

RULMANLI YATAKLARDA HATA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Barış UYGUN

518031003

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ata MUĞAN

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Şeniz ERTUĞRUL (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Hakan TEMELTAŞ (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Günümüzde, titreşim sinyallerinin izlenmesi yöntemiyle mekanik sistemlerde ömür tayini ve hata belirlenmesi konularında oldukça gelişme kaydedilmiştir. Titreşim izleme yöntemi erken uyarıya dayalı bakımı mümkün kılması nedeniyle sıkça kullanılan bir yöntemdir. Özellikle, önceden tahmin edilemeyen bir arızanın büyük ekonomik ve çevresel zararlara neden olduğu, can ve mal kayıplarına yol açtığı kritik mekanizmalarda erken uyarıya dayalı bakım programlarının kullanılması oldukça önemlidir.

Benzer bir çalışmanın gerçekleştirilmesi amacıyla, Doç. Dr. Ata Muğan danışmanlığında, dört farklı durumdaki rulmandan (eski - kullanımdan dolayı yıpranmış rulman, yeni – hiç kullanılmamış rulman, bir bilyesine çekiçle vurularak hasar verilmiş yeni rulman ve dış bileziğinin iç yüzeyine çekiçle vurularak hasar verilmiş yeni rulman) titreşim sinyalleri alınmış, işlenmiş, elde edilen sonuçlar teorik model ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Bu çalışmalar esnasında, danışmanlığımı yapan, maddi manevi desteğini, değerli ilgi ve alakasını eksik etmeyen Doç. Dr. Ata Muğan'a, her konuda bana yardımcı olan arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2006

Barış UYGUN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1 GİRİŞ	1
1.1 Titreşim İzlemenin Önemi	1
1.2 Titreşim İzlemenin Uygulandığı Alanlar	2
1.3 Titreşim İzlemede Sınıflandırmanın Oluşturulması	3
1.4 Titreşim İzlemenin Aşamaları	5
2 RULMAN İÇİN TİTREŞİM MODELİ	9
2.1 Dönüş Hızlarının ve Frekanslarının Hesaplanması	9
2.2 Lokal Kusurlardan Kaynaklanan Titreşimler	10
2.3 Yüklemenin Etkisi	12
2.4 Dağılmış Kusurlardan Kaynaklanan Titreşimler	13
2.5 Rulman Modeli için Sonuçlar	15
3 DENEY	16
3.1 Deney Düzenegi	16
3.1.1 Titreşim algılayıcıları	17
3.1.2 Rulmanlar	18
3.2 Deney Parametrelerinin Seçilmesi	19
3.3 Deney Prosedürü	20
4 ANALİZ VE SONUÇLAR	22
4.1 Analiz ve Veri İndirgeme Metotları	22
4.1.1 Toplam titreşim seviyesi	22
4.1.2 Frekans ekseninde analiz	22
4.1.3 Zaman ekseninde analiz	23
4.2 Deney Verilerinin Matlab Ortamına Atılması	23
4.3 Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerleri	24

4.4 Spektrum Analizi	25
4.5 Verileri Karşılaştırma ve Değerlendirme	31
5 TARTIŞMA	34
5.1 Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerlerinin Yorumlanması	34
5.2 Spektrum Analizlerinin Yorumu	34
5.3 Sonuçlar	36
KAYNAKLAR	39
EK A	41
EK B	54
EK C	55
EK D	57
EK E	61
ÖZGEÇMİŞ	64

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Kusurların oluşturduğu sinyal bileşenleri.....	15
Tablo 4.1. Titreşim şiddeti değerlendirme tablosu.....	22
Tablo 4.2. Deney verilerinin maksimum değerleri.....	25
Tablo 4.3. Deney verilerinin ortalama değerleri	25
Tablo 4.4. A rulmanının y yönündeki titreşimleri için spektrum grafiklerinin integralleri.....	32
Tablo 4.5. A rulmanının y yönündeki titreşimleri için spektrum grafiklerinin kritik frekanslardaki tepe noktaları.....	33

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1.	Mekanizmalar için tipik bozulma-zaman eğrisi..... 3
Şekil 1.2.	Sınıflandırmanın aşamaları..... 4
Şekil 1.3.	Rulmanlarda titreşim izleme..... 6
Şekil 2.1.	Rulman geometrisi..... 9
Şekil 2.2.	Lokal kusurun spektruma etkisi..... 11
Şekil 2.3.	Rulman üzerindeki yük dağılımı..... 12
Şekil 2.4.	Yüklemeyeyle oluşan modülasyon etkisi..... 13
Şekil 2.5.	Rulman üzerindeki dağılmış kuvvetler..... 14
Şekil 3.1.	Deney düzeneği resmi..... 16
Şekil 3.2.	Deney düzeneği şematiği..... 17
Şekil 3.3.	SKF 1206 rulman ölçüleri..... 18
Şekil 3.4.	Rulman perspektif görünüş..... 19
Şekil 3.5.	Rulman kesit görünüş..... 19
Şekil 4.1.	Test no. 01'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 26
Şekil 4.2.	Test no. 02'ye ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 27
Şekil 4.3.	Test no. 03'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 27
Şekil 4.4.	Test no. 04'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 28
Şekil 4.5.	Test no. 01'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 29
Şekil 4.6.	Test no. 02'ye ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 29
Şekil 4.7.	Test no. 03'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 30
Şekil 4.8.	Test no. 04'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 30
Şekil A.1.	Test no. 01'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 41
Şekil A.2.	Test no. 02'ye ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 42
Şekil A.3.	Test no. 03'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 42
Şekil A.4.	Test no. 04'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 43
Şekil A.5.	Test no. 01'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 43
Şekil A.6.	Test no. 02'ye ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği..... 44

Şekil A.7.	Test no. 03'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	44
Şekil A.8.	Test no. 04'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	45
Şekil A.9.	Test no. 01'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	45
Şekil A.10.	Test no. 02'ye ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	46
Şekil A.11.	Test no. 03'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	46
Şekil A.12.	Test no. 04'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	47
Şekil A.13.	Test no. 01'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	47
Şekil A.14.	Test no. 02'ye ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	48
Şekil A.15.	Test no. 03'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	48
Şekil A.16.	Test no. 04'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	49
Şekil A.17.	Test no. 01'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	49
Şekil A.18.	Test no. 02'ye ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	50
Şekil A.19.	Test no. 03'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	50
Şekil A.20.	Test no. 04'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	51
Şekil A.21.	Test no. 01'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	51
Şekil A.22.	Test no. 02'ye ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	52
Şekil A.23.	Test no. 03'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	52
Şekil A.24.	Test no. 04'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği.....	53

SEMBOL LİSTESİ

d_b	: Bilye çapı
d_p	: Dış bilezik çapı
f_0	: Doğal frekans
f_b	: Bilye dönme frekansı
f_c	: Kafes dönme frekansı
f_{ir}	: İç bilezik dönme frekansı
f_{or}	: Dış bilezik dönme frekansı
$g_i(t)$	: Kusurdan kaynaklanan darbelerin oluşturduğu titreşim cevabı
j	: Periyot indeksi
K	: Bilye adedi
M_n	: Efektif modal kütle
P_0	: Temas kuvveti
$Q(t)$	: Yükleme fonksiyonu
U	: Birim basamak fonksiyonu

RULMANLI YATAKLARDA HATA ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, dört farklı durumdaki rulmandan (SKF 1206) titreşim sinyalleri alınmış, işlenmiş, elde edilen sonuçlar teorik model ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Öncelikle literatür araştırması yapılmış ve rulman kusurlarının oluşturduğu sinyaller modellenmiştir. Lokal kusurlardan kaynaklanan titreşimlere ait bağıntılar çıkarılmıştır. Yüklemenin etkisi bağıntılara eklenmiştir. Sonrasında dağılmış kusurlardan kaynaklanan titreşim sinyalleri için model oluşturulmuştur. Bu modelden faydalanılarak, farklı rulman kusurlarının hangi frekanslarda, yüksek genlikli sinyaller oluşturduğu hesaplanmıştır. Böylelikle kritik frekanslar belirlenmiştir. Daha sonra sırasıyla (eski - kullanımdan dolayı yıpranmış rulman, yeni – hiç kullanılmamış rulman, bir bilyesine çekiçle vurularak hasar verilmiş yeni rulman ve dış bileziğinin iç yüzeyine çekiçle vurularak hasar verilmiş yeni rulman) dört farklı durumdaki rulmandan titreşim sinyalleri alınmıştır. Deney verileri incelenmek üzere Matlab ortamına atılmıştır. Matlab ortamında hazırlanan programlar ile bu sinyallere spektrum analizi yapılmış ve spektrum grafikleri çıkarılmıştır. Deney verilerinden, (modelden hesaplanan) kritik frekanslardaki sinyal bileşenlerine ait genlikler hesaplanmıştır. Frekans ekseninde analiz yöntemiyle alınan sinyaller incelenmiştir. Elde edilen tüm bu sonuçlar kurulan model ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, eski, yeni ve bir bilyesine çekiçle vurularak hasar verilmiş rulmanlardan alınan sinyallerin, kurulan model ile örtüştüğü görülmüştür. Dış bileziğinin iç yüzeyine çekiçle vurularak hasar verilmiş rulmandan alınan sinyallerin, çok yüksek genlikli ve karmaşık yapıda olması nedeniyle, model ile bağlantısı kurulamamıştır.

FAULT DIAGNOSIS IN ROLLER BEARINGS

SUMMARY

In this study, vibration signals that were taken from four different roller-ball bearings (SKF 1206) were monitored and analyzed. Each roller-ball bearings were in different condition: sample no 1 was old (used), sample no 2 was new, sample no 3 was new but its one ball was damaged, sample no 4 was new but its outer ring was damaged. Results of the analysis were compared with the roller-ball bearing vibration model. Similarities and differences between model and monitored signals were discussed. First, literature search was done and vibration model was generated for roller-ball bearings. Vibrations that were generated by localized defects, distributed defects and loading were formulated. Signal components that were excited by defects were found and critical frequencies were calculated. Then signals were monitored for four different roller-ball bearings by the experiment. Signal data was analyzed in Matlab and spectral graphs were calculated. Signal components were checked on critical frequencies. Frequency domain analyses were done. Results were compared with roller-ball bearing vibration model and discussed. In conclusion, for the first three samples, the comparison of the results with the model given in the literature was in a good agreement but for the fourth sample, relation could not be found because of signals complexity.

1 GİRİŞ

1.1 Titreşim İzlemenin Önemi

Çeşitli cihazlar, sensörler kullanılarak belirli bir sistemin gözlemlenmesi, veri toplanması ve bu verilerin değerlendirilerek sistemle ilgili bilgilere ulaşılması işi izleme olarak tanımlanır. Titreşim izleme, sistemle ilgili bilgiler taşıyan titreşim sinyallerinin toplanması ve işlenmesidir. Sensörler vasıtasıyla elde edilen bu sinyaller hem sisteme etkiyen iç ve dış kuvvetler hakkında hem de sistemin yapısal özellikleri hakkında bilgi taşırlar.

Titreşim izleme önemli bazı avantajları nedeniyle sıkça uygulanan bir izleme yöntemidir. Piyasada hazır olarak bulunan aygıtlarla sistemin birçok kinematik özelliğini içeren titreşim sinyalleri kolayca ve güvenilir şekilde elde edilebilir. Bu durum, gürültü sinyallerinin bozucu etkisine açık olmasına rağmen sistemle ilgili bilgi taşıyan titreşimlerden faydalanmak isteyenler için önemli bir avantajdır. Titreşim izlemenin bir diğer avantajı sisteme zarar vermeden, sistemde herhangi bir değişiklik yapmaksızın izlemeyi mümkün kılmasıdır. Bu nedenle normal çalışma koşulları altında sistemin erişilmesi, ölçülmesi mümkün olmayan özellikleri hakkında bilgi edinmeyi çoğu zaman olanaklı hale getirir [1]. Diğer bir deyişle titreşim izleme bir çeşit hasarsız test yöntemidir.

Titreşim izleme yöntemi kullanılırken bazı güçlüklerle karşılaşılabilir. Yöntemin yüksek hassasiyette veri toplanmasına olanak vermesi, elde edilen verinin gürültü kaynaklarından gelen bozucu etkilere açık olmasına neden olur [2]. Burada gürültü ile, titreşim sinyalinin, sistemin ilgilendiğimiz özelliğine ait bilgi taşımayan kısmı kastedilmektedir. Sistemin ilgilendiğimiz özelliğine ait titreşim karakteristiği hakkında önceden bilgi sahibi olunması, deneyler sonucunda elde edilen sinyallerin gürültüden arındırılmasında önemli fayda sağlar.

1.2 Titreşim İzlemenin Uygulandığı Alanlar

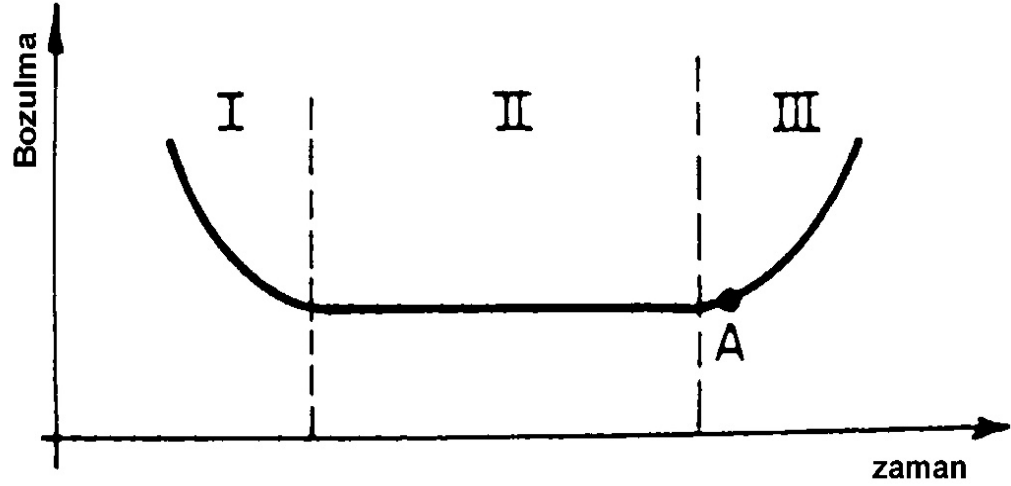
Titreşim izleme, makinalardan oluşan sistemlerde bakım ve kalite kontrol amaçlı kullanılmaktadır. Bu iki uygulama alanı kavram olarak birbirlerine benzemekle birlikte bazı bakımlardan belirgin şekilde farklılık göstermektedir.

Titreşim izlemenin bakım amaçlı kullanılması erken uyarıya dayalı bakım programlarının kurulmasına olanak verir. Önceden tahmin edilemeyen bir arızanın büyük ekonomik ve çevresel zararlara neden olduğu, can ve mal kayıplarına yol açtığı kritik mekanizmalarda erken uyarıya dayalı bakım programlarının kullanılması oldukça önemlidir. Bu tür uygulamalarda genellikle tek bir sistem (veya az sayıdaki birkaç sistem) sürekli olarak izlenir.

Kalite kontrol amaçlı kullanımda ise çok sayıdaki, çoğu zaman göreceli olarak düşük maliyetli parçalar üretim sırasında test edilirler. Hatalı parçaların belirlenmesi sadece üretim veya garanti maliyetlerinin azaltılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda imalat sırasında oluşan problemlerin gerçek nedenini bulmaya ve dolayısıyla çözüm üretmeye de yardımcı olur. Titreşim izleme yöntemi diğer yöntemlerin çeşitli sınırlamalardan dolayı uygulanabilir olmadığı durumlarda bile kalite kontrol amaçlı kullanılabilir.

Titreşim izlemenin diğer bir avantajı ise incelenen parçada bir hata olmasa bile ileride hataya yol açabilecek durumları algılamaya olanak sağlamasıdır. Böyle bir durumu algılamak parçanın ne kadar ömrü kaldığını tahmin etmeyi mümkün kılar [3].

Yukarıda anlatılan bütün izleme yöntemlerinde sistemin durumu hakkında bilgi gereklidir. Bakım için, hata oluşmadan hemen önceki sistem durumu belirlenmeye çalışılır. Aşağıdaki şekil mekanizmalar için tipik bir bozulma-zaman eğrisini göstermektedir.



Şekil 1.1: Mekanizmalar için tipik bozulma-zaman eğrisi

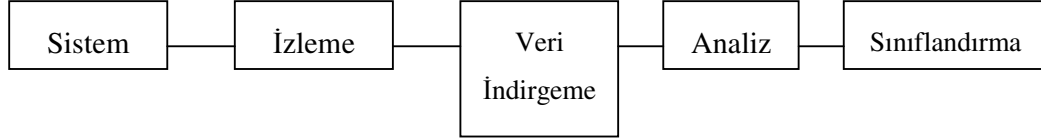
Bozulma-zaman eğrisi genellikle üç ana evreden oluşur. Bunlardan birincisi: ilk çalıştırma, alışma; ikincisi: normal çalışma; üçüncüsü: arızanın oluşma evresidir. Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere evreler arasında belirgin bir ayrım bulunmayabilir. İzleme yöntemindeki amaç arızanın önceden belirlenmesini mümkün kılan A durumunun bulunmaya çalışılmasıdır. Üçüncü evrenin uzun olması bakım planlamasının daha güvenilir şekilde yapılmasına olanak sağlar. Pratik hayatta çoğu zaman A durumunun belirlenmesi zorlu bir süreçtir. Kimi mekanizmalarda ise üçüncü evre o kadar kısadır ve arızanın oluşturacağı kayıplar o kadar fazladır ki izleme yönteminin pek bir faydası kalmaz.

A noktasının belirlenebilmesi için sistemin durumunun yine sistemin değişkenleri (algılayıcılardan alınan veriler) vasıtasıyla izlenmesi ve ikisi arasındaki ilişkinin saptanması gereklidir. Sistemin hangi evrede olduğunun mutlak olarak saptanması genellikle mümkün olmaz ve çalışma sırasında sistemden sürekli veya belirli aralıklarla veri toplanır. Bu verilerdeki değişim takip edilerek sistemin eğilimi izlenir ve A noktası belirlenmeye çalışılır. Eğilim izleme işi bu nedenle sistemin karakteristiği hakkında önceden bilgi sahibi olmayı gerektirir.

1.3 Titreşim İzlemede Sınıflandırmanın Oluşturulması

Mekanizmalardaki veya parçalardaki hatanın belirlenmesi bir çeşit sınıflandırma işidir. Bazen sadece “hata var”, “hata yok” ayrımının belirlenmesi söz konusu iken

bazen de daha fazla sayıdaki durumlardan hangisinin sistemde mevcut olduğunun saptanması istenir.



Şekil 1.2: Sınıflandırmanın aşamaları

Yukarıdaki şekilde genel sınıflandırma planı verilmektedir. Titreşim sinyalleri öncelikle sistemin incelenmek istenen özellikleri belirginleştirilecek şekilde işlemden geçirilir. Bu işlem “veri indirgeme” olarak isimlendirilir ve filtreleme, ortalama alma (averaging), çerçeveleme (windowing), spektrum analizi v.b. aşamalardan oluşur [4]. Veri indirgeme sonunda yüksek örnekleme frekansında kaydedilmiş milyonlarca ölçüm noktasından oluşan verilerden, sistemin az sayıdaki belirli bazı özelliklerine ait bilgiye ulaşılabilir. Bu bilgiler sınıflandırmanın gerçekleştirildiği aşamada değerlendirilir ve sistemin mevcut durumu belirlenip varsa özgül bir hatanın tespit edilmesi sağlanır. Bir sistemdeki titreşim sinyallerinin seviyesinin daha önceden belirlenmiş eşik değerini aşması durumunda hatanın belirlenmesi, sınıflandırmaya ilişkin en basit örnek olarak verilebilir.

Sınıflandırmanın doğru yapılabilmesi için izlenen sistemin tüm çalışma durumlarında ne çeşit sinyal oluşturduğunun önceden biliniyor olması gereklidir. Daha sonra alınan sinyaller sisteme ait eldeki karakteristik sinyal tipleri ile karşılaştırılır ve sistemin hangi durumda olduğu tahmin edilmeye çalışılır [5]. Bu işlem daha çok olasılık değerlendirmesine dayanır. Eldeki sinyal çoğu zaman önceden belirlenmiş karakteristik sinyal tiplerine bire bir uymaz. Sınıflandırma sırasında büyük olasılıkla hangisine daha yakın olduğu karar vermeye çalışılır. Bazen eleme yöntemi kullanılır. Bu yöntemde eldeki sinyalin hangi karakteristik sinyal grubuna kesinlikle ait olamayacağı bulunup mevcut durumlar bir bir elenerek doğru sınıflandırma yapılmaya çalışılır. Günümüzde kullanılan titreşim izlemesine dayalı kalite kontrol sistemlerinde bu mantık kullanılmaktadır.

Titreşim izlemede, çoğu zaman, sınıflandırma yapmak için genel bir yaklaşım oluşturulmasını engelleyen zorluklarla karşılaşılır. Sınıflandırma işi özetle yeni bir

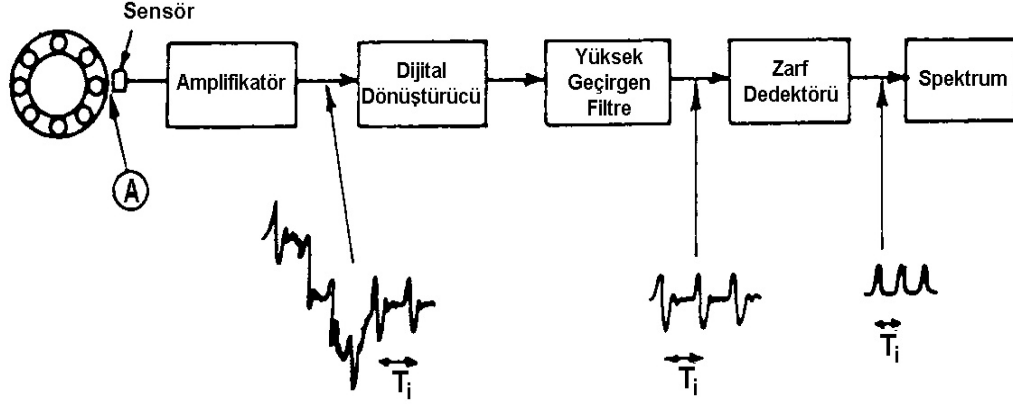
sinyalin bilinen sinyal kategorilerinden birine sokulmasıdır. İki farklı sınıflandırma uygulamasını ayırt etmek gerekir.

