

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK SİSTEMLERİN KESTİRİMCİ BAKIMINA ETKİ EDEN
FAKTÖRLERİN DURUM BAZLI İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Salih Seçkin EROL**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği A.B.D.

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cemal MERAN

Ocak 2015

DOKTORA TEZ ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 081609002 no'lu öğrencisi Salih Seçkin EROL tarafından hazırlanan "DİNAMİK SİSTEMLERİN KESTİRİMCİ BAKIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN DURUM BAZLI İNCELENMESİ" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cemal MERAN (PAÜ)



Jüri Başkanı : Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ (PAÜ)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Nizami AKTÜRK (Gazi Ü.)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Aşkner GÜNGÖR (PAÜ)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU (PAÜ)



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14.01.2015. tarih ve ...02/29... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Orhan KARABULUT

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından 2012FBE010 no'lu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.



Salih Seçkin EROL

ÖNSÖZ

Mekanik sistemlerin toplam kaliteli bakım gereksinimi hızla küreselleşen rekabet ortamında zorunlu hale gelmiştir. Gelişmiş ülkelere bakıldığında bu alandaki uygulamaların yaygın olarak yer bulduğunu görmekteyiz. Gelişmekte olan ülkemizde ise halen ilgili teknolojiler fazlaca kullanılamamaktadır. Bu çalışmada, titreşim veri analizi ve elektrik veri analizi olmak üzere iki farklı kestirimci bakım tekniğinin mekanik aksamlarda yaygın hasar ana sebep tiplerinin tespiti üzerine etkinliği araştırılmıştır. Bu amaçla endüstrideki aslına benzer bir test düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir. Endüstriyel bakımda, prognostik ve diagnostik uygulamaların farklılığı ve önemi vurgulanmıştır. Mekanik sistemlerde çok küçük ayar bozukluklarının dahi sistemde meydana getirebileceği etkilerdeki değişimler ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmanın gerçekleşmesinde verdiği özverili destekten dolayı öncelikle tez danışmanım Prof. Dr. Cemal Meran'a, verdikleri teknik destekten dolayı Denizli Çimento A.Ş. Genel Müdürlüğü'ne ve Bakım Müdürü Sn. Emrah Gezer'e; çalışmadaki testlerin gerçekleştirilmesinde teknik altyapının kurulmasına maddi destek veren Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve bu tez çalışması boyunca emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmayı anne ve babama ithaf ediyorum.

Ocak 2015

Salih Seçkin EROL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Kestirimci Bakım ve Literatürdeki Yeri.....	3
1.3 Konuyla İlgili Önceki Çalışmalar.....	6
2. KESTİRİMCİ BAKIM VE ARIZA YAKLAŞIMI	12
2.1 Bakım Stratejileri	12
2.2 Kestirimci Bakım Teknikleri.....	14
2.2.1 Titreşim analizi	15
2.2.2 Sinyal (işaret) görüntüleme teknikleri	17
2.2.2.1 Dalgaform görüntüleme (Zaman bölgesi).....	17
2.2.2.2 Spektrum görüntüleme (Frekans bölgesi)	18
2.2.2.3 Fourier tekniği.....	19
2.3 Test Edilen Kusur Tipleri	21
2.3.1 Balanssızlık	21
2.3.2 Eksen kaçıklığı.....	21
2.3.3 Mekanik gevşeklik	22
2.3.4 Yağsızlık ve rulman etkileri.....	22
3. MATERYAL VE METOD	24
3.1 Test Düzenegi.....	24
3.2 Elektrik, Titreşim Frekansı Harmonikleri ve Arıza Frekansları.....	30
3.3 Test Edilen Kusur Tiplerinin Oluşturulması	34
3.3.1 Balanssızlık testi	35
3.3.2 Eksen kaçıklığı testi	35
3.3.3 Mekanik gevşeklik testi	36
3.3.4 Rulmanda yağsızlık testi	36
3.4 Test Parametreleri.....	37
4. TEST BULGULARI	40
4.1 Titreşim Verileri ve Analizi	40
4.1.1 Rezonans verileri	42
4.1.1.1 Birinci kritik devir sayısı.....	44
4.1.1.2 İkinci kritik devir sayısı	44
4.1.1.3 Üçüncü kritik devir sayısı	45
4.1.1.4 Dördüncü kritik devir sayısı.....	46
4.1.2 Yağsızlık testleri	47
4.1.2.1 1900 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık testi	48
4.1.2.2 2880 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık testi	50

4.1.2.3	3510 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık testi	52
4.1.3	Balanssızlık testleri	54
4.1.3.1	1900 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık testi	54
4.1.3.2	2880 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık testi	56
4.1.3.3	3510 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık testi	57
4.1.4	Eksen kaçıklığı testleri	59
4.1.4.1	1900 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı testleri	59
4.1.4.2	2880 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı testleri	66
4.1.4.3	3510 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı testleri	72
4.1.5	Mekanik gevşeklik testleri	79
4.1.5.1	1900 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testleri	79
4.1.5.2	2880 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testleri	86
4.1.5.3	3510 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testleri	93
4.1.6	Titreşim verileri genel sinyal incelemesi	100
4.2	Elektrik Tüketim Verileri ve Analizi	103
4.2.1	Trend verileri	103
4.2.1.1	Referans trend verileri	104
4.2.1.2	Yağsızlık testleri	105
4.2.1.3	Balanssızlık testleri	105
4.2.1.4	Eksen kaçıklığı testleri	106
4.2.1.5	Mekanik gevşeklik testleri	107
4.2.2	Elektriksel güç spektrum yoğunluğu (GSY=PSD) incelemesi ..	109
4.2.2.1	Referans elektriksel PSD verileri	109
4.2.2.2	Yağsızlık etkisi altında elektriksel PSD değişimi	110
4.2.2.3	Balanssızlık etkisi altında elektriksel PSD değişimi	111
4.2.2.4	Eksen kaçıklığı etkisi altında elektriksel PSD değişimi	112
4.2.2.5	Mekanik gevşeklik etkisi altında elektriksel PSD değişimi ..	118
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	124
5.1	Titreşim ve Elektrik Tüketim Analizi Sonuçları	125
5.1.1	Eksen kaçıklığı test sonuçlarının irdelenmesi	125
5.1.2	Mekanik gevşeklik test sonuçlarının irdelenmesi	126
5.1.3	Balanssızlık test sonuçlarının irdelenmesi	126
5.1.4	Yağsızlık test sonuçlarının irdelenmesi	127
5.2	Genel Sonuç Değerlendirmesi ve Literatüre Özgün Katkıları	127
5.3	İleride Yapılabilecek Çalışmalar İçin Öneriler	128
6.	KAYNAKLAR	130
EKLER	136	

KISALTMALAR

VTK	: Veri Toplama Kartı
MDİC	: Motor Durum İzleme Cihazı
RMS	: Root Mean Square
KOK	: Kareler Ortalamasının Karekökü
PSD	: Power Spectrum Density
GSY	: Güç Spektrum Yoğunluğu
FFT	: Fast Fourier Transform
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
PSY	: Prognostik ve Sağlık Yönetimi
Ref	: Referans
Y	: Yağsızlık
B	: Balanssızlık
EK	: Eksen Kaçıklığı
MG	: Mekanik Gevşeklik
R	: Radyal
E	: Eksenel
S	: Sinyal

SEMBOLLER

ω_s	: Mil frekansı
ω_c	: Kafes frekansı
ω_{bsf}	: Bilya dönüş frekansı
ω_{bpfo}	: Dış bilezik bilya geçiş frekansı
ω_{bpfi}	: İç bilezik bilya geçiş frekansı
ω_{bpf}	: Kanat geçiş frekansı
n	: Bilya sayısı
n_b	: Kanat sayısı
f	: Frekans
f_n	: Doğal frekans
t	: Zaman
h	: Harmonik
$1x$: Temel frekansın birinci harmoniği (katı)

TABLO LİSTESİ

Tablolar

	<u>Sayfa</u>
3.1: Teorik ve uygulamalı harmonikler.....	30
3.2: Temel arıza frekansları.....	31
3.3: Testlerde uygulanan parametreler	38
4.1: Devire göre titreşim frekansı, genlik ve RMS değerleri değişimi	41
4.2: 1900 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık sinyalleri	50
4.3: 2880 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık sinyalleri	52
4.4: 3510 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık sinyalleri	53
4.5: 1900 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık sinyalleri.....	55
4.6: 2880 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık sinyalleri.....	57
4.7: 3510 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık sinyalleri.....	58
4.8: 1900 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı sinyalleri	64
4.9: 2880 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı sinyalleri	70
4.10: 3510 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı sinyalleri	77
4.11: 1900 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik sinyalleri	84
4.12: 2880 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik sinyalleri	91
4.13: 3510 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik sinyalleri	97

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

Sayfa

1.1: Diagnostik ve Prognostik arasındaki farklılık algısı	3
2.1: Genlik ölçüm tipleri	15
2.2: Titreşim ölçüm yönleri.....	16
2.3: Üç fiziksel durumun dalgaform karşılığı	18
2.4: Bir saniyelik titreşim sinyalinin spektrum görünümü.....	19
2.5: Bir dalgaformun basit dalgaformlarına ayrılması	19
2.6: Dalgaform-Spektrum dönüşümü.....	20
2.7: Temel frekans ve harmoniklerin örnek görünümü.....	20
2.8: Balanssızlık kusuruna ait spektrum ve dalgaform görüntüleri.....	21
2.9: Eksen kaçıklığı kusuruna ait spektrum ve dalgaform görüntüleri	22
2.10: Mekanik gevşeklik kusuruna ait spektrum ve dalgaform görüntüleri	22
2.11: Rulman hasarı spektrum ve dalgaform görüntüleri	23
3.1: Test düzeneği genel görünümü	25
3.2: Elektrik motoru	26
3.3: Çift emişli radyal fan.....	26
3.4: Kaplin genel görünüm.....	27
3.5: Titreşim ölçüm sistemi.....	27
3.6: Motor durum izleme cihazı (MDİC).....	28
3.7: Frekans dönüştürücü	28
3.8: Optik devir sayısı ölçer	28
3.9: Lazerli kaplin ayar cihazı	29
3.10: Plastik uçlu çekiç	29
3.11: Rulman frekansı hesaplama ölçüleri	31
3.12: MDİC parametre seçim paneli	32
3.13: MDİC parametre izleme paneli.....	32
3.14: MDİC elektriksel PSD frekans bantları grafiği.....	33
3.15: Test koşullarının modellenmesi	34
3.16: Fan kanatlarında ek yük ile balanssızlık sağlanması	35
3.17: Eksen kaçıklığı.....	35
3.18: Motor ön ayaklarında şim yardımıyla boşluk oluşturma (üst görünüş)..	36
3.19: Elektrik motoru ve kullanılan rulman	36
3.20: Şafta yataklanmış rulman.....	37
4.1: Birinci kritik devir sayısında rezonans verileri	44
4.2: İkinci kritik devir sayısında rezonans verileri	45
4.3: Üçüncü kritik devir sayısında rezonans verileri	46
4.4: Dördüncü kritik devir sayısında rezonans verileri	47
4.5: 1900 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık verileri	48
4.6: 2880 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık verileri	51
4.7: 3510 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık verileri	53
4.8: 1900 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık verileri.....	55
4.9: 2880 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık verileri.....	56
4.10: 3510 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık verileri.....	58
4.11: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı verileri.....	59
4.12: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm eksen kaçıklığı verileri.....	60

4.13: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı verileri.....	62
4.14: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm eksen kaçıklığı verileri.....	63
4.15: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı verileri.....	63
4.16: 1900 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum değişimi.....	65
4.17: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı verileri.....	66
4.18: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm kaçıklık etkisi verileri.....	67
4.19: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı verileri.....	68
4.20: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm kaçıklık etkisi verileri.....	69
4.21: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı verileri.....	69
4.22: 2880 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum diyagramları.....	71
4.23: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm kaçıklık etkisi verileri.....	72
4.24: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm kaçıklık etkisi verileri.....	73
4.25: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı verileri.....	74
4.26: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm eksen kaçıklığı verileri.....	75
4.27: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı etkisi verileri.....	76
4.28: 3510 min ⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum diyagramları.....	78
4.29: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm mekanik gevşeklik verileri.....	80
4.30: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm mekanik gevşeklik verileri.....	80
4.31: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm gevşeklik titreşim verileri.....	81
4.32: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm mekanik gevşeklik verileri.....	82
4.33: 1900 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik verileri.....	83
4.34: 1900 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik spektrum diyagramları..	85
4.35: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm gevşeklik verileri.....	86
4.36: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm mekanik gevşeklik verileri.....	87
4.37: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm gevşeklik verileri.....	88
4.38: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm mekanik gevşeklik verileri.....	89
4.39: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik verileri.....	90
4.40: 2880 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik spektrum harmonikleri..	92
4.41: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm mekanik gevşeklik verileri.....	93
4.42: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm gevşeklik verileri.....	94
4.43: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm mekanik gevşeklik verileri.....	95
4.44: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm gevşeklik titreşim verileri.....	96
4.45: 3510 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik verileri.....	97
4.46: 3510 min ⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik spektrumları.....	99
4.47: Referans trend verileri.....	104
4.48: Yağsızlık etkisi trend verileri.....	105
4.49: Balanssızlık etkisi trend verileri.....	106
4.50: 0,2 mm seviyesi eksen kaçıklığı trend verileri.....	107
4.51: 0,5 mm seviyesi eksen kaçıklığı trend verileri.....	107
4.52: 0,2 mm seviyesi mekanik gevşeklik trend verisi.....	108
4.53: 0,5 mm seviyesi mekanik gevşeklik trend verisi.....	108
4.54: 2880 min ⁻¹ devir sayısında referans PSD değerleri.....	110
4.55: 2880 min ⁻¹ devir sayısında yağsızlık etkisi PSD değerleri.....	111
4.56: 2880 min ⁻¹ devir sayısında balanssızlık PSD değerleri.....	112
4.57: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri.....	113
4.58: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri.....	114
4.59: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri.....	115
4.60: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri.....	116
4.61: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri.....	117
4.62: 2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,1 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri..	118

4.63:	2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,2 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri.	119
4.64:	2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,3 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri.	120
4.65:	2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,4 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri.	121
4.66:	2880 min ⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri.	122
A.0.1:	1900 min ⁻¹ devir sayısında referans titreşim verileri.....	136
A.0.2:	2880 min ⁻¹ devir sayısında referans titreşim verileri.....	137
A.0.3:	3510 min ⁻¹ devir sayısında referans titreşim verileri.....	138

ÖZET

DİNAMİK SİSTEMLERİN KESTİRİMCİ BAKIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN DURUM BAZLI İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Bu çalışmada, test uygulamaları ile arıza başlangıcı ana sebeplerine etki eden faktörler incelenmiş ve durum izleme teknikleri üzerinde durulmuştur. Bu hedefe yönelik olarak laboratuvar ortamında oluşturulan test düzenekleri ve testler araştırılıp, yapılacak araştırmaya ait testlerin gerçekleştirilebilmesi için özgün bir test düzeneği ve test planı oluşturulmuştur. Planlanan testler ile arıza ana sebep koşulları altında radyal ve aksenal yöne ait titreşim verileri ile elektriksel tüketim verilerinin toplanıp analiz edilmesi yoluyla iki farklı durum izleme tekniğinde karşılaştırmaya gidilmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Test çalışmaları için öncelikle endüstride mevcut bir sistem örnek alınarak test düzeneği oluşturulmuş ve mekanik gevşeklik, eksen kaçıklığı, balanssızlık, yağsızlık kusuru olmak üzere toplam dört kusur beş farklı seviyede üç farklı devir sayısında uygulamaya tabi tutulmuştur. Testlerin uygulanması aşamasında, önce ön testler yapılarak aksaklıklar tespit edilmiş ve bu aksaklıklar giderilip asıl testler gerçekleştirilmiştir. Testler esnasında titreşim verileri bilgisayar sistemine entegre edilmiş dört kanallı veri toplama kartı (VTK) ile, elektriksel tüketim verileri ise motor durum izleme cihazı (MDİC) ile eş zamanlı olarak toplanmıştır. Çalışma sonucunda bahsedilen kusurların tespitinde test şartları altında durum bazlı kestirimci bakım açısından titreşim analizi elektriksel tüketim analizine kıyasla daha başarılı bulunmuştur. Testlerde milimetrenin onda biri hassasiyetindeki değişimler incelenmiş ve kusur oluşumları başlangıç seviyelerindeki artış ortaya konmuştur. Çalışmada, hassas seviyelerdeki kusur oluşumlarının tespiti ve doğurduğu sonuçların önemi belirtilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, Titreşim, Elektriksel Tüketim, Subharmonik, Süperharmonik, Rezonans, Fourier, Dijital Sinyal

SUMMARY

CONDITION BASED INVESTIGATION OF THE FACTORS AFFECTING ON PREDICTIVE MAINTENANCE OF DYNAMIC SYSTEMS

(Ph.D. Thesis)

In this study, the factors influence on root causes of failure initiation are examined with the original test implementation and condition monitoring techniques are emphasized. In working toward this goal, the laboratory test setups and tests which have been created by international research bodies are examined and in order to realize a new research work, a unique test setup system and a test plan is created. In this target of the root cause failure detection, vibration data at radial, axial directions and electrical consumption data are collected through the analysis by comparing two different condition monitoring techniques. In this research, fault detection in modeling fault conditions and vibration, electrical consumption measurement have been let us examination in depth. Primarily, the test setup system has been created with inspiration by an existing system in industrial environment and total of four defects including mechanical looseness, misalignment, imbalance, and leanness defects are practised as modeling through five different levels, three different rotation numbers. At the stage in carrying out test phenomenons; firstly, preliminary tests were implemented in order to eliminate troubles detected; and resolved before actual tests were conducted. During the tests, data are collected simultaneously in vibration by four-channel data acquisition card (DAQ) and electrical consumption by motor condition monitoring (MCM) system which are integrated with an computer system. Respect to the study results; vibration analysis in detection of defects has been judged to be more successful in comparison with electric consumption analysis under the test conditions in perspective of condition based predictive maintenance. In tests, one tenth of a millimeter accuracy changes are examined and the increase at incidence of defects have been revealed in the baseline levels. In the study, it is mentioned that detection of failure initiations at sensitive levels and importance of consequent results.

Key Words: Predictive Maintenance, Vibration, Electrical Consumption, Subharmonic, Superharmonic, Resonance, Fourier, Digital Signal, Spectrum

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak insan sağlığı, doğumdan itibaren çeşitli tekniklerle, gelecek öngörülerini içerisinde kontrol altında tutulabilmektedir. Bununla beraber insan ömrü de uzayabilmektedir. Benzer şekilde, tıp alanındaki öngörü yöntemlerini ifade eden prognostik (tahmin) ve diagnostik (teşhis) tanımları bugün makine sağlığı alanına da girmiş bulunmaktadır. Tahmin ve teşhis odaklı teknolojilerle, mekanik sistemler muayene ve tahlil edilebilmekte, çalışma koşulları kontrol altında tutulabilmekte ve mekanik sistemlerin nominal ömrü korunabilmekte, hatta uzatılabilmektedir.

Birim ürün maliyetini düşürmek için çeşitli optimizasyon yöntemleri, lojistik, yedek parça, iş etüdü uygulamaları ve bunun yanında altı sigma, yalın üretim teknikleri ve yöneylem araştırması kapsamına giren diğer birçok metod uygulanmaktadır. Ülkemizde bu yöntemlerin henüz yaygın biçimde sistematik olarak yer bulamadığı düşünülmektedir. Bu yöntemlerin yanında öncelikli olarak işletmelerin başlıca giderlerinden olan bakım giderlerinin yenilikçi bakım teknikleri ile düşürülebilmesi birim ürün maliyetlerinde ciddi kazanımlar sağlayabilecektir. Yenilikçi bakım uygulamaları gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılırken, ülkemizde ise ilk yatırım maliyeti, konuyla ilgili uzman personelin bulunmaması ve bu uygulamalarla elde edilecek kazanımlar hakkında bilgisizlik gibi nedenlerle işletmelerde genellikle yer bulamamaktadır. Yenilikçi bakım tekniklerinden durum izlemeye dayalı kestirimci bakım tekniklerinin ülkemizde yaygınlaşması ile makine ömürleri uzatılabilecek, kaliteli ürün çıktısı artabilecektir, yedek parça stokları azaltılabilecek, birim ürün maliyeti düşebilecek ve iş sağlığı, güvenliğinde olumlu gelişmeler olabilecektir.

Yenilikçi durum izleme tekniklerinin sadece büyük işletmelerde değil, küçük ve orta büyüklükteki işletmelerde de yaygınlaşması yukarıda sayılan başlıca faydaların yanında arızalara bağlı elektrik kayıplarının önlenmesi, bakım-onarım işçiliği ve eksen kaçıklığı, balanssızlık, mekanik gevşeklik, rulman hasarları gibi mekanik hata

kaynaklı plansız duruşlardan kaynaklanan üretim kayıplarının önlenmesi gibi daha birçok fayda sağlayacağından sürdürülebilirliğe önemli katkılarda bulunacaktır.

1.1 Tezin Amacı

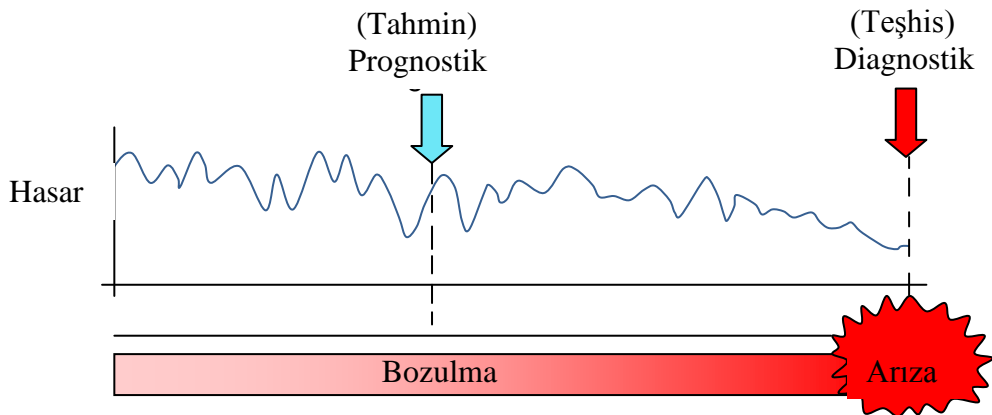
Bu tez çalışması ile endüstride sıkça karşılaşılan balanssızlık, eksen kaçıklığı, mekanik gevşeklik, rulmanda yağsızlık problemlerinin laboratuvar ortamında ideale yakın şartlarda geleneksel titreşim tekniği ve daha yeni durum izleme tekniklerinden olan elektriksel tüketim tekniği ile karşılaştırmalı olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu kusur tipleri üzerinde farklı devir sayısı etkisinin araştırılması çalışma kapsamını genişletmiştir. Teknolojik alt yapının yardımıyla yapay hasarlar oluşturularak titreşim ve elektriksel tüketim (akım, gerilim) sinyallerine dayalı iki farklı durum izleme tekniği etkinliklerinin araştırılmasına imkan verilmiş ve bu konuda detaylı bilgi edinilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Daha önce yapılan akademik çalışmalar incelendiğinde, zaman bazlı kestirimci bakım ağırlıklı araştırmaların çoğunlukta olduğu görülmüştür, bu çalışmada ise durum bazlı kestirimci bakım ön plana çıkmıştır. Çalışmada, durum bazlı kestirimci bakımın uygulanması ve ilgili teknolojilerin önemi vurgulanmaya çalışılmıştır.

Ayrıca, insan sağlığında teşhis hatalarının ölümcül sonuçlara kadar gidebildiği gibi makine sağlığında da teşhis hataları hem maddi kayıpların hem de can kayıplarının meydana gelmesine yol açabilmektedir. Çalışmada bu hususun önemi göz önüne alınarak, testler için planlanan kusur tiplerine ait veriler geniş bir spektrumda incelenmiştir. Çıkan sonuçlar, oluşan kusurların farklı koşullar altında doğru tespitine katkıda bulunacaktır. Meydana getirilen kusurların etkileri hem dalgaform, hem de spektrum görüntüleme teknikleri ile irdelenmiştir.

En son teknolojik gelişmelere dayanan durum izleme tekniklerinin karşılaştırmalı olarak irdelenmesi bu konudaki yeni çalışmalara zemin hazırlayacaktır. Çalışmada durum bazlı kestirimci bakım alanında yağsızlık, balanssızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik kusurlarının daha önce denenmemiş hassasiyette incelenerek, elde edilen bulguların bilim dünyasıyla paylaşılması ile bu konuda çalışan bilim insanlarına ve uygulama çalışmalarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

1.2 Kestirimci Bakım ve Literatürdeki Yeri

Diagnostik ve prognostik tanımlamaları makine mühendisliği alanına tıp alanından transfer edilmiştir ve bu tanımlamalar ilerlemekte olan bakım teknolojilerinin simgelerinden olmuşlardır. Tarihi olarak, prognostik ve sağlık yönetimi (PSY) konsepti ilk defa tıp alanında kullanılmıştır. Medikal prognostik, hastalık seyrinin geleceğe dönük olarak gerek doğal gidişatının, gerekse tedavi sonrası gidişatının tahmin edilmesi olarak tanımlanmıştır [1]. Mekanik ekipmanlarda meydana gelen arızaların ana sebeplerine inmeye yönelik olarak sensörler ve diğer hesaplama araçları ile sinyaller toplanıp analiz edilebilmektedirler. Diagnostik olarak tanımlanan arızanın ortaya çıktıktan sonra tespit edilebilmesi duruşları ve makine hasarlarını yeterince engelleyememektedir. Duruşlardan kaynaklanan maddi kayıpların önlenmesi ve makine ömrünün en uzun seviyede tutulabilmesi Şekil 1.1’de görüldüğü gibi arıza oluşmadan çok daha önce elde edilen verilerin analizine dayalı öngör ve önle olarak da ifade edilebilen prognostik metodolojisi ile sağlanabilmektedir [2]. Prognostik, en basit tanımıyla, komponent bozulması başlangıcı göstergelerinin tespiti ve görüntülenmesi ile sürekli olarak doğru öngörüler yapılabilmesi olarak nitelenebilir [1]. Prognostik ve sağlık yönetiminin gelecekteki gelişimi, mühendislik dışındaki farklı alanlardan da karşılıklı olarak etkilenecek ve daha da yaygınlaşacaktır [3]. Çoğunlukla bakıma dönük gelişmelerin takip edilmesi yüksek maliyetler getirebileceğinden dolayı, işletmelerde gider kalemlerini azaltmak düşüncesiyle geri planda bırakılan bir uygulama olmuştur. Kimi endüstrilerde bakım bölümü ikinci hatta birinci sırada maliyet oluşturan birimdir [4].



Şekil 1.1: Diagnostik ve Prognostik arasındaki farklılık algısı [1]

Sürekli üretim süreci, yüksek kullanılabilirlik oranı ve üretimde plansız duruşlara neden olan beklenmeyen arızaların önlenmesini gerektirir [5].

Bakım stratejileri geniş kapsamda, düzeltici ve önleyici bakım olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadırlar [6]. Arıza meydana gelmeden önlenmesini amaçlayan grupta yer alan kestirimci bakım; karar mekanizmalarına destek amacıyla işlevsel makinalara ait seçilmiş parametrelere dayalı olarak makinaların işleyiş ve bakımla ilgili verilerinin analiz, karşılaştırma, görüntülenmesi düzeyinde aralıklarla ya da sürekli olarak algılandığı, ölçüldüğü, kaydedildiği bir bakım politikasıdır [7]. Düzeltici bakım ise makine duruşlarından dolayı yüksek seviyelerde üretim kayıplarına ve tamir, değiştirme nedenli bakım maliyetlerine neden olmaktadır [8].

Makine operasyonel yaşam döngüsü boyunca makine türüne has genellikle izlenebilen hasarlara uğrar. Makine durum izleme teknolojisi, çoğunlukla titreşim bazlı olmak üzere semptomatik belirtilerin toplandığı ve ölçüldüğü makine durum alanının incelendiği ve değerlendirildiği bilim dalıdır [9].

Durum bazlı bakımın kalbi, belirli tip sensörler ve göstergeler kullanarak sinyallerin sürekli görüntülenmesini sağlayan durum izleme sürecidir [10].

Durum izleme tekniğinin temeli, bozulma süreçleri göstergesi olan ekipman sensör ölçümlerinin okunması ile bazı özelliklerin tanımlanmasına ve bu özelliklerin uygun durum izleme tekniği ile ekipman sağlığının anlaşılmasına dayalıdır [11].

Dönen elemanlı makinalarda; imalat, montaj ve tolerans hatalarından kaynaklanan kusurlar nedeniyle ortaya çıkan ısıl birikimler, aşınma, gevşeklik vb. belirtiler başlangıç safhasında tespit edilemezse arızaların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Genelde kendini rotor üzerinde gösteren arıza başlangıçlarının tespiti için model ve sinyal bazlı metodlar kullanılmaktadır. Arıza tespit edildikten sonra, arıza safhasını detaylı olarak analiz edebilmek için arızanın tam yeri ve şiddeti hakkında bilgi edinilmelidir. Dönen elemanlı herhangi bir makinadaki balanssızlık, eksen kaçıklığı, çatlak vb. kaynaklı kusurlar titreşim sinyallerine neden olmaktadır. Bu gibi kusurlar çoğunlukla sadece titreşime dayalı incelenmiştir [12]. Zaman/gerilim, sıcaklık, akustik emisyonlar [13] ve ultrasonik inceleme, elektriksel akım yoğunluğu vb. değişimlerin de geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Bu ölçüm parametrelerinin işlenmesinde geleneksel sinyal işleme teknikleri dışında fazla bir gelişme olmamasından dolayı prognostik yaklaşım daha çok bu alanla sınırlı kalmıştır [14].

Başlangıç seviyesindeki mekanik kusurlardan çatlak ya da kırık rotor barları, küçük rulman hasarları ve rotoru tamamen bloke etmeyen eksen kaçıklıkları, motorun kararlı çalışması esnasında artan akım tüketimi ve ısı artışına yol açabilir [15].

Elektronik ve bilgisayar sistemlerinin gelişimiyle beraber, ekipmanın genel durumunu kontrol altında tutma amaçlı, arıza meydana gelmeden tespiti ve bakım masraflarını azaltmaya dönük durum bazlı bakım metodolojisi doğmuştur. Muhtemel arıza parametrelerine ait veriler sinyal analiz teknikleri ile görüntülenip normal ve normal olmayan durumlar karşılaştırılır. Sinyal analiz teknikleri uygulamalarında da titreşim analizi, yağ analizi, enerji tüketimi, sıcaklık değişimi, gürültü analizi gibi tekniklerden makinenin durumunu göstermeye uygun olanlar kullanılır [16]. Durum izleme teknikleri ile arızanın erken tespit edilmesi ve rulman durumunun izlenmesinde titreşim, akustik ölçümleri, sıcaklık değişimleri, aşınma döküntüleri gibi parametreler kullanılmaktadır. Bunların içerisinde en yaygın kullanılan metod titreşim analizidir. Zarar görmüş rulmanlarda, zaman alanındaki titreşim analizinde kareler ortalamasının karakökü ($KOK=RMS$) değeri incelemeye tabi tutulabilmektedir [17].

Makine titreşim cevabının en ufak yapısal ya da süreçsel değişime duyarlı olması nedeniyle, işletmelerde titreşim analizi en popüler ve kabul gören metodolojilerdendir [18].

Dinamik sistemlerde titreşim genliğini ve frekansını kontrol eden dış kuvvet ve sistem dinamik karakteristikleri olmak üzere iki ana sebep bulunmaktadır. Bu sebeplerden herhangi birini değiştirmek sistemde meydana gelen titreşim tepkisini de değiştirecektir. Dışarıdan oluşan kuvvetler periyodik, harmonik ve gelişigüzel olabildiği gibi darbe ya da itici yüklemeler kaynaklı da olabilmektedir [19].

Genellikle, süren ve sürülen ekipmanlar birbirlerine elastik kaplin gibi mekanik elemanlarla eşleştirilmiştir. Kaplinlerde eksen kaçıklıkları, makine konstrüksiyonunu etkileyen yüksek titreşimlere sebep olabilmektedir [20]. Pratik uygulamalarda, indüksiyon makinelerinde elektriksel, çevresel, mekanik ve ısı gibi önlenemeyen gerilmeler indüksiyon makinelerinin bazı parçalarında kusurlar meydana getirmektedirler [21]. Bakım planları indüksiyon makinelerinde var olan kusurların erken döneminde teşhisi ve duruşların önlenmesi amacıyla durum izleme bazlı olarak hazırlanmaktadır [22].

Farklı araştırmacılar, stator akım görüntülemenin motora müdahale edilmeden farklı göstergeleri temin edebileceğini belirtmişlerdir. Bu teknik, teşhis için bir indüksiyon motorunun stator akımı spektral analiz sonuçlarını baz almaktadır [23].

1.3 Konuyla İlgili nceki alışmalar

Günümüzdeki en önemli araştırma konularından biri tükenmekte olan enerji kaynaklarıdır. Düşük enerji sarfiyatı üzerine yapılan çalışmalar ülke politikaları haline gelmektedir. Makinelerde enerji sarfiyatını etkileyen başlıca unsurlardan biri rulmanın çeşitli nedenlerle yük altında kalıp zorlanmasıdır. Araştırmacılar bu sarfiyatların önüne geçebilmek için makinelerde rulman arızasına yol açabilecek kusurları önceden tespit edip giderebilmeye yönelik farklı koşullar altında incelemelerine devam etmektedirler.

Heng vd. [24], durum izleme verilerinin kullanarak makine teşhis tetkik metodları kapsamında makinaların geri kalan ömür sürelerini hesaplama üzerine çalışmışlardır.

Jardine vd. [25], gelecek zamandaki muhtemel eğilimleri de tartıştıkları çalışmada, makine diagnostik ve prognostik alanında güncel uygulamalar hakkında bilgiler vermişlerdir.

Orhan vd. [26], fan motorlarındaki ve pompalardaki rulmanlar üzerinde iki dış bilezik, iki gevşeklik hatasını titreşim analizi ile incelemiştir. Arıza tespiti yapılırken genel titreşim değerlerinin yanıtıcı olabileceğini, asıl takip edilmesi gerekenin temel frekans ve harmoniklerindeki değişim olduğunu belirtmiştir. Ayrıca karmaşık olmayan makinelerde titreşim analizi ile balanssızlık, mekanik gevşeklik ve eksen kaçıklığı hatalarının hassaslıkla tespit edilebileceğini dile getirmiştir.

Karaçay ve Aktürk [27], çalışmasında açısal temaslı rulmanlarla yataklanmış bir sistemin önce rulmanlar sağlıklı iken daha sonra iç bilezik, dış bilezik, yuvarlanma elemanlarında kısmi ve yayılmış hata oluşumlarını farklı devir sayılarında test ederek titreşim tekniği ile araştırmıştır. Rulmanlarda herhangi bir kusur bulunmasa dahi titreşim tepkisi verdiğini ve spektrum grafiğinde bilya geçiş frekansı harmoniklerinde kendini gösterdiğinden bahsetmiştir.

Kalkat ve Yiğiter [28], iki ucundan rulmanlarla yataklanmış şaftta balanssızlıkları incelemiş ve dengeye getirilen sistemlerde titreşimlerin azaldığını gözlemlemiştir. Balanssızlık meydana gelen sistemlerde titreşimin artması nedeniyle hem enerji tüketimi yönünden hem de malzeme bozulması açısından kayıplar meydana geldiğini belirtmiştir.

Arslan vd. [29], açısal temaslı sabit bilyalı rulmanlarla yataklanmış 0,5 kW alternatif akım motoru ile tahrik edilen bir şafta ait rulmanın yüzeylerinde deformasyon meydana getirerek dış bilezik, iç bilezik ve rulman yüzey kusurlarını incelemiştir. Kusursuz rulmanlarda da yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan hasar frekansları görüldüğünü vurgulamıştır. Çalışmasında düşük devir sayılarında doğal frekans ile bilya geçiş frekansının üst harmonikleri kesişmiş ve meydana gelen rezonans nedeniyle titreşim büyüklükleri artmıştır.

Velarde-Suarez vd. [15], titreşim ve gürültü analizi ile 9,2 kW alternatif akım motoru tarafından 1480 min^{-1} devir sayısı ile sürülen tek emişli kanatları öne eğik fanla ilgili kusur tespiti çalışması yapmıştır. Çalışmada kusur oluştururken farklı debide dört farklı hava akışı kullanılmış, fanın emiş ağzı ve kanatlar üzerinde oynamalar yapılarak normal dışı durumlar oluşturulmaya çalışılmıştır. Hava akış miktarı ve değişen basıncın kanat geçiş frekansı da baz alınarak hesaplanan sinyal genliklerinde değişim meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Elbhah ve Jyoti [30], bir elektrik motoru ile tahrik edilen dört adet rulman ile yataklanmış birbirine akuple iki adet şafttan oluşan test düzeneğinde balanssızlık, eksen kaçıklığı, şaft çatlağı ve şaft aşınması kusurlarını iki farklı devir sayısında titreşim analizi ile incelemiştir. Bu kusurların ve rulmanların hasar görmesinin tespitinde titreşim analizinin istenen sonuçları verdiğini ifade etmişlerdir.

Yang ve Zhou [31], titreşim analizini dizel motorlar üzerinde uygulamalı olarak kullanmışlardır.

Bachshimid vd. [32], simulasyon ve gerçek test çalışmalarında balanssızlık ve moment etkilerini eş zamanlı oluşturup rulmanlar üzerinden titreşim analizi ile tespitine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda simulasyon ve gerçek test çalışması sonucunun her ikisinin de bu eş zamanlı etkilerin tespitini yapabildiğini ortaya koymuşlardır.

Boskoski vd. [33], titreşim analizi ile rulmanda yağsızlık tespiti üzerine yaptıkları çalışmalarda, rulmanlarda yağsızlığın tespit edilebileceğini ve hatta yağ kalitesinin de titreşim analizi yoluyla belirlenebileceğini vurgulamışlardır.

Al-Ghamd ve Mba [34], rulman bilezikleri yüzeyinde pürüzlülük tespiti testlerinde, akustik analiz yönteminin titreşim analizine göre daha erken tespit imkanı verdiğini belirtmiştir. Ayrıca, titreşim analiziyle tespit edilemeyen bu kusurun büyüklüğünün ve gelişiminin de akustik analizle tespit edilebildiği belirtilmiştir.

Tandon vd. [35], rulman dış bileziği hasarlarının tespitinde dört farklı durum izleme tekniğini karşılaştırmıştır. Sonucun etkinliği açısından akustik emisyon birinci sırada, şok vuruş metodu ikinci sırada, titreşim analizi üçüncü sırada ve stator akımı izleme dördüncü sırada yer aldığı tespit edilmiştir.

Han vd. [36], indüksiyon motorunda rotora ait balanssızlık, eksen kaçıklığı, rulman, stator arızalarını bir test düzeneğinde titreşim ve akım sinyallerine göre değerlendirmiştir. Durum izleme ve arıza tespitinde titreşim sinyallerinin akım sinyallerinden daha iyi performans verdiğini belirtmiştir.

Elbhah ve Sinba [37], iki farklı devirde bir elektrik motoru tarafından sürülen birbirine kaplinle bağlanmış iki şaft üzerinde eksen kaçıklığını titreşim analizi ile incelemiştir. Eksen kaçıklığı ve rulman hatalarının tespitinde titreşim analizinin olumlu sonuçlar verdiğini tespit etmiştir.

Hariharan ve Srinivasan [38], dönen elemanlı makinelerde eksen kaçıklığı hatasını inceleyebilmek için üç ayaklı elastik kaplinle eşleştirilmiş ve rulmanlarla yataklanmış şaft içeren bir test düzeneği kullanmıştır. Çalışmada, testte kullanılan 8,33 Hz, 16,67, 25 Hz ve 33,33 Hz elektrik sinyali frekanslarında eksen kaçıklığı etkisinin 2x harmoniğinde baskın çıktığını tespit etmiştir.

Patel ve Darpe [39], çalışmalarında dört rulmanla yataklanmış iki şaftın birbirine üç ayaklı elastik kaplin ile eşleştirilmesinden oluşan bir test düzeneğinde üç farklı elektrik sinyali frekansı 14,2 Hz, 16,534 Hz ve 24,8 Hz'te eksen kaçıklığı testleri yapmış ve titreşim spektrum analizinde 3x harmoniğinde en baskın değer gözlemlemiştir.

Xu ve Marangoni [40], eksen kaçıklığı ve balanssızlık etkisi altında esnek kaplin bağlantılı motor-rotor sisteminin tepkilerini baz alan bir model üzerinde çalışmışlardır.

Sinha vd. [41], iki rulmanlı bir makinenin esnek kaplinle bir motora bağlanmasıyla oluşturulan test düzeneğinde balanssızlık ve aksel kaçıklık etkilerini incelemişlerdir. Uyguladıkları metodla bu kusurların tespitinde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Randall çalışmasında [42], rulman bileşenlerine ait kusur frekansları hesaplanırken elemanların birbiri üzerinde kaymadığı, bunun yerine yuvarlandığı varsayıldığını ve gerçek ölçümlerde hesaplanan frekanslardan her zaman biraz sapma olabildiğini belirtmiştir.

Behzad ve Bestami'ye göre [43], dönen bir shaftın kritik devir sayısı dönmeyen halindeki doğal frekanslardan farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılığın oluşmasının altında yatan ana neden açısal momenttir. Dönen shaftlarda iç ve dış kuvvetler de doğal frekanslarda farklılıklar meydana getirebilmektedirler.

Green [44], açısal momentin esnek rotorlar üzerinde doğal frekans değişimi etkisini ilk inceleyen araştırmacı olmuştur.

Fearn ve Millsaps [45], endüstriyel uygulamalarda rezonansa karşı en çok kullanılan yöntemin motor devir sayısının kritik devir sayılarından hızlı bir şekilde geçmesini sağlamak olduğunu belirtmiştir.

Jimeng vd.'ne göre [46], makine sağlığı izleme metodu endüstriyel alanlarda verimlilik gibi çeşitli nedenlerle kendine yer bulmaktadır, ancak özellikle başlangıç seviyesindeki kusurların tespitinde makinenin çeşitli elemanlarından ya da çevresel etkilerden gelen sinyaller analizi güçleştirmektedir.

Littmann çalışmasında [47]; rulmanlardaki kusurların, üretimden kaynaklı pürüzlülük, dalgalılık, ölçülendirme toleransları, ekseni kaçık bilezikler gibi nedenlerden kaynaklı dağılık kusurlar olabileceği gibi yüzey temas yorulması kaynaklı bölgesel kusurlar da olabileceğini belirtmiştir.

Bai ve Xu [48], bilyalı rulmanlarla yataklanmış rotor sisteminin dinamik özelliklerini öngörebilmek için genel bir dinamik model ortaya koymuşlardır.

Lioulios vd. [49], bilyalı rulman rotor sisteminin dinamik davranışı üzerine devir sayısı dalgalanmalarının etkisini incelemişlerdir.

Wang vd. [50], beş serbestlik dereceli bilyalı rulman rotor sistemi üzerine sistem parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir.

Chen [51], bilyalı rulman ile yataklanmış balanssız rotorun lineer olmayan dinamik davranışını analiz etmiştir.

Movchan ve Filatov deneysel çalışmalarında [52], bilyalı rulman ile yataklanmış rotora ait belirgin subharmonik titreşimlerin tespit edildiğini bildirmişlerdir.

Lalwani [53] bilyalı rulmanlardaki dönen bilyalardan kaynaklanan subharmonik titreşimi analiz etmiştir.

Ehrich [54], yüksek devirli rotorda meydana gelen rulman boşluklarına bağlı yüksek katlardaki subharmonik titreşim davranışlarını incelemiştir.

Ji ve Leung [55], rotor manyetik rulmanlı sisteme ait lineer olmayan salınımlara ait süperharmonik rezonans şartları altında incelenmiştir.

Agaston çalışmasında [56], bir kuvvete ait frekans sistemin doğal salınım oranına yakın olduğunda, bu durumun gittikçe artan genlikte titreşim oluşmasına ve sistemin rezonansa girmesine yol açacağını belirtmiştir.

Forbes ve Randall [57], 19 kanatlı bir fanın basınç ve titreşim sinyallerini analiz ederek doğal frekanslarının hesaplanması üzerine çalışmışlardır.

Kostek'e göre [58]; dinamik sistemlerin analizinde genellikle ana rezonans durumuna odaklanılmakta ve diğer titreşim etkileri güvenli kabul edilmektedir. Ana rezonansın dışında doğal frekansları uyaran alt frekanslardaki titreşimlerin yol açtığı süperharmonik rezonanslar da meydana gelebilir. Sonuç olarak, lineer olmayan sistemler için geniş bir spektrumdaki rezonans durumları incelenmelidir.

Kıral tez çalışmasında [59], yağlayıcı madde varlığında bile birbirine temas eden iki yüzeye ait bağlı hareketle meydana gelen sürtünme kaynaklı titreşimlerin varlığına değinmiştir ve bu durumun aşınmaya yol açan sürtünme mekanizmasına ait kinematik eşleşmelerden kaynaklandığını ifade etmiştir.

Orhan tez çalışmasında [60], üretim yapan bir işletmedeki fan ve pompadan titreşim verileri toplayarak rulmanda bilezik hatası, mekanik gevşeklik ve balanssızlık; kaplinde ise eksen kaçıklığı durumlarını tespit edebilmiştir. Spektrum bölgesinde rotorla ilgili kusurları ilgilendiren rotor bölgesi, rulman kusurlarını ilgilendiren eleman geçiş bölgesi ve makineyle ilgili diğer hasarlar (sürtünme, kavitasyon vb.) ile erken rulman arızalarının tespitinde yüksek frekans bölgesi olarak isimlendirilen frekans aralıklarında değerlendirmelerin yapılabildiğinden bahsetmiştir.

Arslan doktora çalışmasında [61], rulmanlardaki bilyaların kafes frekansı ve katlarında titreşimler meydana getirebildiğini ve bu titreşimlere ait frekansların doğal frekanslarla çakışması ya da yeteri kadar yaklaşması durumunda rezonans durumlarının ortaya çıktığını belirtmiştir.

Karaçay doktora çalışmasında [62], hatasız rulmanda bile titreşimlerin meydana geldiğini ve bilya geçiş frekansları görüldüğünü; bilya boyutu farklılığından dolayı da kafes frekansı ve katlarında titreşim sinyallerinin görüldüğünü ve rezonanslara yol açabildiğine değinmiştir.

Fidlin araştırmasında [63], doğal frekans sinyalinin dış uyarı sinyalinden büyük olduğu durumlarda meydana gelen rezonansın süper harmonik rezonans olarak adlandırıldığını belirtmiştir.

Yapılan bu çalışma literatürdeki çalışmalar ile kusur tipleri ve seçilen tespit yöntemleri açısından benzerlik göstermekte; oluşturulan kusurlardaki hassasiyet seviyeleri, test edilen devir sayıları, elektriksel frekanslar ve tespit yöntemlerindeki yaklaşım ile ayrılmaktadır. Sonuçların, durum bazlı kestirimci bakım ile ilgili çalışma yapacak araştırmacılara, karşılaşılabilecekleri benzer durumlarla ilgili yol gösterebileceği düşünülmektedir. Özellikle de titreşim analizi ve elektriksel veri analizinin karşılaştırmalı olarak kullanıldığı yeni çalışmalar için ilgili literatüre katkıda bulunacaktır.

2. KESTİRİMCİ BAKIM VE ARIZA YAKLAŞIMI

Bu bölümde bakım stratejileri, kestirimci bakım teknikleri, titreşim ve testlerde uygulanan kusur tipleri tanıtılmıştır.

2.1 Bakım Stratejileri

Bateman [23] ve FAG'a [64] göre; bakım stratejileri reaktif (arizi), periyodik (önleyici) ve kestirimci bakım olarak üç grupta sınıflandırmıştır:

a) Reaktif Bakım: Bozulana kadar çalıştırma anlayışına sahip bakım türüdür, arızı bakım olarak da adlandırılır.

Avantajları:

- 1- Bozulana kadar herhangi bakım işlemi gerektirmez.
- 2- Makine elemanları, ömürleri bitene kadar faal olur.

Dezavantajları:

- 1- Sıklıkla ani duruşlar meydana gelir. Bu da bütün sistemin üzerinde kamçı etkisi yaratarak sistem etkinliğini düşürür.
- 2- Ansızın meydana gelen kırılmalarla makine bütün olarak zarar görebilmektedir.

b) Periyodik Bakım: Belirli aralıklarla bakım işleminin yapılmasıdır.

Avantajları:

- 1- Planlı aralıklar ile bakım yapıldığından dolayı muhtemel bazı arızaların ortaya çıkması önlenmektedir.

Dezavantajları:

- 1- Planlı bakım aralıkları uzun olduğunda, plansız duruş ihtimalleri artmaktadır.
- 2- Bakım aralıkları kısa ise gereksiz parça değişimleri, sökme-takma işlemleri ile maliyetler artmaktadır.

c) Kestirimci Bakım: Gelişmiş cihazlar ile titreşim, sıcaklık vb. parametrelere ait veriler toplanıp gelişimine bakılır.

