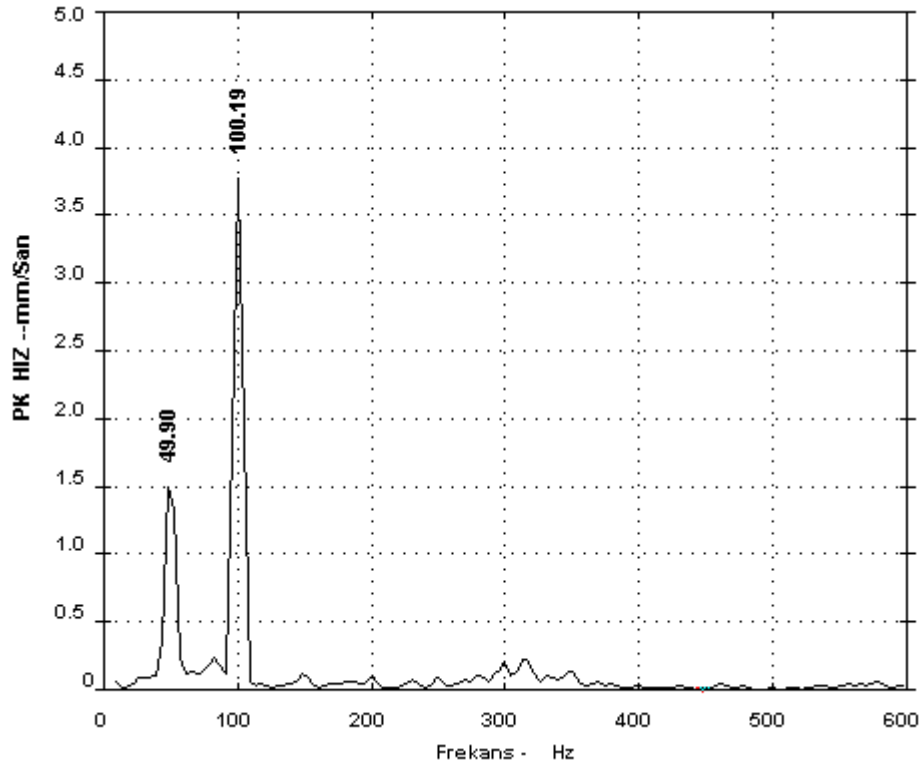
Eksen kaçıklığı problemlerinin kaynağı arasında; geometrik hizanın çeşitli nedenler ile kaybolması, hatalı montaj, eğilme veya burulma gibi kuvvetlerin neden olduğu gerilmeler, sıcaklık farklılıkları, mekanik titreşimler, bağlantı gevşekliği vb. sorunlar sayılabilir (Gökçe M. ve diğ., 2003; Y.-S. Lee ve C.-W. Lee, 1996)

Çoğunluk olarak makinelerde genellikle vardır. Genel olarak eksen kaçıklığının miller, kaplinler vb. kayış kasnak sistemleri gibi aktarma organları arasında olduğu var sayılır. Ancak milin yatak kısımlarında veya ekipmanın diğer bağlantı noktalarında da olabilir. Eksenel yönde, devrin 1 ve 2 katında oluşan baskın titreşim sinyalleri, iki bağlı şaft arasındaki hizasızlığı belirtir. Bazı durumlarda mekanik gevşeklik ile eksen kaçıklığını spektrum grafiğinde ayırtmak zordur. Bu durumlarda zaman dalga formundaki “W,M” şeklinde desen oluşması ve tekrarlı bir şekilde olması eksen kaçıklığı arızasının net olarak ortaya çıkarır. (T .A. Dunton,)

Artan titreşim sonucunda radyal yöndeki ölçümlerinde titreşim değerlerinde artış gözlenir (Technical Associates of Charlotte Inc., 1993). Aşağıdaki şekil, standart olarak bilinen titreşim analizi ile eksen kaçıklığının frekans tabanlı spektrum grafiği ile gösterimidir. (S.Orhan, 2003).



Şekil 5.16. Eksen kaçıklığı dalga form grafiği (S.Orhan, 2003)



Şekil 5.17. Eksen kaçıklığı spektrum grafiği (S.Orhan, 2003)

5.10.1. Açısal Hizasızlık

Şaft merkezleri, her iki shaftın izdüşüm eksenleri boyunca bir noktada kesişiyorsa bu açısal hizasızlığı gösterir. Spektrumu alındığında devrin 1 katında, 2 katında, 3 katında

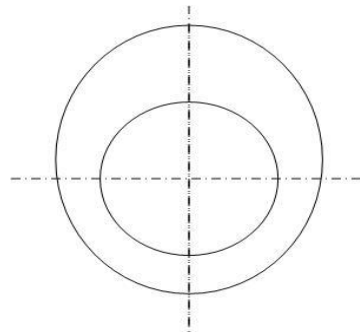
yüksek seviye aksenal titreşimler ve 180 derece faz farkı görülmektedir. Bu sinyaller aynı zamanda, radyal yönde düşük seviyelerde ve fazlarda da gözlenebilir.

5.10.2. Paralel Hizasızlık

Merkezler paralel olduğu halde aralarında offset varsa, bu paralel hizasızlığa neden olur. Spektrumda devrin 2 katında yüksek radyal titreşim, 1 katında ise düşük radyal titreşim ve aynı zamanda kaplin boyunca 180 derece faz farkı olarak gözlemlenebilir. Bu sinyaller aynı zamanda, aksenal yönde düşük seviyelerde ve fazlarda da gözlenebilir.