Çok sayıda parçadan sinyal toplanan kalite kontrol uygulamalarında eldeki sinyallerin bilinen sinyal kategorilerinden birine sokulmasında zorluk yaşanabilir. Sorunun gerçek nedeni bilinen sinyal kategorilerinin yeterli sayıda örnek kullanılmadan oluşturulması nedeniyle sistemde görülebilecek bütün durumları kapsamamasıdır.

Tek bir sistemin bakım amaçlı izlendiği durumlarda elde edilen sinyalin karakteristiğindeki değişim ve sistemin eğilimi sürekli takip edilir. Endüstrideki benzer sistemlerden kazanılan bilgilerle bakım yapılması gereken zaman belirlenmeye çalışılır. Buradaki sorun ise benzer sistemlerde bulunan ufak farklılıklar bile sinyal karakteristiğini değiştirebilir ve bakım zamanının yanlış hesaplanmasına neden olabilir.

1.4 Titreşim İzlemenin Aşamaları

Aşağıdaki şekilde bir rulmandaki titreşim izlemenin aşamaları gösterilmektedir. Piezoelektrik ivme sensörü tarafından alınan sinyaller öncelikle bir amplifikatörden geçirilerek güçlendirilir sonrasında yüksek geçirgen (high-pass) filtreden geçirilerek düşük frekanslı bileşenlerinden temizlenir ve zarf (envelope) dedektöre sokulur. İleriki aşamada spektrum analizi gerçekleştirilir ve sensörün takıldığı rulman bileziğine ait titreşimlerin hız bileşenlerine ulaşılır. Bu değerlerin incelenen rulman için kabul edilebilir sınırlar arasında olup olmadığı kontrol edilir. Sonuçta “rulman değiştirilmeli” veya “rulman kullanılmaya devam edilebilir” şeklinde bir karar verilir. Varsayıma dayalı bu sistem, özellikle kritik mekanizmalarda, arıza oluşmadan evvel bakım yapılması amacıyla tasarlanmıştır [6].



Şekil 1.3: Rulmanlarda titreşim izleme

İlk aşamada rulmanın dış bileziği üzerinden titreşim sinyalleri alınır. Daha önceden rulman için oluşturulmuş, sinyal parametreleri ile sistem yükleri, deformasyonları, gerilmeleri, boyutsal hataları v.b. arasındaki kantitatif ilişkileri içeren sinyal modeli mevcutsa, A noktasından alınan bu sinyaller ile rulmanın ne durumda olduğu belirlenebilir. Rulmanın üzerindeki lokal bir kusur, bileziğin dönme devrine, rulmanın geometrik özelliklerine, yüklenme durumuna ve kusurun bulunduğu yere bağlı olarak darbe etkisi yaratır.

Titreşimler, rulmanın yapısına ait dinamik özellikler nedeniyle değişime uğrarlar. Birçok yapı oldukça karmaşık karakterdedir ve parametreleri kısmen bilinir. Sinyalleri büyük ölçüde etkileyebilirler. Öyle ki, kimi durumlarda sinyal ağırlıklı olarak yapısal karakteristiği taşır. Uygun tekniklerle kullanılmadıkça, elde edilen sonuçlar incelenmek istenen kaynağın karakteristiğini değil, yapısal karakteristiği yansıtır.

Titreşim sinyallerinde değişikliğe neden olan diğer bir aşama ise algılayıcı (sensör) seçimidir. Bazen bu değişiklik kasıtlı olarak oluşturulabilir. Örneğin, ivme, hız veya yer değiştirme bilgilerinden sadece biri uygun sensörle okunup diğer iki bilgi integral veya türev alınarak hesaplanabilir. Gürültü-sinyal oranının iyileştirilmesi için filtre uygulanması da yine kasıtlı olarak yapılan bir sinyal değiştirme yöntemidir.

Ölçüm sırasında geniş frekans aralığının kullanılması algılayıcının dinamik özelliklerinin de ölçüm sinyaline karışmasına neden olabilir. Böyle bir etkinin sinyal üzerinde ne kadar değişiklik yaratacağını hesaplamak çoğu zaman güçtür. Bu serbest haldeki ivme algılayıcısının frekans cevabına ve algılayıcının bağlanması için kullanılan yöntemeye bağlı olarak değişir. İvme algılayıcısının frekans cevabı üretici

firma tarafından belirtilir. Sinyal üzerindeki, algılayıcıdan kaynaklanan değişimleri kabaca tahmin etmek mümkün olabilir [7]. Algılayıcının sabitlenmesi için kullanılan montaj yönteminin sinyal üzerinde yarattığı değişimi belirleyebilmek çok daha zordur.

Sinyal işleme, düşük frekanslı bileşenlerin temizlendiği yüksek geçirgen filtreleme aşaması ile başlar. Yukarıdaki şekilde yüksek geçirgen filtreleme işlemi, sinyal sayısal (dijital) hale dönüştürüldükten hemen sonra gerçekleştirilmiştir. Farklı uygulamalarda sinyal analog haldeyken, analog yüksek geçirgen filtreler kullanılarak da bu işlem yapılabilir. Yüksek geçirgen filtrelemenin esas amacı rulmana ait olmayan bileşenlerin sinyalden çıkarılmasıdır. Bir çok döner mekanizmada çevreden gelen titreşimler düşük frekanslı bileşenler oluşturur. Rulmana ait titreşimler ise yüksek frekanslıdır. Yüksek geçirgen filtreleme ile gürültü-sinyal oranı iyileştirilmiş olur. Pratikte, incelenmek istenen sinyal ile gürültü sinyali aynı frekans üzerinde çakışmış olabilir. Bu nedenle gürültü-sinyal oranı iyileştirilmeye çalışılırken uygun filtrelemenin seçilmesine özen gösterilmelidir. İncelenmek istenen sinyal ile gürültü sinyalinin karakteristikleri hakkında önceden bilgi sahibi olunması oldukça önemlidir. Genelde, yaklaşık karakteristiklerle ilgili bilgiye ulaşmak mümkündür. Fakat çoğu uygulamada sinyal ve gürültü karakteristiğine ait yeterli miktarda istatistiksel bilgi bulunmadığı için optimum filtrenin belirlenmesi olanaksızdır.

Sonraki aşamalar zarf dedektörü ve belirli bir frekans aralığı için spektrum analizidir. Zarf dedektörü ile sinyal, sistemin yapısal özelliklerinden bir miktar arındırılmış olur.

Son aşama ise sınıflandırmadır. Yukarıda belirtilen işlemler sonucunda, sistemdeki belirli kusurlara ait frekans bileşenlerini taşıyan özel bir sinyal elde edilir. Sınıflandırma aşamasında bu özel sinyal değerlendirilir ve rulman üzerinde kusur olup olmadığı, varsa kusurun nitelikleri (konumu v.b.) belirlenir. Elde edilen sinyalin karakteristiği, sağlam kabul edilen bir rulmanın sinyal karakteristiği ile karşılaştırılır veya elde edilen sinyaldeki değişim takip edilerek kritik frekanslarda ciddi bir artış eğilimi olup olmadığı kontrol edilir.

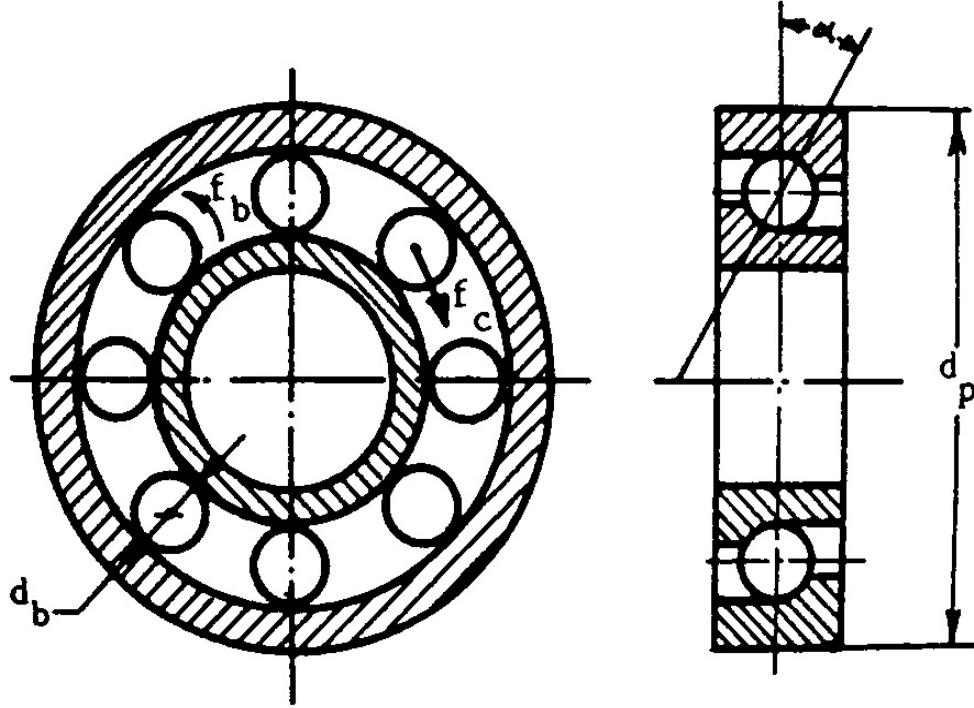
Tahrik kuvvetleri, mekanizmanın yapısından başlayıp izlemenin gerçekleştirildiği algılayıcı bulunan noktaya doğru ilerleyen titreşim sinyalleri oluşturur. Dolayısıyla daha önceden, incelenen sistme ait bir sinyal modeli hazırlanmışsa, bu model

kuvvetlerin kinematik bileşenlerini ve sistemin yapısal özelliklerini kapsar. İlk aşama olan enstrümantasyon aşaması algılayıcı, sinyal şartlandırıcı ve ikiz yanılması (anti-aliasing) filtre içeren analog/sayısal çeviricinin seçilmesi ve monte edilmesi işlemlerinden oluşur. Sonrasında sinyal işleme ile veriler indirgenir, sinyal içinde aranan karakteristikler belirginleştirilir. Son aşama olan sınıflandırmada, belirginleştirilmiş olan sinyal karakteristikleri önceden edinilmiş bilgilerle karşılaştırılır ve sistemin hangi durumda olduğuna karar verilir.

Sisteme ait sinyal modelinin önceden oluşturulması enstrümantasyon aşamasında yapılacak seçimlere yardımcı olur. Dolayısıyla sinyal işleme aşamasını ve gürültü karakteristiğini etkiler. Örneğin ivme algılayıcısı ve örnekleme süresi ilgilenilen frekans aralığına ve en iyi gürültü-sinyal oranına bağlı olarak seçilir. Önfiltreleme gürültü-sinyal oranını iyileştirir. Sınıflandırma sırasında yapılan karşılaştırma işlemi, sistemin her bir durumuna ait önceden kaydedilmiş istatistiksel veri gerektirir. Bu veri grupları belirli toleranslar içindedir. Toleransların dar oluşu ve gürültü karakteristiği veri analiz aşamasını (örneğin değerlendirilen veri uzunluğunu) etkileyecektir.

2 RULMAN İÇİN TİTREŞİM MODELİ

2.1 Dönüş Hızlarının ve Frekanslarının Hesaplanması



Şekil 2.1: Rulman geometrisi

Salt rulman hareketinden oluşan titreşim frekansları basit denklemlerle ifade edilebilir. Dönüş hızlarını yansıtan bu frekanslar, bilye ve rulman çapları, iç ve dış bilezik hızları ve değme açısı cinsinden denklemlendirilebilir [8].

$$f_c = 0,5 f_{ir} (1 - \gamma) + 0,5 f_{or} (1 + \gamma) \quad (2.1a)$$

$$f_b = 0,5 \frac{d_b}{d_p} (1 - \gamma)(1 + \gamma)(f_{or} - f_{ir}) \quad (2.1b)$$

Burada $\gamma = (d_b / d_p) * \cos \alpha$; d_b bilye çapı; d_p dış bilezik çapı; α değme açısı; f_c kafes dönme frekansı; f_b bilye dönme frekansı; f_{or} dış bilezik dönme frekansı; f_{ir} iç bilezik dönme frekansıdır.

İç bileziğin sabit olduğu durumda, $f_{ir} = 0$ ve $f_{or} = f_r$ (rulmanın - temel - dönme frekansı);

$$f_c = 0,5 f_r (1 + \gamma) \quad (2.2)$$

Şunu da belirtmek gerekir ki, değme açısı α sıfır olmadıkça, hesaplanan dönme frekansları arasındaki oranlar rasyonel sayılarla ifade edilemezler.

2.2 Lokal Kusurlardan Kaynaklanan Titreşimler

Rulman için oluşturulan model hem tahrik kuvvetleri hem de rulmanın yapısal özellikleriyle ilgili kabuller içerir.

Rulmanlardaki aşınmalar genellikle mikroskopik kusurlar olarak başlar. Bu kusurlar zamanla lokal makroskopik kusurlara dönüşür. Hata teşhisinde lokal kusurların görünümü önemli ip uçları verir. Bir kusurun üzerinden geçen her bilye tekrarlanan kuvvetler oluşturur. Dolayısıyla tekrarlanan kuvvetlerin etkilerini içeren model üretilmesi uygun olur. Denklem (2.1) ve (2.2)'de belirtildiği üzere tekrarlanma frekansı kusurun bulunduğu yere göre değişir. Tek bir i kusurunun periyodik karakteristiği şu şekilde ifade edilebilir;

$$x_i(t) = \sum_j g_i(t - jT_i)U(t - jT_i) \quad (2.3a)$$

Burada j periyodun indeksi ve T_i uygun tekrarlanma periyodudur [9]. Örneğin, dış bilezik üzerinde bir kusur olması durumunda, $f_{or} = 0$ ve K adet bilye mevcut iken, $T_i = 1 / (K * f_c)$ dir. f_c , denklem (2.1a)'dan bulunur. U birim basamak fonksiyonudur. $g_i(t)$ kusurdan kaynaklanan darbelerin oluşturduğu titreşim cevabıdır. Periyodik $x_i(t)$ fonksiyonuna Fourier dönüşümü uygulanırsa;

$$X_i(f) = 2\pi \sum_k X_{ki}(f) \delta(f - kf_i) \quad (2.3b)$$

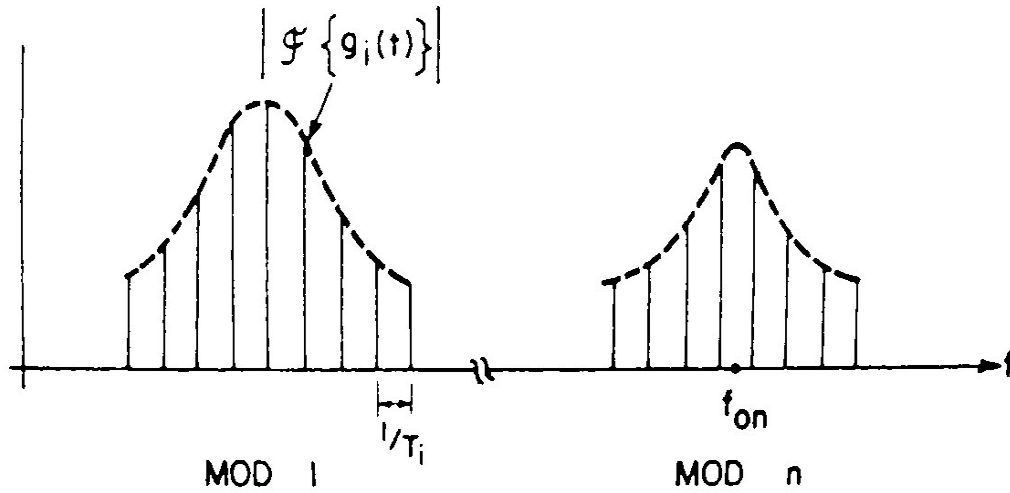
$$X_{ki} = F[g_i(t)] = \frac{1}{T_i} \int_{-T_i/2}^{T_i/2} g_i(t) \exp(-j2\pi kf_i t) dt \quad (2.3c)$$

Görüldüğü üzere, $X_i(f)$ fonksiyonu, ayrı n / T_i frekansların bileşenlerinden oluşur.

Kusurun oluşturduğu darbe etkisinin, sönümlenmiş sinüs formda olacağını kabul edersek her bir yapısal mod için;

$$g_i(t) = A_i \exp(-\alpha t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (2.4)$$

Burada α (sönümlenme faktörü) ve f_0 (doğal frekans), n . yapısal moda bağlı olarak değişir. Serbest haldeki rulman için $g_i(t)$ fonksiyonu genellikle bileziklerin doğan frekanslarından oluşur. n adet modun her biri için ayrı bir doğal frekans f_{0n} ve ayrı bir sönümlenme faktörü α_n vardır. Aşağıdaki şekilde f_{0n} doğal frekansı için spektrum grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Lokal kusurun spektruma etkisi

Çok sayıda i lokal kusur olması durumunda, her n modu için;

$$x(t) = \sum_i x_i(t) = \sum_i \sum_j A_i \exp[-\alpha_n(t - jT_i)] \sin[2\pi f_{0n}(t - jT_i)U(t - jT_i)] \quad (2.5a)$$

Aynı durum için spektrum;

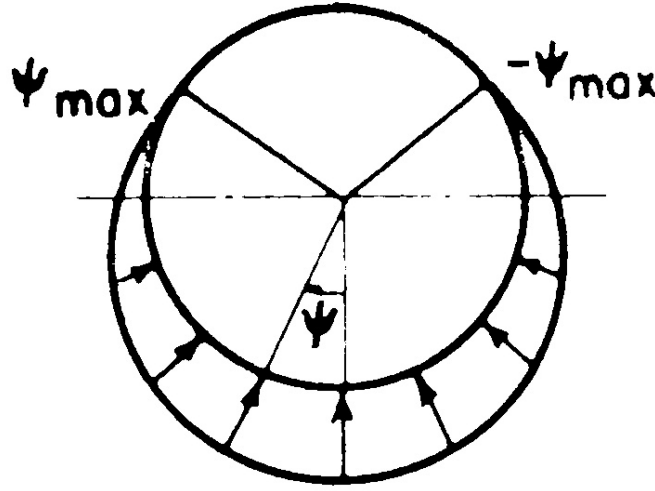
$$X(f) = 2\pi \sum_i \sum_k X_i(f) \delta(f - kf_i) \quad (2.5b)$$

Denklem (2.5) ile kusurların oluşturduğu frekansların tüm katları bulunur ve yapısal frekans cevabına bakılarak büyüklükleri belirlenir [10]. Göreceli olarak basit bir durum olan serbest haldeki rulmanda bile analitik ifadeler karmaşık gözükabilir. Fakat fiziksel tercümesi oldukça açıktır. Bu ifadeler, lokal kusurların darbe

etkisinden doğan periyodik tahrik kuvvetlerinden oluşur. Periyodik tahrik kuvvetlerin etkisi yapısal doğal frekansların civarında artış gösterir.

2.3 Yüklemenin Etkisi

Yüklemenin etkisinin de eklenmesiyle daha detaylı bir model hazırlanabilir. Lokal kusurlar tarafından yaratılan darbe etkisi, dönen eleman üzerindeki yüklemeyle orantısal olarak değişiklik gösterir.

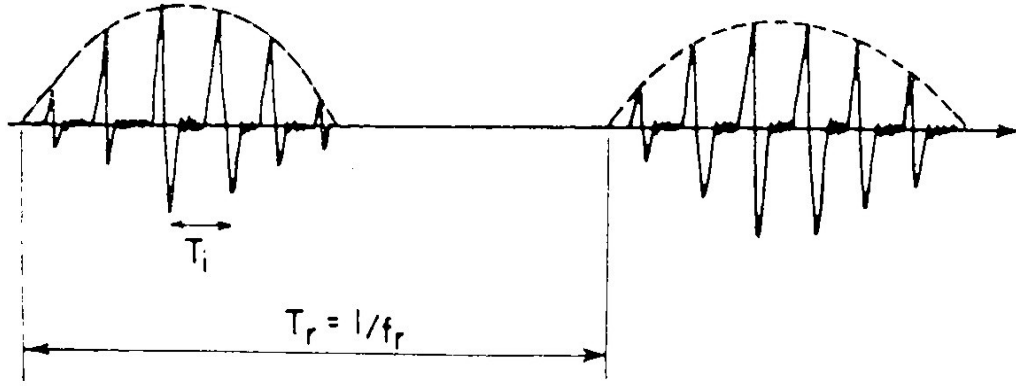


Şekil 2.3: Rulman üzerindeki yük dağılımı

Yukarıdaki şekilde gösterilen yük dağılımı denklem (2.6) ile ifade edilir;

$$Q_{\psi} = Q_{\max} \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos \psi) \right]^n \quad (2.6)$$

Burada ε yük dağılım faktörüdür ve yüklemenin bulunduğu bölgedeki bilye sayısına bağlı olarak oluşan düzensizlikler ihmal edilmiştir [11]. Denklemdaki n ise, 1 ile 1,5 arasında değerler alır ve rulmandaki dönen eleman tipine göre değişen bir faktördür. Yük dağılımı zamanın bir fonksiyonudur ve ψ parametresine bağlı olarak döner. $\psi = 2\pi * f_{ir} * t$ ile dönen iç bilezik, yükleme bölgesinde ($\psi_{\max}$) bulunduğu sürece, denklem (2.3a)'da belirtilen $x_i(t)$ ile aynı periyotlu, $Q(t)$ yükleme fonksiyonu oluşturur. Bu durum aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Yüklemeyle oluşan modülasyon etkisi

Denklem (2.3a)'daki g_i terimi tekrar düzenlendiğinde;

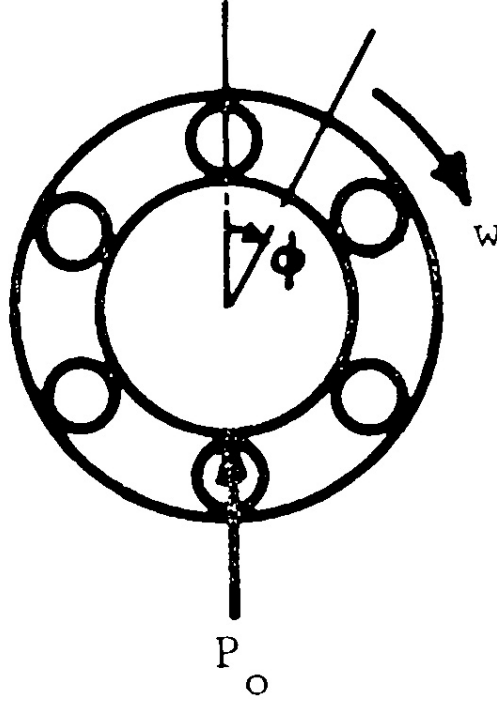
$$g'_i(t) = \begin{cases} g_i(t) Q_{\max} \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos 2\pi / T_i) \right]^n, & t/T \leq \psi_{\max} \\ 0, & t/T > \psi_{\max} \end{cases} \quad (2.7)$$

Yüklemenin etkisinden dolayı spektrum analizi daha karmaşık hale gelir. Fiziksel açıklaması basit olmakla birlikte uzun ve karmaşık ifadeler oluşur. Darbe frekanslarının çevresinde yeni yan frekanslar oluşur. Örneğin, f_i darbe frekansı ve f_{or} dış bilezik frekansı için; $n * f_i$ darbe frekansları ve $n * f_i \pm m * f_{or}$ yan frekansları söz konusudur [12].