Avantajları:

- 1- Periyodik bakıma gerek kalmaz.
- 2- Bakım süreci ihtiyaca göre planlanabilir ve bozulmanın önüne geçilebilir.
- 3- Makinenin faydalı ömrü diğer bakım türlerine göre daha fazla korunmuş olur.
- 4- Yedek parça maliyeti ve duruş süreleri kısalmır.

Dezavantajları:

- 1- İlk yatırım, eğitim, işletim ve servis giderleri vardır.
- 2- Yetişmiş uzman personel gereklidir.

Bevilacqua ve Braglia [65]'a göre ise; mekanik bakım stratejileri beş grup altında toplanmıştır; buna göre birinci strateji olan düzeltici bakımın özelliği makine bozulana kadar herhangi bir bakımın yapılmamasıdır. Arıza bakım olarak da isimlendirilen bu stratejide, makine bozulduğunda tamir ve bakım yapılır. İkinci strateji önleyici bakım ise makinelerin güvenilirlik karakteristiklerinin belirlenip periyodik bakım planı hazırlanması stratejisidir. Daha çok aşınmaya bağlı arızaların tespit edilmesine yarar, gerektiğinde tamir, gerektiğinde de parça değişimini sağlar. Üçüncü bakım stratejisi fırsatçı bakımın özelliği aynı makinenin parçalarında ya da aynı işletmedeki tüm makinalarda aynı anda toptan bakım yapılabilmesidir. Bu sayede bir seferde tüm sistemler kapatılıp bütün elemanlar bakıma alınabilir. Dördüncü bakım stratejisi olan durum bazlı bakımın en temel özelliği makine durumunun gerçek zamanlı olarak çeşitli enstrümanlar ve veri toplama sistemleri ile izlenebilmesidir. Alınan ölçümlere ya da trende göre sistem bakıma alınabilir.

Beşinci bakım stratejisi ise zaman bazlı kestirimci bakım tekniğidir. Durum bazlı bakımdan farkı zamana dayalı toplanan verilerle geçici trend seyri yapmaktır.

2.2 Kestirimci Bakım Teknikleri

Mobley'e göre; günümüzde kestirimci bakım anlayışında en temel durum izleme tekniği titreşim görüntülemedir. Bunun yanında titreşim görüntüleme tekniğine destek olmak amacıyla görsel inceleme, termografi, triboloji, titreşim görüntüleme, elektriksel test, ultrasonik inceleme ve bazı diğer tahribatsız test tekniklerine başvurulmaktadır. Görsel inceleme endüstriyel alanda kullanılan ilk kestirimci bakım tekniğidir. Endüstriyel devrimle beraber, bakım personeli periyodik olarak çıkabilecek arızaları tahmin edebilmek amacıyla mekanik ekipmanların kritik noktalarında gözle muayene yapmışlardır. Bu teknik hala kestirimci bakım uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır. Termografi, sadece elektriksel sistemlerin değil makinaların, konstrüksiyonların ve sistemlerin de izlenebilmesine katkıda bulunan bir kestirimci bakım tekniğidir. Ekipmanlardan yayılan kızılötesi enerjiyi sıcaklık değişimlerine göre ayırt etmeyi sağlar. Eğitimli bir personel de bu veriyle arıza başlangıcına dair fikir yürütebilecektir. Triboloji terimi makinaların rulman yağlama rotor destek yapısını kapsayan genel bir terimdir. Tribolojinin kestirimci bakımda yer almasıyla ilgili genel anlamda makine yağı analizi ve aşınma partikül analizi olarak iki ana teknik uygulanmaktadır. İşletmelerin çoğunluğunun elektromekanik sistemlere dayalı olması, titreşim analizini en temel arıza tespit metodlarından biri haline getirmektedir. Doğru kullanıldığında titreşim analizi en güçlü tespit metodu olarak görevini yerine getirmektedir. Kendi içinde dalgaform ve spektrum görüntüleme imkanı olması, en küçük değişimlerin bile algılanmasına izin vermektedir. Titreşim tekniğinin yanında, özellikle elektrik motorlarındaki kusurların tespiti amacıyla elektriksel tüketim verilerine göre analiz yapılması gereklidir. Ultrasonik inceleme titreşim görüntülemeyle benzer şekilde belirli frekanslarda gürültü ölçümü ve analizini içerir. Titreşim analizinden farkı, çok daha yüksek frekanslarda ölçüm yapılması ve daha çok genel gürültü ölçümü ve sızıntı tespitleri için kullanılmasıdır. Yapılan araştırmalara göre rulman arızalarının tespitinde titreşim analizine göre daha efektif olduğu görülmektedir [66].

2.2.1 Titreşim analizi

Analiz esnasında kullanılan bazı terimlerin açıklamaları pratikte şu şekilde yapılabilir;

Deplasman (m) : Bir yapının referanstan veya durağan pozisyonundan uzaklığıdır.

Hız (m/s) : Deplasman genliğinin zamana bağlı değişimidir.

İvmelenme (m/s²) : Hızın zamana göre değişimidir.

Frekans (Hz) : Verilen olayın, bir birim zaman içindeki devrinin sayısıdır.

Harmonikler: Spektrumda mevcut dönen bir rotor bulunduran sisteme ait temel devir sayısındaki titreşim frekansı ve katlarıdır.

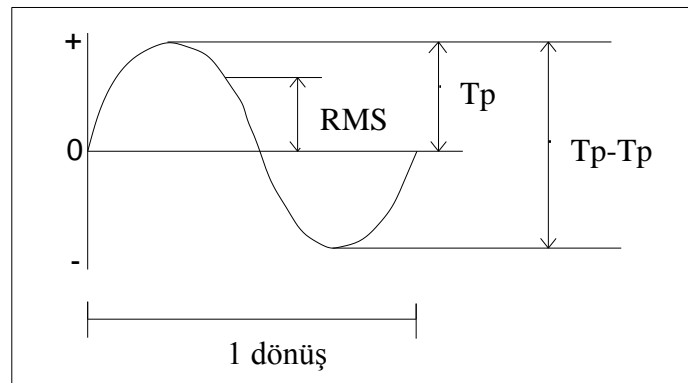
Verilen bu tanımlamaları analiz elemanı olarak kullanarak olacak arızayı önceden tespit edebiliriz [67].

2.2.1.1 Titreşimin genliği

Titreşim genliği, harmonik titreşimde hareketin ortalama değerden en fazla ayrıldığı miktardır, Şekil 2.1’de görsel tanıtımı yapılmıştır [68].

Titreşim genliği üç şekilde ifade edilir:

- Tepe-tepe (T_p-T_p) (İki tepe arasındaki uzaklık): Kütlenin titreşim esnasında ulaştığı maksimum ve minimum iki uç nokta arasındaki uzaklıktır.
- Tepe (0- T_p) : Denge konumu ile tepe noktası arasındaki uzaklıktır.
- RMS (Root mean square) (Kareler ortalamasının karekökü): Titreşimin efektif değeridir. Elinizi titreşim yapan makina üzerine koyduğunuzda hissettiğiniz titreşim seviyesidir. Basit harmonik harekette 0- T_p değerinin 0,7071 katıdır.



Şekil 2.1: Genlik ölçüm tipleri

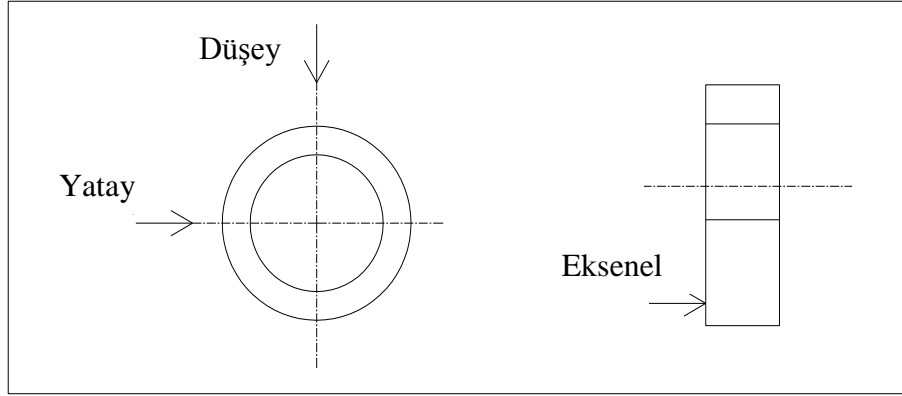
2.2.1.2 Doğal frekans ve rezonans durumu

Sistemin serbest titreşiminin frekansına doğal frekans denir. Sistemin doğal frekansını tamamen sistemin kendi parametreleri belirler.

Rezonans durumu, zorlama frekansı ile sistemin doğal frekansının eşit olduğu durumdur. Bu gerçekleştiğinde, sistemin titreşim genliği matematiksel olarak sonsuza gider. Fiziksel olarak ise sistemde büyük hasarlara neden olabilir.

2.2.1.3 Titreşim ölçüm yönleri

Ölçümler, ISO 10816-1 standardına göre Şekil 2.2’de görüldüğü gibi radyal (düşey, yatay) ve aksenal yönde olmak üzere üç yönde yapılır.



Şekil 2.2: Titreşim ölçüm yönleri

2.2.1.4 Titreşim analizi ile erken tespit edilebilecek bazı mekanik arızalar

Dönen elemanlı mekanik aksamlarda meydana gelen titreşim sinyallerinin analiziyle arıza tiplerine özgün karakteristiklere sahip dalgaform ve spektrum görüntülemeleri ile aşağıda belirtilen arıza başlangıçları tespit edilip izlenebilmektedir.

- 1) Balanssızlık
- 2) Kaplin ayarsızlığı veya ayarın bozulması
- 3) Mekanik gevşeklik
- 4) Yatak problemleri
- 5) Yağlama problemleri
- 6) Elektriksel problemler, manyetik alan bozukluğu
- 7) Rezonans

8) Dişli problemleri

Verilen arıza türleri dönen elemanlı makinelere ait titreşim analizi ile tespit edilebilen genel kusurlar olup arıza tipleri genişletilebilir.

Döner elemanlı mekanik sistemlerde meydana gelen titreşimler genel olarak imalat toleransları, boşluklar, çalışma esnasında temas eden hareketli makine parçaları arasında oluşan boşlukların dinamik etkileri ve döner, dalgalı hareket yapan elemanlardaki kuvvet dengesizliği nedenlerinden kaynaklanmaktadır.

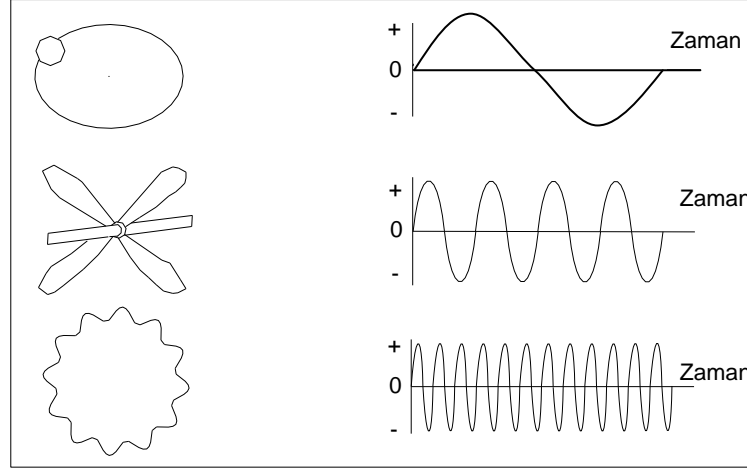
2.2.2 Sinyal (işaret) görüntüleme teknikleri

Titreşim görüntüleme şekilleri, zaman-bölgesi, frekans-bölgesi ya da zaman-frekans bölgesi grafikleri olarak sınıflanabilmektedir. Uzmanlar bu gösterim şekillerini inceleyerek rulman vb. gibi döner elemanlarda meydana gelen kusurları tespit edebilmektedirler. Veriler detaylı olarak incelendiğinde kesin teşhisin konulmasında oldukça yararlı olmaktadır [69]. Frekans bölgesi teknikleri, mekanik kusurların tespitinde çoğunlukla titreşim sinyalleri arasına gizlenmiş olan kusur karakteristik frekanslarını değerlendirmeye almaktadır [70].

2.2.2.1 Dalgaform görüntüleme (Zaman bölgesi)

Zaman bölgesi olarak da isimlendirilen bu grafik gösterim şeklinde, alınan titreşim sinyalleri tam zamanlı olarak gerçek değerleri ile görüntülenmiştir. Bu çalışmada kullanılan birimler SI birim sistemine göre, ivme için m/s^2 ve zaman için s'dir.

Dalgaform grafiklerinin oluşumuna dair görsel örnekleme Şekil 2.3'te verilmiştir. Bu şekle göre; elips formunda bir cisim üzerindeki bir noktaya ağırlık bağlandığında birim zamanda bir tam dönüşte dalgaform veri görüntülemesinde artı ve eksi yönde dalgalanan bir adet sinüs eğrisi gözlenmektedir. Dört kanatlı bir yapının bir tam dönüşünde ise dalgaform görüntüsünde birim zamanda dört adet sinüs eğrisi gözlenmektedir. Oniki dişle dairesel bir cisimin dönüşünde ise birim zamanda oniki adet sinüs eğrisi gözlenmektedir. Bu bilgiler ışığında herhangi bir cisimin dönüşü esnasında homojenliğini ve salınımı bozan unsur sayısı kadar birim zamanda titreşim sayısı meydana gelmektedir.



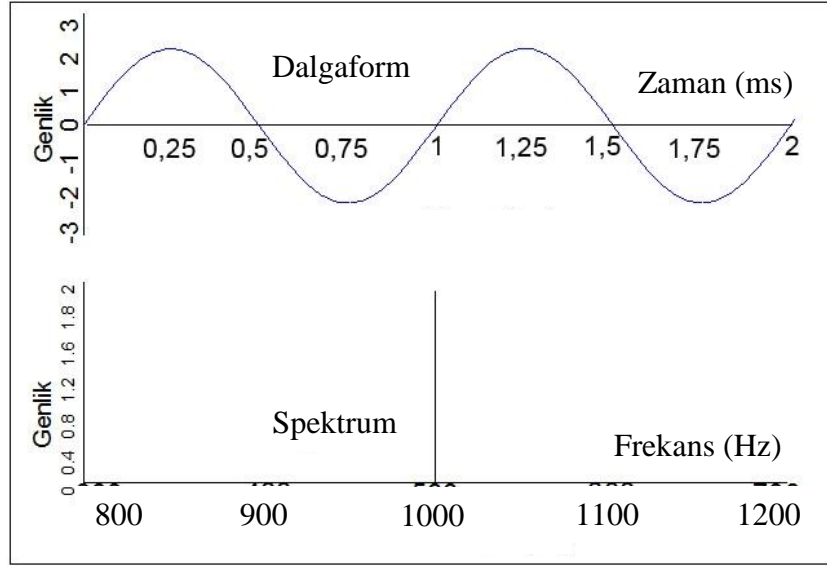
Şekil 2.3: Üç fiziksel durumun dalgaform karşılığı [68]

Zaman-bölgesi'nde en basit arıza tespit yaklaşımı kareler ortalamasının karekökü (KOK=RMS) yaklaşımıdır. Titreşim sinyalinin sahip olduğu efektif güç miktarı RMS olarak hesaplanmakta ve titreşime bağlı arıza teşhisinde yardımcı olabilmektedir. Özellikle dönen sistemlerdeki balanssızlıkların tespitinde çok faydalı olabilmektedir. Aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir [71]. Bahsedilen ifade, eşitlik (1.1)'de verilmiştir. Eşitlikte yer alan x terimi sinyal genlik değerini, n ise sinyal sırasını simgelemektedir.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (1.1)$$

2.2.2.2 Spektrum görüntüleme (Frekans bölgesi)

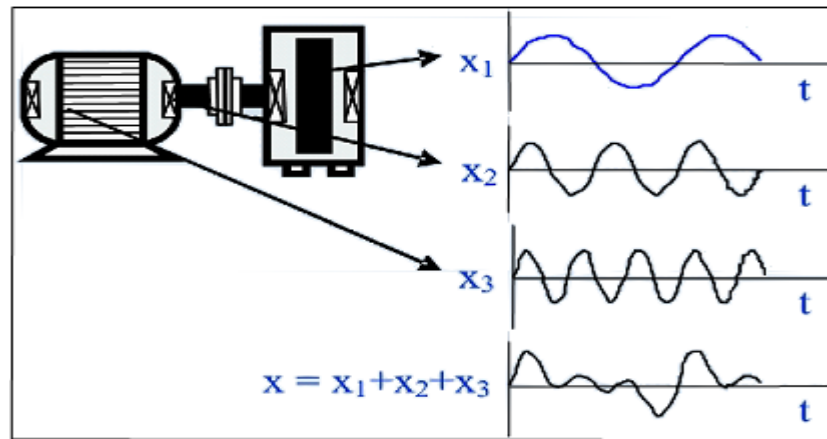
Frekans bölgesi ya da spektrum olarak tanımlanan bu grafik sisteminde ise, Joseph Fourier tarafından geliştirilen periyodik olarak tekrar eden aynı genlikteki titreşimlerin frekans ekseninde birim zamandaki tekrar sayılarının ve genlik ekseninde büyüklüklerinin belirtilmesi esasına dayanan Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD=FFT) kullanılmıştır. Bu çalışmadaki spektrum gösterim şeklinde kullanılan birimler SI birim sistemine göre ivme için m/s^2 ve frekans için Hz'tir. Bir sinyalin zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüşüm örneği Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: Bir saniyelik titreşim sinyalinin spektrum görünümü

2.2.2.3 Fourier tekniği

1822 yılında Baron Joseph Bastiste Fourier, karmaşık dalgaform sinyallerinin bileşenlerine ayrılarak Şekil 2.5'teki gibi basit dalgaform eğrilerine dönüştürülebileceğini bulmuştur. Şekilde de görüldüğü üzere bir elektrik motoru, kaplin ve fandan oluşan sistemde bu elemanların her birinin oluşturduğu titreşimler birbirinden ayırt edilmediği takdirde tek bir kompleks sinyal olarak algılanılır ki bu da analiz imkanını ortadan kaldırır. Kompleks sinyalin ayrıştırmaya uğrayan bu basit dalgaform sinyalleri de frekans düzlemine aktarıldığında spektrum görüntüleme tekniği ortaya çıkmıştır [72].

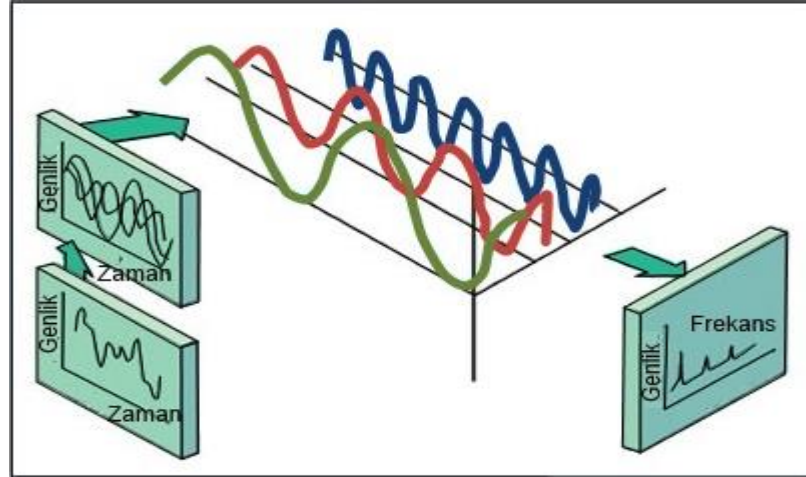


Şekil 2.5: Bir dalgaformun basit dalgaformlarına ayrılması [72]

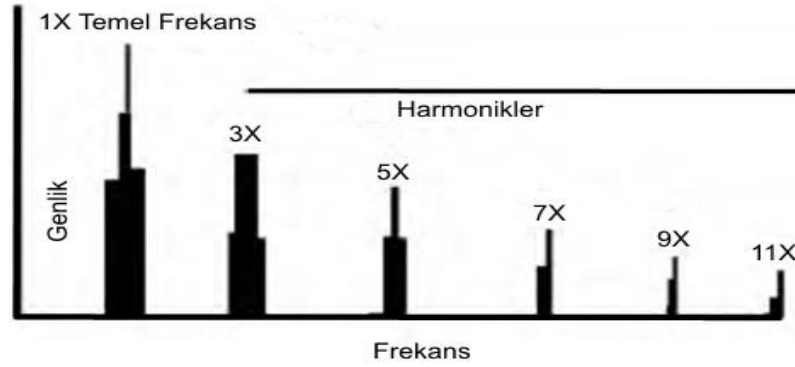
Şekil 2.5'te görüldüğü üzere dönerek dinamik davranış gösteren bir sistemde elektrik motoru, kaplin, sürülen ekipman kendine özgü frekanslarda titreşim sinyalleri meydana getirmektedir. Bu sinyaller titreşim sensörü tarafından birbirine geçmiş tek

bir sinyal olarak algılanır, kusur başlangıçlarının takip edilebilmesi için kompleks sinyaller bileşenlerine ayrılarak her bir elemana ait veriler tekil olarak incelenmelidir.

Joseph Fourier tarafından geliştirilen bu tekniğin ana prensibini Şekil 2.6'daki gibi dalgaform-zaman verilerinin frekans bileşenlerine dönüştürülerek genlik spektrum görüntüleme şeklini alması oluşturur.



Şekil 2.6: Dalgaform-Spektrum dönüşümü [68]



Şekil 2.7: Temel frekans ve harmoniklerin örnek görünümü [73]

Test verilerinin değerlendirmesinde kullanılan temel frekans, harmonik görünüm örnekleme Şekil 2.7'de [73] verilmiştir.

2.3 Test Edilen Kusur Tipleri

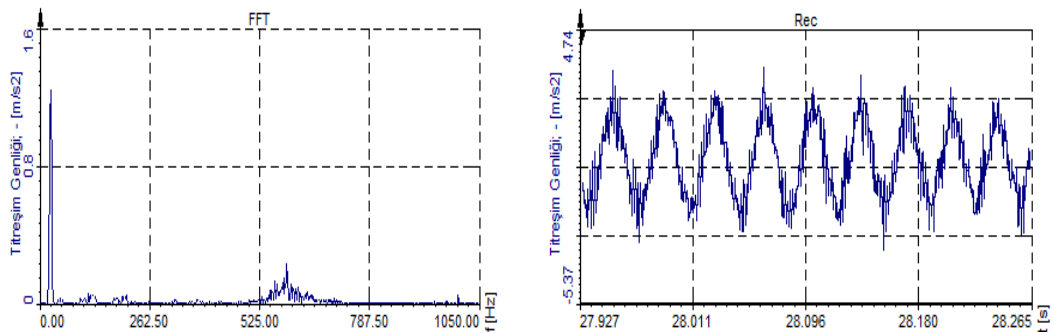
Testlerde incelenen kusur tiplerine dönük teorik bilgi bu kısımda verilmiştir.

2.3.1 Balanssızlık

İleri derecede yüksek titreşimin nedenlerinden biri balanssızlığın rotorda meydana getirdiği etkidir [46]. Şekil 2.8’de görsel tanıtımı yapılan bu tipte bir kusur, spektrum ve dalgaform grafikleri aracılığıyla izlenebilir.

Spektrum grafiğinde; Radyal (düşey, yatay) yönde alınan ölçümlerde, 1x frekansında baskındır. Balanssızlığı diğer arızalardan 1x harmoniğindeki sinyalde genlik artışı olması ve baskınlık ayırt eder.

Dalgaform grafiğinde; 1x periyodunda kendine özgü sinüs deseni görülür. Genelde başka arızaların türevi olarak ortaya çıkar. Şart olmamakla beraber dalgaform grafiğinde tekrar eden W harfi yapısı görülmektedir.



(a) Spektrum görüntüsü

(b) Dalgaform görüntüsü

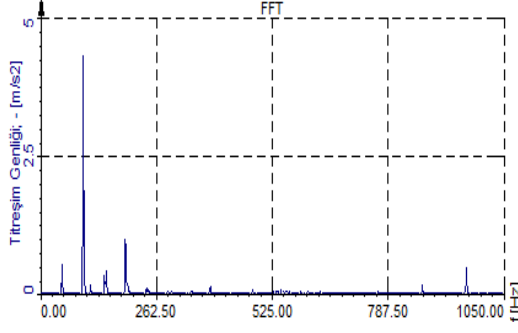
Şekil 2.8: Balanssızlık kusuruna ait spektrum ve dalgaform görüntüleri

2.3.2 Eksen kaçıklığı

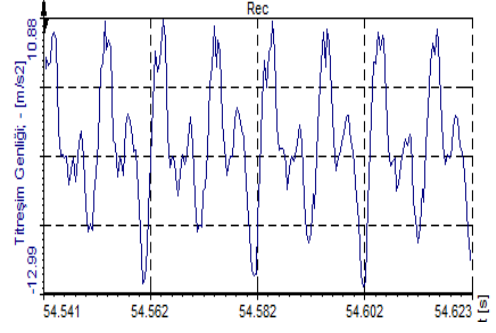
Açısal eksen kaçıklığı 1x harmoniğinde eksenel titreşim, paralel eksen kaçıklığı ise 2x harmoniğinde radyal titreşim meydana getirir. Kasıntı olarak da anılan eksen kaçıklıkları Şekil 2.9’da görüldüğü gibi çoğunlukla açısal ve paralel kaçıklık beraber olarak görülmektedir.

Spektrum grafiğinde; Radyal alınan ölçümlerde; 1x, 2x, 3x frekansında tepecikler görülür. 2x ya da 3x frekansındaki tepecik, 1x frekansı tepeciğinin yarısını geçmelidir.

Dalgaform grafiğinde; 1x periyodunda deve hörgücü deseni ya da M harfi görünümü bulunur. Hatalı rulman montajı, eğik shaft, yalpalı montaj, milde çatlak, makine üzerindeki gerilmeler, topal ayak gibi sorunlar da benzer işaretleri verir.



(a) Spektrum görüntüsü



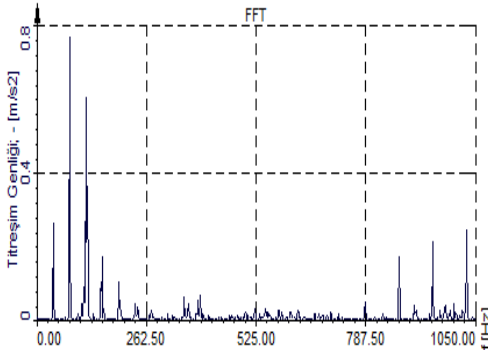
(b) Dalgaform görüntüsü

Şekil 2.9: Eksen kaçıklığı kusuruna ait spektrum ve dalgaform görüntüleri

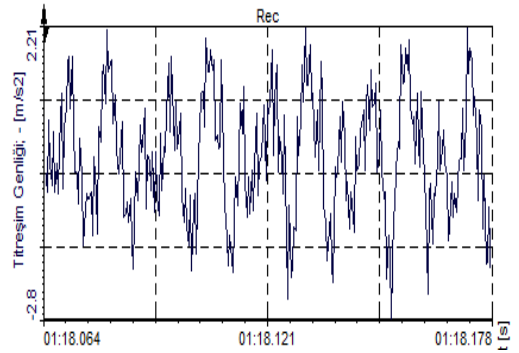
2.3.3 Mekanik gevşeklik

Spektrum grafiğinde; Yapı bağlantılarında çözümler/gevşemeler, Şekil 2.10'da görülen dönüş devri katlarında 8x frekansına kadar harmonikler üretir. Dönen kısımdaki çözümler; 0,5x harmoniklerinde göreceli olarak düşük tepelikler oluşturur. 2x, 3x,...,8x olabileceği gibi 2x, 3x, 3,5x, 4x, 5x, 5,5x,...,8x gibi de olabilmektedir.

Dalgaform grafiğinde; Düzensiz vuruş ve periyodik olmayan sinyaller görülmektedir.



(a) Spektrum görüntüsü



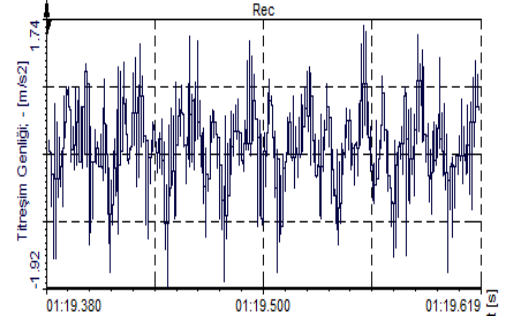
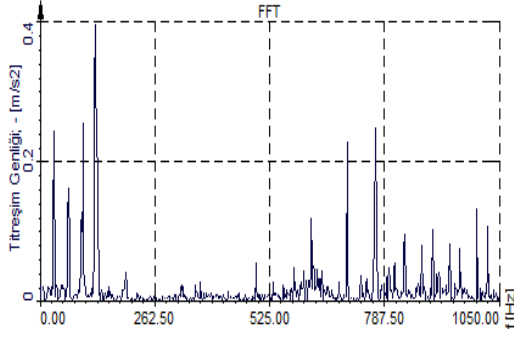
(b) Dalgaform görüntüsü

Şekil 2.10: Mekanik gevşeklik kusuruna ait spektrum ve dalgaform görüntüleri

2.3.4 Yağsızlık ve rulman etkileri

Spektrum grafiğinde; Temel devir sayısı katlarında oluşan ve oluşmayan, Şekil 2.11'de görüldüğü gibi kendine has yüksek frekanslarda harmonikleri olan ya da frekans düzleminde kabarma olan bir yapıya sahip olarak gözlemlenir. Orhan [60], yağsızlık durumunda aşırı aşınma meydana gelmesiyle beraber rulman bozulmalarının oluşabileceğini belirtmiştir.

Dalgaform grafiğinde; Mekanik gevşekliğe benzeyen düzensiz yığıntılı vuruntular verir.



(a) Spektrum görüntüsü

(b) Dalgaform görüntüsü

Şekil 2.11: Rulman hasarı spektrum ve dalgaform görüntüleri

3. MATERYAL VE METOD

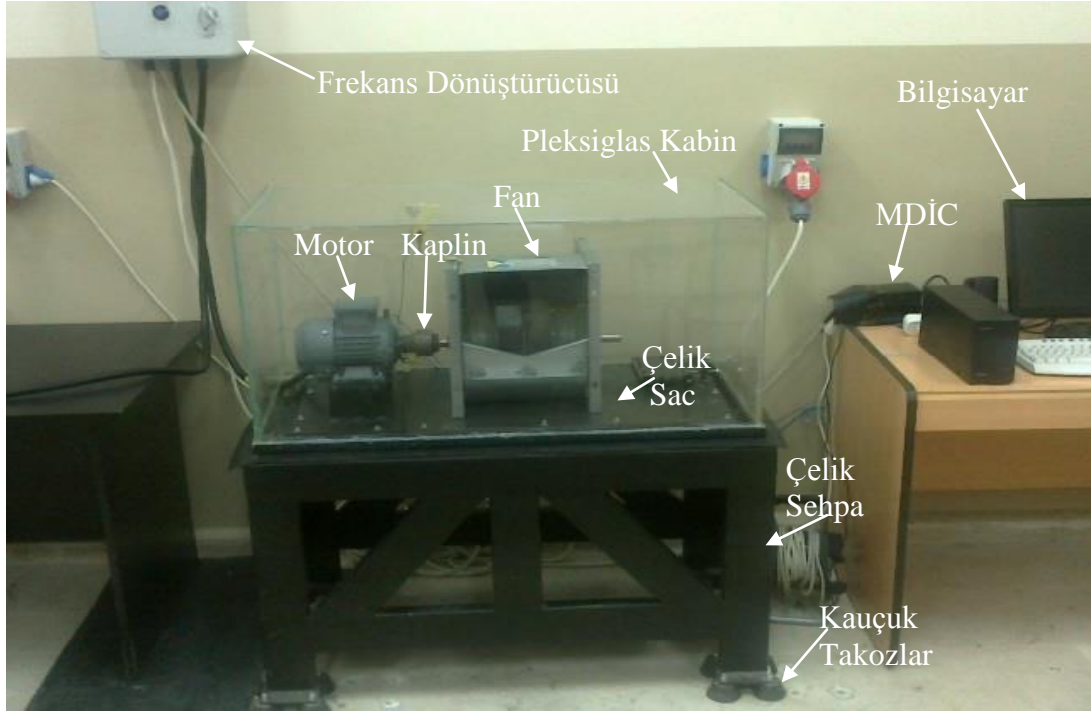
Testler gerçekleştirilirken, veri toplama kartı aracılığıyla titreşim ve motor durum izleme sistemi aracılığıyla da akım, gerilim sinyalleri eş zamanlı olarak toplanmıştır. Titreşim ölçümleri, elektrik motoruna yapıştırma yoluyla tespit edilen üç adet titreşim sensöründen radyal (düşey, yatay) ve eksenel yönde veri alınarak gerçekleştirilmiştir. Her testte üç farklı ölçüm yönünde veri alınmasıyla beraber, kusur tipine göre karşılaştırma alanı daraltılarak daha detaylı inceleme için sadece radyal (düşey) ve eksenel yöndeki ölçüm sonuçları incelenmiştir.

Motor durum izleme cihazı (MDİC), çalışmaya öğrenme modunda başlamakta ve motorun elektrik şebekesinden çektiği akım ve gerilim değerlerini baz alarak sistemin genel karakteristiklerini çıkartmaktadır. İkinci safha olan geliştirme aşamasında ise toplamakta olduğu yeni verileri öğrenme periyodunda topladığı akım, gerilim sinyalleri ile karşılaştırmaya başlamaktadır. Bu sistem, akım, gerilim sinyali değişimlerinin standart sapma değerlerini kullanarak trend grafiği ve elektriksel güç spektrum yoğunluğu (GSY=PSD) grafiği ile izlenebilmesini sağlamaktadır. Elektriksel PSD grafiklerinde yüksek, normal, motor ve anlık değerleri incelemek mümkündür. Motor durum izleme cihazı (MDİC) ile her frekansta trend görüntülemesi yapılabilmişken, öğrenme aşamasını 50 Hz frekansta gerçekleştirdiğinden dolayı elektriksel PSD görüntülemesi sadece 50 Hz'te gerçekleştiren testler için arıza bantları ile uyumlu çıkmıştır ve anlık değerlerin yüksek, normal ve motor değerleri ile karşılaştırılmasına imkan vermiştir.

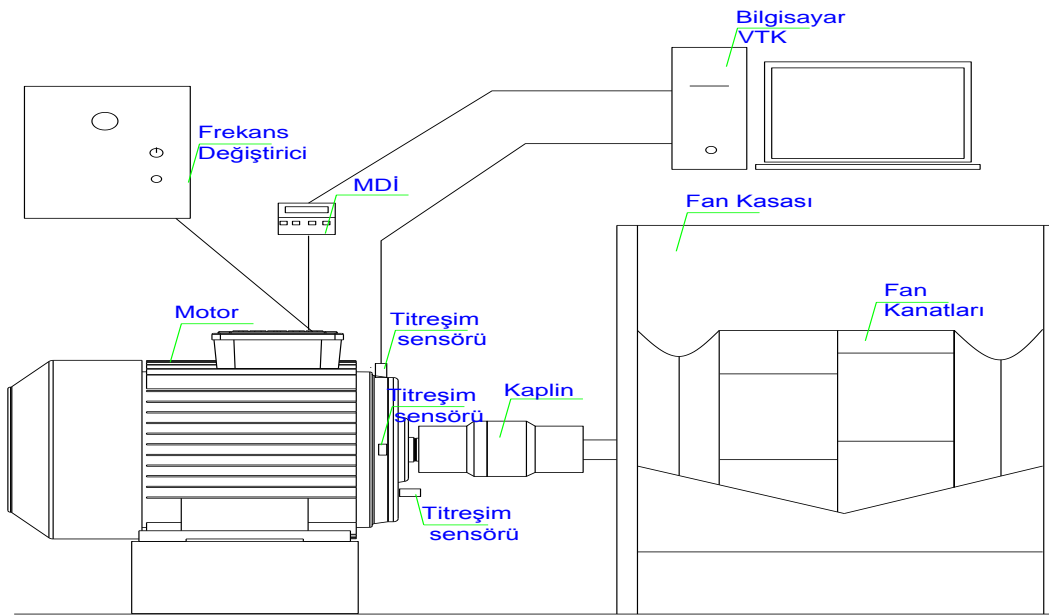
3.1 Test Düzeneği

Bu çalışmada kullanılan test düzeneği bir çimento tesisindeki bacagazı fanından esinlenerek oluşturulmuştur. Test düzeneği; AC indüksiyon motoru, çift emişli radyal fan, beş ayaklı elastik kaplin ve frekans dönüştürücüden meydana gelmektedir. Test düzeneği çelik sac ve stabil bir sehpa üzerine yerleştirilmiştir. Test düzeneğinin yerleştirildiği sac ile test düzeneği sehpası arasında çift katlı kauçuk malzeme

yerleştirilmiş, ayrıca sehpanın her ayağı dörder adet vakumlu kauçuk takozla zemin üzerine yerleştirilmiştir. Test düzeneği, dış ortamdaki korumak amacıyla pleksiglas kabin ile çevrelenmiştir. Sistem bir bütün olarak veri toplama kartı ve motor durum izleme sisteminin entegre edildiği bir bilgisayar sistemi ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 3.1’de test düzeneğinin gerçek ve şematik görünümü verilmiştir.



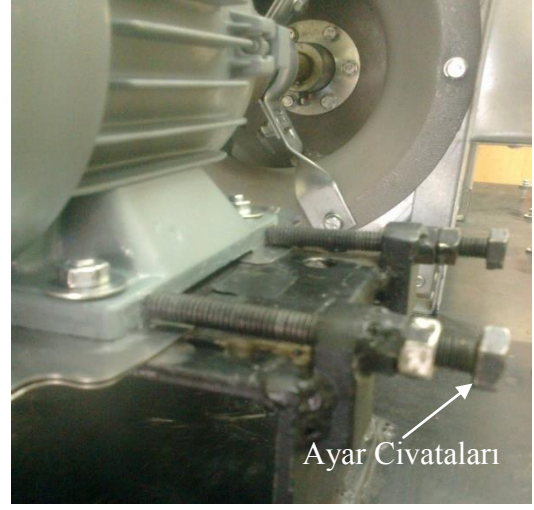
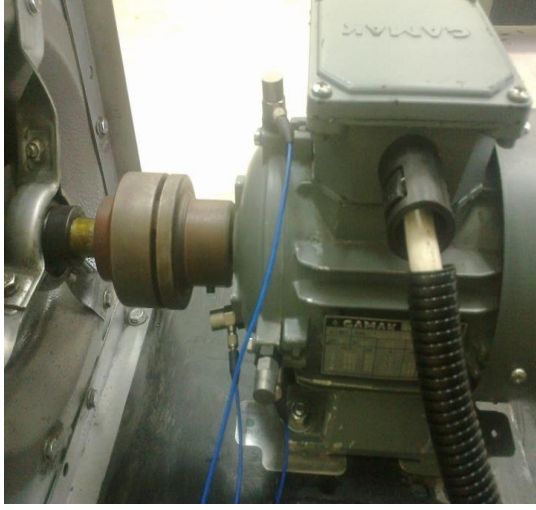
(a) Gerçek görünüm



(b) Şematik görünüm

Şekil 3.1: Test düzeneği genel görünümü

Motor: Gücü 0,37 kW, çekilen akım değeri 1,1 A ve nominal frekans değeri 50Hz olan bir 3-faz AC indüksiyon motorudur. Testte kullanılan motora ait görüntüler Şekil 3.2’de verilmiştir.



(a) Motor, sensör, kaplin, fan bağlantısı

(b) Konumlama Ayar civataları

Şekil 3.2: Elektrik motoru

Sürülen ekipman: Yilida marka SYQ 200R model çift emişli seyrek kanatlı radyal fan tipidir. Fan görüntüleri Şekil 3.3’te verilmiştir.



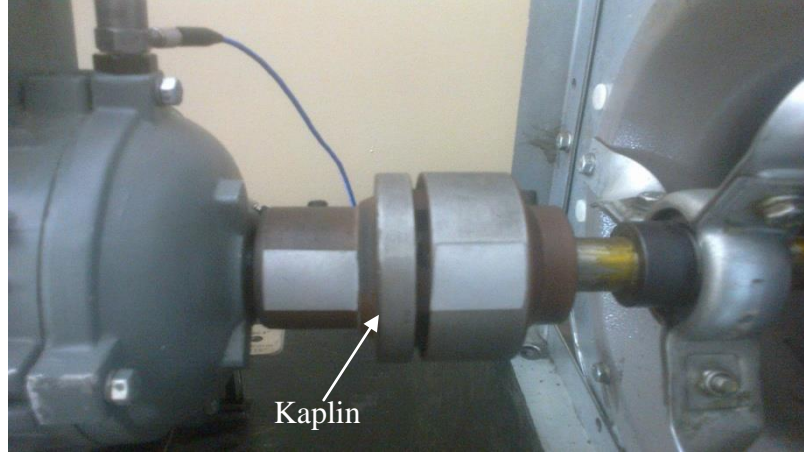
(a) Fan yan görünüş



(b) Fan ön görünüş

Şekil 3.3: Çift emişli radyal fan

Kaplin: Dökme demirden imal beş ayaklı elastik kaplin çeşididir. Kaplin görüntüsü Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4: Kaplin genel görünüm

Veri Toplama Kartı (VTK): Titreşim verilerini bilgisayar sistemine transfer etmek için Dewe-Orion (model: 0424-200) marka veri toplama kartı kullanılmıştır. Bu VTK dört adet eş zaman örnekleme kanala ve 24 bit çözünürlüğe sahiptir, verilerin işlenmesinde ve görüntülenmesinde kart ile uyumlu Dewesoft marka yazılım kullanılmıştır.

Titreşim ölçümleri zaman ve frekans bölgelerinde görüntülenmiştir. Çözünürlük: 24 bit , Birim: m/s^2 (ivme) ; FFT özellikleri: 1024 line (genlik) çözünürlük ; pencereleme tipi: blackman ve örnekleme oranı: 2500/s'dir.

Sensörler: Üç adet seramik ivme ölçer (PCB marka; model: 352C33) kullanılmıştır. Hassasiyet: 100 mV/g (10,2 mV/(m/s^2)), Frekans bandı: ($\pm 5\%$) 0,5-10000 Hz. Sensör görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



(a) Veri toplama kartı



(b) Titreşim sensörü

Şekil 3.5: Titreşim ölçüm sistemi

Motor Durum İzleme Cihazı (MDİC); İndüksiyon motorları için tasarlanmış Şekil 3.5'te görülen bir durum izleme cihazıdır. MDİC; akım, gerilim değişimlerinin standart sapma değerlerine göre sistemindeki kusur parametrelerine ait bilgileri görüntüleyebilen bir algoritmaya sahip MDİC-SCADA yazılımını kullanır.



Şekil 3.6: Motor durum izleme cihazı (MDiC)

Frekans dönüştürücü: Testlerde Şekil 3.7’de görülen motorun devir sayısını değiştirebilmek için ABB marka elektrik sinyali frekans dönüştürücüsü kullanılmıştır.



(a) Frekans dönüştürücü panosu



(b) Frekans dönüştürücü

Şekil 3.7: Frekans dönüştürücü

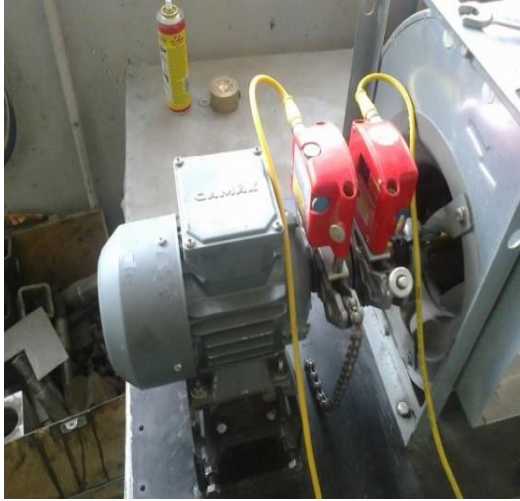
Devir Sayısı Ölçüm Cihazı: Milin dakikadaki devir sayısını ölçmek için Şekil 3.8’de görülen Testo 460 marka temassız optik devir sayısı ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Optik devir sayısı ölçer

Bilgisayar: 4 GB RAM ve sekiz çekirdekli işlemciye sahip bilgisayara VTK ve MDİC entegre edilmiştir, ilgili yazılımlar aracılığıyla verilerin analizi için kullanılmıştır.

Lazerli Kaplin Ayar Cihazı: Test düzeneği üzerinde, Şekil 3.9’da görülen SKF marka lazerli kaplin ayar cihazı ile kaplin ayarı yapılmıştır. Test düzeneği elemanları boyut olarak çok küçük olduklarından dolayı kaplin ayar cihazının uyumunda güçlüklerle karşılaşmıştır, uyumluluk derecesinde ayar yapılabilmektedir.



(a) Lazerli kaplin düşey eksen ayarı



(b) Lazerli kaplin yatay eksen ayarı

Şekil 3.9: Lazerli kaplin ayar cihazı

Çekiç: Şekil 3.10’da görülen plastik uçlu çekiç, test düzeneği bileşenleri ve zeminden kaynaklanabilecek doğal frekans sinyallerini tespit etmek amacıyla darbe testleri için kullanılmıştır.



Şekil 3.10: Plastik uçlu çekiç

Rulman; Testlerde elektrik motoru şaftına yataklanmış ORS 6202 model sabit bilyalı rulman kullanılmıştır. Tek sıralı sabit bilyalı rulmanların özelliği radyal, eksenel yükleri karşılayabilmesi ve yüksek devir sayılarında çalışabilmesidir. Eksen kaçıklıklarıyla uyumluluğu sınırlıdır, bu sebeple kullanıldıkları yerlerde eksen kaçıklıkları kontrol edilmelidir [69]. Test edilen rulmanın eksen kaçıklığıyla uyumu üretici firma tarafından fabrikasyon olarak ayarlanmıştır.

3.2 Elektrik, Titreşim Frekansı Harmonikleri ve Arıza Frekansları

Testlerde kullanılan frekansların Teorik (T) ve Uygulamalı (U) yaklaşık değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Teorik frekanslar, frekans dönüştürücüsü üzerinde dijital olarak ayarlanan değeri gösterirken, uygulama esnasında elde edilen verilere göre ise bazı kayıplara uğrayarak sayısal değeri değişen gerçek frekanslar ölçülmüştür. 1x olarak ifade edilen frekans değeri temel frekansın birinci katı (harmonigi) olarak kabul edilmektedir; 2x, 3x ve devamındaki değerler ise temel frekansın üst katlarıdır ve harmonik olarak adlandırılmaktadırlar. Tablo 3.1’deki f sembolü frekans dönüştürücü ile ayarlanan frekansı, h sembolü harmonik sıralamasını ifade etmektedir.

Tablo 3.1: Teorik ve uygulamalı harmonikler; (f: frekans (Hz) ; h: harmonik (Hz))

(h)	1x		2x		3x		4x		5x	
	T	U	T	U	T	U	T	U	T	U
32,7	32,7	31,74	65,4	63,48	98,1	95,22	130,8	126,92	163,5	158,7
50	50	47,61	100	95,22	150	142,83	200	190,44	250	238,05
63,8	63,8	58,59	127,6	117,18	191,4	175,77	255,2	234,36	319	292,95

Testler esnasında yapılan ölçümlerde devir sayıları 32,7 Hz için 1900 min^{-1} , 50 Hz için 2800 min^{-1} , 63,8 Hz için 3510 min^{-1} olarak ölçülmüştür. Test düzeneğine ait muhtemel arıza frekansları ve harmonikler hesaplanırken rulman ve fan kaynaklı titreşimler hesaba katılmıştır.

Rulman ve fana ait arıza frekansları, hesaplama eşitlikleri ve hesaplanan 1x temel frekansına ait harmonikler aşağıda verilmiştir, hesaplanan artan katlardaki harmonik değerleri verilerin yorumu ve karşılaştırma amacıyla EK-B bölümü Tablo B.1’de sunulmuştur.