5.10.3. Statik Eksen Kaçıklığı

“Rotor statorun ekseninden farklı bir yerde ama hala kendi ekseninde dönüyorsa bu statik eksen kaçıklığı olarak tanımlanır. Eksen kaçıklığından oluşan minimum hava aralığı zamanla değişmeden sabit durmaktadır. SEK hava aralığının küçük olduğu tarafa doğru sabit duran magnetik çekme kuvveti yaratır. Statik eksen kaçıklığını aşınmış rulman dış bileziği veya statorun oval oluşu (Şekil 3.10) yaratabilir. Oval statorda, rotor kendi merkezinde dönmeye rağmen statorun merkezinde dönmemektedir.” (İ. Özelgin., 2006)

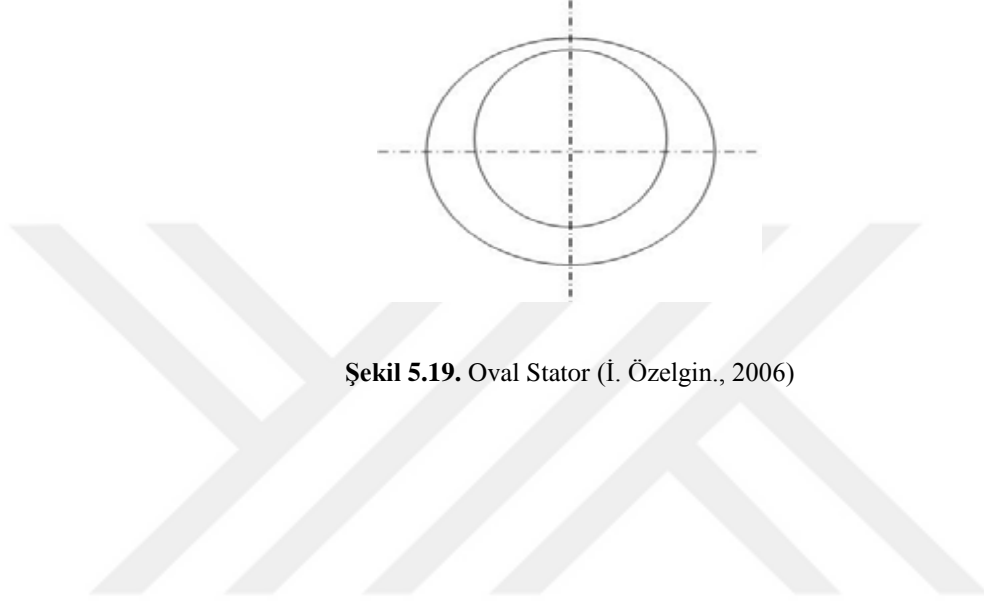


Şekil 5.18. Oval Stator (İ. Özelgin., 2006)

5.10.4. Dinamik Eksen Kaçıklığı

“Rotor statorun eksenini etrafında döner ama kendi ekseninde dönmemektedir. Eksen kaçıklığından dolayı oluşan minimum hava aralığı rotorla beraber dönmektedir. Rotor hızıyla hareket eden hava aralığının küçük olduğu yöne doğru dengesiz çekme kuvveti

yaratır. Dinamik eksen kaçıklığını statik eksen kaçıklığına göre belirlemek daha kolaydır. Çünkü DEK'te dengesiz çekme kuvveti rotorla beraber dönerken, SEK'te sabit bir yöne doğrudur. SEK'te arızanın etkisinin anlaşılabilmesi için algılayıcının konması gereken yer çok önemlidir. Rotorun yüzeyinin oval olması (Şekil 3.11) veya rulmanın iç bileziğinin aşınmış olması dinamik eksen kaçıklığını yaratır.” (İ. Özelgin., 2006)