Yan frekansların şiddeti yüke bağlıdır ve yapısal doğal frekansların civarında artış gösterir.

2.4 Dağılmış Kusurlardan Kaynaklanan Titreşimler

Lokal kusurların varlığı, genellikle rulman üzerinde oluşmuş bir hatanın ilerlediğinin işaretidir. Buna zıt olarak, dağılmış kusurlar rulmanın montaj şekline ve üretim kalitesine bağlı olarak oluşur ve çalışma ömrünü etkiler. Bilye yuvarlaklığındaki bozukluk, dönen elemanlardaki büyüklük farkları, asimetriklik v.b. kusurlar dağılmış kusur grubuna girerler.



Şekil 2.5: Rulman üzerindeki dağılmış kuvvetler

Titreşim fonksiyonunun oluşturulması için atılacak ilk adım ideal bir rulmanın modellenmesidir. Yukarıdaki şekilde ideal bir rulman modeli görülmektedir. Bileziğin üzerindeki belirli bir noktanın toplam yer değiştirmesi zamanın bir fonksiyonudur. ϕ_k açısında, K adet bilye tarafından oluşturulan P_0 temas kuvvetlerinin etkilerini doğrusal olarak üst üste koyduğumuzda;

$$\delta = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{P_0}{M_n} \right) \frac{\cos[n(2\pi f_r t - \theta_k - \phi)]}{(2\pi f_r)^2 - (2\pi f_{rn})^2} = \sum_{n=1}^{\infty} K \frac{P_0}{M_n} \frac{\cos[Kn(2\pi f_r t - \phi)]}{(2\pi f_{Kn})^2 - (2\pi f_{rnk})^2} \quad (2.8)$$

Burada M_n , mode n için efektif modal kütle, f_r ise denklem (2.1)'de hesaplanan uygun dönme frekansdır. Herbir bilye nedeniyle oluşan yer değiştirme genel koordinat sistemi kullanılarak Lagrange denklemleriyle çözülür, ve $2\pi / K$ artışları için θ_k üzerinde sadeleştirme yapılır [13]. Rasgele sayıda mode dikkate alınır. f_n , mod n için doğal frekanstır. n 'in, K 'nın katları olduğu durumlar hariç, θ_k sıfırdır. Bundan faydalanarak denklem (2.8)'in sağ tarafındaki ifadeler sadeleştirilir. Sonuç olarak denklem (2.8), rulman bileziğine yakın yerleştirilmiş bir sensörden $K * n * f$ frekansında sinyaller alınacağını gösterir.

Bilyeler bilezikler üzerinde dönerken, temas kuvvetlerinin φ boyunca dağıldığı varsayılarak, dağılmış kusurlar aşağıdaki şekilde modellenir;

$$P = P_0 \{1 + \Delta P \cos[m(2\pi f_r t - \theta_k - \beta t)]\} \quad (2.9)$$

Bu denklem birçok kusur için geçerlidir. Örneğin, $m = 1$ ve β bilezik açısal hızına eşit iken denklem (2.9) yanlış hizalanmış bilezikleri temsil eder. Benzer şekilde, m yuvarlaklıklardaki bozukluğun derecesini belirttiğinde denklem (2.9) yuvarlaklık kaçıklığını ifade eder. Denklem (2.9)'u denklem (2.8)'in içine yerleştirdiğimizde;

$$\delta = \sum_k \sum_n \frac{P_0}{M_n} \frac{1 + \Delta P \cos\{m[(2\pi f_r - \beta)t - \theta_k]\} \cos\{n[2\pi f_r t - \theta - \phi]\}}{(2\pi f_n)^2} \quad (2.10)$$

$\Delta P = 0$ olan ideal rulman için denklem (2.10), n 'in harmonik katlarıyla gittikçe azalan $n * K * f_r$ frekans bileşenlerinden oluşur [14].

2.5 Rulman Modeli için Sonuçlar

Yukarıdaki bölümlerde tipik rulman modelleri için bağıntılar çıkarılmıştır. Bu bağıntılar sonucunda farklı kusurlar için oluşan frekans bileşenleri aşağıdaki tabloda verilmiştir [15].

Tablo 2.1: Kusurların oluşturduğu sinyal bileşenleri

Kusur	Frekans
Yeni rulman	$K * f_r * n$
Bilyeler üzerinde dengesiz kuvvetler	$K * f_r * n; f_r * n$
Yanlış hizalanmış (eksenleri çakışmayan) bilezikler	$K * f_r * n; K * f_r * n \pm 2 * f_r$
Yuvarlaklığı bozulmuş (eliptik) bilezikler	$K * f_r * n; K * f_r * n \pm f_r$

Kinematik analizler muhtemel titreşim frekanslarının belirlenmesine yardım ederler. Periyodik karakteristik taşıyan dönen mekanizmalar için bu iş göreceli olarak daha kolaydır. Analizler sadece sistemin kararlı halleri için geçerlidir. Mekanizmanın hızlanması veya yavaşlaması sırasındaki titreşimler pratik hayatta hata teşhisinde kullanılsada bu çalışma koşulları için sistem karakteristiklerini yansıtan kinematik analiz yok denecek kadar azdır.

3 DENEY

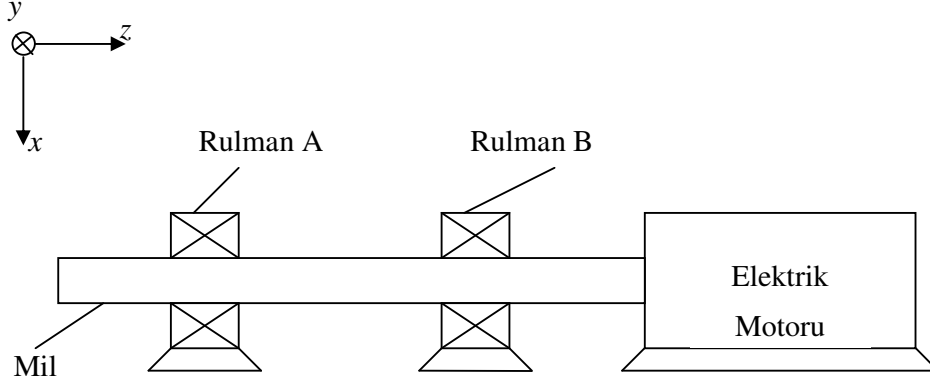
3.1 Deney D zeneg i

Deney d zeneg i bir elektrik motoru, bu elektrik motorunun ucuna bağlanmış bir mil ve bu mili iki noktadan destekleyen iki adet test rulmanından oluşmaktadır. Test rulmanlarının bağlandığı yuvalar düz deney platformuna iki adet civata ile sabitlenmiştir. Elektrik motoru da yine aynı şekilde platforma sabitlenmiştir. Parçaların platforma montajı sırasında rulman, mil ve elektrik motorunun eksenlerinin aynı hizada olmasına mümkün mertebe dikkat edilmiştir. Sensörler rulman üzerine silikonla yapıştırılmıştır. Sensörlerden gelen veriler ESAM Traveler  l  sistemi ile kayıt edilip bilgisayara aktarılmıştır. Aşağıdaki şekilde deney d zeneg inin resmi görülmektedir.



şekil 3.1: Deney d zeneg i resmi

Aşağıdaki şekilde deney d zeneg i için şematik diyagram görülmektedir. İleriki hesaplarda kullanılacak olan x , y , z yönleri ve rulman isimlendirmeleri şekilde belirtilmektedir.



Şekil 3.2: Deney düzeneği şematiği

3.1.1 Titreşim algılayıcıları

Bir çok farklı titreşim izleme uygulaması için piyasada kullanıma hazır, güvenilir ticari ivme algılayıcısı bulmak mümkündür. Çoğu imalatçı firma, algılayıcı ile birlikte iyi hazırlanmış güncel performans dökümanı ve uygulama yöntemlerini gösteren kitap sağlamaktadır.

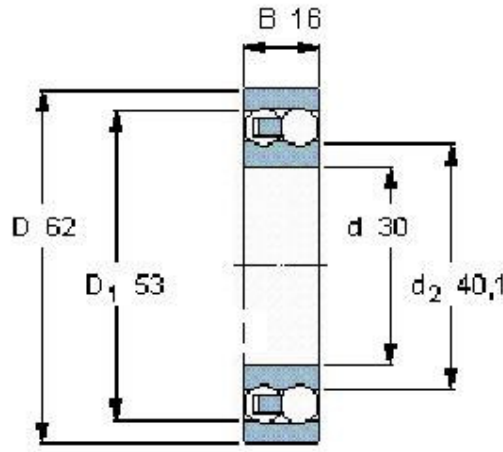
Pratik hayattaki yöntemlerin incelenmesi, kullanılacak donanımın özelliklerinin belirlenmesinde ve titreşim izleme amacıyla ivme, hız veya yer değiştirme algılayıcılarından hangisinin uygun olacağına karar verilmesinde yardımcı olur. İvme, hız veya yer değiştirme ölçümlerinden birinin bilinmesi diğer ikisinin hesaplanması için yeterlidir. Bu hesaplama için yapılacak olan türev veya integral alma işlemi elektromekanik sistemler veya bilgisayarlar tarafından gerçekleştirilebilir. Fakat hesaplamalar sırasında bir miktar hata oluşacaktır. Bu hata, üç ölçüm değerinin filtreleme özelliklerinin farklı olmasından dolayı oluşur. Yer değiştirme ölçümleri düşük, ivme ölçümleri yüksek frekansları belirginleştirir. Dolayısıyla düşük frekanslı bileşenlerin baskın olduğu titreşimlerde ve dengelemedeki bozuklukların belirlenmeye çalışıldığı uygulamalarda yer değiştirme ve hız sensörleri, yüksek frekansların incelendiği teşhis amaçlı uygulamalarda ise ivme sensörleri kullanılır.

Bir algılayıcının gerçek frekans cevabı, serbest haldekinden farklı olabilir. Bu, algılayıcının montaj şekline, yüzey özelliklerine, malzemesine, uygulanan basınca v.b. etkenlere bağlı olarak değişir. Montaj yöntemi göz önünde bulundurulduğunda, algılayıcı, yapının bir uzantısı olarak davranır ve içinden geçen sinyalleri değiştirir.

Titreşim sinyallerinin algılanması için 2 adet 3 eksenli piezoelektrik ivme sensörleri kullanılmıştır. İvme ölçümleri ESAM Traveler ölçü sistemi ile kayıt edilip bilgisayara aktarılmıştır.

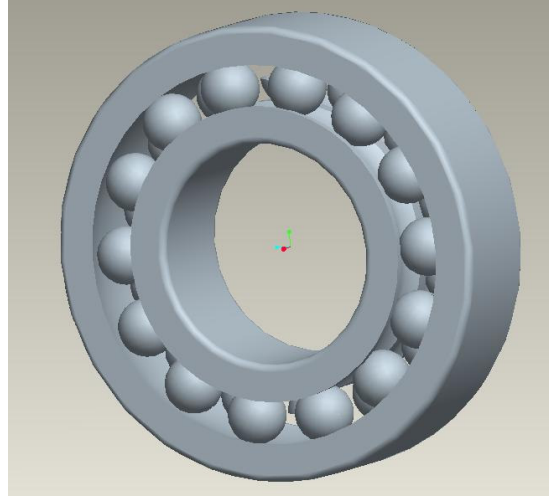
3.1.2 Rulmanlar

Deney sırasında SKF 1206, çift sıralı bilyeli test rulmanları kullanılmıştır. SKF 1206 rulmanda, her sırada 14 adet olmak üzere toplam 28 adet bilye bulunmaktadır. İç çap 30 mm, dış çap 62 mm'dir. Aşağıdaki şekilde rulmana ait diğer ölçüler görülmektedir.

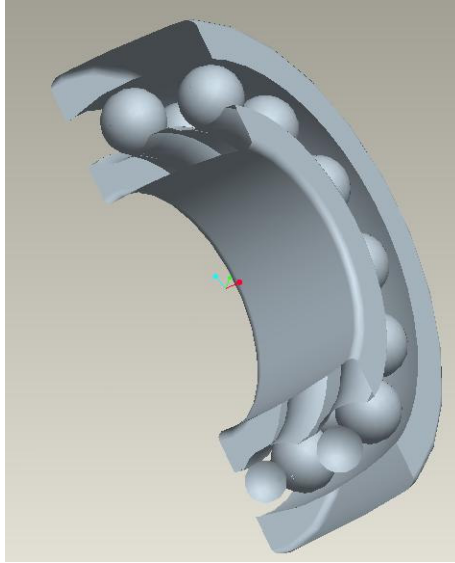


Şekil 3.3: SKF 1206 rulman ölçüleri

Rulmanın yorulma limit yükü 240 N'dur. Limit hız 15000 devir/dakika, ağırlığı ise 0,24 kg'dır. Aşağıdaki şekillerde rulmanın perspektif ve kesit görünüşleri verilmektedir.



Şekil 3.4: Rulman perspektif görünüş



Şekil 3.5: Rulman kesit görünüş

SKF 1206 rulmanın iç ve dış bileziklerinin doğrultuları belirli bir açı değerine kadar birbirlerine göre döndürülebilmektedir. Bu sayede deneyler için gerekli olan hasar, bilyelere ve dış bileziğin iç yüzeyine rahatlıkla ulaşıp istendiğinde yaratılabilmektedir.

3.2 Deney Parametrelerinin Seçilmesi

Bölüm 2’de hazırlanan rulman modelinde, bilyeler üzerinde dengesiz kuvvetler olması durumunda (deneyin ileriki aşamalarında, rulman üzerinde oluşturulacak olan kusurlar bu gruba girmektedir), titreşimlerin $K * f_r * n$ frekanslarında oluşacağı hesaplanmıştır. Burada f_r , deneyde kullanılan elektrik motorunun, dolayısıyla milin

ve rulmanların iç bileziğinin dönme frekansdır. Deney sırasında, mevcut elektrik motoru için nominal değer olan 920 devir/dakika, dönüş hızı olarak seçilmiştir. Bu değer aynı zamanda SKF 1206 rulmanlarının, çalıştırılması tavsiye edilen limit hızları içindedir. Buradan hesaplandığında; $f_r = 15,33$ Hz olarak bulunur.

SKF 1206 rulmanlarda, her sırada 14 adet olmak üzere toplam 28 adet bilye vardır. K değeri olarak her bir sırada bulunan bilye sayısı, $K = 14$ alınır. Yukarıdaki denklemde yerine konduğunda; $K * f_r = 214,67$ olur. n değerinin 1, 2 ve 3 olduğu ilk üç kat dikkate alındığında, incelenecek frekansların 214,67 Hz, 429,33 Hz ve 644,00 Hz olduğu belirlenmiş olur. Dolayısıyla deney sırasında 700 Hz'e kadar olan frekanslar incelenecektir. Bu nedenle örnekleme frekansı, Nyquist frekans teoremi göz önünde tutularak 1500 Hz olarak seçilmiştir.

Karar verilmesi gereken diğer bir deney parametresi ise alınacak olan verilerin uzunluğudur. Verilerin uzunluğu (kaç saniye süreyle veri alınacağı), daha sonradan yapılacak olan spektrum analizi için önemlidir. Veri süresi uzadıkça, spektrum grafiğinin frekans eksenindeki hassasiyet artar. Örneğin iki saniye süreyle alınan veri kullanılarak, $1 / 2 = 0,5$ Hz frekansdaki bir titreşim sinyali yakalanabilir. Deneyde, gerektiğinde yüksek hassasiyette frekans analizi yapabilmek, gerektiğinde ise tek bir deney datasını parçalara bölüp bulunan sonuçların karşılaştırmalı kontrolünü yapabilmek için veri toplama süresi 12 saniye olarak belirlenmiştir.

3.3 Deney Prosedürü

Şekil 3.1'de görülen deney düzeneğine öncelikle iki adet eski (kullanılmış) SKF 1206 rulman takılmıştır. Motor devri 920 devir/dakika'ya getirilmiştir. Her iki rulmandan da ivme sensörleriyle x , y ve z yönlerinde 12 saniye süreyle, 1500 Hz örnekleme frekansında ivmeler 3 eksenli olarak kaydedilmiştir (test no:1). Birinci aşama bu şekilde tamamlanmıştır.

İkinci aşamada, elektrik motorundan uzakta olan A rulmanı sökülmüş ve yerine yeni, hasarsız rulman takılmıştır. Yukarıda belirtilen ölçümler aynı şekilde yeni rulman için tekrarlanmıştır (test no:2).

Deneyin üçüncü ve dördüncü aşamalarında da aynı ölçümler sırasıyla bir bilyesi çekiçle vurularak hasar verilmiş yeni rulman için (test no:3) ve dış bileziğinin iç yüzeyi çekiçle vurularak hasar verilmiş yeni rulman için (test no:4) tekrarlanmıştır.

Elektrik motoruna yakın tarafta bulunan B rulmanı tüm testler boyunca değiştirilmemiştir. Sistemdeki ivme kazancı 10'dur. Diğer bir deyişle, ölçülen ivme değerleri sinyallerin daha fazla belirginleştirilmesi için yazılım kullanılarak 10 ile çarpılmıştır.

4 ANALİZ VE SONUÇLAR

4.1 Analiz ve Veri İndirgeme Metotları

4.1.1 Toplam titreşim seviyesi

Bu tür ölçümler genellikle mekanizmanın durumu hakkında bilgi verirler. Titreşimlerin şiddeti, belirli endüstrilerde kullanılan tipik makinalar için hazırlanmış kılavuz dökümanlar, ISO standartları ve ulusal standart enstitüleri tarafından ilan edilmiş limitler yardımıyla değerlendirilir. Bir çok titreşim izleme teçhizatı üreticisinde detaylı listeler mevcuttur.

Tablo 4.1: Titreşim şiddeti değerlendirme tablosu

Maksimum hız (mm/s)	Sınıf	Açıklama
> 12,7	AA	Tehlikeli; sistem durdurulmalı
7,6 – 12,7	A	Çok şiddetli; en kısa sürede düzeltilmeli; sık sık kontrol edilmeli
5,1 – 7,6	B	Şiddetli; en kısa sürede düzeltilmeli
2,5 – 5,1	C	Orta; düzeltme gereksiz
< 2,5	D	Sarsıntısız; denge ve hizalama sorunsuz

Yukarıda örnek bir titreşim şiddeti değerlendirme tablosu görülmektedir [16]. Daha detaylı tablolar farklı makina tiplerine, çalışma hızlarına, ağırlığa, mesnet tiplerine (esnek veya rijit) v.b. özelliklere göre hazırlanmış limit değerleri de içermektedir. Bu kılavuz dökümanlar genellikle, dengeleme bozuklukları hariç, özel bir kusurun sınıflandırılmasında yardımcı olmazlar. Dolayısıyla, kalite kontrol uygulamaları gibi birçok problem teşhis uygulamasında belirli bir tür hataya özgü kriterleri, limitleri içeren farklı dökümanlara ihtiyaç vardır.

4.1.2 Frekans ekseninde analiz

En sık kullanılan analiz metodudur. Bir çok izleme yöntemi, frekans ekseninde analiz ile sınıflandırma yapar. Piyasada, titreşim sinyali için tasarlanmış çok sayıda

spektrum analizörü bulunmaktadır. Frekans eksenini analiziyle, dengelemedeki bozukluklar, yanlış hizalama v.b. kusurlardan oluşan sürekli harmonik sinyallerin belirlenmesi oldukça kolaydır [17].

Hata teşhis uygulamalarında genellikle dar bant analizleri gereklidir. Bu amaçla, bir frekans bölgesinde yoğunlaşılır ve yüksek çözünürlüklü analiz yapılır. Aşınmalardan oluşan titreşimlerin belirlenmesi ise geniş bant analizleri ile gerçekleştirilir.

4.1.3 Zaman ekseninde analiz

Zaman ekseninde analizin en önemli avantajı, sistemdeki belirli kinematik olaylarla alınan sinyaller arasında ilişki kurulmasına olanak vermesidir. Bu zamanlama ilişkisi çoğu kez frekans eksenindeki incelemelerde ortaya çıkmaz. Belirli zaman aralıkları alınarak yapılan analizler, frekans ekseninde çakışan ama zaman ekseninde çakışmayan sinyal bileşenlerinin ayrı ayrı incelenebilmesini sağlar [18].