Rulmanlarla ilgili frekans eşitlikleri :

$$\omega_{bpfo} = \omega_s \left(\frac{n}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{r}{d}\right) \cos \phi\right] \quad (1.2)$$

$$\omega_{bpfi} = \omega_s \left(\frac{n}{2}\right) \left[1 + \left(\frac{r}{d}\right) \cos \phi\right] \quad (1.3)$$

$$\omega_{bsf} = \omega_s \left(\frac{d}{2r}\right) \left[1 - \left(\frac{r}{d}\right) \cos \phi\right]^2 \quad (1.4)$$

$$\omega_c = \frac{\omega_s}{2} \left[1 - \left(\frac{r}{d}\right) \cos \phi\right] \quad (1.5)$$

$$\omega_{bpf} = \omega_s n_b \quad (1.6)$$

ω_{bpfo} : Dış bilezik geçiş frekansı (Hz), ω_{bpfi} : İç bilezik geçiş frekansı (Hz),
 ω_{bsf} : Bilya dönüş frekansı (Hz), ω_c : Kafes frekansı (Hz), ω_s : Mil frekansı (Hz),
 ω_{bpf} : Kanat geçiş frekansı (Hz), n: Bilya sayısı, r: Bilya çapı, ϕ : Temas açısı,
d: Bölüm dairesi çapı, n_b : Fan kanat sayısı = 10

ORS 6202 Bilya geometrisi:

Bilya çapı (r): 6 mm

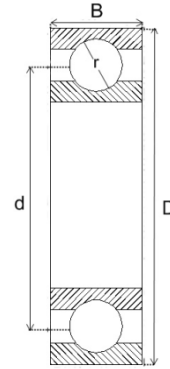
Bilya sayısı (n): 8

Bölüm dairesi çapı (d): 25 mm

Temas açısı (ϕ): 0°

Rulman dış bilezik çapı (D): 35 mm

Rulman genişliği (B): 11 mm



Şekil 3.11: Rulman frekansı hesaplama ölçüleri

Şekil 3.11’de sunulan ORS 6202 model rulmana ait temel arıza frekansları yukarıda verilen 1.2-1.6 eşitlikleri ile hesaplanarak Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2: Temel arıza frekansları

f (Hz)	ω_s (Hz)	ω_{bpf} (Hz)	ω_c (Hz)	ω_{bpfo} (Hz)	ω_{bpfi} (Hz)	ω_{bsf} (Hz)
32,7	31,74	317,4	12,56	100,48	161,12	62,2
50	47,61	476,1	19	152	248	98,16
63,8	58,59	585,9	24,24	193,95	316,45	125,26

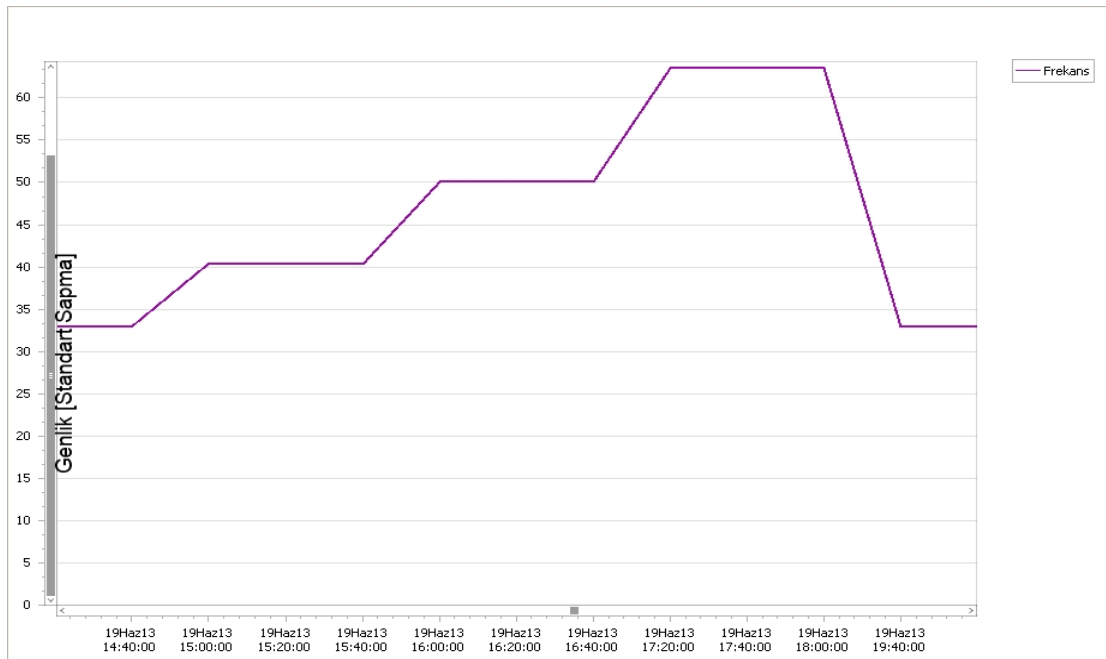
Motor durum izleme sistemiyle gerçekleştirilen elektriksel ölçümler, akım ve gerilim değişikliklerini takip ederek kusurların tespitine imkan vermektedir. Değişimler trend ve elektriksel PSD grafikleri üzerinde takip edilebilmektedir. Trend grafiğinde kusur tipi seçilip, meydana gelen değişiklikler standart sapma ve zamana göre

görüntülenebilmektedir. Elektriksel PSD grafik gösterimi ise standart sapma ve frekans düzleminden oluşmakta ve kusur tipleri temel frekansın katları (harmonikler) üzerinden takip edilebilmektedirler. Şekil 3.12 - Şekil 3.14 arasında MCM-SCADA yazılımının işlevsel yapısını anlatan parametre seçimi, trend gösterimi ve elektriksel PSD görüntülerine yer verilmiştir.

Ad	Renk	...	Ç...	...
Gevsek Zemin / Komponent		<input type="checkbox"/>	1	2
Balanssızlık / Aksel Kaçıklık / Kaplin / Rulman		<input type="checkbox"/>	1	2
Kayis / Kanat / Aktarma Elemanı / Sürülen Ekipman		<input type="checkbox"/>	1	2
Rulman		<input type="checkbox"/>	1	2
Rotor		<input type="checkbox"/>	1	2
Stator / Kısa Devre		<input type="checkbox"/>	1	2
Dahili Elektriksel Arıza		<input type="checkbox"/>	1	2
Harici Elektriksel Arıza		<input type="checkbox"/>	1	2
Diger		<input type="checkbox"/>	1	2
Vr rms		<input type="checkbox"/>	1	2
Ir rms		<input type="checkbox"/>	1	2
Voltaj Balansı		<input type="checkbox"/>	1	2
Akım Balansı		<input type="checkbox"/>	1	2
Güç Faktörü		<input type="checkbox"/>	1	2
Aktif Güç		<input type="checkbox"/>	1	2
Frekans		<input checked="" type="checkbox"/>	1	2
Motor Durumu2		<input type="checkbox"/>	1	2
THD		<input type="checkbox"/>	1	2

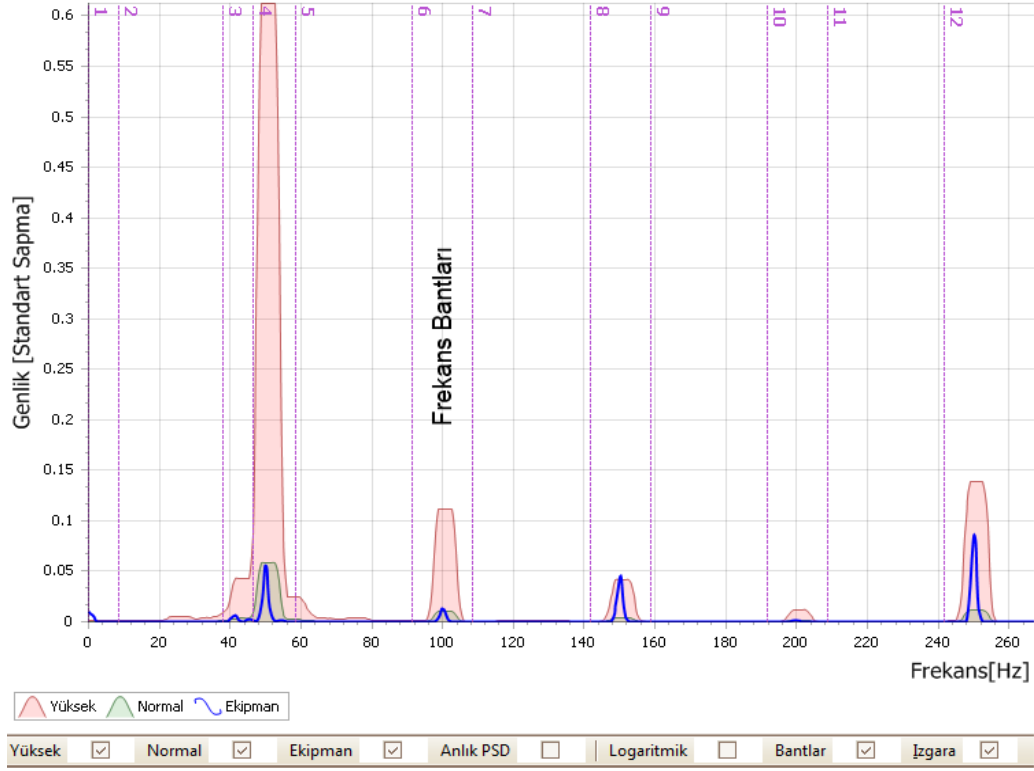
Şekil 3.12: MDİC parametre seçim paneli

Şekil 3.12’de görülen panel üzerinde trend görüntülenmesi istenen parametreler seçilebilmektedir. Şekil 3.13’te ise seçimi yapılan parametreye ait trend, X eksenini standart sapmayı ve Y eksenini zamanı ifade edecek şekilde görüntülenebilmektedir.



Şekil 3.13: MDİC parametre izleme paneli

Elektrik tüketim verileri analizinde trend görüntülemesi yapılırken önce Şekil 3.12’de görülen parametreler tablosundan incelenecek parametre ya da parametreler seçilir. Seçilen parametre ya da parametreler bir sonraki adımda Şekil 3.13’te verilen grafik dönüşümüyle trend gösterimi oluşur. Örnek olması açısından Şekil 3.12’de frekans parametresi seçilmiş ve Şekil 3.13’te frekans değişimi 32,7 Hz, 40,5 Hz, 50 Hz ve 63,8 Hz elektrik frekanslarındaki geçişler gözlenebilmektedir.



Şekil 3.14: MDİC elektriksel PSD frekans bantları grafiği

Şekil 3.14’teki grafik, elektriksel PSD verilerinin görüntülenmesini sağlamaktadır. Bu grafiğe göre temel frekans ve katlarında arıza türlerine göre genlik değişimi olmaktadır. Üretici firma tarafından temel frekans ve katlarına göre algoritmalanmış arıza frekans bantları aşağıda verilmiştir:

Frekans Bandı 1: Gevşek zemin / Komponent

Frekans Bandı 2: Kayış/Kanat/Aktarma elemanı/Sürülen ekipman 1

Frekans Bandı 3: Kayış/Kanat/Aktarma elemanı/Sürülen ekipman 2

Frekans Bandı 4: Rotor

Frekans Bandı 5: Kayış/Kanat/Aktarma elemanı/Sürülen ekipman 2/Rulman 1

Frekans Bandı 6: Balanssızlık/Eksenel kaçıklık/Kaplin/Rulman 1/Stator

Frekans Bandı 7: Rulman 2

Frekans Bandı 8: Diğer 2

Frekans Bandı 9: Rulman 3

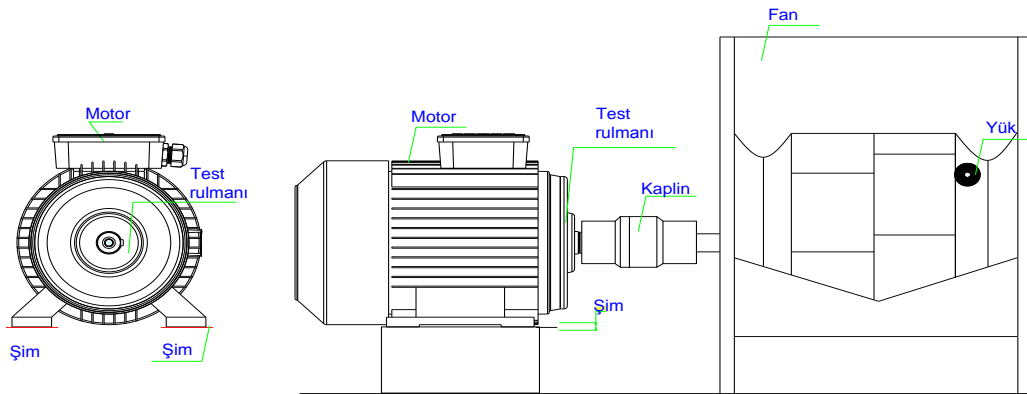
Frekans Bandı 10:Diğer 3

Frekans Bandı 11: Rulman 4

Frekans Bandı 12: Diğer 4

3.3 Test Edilen Kusur Tiplerinin Oluşturulması

Testlerde balanssızlık, yağsızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik kusurları incelenmiştir. Kusurların oluşturulmasıyla ilgili şematik görünüm Şekil 3.15'te verilmiştir.



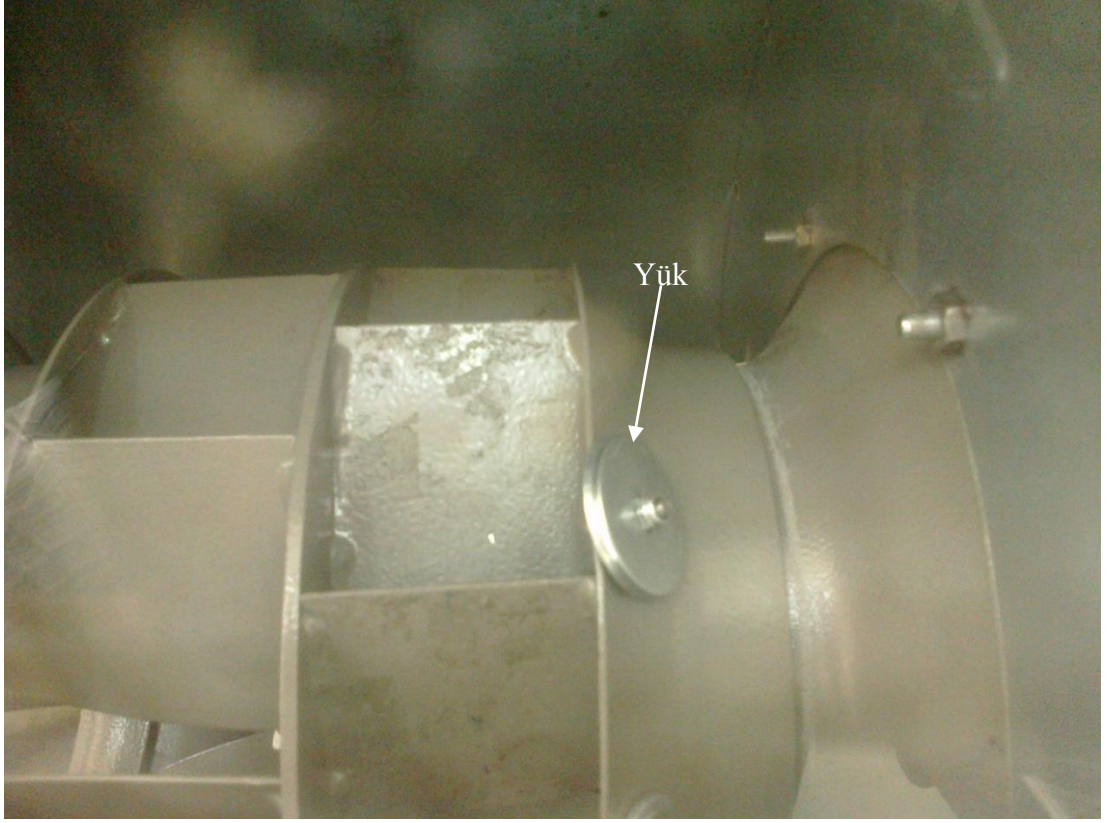
(a) Motor ön görünüm (b) Yağsızlık, balanssızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik şartlarının oluşturulması

Şekil 3.15: Test koşullarının modellenmesi

Şekil 3.15'te fan kanatlarında ağırlık yüklemek vasıtasıyla balanssızlık etkisi, motor ayaklarında şim ile yükseltme yapılarak eksen kaçıklığı etkisi, motor ayaklarında şim ile boşluk meydana getirilerek mekanik gevşeklik etkisi ve yağsızlık meydana getirilen rulmana ait tasvirler şematik olarak verilmiştir. Bunlardan önce plastik uçlu çekiç kullanılarak darbe testleri ile sistemin iç ve çevresel titreşimleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda bölgesel doğal frekanslar bulunmuştur, bunun yanında sistemin doğal frekansı 11 Hz olarak tespit edilmiştir.

3.3.1 Balanssızlık testi

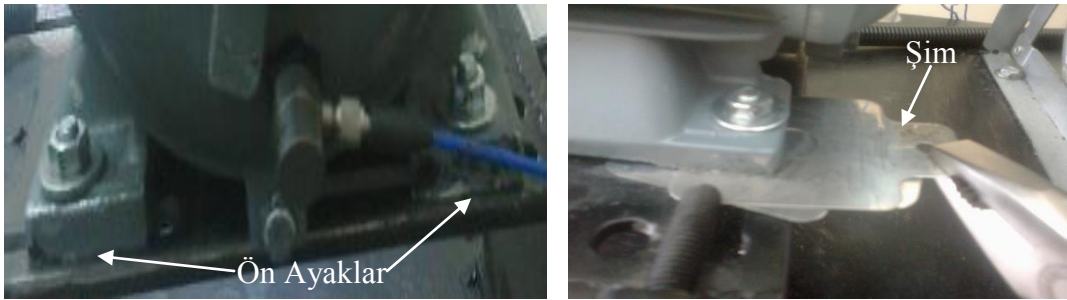
Balanssızlık testi 3.16'da görüldüğü üzere 23 g ağırlığındaki kütle yüklenmesi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.16: Fan kanatlarında ek yük ile balanssızlık sağlanması

3.3.2 Eksen kaçıklığı testi

Elektrik motorunun aynı anda ön iki ayağında Şekil 3.17'de görüldüğü gibi düşey yönde 0,1 mm'den 0,5 mm'e kadar 0,1'er mm aralıkla beş farklı seviyede eksen kaçıklıkları meydana getirilerek ortaya çıkan durumlar incelenmiştir.



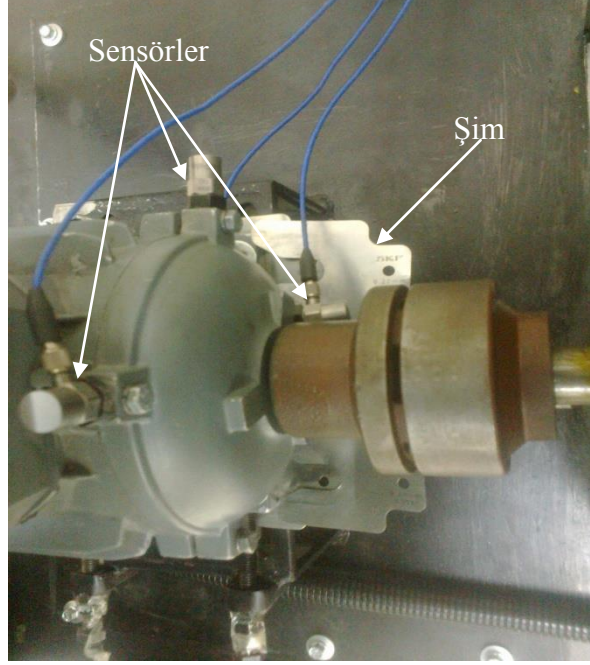
(a) Motor ön iki ayağı

(b) Ön iki ayakta şim ile yükseltme işlemi

Şekil 3.17: Eksen kaçıklığı

3.3.3 Mekanik gevşeklik testi

Elektrik motorunun ön iki ayağında Şekil 3.18'deki gibi düşey yönde 0,1 mm'den 0,5 mm'e kadar 0,1'er mm aralıkla beş farklı seviyede gevşeklik meydana getirilerek ortaya çıkan durumlar incelenmiştir.



Şekil 3.18: Motor ön ayaklarında şim yardımıyla boşluk oluşturma (üst görünüş)

3.3.4 Rulmanda yağsızlık testi

Elektrik motorundaki shaftın yatakladığı ön taraftaki rulman Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de görüldüğü gibi yerinden çıkartılarak, çözücü kimyasal yardımıyla rulmandaki yağ tamamen temizlenmiş, yerine 0,55 g gres yağı konularak tüm yağsızlık testleri yapılmıştır.



(a) Rotor ve stator



(b) Yağı tahliye edilmiş motor shaft rulmanı

Şekil 3.19: Elektrik motoru ve kullanılan rulman



Şekil 3.20: Şafta yataklanmış rulman

Şekil 3.20’de görüldüğü üzere yan kapakları açılan rulmandaki yağ tamamen temizlendikten sonra, Şekil 3.11’de verilen ölçüler esas alınarak aşağıda verilen eşitlikle yağ yenileme miktarı hesaplanmıştır.

Yağ yenileme miktarının hesaplanması [74] :

$$\begin{aligned} G \text{ (Konulması gereken yağ miktarı)} &= 0,05 \times D \times B & (2.1) \\ D \text{ (Rulman dış bilezik çapı)} &= 35 \text{ mm} \\ B \text{ (Rulman genişliği)} &= 11 \text{ mm} \\ G &= 0,05 \times 35 \times 11 = 19,25 \text{ g} \end{aligned}$$

3.4 Test Parametreleri

Bu çalışmadaki bulgular kolay takip edilebilmesi için hem bölüm ismi ile hem de test tablosunda bulunan test kodu ile verilmiştir. Tablo 3.3’te görülen test parametreleri seçilirken mekanik sistemlerde karşılaşılan yaygın kusurlar göz önüne alınmıştır. Kusur seviyeleri belirlenirken toleransı düşük ölçüm seviyeleri tercih edilmiştir. Test edilen devir sayıları, 50 Hz elektrik şebekesi nominal frekansında 2880 min^{-1} devir sayısının meydana gelmesi baz alınarak, motor kapasitesi kapsamında minimum ve maksimum aralıkta değerlendirilerek belirlenmiştir. Ölçüm tekniklerinin verimliliğini tespit edebilmek açısından ve ölçümlerden elde edilen verilerdeki değişimlerin hassasiyetinin daha da arttırılabilmesi için 0,37 kW gibi titreşim ve elektriksel tüketim değerlerini minimize edecek düşük güce sahip bir elektrik motoru tercih edilmiştir.

Tablo 3.3: Testlerde uygulanan parametreler

İncelenen Etki	Test Kodu	Yağsızlık (g)	Balanssızlık (g)	Eksen Kaçıklığı (mm)	Mekanik Gevşeklik (mm)	Devir Sayısı (min ⁻¹)
Devir Sayısı	T1	0	0	0	0	1900
	T2	0	0	0	0	2880
	T3	0	0	0	0	3510
Devire Bağlı Yağsızlık	T4	0,55	0	0	0	1900
	T5	0,55	0	0	0	2880
	T6	0,55	0	0	0	3510
Devire Bağlı Balanssızlık	T7	0	23	0	0	1900
	T8	0	23	0	0	2880
	T9	0	23	0	0	3510
Devire Bağlı 0,1 mm Eksen Kaçıklığı	T10	0	0	0,1	0	1900
	T11	0	0	0,1	0	2880
	T12	0	0	0,1	0	3510
Devire Bağlı 0,2 mm Eksen Kaçıklığı	T13	0	0	0,2	0	1900
	T14	0	0	0,2	0	2880
	T15	0	0	0,2	0	3510
Devire Bağlı 0,3 mm Eksen Kaçıklığı	T16	0	0	0,3	0	1900
	T17	0	0	0,3	0	2880
	T18	0	0	0,3	0	3510
Devire Bağlı 0,4 mm Eksen Kaçıklığı	T19	0	0	0,4	0	1900
	T20	0	0	0,4	0	2880
	T21	0	0	0,4	0	3510
Devire Bağlı 0,5 mm Eksen Kaçıklığı	T22	0	0	0,5	0	1900
	T23	0	0	0,5	0	2880
	T24	0	0	0,5	0	3510
Devire Bağlı 0,1 mm Mekanik Gevşeklik	T25	0	0	0	0,1	1900
	T26	0	0	0	0,1	2880
	T27	0	0	0	0,1	3510
Devire Bağlı 0,2 mm Mekanik Gevşeklik	T28	0	0	0	0,2	1900
	T29	0	0	0	0,2	2880
	T30	0	0	0	0,2	3510
Devire bağlı 0,3 mm Mekanik Gevşeklik	T31	0	0	0	0,3	1900
	T32	0	0	0	0,3	2880
	T33	0	0	0	0,3	3510
Devire Bağlı 0,4 mm Mekanik Gevşeklik	T34	0	0	0	0,4	1900
	T35	0	0	0	0,4	2880
	T36	0	0	0	0,4	3510
Devire Bağlı 0,5 mm Mekanik Gevşeklik	T37	0	0	0	0,5	1900
	T38	0	0	0	0,5	2880
	T39	0	0	0	0,5	3510

Tablo 3.3'teki test planında görüldüğü üzere toplam 39 adet asıl test gerçekleştirilmiştir. Yağsızlık etkisinin incelenmesinde, teorik olarak bir rulmanın tamamen yağsız kalma ihtimali çok düşük olduğundan film kalınlığı oluşturulması amacıyla 0,55 g yağ tatbik edilmiştir. Balanssızlık etkisi 23 g noktasal yük ile incelenmiştir. Eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik etkisi ise 0,1 mm hassasiyetinde 0,1 mm - 0,5 mm aralığında incelenmiştir. Bu kusurlar üzerinde devir değişimi etkisi ise 32,7 Hz, 50 Hz ve 63,8 Hz elektrik frekanslarında meydana gelen 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devir sayılarında test edilmiştir. Bu çalışmada yağsızlık, balanssızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik kusurlarının devir sayısı değişimi ile etkileşimi detaylı olarak incelenebilmesi için bu kusurların birbirleri ile etkileşimlerinin araştırılması sonraki çalışmalara bırakılmıştır.

4. TEST BULGULARI

Test bulguları, çalışmanın hedefine uygun olarak titreşim verileri ve elektrik tüketim verileri olmak üzere iki ana başlıkta incelenmiştir.

4.1 Titreşim Verileri ve Analizi

Bu bölümde test planı takip edilerek gerçekleştirilen testlerden elde edilen titreşim verileri, veri görüntüleme teknikleriyle sunulmuş ve analiz edilmiştir. Spektrum grafiklerinde en yüksek genliğe sahip beş titreşim sinyali ve RMS değerlerine yer verilerek karşılaştırma yapma imkanı sunulmuştur. Test bulguları hem bölüm isimleriyle hem de test planındaki test kodları ile takip edilebilir. Bu bölümle ilgili değerlendirmenin daha iyi anlaşılabilmesi için 2.3 Test Edilen Kusur Tipleri başlığı altındaki ön bilgilerin incelenmesi faydalı olacaktır.

Testler, elektrik sinyali frekans dönüştürücüsü kullanılarak 32,7 Hz, 50 Hz ve 63,8 Hz frekanslarında gerçekleştirilmiştir. Devir sayısı ölçme cihazı ile alınan verilerde 32,7 Hz frekansında 1900 min^{-1} , 50 Hz frekansında 2880 min^{-1} ve 63,8 Hz frekansında 3510 min^{-1} devir sayıları tespit edilmiştir. Bu devir sayılarına ait başlangıç verileri radyal (düşey, yatay) ve eksenel yönde verilmiştir. Bu veriler testlerde meydana gelen değişimlerin takip edilebilmesinde karşılaştırma referansı olarak kullanılmıştır. Lazerli kaplin ayar cihazıyla kaplin ayarı yapılan test düzeneğinden alınan ve referans verileri olarak kabul edilen dalgaform ve spektrum grafikleri EK-A kısmında Şekil A.1 - Şekil A.4 arasında verilmiştir. Referans ölçümlerden elde edilen en yüksek genlikli beş titreşim sinyali değeri ve RMS değerleri, uygulanan devir sayısı etkisini göz önüne sermek amacıyla Tablo 4.1'de verilmiştir. Orhan vd. [26] çalışmasında, genel titreşim değerlerinin arıza tespitinde yardımcı sonuçlar verebileceği, bu nedenle de asıl incelenmesi gerekenin spektrum verilerindeki temel frekans ve harmonikleri (katları) olduğunu belirtmiştir. Movchan ve Filatov deneysel çalışmalarında [52], bilyalı rulman ile yataklanmış rotora ait belirgin subharmonik titreşimlerin tespit edildiğini bildirmişlerdir. Spektrum verileri

incelenirken balanssızlık, eksen kaçıklığı, mekanik gevşeklik ve rulman kusur frekanslarının tam ve buçuklu katları dışında kalan subharmonik ve süperharmonikler EK-B kısmında Tablo B.1’de verilen kusur frekansları ile yorumlanmıştır.

Li vd.’ne göre [57], özellikle başlangıç seviyesindeki kusurların tespitinde makinanın çeşitli elemanlarından, çevresel etkilerden meydana gelen titreşim sinyalleri ve sistemin doğal frekanslarının fazla görülmesi analizi güçleştirmektedir. Bu çalışma için önce sistem hareketsiz iken plastik uçlu çekiç kullanarak darbe testi ile deney düzeneği üzerinde motor, motor mili, motor ayaklarının oturduğu şase, kaplin, fan, fan mili, sac, test düzeneği sehpası ve sehpanın konumlandırıldığı zeminden doğal frekans verileri toplanmıştır. Deney düzeneğinin sistem olarak doğal frekansını bulmak için ise etrafı sünger malzeme ile kaplanmış katı bir cisim yardımıyla sisteme bir bütün olarak kuvvet uygulanarak darbe testi uygulanmıştır. Bu testler sonucunda birçok bölgesel doğal frekans tespit edilmiştir; sistemin doğal frekansı ise 11 Hz olarak tespit edilmiştir. Testlerin sonunda verilen tablolarda, spektrumda tespit edilen en yüksek genlikli ilk beş titreşim sinyalinin ifade ettiği temel frekanslara ait harmonikler ve doğal frekanslardaki titreşim sinyallerini uyaran harmoniklere yer verilmiştir. Doğal frekanslar f_n ile ifade edilmiştir.

*Tezde bu kısımdan sonra radyal yön sadece düşey yön için ifade edilmiştir.

Tablo 4.1: Devire göre titreşim frekansı, genlik ve RMS değerleri değişimi

Devir Sayısı (min ⁻¹)	Veri	Düşey					Eksenel					Yatay				
		Frekans (Hz)	İvme (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Frekans (Hz)	İvme (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Frekans (Hz)	İvme (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Frekans (Hz)	İvme (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Frekans (Hz)	İvme (m/s ²)	RMS (m/s ²)
1900	Frekans (Hz)	31,74 (1x)	96,44 (f_n)	63,48 (2x)	571,3 (18x)	626,2 (f_n)	96,44 (f_n)	63,48 (2x)	31,74 (1x)	1065 (f_n)	111,1 (f_n)	127 (4x)	130,6 (f_n)	124,5 (f_n)	63,48 (2x)	96,44 (f_n)
	İvme (m/s ²)	0,326	0,227	0,205	0,198	0,172	0,292	0,238	0,165	0,129	0,107	0,472	0,35	0,277	0,233	0,205
	RMS (m/s ²)	0,5262					0,4148					0,6106				
2880	Frekans (Hz)	1063,2 (f_n)	47,61 (1x)	963,1 (f_n)	191,7 (f_n)	96,44 (f_n)	1063,2 (f_n)	147,7 (f_n)	96,44 (f_n)	963,1 (f_n)	47,61 (1x)	47,61 (1x)	96,44 (f_n)	100,1 (f_n)	1063,2 (f_n)	144 (f_n)
	İvme (m/s ²)	0,601	0,547	0,532	0,505	0,431	0,516	0,506	0,451	0,386	0,38	1,09	4,06	0,381	0,354	0,275
	RMS (m/s ²)	1,015					0,8065					1,022				
3510	Frekans (Hz)	58,59 (1x)	180,7 (f_n)	925,3 (f_n)	1052,2 (f_n)	117,2 (2x)	58,59 (1x)	117,2 (2x)	128,2 (f_n)	925,3 (f_n)	1180,4 (f_n)	58,59 (1x)	128,2 (f_n)	925,3 (f_n)	117,2 (2x)	124,5 (f_n)
	İvme (m/s ²)	1,21	0,519	0,491	0,434	0,367	1,89	0,595	0,407	0,346	0,334	1,33	1,04	0,583	0,471	0,313
	RMS (m/s ²)	1,373					1,585					1,475				

Referans ölçümlerden elde edilen veriler, gerçekleştirilen testlerde elde edilen verilerin karşılaştırılmasında yardımcı olacaktır. Referans ölçümde hasarsız rulmanda eleman geçiş bölgesinde belirgin titreşim sinyalleri tespit edilmiştir, Karaçay ve Aktürk [27] çalışmalarında kusursuz rulmanların da hasar frekanslarında titreşim tepkisi verebileceklerini belirtmişlerdir. Arslan vd. de [29], kusursuz rulmanlarda yüzey pürüzlülüğü nedeniyle hasar frekanslarının görülebileceğinden bahsetmiştir. 1900 min⁻¹ devir sayısında alınan referans ölçüme ait düşey, eksenal ve yatay yön verilerinde 31,74 Hz, 96,44 Hz, 63,48 Hz, 111,1 Hz, 124,5 Hz, 127 Hz, 130,6 Hz, 571,3 Hz, 626,2 Hz, 1065 Hz frekansları; 2880 min⁻¹ devir sayısında alınan ölçümde 47,61 Hz, 96,44 Hz, 100,1 Hz, 144 Hz, 147,7 Hz, 191,7 Hz, 963,1 Hz, 1063 Hz; 3510 min⁻¹ devir sayısında ise 58,59 Hz, 117,2 Hz, 124,5 Hz, 128,2 Hz, 180,7 Hz, 925,3 Hz, 1052 Hz, 1180 Hz frekanslarında en yüksek genlikli ilk beş titreşim sinyaline rastlanılmıştır. Genel olarak referans ölçümlerindeki titreşim frekansları incelendiğinde, temel frekansın katlarındaki sinyaller ve uyardıkları doğal frekanslarda rezonans sinyalleri gözlenmiştir. Temel frekansa ait sinyal genliği 1900 min⁻¹'de en yüksek düşey yönde (0,306 m/s²), 2880 min⁻¹'de en yüksek yatay yönde (1,09 m/s²), 3510 min⁻¹'de ise en yüksek eksenal yönde (1,89 m/s²) tespit edilmiştir. Referans verileri incelendiğinde, 3510 min⁻¹ devir sayısında her üç yönde, balanssızlık etkisini ifade eden 1x harmoniğine ait titreşim sinyali en yüksek genlikli sinyal olarak tespit edilmiştir; bu devir sayısında yüksek salınımlardan dolayı belirgin olarak balanssızlık meydana gelmektedir. Test edilen devir sayılarında farklı ölçüm yönlerinde referans verilerine ait RMS değerleri birbirine yakın değerler olmakla beraber; 1900 min⁻¹ devir sayısında en yüksek yatay yönde (0,6106 m/s²), 2880 min⁻¹ devir sayısında en yüksek yatay yönde (1,022 m/s²), 3510 min⁻¹ devir sayısında ise en yüksek eksenal yönde (1,585 m/s²) tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, testlerde devir sayısı arttıkça titreşim sinyal genliği ve RMS değeri artmıştır.

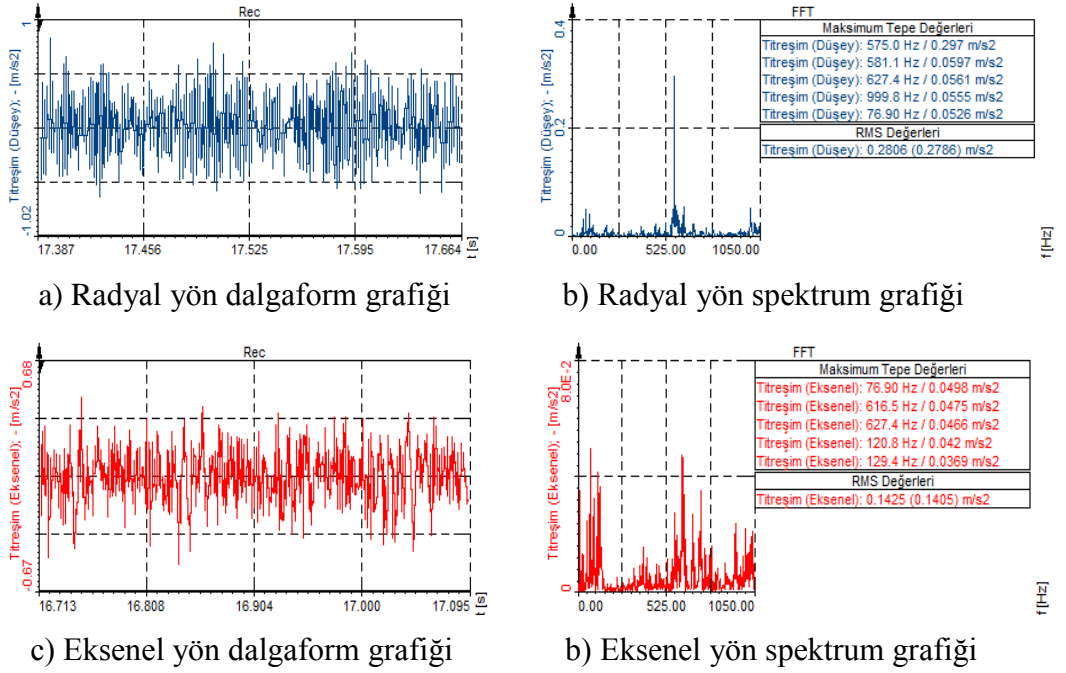
4.1.1 Rezonans verileri

Her cisime ait özgün doğal frekanslarda titreşim karakteristikleri bulunmaktadır. Herhangi bir cisimde doğal frekansa eşdeğer frekansta fiziksel kuvvet oluştuğunda, rezonans olarak adlandırılan durum meydana gelmekte ve yüksek genlikte titreşimler gözlenmektedir; bu durum malzemenin yorulmasıyla beraber ömrünün kısalmasına yol açabilmektedir. Kostek'e göre [69]; lineer olmayan sistemler için geniş bir

spektrumdaki rezonans durumları da incelenmelidir. Bu çalışmada kusursuz rulmanlarla yapılan testlerde, sistem test edilen devir sayılarında tahrik halindeyken kafes frekansı harmoniklerinin doğal frekanslar ile çakışarak subharmonik ve süperharmonik rezonans durumlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Arslan [29] kusurlu rulmanlarla yaptığı çalışmada düşük devir sayılarında bilya geçiş frekansı katlarının; kusursuz rulmanlarla yaptığı çalışmada [61] ise kafes frekansı katlarının doğal frekanslar ile çakışarak rezonans meydana geldiğini gözlemlemiştir. Elektrik sinyali frekans dönüştürücüsü yardımıyla 0 - 70 Hz arasında kademeli olarak çalıştırılan test düzeneğinde Şekil 4.1 - Şekil 4.4'te tespit edilen, dört farklı devir sayısında rezonans tipi titreşim genliği artışı tespit edilmiştir. Dinamik sistemlerde shaft dönüşüyle meydana gelen titreşim temel frekansının ya da katlarının cismin doğal frekansına eşit ya da yakın olduğu durumlarda rezonans meydana gelmektedir; rezonansa girilen bu devir sayıları kritik devir sayısı olarak adlandırılmaktadır. Agaston [56] çalışmasında bir cisme kuvvet uygulanmasıyla meydana gelen titreşimin frekansı sistemin doğal salınım oranına yakın olduğunda, bu durumun gittikçe artan genlikte titreşim oluşmasına ve sistemin rezonansa girmesine yol açacağını belirtmiştir. Kritik devir sayılarında titreşim genlikleri yüksek olacağından dönen elemanlı makinelerin bu devir sayılarını süratli bir şekilde geçmesi istenir. Rezonans durumunda, eleman geçiş bölgesinde meydana gelen rulman sinyalleri belirgin şekilde artarak Şekil 4.1 - Şekil 4.4'te görüldüğü gibi bant görünümü alır. Sisteme ait kritik devir sayılarının tespitinin yanında sistem durağan iken doğal frekansların tespit edilmesi testlerden alınan verileri yorumlamaya yardımcı olmaktadır. Plastik uçlu çekiç ile motor, motor mili, motor ayaklarının oturduğu şase, kaplin, fan, fan mili, sac, test düzeneği sehпасı ve sehpanın konumlandırıldığı zemine uygulanan darbe testlerinden elde edilen titreşim yanıtları izlenmiş ve deney düzeneği elemanlarından gelen çok sayıda farklı doğal frekans tespit edilmiştir. Behzad ve Bestami'ye göre [43], dönen bir shaftın kritik devir sayısına bağlı titreşim frekansı dönmeyen halindeki doğal frekanslardan farklılık gösterebilmektedir. Test planındaki testlerin uygulanması sonucu elde edilen verilerde tespit edilen doğal frekanslar çekiç ile gerçekleştirilen darbe testlerinden alınan titreşim frekansları ile karşılaştırıldığında, bu doğal frekansların darbe testinde tespit edilen frekanslar arasında olduğu tespit edilmiştir. Testlerdeki verilerin analizinde bu bulgular göz önünde bulundurulmuştur.

4.1.1.1 Birinci kritik devir sayısı

Sistem dönüş hareketinde değil iken uygulanan darbe testinde sistem doğal frekansı 11 Hz olarak bulunmuştur. Elektrik motoru, frekans dönüştürücüsü vasıtasıyla 11 Hz frekansında tahrik edildiğinde meydana gelebilecek rezonans etkisi birinci kritik devir sayısı olarak tanımlanmıştır; bu frekanstaki devir sayısı optik devir ölçüm cihazı ile 638 min^{-1} olarak ölçülmüştür. Sistem bu elektrik frekansı ile tahrik edildiğinde dönme hareketinin yarattığı salınımların uyarması sonucu sistemin doğal frekansı Şekil 4.1’de görüldüğü üzere radyal yönde 575 Hz olarak tespit edilmiştir.

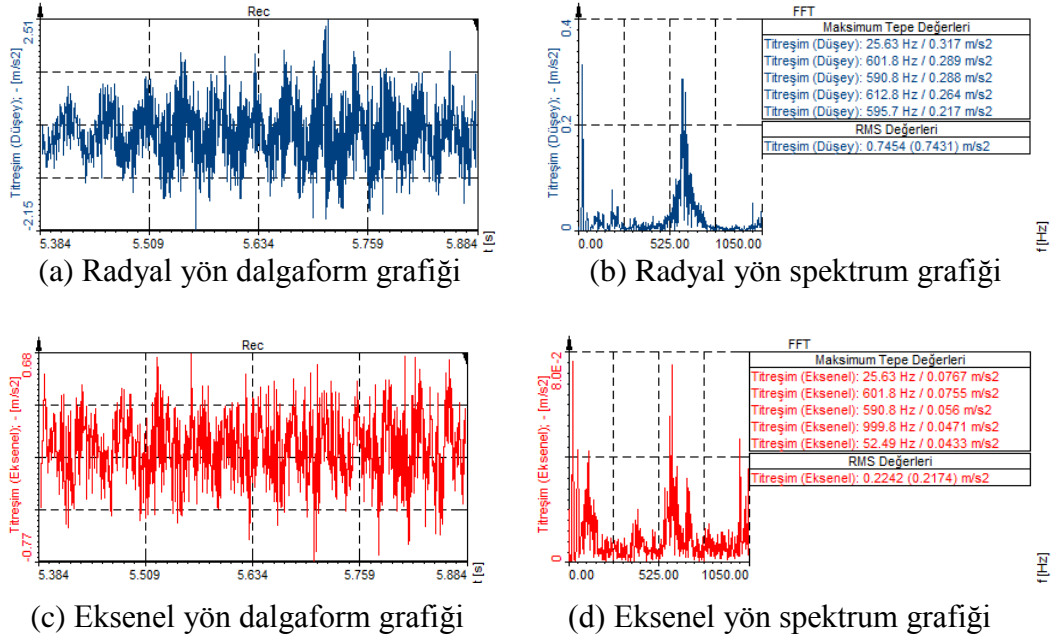


Şekil 4.1: Birinci kritik devir sayısında rezonans verileri

Spektrum verileri incelendiğinde, radyal yön ve eksenel yön frekans dağılımlarındaki farklılıklar göze çarpmaktadır. Radyal yönde, eleman geçiş bölgesinde tipik sistem doğal frekansı belirgin olarak ortaya çıkarırken, eksenel yönde belirgen frekanslardaki sinyal genlikleri birbirine yakın çıkmıştır. Radyal ve eksenel yön dalgaform verileri incelendiğinde düzensiz yapıda değişen genliğe sahip sinüzoidal geçişler tespit edilmiştir.

4.1.1.2 İkinci kritik devir sayısı

Sistem elektrik motoru tahriği ile dönüş hareketindeyken rezonansa girdiği ikinci devir sayısı ikinci kritik devir sayısı olarak adlandırılmıştır. İkinci kritik devir sayısının 1538 min^{-1} devir sayısında başladığı tespit edilmiştir.

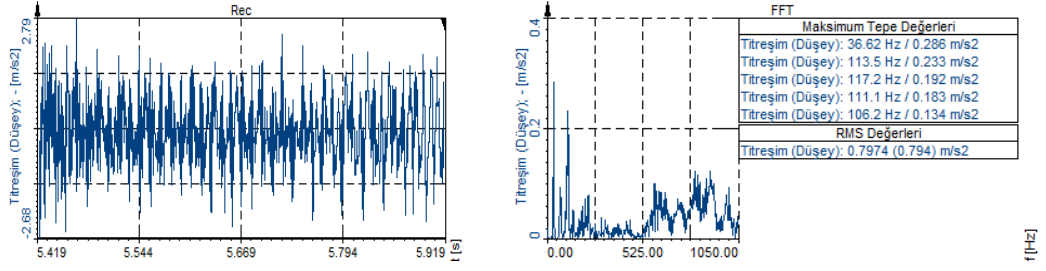


Şekil 4.2: İkinci kritik devir sayısında rezonans verileri

Radyal yönde 25,63 Hz (1x) temel frekansı ve 601,8 Hz, 590,8 Hz, 612,8 Hz, 595,7 Hz doğal frekans titreşim sinyalleri; eksenel yönde 25,63 Hz (1x) temel frekansı ve 601,8 Hz, 590,8 Hz, 999,8 Hz, 52,49 Hz doğal frekans titreşim sinyalleri tespit edilmiştir. RMS değerleri incelendiğinde radyal yönde 0,7454 m/s², eksenel yönde 0,2242 m/s² değerleri ortaya çıkmıştır. Üçüncü ve dördüncü kritik devir sayıları verilerinde radyal ve eksenel yön RMS değerleri nicelik olarak birbirine yakın değerler iken, ikinci kritik devir sayısı verilerinde radyal yön RMS değeri eksenel yön RMS değerinin üç katına yaklaşmıştır. Sinyal yoğunluğu incelendiğinde, radyal ve eksenel yönde ilk üç baskın titreşim sinyalinin aynı frekanslarda olduğu görülmektedir. Radyal yönde dördüncü ve beşinci baskın sinyal frekansları, ikinci ve üçüncü baskın sinyal frekanslarına yakınken, eksenel yönde hem rotor bölgesi hem de eleman bölgesinde birbirinden daha uzak frekanslarda sinyaller tespit edilmiştir. Bu açıdan bakıldığında, radyal yönde 1538 min⁻¹ devir sayısındaki rezonans etkisi altında doğal frekans titreşimleri birbirine yakın frekanslarda uyarılırken, eksenel yönde daha geniş aralıkta uyarılmaktadır.

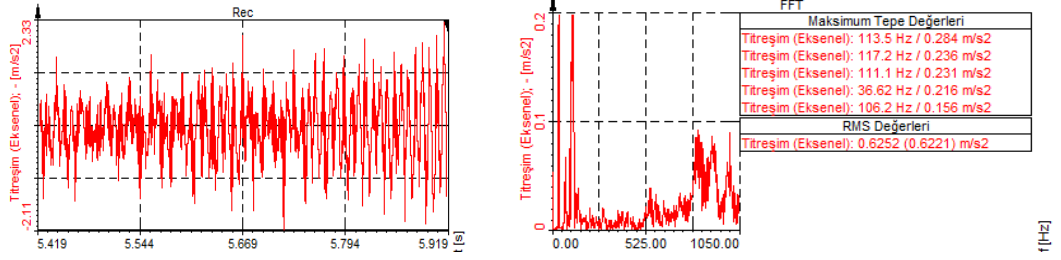
4.1.1.3 Üçüncü kritik devir sayısı

Devir sayısı yükseldikçe rezonans durumunun üçüncü kez gözlemlendiği devir sayısı üçüncü kritik devir sayısı olarak adlandırılmıştır. Üçüncü kritik devir sayısı, 2197 min⁻¹ devir sayısında tespit edilmiştir.



(a) Radyal yön dalgaform grafiği

(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Eksenel yön dalgaform grafiği

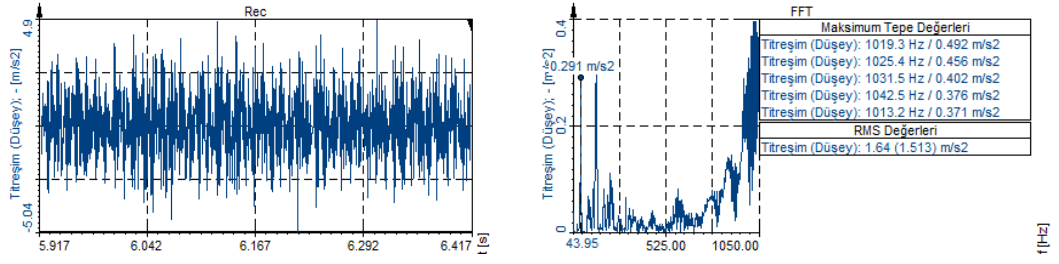
(d) Eksenel yön spektrum grafiği

Şekil 4.3: Üçüncü kritik devir sayısında rezonans verileri

Radyal yönde 36,62 Hz (1x), 113,5 Hz (f_n), 117,2 Hz (f_n), 111,1 Hz (f_n), 106,2 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 113,5 Hz (f_n), 117,2 Hz (f_n), 111,1 Hz (f_n), 36,62 Hz (1x), 106,2 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller en yüksek genlikli beş sinyal olarak tespit edilmiştir. RMS değerleri incelendiğinde radyal yönde 0,7974 m/s², eksenel yönde 0,6252 m/s² değerleri ortaya çıkmıştır. Veriler incelendiğinde; 2197 min⁻¹ devir sayısında rezonans durumu altında ortaya balanssızlık etkisi çıkmış ve radyal yönde balanssızlık belirtisi 1x harmoniğindeki sinyal en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. En yüksek genlikli beş sinyal her iki yönde de baskınlık sıralamaları farklı olmakla beraber aynı titreşim frekanslarında görülmüştür. Radyal ve eksenel yöndeki RMS değerleri ise ikinci kritik devir sayısındaki kıyasla nicelik olarak birbirine yakınlaşmıştır. Burada oluşan rezonans durumu her iki yönde de birbirine yakın etkiler göstermiştir; gerilmelerin her iki yönde de benzer özelliklerde olduğu söylenebilir.