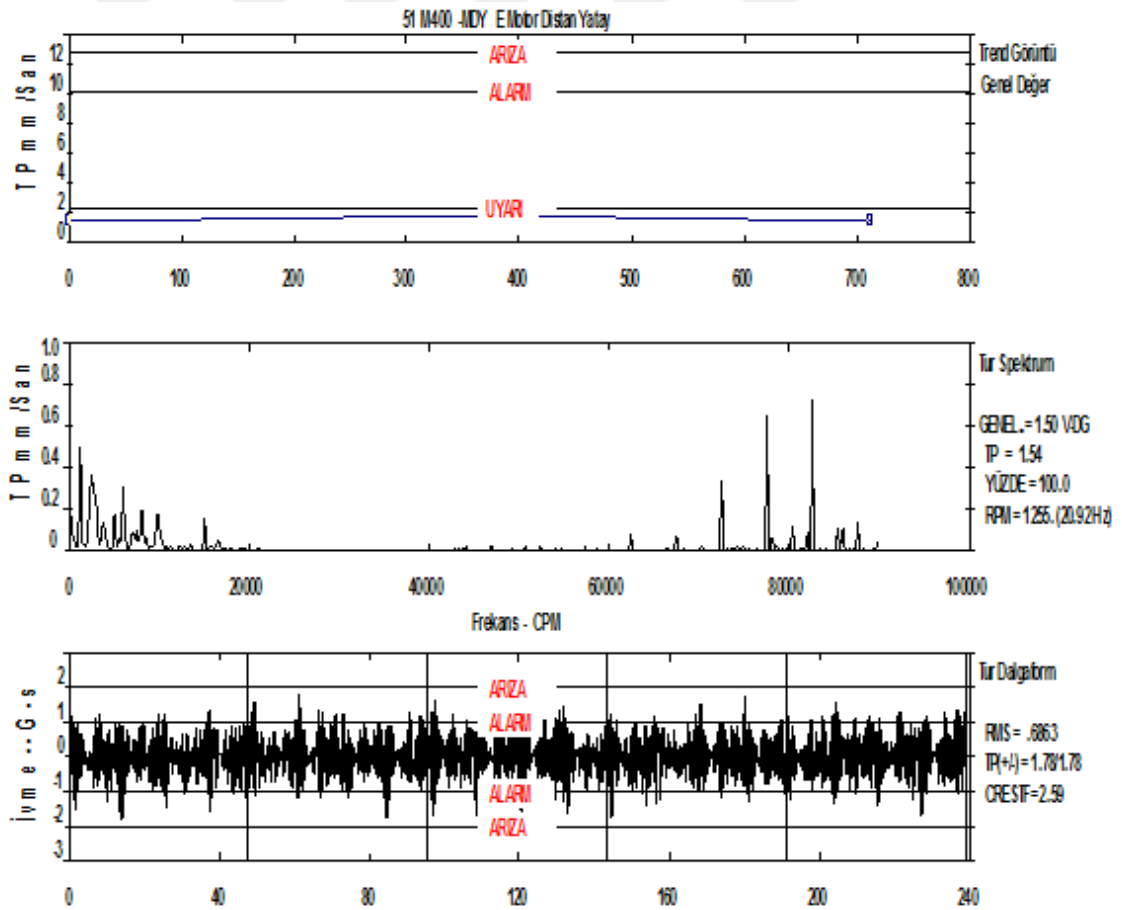


Şekil 5.19. Oval Stator (İ. Özelgin., 2006)

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

6.1. Türbin Soğutma suyu pompası elektrik motoru eksen kaçıklığı arızası

Bu pompanın motor yataklarından alınan ilk ölçüm sonucunda kaplin ile mil arasında eksen kaçıklığının oluşmakta olduğu tespit edilmiştir. Bunun belirtileri ölçüm sonucunda alınan baskın 1x'in yanında, baskın 2x tepesi 3x ve 4x küçük genlikli tepelerin varlığıdır. Ayrıca dalga formundaki düzenli tekrarlı titreşimler bu durumun açıkça belirtisidir. Titreşim değerleri yüksek olan motor iç yatak dikey değerleri daha yüksek olduğu için hasarın bu yönde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Kaplinde oluşan eksen kaçıklığını açıklamakta eksenel ve yatay ölçüm daha bilgilendiricidir. Şekil 5.1 de yatay ölçüm sonucu verilmiştir.

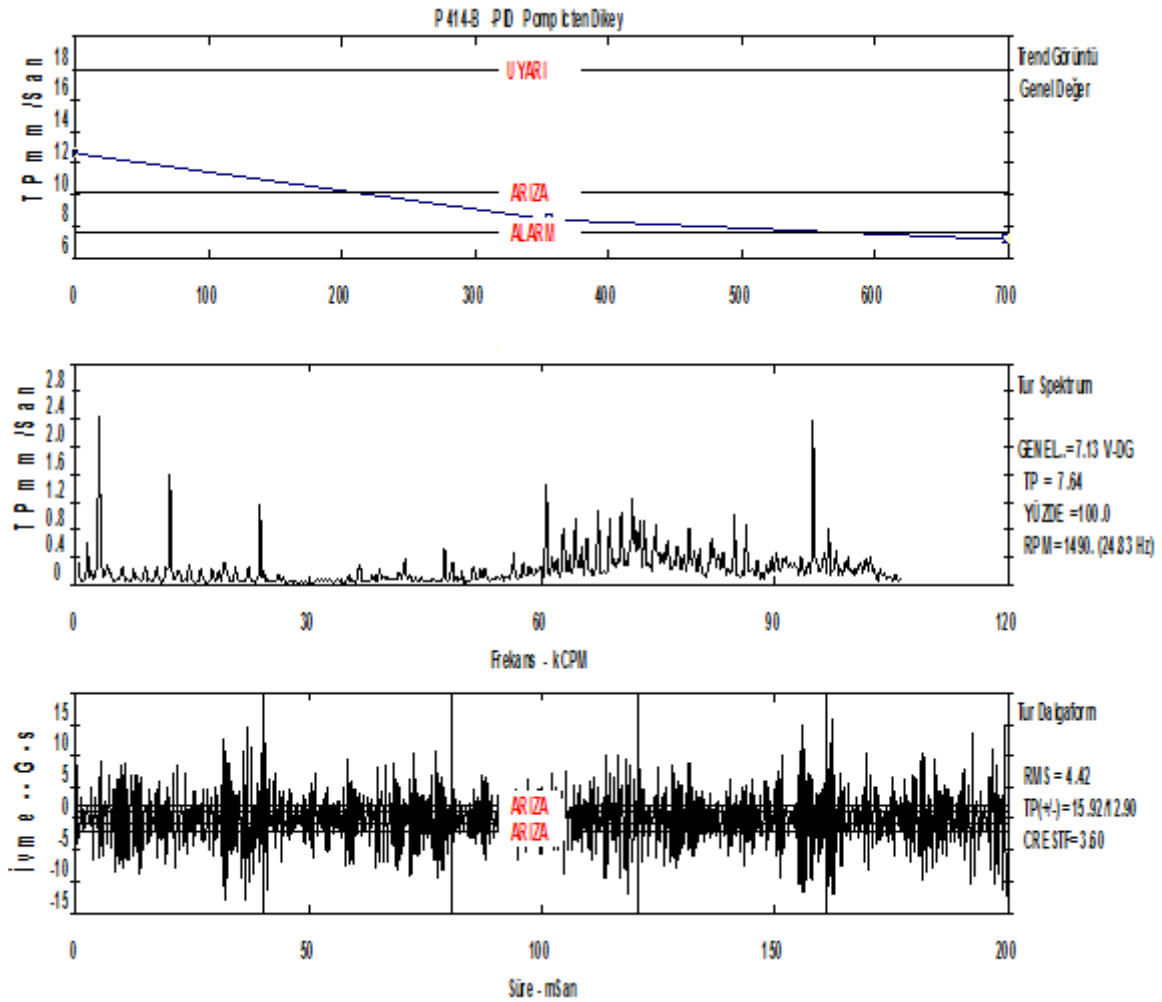


Şekil 6.1. Motor dıştan yatay referans ölçüm spektrum grafiği

Frekans (Hz)	Genlik (mm/s)	Karşılığı
16.29	5	1xRpm
33.09	5.3	2xRpm
48.87	1.1	3xRpm
65.16	-	4xRpm
81.45	-	5xRpm