4.2 Deney Verilerinin Matlab Ortamına Atılması

Deney verilerinin analizi Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, öncelikle veriler, Matlab ortamına birer Matlab değişkeni olarak aktarılmıştır. Deney verilerinin Matlab ortamına düzenli bir şekilde aktarılması için “ReadData.m” dosyası oluşturulmuştur. “ReadData.m” dosyasının içeriği Ek B’de verilmiştir.

Elektrik motorundan uzakta bulunan A rulmanının üzerindeki sensörden okunan x , y , z yönlerindeki ivme değerleri Ax_01 , Ay_01 , Az_01 değişkenlerine, elektrik motoruna yakın olan B rulmanının üzerindeki sensörden okunan x , y , z yönlerindeki ivme değerleri ise Bx_01 , By_01 , Bz_01 değişkenlerine sütun vektör şeklinde atanmıştır. Bu değişkenlerin sonunda bulunan $_01$ indisi test numarasını göstermektedir. Bölüm 3.3’deki Deney Prosedürü kısmında yapılan testlerin açıklamaları, isimleri ve numaraları belirtilmiştir. “ReadData.m” fonksiyonunun *filename* değişkenine sırasıyla, teker teker tüm veri dosyaları girilir ve her giriş için “ReadData.m” fonksiyonu çağırılır. Fonksiyon çağırılmadan önce yukarıda belirtilen değişkenlerin indisleri, girilen veri dosyasının ait olduğu teste göre tekrar numaralandırılır. Böylelikle tüm testler için, A ve B rulmanına ait x , y , z yönlerindeki ivme değerleri uygun değişkenlere atanmış olur (Ax_01 , Ay_01 , Az_01 , Bx_01 , By_01 , Bz_01 , Ax_02 , Ay_02 , Az_02 , Bx_02 , By_02 , Bz_02 , Ax_03 , Ay_03 , Az_03 , Bx_03 , By_03 , Bz_03 , Ax_04 , Ay_04 , Az_04 , Bx_04 , By_04 , Bz_04). Benzer şekilde

t_real_01 , t_real_02 , t_real_03 , t_real_04 değişkenlerine ölçüm zamanı atanır ve buradan testin başlangıç anını sıfır kabul eden t_01 , t_02 , t_03 , t_04 zaman değişkenleri hesaplanır.

sample_no fonksiyon parametresi, veri dosyasından, her bir değişkene ait kaç adet veri okunacağını belirtir. 12 saniye süreyle 1500 Hz’de kaydedilmiş veri okunacağı için *sample_no* değeri $12 * 1500 = 18000$ ’dir. *column_no* fonksiyon parametresi ise her bir veri dosyasının içinden kaç farklı Matlab değişkeni çekileceğini ifade eder. Değişkenlerin değerleri, veri dosyasının içinde sütunlar halinde bulunur.

Her veri dosyasının içinden A rulmanına ait x , y , z yönlerindeki ivme değerleri, B rulmanına ait x , y , z yönlerindeki ivme değerleri ve zaman olmak üzere yedi Matlab değişkeni çekilir.

“ReadData.m” fonksiyonundaki;

% Show file info. Move position indicator until reaching datas row.

while 1

 tline = fgetl(fid);

 if ~isletter(tline), break, end

 disp(tline)

end

komut grubu, veri dosyasındaki başlık satırlarını ekrana yazdırmak ve değişkenlere atanacak değerlerin bulunduğu veri satırlarına ulaşmak için hazırlanmıştır [19].

4.3 Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerleri

Analiz aşamasına, A ve B rulmanına ait x , y , z yönlerindeki ivmelerin maksimum ve ortalama değerlerinin her test (test no: 1, 2, 3, 4) için incelenmesiyle başlanmıştır. Bölüm 3.3’deki Deney Prosedürü kısmında yapılan testlerin numaraları ve açıklamaları belirtilmiştir. Verilerin maksimum ve ortalama değerlerinin bulunması için “analyse_max_mean.m” Matlab dosyası oluşturulmuştur. “analyse_max_mean.m” dosyasının içeriği Ek C’de verilmiştir.

Sonuçta bulunan maksimum ve ortalama değerler aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.2: Deney verilerinin maksimum değerleri (mm/s²)

	Test no: 1	Test no: 2	Test no: 3	Test no: 4
Ax	44.06	14.91	29.56	104.5
Ay	33.791	18.434	23.611	60.725
Az	41.546	15.604	27.595	33.846
Bx	22.636	25.742	46.123	52.173
By	22.46	16.408	13.507	15.309
Bz	30.777	23.489	35.151	34.688

Tablo 4.3: Deney verilerinin ortalama değerleri (mm/s²)

	Test no: 1	Test no: 2	Test no: 3	Test no: 4
Ax	2.9123	1.6331	1.7962	7.365
Ay	3.3099	2.1686	2.439	3.8434
Az	4.5474	3.0731	3.0463	4.4056
Bx	2.2073	2.4011	2.4961	3.4631
By	2.6285	2.2587	2.3407	2.5736
Bz	5.0764	4.7238	5.0151	5.2751

Yukarıdaki tablolarda, her test (test no: 1, 2, 3, 4) için A ve B rulmanına ait x, y, z yönlerindeki titreşim verilerinin en basit karşılaştırması yapılmıştır. Böylelikle veriler hakkında kabaca bir fikir sahibi olunur. Konu ile ilgili yorumlar bölüm 5.1’de Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerlerinin Yorumlanması kısmında belirtilmiştir.

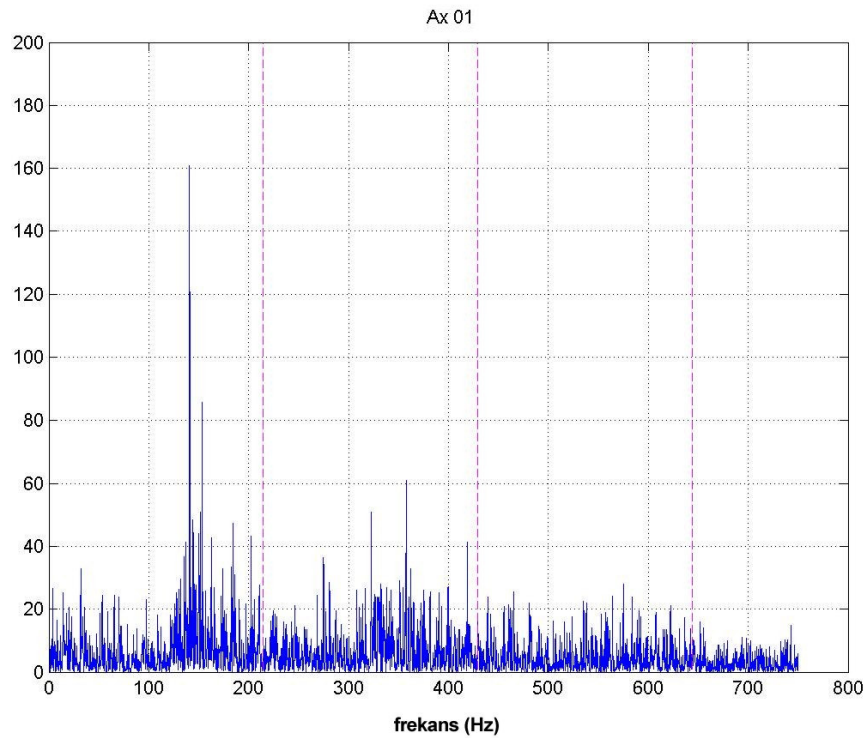
4.4 Spektrum Analizi

Test verilerinin frekans ekseninde incelenmesi için spektrum analizi yapılmıştır. Algılayıcılardan alınan titreşim sinyalleri, frekans bileşenlerine ayrılarak değerlendirilmiştir. Bölüm 3.2’de Deney Parametrelerinin Seçilmesi kısmında rulmanlara ait kritik frekanslar 214,67 Hz, 429,33 Hz ve 644,00 Hz olarak hesaplanmıştır. Spektrum analiziyle kritik frekanslardaki bileşenler bulunmuştur ve genliklerine bakılarak sistem hakkında yorumlar yapılmıştır (5. Bölüm - Tartışma).

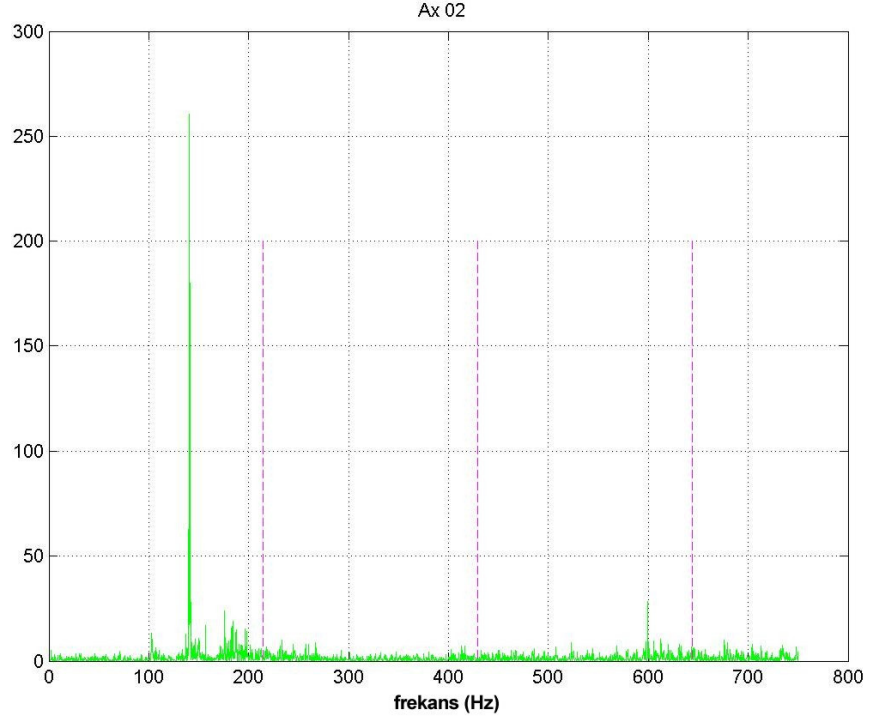
Deney aşamasında gerçekleştirilen her bir test (test no: 1, 2, 3, 4) için, A rulmanlarının x ve y yönlerindeki titreşimlerinin spektrum analizleri yapılmıştır. Bölüm 3.3’deki Deney Prosedürü kısmında yapılan testlerin numaraları ve açıklamaları belirtilmiştir. Mil eksen z yönünde olduğundan, bu eksen üzerinde spektrum analizi yapılmamıştır. B rulmanı, tüm testler boyunca değiştirilmediğinden dikkate alınmamıştır.

Matlab ortamında spektrum analizlerinin gerçekleştirilmesi için “Analyse_fft.m” dosyası hazırlanmıştır. “Analyse_fft.m” dosyasının içeriği Ek D’de verilmiştir.

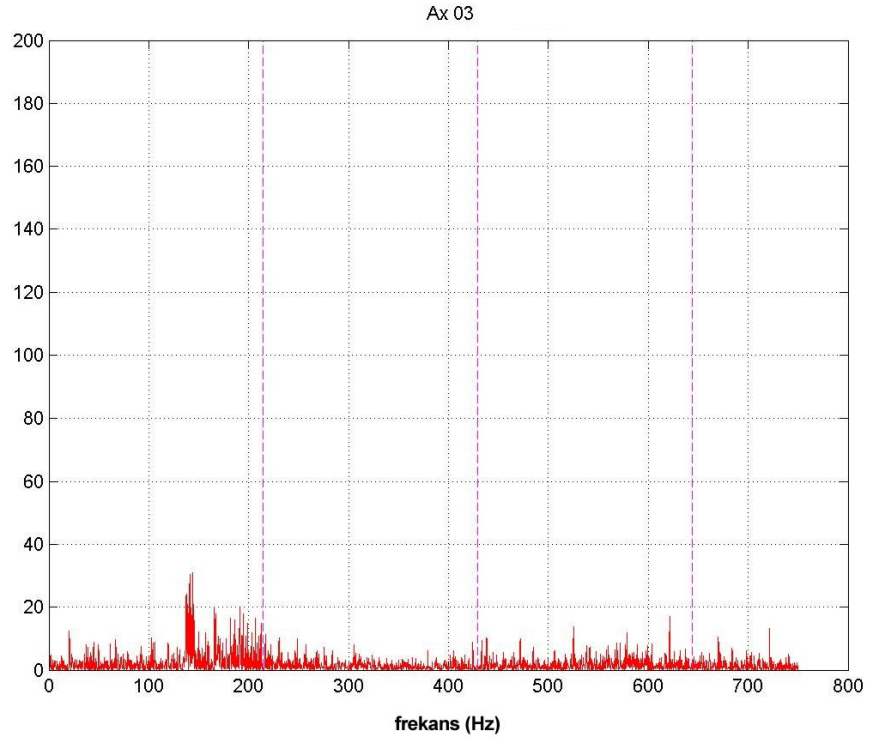
“Analyse_fft.m” komut dosyası ile hesaplanan, x yönündeki deney verilerinin ilk dört saniyelik bölümünün spektrum grafikleri aşağıda verilmiştir.



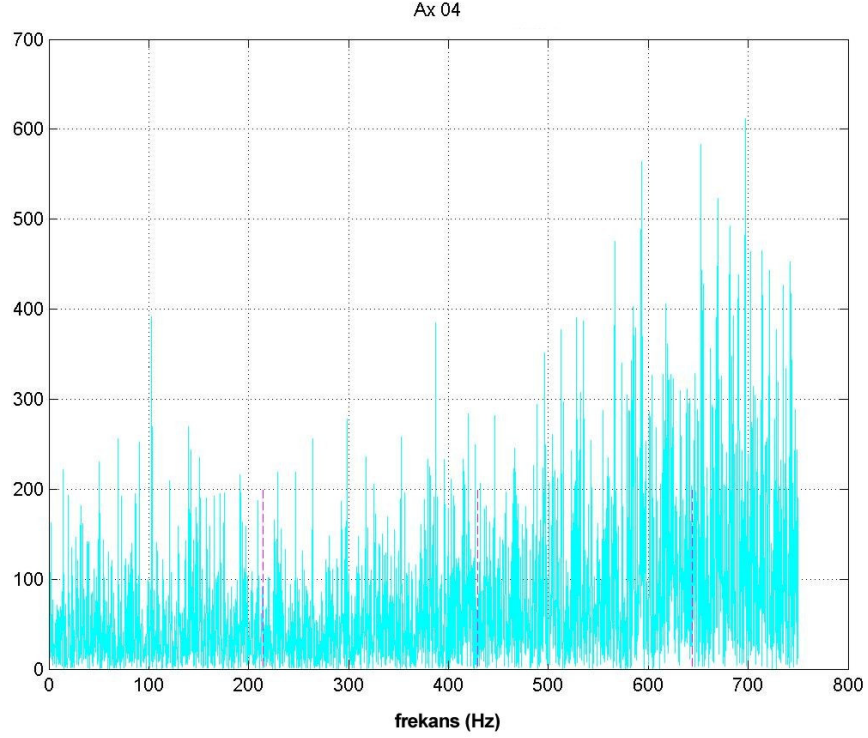
Şekil 4.1: Test no. 01’e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil 4.2: Test no. 02'ye ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



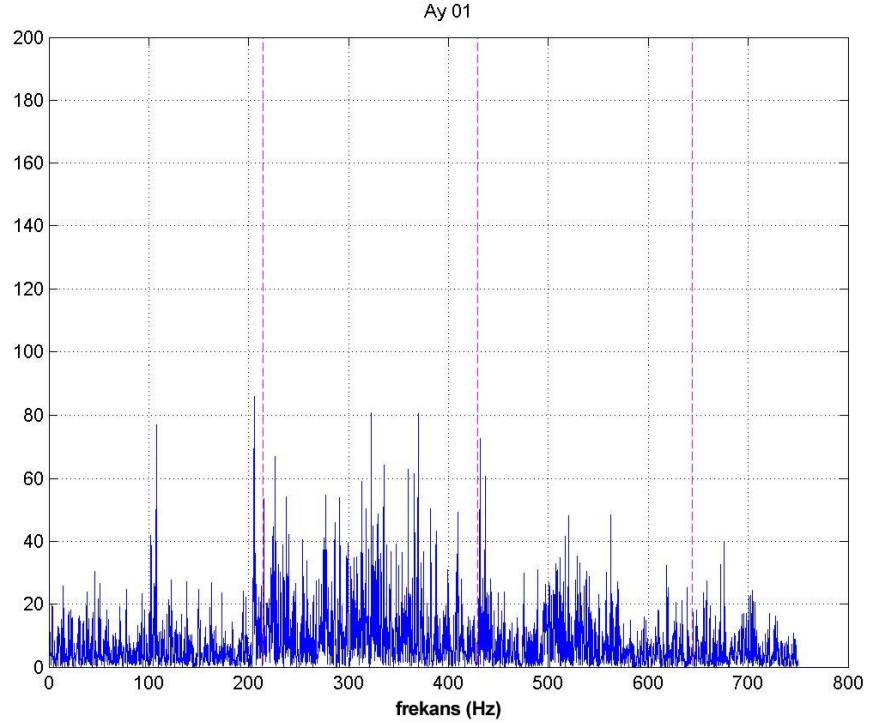
Şekil 4.3: Test no. 03'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



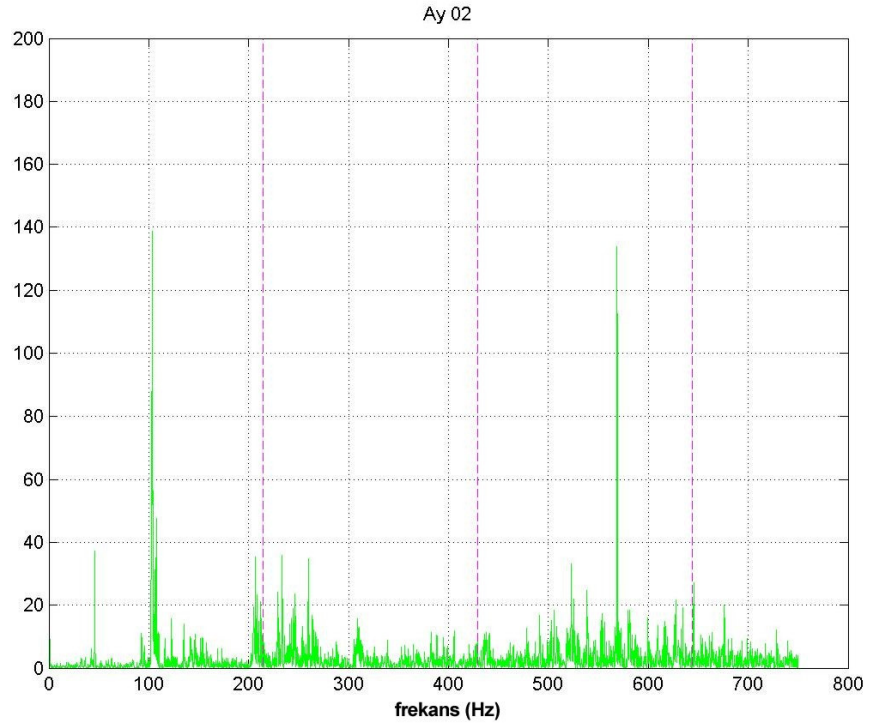
Şekil 4.4: Test no. 04'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği

Deney verilerine, spektrum analizi uygulanmadan önce, Hanning (Hann) çerçeveleme (windowing) uygulanmıştır. Hanning, titreşim verileri için en sık kullanılan çerçeveleme yöntemidir. Bunun kullanılmasındaki amaç, titreşim kayıtlarının rasgele bir anda başlamasından ve bitmesinden dolayı, sinyallerin bileşimini oluşturan, yarım kalmış, periyodunu tamamlayamamış frekansların spektrum analizi üzerindeki bozucu etkisini azaltmaktır. Bu nedenle, veri gruplarının başlangıcındaki ve sonundaki değerler, ortasındaki değerlere göre daha küçük bir katsayı ile çarpılmıştır. Hanning katsayıları, $(1 - \cos(\pi * k / (n - 1)))$; $k = 0, 1, \dots, n - 1$; denkleminde hesaplanır. Burada n veri grubundaki eleman sayısıdır.