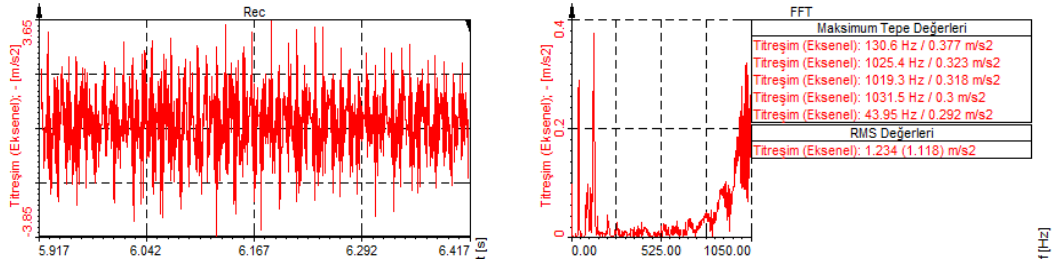
4.1.1.4 Dördüncü kritik devir sayısı

Devir sayısı artışının devamıyla beraber rezonans durumunun dördüncü kez gözlemlendiği devir sayısı dördüncü kritik devir sayısı olarak adlandırılmıştır. Dördüncü kritik devir sayısı 2637 min⁻¹ devir sayısında tespit edilmiştir.



(a) Radyal yön dalgaform grafiği

(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Eksenel yön dalgaform grafiği

(d) Eksenel yön spektrum grafiği

Şekil 4.4: Dördüncü kritik devir sayısında rezonans verileri

En yüksek genlikli beş sinyal arasında radyal yönde 1019,3 Hz (f_n), 1025,4 Hz (f_n), 1031,5 Hz (f_n), 1042,5 Hz (f_n), 1013,2 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 130,6 Hz (f_n), 1025,4 Hz (f_n), 1019,3 Hz (f_n), 1031,5 Hz (f_n), 43,95 Hz (1x) frekanslarındaki sinyaller tespit edilmiştir. RMS değerleri incelendiğinde radyal yönde 1,64 m/s², eksenel yönde 1,234 m/s² değerleri ortaya çıkmıştır. 2637 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık belirtisi 1x (43,95 Hz) harmoniğinin radyal yönde değil de eksenel yönde en yüksek genlikli ilk beş frekans arasında yer alması dikkat çekicidir, bu durum doğal frekans sinyalini ön plana çıkaran gerilimlerin eksenel yönde baskın olduğunu göstermektedir. Radyal yönde ise sadece rulman kaynaklı sinyallerin uyardığı eleman geçiş bölgesi frekanslarındaki doğal frekanslar gözlenmiştir.

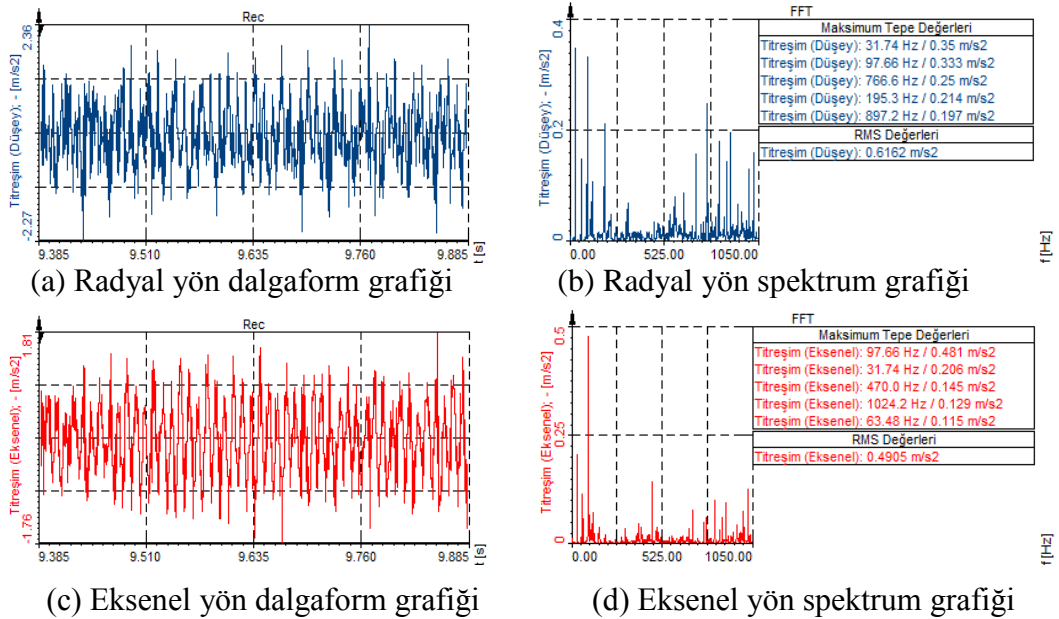
4.1.2 Yağsızlık testleri

Yağsızlık testlerinde kullanılan test rulmanı için yağ yenileme eşitliğiyle yapılan hesaplamada, yağı tahliye edilen test rulmanına 19,25 g yağ tatbik edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Pratikte rulmanın tamamen yağsız kalma ihtimali çok düşük olduğu için yağsızlık etkisi tüm yağı tahliye edilen test rulmanına 0,55 g rulman yağı tatbik edilerek sağlanmıştır. Boskoski vd. [33], yağsızlık üzerine yaptıkları çalışmalarda, titreşim analizi ile rulmanlarda yağsızlığın tespit edilebileceğini vurgulamışlardır. Genel olarak yağsızlık testlerinden elde edilen veriler incelendiğinde yağsızlık etkisi

altındaki titreşim sinyallerinin radyal yönde daha iyi tespit edilebildiği tespit edilmiştir. Temel frekansa ait harmoniklerde tam ya da buçuklu değerler dışında kalan kusurlu katların çıkması EK-B’de sunulan arıza frekanslarının doğal frekanslar ile çakıştığına ve spektrum grafiklerinde eleman geçiş bölgesi sinyallerinin yoğunlaşması rulman bölgesindeki gerilmelerin ve yüklerin arttığına işaret etmektedir.

4.1.2.1 1900 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık testi (T4)

Test düzeneğindeki elektrik motoru, frekans dönüştürücüsü vasıtasıyla 32,7 Hz frekansında elektrik sinyali ile tahrik edildiğinde motor mili devir sayısı 1900 min⁻¹ olarak ölçülmüştür. Littmann çalışmasında [47]; rulmanlardaki kusurların, üretimden kaynaklı pürüzlülük, dalgalılık, ölçülendirme toleransları, ekseni kaçık bilezikler gibi nedenlerden kaynaklı dağımik kusurlar olabileceği gibi yüzey temas yorulması kaynaklı bölgesel kusurlar da olabileceğini belirtmiştir. Kıral tez çalışmasında [59], yağlayıcı madde varlığında bile birbirine temas eden iki yüzeye ait bağlı hareketle meydana gelen sürtünme kaynaklı titreşimlerin varlığına değinmiştir. Yağsız kalma etkisinin yüzey temasından dolayı sürtünme kuvvetlerini arttıracak aşıkardır ve sürtünme kuvvetleri hasarsız rulmanda kafes, bilya, dış bilezik, iç bilezik üzerinde farklı titreşim tepkilerine yol açacaktır. Yağsızlıkla ilgili testlerden elde edilen veri grafikleri Şekil 4.5’te ve harmonikler Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.5: 1900 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık verileri

Spektrum grafiklerinde radyal yön verileri incelendiğinde yağsızlık etkisi altında en yüksek genlikli ilk beş sinyal arasında balanssızlık ($1x$) belirtisinin yanı sıra, mekanik gevşeklik ($3x$, $6x$) ve rulman frekanslarının ($64x\omega_c$, $74x\omega_c$) uyardığı doğal frekanslarda titreşim sinyalleri tespit edilmiştir. Dalgaform grafiklerinde ise genel olarak referans verilerindeki benzer sinüzoidal yapılar alınmıştır.

Radyal yön verilerinde, balanssızlık göstergesi olan $1x$ (31,74 Hz) harmoniğindeki sinyal en yüksek genlikli titreşim; aksel yön verilerinde ise eksen kaçıklığı göstergelerinden biri olan $3x$ (95,21 Hz) harmoniğindeki titreşim 97,66 Hz doğal frekansıyla çakışarak süperharmonik rezonans durumu meydana gelmiş ve en yüksek genlikli titreşim olarak tespit edilmiştir. 97,66 Hz doğal frekansında meydana gelen titreşim radyal yönde ikinci en yüksek genlikli sinyal olmuştur. Ehrich [54], yüksek devirli rotorda meydana gelen rulman boşluklarına bağlı yüksek katlardaki subharmonik titreşimlerin meydana gelebileceğini belirtmiştir. Karaçay doktora çalışmasında [62], bilya boyutu farklılığından dolayı kafes frekans katlarında titreşim sinyallerinin görüldüğünü ve bu sinyallerin rezonans durumlarına yol açabildiğine değinmiştir. Radyal yönde meydana gelen üçüncü en yüksek genlikli sinyal 766,6 Hz doğal frekansında meydana gelen titreşim sinyali olup, 771,84 Hz ($64x\omega_c$) kafes frekansının uyarması ile bu sinyalde subharmonik rezonans oluşmuştur. Ji ve Leung [55], gerçekleştirdikleri testlerdeki sonuçlara göre lineer olmayan salınımların oluşmasıyla beraber süperharmonik rezonansların da oluşabileceğini teyit etmektedir. Radyal yöndeki dördüncü en yüksek genlikli sinyal 195,3 Hz temel frekansın katı olan 190,44 Hz ($6x$) kafes frekansındaki sinyalinin uyarması, beşinci baskın sinyal 897,2 Hz doğal frekans ise 892,44 Hz ($74x\omega_c$) kafes frekansının uyarması ile süperharmonik rezonansa maruz kalmıştır. Aksel yönde, 470 Hz doğal frekans sinyalinde 470,34 Hz ($39x\omega_c$) kafes frekansının uyarması, 1024,2 Hz doğal frekans sinyalinde ise 1025,1 Hz ($85x\omega_c$) kafes frekansının uyarması ile subharmonik rezonans tespit edilmiştir.

Bu ölçümde, referans ölçümde gözlenen 31,74 Hz ve 63,48 Hz sinyalleri ortak frekans olarak tespit edilmiş, diğer sinyaller ise farklı frekanslarda gözlenmiştir. Diğer sinyaller doğal frekans özelliği gösteren sinyaller olup, yağsızlık testinde doğal frekans sinyallerinin referans verilerine kıyasla farklı frekanslarda ve şiddette ortaya çıktığı tespit edilmiştir. 766,6 Hz doğal frekans sinyaline sadece yağsızlık ve

balanssızlık testinde, 1024,2 Hz ve 897,2 Hz doğal frekans sinyallerine sadece yağsızlık testinde rastlanılmıştır.

Tablo 4.2’de verilen en yüksek genlikli ilk beş sinyalin harmonik dönüşüm karşılıkları incelendiğinde, radyal yönde $64x\omega_c$, $74x\omega_c$ kafes frekansı harmoniklerinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyaller, eksenel yönde $39x\omega_c$, $85x\omega_c$ kafes frekansı harmoniklerinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyaller gibi eleman geçiş bölgesinde birbirinden farklı frekanslarda rezonans oluşumları meydana gelmiştir.

Tablo 4.2: 1900 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
Y/1900 min ⁻¹ /(R)	1x	f_n (3x)	f_n (64x ω_c)	f_n (6x)	f_n (74x ω_c)	0,6162
Y/1900 min ⁻¹ /(E)	f_n (3x)	1x	f_n (39x ω_c)	f_n (85x ω_c)	2x	0,4905

Y: Yağsızlık, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

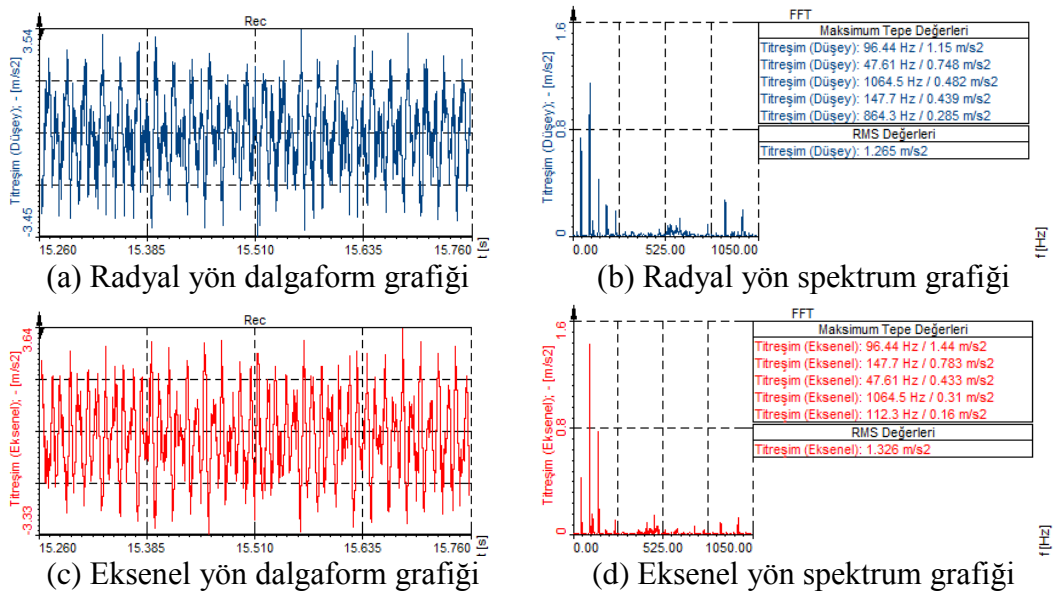
Referans veriler ile karşılaştırıldığında; radyal yönde en baskın sinyal aynı frekansta (1x) gözlenmiştir. Referans verilerinde radyal yönde en baskın beş sinyal arasında üç doğal frekans yer alırken, yağsızlık etkisi altında dört doğal frekans tespit edilmiştir. Radyal yönde referans verilerinde üçüncü baskın sinyal olarak 2x harmoniği belirirken, yağsızlık etkisi altında $64x\omega_c$ kafes frekansı harmoniğinin uyardığı doğal frekans gözlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında yağsızlık etkisi altında, rulman kaynaklı frekansların meydana getirdiği sinyaller belirginleşmiştir. Benzer şekilde, eksenel yön referans verilerinde üçüncü baskın sinyal temel frekansın 1x harmoniğinde gözlenirken, yağsızlık etkisi altında $39x\omega_c$ kafes frekansının uyardığı doğal frekans gözlenmiştir.

RMS değerleri incelendiğinde ise referans verilerde radyal yönde 0,5262 m/s² olan değer yağsızlık testinde 0,6162 m/s²’ye; eksenel yönde ise 0,4148 m/s²’den 0,4905 m/s²’ye yükselmiştir. Yağsızlık etkisi altında titreşimlerin meydana getirdiği hasar görme şiddeti referans ölçümdekine göre artmıştır.

4.1.2.2 2880 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık testi (T5)

Radyal yönde en yüksek genlikteki sinyalden başlamak üzere 96,44 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 1064,5 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n) ve 864,3 Hz (f_n) frekansları en yüksek genlikli beş

sinyal arasında tespit edilmiştir. Eksenel yönde ise 96,44 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 1064,5 Hz (f_n) ve 112,3 Hz (f_n) olarak değişmiştir. 2880 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık testinde radyal yön spektrum grafiğinde 2x harmoniği ile çıkan doğal frekandaki sinyalin en yüksek genlikli sinyal olması, ikinci en yüksek genlikli sinyalin 1x harmoniğindeki sinyal olması ve frekans ekseninde 2x harmoniğindeki sinyalden daha üst frekanslarda sinyallerin belirmesi mekanik gevşeklik izlenimi vermektedir. Materyal ve metod başlığı altında verilen örnek dalgaform grafikleri gözönünde bulundurularak değerlendirme yapıldığında dalgaform grafiklerinde balanssızlıkla (W harfi yapısı) karışık mekanik gevşeklik etkileri gözlenmektedir. Veri grafikleri Şekil 4.6’da ve harmonikler Tablo 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.6: 2880 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık verileri

95,22 Hz’te ortaya çıkan 2x harmoniği 96,44 Hz doğal frekansı ile çakışmış ve radyal yönde 1,15 m/s², eksenel yönde 1,44 m/s² genlik ile en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır. Radyal yönde 47,61 Hz frekansında görülen 1x harmoniği 0,748 m/s² genlik ile ikinci baskın sinyal olarak, eksenel yönde ise 0,433 m/s² genlik ile üçüncü baskın sinyal olarak belirmiştir. Tablo 4.4’te incelendiği üzere 2880 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık kusuru etkisi altında radyal ve eksenel yönde mekanik gevşeklik harmonikleri ile 1x balanssızlık harmoniği ve rulman komponentlerinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyaller tespit edilmiştir.

Referans veri değerlerindeki benzer şekilde 47,61 Hz (1x) temel frekansı ve 96,44 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller gözlenmiştir. Diğer sinyaller ise farklı doğal frekanslarda belirmiştir. 864,3 Hz doğal frekansındaki sinyal sadece

yağsızlık testinde görülmüştür. 96,44 Hz doğal frekansı 1900 min⁻¹ devir sayısında da görülmüştür. 112,3 Hz doğal frekansı ise test edilen üç devir sayısında da görülmüştür. RMS değerleri 1900 min⁻¹ devir sayısındaki değerler ile karşılaştırılmalı olarak incelendiğinde her iki yön ölçümde artış gözlemlenmiştir. Bu durum titreşim sinyalleri efektif bozunma şiddetinin artış yönünde olduğuna işaret etmektedir.

Alınan verilere ait en yüksek genlikli ilk beş sinyal harmonik dönüşümüyle Tablo 4.3'te incelendiğinde, 1900 min⁻¹ devir sayısı testinde görülmeyen 56x ω_c ve 45x ω_c harmoniklerinin uyardığı doğal frekanslar tespit edilmiştir. 56x ω_c harmoniğinin uyardığı doğal frekans hem radyal hem de eksenel yönde görülmüştür.

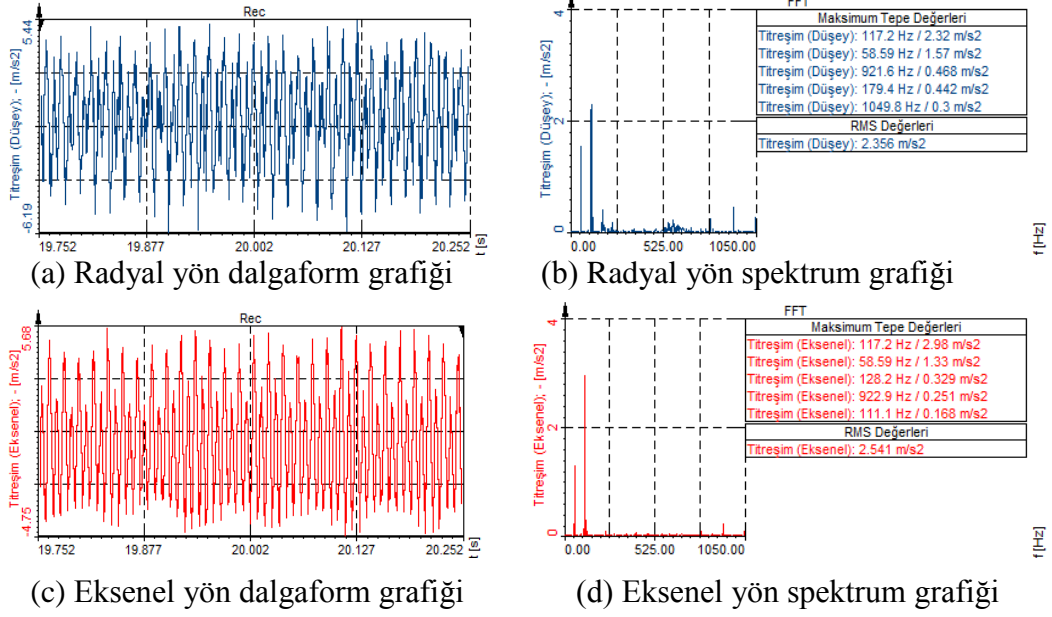
Tablo 4.3: 2880 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
Y/2880 min ⁻¹ /(R)	f_n (2x)	1x	f_n (56x ω_c)	f_n (3x)	f_n (45x ω_c)	1,265
Y/2880 min ⁻¹ /(E)	f_n (2x)	f_n (3x)	1x	f_n (56x ω_c)	f_n (6x ω_c)	1,326

1900 min⁻¹ devir hızı yağsızlık testi verileri ile karşılaştırıldığında, eksenel yöndeki en baskın frekans 3x harmoniğiyle uyarılan doğal frekans olarak gözlenmişken, 2800 min⁻¹ devir sayısında 2x harmoniği tarafından uyarılan doğal frekanstaki sinyal gözlemlenmiştir. Radyal yönde ise 1900 min⁻¹ devir hızı yağsızlık testinde en baskın sinyal 1x harmoniğinde gözlemlenirken, 2800 min⁻¹ devir sayısında 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekans gözlenmiştir.

4.1.2.3 3510 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık testi (T6)

Her iki yönde eksen kaçıklığı belirtisi 2x harmoniğindeki sinyal en yüksek genlikli, balanssızlık belirtisi 1x harmoniğindeki sinyal ikinci en yüksek genlikli sinyal olarak tespit edilmiştir. Dalgaform grafiklerinde balanssızlık (W harfi görünümü) etkileriyle karışık dalgalanmalar gözlenmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.7'de ve harmonikler Tablo 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.7: 3510 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık verileri

Radyal ve eksenel yönde alınan ölçümde, 2x (117,2 Hz) harmoniğindeki sinyal en baskın genlik olarak ortaya çıkmıştır. Yine her iki yönde 1x (58,59 Hz) harmoniği ikinci en yüksek genliğe sahip sinyal olarak meydana gelmiştir. Tablo 4.4'e göre, 3510 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık etkisi altında eksen kaçıklığı belirtisi 2x harmoniği, balanssızlık belirtisi 1x harmoniği ve rulman sinyallerinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyaller görülmektedir.

Tablo 4.4: 3510 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
Y/3510 min ⁻¹ /(R)	2x	1x	f_n (38x ω_c)	f_n (3x)	f_n (43x ω_c)	2,356
Y/3510 min ⁻¹ /(E)	2x	1x	f_n (5x ω_c)	f_n (38x ω_c)	f_n (2x)	2,541

Yağsızlık etkisi altında genel olarak sürtünme kuvvetlerinin artmasıyla beraber doğal frekanslarındaki uyarımlara bağlı rezonans sayılarında artış görülmüştür. Testlerde; 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devir sayılarında eleman geçiş bölgesinde meydana gelen rulman sinyallerinin uyardığı doğal frekansların, 1900 min⁻¹ devir sayısında meydana gelen sinyal frekanslarına göre daha alt harmoniklerde uyarıldığı tespit edilmiştir; bu durum devir sayısı arttıkça sürtünmenin azalmasına bağlıdır. Devir sayısına bağlı olarak radyal ve eksenel yön verilerinde balanssızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşekliklerini andıran belirtiler görülmüştür; devir sayısı yükseldikçe mekanik gevşeklik etkileri azalmıştır.

Referans verileri ile karşılaştırma yapıldığında 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x) ve 128,2 Hz (f_n) frekansı aynı şekilde gözlemlenmiş, diğer sinyaller ise farklı doğal frekanslarda görülmüştür. Yalnızca 1900 min⁻¹ devir sayısındaki ölçümde gözlenen 111,1 Hz doğal frekansı, 3510 min⁻¹ devir sayısındaki yağsızlık ölçümünde de gözlenmiştir. 921,6 Hz ve 128,2 Hz doğal frekansları sadece yağsızlık testinde gözlenmiştir. 922,9 Hz doğal frekansı sadece yağsızlık ve balanssızlık testinde gözlenmiştir. 111,1 Hz doğal frekansı hem 1900 min⁻¹ hem de 3510 min⁻¹ devir sayısında görülmüştür.

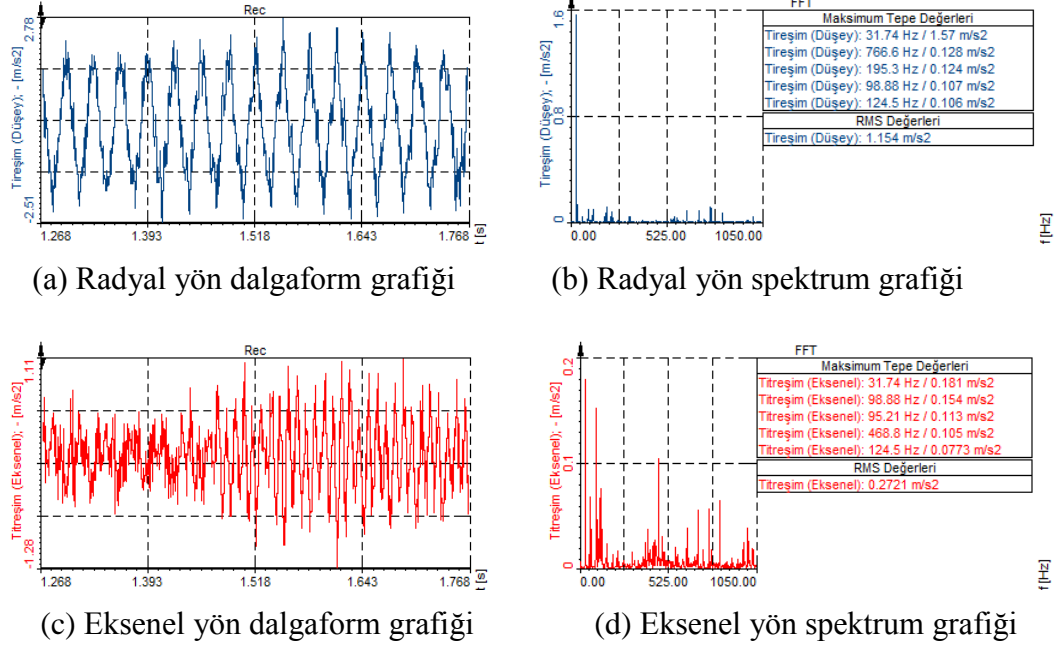
2880 min⁻¹ devir sayısı yağsızlık testi verileri ile karşılaştırıldığında, her iki yönde de en baskın sinyal olan 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekanstaki titreşim, yerini 2x harmoniğinin kendisine bırakmıştır.

4.1.3 Balanssızlık testleri

Balanssızlık testleri, fan kanadına 23 g ağırlık yüklemesi yapılarak 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹, 3510 min⁻¹ devir sayılarında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlere göre 1900 min⁻¹ ve 2880 min⁻¹ devir sayılarında balanssızlık etkisi 1x harmoniğinin en baskın görüldüğü radyal yönde belirgin olarak ortaya çıkarken, 3510 min⁻¹ devir sayısında hem radyal hem de eksenel yönde en baskın harmonik olarak tespit edilmiştir. Dalgaform grafikleri incelendiğinde ise 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde balanssızlık etkisinin açık olarak gözlenebildiği W harfi formunda sinüs eğrileri tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak, balanssızlık etkisi arttıkça sadece radyal yönde değil, eksenel yönde de balanssızlık etkisinin en baskın belirtilere sahip kusur olarak ortaya çıkacağı söylenebilir. Böyle bir durumda eksenel yönde diğer olası kusurların tespiti güçleşebilir.

4.1.3.1 1900 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık testi (T7)

Şekil 4.8'e göre radyal yön verilerinde, 23 g yükün neden olduğu balanssızlık etkisi 1x harmoniğindeki sinyale ait genlik 1,57 m/s² ile baskın olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde radyal yön dalgaform grafiği balanssızlık karakteristik özelliklerini W harfi sinüs eğrisi formu ile ayırt edici olarak göstermiştir. Eksenel yön ölçümünde ise balanssızlık belirtisi olan 1x harmoniğindeki sinyal 0,181 m/s² genliği ile yine birinci baskın sırada ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.8: 1900 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık verileri

Yağsızlık testi 1900 min⁻¹ devir sayısında radyal yönde üçüncü baskın sinyal olarak beliren 766,6 Hz doğal frekansı, aynı devir sayısı etkisi altında Şekil 4.8'deki balanssızlık testi radyal yön verilerinde ikinci baskın sinyal olarak belirmiştir ve sinyal genliği 0,25 m/s²'den 0,128 m/s²'ye gerilemiştir. Bu durum; mevcut durum koşullarına bağlı olarak toplam sistem titreşimi belirgin bir sinyal üzerine yoğunlaştığında, diğer sinyallerin genliğinde göreceli olarak azalma olduğunu ortaya koymaktadır. 31,74 Hz (1x) ve 124,5 Hz (f_n) frekansları referans verilerinde de tespit edilmiştir, diğer sinyaller ise farklı frekanslarda beliren doğal frekanslardaki sinyallerdir. 468,8 Hz (f_n) ve 124,5 Hz (f_n) frekansları sadece balanssızlık testinde görülmüştür.

1900 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık kusuruna ait harmonikler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: 1900 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
B/1900 min ⁻¹ /23 g(R)	1x	f_n (64x ω_c)	f_n (6x)	f_n (3x)	f_n (4x)	1,154
B/1900 min ⁻¹ /23 g(E)	1x	f_n (3x)	3x	f_n (39x ω_c)	f_n (4x)	0,453

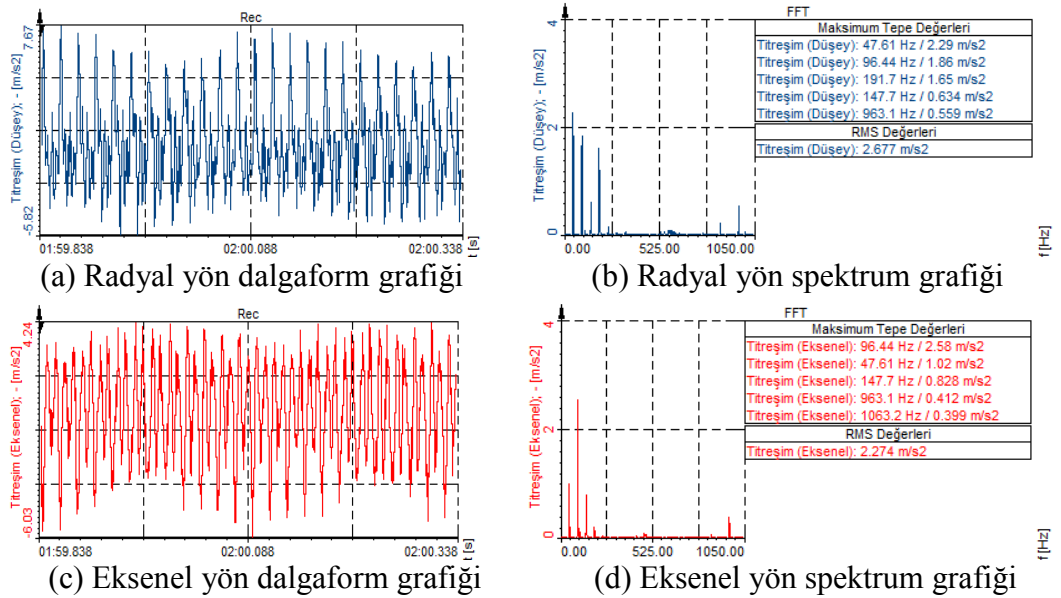
B: Balanssızlık, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

Tablo 4.5'e göre, sinyal genlikleri incelenerek balanssızlık belirtisi 1x harmoniği radyal yönde en baskın sinyal olarak başarılı bir şekilde tespit edilmiştir, eksenel yönde ise 1x harmoniği yine en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Radyal yönde ikinci baskın harmonik incelendiğinde ise $64x\omega_c$ kafes frekansının uyardığı doğal frekans tespit edilmiştir. Radyal yöndeki RMS değerleri, balanssızlıktaki artışla beraber belirgin olarak yükselişe geçmiştir.

Referans verilerinde ikinci baskın sinyal 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekans sinyali olurken, bu testte $64x\omega_c$ kafes frekansının uyardığı doğal frekans olmuştur. Eksenel yönde ise üçüncü baskın sırada 1x harmoniği gözlenirken, bu testte 3x temel frekans harmoniği gözlenmiştir. Referans verilere göre eleman geçiş bölgesi kaynaklı sinyallerde belirginlik artmıştır.

4.1.3.2 2880 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık testi (T8)

Şekil 4.9'a göre radyal yön verilerinde 23 g yükün neden olduğu balanssızlık belirtisi 1x harmoniği birinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir, eksenel yönde ise 1x harmoniği ikinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Radyal yön ve eksenel yön dalgaform grafiklerinde belirgin olarak balanssızlığa ve tepe-tepe (Tp-Tp) değerlerinde düzensizliklere rastlanmıştır.



Şekil 4.9: 2880 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık verileri

Her iki yönde de eleman geçiş bölgesi frekanslarında $51x\omega_c$ kafes frekansı harmoniğinin uyardığı 963,1 Hz doğal frekansındaki sinyal ilk beş baskın sinyal arasında ortaya çıkmıştır. Eksenel yönde eleman geçiş bölgesi frekanslarında $56x\omega_c$

kafes frekansı harmoniğinin uyardığı 1063,2 Hz doğal frekansı da görülmüştür. Radyal yön spektrum verilerinde balanssızlık etkisi açık olarak görülürken, eksenel yön spektrum verilerinde eksen kaçıklığı görünümü belirmiştir.

Balanssızlık etkisi radyal yönde en baskın temel frekansın 1x (47,61 Hz) harmoniğinde 2,29 m/s² genlik değeri ile tespit edilmiştir. Eksenel yönde ise 1x harmoniği, 47,61 Hz frekansında 1,02 m/s² genlik değeri ile gözlenmiştir. Tablo 4.6'ya göre balanssızlık belirtisi temel frekansın 1x harmoniği sadece radyal yön ölçümünde en baskın sinyal olarak görülmüştür. Radyal yönde dördüncü ve beşinci baskın sinyal olarak eleman geçiş bölgesi frekanslarında rulman sinyallerinin uyardığı doğal frekanslar 963,1 Hz frekansında, eksenel yönde ise eleman geçiş bölgesi frekanslarında rulman sinyallerinin uyardığı doğal frekanslar 963,1 Hz ve 1063,2 Hz frekanslarında tespit edilmiştir. Balanssızlık etkisi altında RMS değerleri 1900 min⁻¹ devir sayısındaki teste kıyasla yükselmiştir. RMS değerleri, radyal yönde 1,54 m/s²'den 2,677 m/s²'ye, eksenel yönde ise 0,2721 m/s²'den 2,274 m/s²'ye yükselmiştir. 963,1 Hz ve 1063,2 Hz doğal frekansları sadece balanssızlık testinde görülmüştür. 2880 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık kusurunda oluşan en yüksek genlikli beş sinyal referans verilerindeki ile aynı frekanslarda meydana gelmiştir.

Tablo 4.6: 2880 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık sinyalleri

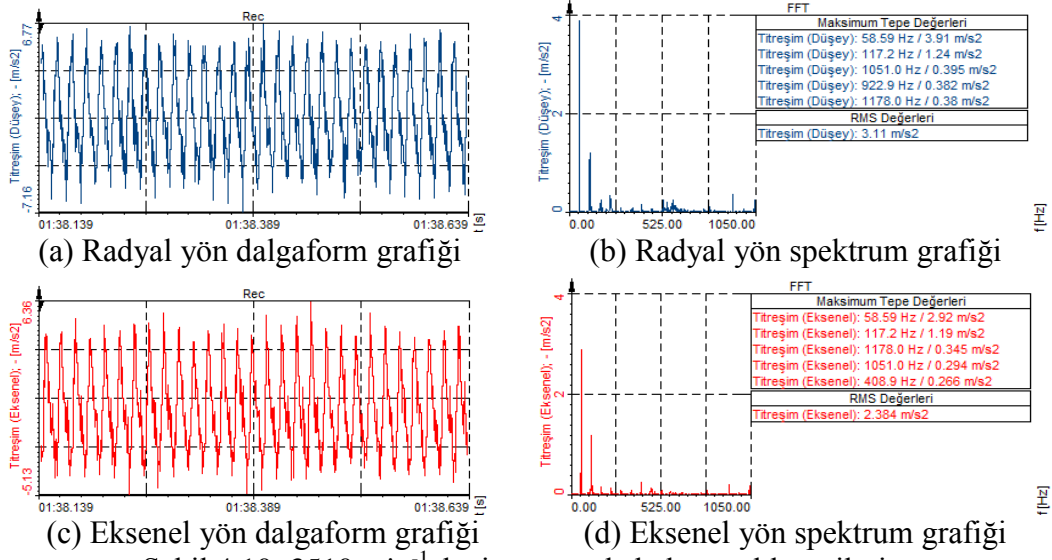
ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
B/2880 min ⁻¹ /23 g/(R)	1x	f_n (2x)	f_n (4x)	f_n (3x)	f_n (51x ω_c)	2,677
B/2880 min ⁻¹ /23 g/(E)	f_n (2x)	1x	f_n (3x)	f_n (51x ω_c)	f_n (56x ω_c)	2,274

1900 min⁻¹ balanssızlık testindeki verilerde radyal yönde 1x harmoniği 2880 min⁻¹ devir sayısı yağsızlık verilerindeki gibi en baskın sinyal olarak gözlenirken, eksenel yönde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansın yerini, 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekans almıştır.

4.1.3.3 3510 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık testi (T9)

Radyal yön ve eksenel yön verilerinde 23 g yük etkisi temel frekansın 1x harmoniğinde en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Her iki yönde eleman geçiş bölgesinde 43x ω_c ve 49x ω_c kafes frekansı harmoniklerinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyaller genlik açısından ilk beş sinyal arasına girmiştir; ayrıca radyal yönde yine rulman titreşim sinyallerinden olan 38x ω_c kafes frekansı harmoniğinin

uyardığı doğal frekansta titreşim sinyali meydana gelmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10: 3510 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık verileri

Radyal ve eksenel ölçümün her ikisinde de temel frekansın 1x (58,59 Hz) harmoniği en yüksek sinyal genliği ile balanssızlık etkisini ortaya çıkarmıştır. 1x harmoniğindeki sinyal genlik değeri radyal yöndeki ölçümde elde edilen 3,91 m/s² ile eksenel yön ölçümünde elde edilen 2,92 m/s² sinyal genliği değerinden daha yüksek çıkmıştır. Tablo 4.7'ye göre testte temel frekansın 1x harmoniğindeki titreşim radyal ve eksenel yönde en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır. Testlerde ikinci baskın sinyal 2x harmoniğinde tespit edilmiştir. Üçüncü baskın sinyalden itibaren eleman geçiş bölgesinde doğal frekansları ifade eden sinyaller gözlenmiştir. RMS değerlerinde devir sayısının artışıyla beraber yükselme meydana gelmiştir. 1051 Hz ve 408,9 Hz doğal frekansları sadece balanssızlık testinde görülmüştür. Referans verileri ile karşılaştırma yapıldığında 58,59 Hz (1x) ve 117,2 Hz (2x) frekansları eş, diğer sinyaller ise farklı frekanslarda gözlenmiştir.

Tablo 4.7: 3510 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
B/3510 min ⁻¹ /23 g/(R)	1x	2x	f_n (43x ω_c)	f_n (38x ω_c)	f_n (49x ω_c)	3,11
B/3510 min ⁻¹ /23 g/(E)	1x	2x	f_n (49x ω_c)	f_n (43x ω_c)	f_n (17x ω_c)	2,384

Devir sayısının 3510 min⁻¹ değerine yükselmesiyle beraber, balanssızlık belirtisi 1x harmoniğindeki sinyal genlikleri de artmıştır. Balanssızlık etkisinin artmasıyla beraber rulman kaynaklı titreşimler de ilk beş baskın sinyal arasına girmiştir.

2880 min⁻¹ devir sayısındaki balanssızlık verileri ile karşılaştırıldığında, radyal yönde en baskın sinyal olarak 1x harmoniği aynen gözlenmiş, aksel yönde ise 2x harmoniği uyardığı temel frekansın yerini almıştır. 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde balanssızlık sinyalleri tablosunda son üç sinyal eleman geçiş bölgesi frekanslarından meydana gelmiştir.

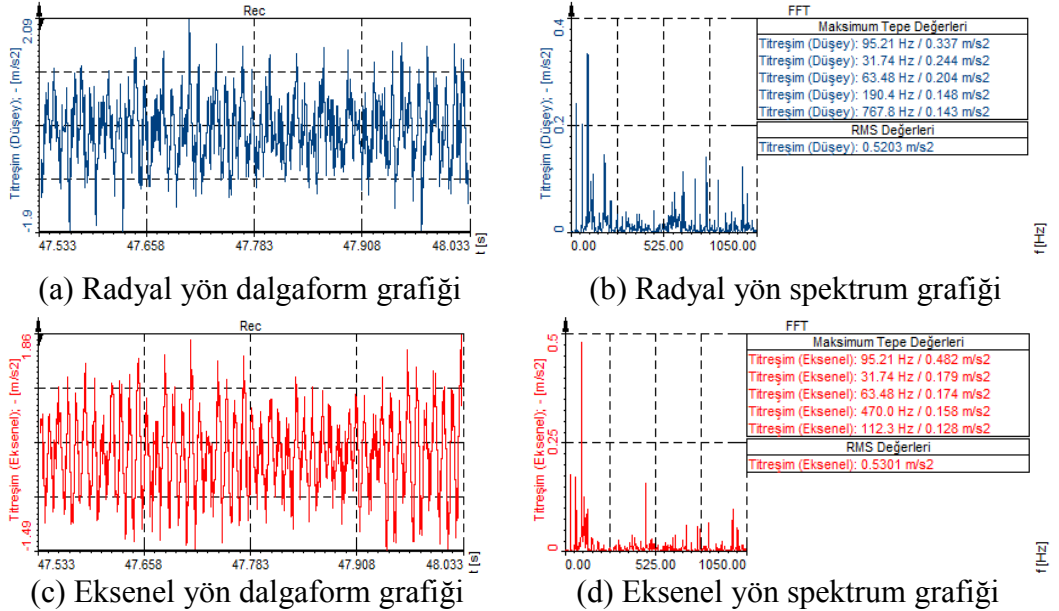
4.1.4 Eksen kaçıklığı testleri

Testler; 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹, 3510 min⁻¹ devir sayılarında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda; eksen kaçıklığı etkisi, aksel yön verileri ile daha ayırt edici belirtilerle tespit edilmiştir; devir sayısı ile eksen kaçıklığı seviyesi arttıkça, eksen kaçıklığı kusur göstergesi sinyallerinde diğer sinyallere kıyasla daha yüksek genlik artışı gözlenmiştir.

4.1.4.1 1900 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı testleri

a) 0,1 mm eksen kaçıklığı testi (T10)

Spektrum bölgesi verileri Şekil 4.11’de incelendiği üzere 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı etkisi, 3x harmoniğini karşılayan 95,21 Hz frekansındaki titreşim sinyalinde radyal yönde 0,337 m/s² ve aksel yönde 0,482 m/s² genlik ile en yüksek genliğe sahip sinyal olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.11: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal ve aksel yönde, 1x (31,74 Hz) harmoniği ikinci ve 2x (63,48 Hz) harmoniği üçüncü en yüksek genlikli sinyaller olarak gözlenmiştir. Devir sayısı ve

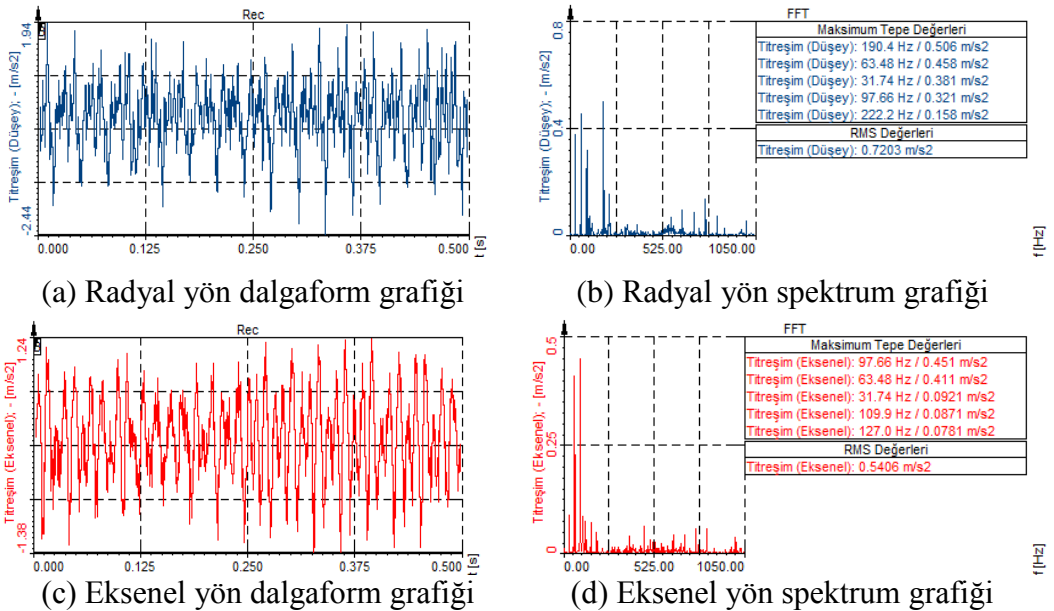
eksen kaçıklığı seviyesine bağlı olarak radyal ve eksenel yönde en yüksek genlikli ilk üç sinyal aynı frekanslarda belirmiştir.

Ölçümlerde, referans verilerinde de gözlenen 31,74 (1x), 63,48 Hz (2x) sinyalleri tespit edilirken, farklı olarak 95,21 Hz (3x) sinyali ve farklı doğal frekanslardaki sinyaller tespit edilmiştir. Radyal yönde beşinci baskın sinyal olarak görülen 767,8 Hz doğal frekansındaki sinyal 771,84 Hz ($64 \times \omega_c$) kafes frekansı harmoniğinin uyarması ile meydana gelen subharmonik rezonans durumuna işaret etmektedir. Eksenel yönde 470,34 Hz ($39 \times \omega_c$) kafes frekansı harmoniğinin uyarması sonucu subharmonik rezonans etkisine giren 470 Hz doğal frekansı tespit edilmiştir, diğer bir kafes frekansı harmoniği olan 108,54 Hz ($9 \times \omega_c$) frekansı 112,3 Hz doğal frekansını uyarak süperharmonik rezonans meydana gelmesine yol açmıştır.

Genel itibari ile değerlendirildiğinde, 1900 min^{-1} devir sayısı 0,1 mm eksen kaçıklığı seviyesinde radyal ve eksenel yön kusur tespit bulguları birbirine yakın bulunmuştur.

b) 0.2 mm eksen kaçıklığı testi (T11)

Spektrum bölgesinde Şekil 4.12 incelendiğinde eksen kaçıklığının 0,2 mm hassasiyetine yükselmesiyle beraber, eksenel yön verilerinde 97,66 Hz doğal frekansını uyaran 3x (95,21 Hz) harmoniğinin ve 2x harmoniğinin baskın olarak ilgili kusur karakteristiklerini daha iyi ortaya koyduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.12: 1900 min^{-1} devir sayısında 0,2 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal yön verilerinde ise 6x (190,4 Hz) harmoniği en baskın sinyal, eksen kaçıklığı belirtisi 2x (63,48 Hz) harmoniği ikinci baskın sinyal, yine mekanik gevşeklik

göstergesi olan 7x (222,2 Hz) harmoniği beşinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Eksenel yönde beşinci baskın sinyal olarak 4x (127 Hz) harmoniği görülmüştür. Eksenel yönde, 108,54 Hz ($9x\omega_c$) kafes frekansı harmoniği 109,9 Hz doğal frekansını uyararak süperharmonik rezonans oluşumuna yol açmıştır. Dalgaform grafiklerinde 0,1 mm eksen kaçıklığına kıyasla farklılık gözlenmiştir; eksen kaçıklığı göstergelerinden olan M harfi yapısı daha belirgin hale gelmiştir.