Çizelge 6.1. Motor dıştan yatay referans ölçüm genlik değerleri

Ölçümlere devam edildiğinde aksel ve yatay 1x'in genliği sabit kalırken 2x'in genliğinde önemli bir artış görülmektedir. Bu durum yukarıda da belirtildiği gibi eksen kaçıklığının gelişmekte olduğunun belirtisidir. Yine aksel ölçüm çoklu dalga form grafiğinde de görüldüğü gibi çok net düzenli dalgalar eksen kaçıklığının göstergesidir.



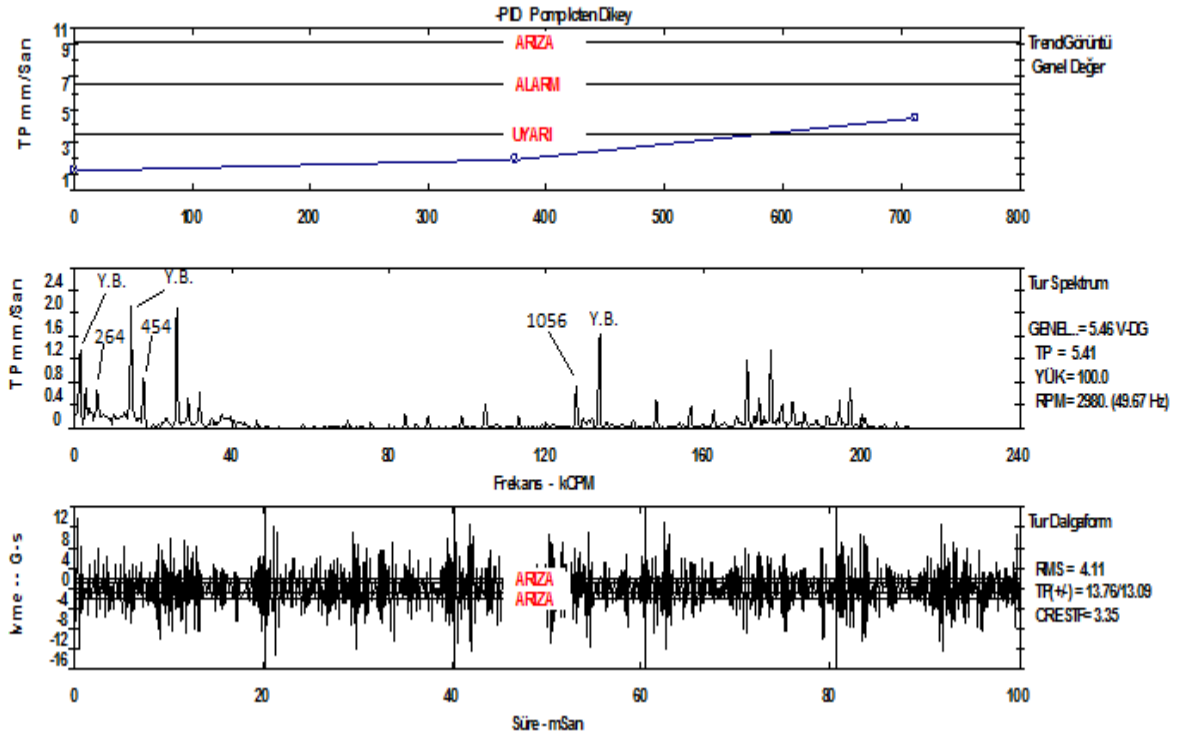
Şekil 6.2. Motor dıştan yatay referans ölçüm spektrum grafiği

Frekans (Hz)	Genlik (mm/s)	Karşılığı
16.29	11.4	1xRpm
33.09	3,3	2xRpm
48.87	1	3xRpm