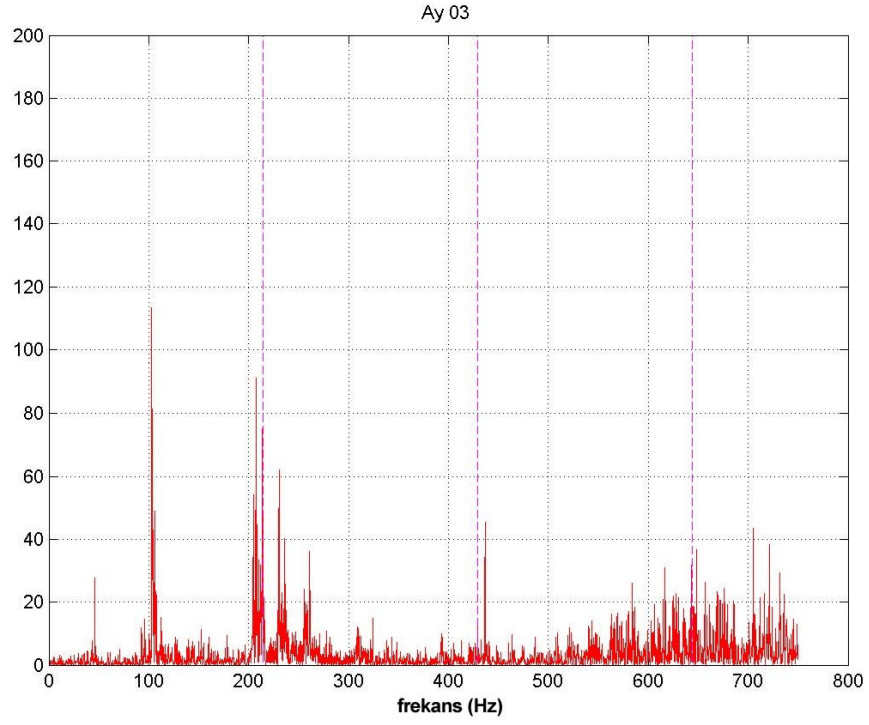
Aşağıdaki şekillerde, y yönündeki deney verilerinin ilk dört saniyelik bölümüne ait spektrum grafikleri görülmektedir. Kritik frekanslar, morumsu kırmızı (magenta) renkli kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



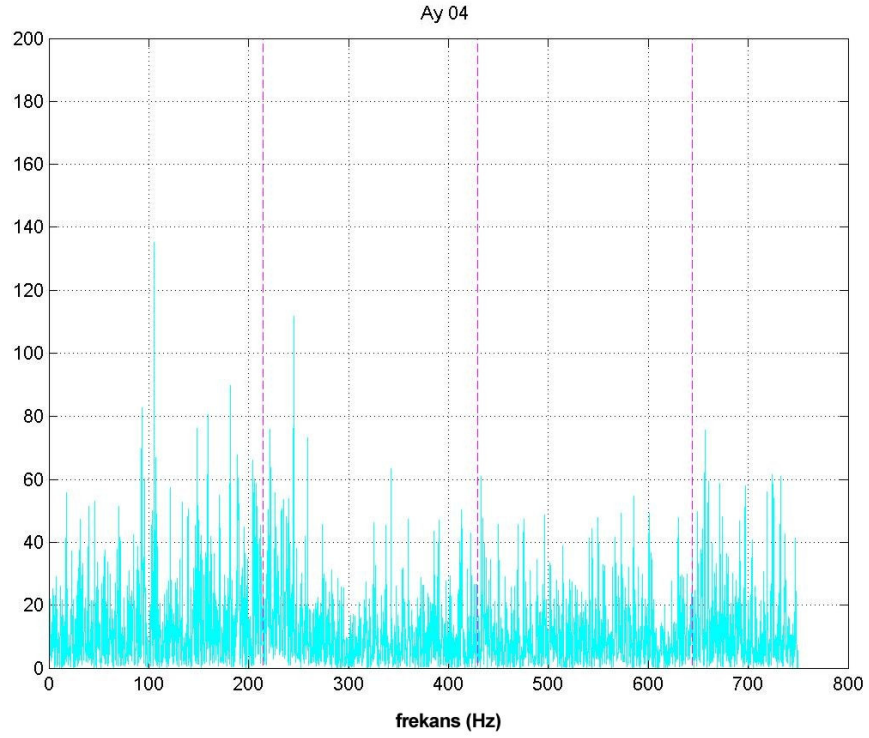
Şekil 4.5: Test no. 01'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil 4.6: Test no. 02'ye ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil 4.7: Test no. 03'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil 4.8: Test no. 04'e ait ilk dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği

Yukarıda verilen spektrum grafiklerinin tutarlılığını kontrol etmek amacıyla, deney verilerinin ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik bölümleri için “Analyse_fft.m” komut dosyası yeniden düzenlenerek spektrum grafikleri çizdirilmiştir. Tüm bu spektrum grafiklerinin ilk dört saniyelik spektrum grafikleriyle örtüştüğü, benzer karakteristikte olduğu görülmüştür.

Deney verilerinin ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik bölümleri için spektrum grafikleri Ek A’da verilmiştir.

4.5 Verileri Karşılaştırma ve Değerlendirme

Bölüm 4.4’deki Spektrum Analizi kısmında, aranan karakteristikteki (bölüm 2’deki Rulman İçin Titreşim Modeli kısmında hesaplanan özellikleri gösteren) spektrum grafiklerinin, A rulmanının y yönündeki titreşimlerinde belirginleştiği görülmüştür. Bu nedenle, sonraki aşamalarda gerçekleştirilmiş olan, her bir teste (test no: 1, 2, 3, 4 için) ait verilerin karşılaştırılması ve değerlendirilmesi işlemlerinde A rulmanının y yönündeki titreşimleri dikkate alınmıştır.

A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiklerinin integralleri her bir test (test no: 1, 2, 3, 4) için hesaplanmış ve değerler karşılaştırılmıştır. Burada amaçlanan, testlerde kullanılan farklı rulmanlar için genel titreşim seviyeleri hakkında fikir sahibi olmaktır. Rulmanlar yıpranmışlıktan ve/veya kusurlardan dolayı daha sarsıntılı çalışmaktadırlar. Titreşimleri oluşturan frekans bileşenlerinin genliği büyür. Spektrum grafiğinin integral değeri de bu nedenle artar.

Gerçekleştirilen bir diğer işlem de, bölüm 3.2’deki Deney Parametrelerinin Seçilmesi kısmında, 214,67 Hz, 429,33 Hz, 644,00 Hz olarak hesaplanan rulmanlara ait kritik frekanslarda, spektrum grafikleri üzerinde tepe noktasının bulunup bulunmadığının ve varsa değerinin belirlenmesidir. Bölüm 2’deki Rulman İçin Titreşim Modeli kısmında anlatıldığı üzere, rulman üzerindeki farklı kusurlar, farklı frekanslarda titreşimlerin oluşmasına neden olurlar. Spektrum grafiği üzerinden bu frekanslardaki genlikler bulunup, tepe noktası olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Her bir test (test no: 1, 2, 3, 4) için, spektrum grafiğinin integralinin hesaplanması, kritik frekanslarda tepe noktasının bulunup bulunmadığının belirlenmesi ve tepe noktası var ise değerinin görüntülenmesi amacıyla “Analyse_comp.m” Matlab dosyası hazırlanmıştır. “Analyse_comp.m” dosyasının içeriği Ek E’de verilmiştir.

ball_no parametresi rulmanın bir sırasındaki bilye adedidir (*ball_no* = 14). *rotational_fre* parametresi elektrik motorunun dönme frekansıdır (*rotational_fre* = 920 / 60). “Analyse_comp.m” Matlab komut dizisi ile, rulmanlar için belirlenen kritik frekansların 2 Hz üstünde veya altında tepe noktası olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu amaçla, her bir teste ait veriler için bir eşik değeri belirlenmiştir. Eşik değeri, veri grubu ortalama değerine, veri grubunun standart sapmasının üç katının eklenmesiyle bulunmuştur ($peak = mean + 3 \times sigma$; *sigma* değişkeni standart sapmadır). Kritik frekansların 2 Hz altında veya üstünde eşik değeri aşan frekans bileşeni olması durumunda frekansın değeri ve büyüklüğü ekrana yazdırılmıştır. Tüm bu işlemler kontrol amaçlı olarak testlerin (test no: 1, 2, 3, 4 için) ilk dört saniyelik, ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik bölümleri için tekrarlanmıştır. Sonuçlar aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.4: A rulmanının y yönündeki titreşimleri için spektrum grafiklerinin integralleri

	Test no: 1	Test no: 2	Test no: 3	Test no: 4
İlk dört saniyelik bölüm	4.8335e+004	1.8489e+004	2.2011e+004	7.0768e+004
İkinci dört saniyelik bölüm	5.5320e+004	1.6531e+004	2.0525e+004	7.7928e+004
Üçüncü dört saniyelik bölüm	5.5320e+004	1.6994e+004	2.2439e+004	6.4258e+004
İlk sekiz saniyelik bölüm	4.2828e+004	1.8224e+004	2.0999e+004	7.3445e+004

Tablo 4.5: A rulmanının y yönündeki titreşimleri için spektrum grafiklerinin kritik frekanslardaki tepe noktaları

	Test no: 1 (frekans – Hz) (genlik)		Test no: 2 (frekans – Hz) (genlik)		Test no: 3 (frekans – Hz) (genlik)		Test no: 4 (frekans – Hz) (genlik)	
İlk dört saniyelik bölüm	n = 1	215 Hz 53.71	n = 1	- -	n = 1	214 Hz 75.07	n = 1	- -
	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -
	n = 3	- -	n = 3	645 Hz 27.22	n = 3	643 Hz 31.71	n = 3	- -
İkinci dört saniyelik bölüm	n = 1	214 Hz 114.32	n = 1	- -	n = 1	213 Hz 25.49	n = 1	- -
	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -
	n = 3	- -	n = 3	- -	n = 3	645 Hz 25.45	n = 3	- -
Üçüncü dört saniyelik bölüm	n = 1	214 Hz 114.31	n = 1	- -	n = 1	214 Hz 71.79	n = 1	- -
	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -
	n = 3	- -	n = 3	645 Hz 22.38	n = 3	- -	n = 3	645 Hz 47.87
İlk sekiz saniyelik bölüm	n = 1	215 Hz 81.43	n = 1	- -	n = 1	214 Hz 43.70	n = 1	214 Hz 95.16
	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -	n = 2	- -
	n = 3	- -	n = 3	645 Hz 31.68	n = 3	645 Hz 51.75	n = 3	644 Hz 73.76

5 TARTIŞMA

5.1 Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerlerinin Yorumlanması

Tablo 4.2 ve tablo 4.3’de görüldüğü üzere, yeni rulmanın kullanıldığı 2 nolu testte A rulmanından x , y , z yönlerinde alınan sinyallerin hem maksimum hem de ortalama değerleri, diğer testlerdekinden belirgin şekilde daha düşüktür. Bu durum, yeni rulmanda, titreşim sinyallerinin seviyesinin en düşük olduğunu gösterir.

Bir bilyesine hasar verilen yeni rulmanın kullanıldığı 3 nolu testte A rulmanından alınan sinyallerin maksimum ve ortalama değerlerinde artış görülmüştür. Özellikle x ve y eksenlerinde bu durum belirgindir. Bilye üzerinde oluşturulan hasar, rulmanın titreşim değerlerinde artışa neden olmuştur.

Eski rulmanın kullanıldığı 1 nolu testte A rulmanından alınan sinyallerin maksimum ve ortalama değerleri, 3 nolu testteki değerlerin de üzerindedir. Eski rulmanda daha fazla sayıda kusur bulunduğundan, titreşimler, test 3’deki değerlerin üzerine çıkmıştır.

Dış bileziğine hasar verilen yeni rulmanın kullanıldığı 4 nolu testte A rulmanından alınan sinyallerin x ve y yönlerindeki maksimum ve ortalama değerleri, 1 nolu testteki değerlerin üzerindedir. Dış bileziğin iç yüzeyinde yaratılan hasar, üzerinden her bilye geçtiğinde titreşime neden olduğu için (testte kullanılan rulmanlarda 28 adet bilye bulunmaktadır) daha güçlü sinyallerinin oluşmasını sağlar.

Yukarıda belirtilen durumlar zaman zaman B rulmanından alınan sinyallerde de görülsede, B rulmanı, A rulmanı üzerinde yapılan değişimlere uzak kaldığı için, genellikle etkiler çok daha zayıftır. Hatta bazen yukarıdaki belirtilenlerin tersi durumlar görülür.

5.2 Spektrum Analizlerinin Yorumu

Yeni rulmanın kullanıldığı 2 nolu testte A rulmanından x ve y yönlerinde alınan sinyallerin spektrum grafikleri şekil 4.2 ve şekil 4.6’da görülmektedir. Buradaki

frekansların genlikleri, diğer testlere ait spektrum grafiklerindeki frekansların genliklerinden daha düşüktür. Benzer durum, bölüm 5.1'deki Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerlerinin Yorumlanması kısmında da belirlenmiştir. Yeni rulmanın oluşturduğu titreşimler diğer rulmanlarınkine göre belirgin şekilde daha düşüktür. Yeni rulman daha titreşimsiz çalışmaktadır. Kritik frekanslar üzerinde tepe noktası görülmemektedir.

Bir bilyesine hasar verilmiş yeni rulmandan alınan (test no: 3) y yönündeki sinyallerin spektrum grafiği şekil 4.7'de verilmiştir. Bilye hasarından dolayı, kritik frekanslardaki genliklerin arttığı ve tepe noktalarının olduğu belirlenmiştir. Bölüm 2'deki Rulman İçin Titreşim Modeli kısmında anlatıldığı üzere kritik frekanslardaki genlik artışı beklenmektedir. x yönündeki sinyallerin spektrum grafiğinde ise çok az bir artış görülmüştür (şekil 4.3). Bunun sebebi, x ekseninin, rulmanın sabitlendiği platforma dik olması ve rulmanın montaj şekli nedeniyle titreşimlerin sönümlenmesidir. Dolayısıyla bölüm 4.5'deki Verileri Karşılaştırma ve Değerlendirme kısmında, kusurlara ait spektrum karakteristiğini daha iyi yansıttığı için y yönündeki sinyaller dikkate alınmıştır.

Eski rulmanın kullanıldığı 1 nolu testte A rulmanından y yönünde alınan sinyallerin spektrum grafiği şekil 4.5'de verilmiştir. Eski rulman üzerinde, kullanımdan dolayı zamanla çok sayıda kusur oluşması sebebiyle, hem kritik hem de diğer bir çok frekansta genliklerin arttığı ve tepe noktalarının olduğu görülmüştür. Kusurların etkileşimi sonucu karmaşık sinyal yapıları olduğundan, spektrum grafiği üzerindeki tüm tepe noktalarının tek tek anlamlandırılması mümkün değildir. Benzer durum x yönünde alınan sinyallerin spektrum grafiğinde de mevcuttur (şekil 4.1).

Şekil 4.4 ve şekil 4.8'de, dış bileziğine hasar verilen yeni rulmana ait (test no: 4) x ve y yönündeki sinyallerin spektrum grafiği görülmektedir. Test rulmanlarında her bir sırada 14 adet olmak üzere toplam 28 adet bilye bulunmaktadır. Dış bileziğin iç yüzeyinde oluşturulacak bir kusur, bilye her üzerinden geçtiğinde darbe etkisi yaratmaktadır. Dolayısıyla 28 adet bilyenin kusurlu bölgeye her değişinde titreşim oluşmaktadır. Bu nedenle, karmaşık bir sinyal yapısı mevcuttur. 4 nolu teste ait spektrum grafiklerinde çok sayıda frekansta tepe noktası görülmektedir ve bunların tek tek yorumlanması mümkün değildir. Frekans genlikleri tüm diğer testlere göre oldukça yüksektir.

Spektrum grafiklerinde dikkat çeken bir diğer özellik ise, y yönünde alınan sinyallerde 105 Hz, x yönünde alınan sinyallerde 140 Hz civarında tepe noktası bulunmasıdır. Bu frekanslardaki yüksek genlikli sinyalin, milin doğal frekansından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sistemin yapısal özelliklerinden dolayı x ve y yönlerinde bir miktar frekans sapmasıyla oluşmuşlardır.

5.3 Sonuçlar

Tablo 4.4’de görüldüğü üzere, hem ilk dört saniyelik verilere hem de kontrol amacıyla değerlendirilen diğer (ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik) verilere ait spektrum grafiklerinin integrallerindeki en düşük değer, yeni rulmanın kullanıldığı 2 nolu testte belirlenmiştir. Bunu sırasıyla bir bilyesine hasar verilen rulmanın kullanıldığı 3 nolu test, eski rulmanın kullanıldığı 1 nolu test ve dış bileziğine hasar verilen rulmanın kullanıldığı 4 nolu test takip etmiştir. Bu durum bölüm 5.1’deki Verilerin Maksimum ve Ortalama Değerlerinin Yorumlanması ve bölüm 5.2’deki Spektrum Analizlerinin Yorumu kısımlarında yapılan değerlendirmelerle de örtüşmektedir. 3 nolu testin (2 nolu teste göre) integral değerlerindeki artış (yaklaşık %25) diğer testlerdeki artışlara göre daha zayıftır. Bir bilye üzerinde oluşturulan hasarın etkisi görülmektedir. 1 nolu testteki artış daha belirgindir (2 katın üzerinde). Uzun süreli kullanımdan dolayı zamanla oluşan çok sayıda kusur, spektrum grafiğinin integral değerinde dramatik bir etkiye neden olmuştur. 4 nolu testteki artış ise en yüksek olanıdır (yaklaşık 4 kat). Dış bileziğin iç yüzeyinde oluşturulan kusur, her bilye geçişinde darbe etkisi yarattığı için böyle bir sonuç görülmektedir.

1 ve 4 nolu teste ait integral değerlerinde aşırı bir artış saptanmıştır. Burada elde edilen test sonuçlarına bakarak, eski rulmana ait spektrum grafiklerinin integrali için 40000 gibi bir eşik değerden söz edilebilir. Benzer şekilde, dış bileziğine hasar verilen rulman için de 60000 civarında bir eşik değer belirlenebilir. Tek başlarına yeterli olmamakla birlikte, bu değerler, ileriki rulman testlerinde referans olarak kullanılabilir.

Tablo 4.5’de, A rulmanının y yönündeki titreşimlerine ait kritik frekanslardaki tepe noktaları verilmiştir. Yeni rulmanın kullanıldığı 2 nolu testten alınan verilerde kritik frekansın birinci katında (214,67 Hz) tepe noktası bulunmamaktadır. Bir bilyesine hasar verilen rulmanın kullanıldığı 3 nolu testin verilerinde ise, kritik frekansın

birinci katında, tepe noktası belirlenmiştir. Bu durum, tüm veri grupları (ilk dört saniyelik, ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik) için geçerlidir ve bölüm 2'deki Rulman İçin Titreşim Modeli kısmında belirtilen model ile örtüşmektedir. Benzer şekilde, eski rulmanın kullanıldığı 1 nolu teste ait verilerde de, kritik frekansın birinci katında tepe noktası bulunmaktadır. Bunun sebebi, eski rulmanda kullanımdan dolayı, muhtemelen bilye hasarı oluşmasıdır. 1 nolu test ile 3 nolu test verileri arasındaki en belirgin fark, eski rulmanın daha fazla kusur içermesi, daha fazla tepe noktası oluşturması ve bu nedenle spektrum grafiğinin integral değerinin çok daha yüksek çıkmasıdır. Dış bileziğine hasar verilen rulmanın kullanıldığı 4 nolu testte ise, kritik frekansın birinci katında, ilk sekiz saniyelik bölüme ait değerlendirme hariç, tepe noktası bulunamamıştır. 4 nolu teste ait spektrum grafiği çok fazla sayıda ve yüksek genlikte frekans bileşeni içerdiği için “Analyse_comp.m” Matlab komut dosyası tepe noktalarını yakalayamamıştır. Zaten bu çeşit bir spektrum grafiğinde, kritik frekanslardaki tepe noktalarını yakalamaya çalışmak, çok fazla sayıda tepe noktası olması nedeniyle anlamsızdır.

A rulmanının y yönündeki tüm spektrum grafiklerinde, kritik frekansın ikinci katı ($n = 2$) için tepe noktası belirlenememiştir. Bu frekanstaki titreşimlerin, sistemin yapısal özellikleri, algılayıcıların ve rulmanların montaj şekli nedeniyle sönümlendiği düşünülmektedir.

Kritik frekansın üçüncü katında, ilk dört saniyelik bölüm ile, karşılaştırma amacıyla değerlendirmeye alınan, diğer (ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik) bölümler arasında, tepe noktaları açısından tutarlı sonuçlar bulunamamıştır. Kritik frekansın üçüncü katı olan 644 Hz'in, örnekleme frekansının Nyquist değerine (750 Hz) yakın olması sebebiyle bu frekanslarda sağlıklı analiz yapılamadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, yeni (test no: 2) ve bir bilyesine hasar verilen (test no: 3) rulmanlardan alınan veriler, bölüm 2'de oluşturulan rulman modeli ile örtüşmektedir. Beklendiği şekilde, hesaplanan kritik frekanslarda, 3 nolu test için tepe noktaları belirlenmiştir. Eski rulmana ait (test no: 1) verilerde de kritik frekanslarda tepe noktaları bulunmuştur. Bu verilerin bir diğer özelliği ise spektrum grafiklerinin integrallerinin 40000 değerlerinin üzerinde olmasıdır. Dış bileziğine hasar verilen rulmana ait (test no: 4) verilerde ise kritik frekanslarda tepe noktaları yakalanamamıştır. 4 nolu testteki verilerin en belirgin özelliği, spektrum grafiğinin integralinin 60000 gibi

(diğer testlerdekine göre) çok yüksek bir değerin üzerinde çıkmasıdır. Bu değerlendirmeler ileriki rulman testleri için referans olarak kullanılabilir ve rulmanlardaki problemlerin belirlenmesinde yardımcı olabilir.