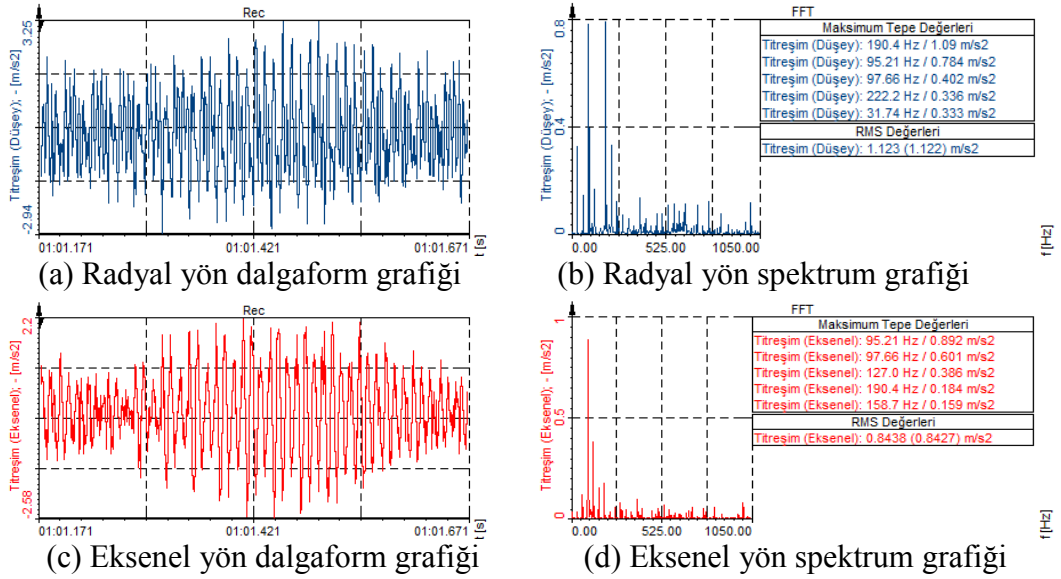
Radyal yön titreşim verileri incelendiğinde 6x (190,4 Hz) harmoniği en yüksek genlikli sinyal olarak gözlenmiştir ve mekanik gevşeklik oluşumunun meydana geldiğine işaret etmektedir. Eksenel yönde ise eksen kaçıklığı göstergesi olan 3x harmoniğini karşılayan 95,21 Hz frekansındaki titreşimin 97,66 Hz doğal frekansı ile çakışması sonucu oluşan süperharmonik rezonansa ait en baskın genlik $0,451 \text{ m/s}^2$ olarak tespit edilmiştir. Her iki yönde 2x ve 1x harmoniklerine ait sinyaller ikinci ve üçüncü en yüksek genlikli sinyaller olarak gözlenmiştir. Eksen kaçıklığı etkisinin yanında radyal yönde 6x ve 7x harmoniklerinin belirmesi mekanik gevşeklik etkilerinin ortaya çıktığını ifade etmektedir. Radyal yönde gözlenen 190,4 Hz (6x), 222,2 Hz (7x), 97,66 Hz (f_n) frekanslarında oluşan sinyaller ve eksenel yön ölçümünde gözlenen 97,66 Hz (f_n), 109,9 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller referans verilerindekinden farklı oluşumlardır.

c) 0,3 mm eksen kaçıklığı testi (T12)

Eksenel yön spektrum grafiği incelendiğinde, eksen kaçıklığı etkisi 3x (95,21 Hz) harmoniğinde en yüksek genlikli sinyal olarak gözlemlenmektedir, diğer baskın sinyallerde görülen 4x, 6x, 5x harmonikleri ise eksen kaçıklığı etkisinin yanında mekanik gevşeklik oluşumunu göstermektedir. Radyal yönde elde edilen spektrum grafiğinde ise eksenel yöne göre daha baskın olmak üzere 6x, 7x mekanik gevşeklik harmonikleri gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde, genlik değişimleri belirgin olarak dalgalanma şeklinde gözlenmeye başlanmıştır. Veri grafikleri Şekil 4.13'te verilmiştir.

Düşey yönde 0,3 mm eksen kaçıklığı etkisi altında radyal yön titreşim verileri incelendiğinde 6x (190,4 Hz) harmoniği en yüksek genlikli sinyal olarak gözlenmiştir. Önceki ölçümlerde 3x harmoniğine ait olan 95,21 Hz frekansındaki titreşim 97,66 Hz doğal frekansı ile çakışıp tek bir sinyal gibi gözlemlenirken, bu ölçümde her iki sinyal de ayrı ayrı tespit edilebilmiştir. Radyal yön titreşim ölçümünde genlik sıralarına göre 6x, 3x, 97,66 Hz (f_n), 7x ve 1x; eksenel yönde ise

3x, 97,66 Hz (f_n) frekansları, 4x, 6x ve 5x harmonikleri gözlenmiştir. Radyal yön baskın sinyalleri arasında balanssızlık belirtisi 1x harmoniği yer alırken, aksel yön sinyalleri arasında gözlenmemiştir.



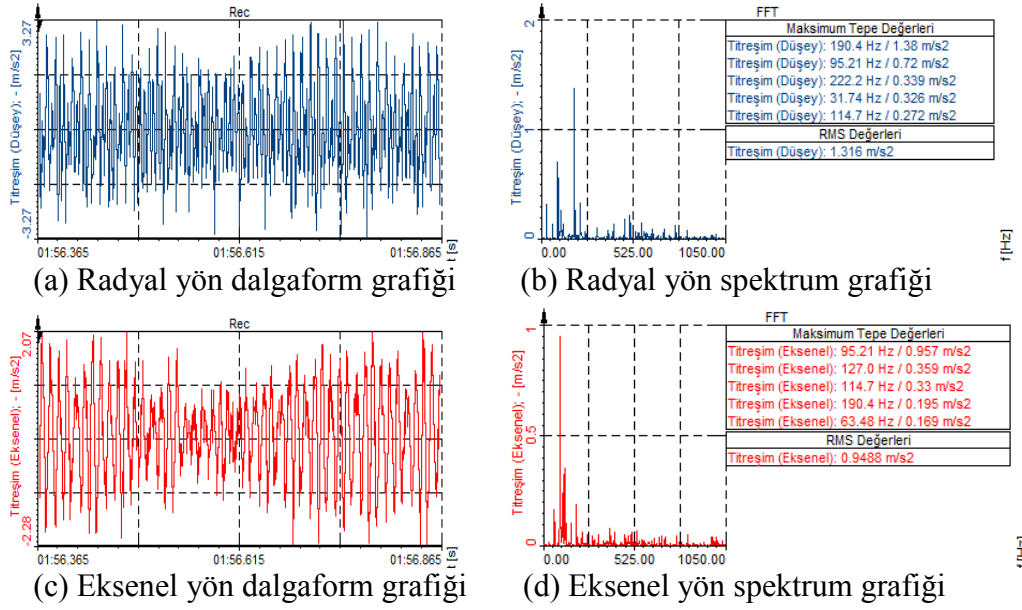
Şekil 4.13: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal yönde gözlenen 95,21 (3x), 190,4 Hz (6x), 222,2 Hz (7x), 97,66 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller ve aksel yön ölçümünde gözlenen 95,21 Hz (3x), 190,4 Hz (6x), 158,7 Hz (5x), 97,66 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller referans verilerinde gözlenmemiş oluşumlardır.

d) 0,4 mm eksen kaçıklığı testi (T13)

Şekil 4.14'te radyal yön titreşim verilerinde 190,4 Hz (6x), 95,21 Hz (3x), 222,2 Hz (7x), 31,74 Hz (1x), 114,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller en baskın beş sinyal arasında tespit edilirken; aksel yönde 95,21 Hz (3x), 127 Hz (4x), 190,4 Hz (6x), 63,48 Hz (2x), 114,7 Hz 95,21 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller gözlenmiştir. Genel itibari ile 0,3 mm ve 0,2 mm eksen kaçıklığındakine benzer belirtiler söz konusudur. Dalgaform grafiklerinde genlik değişimleri dalgalanma şeklinde görülmektedir.

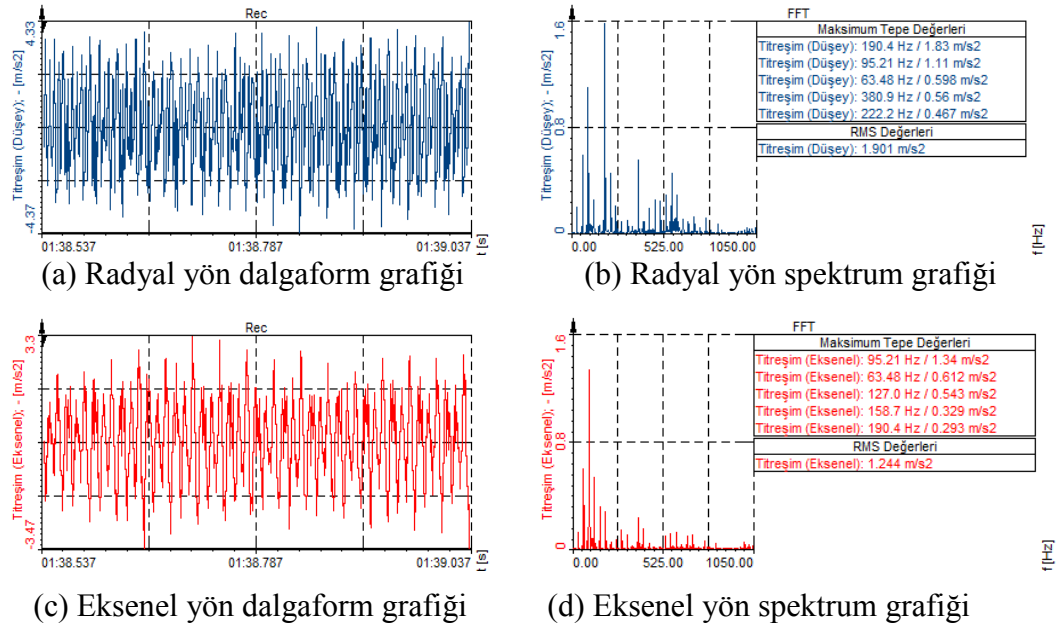
Radyal yönde gözlenen 95,21 (3x), 190,4 Hz (6x), 222,2 Hz (7x), 114,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller ve aksel yön ölçümünde gözlenen 95,21 Hz (3x), 190,4 Hz (6x), 114,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller referans verilerindeki frekanslardan farklı oluşumlardır.



Şekil 4.14: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm eksen kaçıklığı verileri

e) 0,5 mm eksen kaçıklığı testi (T14)

Şekil 4.15'te eksen kaçıklığı belirtileri eksenel yönde 3x harmoniğinde en yüksek genlikli birinci ve 2x harmoniği en baskın ikinci sinyal olarak gözlenmiştir. Radyal yönde ise 12x harmoniğinin görülmesi mekanik gevşeklik etkisinin düşük seviyelerdeki eksen kaçıklıklarına göre daha da arttığını göstermektedir. Dalgaform grafikleri tepe-tepe (Tp-Tp) genlik değişimlerinde dalgalanmalar halinde gözlenmiştir.



Şekil 4.15: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal yönde gözlenen 95,21 Hz (3x), 190,4 Hz (6x), 222,2 Hz (7x), 380,9 Hz (12x) frekanslarındaki sinyaller ve eksenel yön ölçümde gözlenen 95,21 Hz (3x), 190,4 Hz (6x), 158,7 Hz (5x) frekanslarındaki sinyaller referans verilerden farklı frekanslardaki titreşim oluşumlarıdır. Radyal yönde 6x, 3x, 2x, 12x, 7x harmonikleri; eksenel yönde 3x, 2x, 4x, 5x, 6x harmonikleri en baskın ilk beş sinyal arasında görülmüştür. 1900 min⁻¹ devir sayısı için radyal ve eksenel yönde eksen kaçıklığı harmonikleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

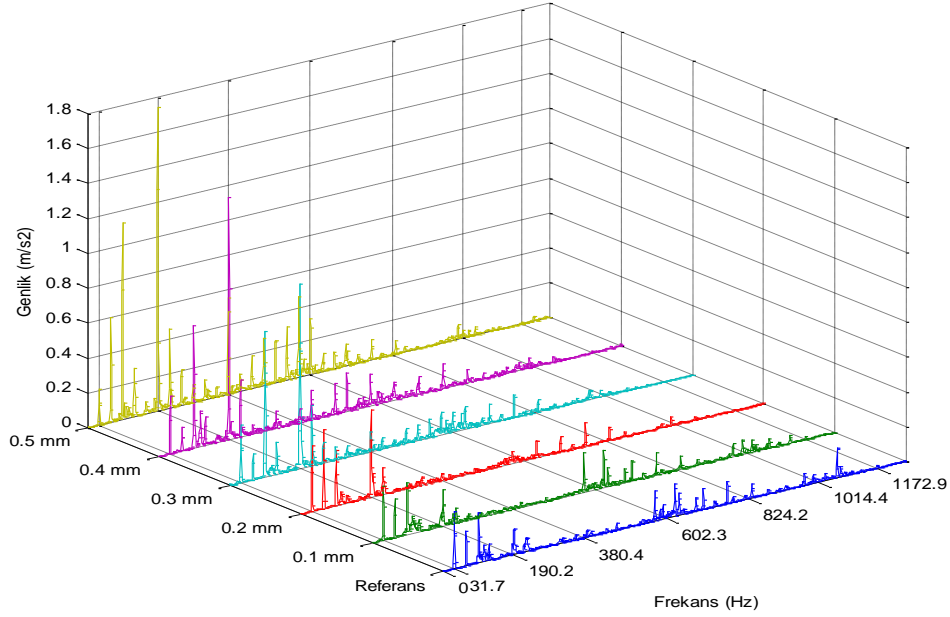
Tablo 4.8: 1900 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
EK/1900 min ⁻¹ /0,1 mm/(R)	3x	1x	2x	6x	f_n (64x ω_c)	0,5203
EK/1900 min ⁻¹ /0,1 mm/(E)	3x	1x	2x	f_n (39x ω_c)	f_n (9x ω_c)	0,5301
EK/1900 min ⁻¹ /0,2 mm/(R)	6x	2x	1x	f_n (3x)	7x	0,7203
EK/1900 min ⁻¹ /0,2 mm/(E)	f_n (3x)	2x	1x	f_n (9x ω_c)	4x	0,5406
EK/1900 min ⁻¹ /0,3 mm/(R)	6x	3x	f_n (3x)	7x	1x	1,122
EK/1900 min ⁻¹ /0,3 mm/(E)	3x	f_n (3x)	4x	6x	5x	0,8427
EK/1900 min ⁻¹ /0,4 mm/(R)	6x	3x	7x	1x	f_n (10x ω_c)	1,316
EK/1900 min ⁻¹ /0,4 mm/(E)	3x	4x	f_n (10x ω_c)	6x	2x	0,9488
EK/1900 min ⁻¹ /0,5 mm/(R)	6x	3x	2x	12x	7x	1,901
EK/1900 min ⁻¹ /0,5 mm/(E)	3x	2x	4x	5x	6x	1,244

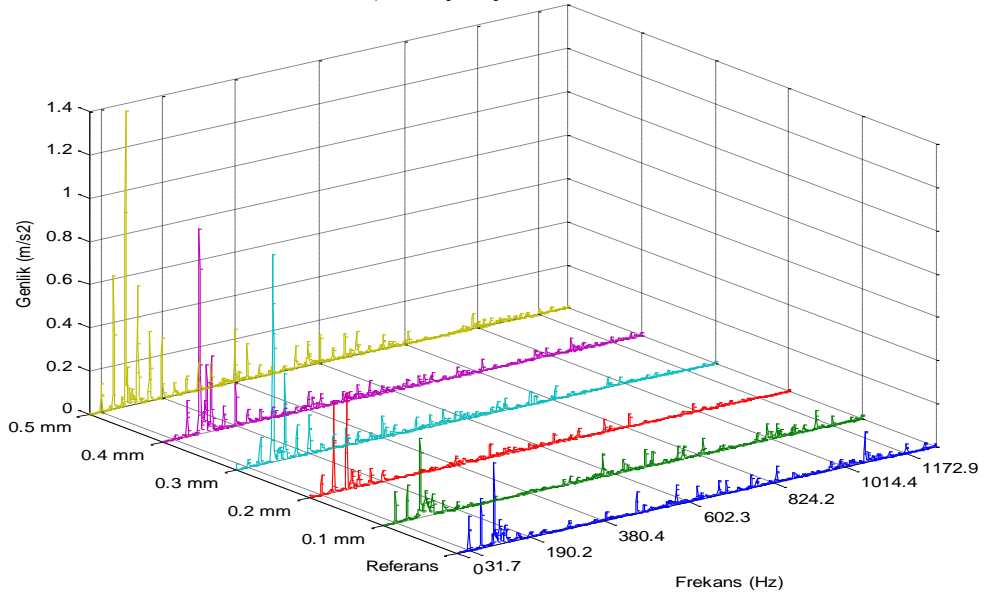
EK: Eksen Kaçıklığı, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

Tablo 4.8’e göre radyal yönde çoğunlukla mekanik gevşeklik belirtisi 6x harmoniği ve eksenel yönde çoğunlukla eksen kaçıklığı belirtisi 3x harmoniği en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır. Eksen kaçıklığı miktarının artması ile kusur frekans harmonikleri artan frekanslarda görülmeye başlanmıştır, bu durum mekanik gevşekliğin meydana geldiğine işaretler. RMS değerlerinde eksen kaçıklığının artmasına paralel yükselme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Referans verileri ile karşılaştırıldığında eksenel yönde gözlenen en baskın titreşim 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekans iken yerini 3x harmoniğine bırakmıştır. Radyal yönde ise en baskın sinyal olarak tespit edilen 1x harmoniği yerini 3x ve 6x harmoniğine bırakmıştır. Test düzeneği üzerinde, 0,1 mm’den beş farklı seviyede kademeli olarak

0,5 mm'ye kadar düşey yönde eksen kaçıklıkları oluşturularak beş adet test gerçekleştirilmiş ve titreşim verileri alınmıştır. Şekil 4.16'da ilgili testlere ait spektrum bulguları çağlayan gösterim şekliyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Spektrum grafikleri incelendiğinde, 1900 min⁻¹ devir sayısında gerçekleştirilen testlerde şaftın bir saniyedeki devir sayısı etkisiyle meydana gelen titreşimin frekansı yaklaşık değer olarak 31,7 Hz temel frekans ve harmonikleri olarak frekans bölgesine yansımıştır.



(a) Radyal yön verileri



(b) Eksenel yön verileri

Şekil 4.16: 1900 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum değişimi

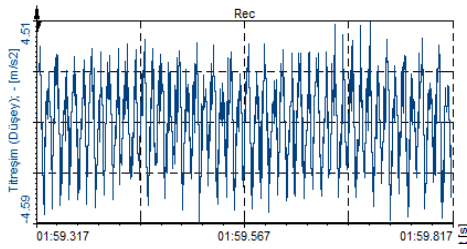
Radyal yönde alınan verilere ait spektrum grafikleri incelendiğinde, eksenel yön verilerinin eksen kaçıklıklarına ait karakteristiklerin tespitinde 2x, 3x ve 6x

harmonikleri ve uyardıkları doğal frekansların; aksel yönde ise 2x ve 3x harmonikleri ile uyardıkları doğal frekansların baskın olarak ayırt edici sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Radyal yön verileri grafiğinde eksen kaçıklığı seviyesinin artmasıyla beraber 0,3 mm seviyesinden itibaren belirgin olarak mekanik gevşeklik meydana gelmesi spektrum grafiğinde eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik harmoniklerinin iç içe geçmesine neden olmuştur. Bunun yanında aksel yön verilerine ait spektrum grafiklerinde de eksen kaçıklığı seviyesinin artmasıyla daha az belirgin olmakla beraber mekanik gevşeklik harmonikleri görülmeye başlanmıştır.

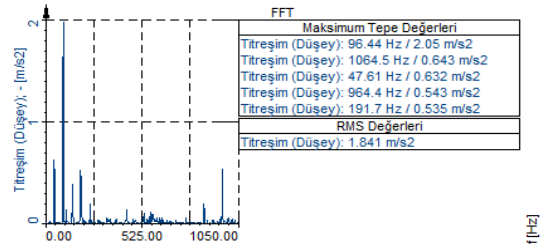
4.1.4.2 2880 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı testleri

a) 0,1 mm eksen kaçıklığı testi (T15)

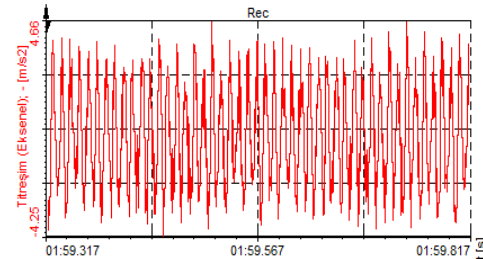
Şekil 4.17’de radyal yön verilerinde; 95,22 Hz (2x) frekansındaki titreşimin 96,44 Hz doğal frekansı ile çakışması sonucu süperharmonik rezonans durumu meydana gelmiş ve en yüksek genlikli sinyal olarak belirmiştir. Diğer taraftan 1064 Hz kafes frekansının uyardığı 1064,5 Hz doğal frekansındaki genlik süperharmonik rezonans oluşumuyla beraber ikinci en yüksek genlikli sinyal olarak tespit edilmiştir, 1x (47,61 Hz) balanssızlık harmoniği üçüncü en yüksek genlikli sinyal olarak tespit edilmiştir ve 4x (190,44 Hz) harmoniğindeki titreşim 191,7 Hz doğal frekansı ile çakışmıştır.



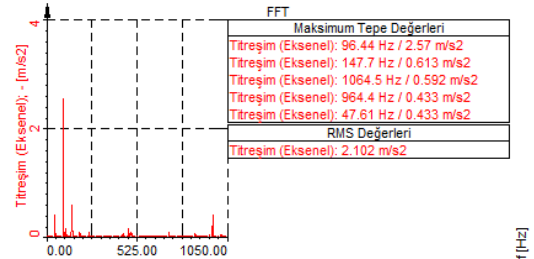
(a) Radyal yön dalgaform grafiği



(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



(d) Eksenel yön spektrum grafiği

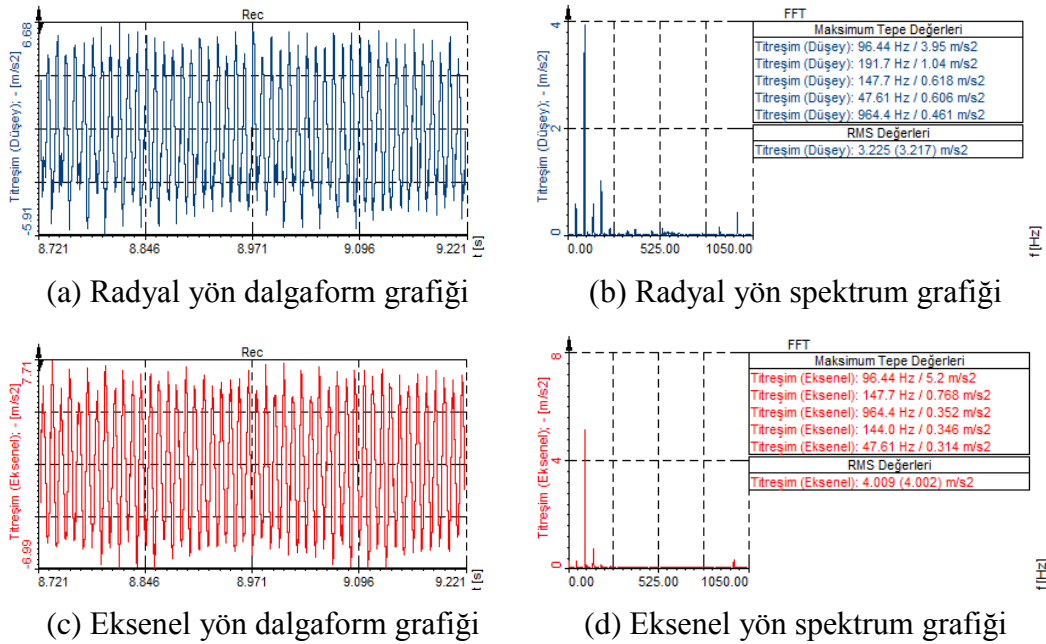
Şekil 4.17: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı verileri

Eksenel yön verilerinde ise eksen kaçıklığı harmoniklerinden olan 95,21 Hz (2x) frekansındaki titreşimin uyardığı 96,44 Hz doğal frekansı ve 142,83 Hz (3x)

titreşiminin uyardığı 147,7 Hz doğal frekansındaki sinyal birinci ve ikinci baskın genlikte belirmiştir, bunun yanında rulman titreşimlerinin uyardığı 1064,5 ve 964,4 Hz doğal frekansları da gözlemlenmiştir. Eksenel yön verileri, doğal frekansları uyaran temel frekans harmonikleri de dahil olmak üzere incelendiğinde eksen kaçıklığı belirtileri ve rulman kaynaklı sinyallerin olduğu gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde dalgalanma gözlemlenmiştir.

b) 0,2 mm eksen kaçıklığı testi (T16)

Radyal ve eksenel yön titreşim verileri incelendiğinde, 0,1 mm eksen kaçıklığı düzeyinde elde edilen bulgulara benzer şekilde 95,21 Hz (2x) titreşim sinyalinin uyardığı 96,44 Hz doğal frekansında meydana gelen süperharmonik rezonans durumu gözlemlenmiş ve en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.17’de radyal ve eksenel yönde 2x eksen kaçıklığı harmoniği ile $51x\omega_c$ kafes frekansı harmoniğinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyallere rastlanmıştır.



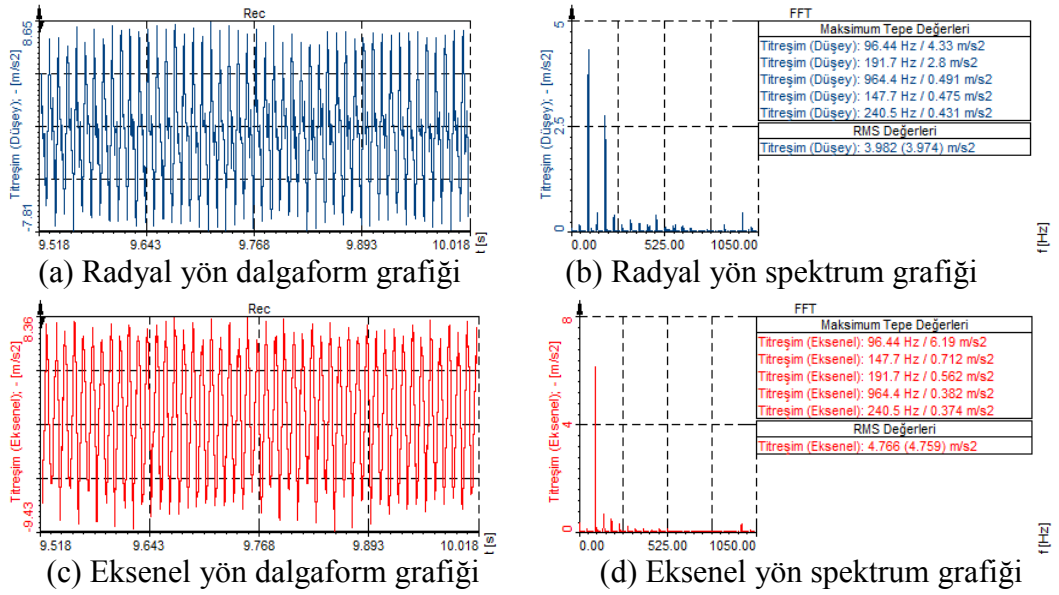
Şekil 4.18: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm kaçıklık etkisi verileri

Radyal yönde baskınlık sırasına göre diğer titreşim sinyalleri 191,7 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 964,4 Hz (f_n) frekanslarında; eksenel yönde ise 147,4 Hz (f_n), 964,4 Hz (f_n), 144 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x) frekanslarında belirmiştir. Radyal yönde, eksenel yönden farklı olarak balanssızlık harmoniği olan 1x daha baskın sırada gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde sadece dalgalanma etkisi gözlemlenmektedir. Radyal yönde 95,21 Hz (2x) frekansındaki sinyal ile 96,44 Hz doğal frekansındaki sinyal, 190,44 Hz (4x) frekansındaki sinyal ile 191,7 Hz frekansındaki doğal frekans,

142,83 Hz (3x) frekansındaki sinyal ile 147,7 Hz doğal frekansı çakışmış ve süperharmonik rezonans durumu meydana gelmiştir.

c) 0,3 mm eksen kaçıklığı testi (T17)

Radyal ve eksenel ölçümde en baskın beş sinyalin baskınlık sıraları değişmekle beraber aynı frekanslardaki sinyaller olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.19'da eksenel yön ölçümünde 2x eksen kaçıklığı harmoniğinin uyardığı 96,44 Hz doğal frekansındaki sinyal en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır. Her iki yön ölçümde 964,4 Hz doğal frekansındaki sinyal ilk beş baskın sinyal arasında ortaya çıkmıştır. Dalgaform grafiklerinde tepe-tepe (Tp-Tp) değerleri değişimi göze çarpmaktadır. Radyal ve eksenel yönde 190,44 Hz (4x) frekansındaki sinyal 191,7 Hz doğal frekansını, 142,83 Hz (3x) frekansındaki sinyal 147,7 Hz doğal frekansını, 238,05 Hz (5x) frekansındaki sinyal 240,5 Hz doğal frekansını uyarak süperharmonik rezonans durumlarının görülmesine yol açmıştır.

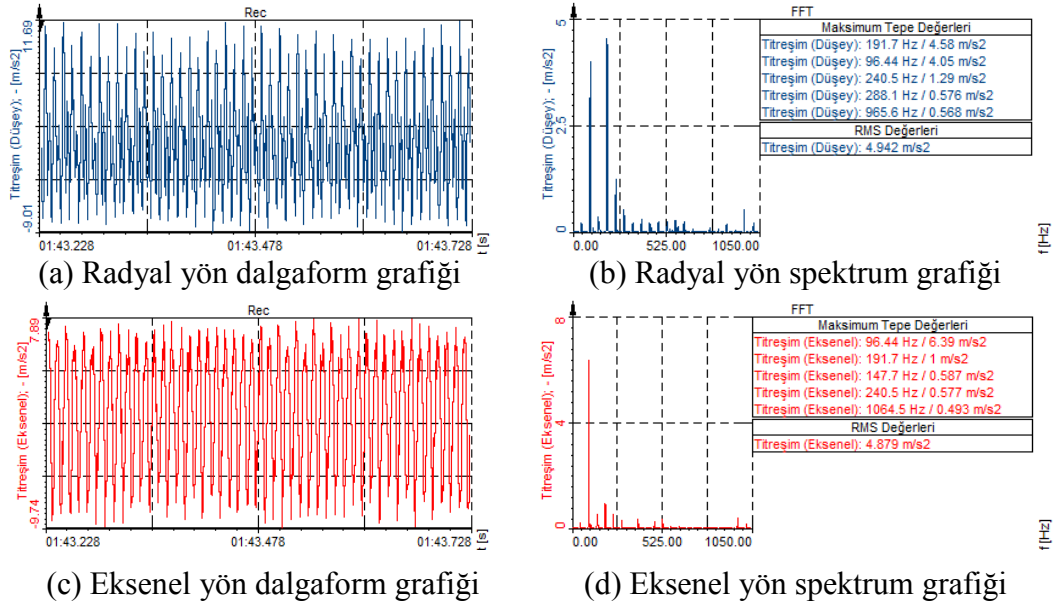


Şekil 4.19: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı verileri

d) 0,4 mm eksen kaçıklığı testi (T18)

2880 min⁻¹ devir sayısında gerçekleştirilen 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm eksen kaçıklığı testlerinde radyal yönde 96,44 Hz doğal frekansındaki titreşim sinyali en baskın sinyal olarak belirirken, 0,4 mm düzeyinde en baskın sinyal 191,7 Hz doğal frekansındaki sinyal olmuştur. Radyal ve eksenel yönde eleman geçiş bölgesinde rulman sinyallerinden $51x\omega_c$ harmoniğinin uyardığı doğal frekansta titreşim sinyali tespit edilmiştir. 0,4 mm kaçıklık düzeyinde 0,3 mm kaçıklık titreşim verilerinden

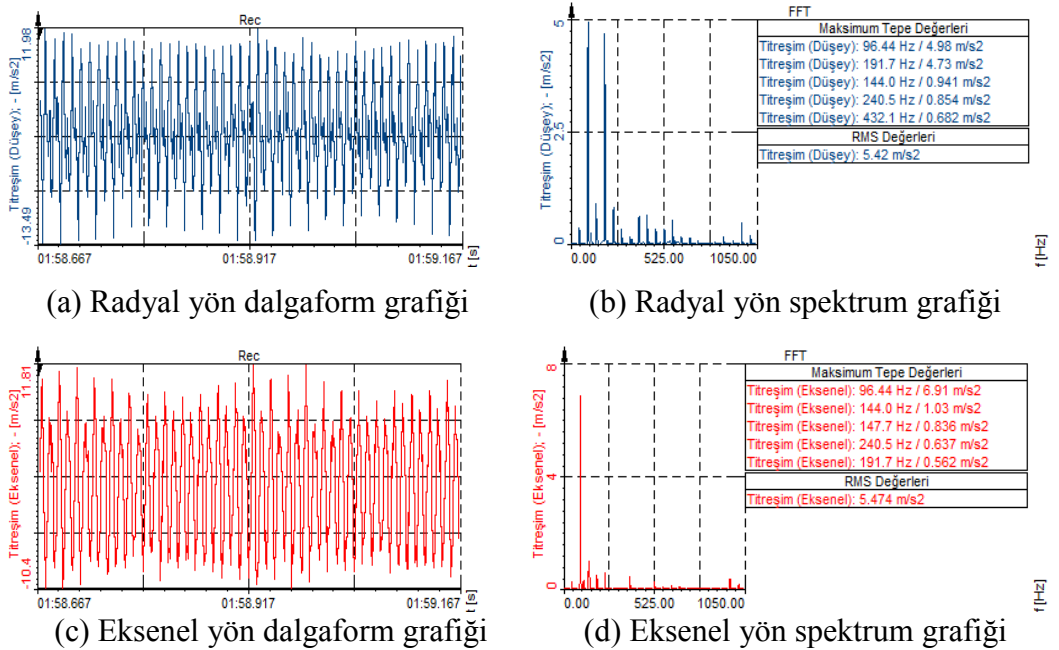
farklı olarak 285,66 Hz (6x) frekansı 288,1 Hz doğal frekansındaki titreşim sinyalini ve rulman titreşim sinyalleri de radyal yönde 965,6 Hz, aksel yönde 1064,5 Hz doğal frekansını uyarmıştır.



Şekil 4.20: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm kaçıklık etkisi verileri

e) 0,5 mm eksen kaçıklığı testi (T19)

Şekil 4.21'de aksel yönde 95,21 Hz (2x) frekansındaki titreşim sinyalinin uyardığı 144 Hz ve 147,7 Hz doğal frekanslardaki süperharmonik rezonans etkisi; radyal yönde 95,21 Hz (2x) frekansındaki titreşim sinyalinin uyardığı 96,44 Hz doğal frekansındaki süperharmonik rezonans etkisi en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.21: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal yönde 190,44 Hz (4x) frekansındaki titreşim sinyali 191,7 Hz doğal frekansını, 240,5 Hz (5x) frekansındaki titreşim sinyali 240,5 Hz doğal frekansını ve 428,49 Hz (9x) frekansındaki titreşim sinyali 432,1 Hz doğal frekansını uyararak süperharmonik rezonansa sokmuştur. Radyal yönde daha belirgin olmak üzere her iki yönde doğal frekansları uyaran temel frekanslar da değerlendirmeye dahil olmak üzere 3x üstü mekanik gevşeklik harmonikleri gözlemlenmiştir.

Tablo 4.9’da radyal ve eksenel yönde eksen kaçıklığı harmonikleri karşılaştırma yapmaya imkan verme amaçlı olarak sunulmuştur.

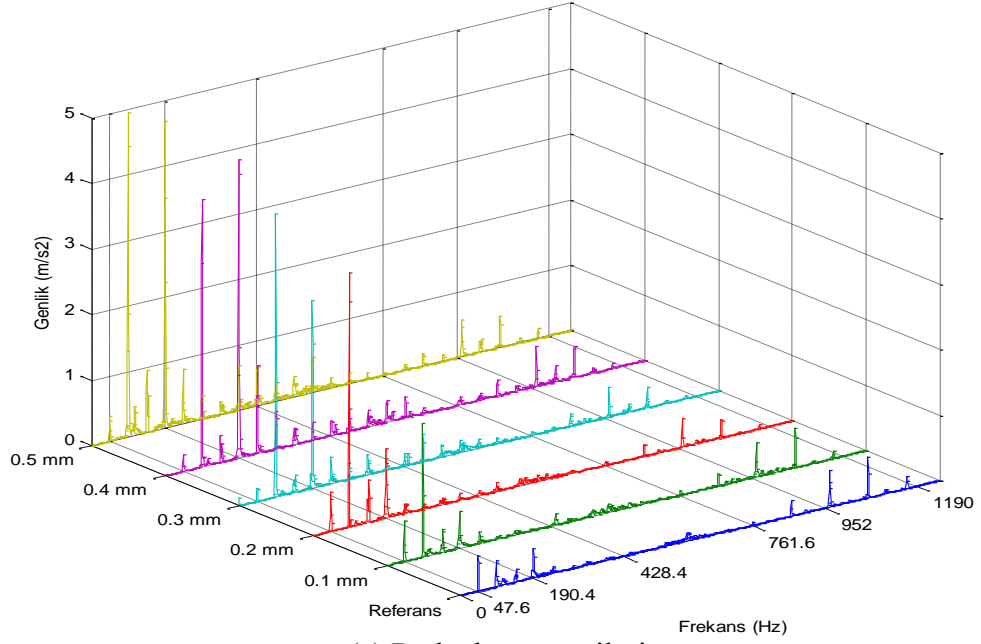
Tablo 4.9: 2880 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
EK/2880 min ⁻¹ /0,1 mm/(R)	f_n (2x)	f_n (56x ω_c)	1x	f_n (51x ω_c)	f_n (4x)	1,841
EK/2880 min ⁻¹ /0,1 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (56x ω_c)	f_n (51x ω_c)	1x	2,102
EK/2880 min ⁻¹ /0,2 mm/(R)	f_n (2x)	f_n (4x)	f_n (3x)	1x	f_n (51x ω_c)	3,217
EK/2880 min ⁻¹ /0,2 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (51x ω_c)	f_n (3x)	1x	4,002
EK/2880 min ⁻¹ /0,3mm/(R)	f_n (2x)	f_n (4x)	f_n (51x ω_c)	f_n (3x)	f_n (5x)	3,974
EK/2880 min ⁻¹ /0,3 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (4x)	f_n (51x ω_c)	f_n (5x)	4,759
EK/2880 min ⁻¹ /0,4mm/(R)	f_n (4x)	f_n (2x)	f_n (5x)	f_n (6x)	f_n (51x ω_c)	4,942
EK/2880 min ⁻¹ /0,4 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (4x)	f_n (3x)	f_n (5x)	f_n (51x ω_c)	4,879
EK/2880 min ⁻¹ /0,5mm/(R)	f_n (2x)	f_n (4x)	f_n (3x)	f_n (5x)	f_n (9x)	5,42
EK/2880 min ⁻¹ /0,5 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (3x)	f_n (5x)	f_n (4x)	5,474

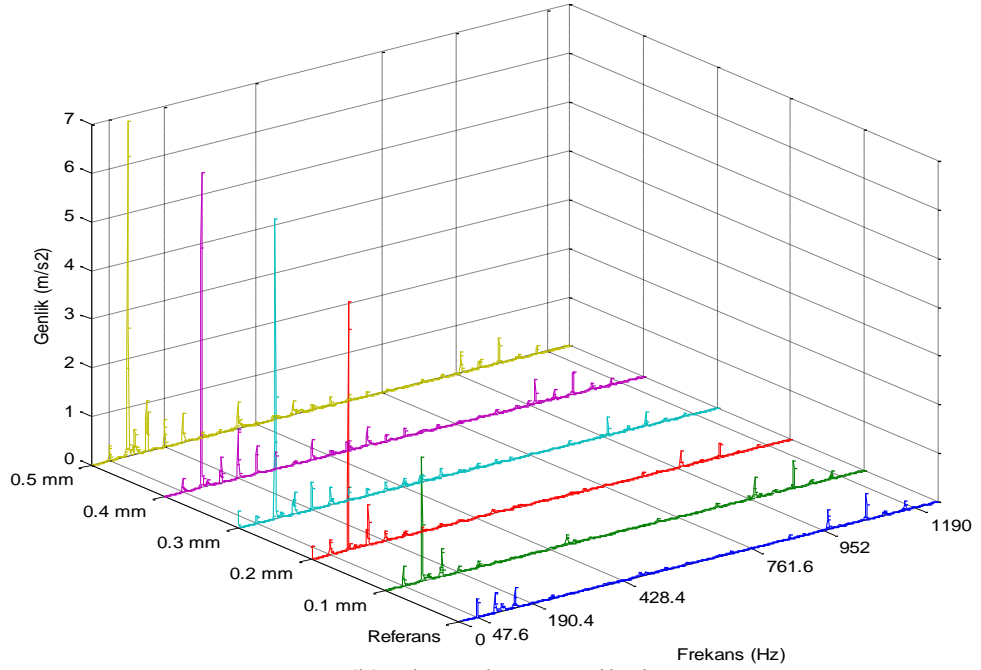
EK: Eksen Kaçıklığı, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

Tablo 4.9’a göre 2880 min⁻¹ devir sayısında tüm eksen kaçıklığı testlerinde eksenel yön ölçümlerinde 2x eksen kaçıklığı harmoniğinin uyardığı doğal frekans en baskın sinyal (1.S) olarak belirirken, radyal yönde ise 2x harmoniğinden farklı olarak 4x mekanik gevşeklik harmoniğinin uyardığı doğal frekans da görülmüştür. RMS değerleri eksen kaçıklığının artmasına paralel olarak yükselmiştir. 1900 min⁻¹ devir sayısındaki eksen kaçıklığı verileri ile karşılaştırma yapıldığında eksenel yönde en baskın sinyal olan 3x harmoniğinin yerini 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansa

bıraktığı tespit edilmiştir. Radyal yönde ise en baskın ilk iki sinyal 3x ve 6x harmonikleri yerlerini 2x ve 4x harmoniklerinin uyardığı doğal frekanslara bırakmıştır. 2880 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum değişimleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Grafiklerde, eksen kaçıklığının eksenel verilerde daha ayırt edici olmakla beraber her iki yönde de algılandığı söylenebilir; ancak radyal yön verilerinde mekanik gevşeklik belirtileri ile karıştırılma ihtimali bulunmaktadır.



(a) Radyal yön verileri



(b) Eksenel yön verileri

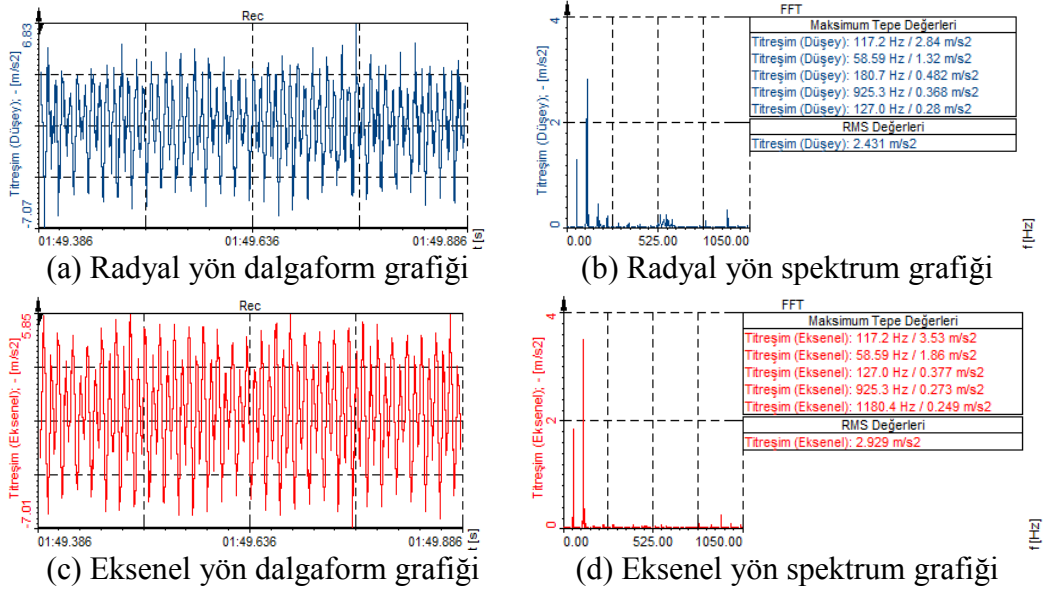
Şekil 4.22: 2880 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum diyagramları

Şekil 4.22'de, 2880 min^{-1} devir sayısında radyal ve eksenel yön titreşim verileri dalgaform ve spektrum görüntüleme teknikleri ile verilmiştir. Radyal yön verilerinde eksen kaçıklığı seviyesi 0,1 mm - 0,2 mm aralığındayken 2x harmoniği belirginleşmeye başlamıştır, 0,3 mm - 0,5 mm aralığında ise 2x harmoniğinin yanında 4x harmoniğinde de sinyal genliğinde belirginleşme görülmüştür. Eksenel yön verilerinde ise sadece 2x harmoniğinde sinyal genliği artışı belirginleşmiştir. Radyal yönde daha belirgin olmak üzere eleman geçiş bölgesinde sinyaller görülmeye başlanmıştır.

4.1.4.3 3510 min^{-1} devir sayısında eksen kaçıklığı testleri

a) 0,1 mm eksen kaçıklığı testi (T20)

Şekil 4.23'te eksen kaçıklığını temsil eden 2x harmoniği her iki yönde en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır ve balanssızlık göstergesi 1x harmoniği her iki yönde ikinci baskın sinyal olarak gözlemlenmiştir. Radyal yönde 175,77 Hz (3x) sinyali ise 180,7 Hz doğal frekans sinyalinu uyarmıştır. Eksenel yönde rulman frekanslarından $49x\omega_c$ kafes frekansı harmoniği 1180,4 Hz doğal frekansını uyarmıştır. Her iki yönde de 127 Hz doğal frekansı görülmüştür. Dalgaform grafiklerinde dalgalanmalar, tepe-tepe (T_p - T_p) değerlerinde geçişler ve genliklerde eksi yöne kaymalar mevcuttur.



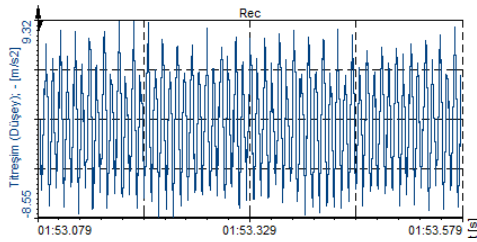
Şekil 4.23: 3510 min^{-1} devir sayısında 0,1 mm kaçıklık etkisi verileri

Spektrum grafiklerinde radyal yönde 117,2 Hz (2x), 58,59 Hz (1x) frekansları ve 180,7 Hz, 925,3 Hz, 127 Hz doğal frekans sinyalleri; eksenel yönde ise 117,2 Hz (2x), 58,59 (1x) ve 127 Hz, 925,3 Hz, 1180,4 Hz doğal frekanslarındaki sinyaller en

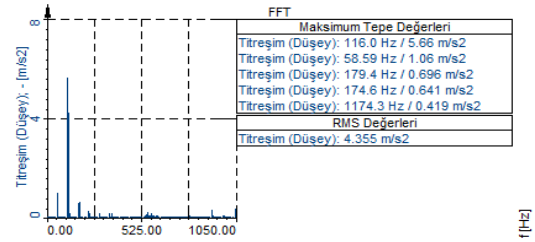
yüksek genlikli beş sinyal arasında belirlemiştir. Bu belirtilerle eksen kaçıklığı etkisini başarılı bir şekilde tespit edilebilmektedir.

b) 0,2 mm eksen kaçıklığı testi (T21)

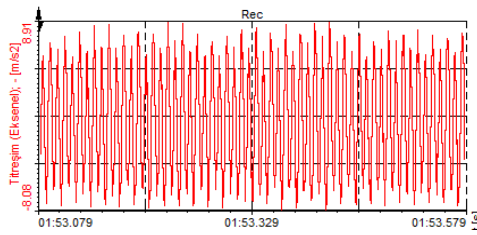
Şekil 4.24'te her iki yönde 117,2 Hz (2x) frekansındaki titreşim sinyalinin uyardığı 116 Hz doğal frekansı subharmonik rezonans karakteristiği göstererek en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır ve balanssızlık belirtisi 1x harmoniği her iki yönde de ikinci baskın sinyal olarak gözlemlenmiştir. Radyal yönde 175,77 Hz (3x) frekansındaki titreşim sinyali 179,4 Hz doğal frekansını uyararak süperharmonik, 174,6 Hz doğal frekansını uyararak ise subharmonik rezonans oluşumu meydana gelmesine yol açmıştır. Ayrıca, her iki yönde rulman frekanslarının uyardığı 1174,3 Hz doğal frekansı tespit edilmiş ve sadece eksenel yönde 1046,1 Hz ve 127 Hz doğal frekanslarında sinyaller gözlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde dalgalanmalar mevcuttur.