Çizelge 6.2. Motor dıştan yatay referans ölçüm genlik değerleri

6.2. Şerbet Pompası Elektrik motorunun rulman hasarı

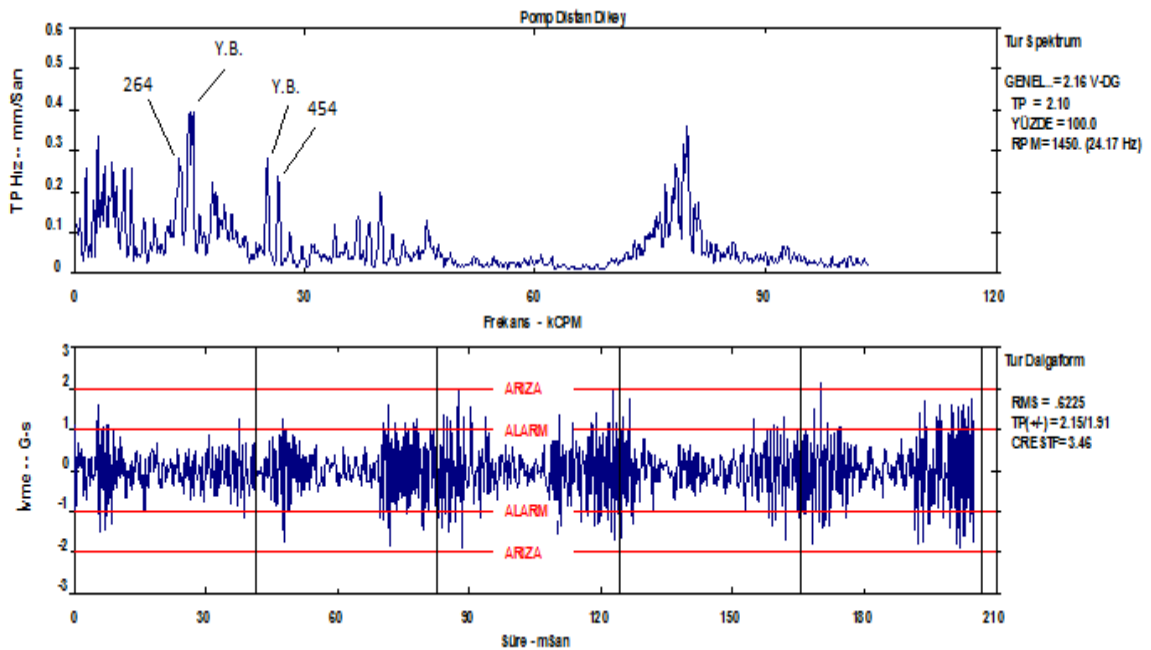
Gücü 90 kW devri 1481 d/d olan bir şerbet pompasında belirli aralıklarla gerçekleştirilen titreşim ölçümlerinde gözle görünür genlikte frekanslar meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada titreşim ölçümlerinin analizi için Prüftechnik firmasının ürettiği Vibxpert II veri ölçeri ve VIB 6.135R tipinde ivmeölçer cihazı kullanılmıştır. Elde edilen titreşim frekanslarının değerlendirilmesi sonucunda pompa rulmanının (SKF 6205) hem dış bilezik esas hasar frekansı ve çoklu katları hem de iç bilezik esas hasar frekansı ve çoklu katlarında gözle görülür genlikler görülmüştür. Ayrıca bu frekansların yan bantlarında da gözle görülür genlikler tespit edilmiştir. Bu koşullarda rulman daha önce zikredilen dört safha içerisinde üçüncü safhada yer almaktadır. Temel hasar frekanslarının oluşan çok sayıda harmoniklerinin grafikler üzerinde tespit edilebilmesi için ölçüm aralığını geniş tutmakta fayda vardır.



Şekil 6.3. Titreşim spektrum grafiği (ilk ölçüm)

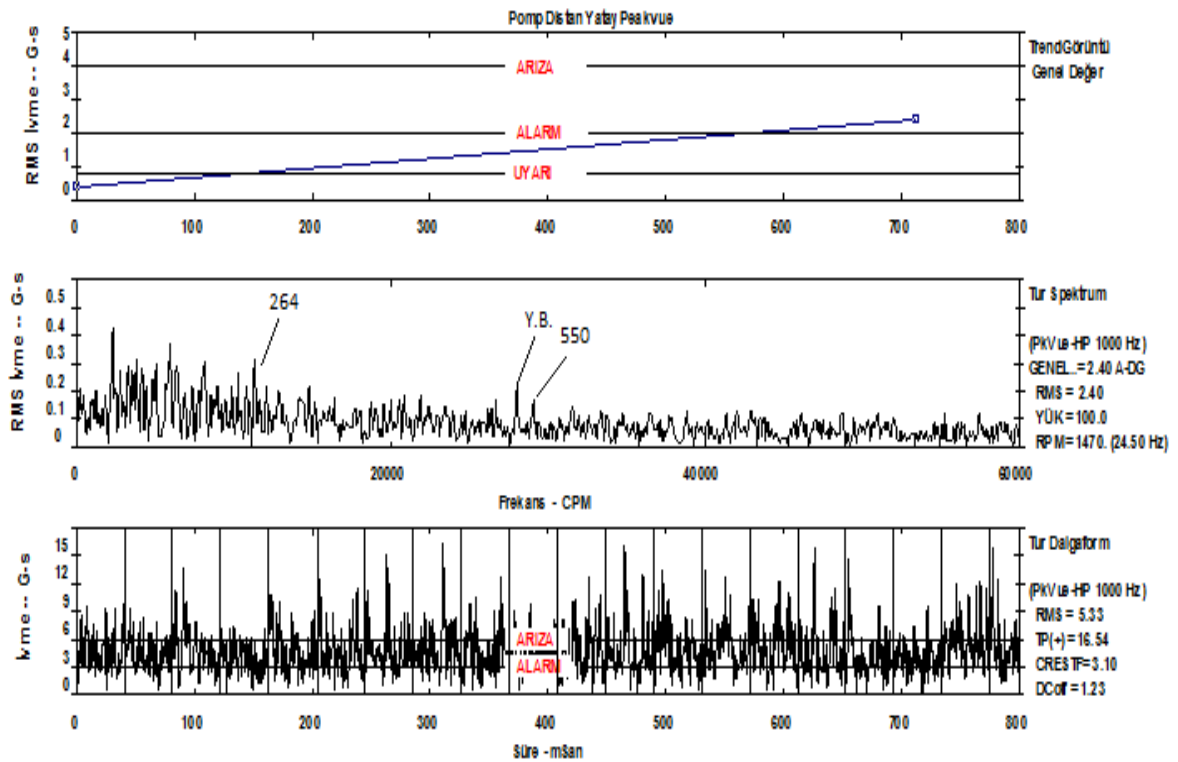
Şekil 6.1 ilk ölçüm sonucunun grafiğini incelersek rulman dış bilezik temel hasar frekansı 268,75 Hz değeri görülmektedir. Bu da 1.2 no.'lu denklemde hesaplanan rulman dış bilezik temel hasar frekansı (270,32 Hz) ve bu frekansın harmoniklerinin oluştuğu anlamına gelir. Ayrıca yine grafiği incelersek rulman iç bilezik temel hasar frekansı 430 Hz değeri görülmektedir. Bu da 1.1 no.'lu denklemde hesaplanan rulman iç bilezik temel hasar frekansı (445,75 Hz) ve bu frekansın harmoniklerinin oluştuğu anlamına gelir.