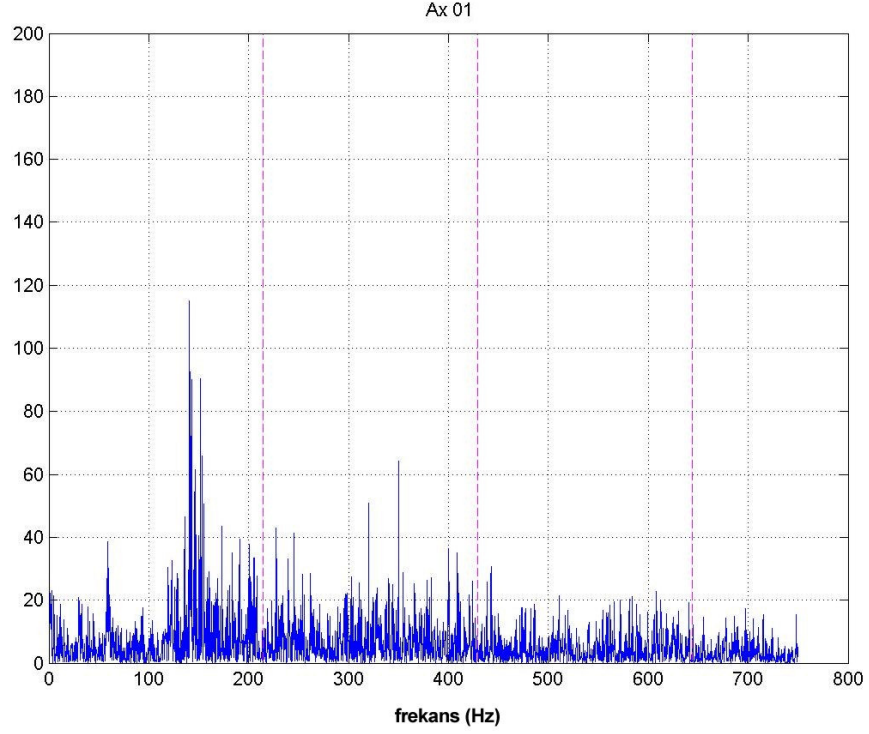
KAYNAKLAR

- [1] **Downham, E. and Woods, R.**, 1971. The rotational of monitoring vibrations on rotating machinery in continuously operating process plants, *ASME*, 71 Vibr 96.
- [2] **Collacot, E.A.**, 1979. Vibration Monitoring and Diagnosis, Wiley, New York.
- [3] **Neale, M.J. and Woodley, B.J.**, 1975. Condition Monitoring Methods and Economics, Brüel & Kjaer Co., Denmark.
- [4] **Cortina, E., Engel, H.L. and Scott, W.K.**, 1970. Pattern recognition techniques applied to diagnostics, *ASME*, 700497.
- [5] **Hoffman, R.L. and Fukunaga, K.**, 1971. Pattern recognition signal processing for mechanical diagnostic signature analysis, *IEEE*, **C-20(9)**, 1095-1100.
- [6] **Braun, S.**, 1980. The signature analysis of sonic bearing vibrations, *IEEE*, **SU-27**, 317-327.
- [7] **Broch, J.T.**, 1976. Mechanical Vibrations and Shock Measurements, Brüel & Kjaer Co., Denmark.
- [8] **Harris, T.A.**, 1966. Rolling Bearing Analysis, Wiley, New York.
- [9] **Braun, S. and Datner, B.**, 1979. Analysis of bearing vibrations, *ASME, J. Mech. Design*, **101(1)**, 118-125.
- [10] **McFadden, P.D. and Smith, J.D.**, 1984. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing, *J. Sound Vib.*, **96(1)**, 69-82.
- [11] **Timoshenko, S.**, 1955. Vibration Problems in Engineering, Van Nostrand, New York.
- [12] **While, M.F.**, 1979. Rolling element bearing vibration transfer characteristics: effect of stiffness, *ASME, J. Appl. Mech.*, **46(3)**, 677-684.

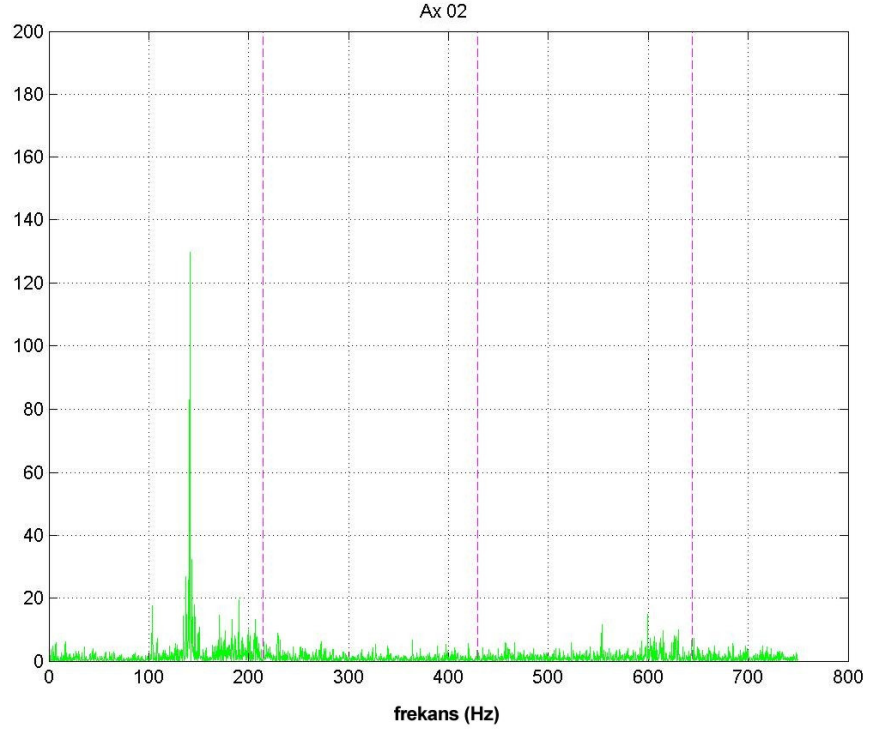
- [13] **Weichbrodt, B.**, 1969. Mechanical signature analysis of long-life spacecraft components: gyro study, *General Electric Tech. Info. Ser. 69-c-332*, R & D Center, Schenectady, New York.
- [14] **Meyer, L.D., Ahlgram, F.F. and Weichbrodt, B.**, 1980. An analytic model for ball bearing vibrations to predict vibration response to distributed defects, *ASME, J. Mech. Design*, **102(2)**, 205-210.
- [15] **Braun, S.**, 1986. Mechanical Signature Analysis, Academic Press Inc., London.
- [16] **Maten, S.**, 1967. New vibration velocity standards, *Hydrocarbon Processing*, **46(1)**, 137-141.
- [17] **Mitchell, J.S.**, 1981. Machinery Analysis and Monitoring: An Introduction, Pen Well Books, Oklahoma.
- [18] **Taylor, J.I.**, 1980. Identification of bearing defects by spectral analysis, *ASME, J. Mech. Design*, **102(2)**, 199-204.
- [19] **Samuel, D.S. and Ruth, A.D.**, 1996. Signal Processing Algorithms in Matlab, Prentice Hall, New Jersey.

EK A

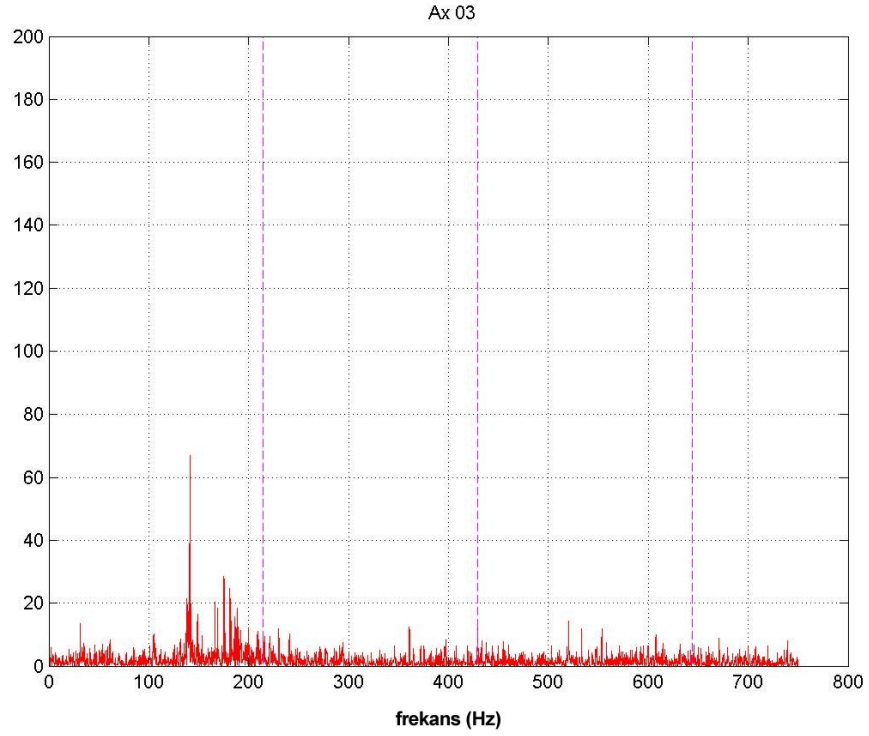
Deney verilerinin ikinci dört saniyelik, üçüncü dört saniyelik ve ilk sekiz saniyelik bölümleri için spektrum grafikleri aşağıda verilmiştir.



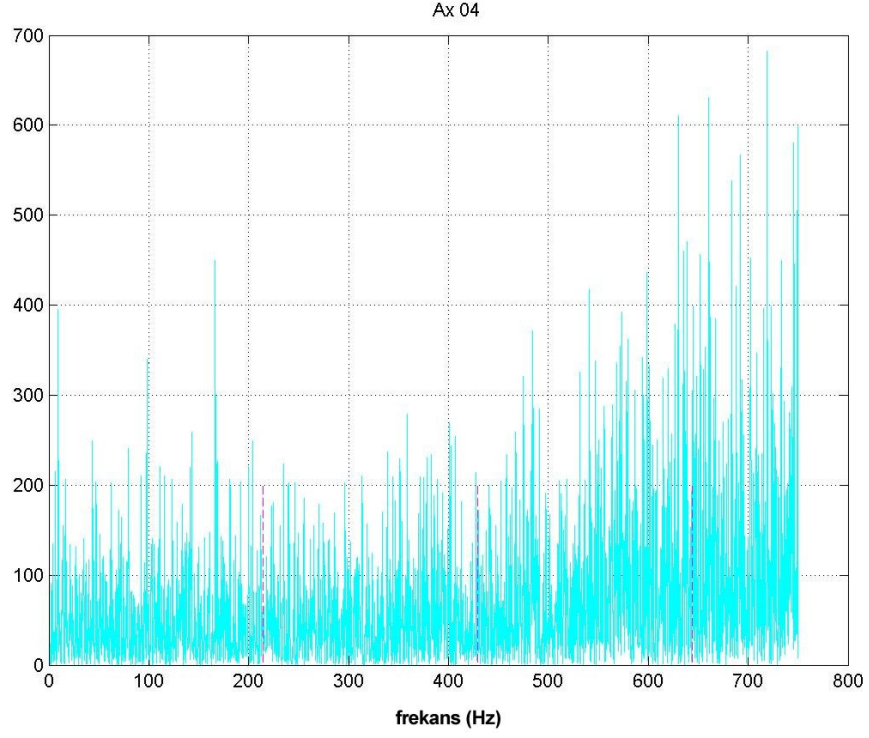
Şekil A.1: Test no. 01'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



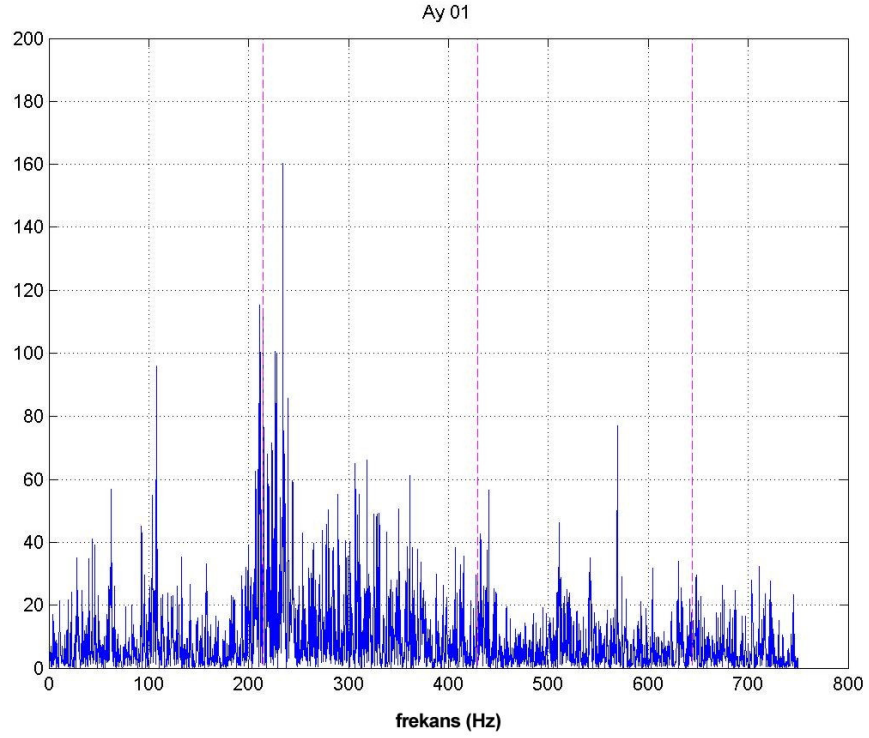
Şekil A.2: Test no. 02'ye ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



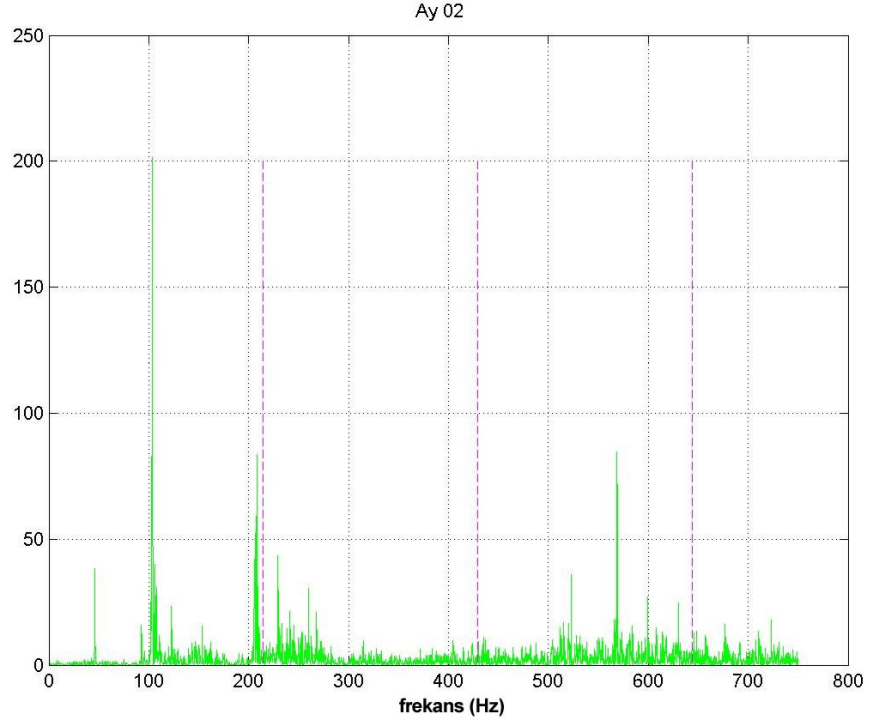
Şekil A.3: Test no. 03'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



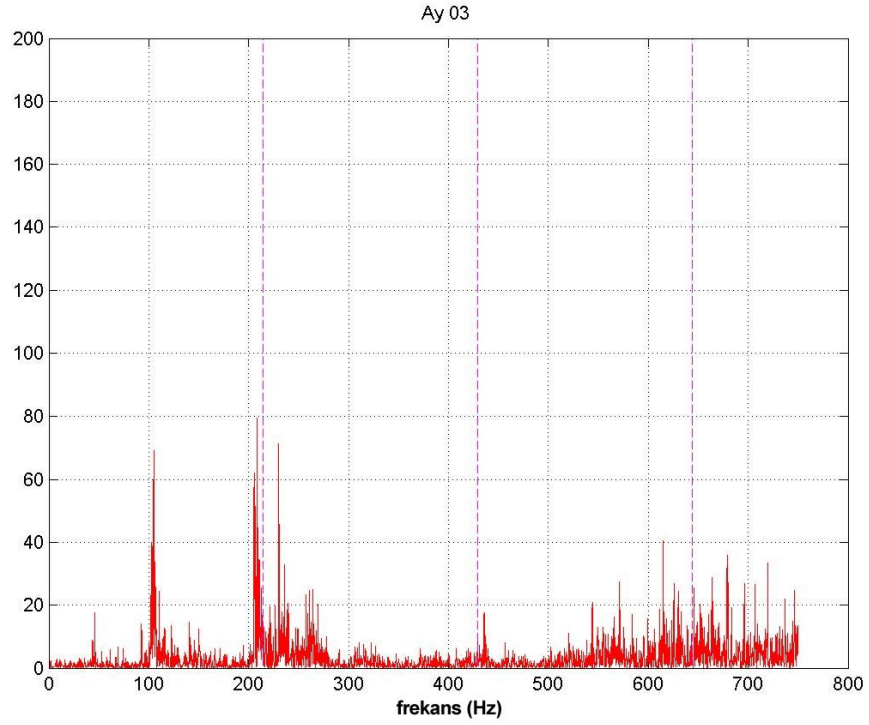
Şekil A.4: Test no. 04'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



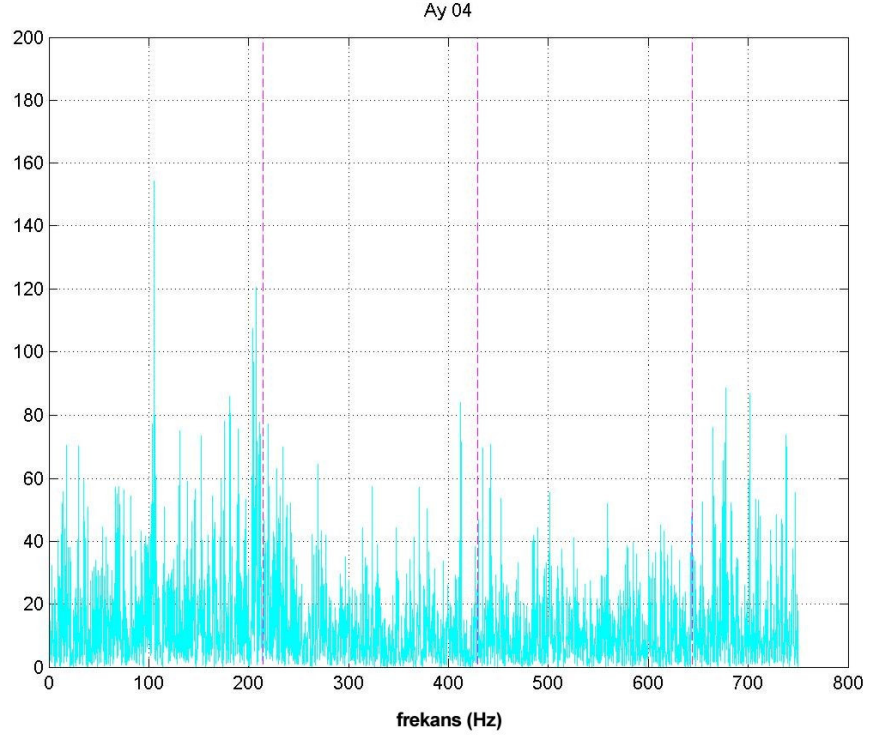
Şekil A.5: Test no. 01'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



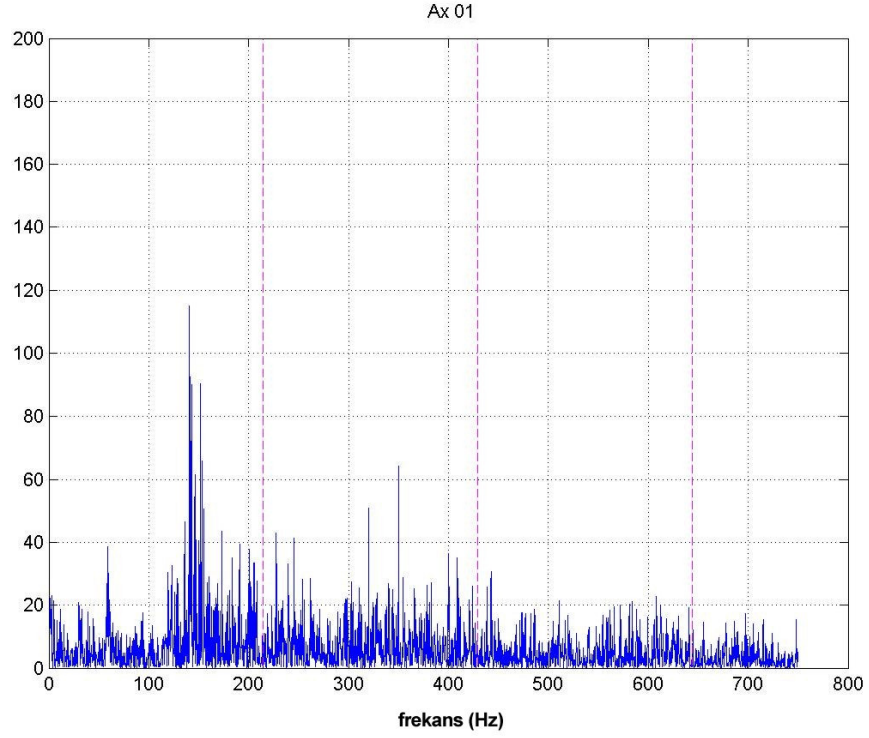
Şekil A.6: Test no. 02'ye ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



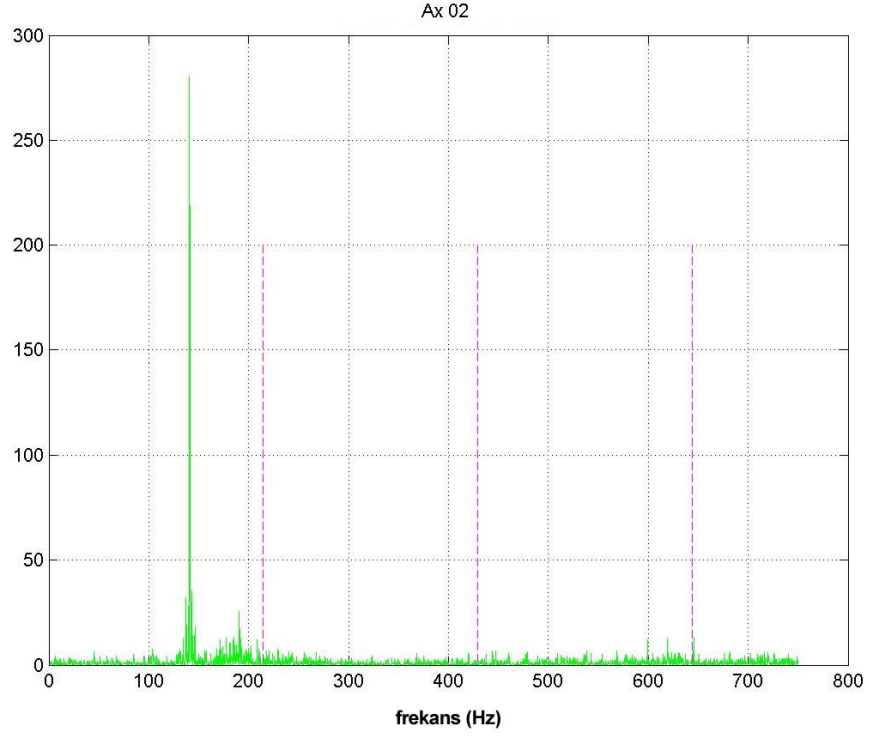
Şekil A.7: Test no. 03'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