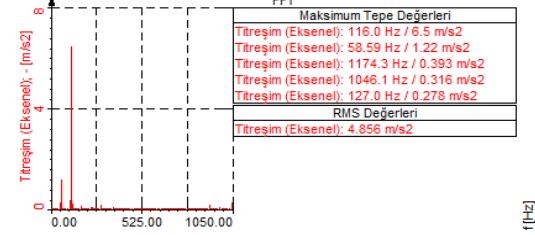
(a) Radyal yön dalgaform grafiği



(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



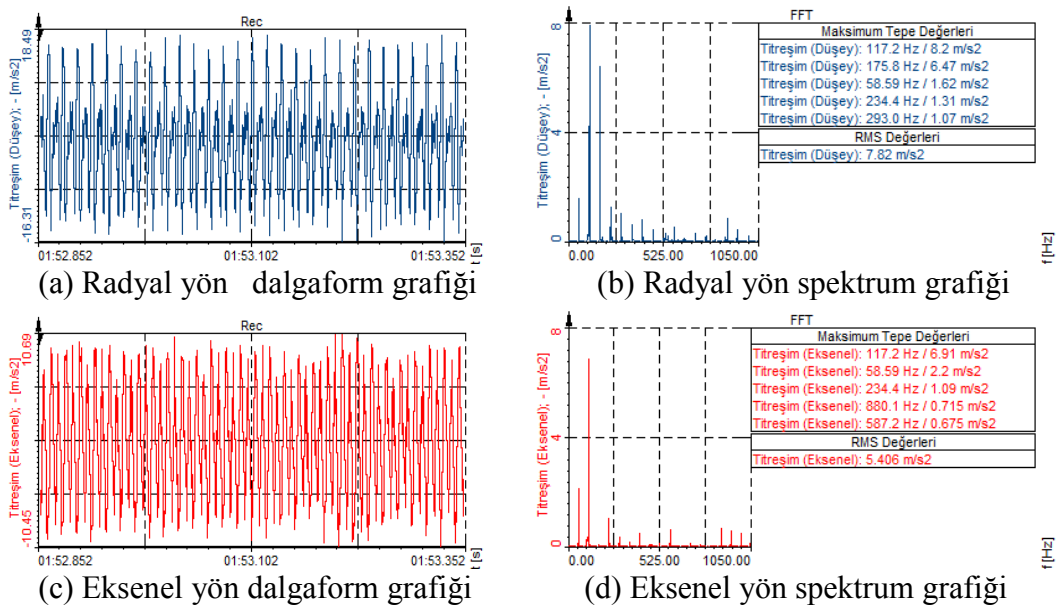
(d) Eksenel yön spektrum grafiği

Şekil 4.24: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm kaçıklık etkisi verileri

Radyal yönde 175,77 Hz (3x) sinyalinin uyardığı 174,6 Hz ve 179,4 Hz doğal frekans sinyallerinde meydana gelen rezonans durumu ile hem subharmonik hem de süper harmonik rezonans meydana gelmiştir. Diğer taraftan, spektrumlardaki 116 Hz doğal frekansını uyarayan 117,2 Hz (2x) frekansındaki genlik en baskın sinyal ve 58,59 Hz (1x) frekansındaki genlik ikinci baskın sinyal olarak gözlenmiş ve eksen kaçıklığı belirtisini belirgin olarak ortaya koymuştur.

c) 0,3 mm eksen kaçıklığı testi (T22)

Her iki yönde 2x harmoniği en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir; balanssızlık göstergesi olan 1x harmoniği radyal yönde üçüncü baskın, eksenel yönde ikinci baskın sinyal olarak gözlemlenmiştir. Radyal yönde 3x (175,8 Hz) eksen kaçıklığı harmoniği, 5x (293 Hz) harmoniği ve her iki yönde 4x (234,4 Hz) harmoniği tespit edilmiştir. Eksenel yönde eleman geçiş bölgesinde 878,85 Hz (15x) frekansındaki sinyalin uyardığı 880,1 Hz doğal frekansı, 585,9 Hz (10x) frekansındaki sinyalin uyardığı 587,2 Hz doğal frekansındaki sinyal tespit edilmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.25'te verilmiştir.



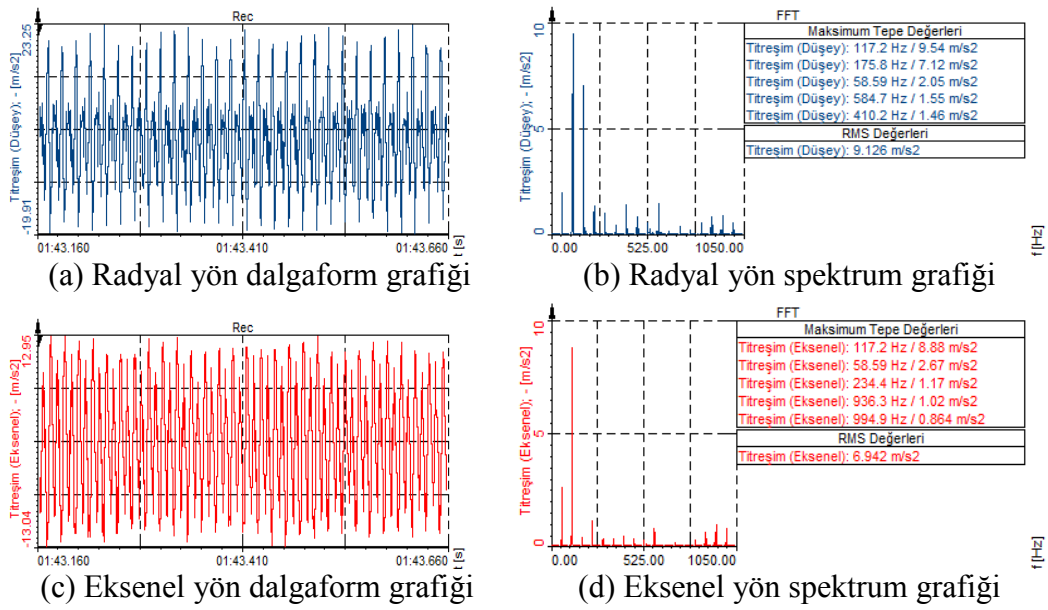
Şekil 4.25: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal yönde en yüksek genlikli beş sinyal arasında 117,2 Hz (2x), 175,8 Hz (3x), 58,59 Hz (1x), 234,4 Hz (4x), 293 Hz (5x) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 117,2 Hz (2x), 58,59 Hz (1x), 234,4 Hz (4x), 880,1 Hz (f_n), 587,2 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller belirlemiştir. Test edilen devir sayısının eksen kaçıklığı üzerindeki etkisiyle beraber radyal yönde artan katlarda mekanik gevşeklik harmonikleri gözlenmiştir. Eksenel yönde ise eksen kaçıklığı belirtisi harmoniklerin yanı sıra rulman sinyallerinin uyardığı doğal frekanslardaki sinyaller belirginleşmiştir.

d) 0,4 mm eksen kaçıklığı testi (T23)

Her iki yönde de 2x harmoniğindeki titreşim genliği en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Balanssızlık göstergesi 1x harmoniği eksenel yönde ikinci baskın, radyal

yönde üçüncü baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Bu sinyallerin dışında radyal yönde 175,8 Hz (3x), 410,2 Hz (7x) frekanslarındaki sinyaller ve 585,9 Hz (10x) frekansındaki sinyalin uyardığı 584,7 Hz doğal frekansındaki sinyal gözlenmiştir. Eksenel yön verilerinde radyal yön verilerine kıyasla daha yüksek frekanslarda titreşimler tespit edilmiştir. Eksenel yönde görülen 117,2 Hz (2x), 58,59 Hz (1x) ve 234,4 Hz (4x) temel frekans katlarında gözlemlenen sinyallerin yanında 937,44 Hz (16x) frekansındaki sinyalin uyardığı 936,3 Hz doğal frekansında ve 996,03 Hz (17x) frekansındaki sinyalin uyardığı 994,9 Hz doğal frekansında subharmonik rezonans oluşumları gözlenmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.26'da verilmiştir.



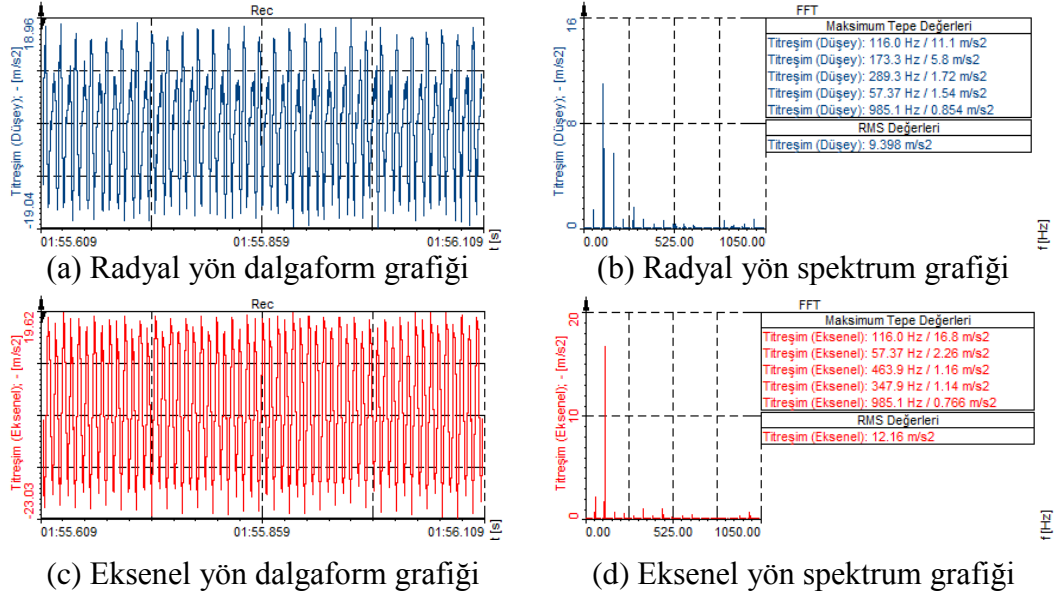
Şekil 4.26: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm eksen kaçıklığı verileri

Radyal yönde 117,2 Hz (2x), 175,8 Hz (3x), 58,59 Hz (1x), 584,7 Hz (f_n), 410,2 Hz (7x) frekanslarındaki sinyaller ve eksenel yönde 117,2 Hz (2x), 58,59 Hz (1x), 234,4 Hz (4x), 936,3 Hz, 994,9 Hz (f_n) frekanslarında titreşim sinyalleri tespit edilmiştir. Bu bulgulara dayanarak eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik teşhisi konulmuştur; eksenel yönde ise rulman sinyallerinin uyardığı doğal frekanslarda görülen rezonans etkileri daha belirginleşmiştir.

e) 0,5 mm eksen kaçıklığı testi (T24)

Her iki yönde 117,2 Hz (2x) frekansındaki sinyalin uyardığı ve subharmonik rezonans durumunun meydana geldiği 116 Hz doğal frekansındaki titreşim sinyali en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. 58,59 Hz (1x) temel frekansında balanssızlık sinyalinin uyardığı 57,37 Hz doğal frekansındaki sinyal eksenel yönde ikinci baskın, radyal yönde dördüncü baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Eksenel yön verilerinde

ve radyal yön verilerinde rulman frekanslarının uyardığı 985,1 Hz doğal frekansındaki genlik beşinci baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı etkisi verileri

Radyal yönde 116 Hz, 173,3 Hz, 289,3 Hz, 57,37 Hz, 985,1 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 116 Hz, 57,37 Hz, 463,9 Hz, 347,9 Hz, 985,1 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller en yüksek genlikli beş sinyal arasında belirlemiştir. Bu test sonuçlarında tüm en yüksek genlikli sinyallerin doğal frekanslardan oluşması dikkat çekicidir. Temel frekans ve katlarında oluşan sinyallerin uyardığı 116 Hz, 173,3 Hz, 289,3 Hz, 57,37 Hz (f_n) frekansındaki sinyallerde subharmonik rezonans ve rulman sinyallerinin uyardığı 463,9 Hz (f_n), 347,9 Hz (f_n), 985,1 Hz (f_n) frekanslarında süperharmonik rezonans durumu gözlenmiştir.

Tablo 4.10’a göre gerçekleştirilen testlerde, gerek radyal yön verilerinde, gerekse eksenel yön verilerinde 2x eksen kaçıklığı harmoniği ve uyardığı doğal frekanstaki titreşim sinyali en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. İkinci baskın sinyal olarak ise 0,3 mm eksen kaçıklığına kadar her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği görülmüştür; 0,3 mm ve üst seviyedeki eksen kaçıklıklarında ise radyal yön verilerinde 3x eksen kaçıklığı harmoniği, eksenel yönde ise 1x balanssızlık harmoniği en baskın sinyal olarak gözlenmiştir. RMS değerleri eksen kaçıklığının artmasıyla beraber yükselişe geçmiştir.

Tablo 4.10'a göre devir sayıları göz önüne alınarak değerlendirilme yapıldığında; 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹, 3510 min⁻¹ devir sayılarında gerçekleştirilen testlerde eksen kaçıklığı kusurunun eksenel yön ölçüm verileriyle tespitinin daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Test edilen 3510 min⁻¹ devir sayısında yapılan testlerde 1x balanssızlık harmoniği sinyal genliği sıralamasında ikinci sıraya kadar yükseldiği gözlenmiştir. Tüm test devir sayılarında zaman zaman mekanik gevşeklik etkileri de görülmüştür. Devir sayısı yükseldikçe eksen kaçıklığı etkisi artmıştır.

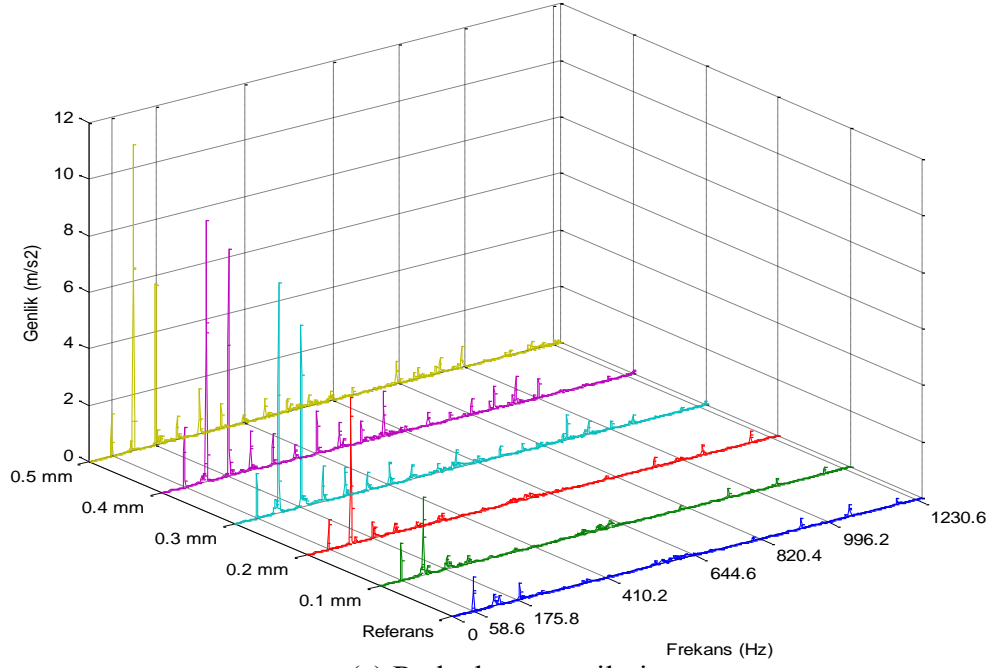
Tablo 4.10: 3510 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
EK/3510 min ⁻¹ /0,1 mm/(R)	2x	1x	f_n (3x)	f_n (38x ω_c)	f_n (5x ω_c)	2,431
EK/3510 min ⁻¹ /0,1 mm (E)	2x	1x	f_n (5x ω_c)	f_n (38x ω_c)	f_n (49x ω_c)	2,929
EK/3510 min ⁻¹ /0,2 mm/(R)	f_n (2x)	1x	f_n (3x)	f_n (3x)	f_n (48x ω_c)	4,355
EK/3510 min ⁻¹ /0,2 mm/(E)	f_n (2x)	1x	f_n (48x ω_c)	f_n (43x ω_c)	f_n (5x ω_c)	4,856
EK/3510 min ⁻¹ /0,3 mm/(R)	2x	3x	1x	4x	5x	7,82
EK/3510 min ⁻¹ /0,3 mm/(E)	2x	1x	4x	f_n (15x)	f_n (10x)	5,406
EK/3510 min ⁻¹ /0,4 mm/(R)	2x	3x	1x	f_n (10x)	f_n (7x)	9,126
EK/3510 min ⁻¹ /0,4 mm/(E)	2x	1x	4x	f_n (16x)	f_n (17x)	6,942
EK/3510 min ⁻¹ /0,5 mm/(R)	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (5x)	f_n (1x)	f_n (41x ω_c)	9,398
EK/3510 min ⁻¹ /0,5 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (1x)	f_n (8x)	f_n (6x)	f_n (41x ω_c)	12,16

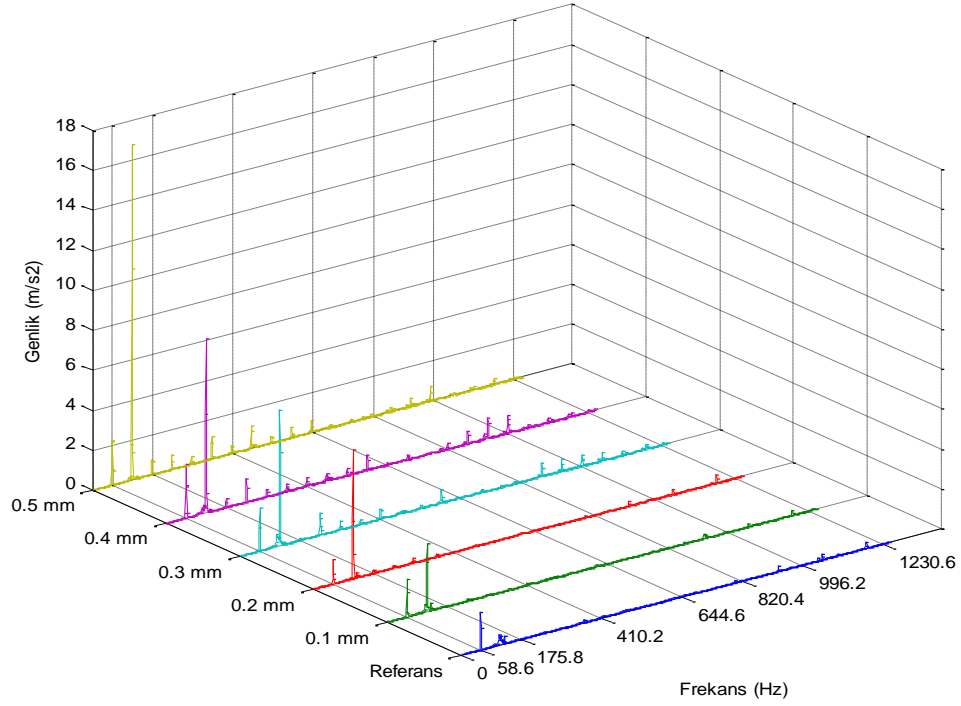
EK: Eksen Kaçıklığı, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

Eksen kaçıklığı etkisi eksenel yönde; 1900 min⁻¹ devir sayısında baskın olarak 3x harmoniğinde gözlemlenirken, 2880 min⁻¹ devir sayısında 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta gözlenmiştir. 3510 min⁻¹ devir sayısında ise 0,1 mm, 0,3 mm, 0,4 mm seviyelerinde 2x harmoniği; 0,2 mm, 0,5 mm seviyelerinde ise 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekanslar tespit edilmiştir. Bu farklılığın, şebeke elektrik değerlerinde oluşan dalgalanmaların devir sayısında yol açabileceği küçük değişimlerden meydana gelmiş olabileceği düşünülebilir.

3510 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum değişimleri Şekil 4.28'de verilmiştir.



(a) Radyal yön verileri



(b) Eksenel yön verileri

Şekil 4.28: 3510 min⁻¹ devir sayısında eksen kaçıklığı spektrum diyagramları

Test edilen bu devir sayısında, eksenel yönde daha belirgin olmak üzere her iki yönde de eksen kaçıklığı kusuru ayırt edici olarak tespit edilebilmiştir. Radyal yön verilerinde 0,1 mm - 0,2 mm eksen kaçıklığı aralığında 2x harmoniği en baskın sinyal olarak gözlenmiştir, 0,3 mm - 0,5 mm aralığında ise 2x harmoniğindeki sinyal

genliği en baskın genlik olarak gözlenirken, 3x harmoniğindeki genlik seviyesinde kademeli olarak artış meydana gelmiştir. Eksenel yönde ise 0,1 mm - 0,5 mm eksen kaçıklığı aralığında sadece 2x harmoniğindeki sinyal genliğinde belirgin artış meydana gelmiştir. Eksen kaçıklığı etkisi, devir sayısı arttıkça zorlama kuvvetlerine bağlı olarak salınımların artmasından dolayı sinyal genlikleri yükselerek daha belirgin hale gelmiştir.

4.1.5 Mekanik gevşeklik testleri

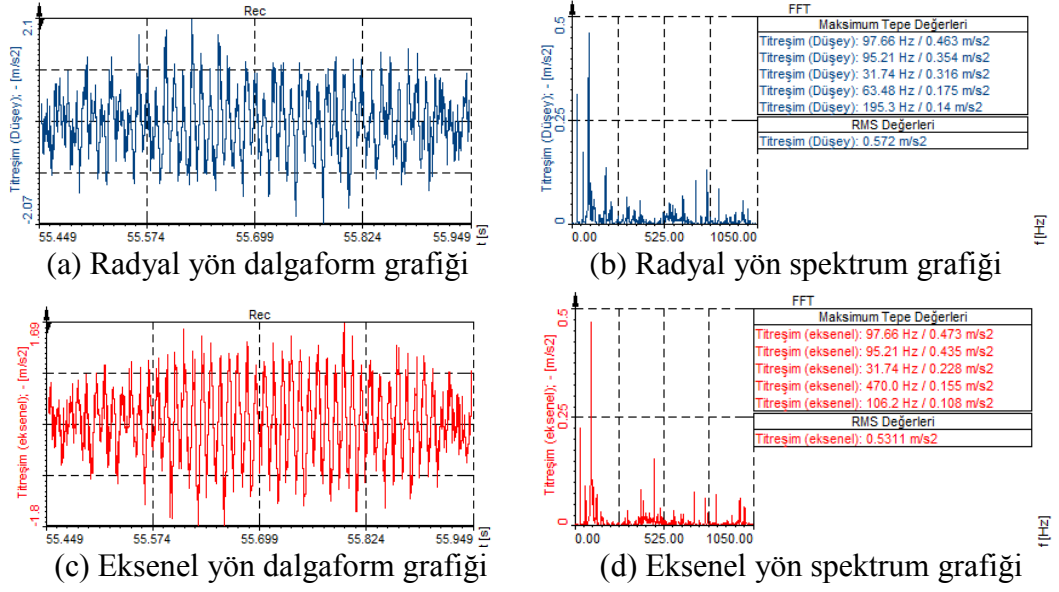
Mekanik gevşeklik testleri; 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹, 3510 min⁻¹ devir sayılarında 0,1 mm - 0,5 mm arası kusur seviyelerini kapsayacak şekilde beş farklı seviyede gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen sonuçlara göre 1900 min⁻¹ ve 2880 min⁻¹ devir sayılarında çoğunlukla 2x harmoniği en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir ve mekanik gevşeklik belirtileri olan temel frekans ve artan katlarındaki titreşimlerinin belirginleşmesi radyal yönde daha başarılı tespit edilmiştir. 3510 min⁻¹ devir sayısında ise her iki yönde en baskın sinyal 1x balanssızlık harmoniğinde gözlenmiştir ancak mekanik gevşeklik belirtisi artan harmoniklerin varlığı da belirgin şekilde gözlenmiştir. Devir sayısı ve mekanik gevşeklik seviyesinin artmasıyla birlikte spektrumda ilgili kusur belirtileri artmıştır.

4.1.5.1 1900 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testleri

a) 0,1 mm mekanik gevşeklik testi (T25)

Radyal ve eksenel yönde 95,21 Hz (3x) frekansındaki titreşim ikinci baskın sinyal ve bu frekansın uyarmasıyla süperharmonik rezonans meydana getirdiği 97,66 Hz doğal frekansındaki sinyal en baskın sinyal olarak gözlenmiştir.

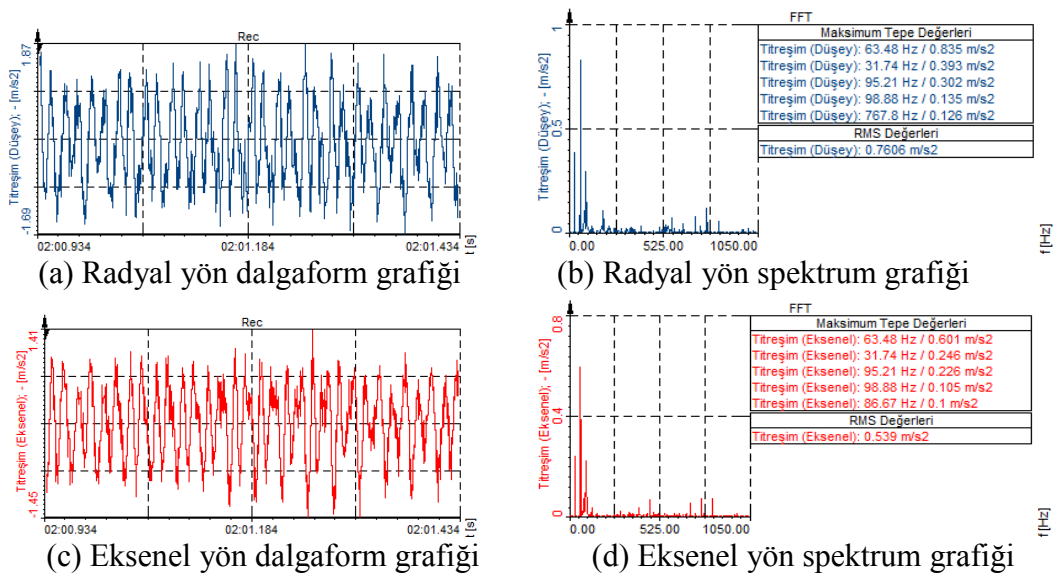
Radyal yönde 97,66 Hz (f_n), 95,21 Hz (3x), 31,74 Hz (1x), 63,48 (2x), 195,3 Hz (f_n) frekanslarında beliren sinyaller; eksenel yönde ise en yüksek genlikli ilk üç sinyal radyal yöndeki ile aynı frekansta olup diğer sinyal frekansları 470 Hz ve 106,2 Hz doğal frekansları ile farklılık göstermiştir. Özellikle radyal yön spektrumunda 2x baskın ve rotor bölgesinde artan frekanslarda sinyallerin görülmesi mekanik gevşeklik mevcudiyetini ifade etmektedir. Veri grafikleri Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm mekanik gevşeklik verileri

b) 0,2 mm mekanik gevşeklik testi (T26)

Radyal ve eksenel yönde, 63,48 Hz (2x), 31,74 Hz (1x) ve 95,21 Hz (3x) frekanslarındaki sinyaller en yüksek genlikli ilk üç baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Her iki yönde 1x balanssızlık harmoniği ikinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Radyal yönde 767,8 Hz doğal frekansındaki sinyal, eksenel yönde 86,67 Hz doğal frekansındaki sinyal; radyal ve eksenel yönde 98,88 Hz doğal frekansındaki sinyal tespit edilmiştir. Diğer sinyaller başlangıç seviyesi mekanik gevşeklik belirtileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde büyük dalgalanmalar görülmüştür. Veri grafikleri Şekil 4.30'da verilmiştir.

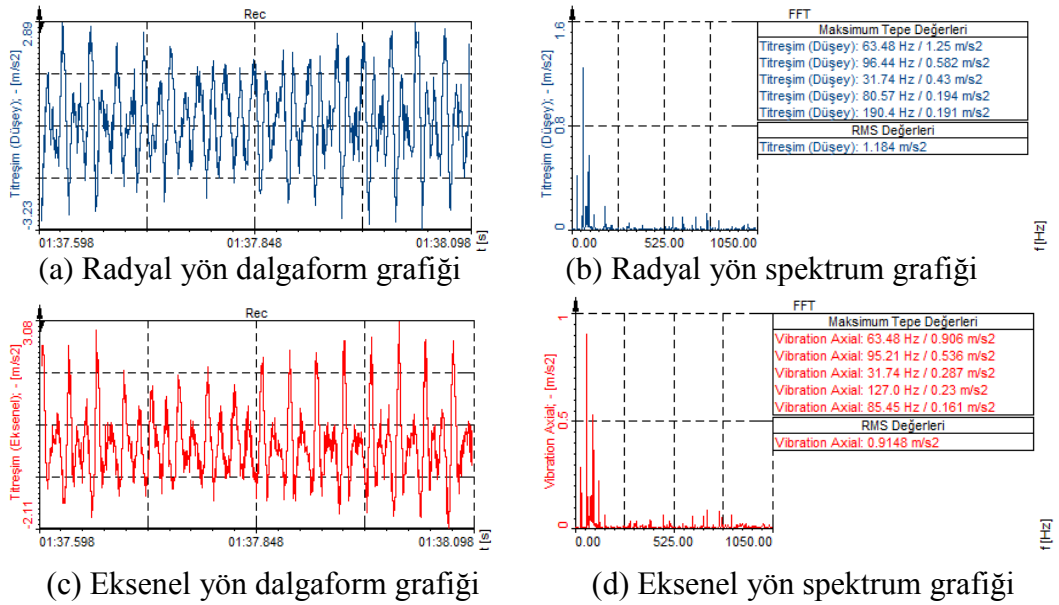


Şekil 4.30: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm mekanik gevşeklik verileri

Elektrik motoru ön ayaklarında gevşeklik oluşturulduğunda 0,1 mm seviyesinde en baskın iki sinyal 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekanstaki sinyal ve 3x harmoniğindeki sinyal olurken; 0,2 mm seviyesinde en baskın sinyal olarak 2x harmoniği görülmüştür. İkinci ve üçüncü baskın sinyal 1x ve 3x harmonikleri olurken sıralama olarak mekanik gevşeklik karakteristikleri belirgin şekilde tespit edilmiştir. 0,1 mm seviyesinde 95,21 Hz (3x) frekansındaki sinyalinin uyardığı 97,66 Hz doğal frekans sinyali 0,2 mm seviyesinde 98,88 Hz frekansına kaymıştır.

c) 0,3 mm mekanik gevşeklik testi (T27)

Radyal yönde 95,21 Hz (2x) frekansındaki sinyalin 96,44 Hz doğal frekansını uarması ile süperharmonik rezonans meydana gelmiştir ve ikinci baskın sinyal olarak tespit edilmiştir; beşinci baskın sinyal 190,4 Hz sinyali ise 6x harmoniği olması itibari ile mekanik gevşeklik belirtisi olarak gözlenmiştir. Eksenel yönde 127 Hz (4x) frekansındaki sinyal ile 95,21 Hz (2x) frekansındaki sinyal temel frekansın tam katlarındaki sinyaller olarak yer almıştır ve bu sinyaller rezonansa neden olmamıştır. Her iki yönde de 2x eksen kaçıklığı harmoniği birinci, 1x balanssızlık harmoniği üçüncü baskın sinyal olarak gözlenmiştir; bu sinyallerin mekanik gevşeklik belirtilerine dahil olduğu tespit edilmiştir. Dalgaform grafiklerindeki değişim büyük dalgalanmalar olarak gözlenmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.31’de verilmiştir.



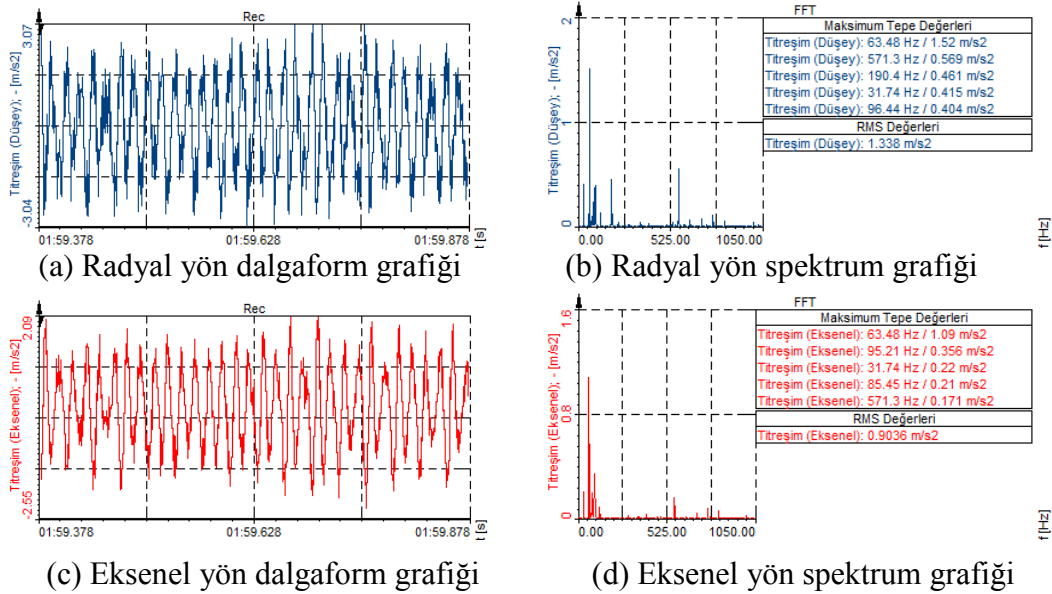
Şekil 4.31: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm gevşeklik titreşim verileri

Radyal yönde, 63,48 (2x), 96,44 Hz (f_n), 31,74 Hz (1x), 80,57 Hz (f_n), 190,4 Hz (6x) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 63,48 (2x), 95,21 Hz (3x), 31,74 Hz (1x),

127 Hz (4x) ve 85,45 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller gözlenmiştir. Her iki yöndeki frekanslar mekanik gevşeklik belirtilerini ifade etmektedir.

d) 0,4 mm mekanik gevşeklik testi (T28)

Radyal ve aksel yönde eksen kaçıklığı göstergesi olan 2x (63,48 Hz) harmoniğindeki titreşim en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında radyal yönde 571,3 Hz (18x) frekansındaki titreşim ise ikinci baskın sinyal, 190,4 Hz (6x) frekansındaki titreşim dördüncü baskın sinyal olarak meydana gelmiştir; 95,21 Hz (2x) frekansındaki titreşim ise 96,44 Hz doğal frekansını uyarmış ve beşinci baskın sinyal olarak gözlenmesine yol açmıştır. 1x balanssızlık harmoniği radyal yönde dördüncü baskın, aksel yönde ise üçüncü baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Aksel yönde baskınlık sırasına göre 2x, 3x, 1x harmonikleri görülmüştür; 571,3 Hz (18x) frekansındaki titreşim ise beşinci baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır, dördüncü baskın sinyal 85,45 Hz doğal frekansındaki titreşim ise temel frekans tam katları dışında yer almıştır. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik etkileri olarak gözlenmiştir. Dalgiform grafiklerinde balanssızlık etkileri belirlemiştir. Veri grafikleri Şekil 4.32'de verilmiştir.



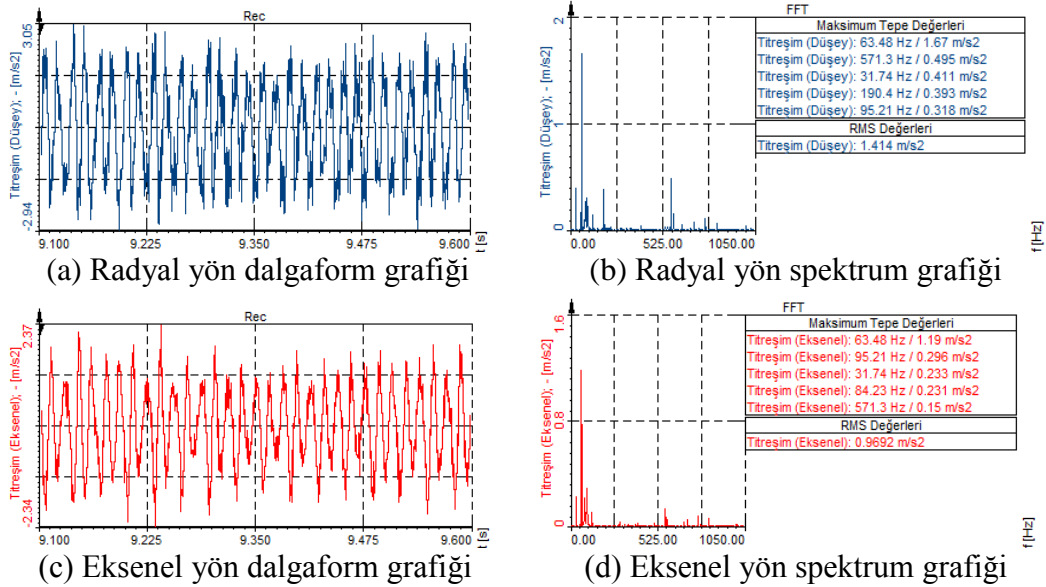
Şekil 4.32: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm mekanik gevşeklik verileri

0,4 mm mekanik gevşeklik seviyesinde radyal yönde 63,48 Hz (2x) frekansındaki en baskın sinyalden sonra 571,3 Hz (18x) frekansındaki ikinci baskın sinyal görülmüştür ve üçüncü baskın sinyal 190,4 Hz (6x) olmuştur. Radyal yönde diğer sinyaller 31,74 (1x) ve 95,21 Hz (3x) frekansındaki sinyalin uyardığı 96,44 Hz doğal frekansı olmuştur. Radyal yönde 18x harmoniğinin görülmesi mekanik gevşeklik

etkilerinin önceki test seviyelerine göre belirgin şekilde arttığını göstermektedir. 18x harmoniği beşinci baskın genlik olmak üzere eksenal yönde de tespit edilmiştir.

e) 0,5 mm mekanik gevşeklik testi (T29)

Radyal yönde baskınlık sıralarına göre en yüksek genlikli ilk beş sinyal arasında temel frekans tam katları 2x, 18x, 1x, 6x, 3x harmonikleri meydana gelmiştir. Eksenal yönde ise 2x, 3x, 1x harmonikleri, 84,23 Hz (f_n) frekansı ve 18x harmoniği meydana gelmiştir. Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği üçüncü baskın sinyal olarak gözlemlenmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik belirtileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgiform grafiklerinde balanssızlık etkileri belirginleşmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.33: 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik verileri

Şekil 4.33'teki spektrum grafikleri incelendiğinde, 0,4 mm mekanik gevşeklik seviyesindeki benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. 0,5 mm seviyesinde mekanik gevşeklik seviyesinin artmasıyla beraber radyal yönde 63,48 Hz (2x) frekansındaki sinyal genliği 1,52 m/s²'den 1,67 m/s²'ye yükselmiştir. Eksenal yönde 0,4 mm seviyesinde görülen 85,45 Hz doğal frekansı 0,5 mm seviyesinde 84,23 Hz frekansına kaymıştır.

Tablo 4.11'e göre radyal ve eksenal yönde 0,2 mm seviyesinden itibaren 2x eksen kaçıklığı harmoniği en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır, ikinci ve üçüncü baskın sinyallerde ise 1x balanssızlık ve 3x eksen kaçıklığı harmonikleri de görülmüştür. Spektrum eksenindeki veriler bir bütün olarak incelendiğinde yukarıda bahsedilen

balanssızlık ve eksen kaçıklığı harmoniklerinin mekanik gevşeklik belirtilerine ait olduğu saptanmıştır. Radyal yönde mekanik gevşeklik durumu 6x gibi harmoniklerin varlığıyla ayırt edici hal almıştır. Mekanik gevşekliğin artmasına paralel olarak RMS değerlerinde yükseliş meydana gelmiştir.

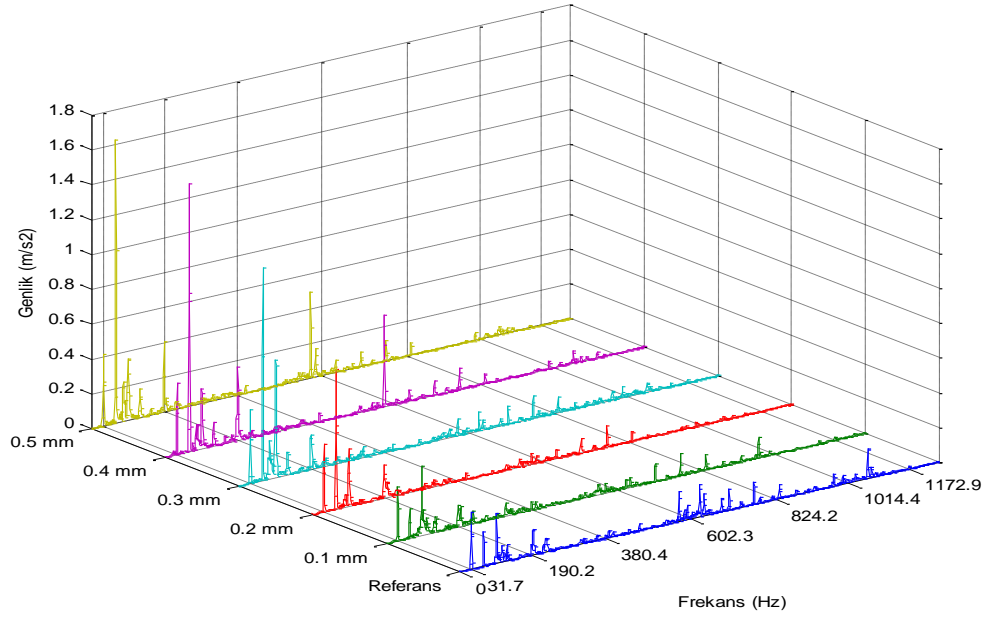
Tablo 4.11: 1900 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
MG/1900 min ⁻¹ /0,1 mm/(R)	f_n (3x)	3x	1x	2x	f_n (16x ω_c)	0,6889
MG/1900 min ⁻¹ /0,1 mm/(E)	f_n (3x)	3x	1x	f_n (39x ω_c)	f_n (9x ω_c)	0,9963
MG/1900 min ⁻¹ /0,2 mm/(R)	2x	1x	3x	f_n (3x)	f_n (64x ω_c)	0,7606
MG/1900 min ⁻¹ /0,2 mm/(E)	2x	1x	3x	f_n (3x)	f_n (7x ω_c)	0,539
MG/1900 min ⁻¹ /0,3 mm/(R)	2x	f_n (3x)	1x	f_n (7x ω_c)	6x	1,184
MG/1900 min ⁻¹ /0,3 mm/(E)	2x	3x	1x	4x	f_n (7x ω_c)	0,9148
MG/1900 min ⁻¹ /0,4 mm/(R)	2x	18x	6x	1x	f_n (3x)	1,338
MG/1900 min ⁻¹ /0,4 mm/(E)	2x	3x	1x	f_n (7x ω_c)	18x	0,9036
MG/1900 min ⁻¹ /0,5 mm/(R)	2x	18x	1x	6x	3x	1,414
MG/1900 min ⁻¹ /0,5 mm/(E)	2x	3x	1x	f_n (7x ω_c)	18x	0,9692

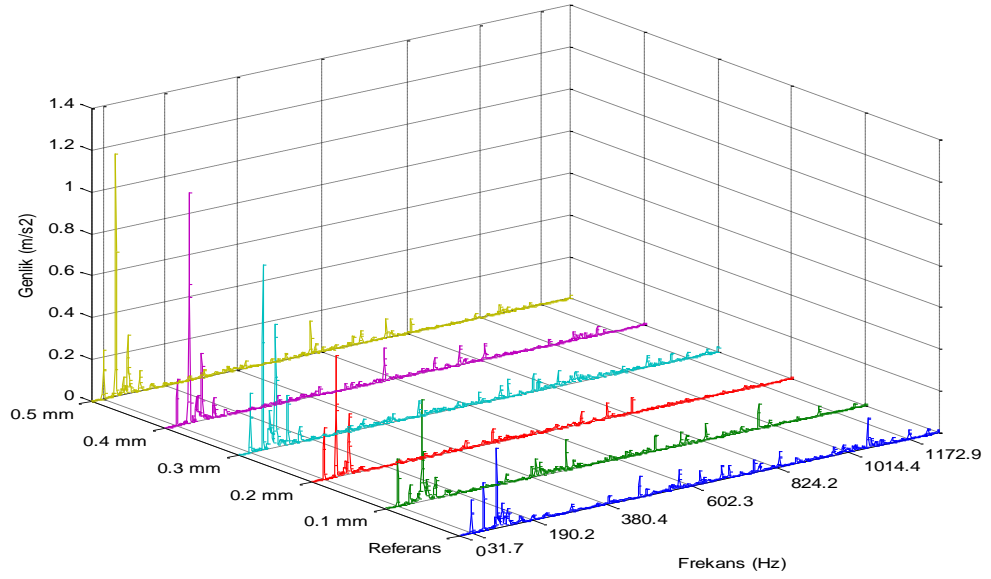
MG: Mekanik Gevşeklik, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

Referans verileri ile karşılaştırma yapıldığında; radyal yönde en baskın sinyal 1x harmoniği yerini 0,1 mm seviyesinde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekans sinyaline, diğer seviyelerde ise 2x harmoniğine bırakmıştır. Radyal yönde ise bu testte ve referans verilerinde 0,1 mm seviyesinde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta en baskın sinyal tespit edilmiş, diğer seviyelerde ise 2x harmoniğindeki sinyal en baskın sinyal olarak yer değiştirmiştir.

1900 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik spektrum değişimi Şekil 4.34'te verilmiştir. Radyal ve eksenel yönde mekanik gevşeklik harmonikleri gözlenmiştir.



(a) Radyal yön verileri



(b) Eksenel yön verileri

Şekil 4.34: 1900 min^{-1} devir sayısında mekanik gevşeklik spektrum diyagramları

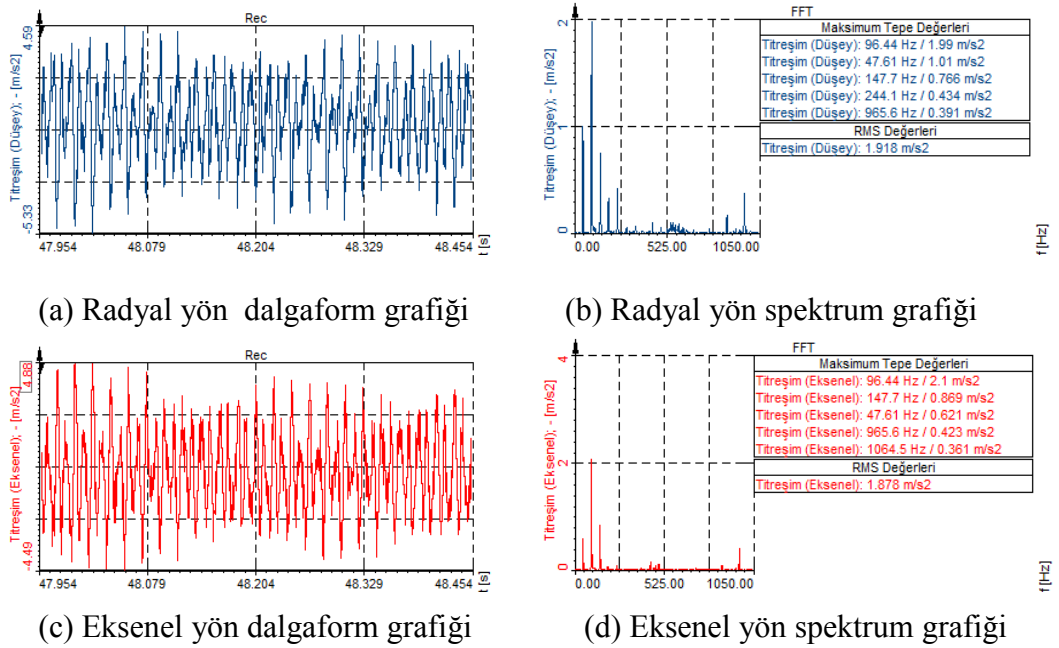
Spektrumlar incelendiğinde, radyal yöndeki titreşimler artan harmoniklerde meydana gelerek mekanik gevşeklik durumunu belirgin olarak yansıtmıştır. Radyal yönde 0,1 mm - 0,5 mm eksen kaçıklığı aralığında baskın olarak 2x harmoniğinde sinyal genliği artışı görülmesinin yanında 3x ve 6x harmoniklerine ait sinyal genliklerinde

de artış görülmüştür. 0,4 mm seviyesinden itibaren ise 19x harmoniğinde sinyal genliği artışı tespit edilmiştir. Eksenel yönde ise 2x harmoniği en baskın sinyal olmak üzere 2x ve 3x harmonik sinyallerinde genlik artışı tespit edilmiştir.

4.1.5.2 2880 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testleri

a) 0,1 mm mekanik gevşeklik testi (T30)

Radyal ve eksenel yönde 95,21 Hz (2x) frekansındaki sinyalin uyardığı 96,44 Hz doğal frekansının süperharmonik rezonansa girmesi ile en yüksek sinyal genliğine ulaştığı gözlenmiştir. Radyal yönde 1x balanssızlık harmoniği ikinci baskın, eksenel yönde üçüncü baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Her iki yönde 964,8 Hz (51x ω_c) kafes frekansı harmoniğinin uyardığı 965,6 Hz doğal frekansında, eksenel yönde 1061,28 Hz (56x ω_c) kafes frekansı harmoniğinin uyardığı 1064,5 Hz doğal frekansında süperharmonik rezonans gözlenmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman kaynaklı sinyaller olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde dalgalanmalar görülmüştür. Veri grafikleri Şekil 4.35'te verilmiştir.