Ayrıca grafikte esas hasar frekanslarının yanında oluşan pikleri incelersek hem dış bilezik temel hasar frekansı ve harmoniklerinin hem de iç bilezik temel hasar frekansı ve harmoniklerinin yan bantları oluşmuştur. Dış bilezik temel hasar frekansının katlarının dört no.'lu harmoniğe kadar çıktığı ve bu katta da yan bant oluştuğu görülmektedir.. Öncelikle grafikten görüldüğü üzere dış bilezik temel hasar frekansının ve bunun harmoniklerinin genlik değerleri yan bantlarının genlik değerlerinden daha küçüktür. Bu yüzden rulman, dış bilezik ve iç bilezik hasar durumu içinde 3. aşamadır. Rulmanın durumu ileride arıza oluşturabileceğinden dolayı takip edilmelidir. Ölçümler periyodik olarak alınmalıdır.



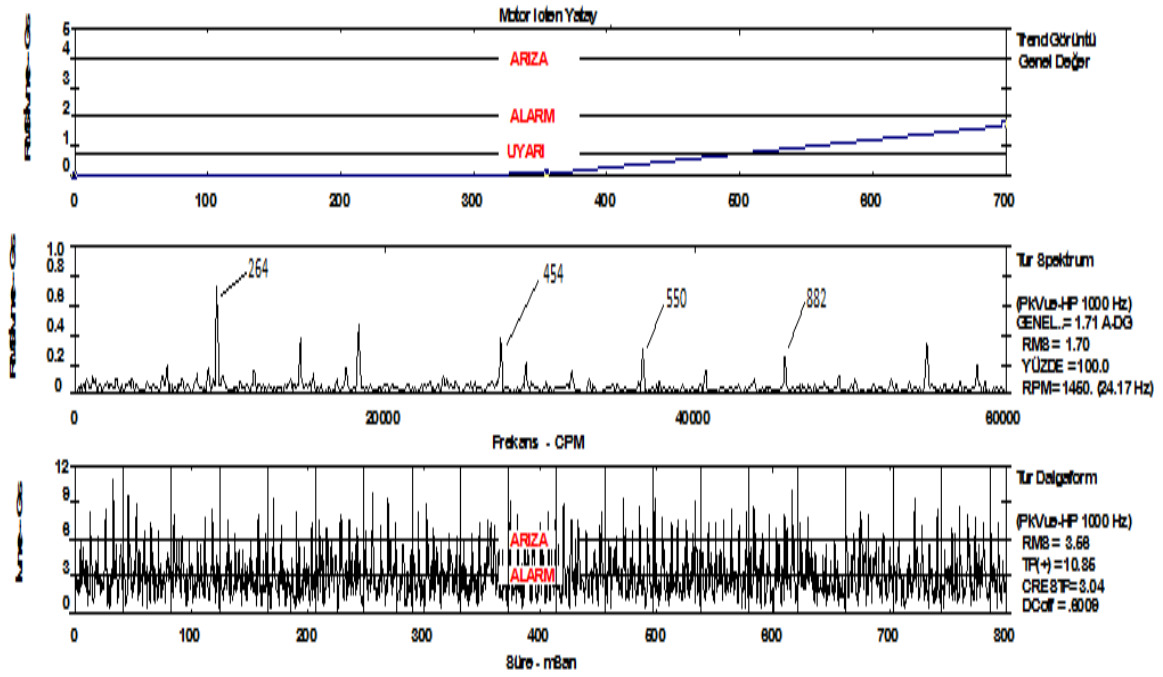
Şekil 6.4. Titreşim spektrum grafiği (ikinci ölçüm)

Şekil 6.2 de ikinci ölçüm sonucu gösterilmiştir. Bu tarihteki ölçümde dış bilezik temel hasar frekansının yan bandının genlik değerinde gözle görülür bir artış söz konusudur. Bu durum hasarın yerinde saymadığı aksine ilerlediğinin göstergesidir. Ayrıca çok katlı harmoniklerin genlik değerlerinde artış gözlenmektedir. Buna ilave olarak zaman dalga boyu grafiğinde arıza alarm limitlerinin aşıldığı açıkça görülmektedir. Bu bize arızanın kesinlikle var olduğunun göstergesidir. Ölçümler alınmaya devam edilerek rulman durumu takip edilmelidir.



Şekil 6.5. Titreşim spektrum grafiği (Üçüncü ölçüm)

Şekil 6.3'de üçüncü ölçüm de görülmektedir ki grafikler birbirini takip ederek devam etmektedir. Dış bilezik temel hasar frekansının iki no.'lu harmoniğinin yan bandının genlik değerinin arttığı gözlenmektedir. Yan bant değerinin genlik değerinde artış olması arızanın devam ettiğini göstermektedir. Ayrıca temel hasar frekansına oldukça yakın değerler oluşması arızanın şiddetinin artışta olduğunu göstermektedir. Bu ivme-zaman grafiğinde de açıkça görülmektedir. Ölçümler periyodik olarak devam etmelidir.