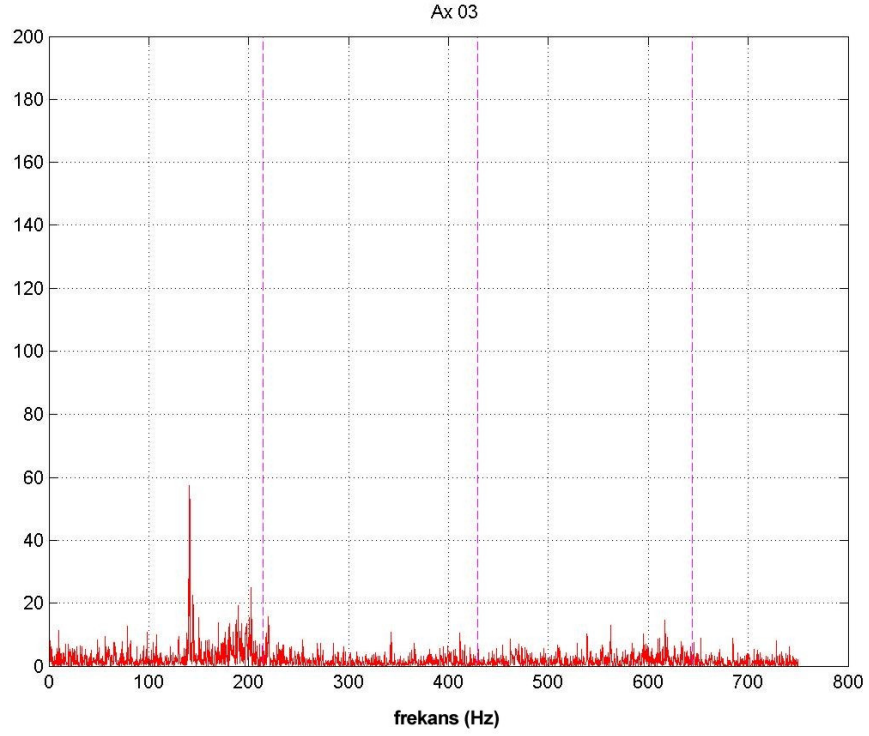
Şekil A.8: Test no. 04'e ait ikinci dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



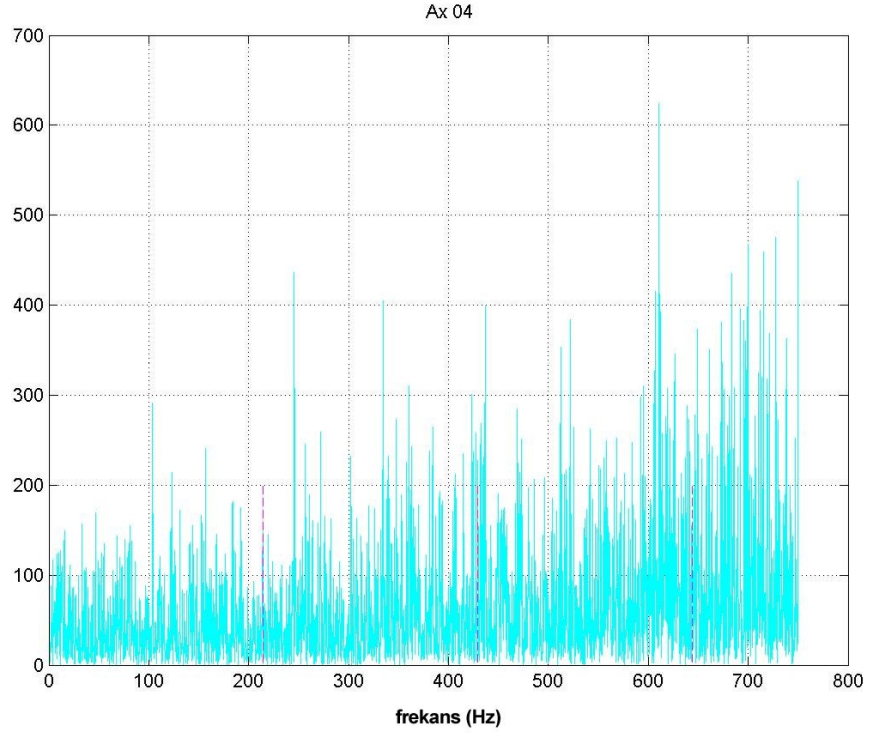
Şekil A.9: Test no. 01'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



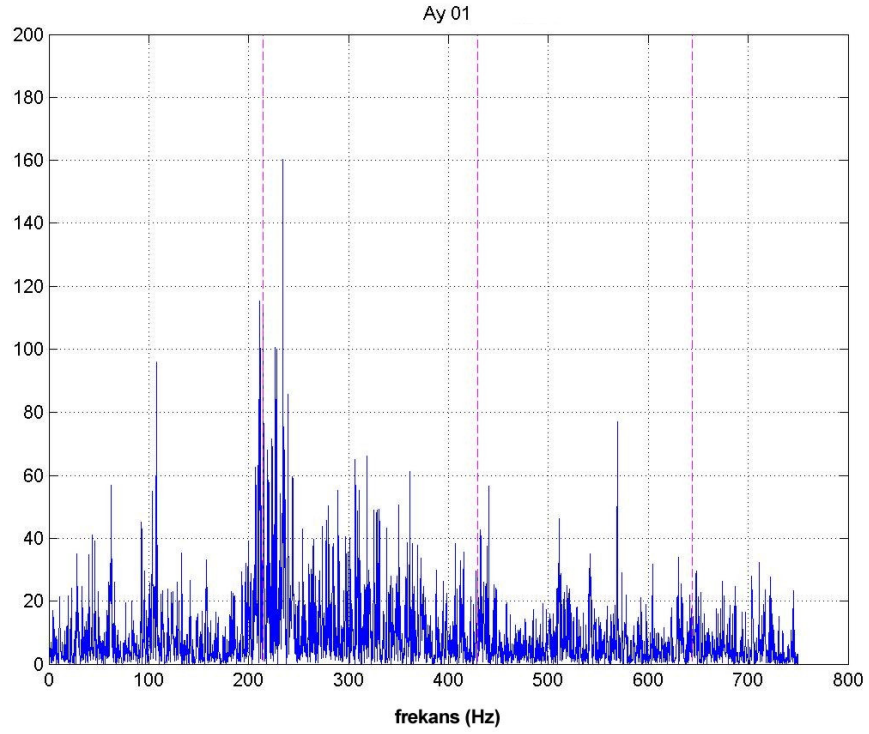
Şekil A.10: Test no. 02'ye ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



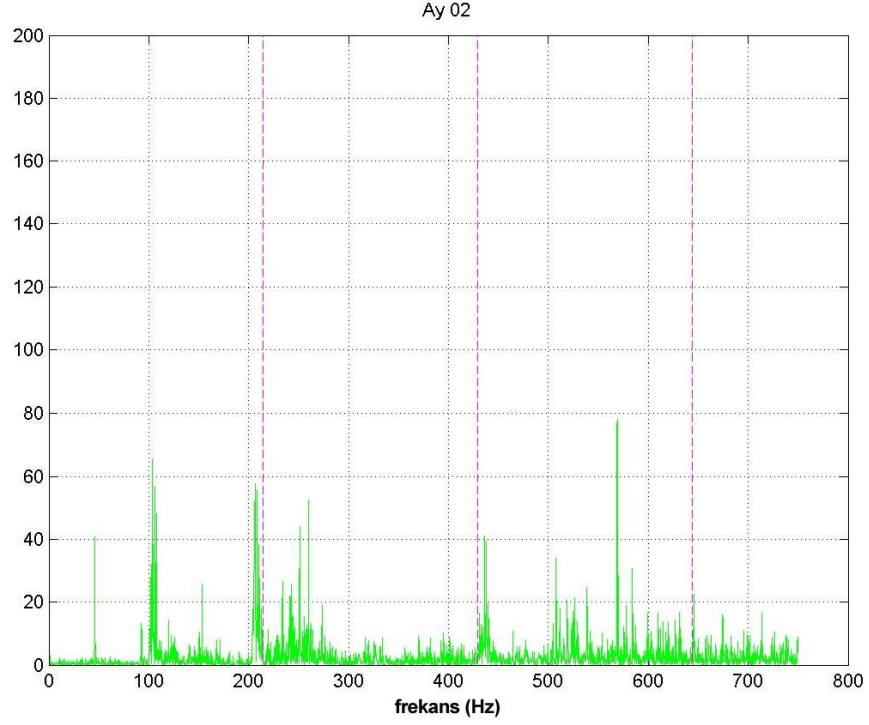
Şekil A.11: Test no. 03'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



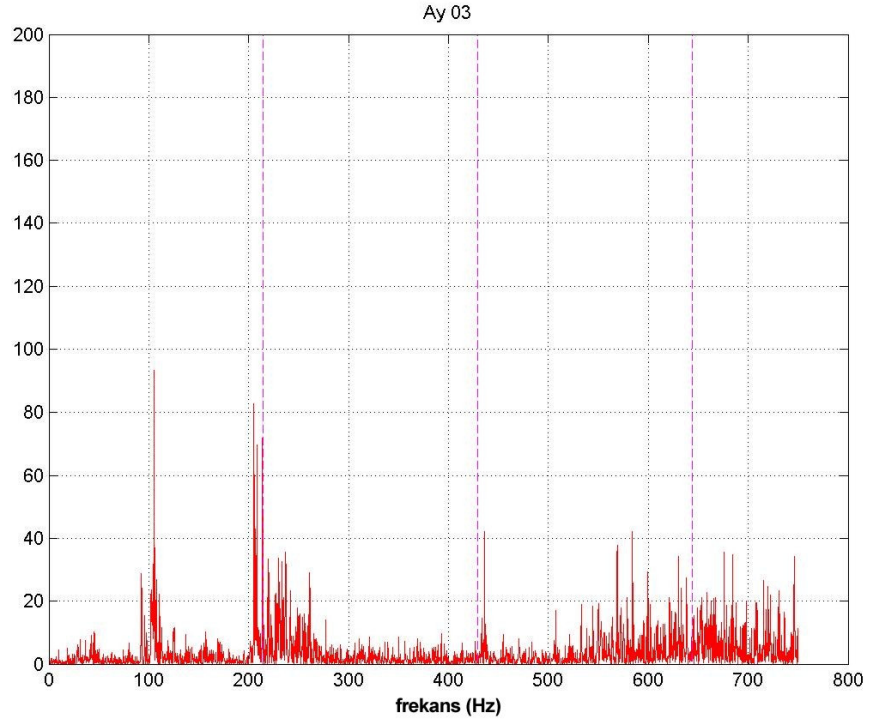
Şekil A.12: Test no. 04'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



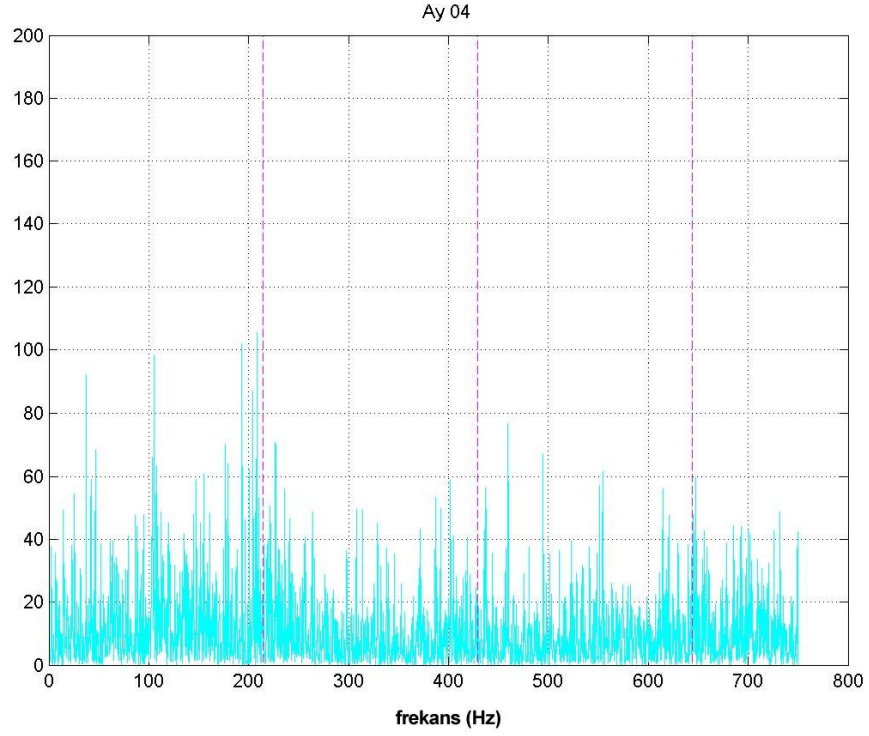
Şekil A.13: Test no. 01'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



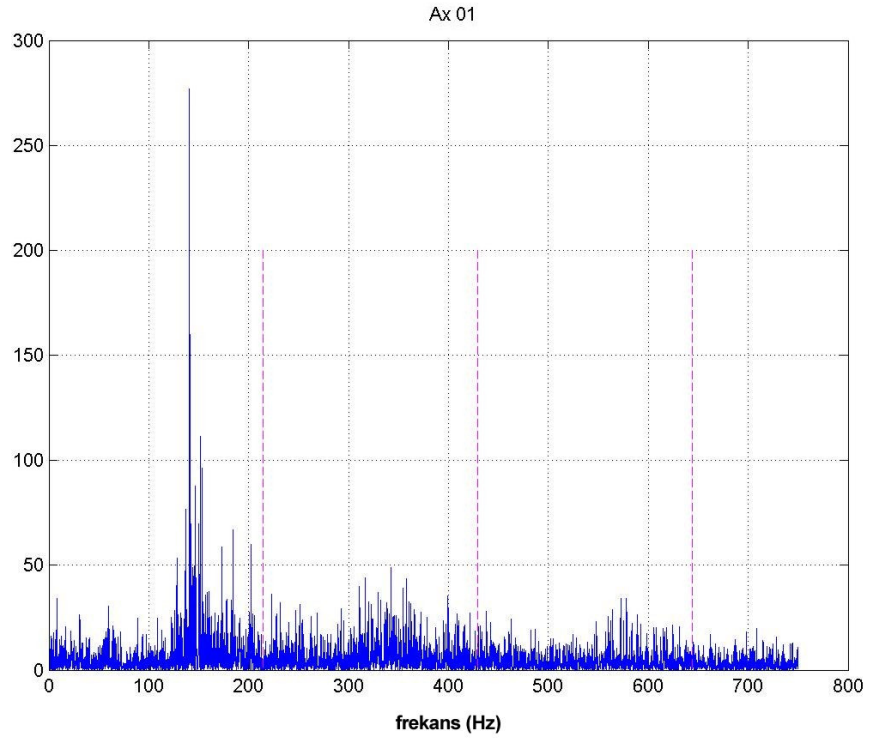
Şekil A.14: Test no. 02'ye ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



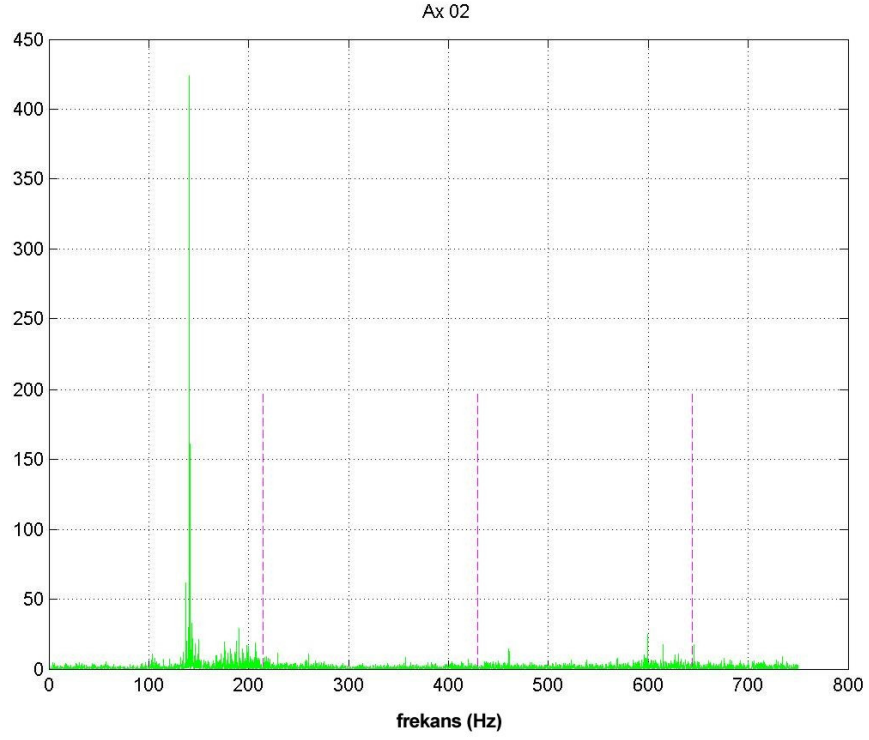
Şekil A.15: Test no. 03'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



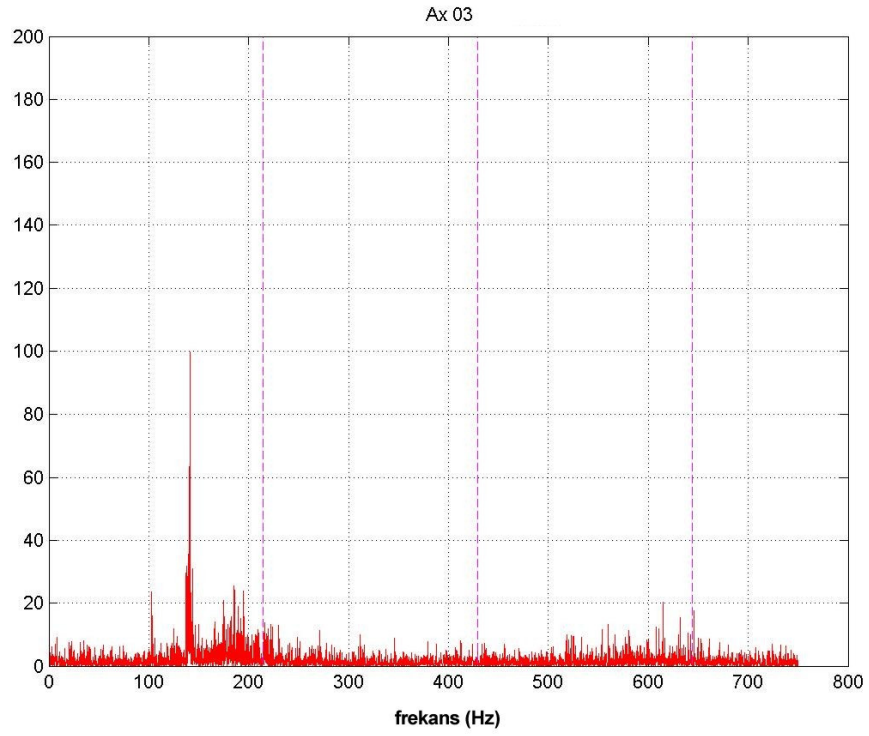
Şekil A.16: Test no. 04'e ait üçüncü dört saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



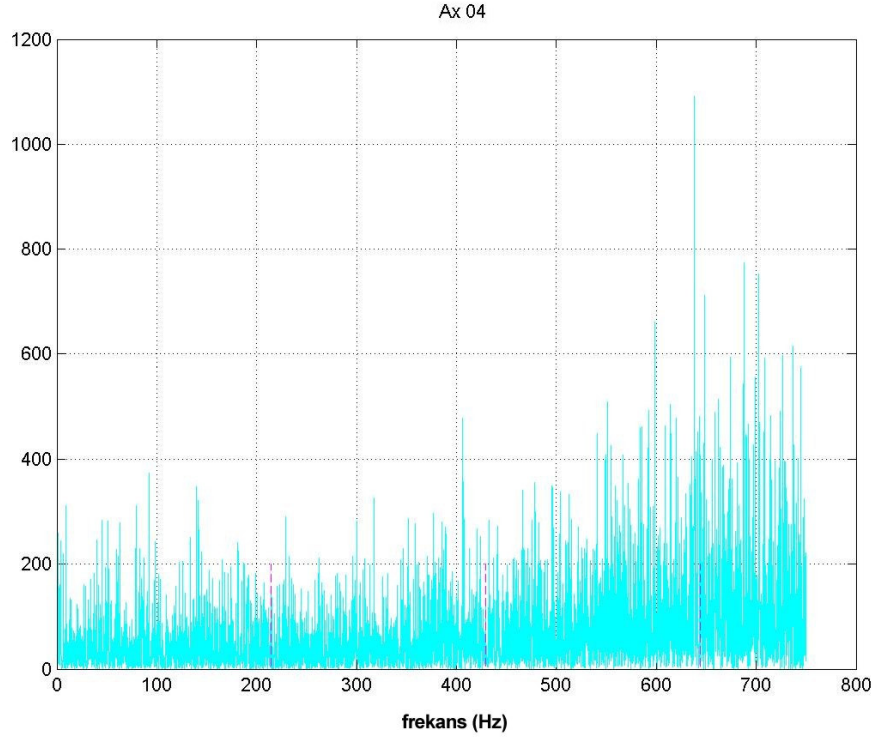
Şekil A.17: Test no. 01'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