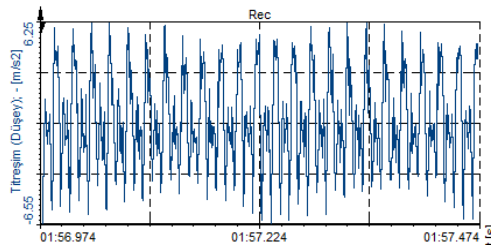
Şekil 4.35: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm gevşeklik verileri

Radyal yönde 96,44 Hz doğal frekansı, 47,61 Hz (1x) temel frekansı, 147,7 Hz doğal frekansı, 244,1 Hz doğal frekansı, 965,6 Hz doğal frekansındaki sinyaller; eksenel yönde ise 96,44 Hz doğal frekansı, 147,7 Hz doğal frekansı, 47,61 Hz (1x) temel frekansı, 965,6 Hz doğal frekansı, 1064,5 Hz doğal frekansındaki sinyaller

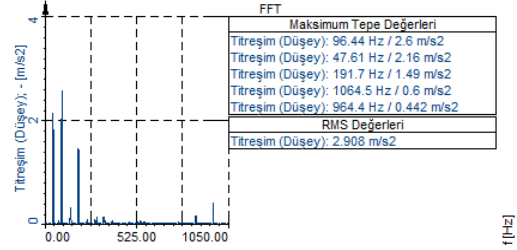
gözlenmiştir. Radyal yön spektrumunda mekanik gevşeklik belirtileri daha belirgin gözlenmiştir.

b) 0,2 mm mekanik gevşeklik testi (T31)

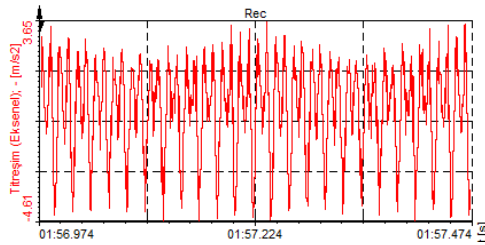
Radyal yönde 95,21 Hz (2x) frekansındaki sinyalin 96,44 Hz doğal frekansındaki, 190,4 Hz (4x) sinyalinin ise 191,7 Hz doğal frekansındaki sinyali uyarılmasıyla süperharmonik rezonanslar meydana gelmiştir. 1064,5 Hz ve 964,4 Hz doğal frekansları ise kafes frekansları tarafından uyarılan rezonans frekanslarıdır. Eksenel yönde 95,22 Hz (2x) frekansındaki sinyal 100,1 Hz doğal frekansını uyararak süperharmonik rezonansa yol açmıştır. Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği ikinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Diğer harmonikler mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde dalgalanmalar ve balanssızlık etkisi gözlenmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.36'da verilmiştir.



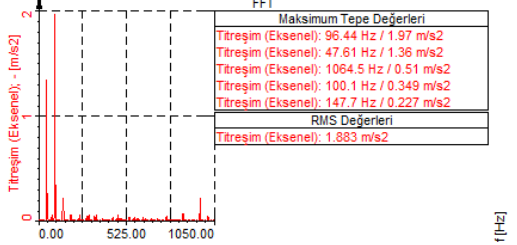
(a) Radyal yön dalgaform grafiği



(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



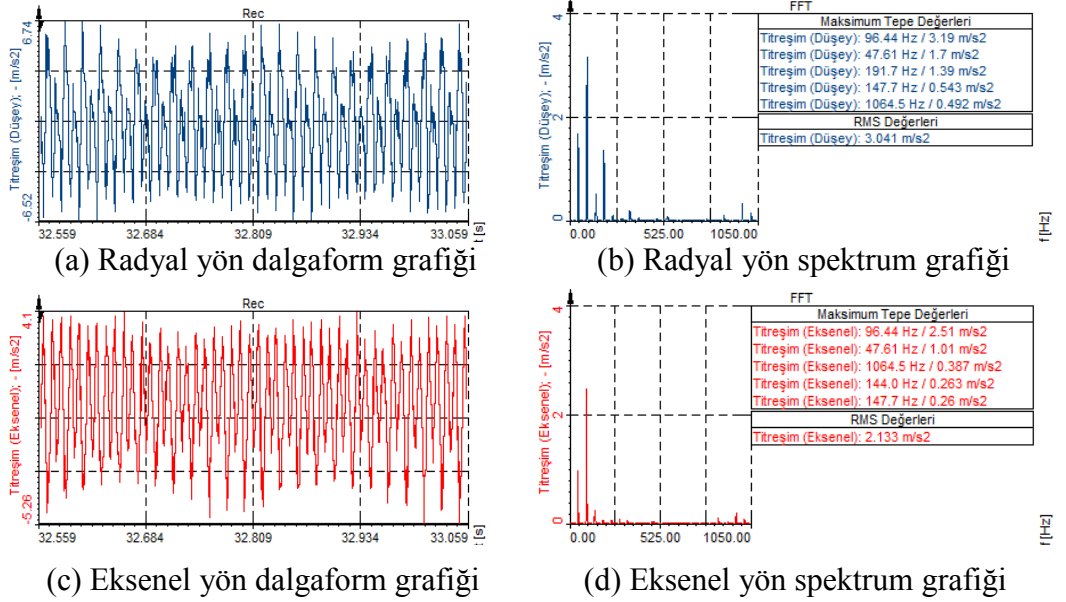
(d) Eksenel yön spektrum grafiği

Şekil 4.36: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm mekanik gevşeklik verileri

Radyal yönde 96,44 Hz, 47,61 Hz (1x), 191,7 Hz, 1064,5 Hz ve 964,4 Hz frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 96,44 Hz, 47,61 Hz (1x), 1064,5 Hz, 100,1 Hz ve 964,4 Hz frekanslarındaki sinyaller en yüksek genlikli beş sinyal arasında gözlenmiştir. Mekanik gevşeklik etkisi radyal yön spektrumunda artan harmoniklerle daha iyi ayırt edilebilmiştir.

c) 0,3 mm mekanik gevşeklik testi (T32)

2880 min⁻¹ devir sayısındaki önceki mekanik gevşeklik testlerinde görüldüğü gibi 0,3 mm gevşeklik düzeyinde de 96,44 Hz doğal frekansındaki titreşim en baskın sinyal olmuştur. Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği ikinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Eksenel yönde rotor bölgesi frekanslarında 144 Hz ve 147,7 Hz doğal frekans sinyalleri, eleman geçiş bölgesi frekanslarında ise 1064,5 Hz doğal frekans oluşmuştur. Radyal yönde ise rotor bölgesinde 191,7 Hz, 147,7 Hz doğal frekanslarındaki sinyaller, eleman geçiş bölgesinde 1064,5 Hz doğal frekans sinyali oluşmuştur; eksenel yönde 1064,5 Hz doğal frekans 144 Hz ve 147,7 Hz doğal frekanslarından daha baskın genlikte gözlenmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde dalgalanmalar ve balanssızlık etkileri görülmüştür. Veri grafikleri Şekil 4.37’de verilmiştir.



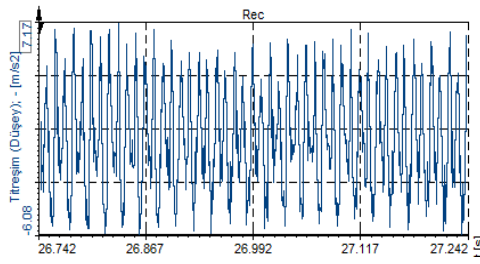
Şekil 4.37: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm gevşeklik verileri

Radyal yönde 96,44 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 191,7 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n), 1064,5 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde 96,44 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 1064,5 Hz (f_n), 144 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n) frekanslarındaki titreşim sinyalleri gözlenmiştir.

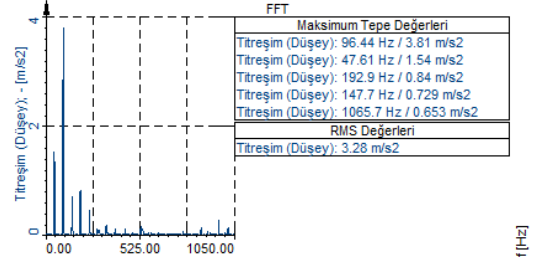
d) 0,4 mm mekanik gevşeklik testi (T33)

96,44 Hz doğal frekansındaki titreşim sinyali her iki yönde en baskın sinyal olmaya devam etmiştir. Her iki yönde 1x balanssızlık harmoniği ikinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. 0,3 mm mekanik gevşeklik titreşim verilerinde görülen 191,7 Hz doğal frekans 192,9 Hz doğal frekansına, 1064,5 Hz doğal frekans 1065,7 Hz frekansına

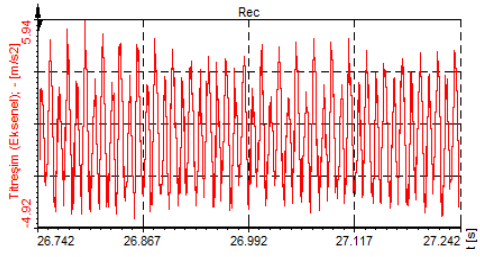
kaymıştır. Bir önceki testte olduğu gibi eleman geçiş bölgesi frekanslarında görülen 1065,7 Hz frekansı aksel yönde baskınlık sıralamasında yukarı ilerlemiştir, ayrıca 144 Hz ve 147,7 Hz frekansları baskınlık sıralamasında kendi aralarında yer değiştirmişlerdir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde dalgalanmalar ve balanssızlık etkileri tespit edilmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.38’de verilmiştir.



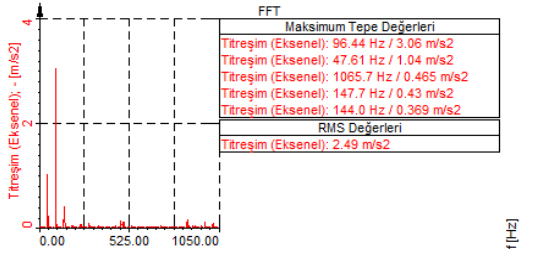
(a) Radyal yön dalgaform grafiği



(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Aksel yön dalgaform grafiği



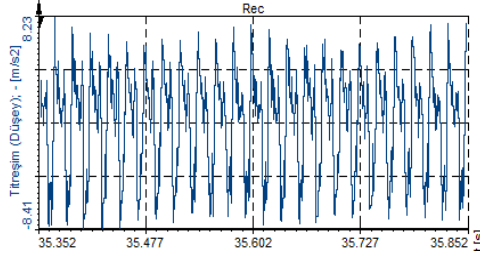
(d) Aksel yön spektrum grafiği

Şekil 4.38: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm mekanik gevşeklik verileri

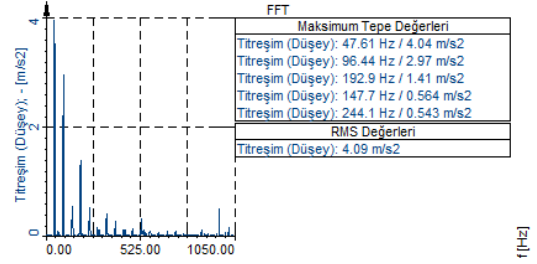
Radyal yönde 96,44 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 192,9 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n), 1065,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; aksel yönde 96,44 Hz (f_n), 47,61 Hz (1x), 1065,7 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n), 144 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller gözlemlenmiştir.

e) 0,5 mm mekanik gevşeklik testi (T34)

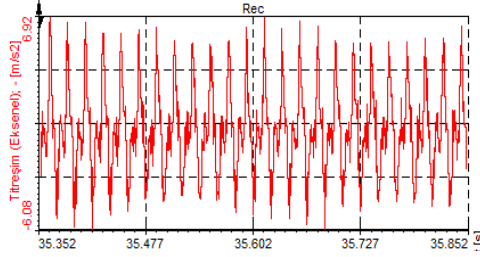
2880 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testlerinde radyal ve aksel yönde en baskın sinyal olan 96,44 Hz doğal frekansındaki sinyal 0,5 mm düzeyinde yerini 1x balanssızlık harmoniğine bırakmıştır; 96,44 Hz sinyali ise bir alt baskın sıraya düşmüştür. Şekil 4.3’da her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği birinci baskın sinyal olarak gözlemlenmiştir. Eleman geçiş bölgesi frekanslarında tespit edilen 1065,7 Hz frekansındaki sinyal en baskın beş sinyal arasında sadece aksel yön verilerinde gözlemlenmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerindeki balanssızlık etkileri belirginleşmiş ve tepe-tepe değerlerinde dalgalanmalar tespit edilmiştir.



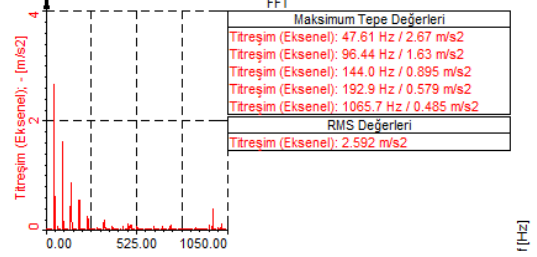
(a) Radyal yön dalgaform grafiği



(b) Radyal yön spektrum grafiği



(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



(d) Eksenel yön spektrum grafiği

Şekil 4.39: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik verileri

Radyal yönde, 47,61 Hz (1x), 96,44 Hz (f_n), 192,9 Hz (f_n), 147,7 Hz (f_n), 244,1 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde, 47,61 Hz (1x), 96,44 Hz (f_n), 144 Hz (f_n), 192,9 Hz (f_n), 1065,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller gözlenmiştir. 2880 min⁻¹ devir sayısı 0,5 mm seviyesine kadar yapılan testlerde ilk defa 1x harmoniği en baskın sinyal olarak gözlenmiştir; bu durum mekanik gevşeklik etkisinin yanında yüksek salınımlar dolayısıyla oluşan kuvvetlerin homojen dağılamaması nedeniyle test düzeneği ekipmanlarında balanssızlık etkisinin daha baskın hale geldiğini göstermektedir.

Tablo 4.12'ye göre her iki yönde 0,5 mm seviyesine kadar 2x eksen kaçıklığı harmoniğinin uyardığı doğal frekansta oluşan sinyal ve 0,5 mm seviyesinde 1x balanssızlık harmoniğinde gözlenen sinyal en baskın iki sinyal olarak ortaya çıkmıştır. 2x harmoniğinin yanında artan frekanslarda sinyallerin gözlenmesi 2x harmoniğinin mekanik gevşeklik tanımı içerisinde yer almasına yol açmıştır. Testlerde eleman geçiş bölgesi kaynaklı frekanslar tespit edilmiştir ve bunlarda sayıca artış vardır; bu durum rulmanın ilgili testlerde verdiği tepkilerin arttığına işaretler. Devir sayısının artmasına paralel olarak RMS değerlerinde yükseliş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

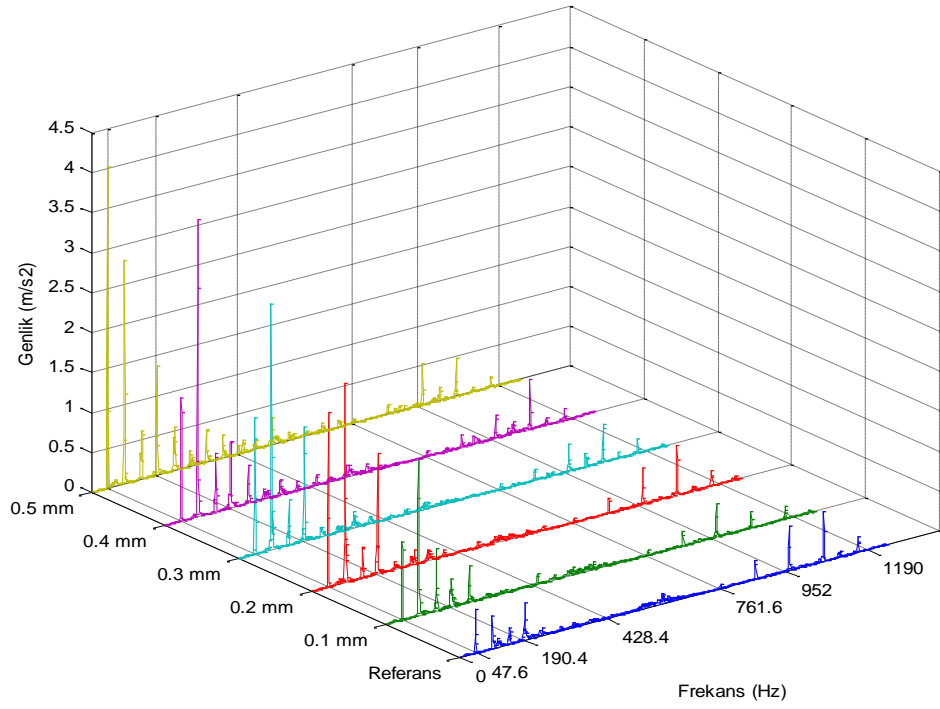
Tablo 4.12: 2880 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
MG/2880 min ⁻¹ /0,1 mm/(R)	f_n (2x)	1x	f_n (3x)	f_n (5x)	f_n (51x ω_c)	1,918
MG/2880 min ⁻¹ /0,1 mm/(E)	f_n (2x)	f_n (3x)	1x	f_n (51x ω_c)	f_n (56x ω_c)	1,878
MG/2880 min ⁻¹ /0,2 mm/(R)	f_n (2x)	1x	f_n (5x)	f_n (56x ω_c)	f_n (51x ω_c)	2,908
MG/2880 min ⁻¹ /0,2 mm/(E)	f_n (2x)	1x	f_n (56x ω_c)	f_n (2x)	f_n (3x)	1,883
MG/2880 min ⁻¹ /0,3 mm/(R)	f_n (2x)	1x	f_n (4x)	f_n (3x)	f_n (56x ω_c)	3,041
MG/2880 min ⁻¹ /0,3 mm/(E)	f_n (2x)	1x	f_n (56x ω_c)	f_n (3x)	f_n (3x)	2,133
MG/2880 min ⁻¹ /0,4 mm/(R)	f_n (2x)	1x	f_n (4x)	f_n (3x)	f_n (56x ω_c)	3,28
MG/2880 min ⁻¹ /0,4 mm/(E)	f_n (2x)	1x	f_n (56x ω_c)	f_n (3x)	f_n (3x)	2,49
MG/2880 min ⁻¹ /0,5 mm/(R)	1x	f_n (2x)	f_n (4x)	f_n (3x)	f_n (5x)	4,09
MG/2880 min ⁻¹ /0,5 mm/(E)	1x	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (5x)	f_n (56x ω_c)	2,592

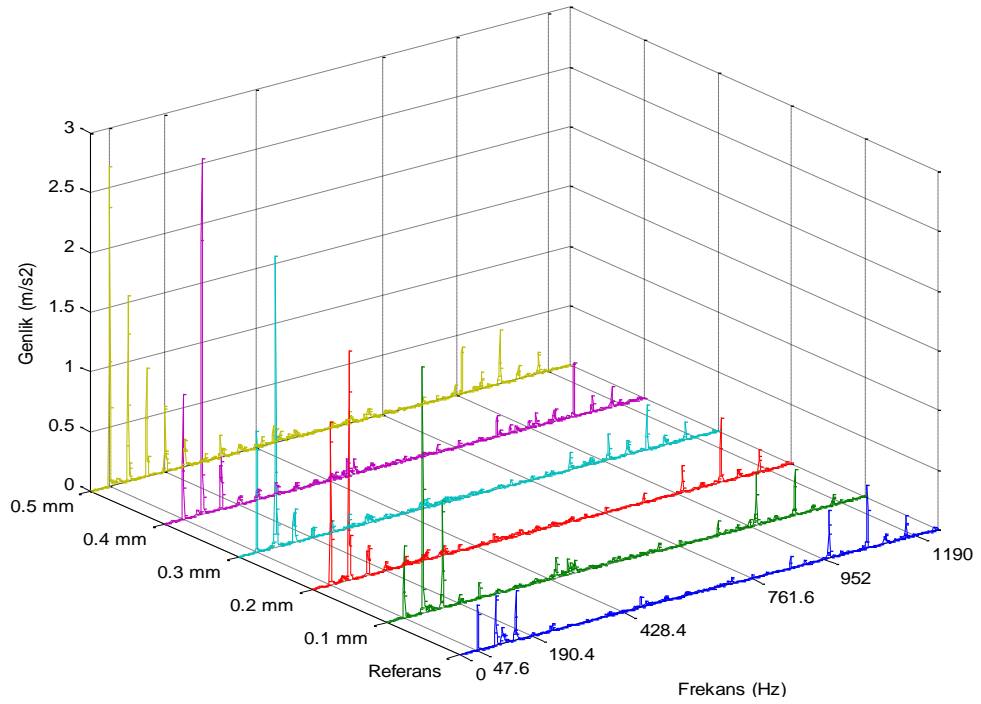
MG: Mekanik Gevşeklik, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

1900 min⁻¹ devir sayındaki mekanik gevşeklik testlerinde her iki yönde 0,1 mm seviyesinde en baskın sinyal olarak 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekanslar tespit edilmiş, diğer seviyelerde ise en baskın sinyal 2x harmoniği olmuştur. 2880 min⁻¹ devir sayısı mekanik gevşeklik testlerinde ise her iki yönde 0,1 mm – 0,4 mm seviyeleri arasında en baskın sinyal 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekanslar, 0,5 mm seviyesinde ise 1x harmoniğindeki sinyal olmuştur.

2880 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik değişim spektrumları Şekil 4.40'da verilmiştir. Mekanik gevşeklik belirtileri radyal yön verilerinde daha iyi gözlenmiştir



(a) Radyal yön verileri



(b) Eksenel yön verileri

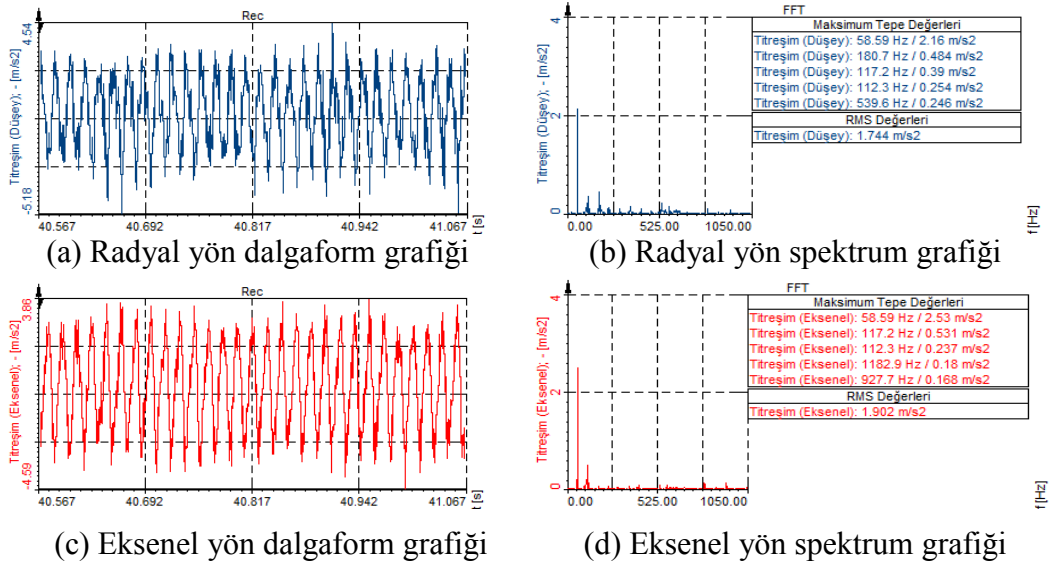
Şekil 4.40: 2880 min^{-1} devir sayısında mekanik gevşeklik spektrum harmonikleri
 Spektrumlar incelendiğinde, mekanik gevşeklik seviyesinin artmasıyla beraber radyal yöndeki harmoniklerin ve bu harmoniklerin uyardığı doğal frekans

sinyallerinin artan frekanslara doğru yayılması durumu mevcuttur, dolayısıyla mekanik gevşeklik özellikleri belirginleşmiştir. Radyal yön verilerinde 0,1 mm - 0,5 mm mekanik gevşeklik aralığında düzenli ve kararlı en baskın sinyal 2x harmoniğinde tespit edilirken 1x, 3x, 4x, 5x harmoniklerinde de sinyal genliklerinde artış gözlenmiştir. Eksenel yönde ise gene 2x harmoniği en baskın sinyal olmak üzere 2x ve 3x harmoniklerinde genlik artışları meydana gelmiştir. Spektrumlarda, 0,5 mm mekanik gevşeklik seviyesinde 1x balanssızlık harmoniğine ait sinyal genliğinin en baskın sinyal haline geldiği görülmektedir. Ayrıca her iki yönde de eleman geçiş bölgesinde rulman kaynaklı sinyaller belirginleşmiştir.

4.1.5.3 3510 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik testleri

a) 0,1 mm mekanik gevşeklik testi (T35)

Radyal ve eksenel yönde 1x balanssızlık harmoniği birinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. İkinci baskın sinyal olarak radyal yönde 3x (175,77 Hz) harmoniğinin uyardığı 180,7 Hz doğal frekansındaki sinyal gözlenirken, eksenel yönde 2x (117,2 Hz) harmoniği tespit edilmiştir; 2x harmoniği radyal yönde üçüncü baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır. 112,3 Hz doğal frekansında her iki yönde de 117,2 Hz (2x) sinyalinin uyarmasıyla subharmonik rezonans meydana gelmiştir. Eksenel yönde eleman geçiş bölgesindeki frekanslarda uyarılan sinyaller en yüksek genlikli ilk beş sinyal arasında tespit edilebilmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde balanssızlık etkileri ve dalgalanmalar gözlenmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.41’de verilmiştir.

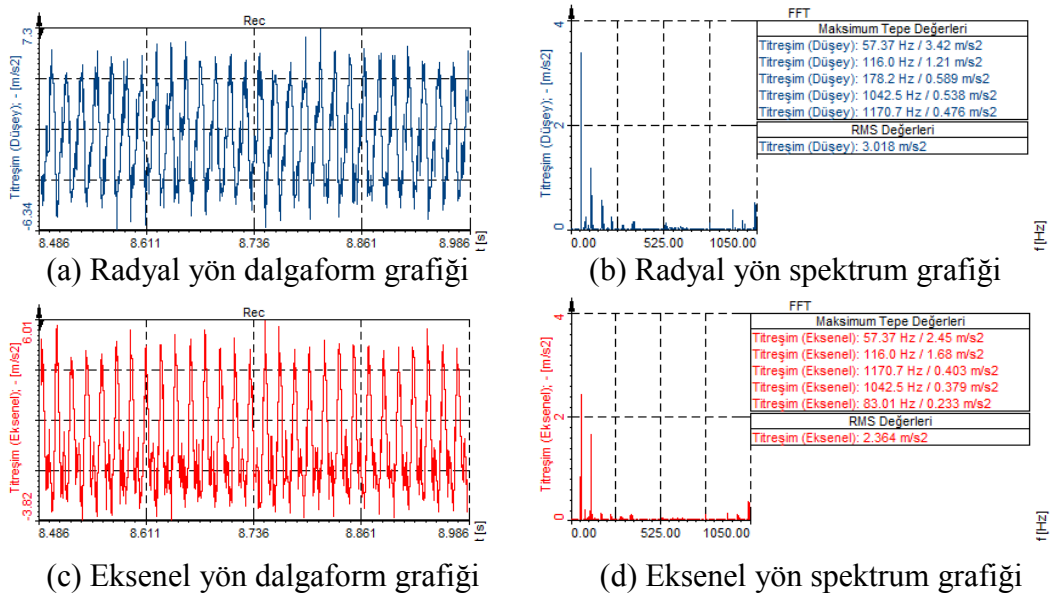


Şekil 4.41: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm mekanik gevşeklik verileri

Radyal yönde 58,59 Hz (1x), 180,7 Hz (f_n), 117,2 Hz (2x), 112,3 Hz (f_n), 539,6 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; aksel yönde, 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x), 112,3 Hz (f_n), 1182,9 Hz (f_n), 927,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller en yüksek genlikli beş titreşim değeri arasında gözlenmiştir. Radyal yön spektrum verileri incelendiğinde, 1x balanssızlık harmoniğindeki titreşim genliğinin $2,16 \text{ m/s}^2$ değeriyle mekanik gevşeklik sinyallerine kıyasla büyük farkla baskın olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, 3510 min^{-1} devir sayısı 0,1 mm mekanik gevşeklik seviyesinde deney düzeneği bileşenlerindeki salınımların artmasıyla beraber yüklerin kararlılığını yitirmesi sonucu baskın ölçüde balanssızlık etkisi ortaya çıkmıştır.

b) 0,2 mm mekanik gevşeklik testi (T36)

Radyal ve aksel yönde 57,37 Hz ve 116 Hz doğal frekanslarında 1x ve 2x harmoniklerinin uyarılması sonucu subharmonik rezonans durumu ortaya çıkmıştır. Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği birinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde balanssızlık etkileri ve dalgalanmalar görülmüştür. Veri grafikleri Şekil 4.42’de verilmiştir.



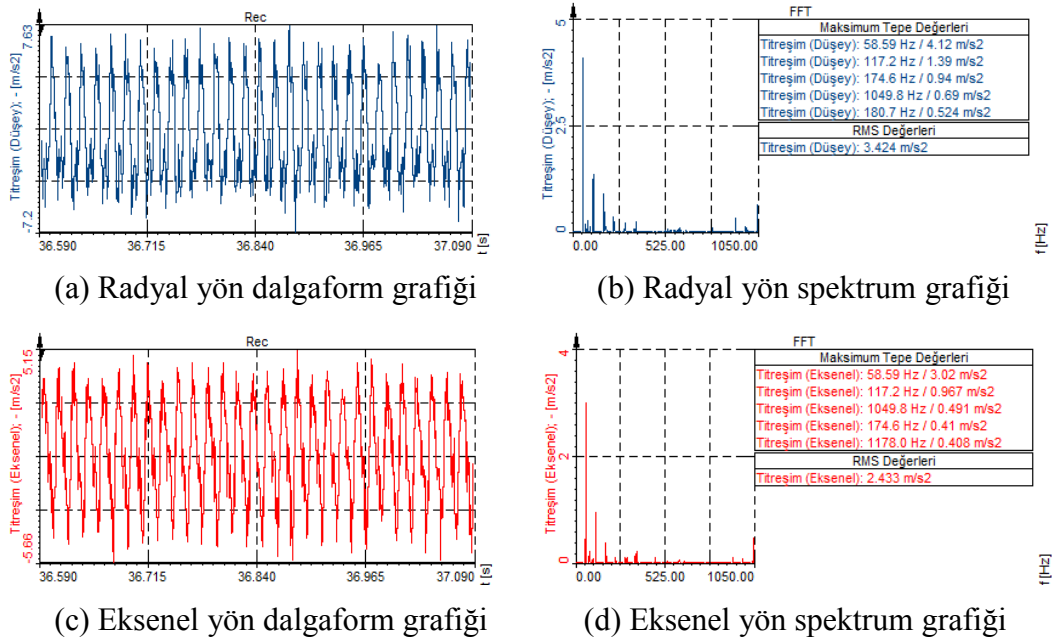
Şekil 4.42: 3510 min^{-1} devir sayısında 0,2 mm gevşeklik verileri

Radyal yönde, 57,37 Hz (f_n), 116 Hz (f_n), 178,2 Hz (f_n), 1042,5 Hz (f_n), 1170,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; aksel yönde, 57,37 Hz (f_n), 116 Hz (f_n), 1170,7 Hz (f_n), 1042,5 Hz (f_n), 83,01 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller gözlenmiştir. Radyal yönde 1x balanssızlık etkisi belirgin bir şekilde ön plana çıkarken mekanik gevşeklik belirtileri de meydana gelmeye devam etmiştir. Rulman sinyallerinin uyardığı doğal

frekanslar daha belirgin hale gelmiştir; bu durum rulman hasarlarına ana sebep oluşturma potansiyeline sahiptir.

c) 0,3 mm mekanik gevşeklik testi (T37)

Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği birinci baskın sinyal olarak, ikinci baskın sinyal 2x harmoniği ise mekanik gevşeklik belirtisi olarak gözlenmiştir. Radyal ve aksel yönde meydana gelen 174,6 Hz doğal frekansı 169,68 Hz (3x) mil frekansı harmoniğinin uyarılmasıyla süperharmonik rezonans durumuna maruz kalmıştır. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlemlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde balanssızlık etkileri ve dalgalanmalar görülmüştür. Veri grafikleri Şekil 4.43'te verilmiştir.



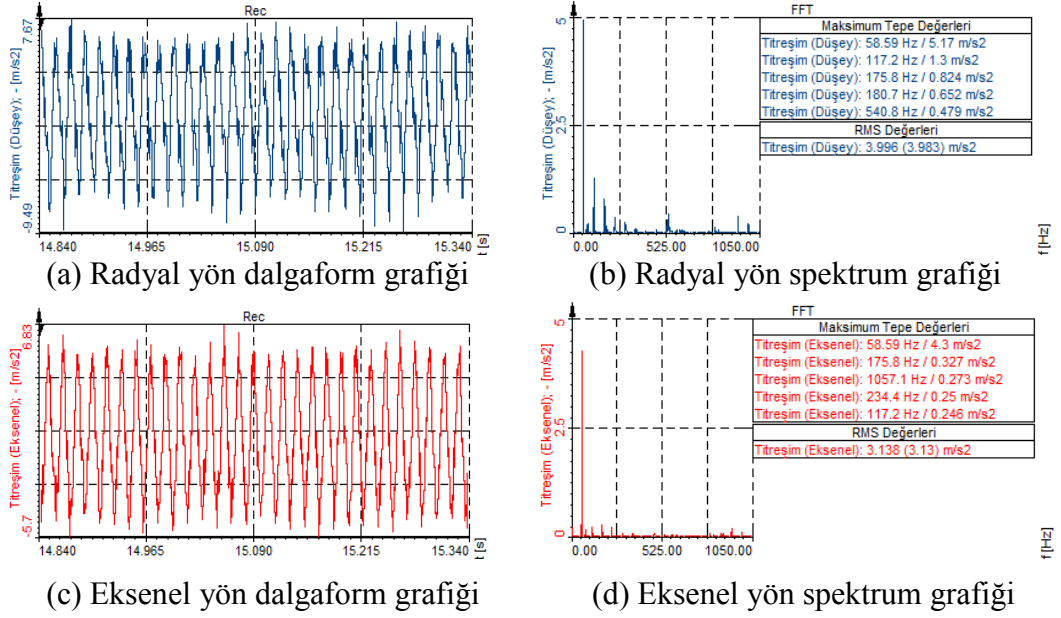
Şekil 4.43: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm mekanik gevşeklik verileri

En yüksek genlikli beş titreşim sinyali arasında radyal yönde, 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x), 174,6 Hz (f_n), 1049,8 Hz (f_n), 180,7 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; aksel yönde, 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x), 1049,8 Hz (f_n), 174,6 Hz (f_n), 1178 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller tespit edilmiştir.

d) 0,4 mm mekanik gevşeklik testi (T38)

Radyal yönde baskınlık sırasına göre 1x, 2x ve 3x harmonikleri tespit edilmiştir. Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği birinci baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Aksel yönde ise baskınlık sıralarına göre 1x, 3x, 1057,1 Hz doğal frekansı, 4x ve 2x harmonikleri tespit edilmiştir. 2x mekanik gevşeklik harmoniği radyal yönde

ikinci baskın sinyal olarak gözlenirken aksel yönde beşinci sıraya gerilemiştir. Diğer taraftan 3x mekanik gevşeklik harmoniği aksel yönde ikinci baskın, radyal yönde üçüncü baskın sırada yer almıştır. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde balanssızlık etkileri ve dalgalanmalar gözlenmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.44'te verilmiştir.

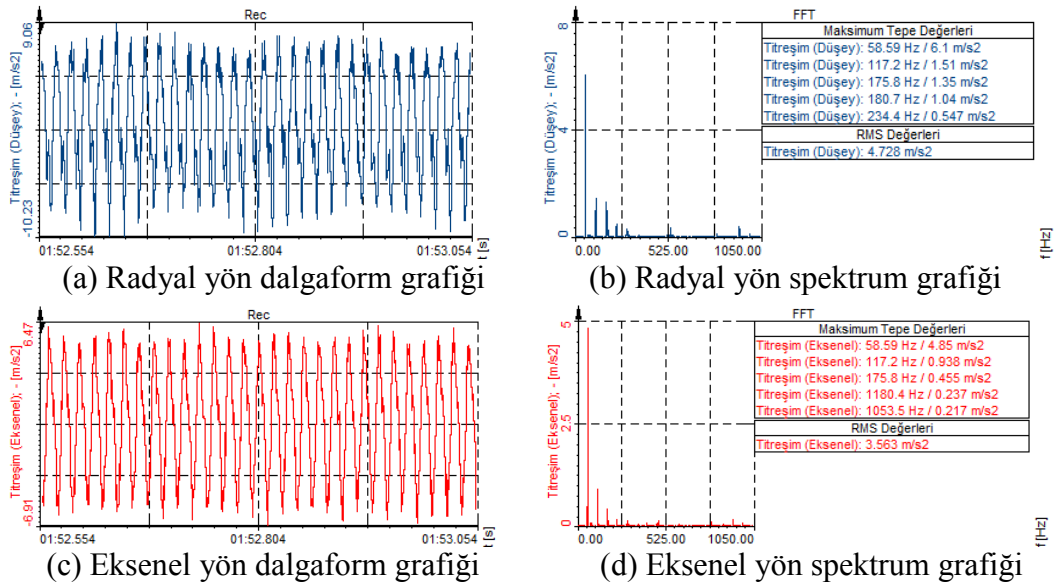


Şekil 4.44: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm gevşeklik titreşim verileri

En yüksek genlikli beş sinyal arasında radyal yönde, 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x), 175,8 (3x) Hz, 180,7 Hz (f_n), 540,8 Hz (f_n) frekanslarındaki sinyaller; aksel yönde, 58,59 Hz (1x), 175,8 (3x) Hz, 1057,1 Hz (f_n), 234,4 Hz (4x), 117,2 Hz (2x) frekanslarındaki sinyaller gözlenmiştir.

e) 0,5 mm mekanik gevşeklik testi (T39)

Radyal yönde 1x, 2x, 3x harmonikleri, 180,7 Hz doğal frekans sinyali ve 4x harmoniği; aksel yönde ise 1x, 2x, 3x harmonikleri ile 1180,4 Hz, 1053,5 Hz doğal frekansları tespit edilmiştir. Her iki yönde de 1x balanssızlık harmoniği birinci baskın harmonik olarak tespit edilmiştir. Diğer sinyaller mekanik gevşeklik ve rulman etkileri olarak gözlenmiştir. Dalgaform grafiklerinde balanssızlık etkileri ve dalgalanmalar görülmüştür. Veri grafikleri Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45: 3510 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik verileri

En yüksek genlikli beş sinyal arasında radyal yönde; 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x), 175,8 (3x) Hz, 180,7 Hz (f_n), 234,4 Hz (4x) frekanslarındaki sinyaller; eksenel yönde, 58,59 Hz (1x), 117,2 Hz (2x), 175,8 (3x) Hz, 1180,4 Hz (f_n), 1053,5 Hz (f_n) frekanslarında titreşim sinyalleri görülmüştür.

Tablo 4.13'e göre her iki yönde 1x balanssızlık frekansı en baskın sinyal olarak ortaya çıkmıştır. İkinci baskın sinyal olarak ise 2x eksen kaçıklığı harmoniği görülmüştür. 2x harmoniğinin yanında artan frekanslarda sinyallerin gözlenmesi 2x harmoniğinin mekanik gevşeklik tanımı içerisinde yer almasına yol açmıştır. Eleman geçiş bölgesi frekanslarında harmonikler tespit edilmiştir ve sayıca artış vardır; bu durum rulmanın ilgili testlerde verdiği tepkilerin arttığına işaretler. RMS değerlerinde devir sayısının artmasına paralel olarak yükselmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.13: 3510 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik sinyalleri

ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
MG/3510 min ⁻¹ /0,1 mm/(R)	1x	f_n (3x)	2x	f_n (2x)	f_n (22x ω_c)	1,744
MG/3510 min ⁻¹ /0,1 mm/(E)	1x	2x	f_n (2x)	f_n (49x ω_c)	f_n (38x ω_c)	1,902
MG/3510 min ⁻¹ /0,2 mm (R)	f_n (1x)	f_n (2x)	f_n (3x)	f_n (43x ω_c)	f_n (48x ω_c)	3,018
MG/3510 min ⁻¹ /0,2 mm (E)	f_n (1x)	f_n (2x)	f_n (48x ω_c)	f_n (43x ω_c)	f_n (3x ω_c)	2,364

Tablo 4.13: (devam) 3510 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik harmonikleri

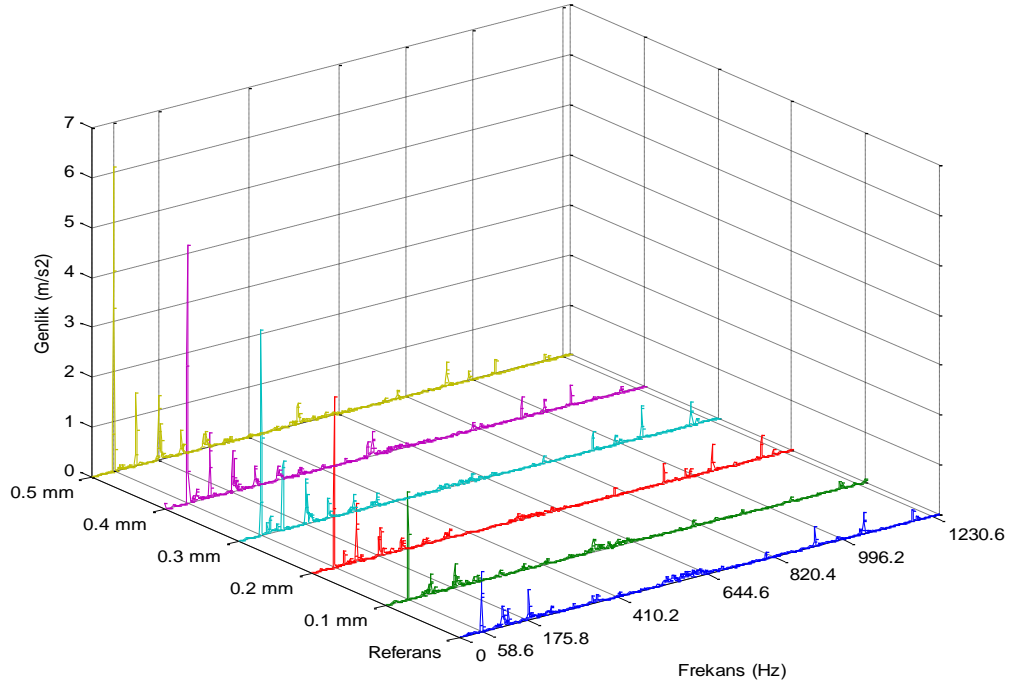
ÖLÇÜM	1.S	2.S	3.S	4.S	5.S	RMS (m/s ²)
MG/3510 min ⁻¹ /0,3 mm/(R)	1x	2x	f_n (3x)	f_n (43x ω_c)	f_n (3x)	3,424
MG/3510 min ⁻¹ /0,3 mm/(E)	1x	2x	f_n (43x ω_c)	f_n (3x)	f_n (49x ω_c)	2,433
MG/3510 min ⁻¹ /0,4 mm/(R)	1x	2x	3x	f_n (3x)	f_n (22x ω_c)	3,996
MG/3510 min ⁻¹ /0,4 mm/(E)	1x	3x	f_n (44x ω_c)	4x	2x	3,138
MG/3510 min ⁻¹ /0,5 mm/(R)	1x	2x	3x	f_n (3x)	4x	4,728
MG/3510 min ⁻¹ /0,5 mm/(E)	1x	2x	3x	f_n (48x ω_c)	f_n (18x)	3,563

MG: Mekanik Gevşeklik, R: Radyal yön, E: Eksenel yön, S: Sinyal

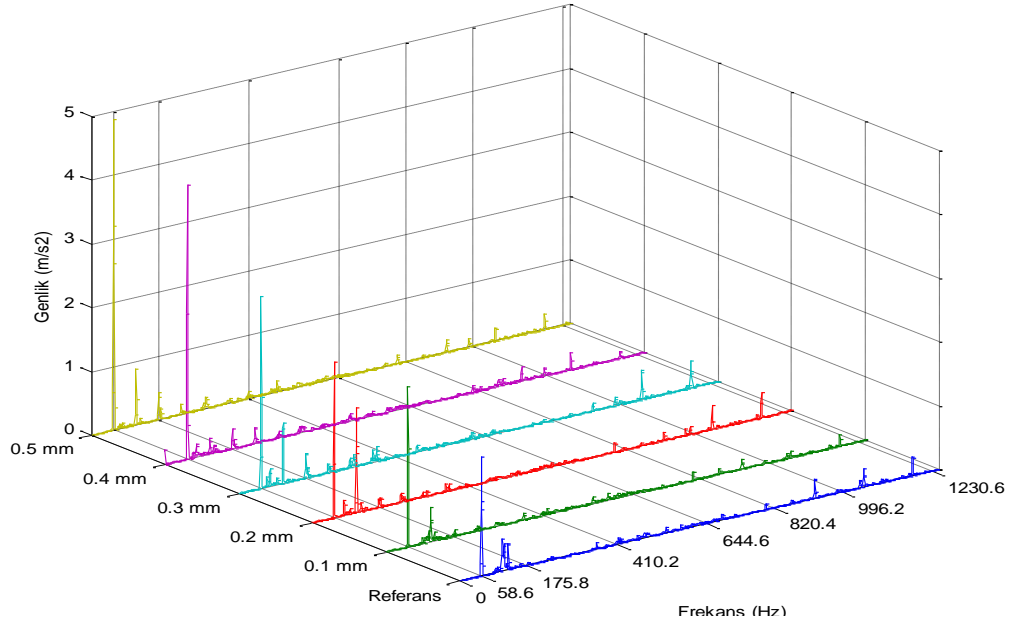
Test devir sayılarında, 1900 min⁻¹ devir sayısında başlangıçta 2x harmoniği en baskın sinyal iken, devir sayısının artmasıyla beraber en baskın sinyal 1x harmoniğinde gözlenmeye başlanmıştır. Benzer şekilde devir sayısı arttıkça eleman geçiş bölgesinde rulman kaynaklı frekanslarda artış gözlenmiştir. Devir sayısı arttıkça balanssızlık etkisi ise mekanik gevşeklik etkisini bastırmaya başlamıştır.

1900 min⁻¹ devir sayındaki mekanik gevşeklik testlerinde her iki yönde 0,1 mm seviyesinde en baskın sinyal olarak 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekanslar tespit edilmiştir, diğer seviyelerde ise en baskın sinyal 2x harmoniği olmuştur. 2880 min⁻¹ devir sayısı mekanik gevşeklik testlerinde ise her iki yönde 0,1 mm – 0,4 mm seviyeleri arasında en baskın sinyal 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekanslar, 0,5 mm seviyesinde ise 1x harmoniğindeki sinyal olmuştur. 3510 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik etkisi altında ise her iki yönde 0,2 mm seviyesinde 1x harmoniğinin uyardığı doğal frekanstaki sinyal en yüksek genlikli sinyal, diğer seviyelerde ise 1x harmoniği en baskın sinyal olarak tespit edilmiştir.

3510 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik değişim spektrumları Şekil 4.46'da verilmiştir. Spektrum grafikleri incelendiğinde radyal yönde daha belirgin özelliklere sahip olmakla beraber her iki yönde de mekanik gevşeklik belirtilerinin tespit edilebildiği söylenebilir.



(a) Radyal yön verileri



(b) Eksenel yön verileri

Şekil 4.46: 3510 min⁻¹ devir sayısında mekanik gevşeklik spektrumları

3510 min⁻¹ devir sayısına ait mekanik gevşeklik spektrumları incelendiğinde, hem radyal hem de eksenel yönde 1x balanssızlık sinyali en baskın sinyal olarak gözlenmiştir. Radyal yönde 1x harmoniğinin yanı sıra beliren 2x, 3x, 4x, 5x, 6x

harmonikleri mekanik gevşeklik göstergesi olarak tespit edilmiştir. Eksenel yönde ağırlıklı olarak 1x harmoniğinde titreşim genliği artışı görülürken, 2x harmoniğinde de önemli ölçüde sinyal genliği artışı tespit edilmiştir. Her iki yönde de eleman geçiş bölgesinde rulman kaynaklı sinyallere rastlanılmıştır.

4.1.6 Titreşim verileri genel sinyal incelemesi

1900 min⁻¹ devir sayısındaki testlere ait radyal yöndeki veriler incelendiğinde yağsızlık ve balanssızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 1x harmoniğinde; eksen kaçıklığı etkisi altında 0,1 mm seviyesinde 3x harmoniğinde, diğer seviyelerde 6x harmoniğinde; mekanik gevşeklik etkisi altında 0,1 mm seviyesinde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, diğer seviyelerde ise 2x harmoniğinde tespit edilmiştir.

1900 min⁻¹ devir sayısındaki testlere ait eksenel yöndeki veriler incelendiğinde yağsızlık etkisi altında 3x ve balanssızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal 1x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta; eksen kaçıklığı etkisi altında 0,2 mm seviyesinde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, diğer seviyelerde ise 3x harmoniğinde; mekanik gevşeklik etkisi altında 0,1 mm seviyesinde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, diğer seviyelerde ise 2x harmoniğinde tespit edilmiştir.

2800 min⁻¹ devir sayısındaki testlere ait radyal yöndeki veriler incelendiğinde yağsızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, balanssızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 1x harmoniğinde; eksen kaçıklığı etkisi altında 0,4 mm seviyesinde 4x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, diğer seviyelerde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta; mekanik gevşeklik etkisi altında 0,5 mm seviyesinde temel frekansın 1x harmoniğinde, diğer seviyelerde ise 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta tespit edilmiştir.