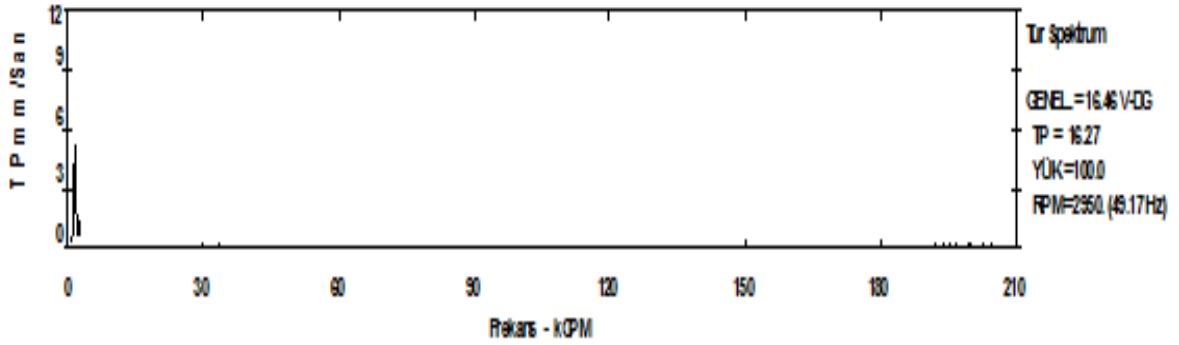


Şekil 6.6. Titreşim spektrum grafiği (Dördüncü ölçüm)

Şekil 6.5’de dördüncü ölçüm sonucu gösterilmiştir. Bu ölçümde daha önceki ölçümlerle paralellik göstermektedir. Bu durum bize ekipmanda hem dış bilezik hem de iç bilezik hasarının olduğunu bildirmektedir. Ayrıca temel hasar frekanlarının olduğu ve spektrum grafiğindeki çimlenme bize arızanın 4. Aşamada olduğunu veya 4.aşamaya geçmeye çok yakın olduğunu göstermektedir. Zaman dalga boyu grafiğindeki sıçramalar arızanın vuruntulu bir şekilde gürültü çıkararak kendisini göstermesine de sebep olmuştur. Bu göstergeler ekipmanın acilen bakıma alınması gerektiği hususunda kesin fikir vermiştir.

Bu tespitlerden sonra pompa ve motorlar revizyona alınmış ve bakımın ardından yapılan titreşim ölçümlerde bu hasarların giderildiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.6’da bakımın ardından yapılan ölçüm gösterilmektedir. Ölçüm sonucunda görülmektedir ki grafikte tepe değerleri kaybolmuş ve oldukça sağlıklı bir spektrum oluşmuştur. Bu durum arıza teşhisinin ardından yapılan revizyonun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

Bakım sonrası grafikleri incelersek;



Şekil 6.7. Titreşim spektrum grafiği (Bakım sonrası grafik)

Çizelge 6.3.'de pompa motorunun rulmanının dış bilezik hasar frekans formülünden elde edilen teorik değerle ölçümler sonucunda elde edilen hasar frekansı ve harmoniklerinin karşılaştırılması tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 6.3. Motorun rulmanı dış bilezik frekansları

Ölçüm ile elde edilen hasar frekansları Hz	Teorik hesaplama ile elde edilen hasar frekansları Hz
264	270,32 1 x f _{du}
550	540,64 2 x f _{du}
814	810,96 3 x f _{du}
1116	1081,28 4 x f _{du}
1360	1351,6 5 x f _{du}

Çizelge 6.4.'de pompa motorunun rulmanının iç bilezik hasar frekans formülünden elde edilen teorik değerle ölçümler sonucunda elde edilen hasar frekansı ve harmoniklerinin karşılaştırılması tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 6.4. Motorun rulmanı iç bilezik frekansları

Ölçüm ile elde edilen hasar frekansları Hz	Teorik hesapla elde edilen hasar frekansları Hz
454	445,75 1 x fdu
882	891,50 2 x fdu
1351	1337,25 3 x fdu
1790	1783 4 x fdu



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada titreşim analizi ile rulman arızalarının ve eksen kaçıklığının belirlenmesi ele alınmıştır. Motor iç yatak rulmanından periyodik titreşim ölçümleri kaydedilmiş ve bu titreşim hareketi analiz edilmiştir. Motor iç yatak rulmanı dış bilezikte ve iç bilezikte oluşan hasarı herhangi bir iş duruşuna ve rulman sökümüne gerek kalmadan, titreşim analizi metodu kullanılarak belirlenmiştir. Hasar belirtisi teoride belirtilen esaslar çerçevesinde gerçekleşmiştir. Teorik hesaplamalarla gerçek ölçüm sonuçları arasında yaklaşık %3 oranında bir fark görülmüştür. Bu çalışmayı benzerlerinden ayıran tamamen gerçek bir sistem ele alınması ve bu şartlar altında hasarlı rulmanın ve hizasızlık problemi yaşayan ekipmanın titreşim davranışı incelenmesidir.

Titreşim analizi yapılarak arıza tespiti yapmak için gerekli donanımına sahip olmak gereklidir. Özellikle ekipman da ne tür bir arıza olduğunun ayrıntısını bilmek için grafiklerin yorumlanma tekniklerine hakim olmak gereklidir. Personele bu şekilde kazandırılan bir yetkinlik işletmeye uzun vade de oldukça kazançlar getirecektir.

Herhangi bir arızanın durumuna karar verirken genel titreşim büyüklüklerine göre hareket etmek her zaman doğru sonucu vermemektedir. Bu yüzden arıza teşhisinde en önemli unsur literatürdeki arıza tanımlamalarını bilmek ve arıza türüne göre hangi harmoniklerin nasıl değişeceğine hakim olmak gereklidir. Verimli bir arıza teşhisinin bir yolu ise ölçümleri periyodik olarak almaktır. En azından üç kere periyodik bir şekilde alınan ölçümlerin doğru sonuca ulaştırma ihtimali yüksektir.

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.

Arızaları daha doğru belirlemek için mümkün olduğunca insan faktörüne az yer vermek gerekir. Bu yüzden otomatikleşmeye yönelik çalışmalar geliştirilmeli özellikle yapay sinir ağları, bulanık mantık metodları geliştirilmelidir. Bu çalışmalar simülasyon ile zenginleştirilerek görsel yazılım programları oluşturulmalıdır.