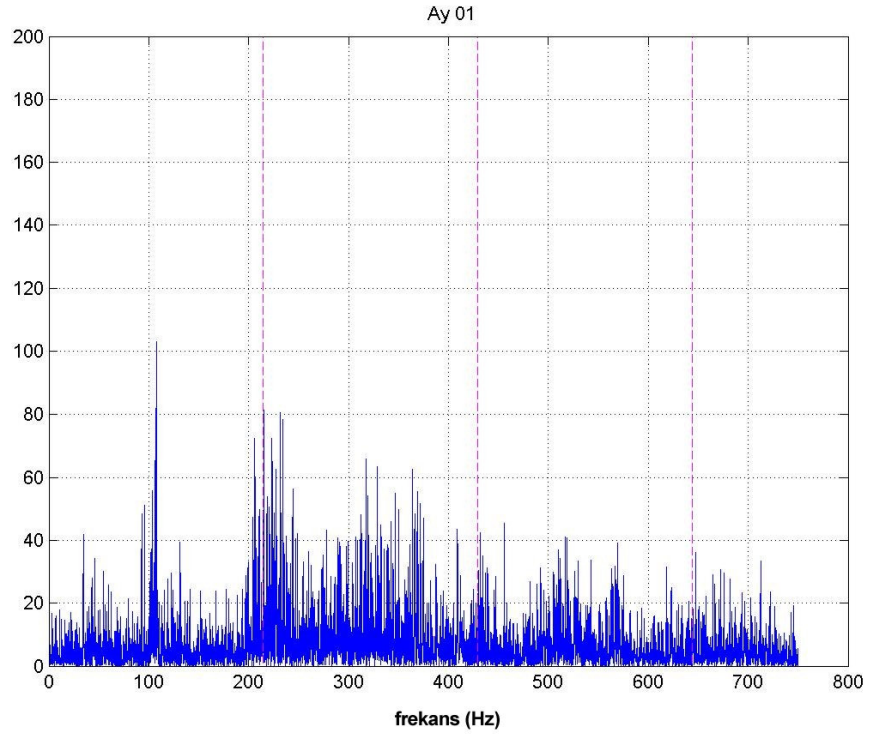
Şekil A.18: Test no. 02'ye ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



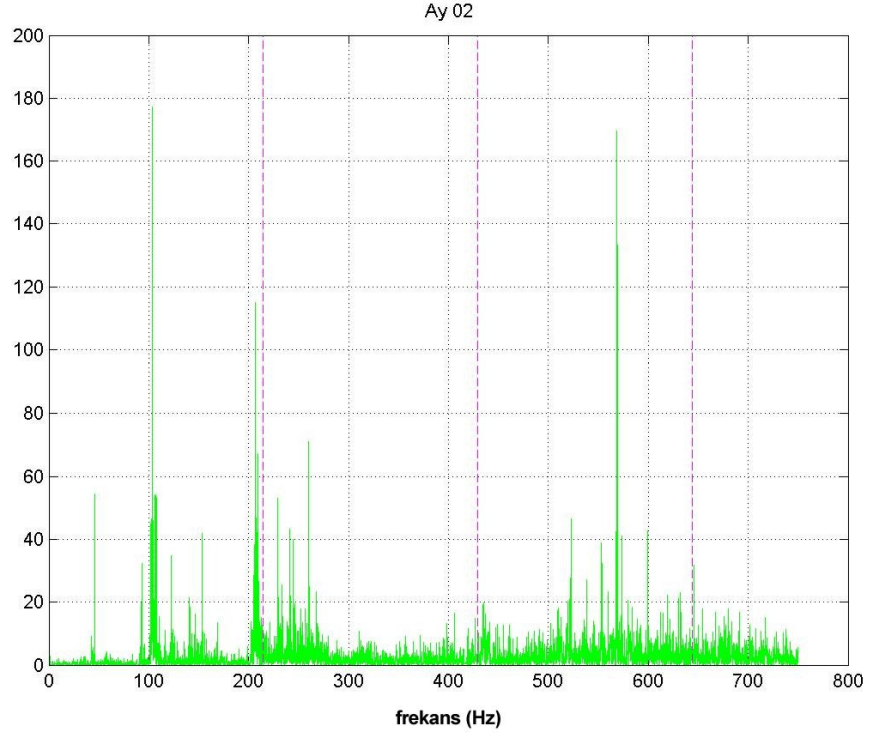
Şekil A.19: Test no. 03'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



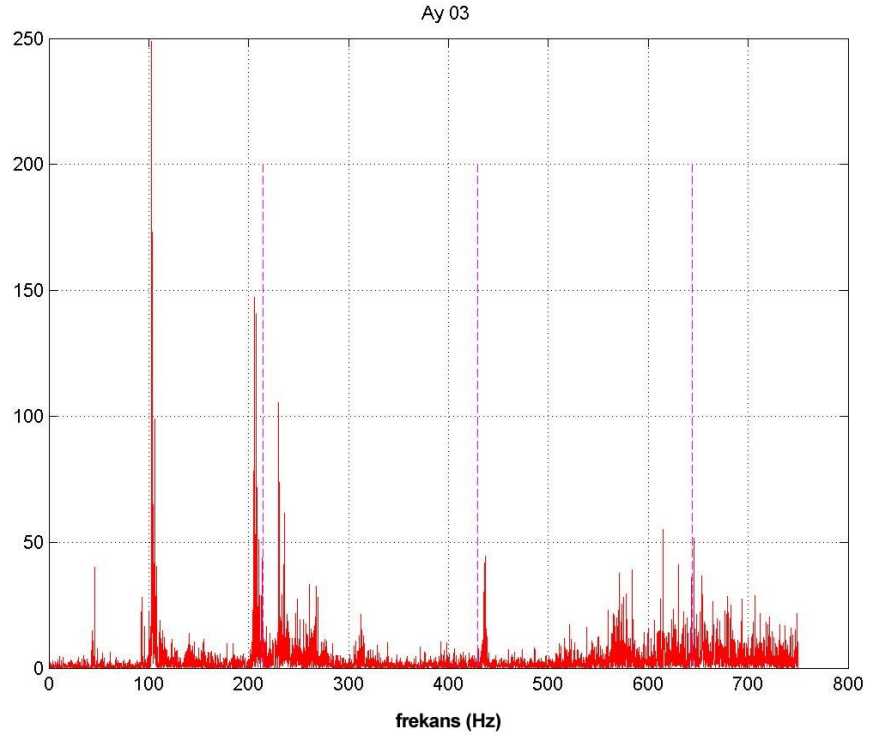
Şekil A.20: Test no. 04'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının x yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



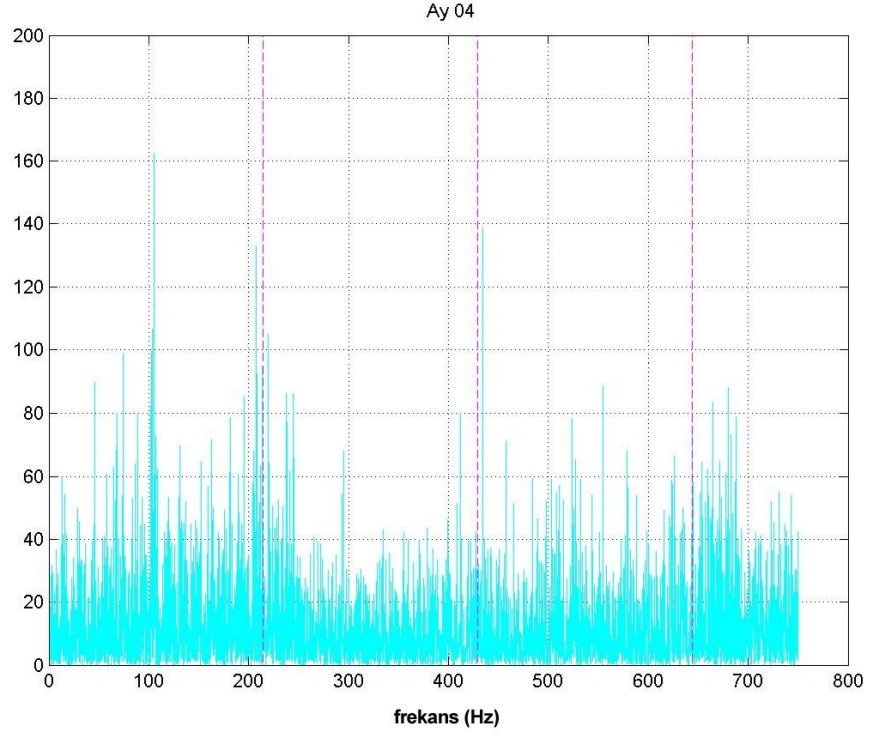
Şekil A.21: Test no. 01'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil A.22: Test no. 02'ye ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil A.23: Test no. 03'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği



Şekil A.24: Test no. 04'e ait ilk sekiz saniyelik veri için A rulmanının y yönündeki titreşimlerinin spektrum grafiği

EK B

Deney verilerinin Matlab ortamına düzenli bir şekilde aktarılması için oluşturulan “ReadData.m” dosyasının içeriği aşağıda verilmiştir:

```
function [ out ] = ReadData( filename )  
  
%READDATA command read datas from txt file and save these datas into MatLab  
%variables.  
  
%Before running the program enter global variables line into the MatLab  
%Command Window.  
  
column_no=7  
sample_no=18000  
global t_real_01 Ax_01 Ay_01 Az_01 Bx_01 By_01 Bz_01 t_01;  
fid = fopen(filename);  
out = 0;  
  
% Show file info. Move position indicator until reaching datas row.  
while 1  
    tline = fgetl(fid);  
    if ~isletter(tline), break, end  
    disp(tline)  
end  
  
% Produce variables from txt datas.  
alldata = fscanf(fid,'%g',[column_no sample_no]);  
alldata = alldata';  
t_real_01=alldata(:,1);  
Ax_01=alldata(:,2);  
Ay_01=alldata(:,3);  
Az_01=alldata(:,4);  
Bx_01=alldata(:,5);  
By_01=alldata(:,6);  
Bz_01=alldata(:,7);  
t_01=t_real_01(:)-t_real_01(1);  
fclose(fid);
```

EK C

Verilerin maksimum ve ortalama değerlerinin bulunması için oluşturulan “analyse_max_mean.m” dosyasının içeriği aşağıda verilmiştir:

```
% Analyse max and mean values
global max_values mean_values
% Find max values of each data:
max_values(1,1)=max(Ax_01);
max_values(1,2)=max(Ax_02);
max_values(1,3)=max(Ax_03);
max_values(1,4)=max(Ax_04);
max_values(2,1)=max(Ay_01);
max_values(2,2)=max(Ay_02);
max_values(2,3)=max(Ay_03);
max_values(2,4)=max(Ay_04);
max_values(3,1)=max(Az_01);
max_values(3,2)=max(Az_02);
max_values(3,3)=max(Az_03);
max_values(3,4)=max(Az_04);
max_values(4,1)=max(Bx_01);
max_values(4,2)=max(Bx_02);
max_values(4,3)=max(Bx_03);
max_values(4,4)=max(Bx_04);
max_values(5,1)=max(By_01);
max_values(5,2)=max(By_02);
max_values(5,3)=max(By_03);
max_values(5,4)=max(By_04);
max_values(6,1)=max(Bz_01);
max_values(6,2)=max(Bz_02);
max_values(6,3)=max(Bz_03);
max_values(6,4)=max(Bz_04);
% Find average of absolute values for each data:
```

```
mean_values(1,1)=mean(abs(Ax_01));
mean_values(1,2)=mean(abs(Ax_02));
mean_values(1,3)=mean(abs(Ax_03));
mean_values(1,4)=mean(abs(Ax_04));
mean_values(2,1)=mean(abs(Ay_01));
mean_values(2,2)=mean(abs(Ay_02));
mean_values(2,3)=mean(abs(Ay_03));
mean_values(2,4)=mean(abs(Ay_04));
mean_values(3,1)=mean(abs(Az_01));
mean_values(3,2)=mean(abs(Az_02));
mean_values(3,3)=mean(abs(Az_03));
mean_values(3,4)=mean(abs(Az_04));
mean_values(4,1)=mean(abs(Bx_01));
mean_values(4,2)=mean(abs(Bx_02));
mean_values(4,3)=mean(abs(Bx_03));
mean_values(4,4)=mean(abs(Bx_04));
mean_values(5,1)=mean(abs(By_01));
mean_values(5,2)=mean(abs(By_02));
mean_values(5,3)=mean(abs(By_03));
mean_values(5,4)=mean(abs(By_04));
mean_values(6,1)=mean(abs(Bz_01));
mean_values(6,2)=mean(abs(Bz_02));
mean_values(6,3)=mean(abs(Bz_03));
mean_values(6,4)=mean(abs(Bz_04));
```

EK D

Matlab ortamında spektrum analizlerinin gerçekleştirilmesi için oluşturulan “Analyse_fft.m” dosyasının içeriği aşağıda verilmiştir:

```
%FFT analyse for test data

% For 4 sec. measurement period, 1500 Hz data frequency, number of samples
% 6000:
% Frequency axis
f = (0:0.25:750);
% Windowing
hann_win = window(@hann,6000);
% Critical frequency grid lines
cri_fre_grid_line_x1=[214.662,214.662];
cri_fre_grid_line_y1=[0,200];
cri_fre_grid_line_x2=[429.324,429.324];
cri_fre_grid_line_y2=[0,200];
cri_fre_grid_line_x3=[643.986,643.986];
cri_fre_grid_line_y3=[0,200];
% Windowing Ax
Ax_01_win = Ax_01(6001:12000).*hann_win;
Ax_02_win = Ax_02(12001:18000).*hann_win;
Ax_03_win = Ax_03(12001:18000).*hann_win;
Ax_04_win = Ax_04(12001:18000).*hann_win;
% Ax fft analyse
Y_Ax_01 = fft(Ax_01_win,6000);
Y_Ax_02 = fft(Ax_02_win,6000);
Y_Ax_03 = fft(Ax_03_win,6000);
Y_Ax_04 = fft(Ax_04_win,6000);
% Ax power spectrum, a measurement of the power at various frequencies
Pyy_Ax_01 = Y_Ax_01.* conj(Y_Ax_01) / 6000;
Pyy_Ax_02 = Y_Ax_02.* conj(Y_Ax_02) / 6000;
Pyy_Ax_03 = Y_Ax_03.* conj(Y_Ax_03) / 6000;
```

```

Pyy_Ax_04 = Y_Ax_04.* conj(Y_Ax_04) / 6000;
% Plot Ax power spectrum
figure
plot(f,Pyy_Ax_01(1:3001),'b')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ax 01')
xlabel('frequency (Hz)')
figure
plot(f,Pyy_Ax_02(1:3001),'g')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ax 02')
xlabel('frequency (Hz)')
figure
plot(f,Pyy_Ax_03(1:3001),'r')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ax 03')
xlabel('frequency (Hz)')
figure
plot(f,Pyy_Ax_04(1:3001),'c')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ax 04')
xlabel('frequency (Hz)')
% Windowing Ay

```

```

Ay_01_win = Ay_01(6001:12000).*hann_win;
Ay_02_win = Ay_02(12001:18000).*hann_win;
Ay_03_win = Ay_03(12001:18000).*hann_win;
Ay_04_win = Ay_04(12001:18000).*hann_win;
% Ay fft analyse
Y_Ay_01 = fft(Ay_01_win,6000);
Y_Ay_02 = fft(Ay_02_win,6000);
Y_Ay_03 = fft(Ay_03_win,6000);
Y_Ay_04 = fft(Ay_04_win,6000);
% Ay power spectrum, a measurement of the power at various frequencies
Pyy_Ay_01 = Y_Ay_01.* conj(Y_Ay_01) / 6000;
Pyy_Ay_02 = Y_Ay_02.* conj(Y_Ay_02) / 6000;
Pyy_Ay_03 = Y_Ay_03.* conj(Y_Ay_03) / 6000;
Pyy_Ay_04 = Y_Ay_04.* conj(Y_Ay_04) / 6000;
% Plot Ay power spectrum
figure
plot(f,Pyy_Ay_01(1:3001),'b')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ay 01')
xlabel('frequency (Hz)')
figure
plot(f,Pyy_Ay_02(1:3001),'g')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ay 02')
xlabel('frequency (Hz)')
figure
plot(f,Pyy_Ay_03(1:3001),'r')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')

```

```

line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ay 03')
xlabel('frequency (Hz)')
figure
plot(f,Py_Ay_04(1:3001),'c')
line(cri_fre_grid_line_x1,cri_fre_grid_line_y1,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x2,cri_fre_grid_line_y2,'color','m','LineStyle','--')
line(cri_fre_grid_line_x3,cri_fre_grid_line_y3,'color','m','LineStyle','--')
grid
title('Frequency content of Ay 04')
xlabel('frequency (Hz)')

```

EK E

Her bir test (test no: 1, 2, 3, 4) için, spektrum grafiğinin integralinin hesaplanması, kritik frekanslarda tepe noktasının bulunup bulunmadığının belirlenmesi ve tepe noktası var ise değerinin görüntülenmesi için oluşturulan “Analyse_comp.m” dosyasının içeriği aşağıda verilmiştir:

```
%Analyse, compare and interpret
% Run "Analyse_fft.m" m-file first!
% Roller bearing parameters
ball_no=14
rotational_fre=920/60

% Integral of Ay power spectrum
integral_Pyy_Ay_01=sum(Pyy_Ay_01)
integral_Pyy_Ay_02=sum(Pyy_Ay_02)
integral_Pyy_Ay_03=sum(Pyy_Ay_03)
integral_Pyy_Ay_04=sum(Pyy_Ay_04)

% Finding peak points of Ay power spectrum (peak = mean + 3 x sigma)
[sort_Pyy_Ay_01 sort_index_Pyy_Ay_01]=sort(Pyy_Ay_01(1:3001));
sort_Pyy_Ay_01(:,2)=f(sort_index_Pyy_Ay_01)';
mean_Pyy_Ay_01=mean(Pyy_Ay_01)
sigma_Pyy_Ay_01=std(Pyy_Ay_01)
peak_Pyy_Ay_01=mean_Pyy_Ay_01+3*sigma_Pyy_Ay_01
[sort_Pyy_Ay_02 sort_index_Pyy_Ay_02]=sort(Pyy_Ay_02(1:3001));
sort_Pyy_Ay_02(:,2)=f(sort_index_Pyy_Ay_02)';
mean_Pyy_Ay_02=mean(Pyy_Ay_02)
sigma_Pyy_Ay_02=std(Pyy_Ay_02)
peak_Pyy_Ay_02=mean_Pyy_Ay_02+3*sigma_Pyy_Ay_02
[sort_Pyy_Ay_03 sort_index_Pyy_Ay_03]=sort(Pyy_Ay_03(1:3001));
sort_Pyy_Ay_03(:,2)=f(sort_index_Pyy_Ay_03)';
mean_Pyy_Ay_03=mean(Pyy_Ay_03)
sigma_Pyy_Ay_03=std(Pyy_Ay_03)
peak_Pyy_Ay_03=mean_Pyy_Ay_03+3*sigma_Pyy_Ay_03
[sort_Pyy_Ay_04 sort_index_Pyy_Ay_04]=sort(Pyy_Ay_04(1:3001));
```

```

sort_Pyy_Ay_04(:,2)=f(sort_index_Pyy_Ay_04)';
mean_Pyy_Ay_04=mean(Pyy_Ay_04)
sigma_Pyy_Ay_04=std(Pyy_Ay_04)
peak_Pyy_Ay_04=mean_Pyy_Ay_04+3*sigma_Pyy_Ay_04
% Searching for peak points by critical frequencies
step=ball_no*rotational_fre;
[row_no_sort_Pyy column_no_sort_Pyy]=size(sort_Pyy_Ay_01)
for cri_fre=step:step:range(f)
    for item=0:row_no_sort_Pyy
        item2=(row_no_sort_Pyy-item);
        if sort_Pyy_Ay_01(item2,1)<peak_Pyy_Ay_01
            break
        end
        if abs(sort_Pyy_Ay_01(item2,2)-cri_fre)<2
            'Pyy_Ay_01'
            sort_Pyy_Ay_01(item2,:)
            break
        end
    end
end
for item=0:row_no_sort_Pyy
    item2=(row_no_sort_Pyy-item);
    if sort_Pyy_Ay_02(item2,1)<peak_Pyy_Ay_02
        break
    end
    if abs(sort_Pyy_Ay_02(item2,2)-cri_fre)<2
        'Pyy_Ay_02'
        sort_Pyy_Ay_02(item2,:)
        break
    end
end
for item=0:row_no_sort_Pyy
    item2=(row_no_sort_Pyy-item);
    if sort_Pyy_Ay_03(item2,1)<peak_Pyy_Ay_03
        break
    end
end

```

```

    if abs(sort_Pyy_Ay_03(item2,2)-cri_fre)<2
        'Pyy_Ay_03'
        sort_Pyy_Ay_03(item2,:)
        break
    end
end
for item=0:row_no_sort_Pyy
    item2=(row_no_sort_Pyy-item);
    if sort_Pyy_Ay_04(item2,1)<peak_Pyy_Ay_04
        break
    end
    if abs(sort_Pyy_Ay_04(item2,2)-cri_fre)<2
        'Pyy_Ay_04'
        sort_Pyy_Ay_04(item2,:)
        break
    end
end
end
end

```

ÖZGEÇMİŞ

18 Nisan 1980, Üsküdar, İstanbul doğumluyum. 1991 yılında başladığım Ümraniye Anadolu Lisesi'nden, 1998 yılında mezun oldum. Aynı yıl girdiğim üniversite sınavlarında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünü kazandım. İlk yıl İngilizce hazırlığı tamamladıktan sonra Uçak Mühendisliği Bölümünde bir yıl okudum ve yatay geçişten faydalanarak Makina Mühendisliği Bölümüne geçtim. 2003 yılında Makina Mühendisliği Bölümünden 3,67 ortalamayla bölüm beşincisi olarak mezun oldum ve hemen ardından Mekatronik Yüksek Lisans Programına başladım. Haziran 2003'den beri Ford Otosan'da Ürün Geliştirme Mühendisliği yapmaktayım.