KAYNAKLAR

- S. Orhan, “Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analiziyle Kestirimci Bakımı”, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı, Kırıkkale, 2002.
- S. Orhan, “Dönen Makinelerde Oluşan Arızalar ve Titreşim İlişkisi”, Teknoloji, Yıl 6, Sayı 3-4, 41-48, 2003.
- T. Belek, “Endüstriyel Tesislerin Bakımında Modern Yaklaşım: Dinamik Erken Uyarıcı Bakım Yöntemleri”, Mühendis ve Makina, 29, 29-36, 1988.
- H. Dal, Ö.K Morgül, İ. Şahin, “Yapay Sinir Ağı (YSA) Kullanarak Titreşim Tabanlı Makina Durum İzlemesi ve Hata Teşhisi”, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(2), s.45-50, 2006
- H. Dal, Ö.K Morgül, “Vibration-Based Machinery Health Monitoring By Fuzzy Logic”, 12th Conference for Computer Aided Engineering and System Modeling with BDM Exhibition, WOW Kremlin Palace, Antalya, 2007
- M.F. Karahan, “Titreşim Analiziyle Makinalarda Arıza Teşhisi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2005
- Girdhar P., Scheffer C., Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2004.
- 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.
- Technical Associates of Charlotte Inc., Training Manual of R0294-1, 1st ed., Entek Ird International, USA, 1993.

T .A. Dunton “An Introduction to Time Wafeform Analysis”

Tandon, N. and Choudhury, A., “A Review of Vibration and Acoustics Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings”, Tribology International, 32, 469- 480, 1999.

Arslan, H., Orhan, S., Aktürk N., 2003. Bilyalı rulman hasarlarının neden olduğu titreşimlerin modellenmesi, G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 18, No 4, 123-146.

Bonnett, A.H., 1992. Cause and analysis of bearing failures in electrical motors, 39th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications San Antonio, TX, USA., Sep. 28-30, p. 87-95.

“Introduction to Demodulation”, The nationalelectrical Carbon Products Company Technical Associates of Charlotte Inc., Training Manual of R0294-1, 1st ed., Entek Ird International, USA, 1993.

R.K. Mobley, An introduction to predictive maintenance, van nostrand reinhold, New York 1990

V.Wowk, Machinery Vibration: Measurment and Analysis, McGraw-Hill, Inc., 1991

R.Keith Mobley, Vibration Monitoring, Technical Review, no.1, Brüel&Kjaer, Denmark, 1987

A.F. Khan, Condition Monitoring of Rolling Element Bearings: A Comparative Study of Vibration Based Techniques, PhD. Thesis, University of Nottingham, 1991

R.K. Köse “Teknolojik Gelişmenin Bakım Planlamasına Katkısı: Bilgisayar yardımıyla kestirimci bakım”, Makine tasarım imalat dergisi, 1989

Özelgin İ. “Asenkron Motor Arızalarının Dinamik Parametrelere Etkisi ve Frekans Analizi ile Tanısı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul 2006

Şahin A. “Büyük Güçlü Asenkron Motorlarda Titreşim Analizi ile Arıza Teşhisi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli 2018

Köse R. K., Mekanik Titreşim Analizi ile Makine Arızalarının Belirlenmesi, 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 04-06 Eylül 2003.

Yılmaz M.S., “Asenkron Motorlarda Sıcaklık, Akım, Titreşim Verilerinin Analizi ve Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul 2008

URL-1, 2018. Rulman hasarları aşamaları [Online], “Identifying the Stages of Bearing Damage”, [https:// www.apr.technology.com.au/techfiles/bearing.html](https://www.apr.technology.com.au/techfiles/bearing.html) [Ziyaret Tarihi: 17.11.2018]

URL-2, 2003. Bir Santrifüj Pompa Rulmanlarının Çalışabilirliğinin Titreşim Analizi ile Belirlenmesi [Online], https://www.researchgate.net/publication/290434790_Bir_Santrifuj_Pompa_Rulmanlarinin_Calisabilirliginin_Titresim_Analizi_ile_Belirlenmesi [Ziyaret Tarihi: 17.11.2018]

URL-3, 2018. Tandem Piezo Sensör Tasarımı [Online], <https://www.pruftechnik.com/tr/ueruenler/vibrasyon-ve-durum-izleme-sistemleri/durum-izleme-sistemleri-icin-sensoer-ve-aksesuarlar/hizlanma-kayit-birimi.html> [Ziyaret Tarihi: 17.11.2018]

URL-4, 2018. Sensör Katalog Bilgileri [Online], https://www.mlt.se/wp-content/uploads/2016/09/catalog_sensors.pdf [Ziyaret Tarihi: 17.11.2018]

URL-5, 2018. Cihaz Katalog Bilgileri [Online], https://www.pruftechnik.com/fileadmin/pt/Downloads/Brochures-Flyers_SPECIAL/product_packages/Condition_Monitoring/Offline/en/VIBXPRT_brochure_en.pdf [Ziyaret Tarihi: 17.11.2018]

URL-6, 2018. Pompa-Motor Ünitesi [Online],

https://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/Application_Notes/BAN0007EN12_CS_Tabriz_1.pdf [Ziyaret Tarihi: 17.11.2018]



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Enes YÜCEL
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Beşiri – 1990
Telefon : 537 454 05 95
Faks :
e-mail : enesyucel425@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Meram Anadolu Lisesi, Meram, Konya	2008
Üniversite	: Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul	2014
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üni., Meram, Konya	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2015	BOSCH Ev Aletleri	Stajyer Mühendis
2015-2018	Konya Şeker A.Ş.	Elektrik Müh.
2018-...	KOSKİ	Elektrik Müh.