2800 min⁻¹ devir sayısındaki testlere ait eksenel yöndeki veriler incelendiğinde yağsızlık ve balanssızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta; eksen kaçıklığı etkisi altında tüm seviyelerde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta; mekanik gevşeklik etkisi altında 0,5 mm seviyesinde temel frekansın 1x harmoniğinde, diğer seviyelerde ise 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta tespit edilmiştir.

3510 min⁻¹ devir sayısındaki testlere ait radyal yöndeki veriler incelendiğinde yağsızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 2x harmoniğinde; balanssızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 1x harmoniğinde; eksen kaçıklığı etkisi altında 0,2 mm ve 0,5 mm seviyesinde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, diğer seviyelerde 2x harmoniğinde; mekanik gevşeklik etkisi altında 0,2 mm seviyesinde temel frekansın 1x harmoniğinin uyardığı frekansta, diğer seviyelerde ise 1x harmoniğinde tespit edilmiştir.

3510 min⁻¹ devir sayısındaki testlere ait eksenel yöndeki veriler incelendiğinde yağsızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 2x harmoniğinde; balanssızlık etkisi altında en yüksek genlikli sinyal temel frekansın 1x harmoniğinde; eksen kaçıklığı etkisi altında 0,2 mm ve 0,5 mm seviyesinde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, diğer seviyelerde 2x harmoniğinde; mekanik gevşeklik etkisi altında 0,2 mm seviyesinde temel frekansın 1x harmoniğinin uyardığı frekansta, diğer seviyelerde ise 1x harmoniğinde tespit edilmiştir.

Test edilen kusur bazında inceleme yapıldığında; yağsızlık etkisinde 1900 min⁻¹ devir sayısında en yüksek genlikli sinyal radyal yönde 1x harmoniğinde, eksenel yönde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 2800 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde tespit edilmiştir.

Balanssızlık kusuru etkisinde 1900 min⁻¹ devir sayısında en yüksek genlikli sinyal olarak radyal yönde 1x harmoniği, eksenel yönde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekans, 2800 min⁻¹ devir sayısında radyal yönde 1x, eksenel yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekans, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 1x harmoniği tespit edilmiştir.

Eksen kaçıklığı etkisinde 1900 min⁻¹ devir sayısında en yüksek genlikli sinyal, 0,1 mm seviyesinde her iki yönde 3x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde tespit edilmiştir. 1900 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm seviyesinde radyal yönde 6x, eksenel yönde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 2800 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir. 0,3 mm eksen kaçıklığı

seviyesinde 1900 min⁻¹ devir sayısında radyal yönde 6x, aksenal yönde 3x, 2800 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir. 0,4 mm eksen kaçıklığı seviyesinde 1900 min⁻¹ devir sayısında radyal yönde 6x harmoniğinde, aksenal yönde 3x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında radyal yönde 4x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, aksenal yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir. 0,5 mm eksen kaçıklığı seviyesinde 1900 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devir sayısında radyal yönde 6x harmoniğinde, aksenal yönde 3x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir.

Mekanik gevşeklik etkisinde 1900 min⁻¹ devir sayısında en yüksek genlikli sinyal, 0,1 mm seviyesinde her iki yönde 3x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta, 2800 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 1x harmoniğinde tespit edilmiştir. 0,2 mm seviyesinde 1900 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında iki yönde 2x harmoniğin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 1x harmoniğinin uyardığı doğal frekansta en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir. 0,3 mm seviyesinde 1900 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında iki yönde 2x harmoniğin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 1x harmoniğinde en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir. 0,4 mm seviyesinde 1900 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında iki yönde 2x harmoniğin uyardığı doğal frekansta, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 1x harmoniğinde en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir. 0,5 mm seviyesinde 1900 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 2x harmoniğinde, 2800 min⁻¹ devir sayısında iki yönde 1x harmoniğinde, 3510 min⁻¹ devir sayısında her iki yönde 1x harmoniğinde en yüksek genlikli sinyal tespit edilmiştir.

Test verilerindeki genlik sıralamasındaki birinci sinyaller incelendiğinde 1900 min⁻¹ devir sayısında beş, 2800 min⁻¹ devir sayısında yirmi bir, 3510 min⁻¹ devir sayısında altı doğal frekans tespit edilmiştir. Tüm testler gözönünde bulundurularak radyal ve aksenal yönlerde en yüksek genlikli beş sinyal incelendiğinde ise toplamda

1900 min⁻¹ devir sayısında kırk, 2800 min⁻¹ devir sayısında yüz iki, 3510 min⁻¹ devir sayısında yetmiş doğal frekans tespit edilmiştir.

Tüm bu veriler ışığında değerlendirme yapıldığında, yağsızlık etkisi altında test edilen en düşük devir sayısında baskınlık değeri balanssızlık belirtisi 1x harmoniğindeyken, test edilen devir sayısı arttıkça eksen kaçıklığı belirtisi 2x harmoniğinin baskınlığı öne geçmeye başlamıştır. Balanssızlık etkisinde test devir sayısı arttıkça balanssızlık belirtisi 1x harmoniğinin sinyal genliği spektrumdaki diğer sinyallere kıyasla artmıştır. Eksen kaçıklığı etkisinde test devir sayısı arttıkça eksen kaçıklığı belirtisi 2x harmoniğinin baskınlığı artmıştır. Mekanik gevşeklik etkisi altında, test edilen devir sayısı yükseldikçe mekanik gevşeklik belirtilerinden 2x harmoniğinin baskınlığından balanssızlık belirtisi olan 1x harmoniğine doğru kayma olmuştur. Diğer taraftan yukarıda bahsedilen test devir sayılarına göre beliren doğal frekans sayıları incelendiğinde en fazla doğal frekans 2880 min⁻¹ devir sayısında tespit edilmiştir; bu devir sayısı test edilen diğer devir sayılarına göre kritik devir sayılarına daha yakın olduğundan dolayı (üçüncü kritik devir sayısı 2637 min⁻¹) rezonansa maruz kalma oranı daha yüksek olabileceği düşünülmektedir.

4.2 Elektrik Tüketim Verileri ve Analizi

Gerçekleştirilen tüm testler, eş zamanlı olarak elektriksel tüketim (akım, gerilim) trend verileri ve güç spektrum yoğunluğu verileri toplanarak değerlendirilmiştir. Trend verileri, zaman-bölgesindeki görüntülemeye benzer yapıda olup, veriler seçilen parametrelere göre standart sapma olarak analiz edilebilmektedir. Güç spektrum yoğunluğu değerlerinin analizi ise, titreşim frekans-bölgesi görüntülenmesine benzer şekilde frekans değişimine bağlı standart sapma değerlerinin incelenmesi yoluyla gerçekleşmektedir. Bu bölümde yağsızlık, balanssızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik testleri motora ait elektriksel veriler ile analiz edilmiştir. Ayrıca bu bölümde, elektriksel trend verilerinde sistem rezonansının varlığını test edebilmek için üçüncü kritik devir sayısına yakın bir devir olan 2345 min⁻¹ (f: 40,5 Hz) devir sayısı incelemeye dahil edilmiştir.

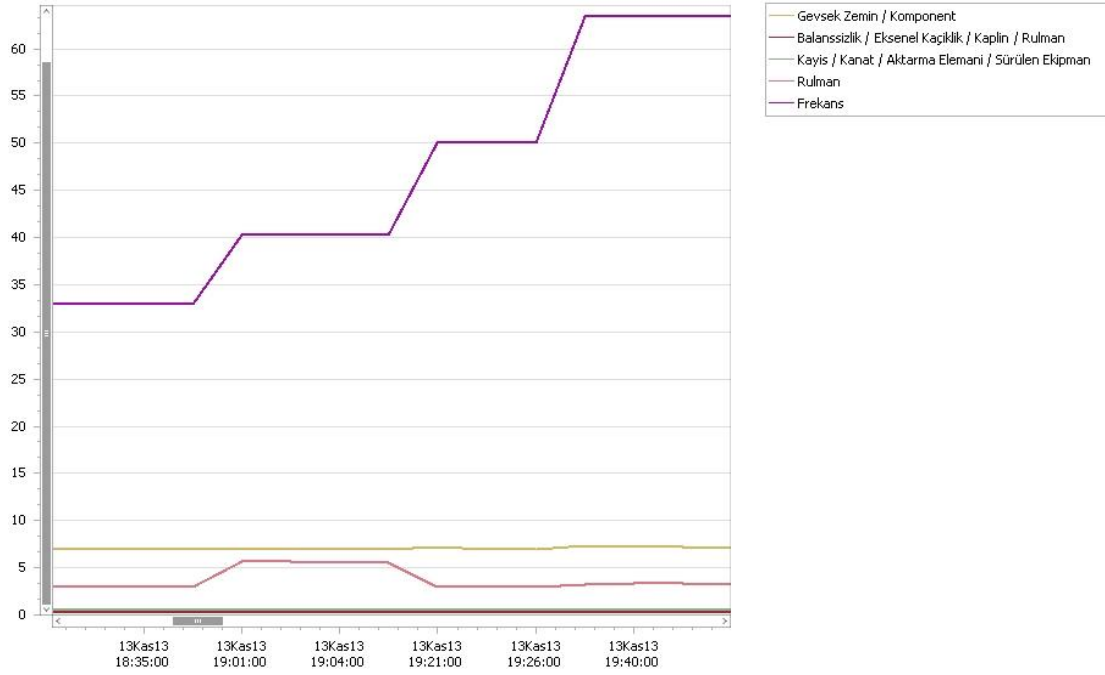
4.2.1 Trend verileri

Veriler, grafik gösterimlerde y ekseninde frekans parametresi için gerçek değer ve kusur seviyeleri için standart sapma; x ekseninde ise zamana bağlı incelenmiştir.

Trend verilerinde gevşek zemin / komponent, balanssızlık / eksen kaçıklığı / kaplin / rulman, kayış / kanat / aktarma elemanı / sürülen ekipman, rulman ve frekans parametrelerindeki değişimler incelenmiştir.

4.2.1.1 Referans trend verileri

Başlangıç şartlarında toplanan verilerin Şekil 4.47'deki trend dönüşümleri testlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için referans kabul edilmiştir.

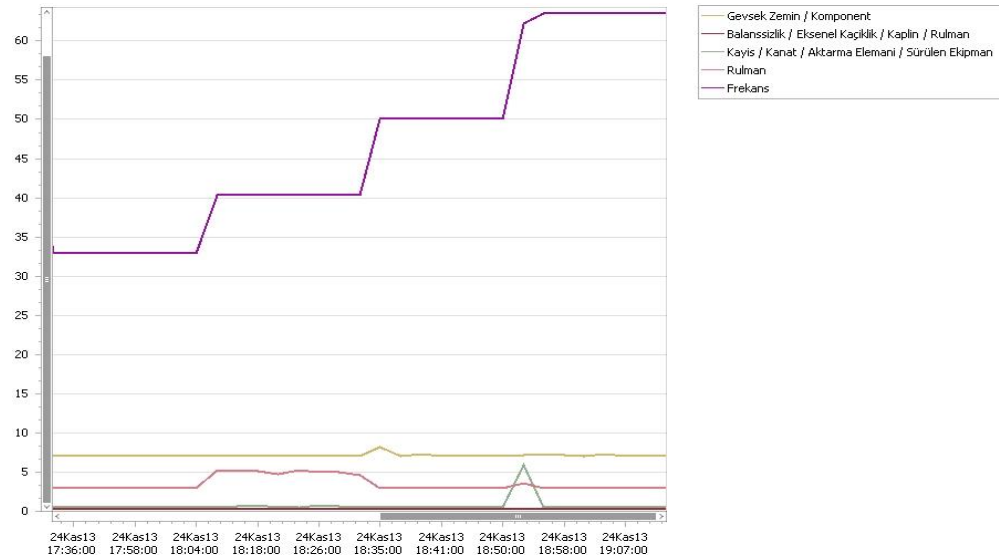


Şekil 4.47: Referans trend verileri

Başlangıç şartları altında, 1900 min^{-1} (f: 32,7 Hz), 2880 min^{-1} (f: 50 Hz) ve 3510 min^{-1} (f: 63,8 Hz) devir sayılarında gevşeklik, balanssızlık, eksen kaçıklığı, kaplin, rulman, aktarma elemanı, sürülen ekipman parametrelerine ait standart sapma değerlerinde herhangi bir değişim gözlenmemiş ve dolayısıyla arıza belirtisine rastlanmamıştır. Elde edilen veriler genel olarak incelendiğinde balanssızlık, eksen kaçıklığı, kaplin, aktarma elemanı, sürülen ekipman parametrelerine ait standart sapma değerleri 0 sayısal değerine yaklaşık gözlemlenirken, rulman için standart sapma değeri 3, gevşeklik için ise 7 değeri gözlemlenmiştir. Sonuç itibari ile anılan değerler kabul edilebilir seviyede bulunmuş ve farklı devir sayılarında değişim gözlenmemiştir. Sadece 2345 min^{-1} (f: 40,5 Hz) devir sayısı düzeyinde rulman parametresi değerinde artış gözlemlenmiştir; gözlenen artış bu devir sayısının rezonans geçiş bölgesinde olduğuna işaret etmektedir.

4.2.1.2 Yağsızlık testleri

Rulmandaki tüm yağ tahliye edilip sadece 0,55 g yağ ilave edildiğinde; 1900 min⁻¹ (f: 32,7 Hz), 2345 min⁻¹ (f: 40,5 Hz), 2880 min⁻¹ (f: 50 Hz) ve 3510 min⁻¹ (f: 63,8 Hz) devir sayılarındaki seçilmiş parametrelere ait trend değişimleri Şekil 4.48'de verilmiştir. Yağsızlık şartları altında, test edilen devir sayılarında referans verilerinden farklı olarak herhangi bir değişime ve arıza belirtisine rastlanmamıştır.

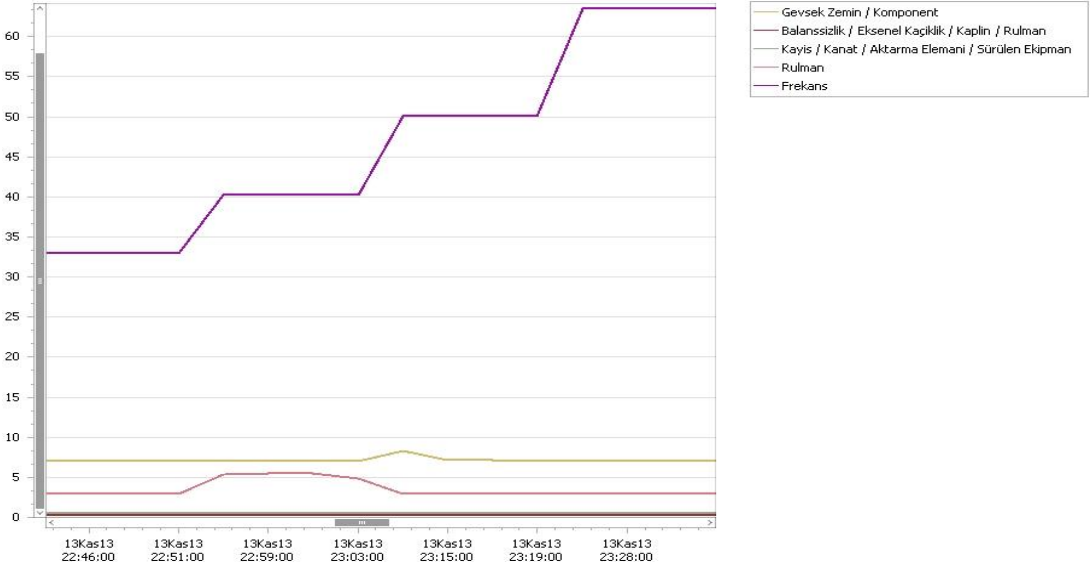


Şekil 4.48: Yağsızlık etkisi trend verileri

Referans verilerinde de gözlemlenen tek artış rulman parametresi değerinde meydana gelmiştir. Bu artış daha önce de ifade edildiği üzere yalnızca 2345 min⁻¹ (f: 40,5 Hz) devir sayısında, rezonans etkisinin rulman üzerindeki tesirine işaret olan bir artış olarak gözlemlenmiştir.

4.2.1.3 Balanssızlık testleri

Fan kanatlarına 23 g yük yüklendiğinde farklı devir sayılarında (elektrik frekanslarında) ortaya çıkan trend seyri Şekil 4.49'da verilmiştir. Elektrik frekansı baz alınarak yapılan incelemede zemin/komponent gevşekliği, balanssızlık, eksen kaçıklığı, sürülen ekipman, kaplin ve rulman parametrelerinin meydana getirdiği elektrik tüketim standart sapma değerleri takip edilerek yorumlamaya gidilmiştir. Elektriksel frekans koşulları altında 32,7 Hz, 40,5 Hz, 50 Hz ve 63,8 Hz değerleri şekilde y eksenini üzerinde izlenebilmektedir, diğer parametreler ise bu frekansların aktif olduğu kısımlarda değerlendirilmiştir.



Şekil 4.49: Balanssızlık etkisi trend verileri

Referans verileri ile karşılaştırıldığında herhangi bir değişim gözlenmemiş olup, test edilen devir sayılarında herhangi bir arıza belirtisine rastlanmamıştır. Referans ve yağsızlık verilerindeki benzer şekilde 2345 min^{-1} (f: 40,5 Hz) devir sayısı düzeyinde, rulman parametresi değerinde rezonans etkisine işaret olan artış gözlemlenmiştir.

4.2.1.4 Eksen kaçıklığı testleri

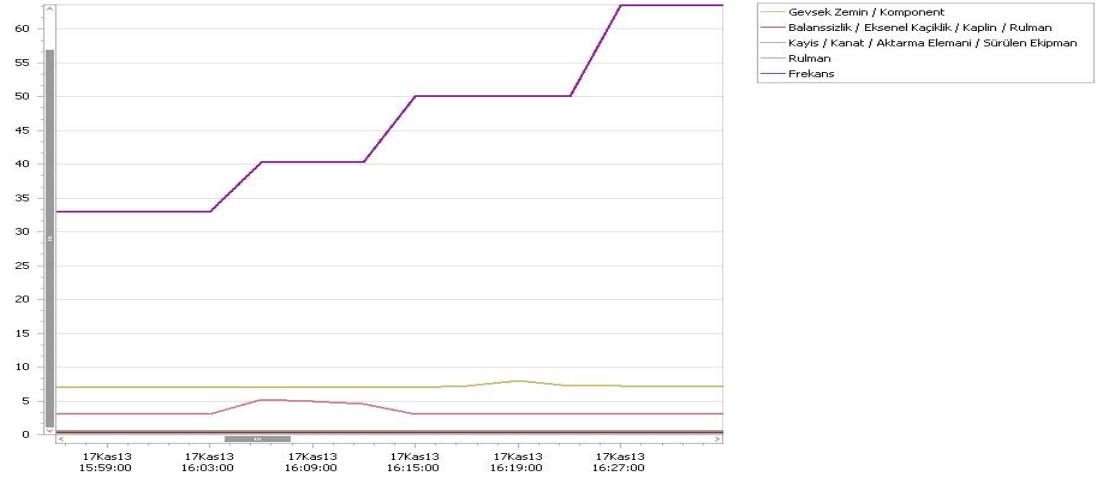
Sonuçlar birbirine benzerlik gösterdiğinden dolayı tüm eksen kaçıklığı seviyeleri için trend grafiği verilmemiş, sadece 0,2 mm ve 0,5 mm seviyesi için verilmiştir. Eksen kaçıklığı 0,2 mm ve 0,5 mm seviyelerindeki değişimler Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de verilmiştir.

0,2 mm eksen kaçıklığı şartları altında, test edilen devir sayılarında herhangi bir arıza belirtisine rastlanmamıştır. Önceki testlerde de görülen 2345 min^{-1} (f: 40,5 Hz) devir sayısı düzeyinde rulman değerinde rezonansa işaret eden artış gözlemlenmiştir.

0,5 mm eksen kaçıklığı şartları altında, test devir sayılarında arıza belirtilerine rastlanmıştır. Devir sayısı olarak 2880 min^{-1} (f: 50 Hz) devir sayısı düzeyinden itibaren gevşek zemin/komponent, eksen kaçıklığı ve rulman parametre değerlerinde artış meydana gelmeye başlamıştır; 3510 min^{-1} (f: 63,8 Hz) devir sayısı düzeyinde ise gevşek zemin/komponent, eksen kaçıklığı ve rulman parametrelerine ait değerlerde belirgin bir şekilde artış meydana gelmiştir. 2880 min^{-1} (f: 50 Hz) devir sayısı düzeyine kadar sadece 2345 min^{-1} (f: 40,5 Hz) devir sayısı düzeyinde rulman

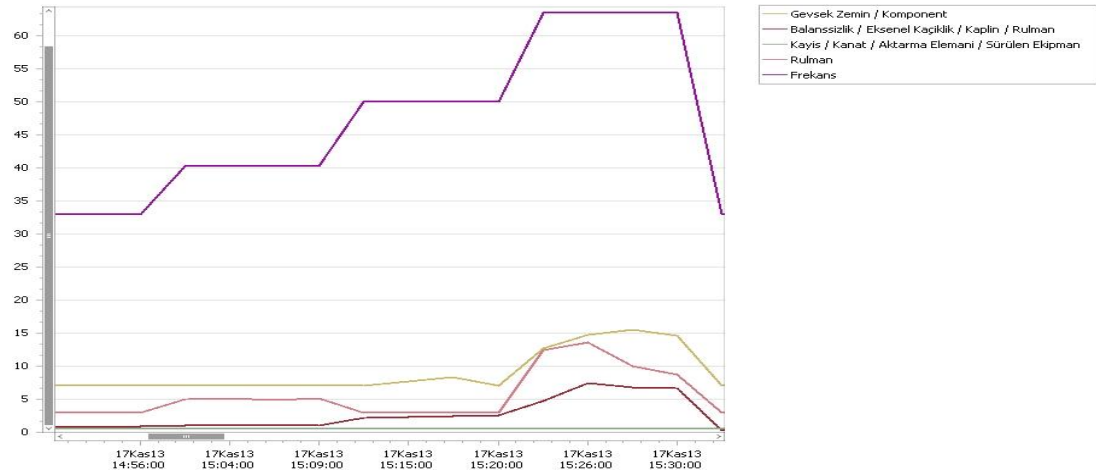
değerinde artış gözlemlenmiştir. 0,1 mm - 0,5 mm arası eksen kaçıklığı testlerinde, sistemin 2345 min^{-1} (f: 40,5 Hz) devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı seviyesinden itibaren kusuru algıladığı görülmüştür.

a) 0,2 mm seviyesinde eksen kaçıklığı trend verileri



Şekil 4.50: 0,2 mm seviyesi eksen kaçıklığı trend verileri

b) 0,5 mm seviyesinde eksen kaçıklığı trend verileri

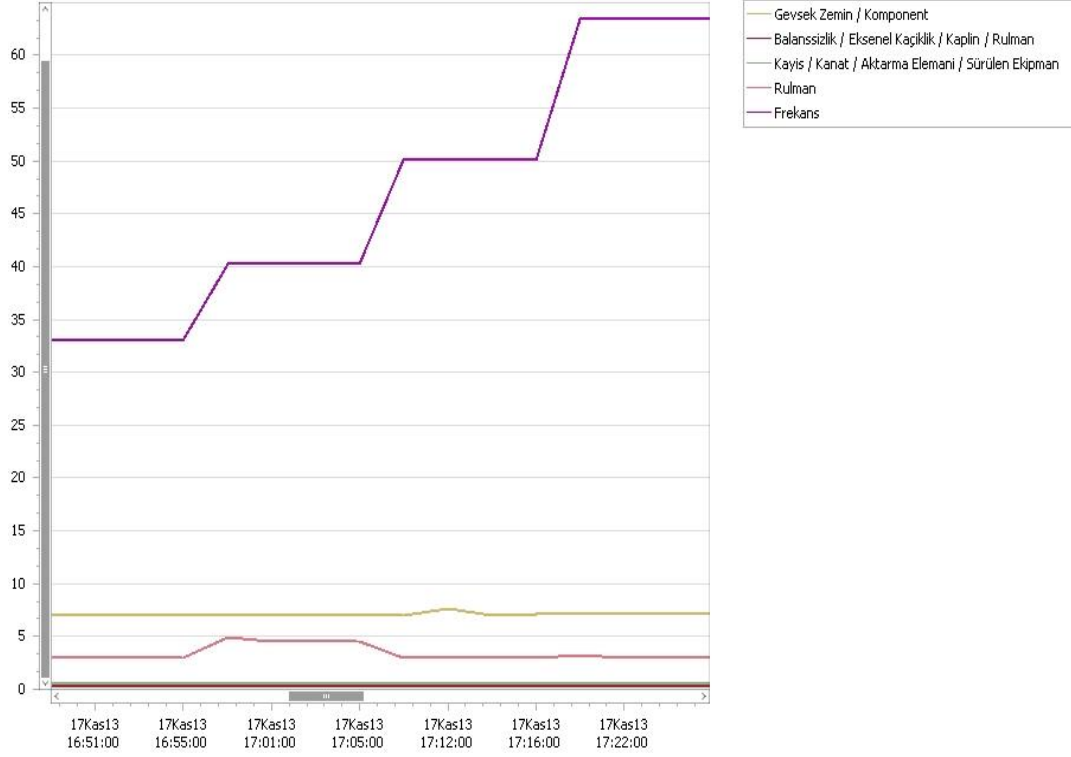


Şekil 4.51: 0,5 mm seviyesi eksen kaçıklığı trend verileri

4.2.1.5 Mekanik gevşeklik testleri

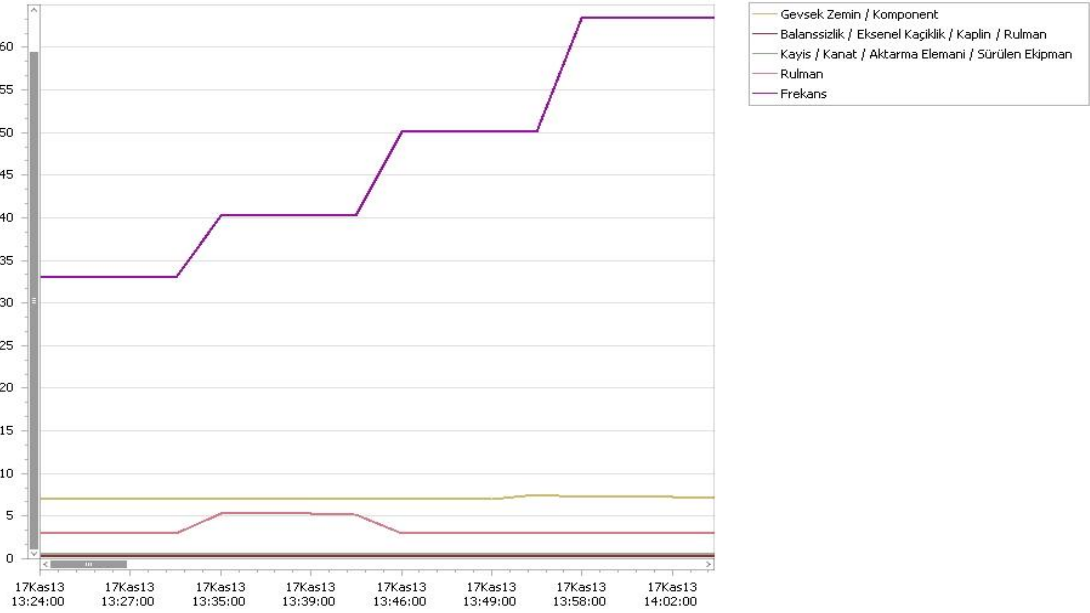
Mekanik gevşeklik 0,2 mm ve 0,5 mm seviyelerindeki trend seyirleri Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te verilmiştir. Elektriksel frekans koşulları altında 32,7 Hz, 40,5 Hz, 50 Hz ve 63,8 Hz değerleri şekilde y eksenini üzerinde izlenebilmektedir, diğer parametreler ise bu frekansların aktif olduğu kısımlarda değerlendirilmiştir.

a) 0,2 mm seviyesinde mekanik gevşeklik trend verileri



Şekil 4.52: 0,2 mm seviyesi mekanik gevşeklik trend verisi

b) 0,5 mm seviyesinde mekanik gevşeklik trend verileri



Şekil 4.53: 0,5 mm seviyesi mekanik gevşeklik trend verisi

Bu sistem üzerinde 0,1 – 0,5 mm arası mekanik gevşeklik etkisinin trend verileriyle tespit edilemediği gözlenmiştir.

4.2.2 Elektriksel güç spektrum yoğunluğu (GSY=PSD) incelemesi

Bu bölümde, güç spektrum yoğunluğu analizi ile arıza tespiti sonuçları MDİC spektrum incelemeleri altında verilmiştir. Yağsızlığa bağlı testlerde, kusur seviyesinin artmasıyla beraber elektriksel PSD değerinin de yükselişe geçmesi ve bu göstergelerin takibi başarılı bir durum izleme tekniği olarak kabul edilmiştir. Tüm testlerde benzer şekilde diğer kusurların oluşumu esnasında elektriksel PSD değerleri farklı oranlarda yükselmiştir ve trend analizinde tespit edilemeyen kusurların elektriksel PSD analizi ile tespiti başarılı bulunmuştur. Bu nedenle burada verilecek olan analizlere benzer şekilde, muhtemel kusurlar için elektriksel PSD haritalaması yapıp şablonlar oluşturularak, arıza kestirimci bakımı için destek ve alternatif durum izleme tekniği olarak kullanılabilir. Bölüm 3'te de ifade edildiği üzere motor durum izleme cihazı (MDİC) ile her frekansta trend görüntülemesi yapılabilirken, öğrenme aşamasını 50 Hz frekansta gerçekleştirdiğinden dolayı elektriksel PSD görüntülemesi sadece 50 Hz'te gerçekleştiren testler için arıza bantları ile uyumlu çıkmakta ve anlık değer yüksek, normal ve motor değerleri ile karşılaştırılmasına imkan vermiştir.

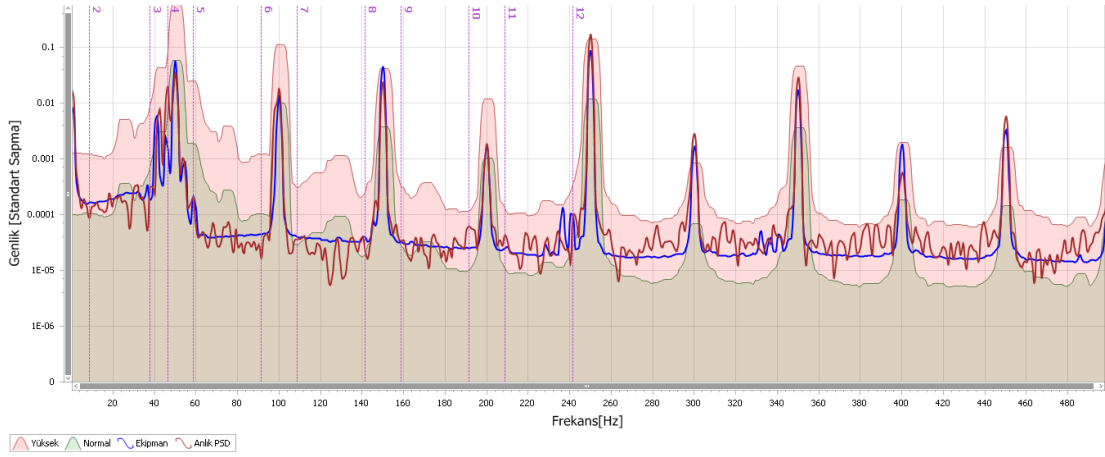
4.2.2.1 Referans elektriksel PSD verileri

Güç spektrum yoğunluğu değerleri incelendiğinde, başlangıçta referans olarak alınan verilerde Şekil 4.54'te görüldüğü gibi anlık değerler normal sınırlar içerisinde kalmakta ve sistemin sağlıklı çalıştığını göstermektedir. Frekans ekseninde 50 Hz ve katlarında meydana gelen sinyal genlik değişimleri incelenmiştir.

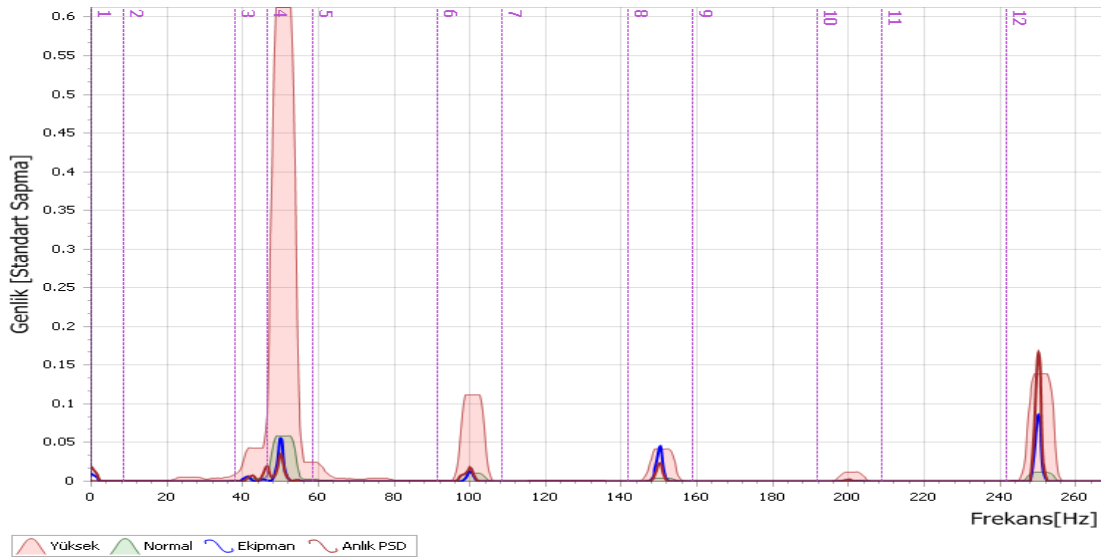
Logaritmik görünümde, MDİC'nin öğrenme sürecinde elde ettiği ekipman ortalama standart sapma değeri 4 ve 6 numaralı bantta normal değer altında, daha üst bantlarda ise normal değer üstünde ancak yüksek değer altında gözlenmiştir. Anlık elektriksel PSD değeri ise 12 numaralı diğer bantına kadar ekipman değerini aşmamıştır.

Genel olarak veriler logaritmik görünümde incelendiğinde, temel frekans 50 Hz'in tüm katlarında farklı genliklerde sinyal varlığı izlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında her frekans katındaki bant aralığının bir kusur tipini ifade etmesi açısından detaylı sonuçlar ortaya koyduğu söylenebilir. Diğer taraftan, aynı bant aralığının birden fazla kusur tipini ifade etmesi ise sinyalin spesifik olarak hangi kusur tipine ait olduğunun tespitini güçleştirmektedir. İnceleme koşulları açısından verilerin spektrum

görüntüleme üzerinden takibi daha az detaylı olmakla beraber daha kısa sürede fikir yürütmeye yardımcı olmaktadır.



(a) Logaritmik görünüm



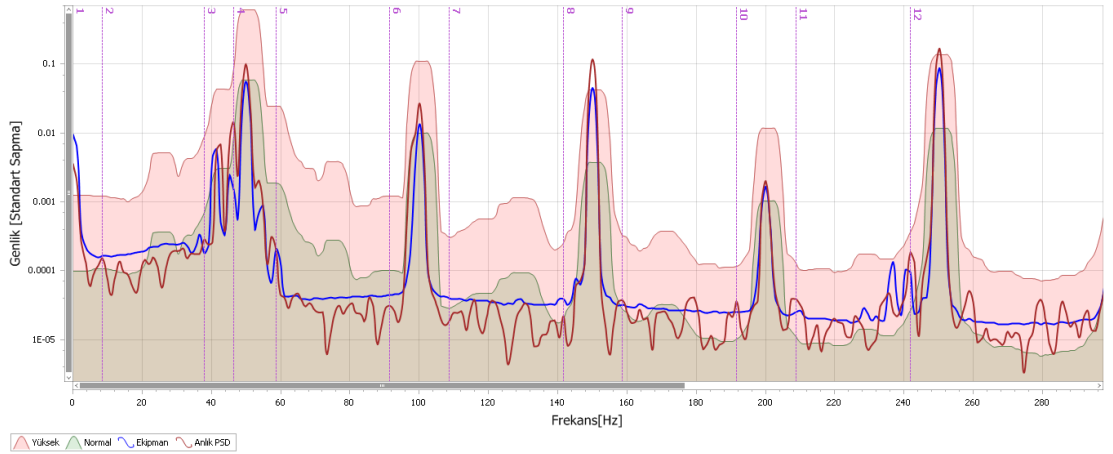
(b) Spektrum görünümü

Şekil 4.54: 2880 min⁻¹ devir sayısında referans PSD değerleri

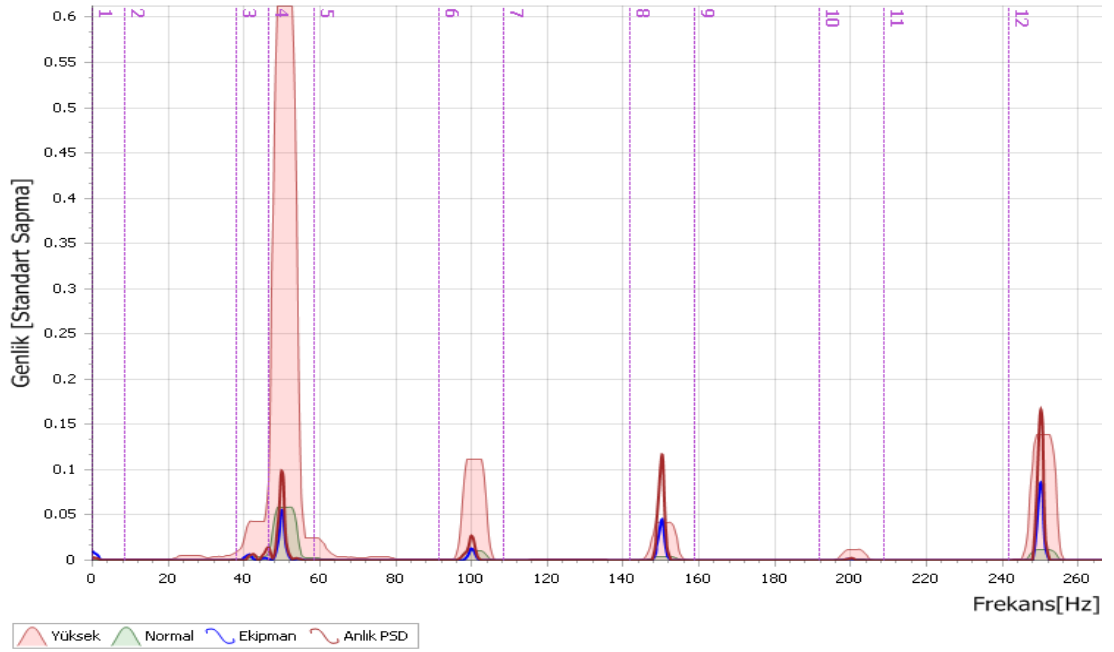
4.2.2.2 Yağsızlık etkisi altında elektriksel PSD değişimi

Yağsızlık etkisi altında, Şekil 4.55'te görüldüğü üzere anlık PSD değeri, rotoru ifade eden 4 numaralı bantta ve rulmanın da aralarında bulunduğu kusurlar grubunu ifade eden 6 numaralı bantta görüldüğü gibi normal sınırların üzerine çıkmıştır.

Yağsızlık etkisi altında tüm bantlarda normal ve ekipman değerini aşan anlık PSD değerleri gözlenmiştir. Verilere göre yağsızlık etkisi 4 numaralı bantta rotorun ve 6 numaralı bantta rulmanın gösterdiği tepkilerin arttığını ortaya koymaktadır.



(a) Logaritmik görünüm

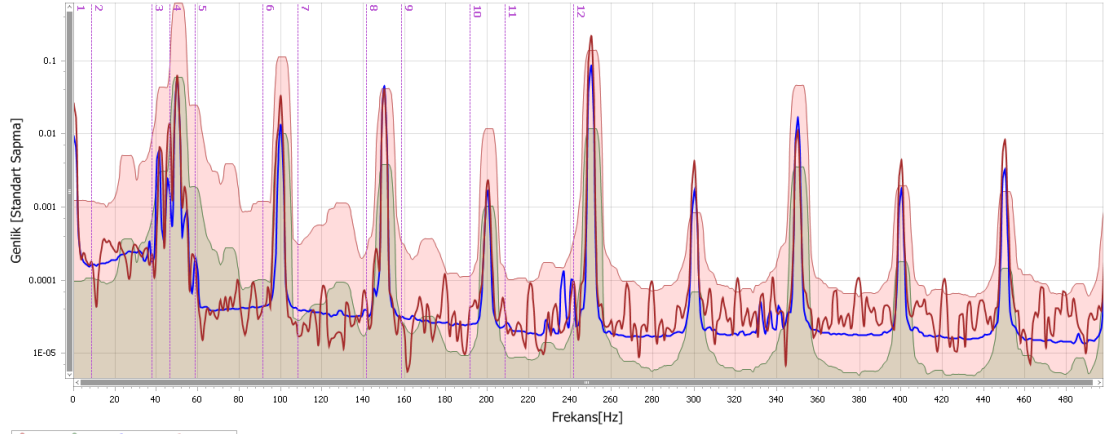


(b) Spektrum görünümü

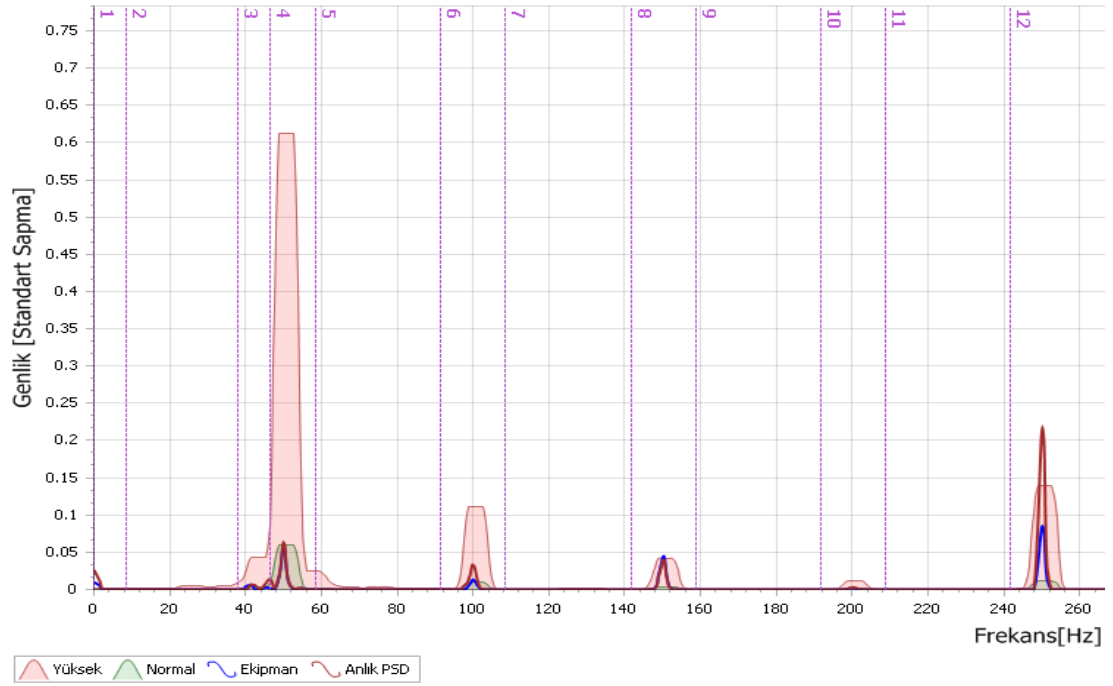
Şekil 4.55: 2880 min⁻¹ devir sayısında yağsızlık etkisi PSD değerleri

4.2.2.3 Balanssızlık etkisi altında elektriksel PSD değişimi

Balanssızlık etkisi altında, Şekil 4.56'da görüldüğü gibi anlık PSD değeri, rotoru ifade eden 4 numaralı bantta normal sınırını zorlamakta ve balanssızlık kusurunun da aralarında kusurlar grubunu ifade eden 6 numaralı bantta görüldüğü üzere normal sınırların üzerine çıkmıştır. Kalkat ve Yiğiter [28], çalışmalarında balanssızlık durumunda enerji tüketiminin ve malzeme bozunmasının arttığını tespit etmiştir.



(a) Logaritmik görünüm



(b) Spektrum görünümü

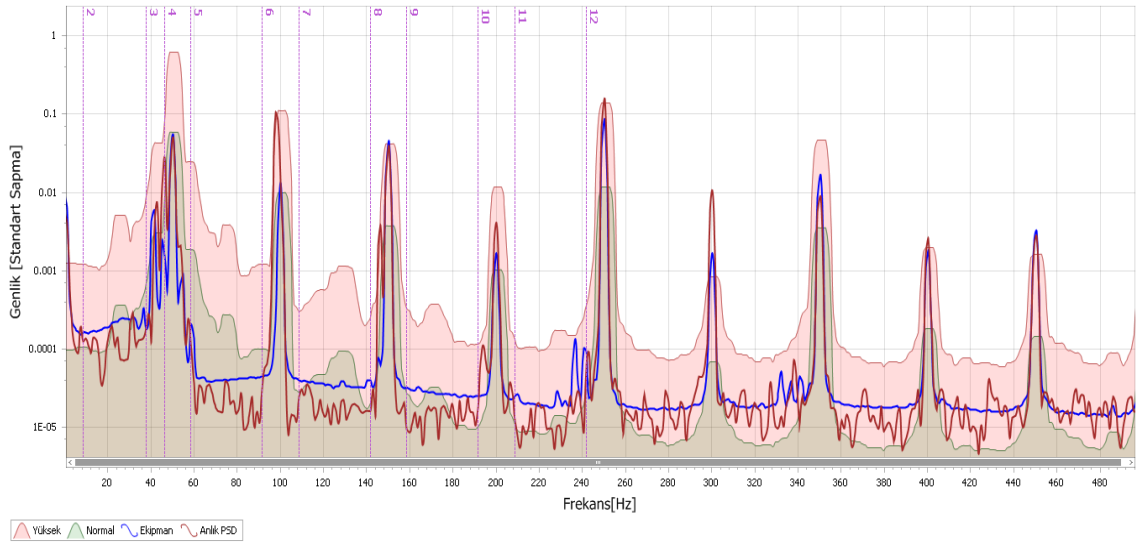
Şekil 4.56: 2880 min⁻¹ devir sayısında balanssızlık PSD değerleri

Balanssızlık etkisi 6 numaralı bantta anlık PSD değerindeki normal ve ekipman değerlerini aşan yükseliş ile tespit edilebilmiştir.

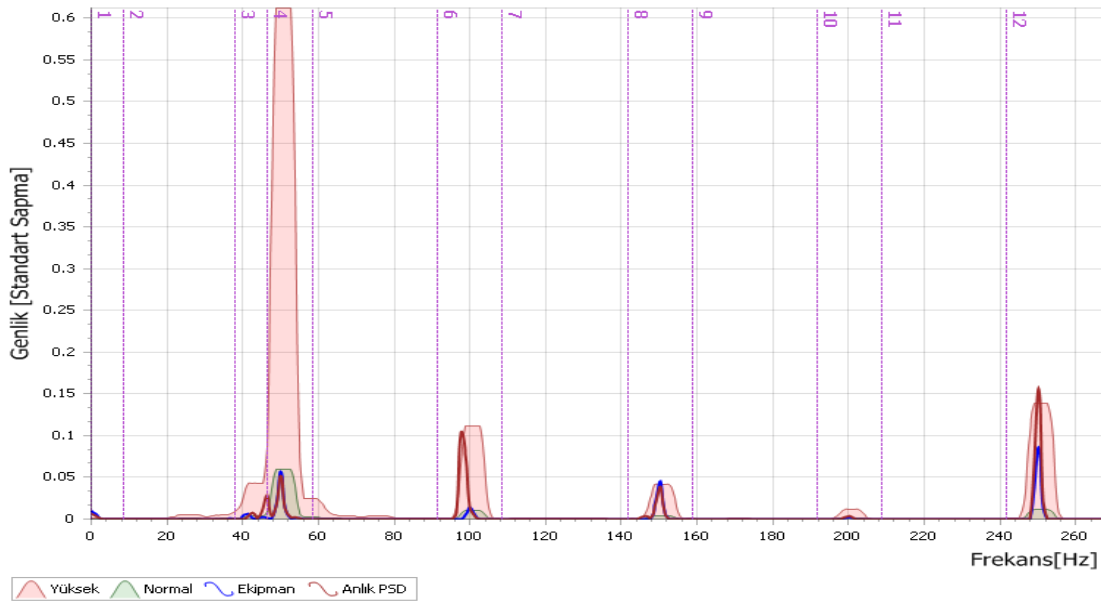
4.2.2.4 Eksen kaçıklığı etkisi altında elektriksel PSD değişimi

Eksen kaçıklığı durumunda anlık PSD değeri normal değer üzerine çıkmıştır. Eksen kaçıklığı seviyesi arttıkça da anlık PSD değeri oransal olarak yükselmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.57 – Şekil 4.61’de verilmiştir.

a) Eksen kaçıklığı seviyesi 0,1 mm



a) Logaritmik görünüm



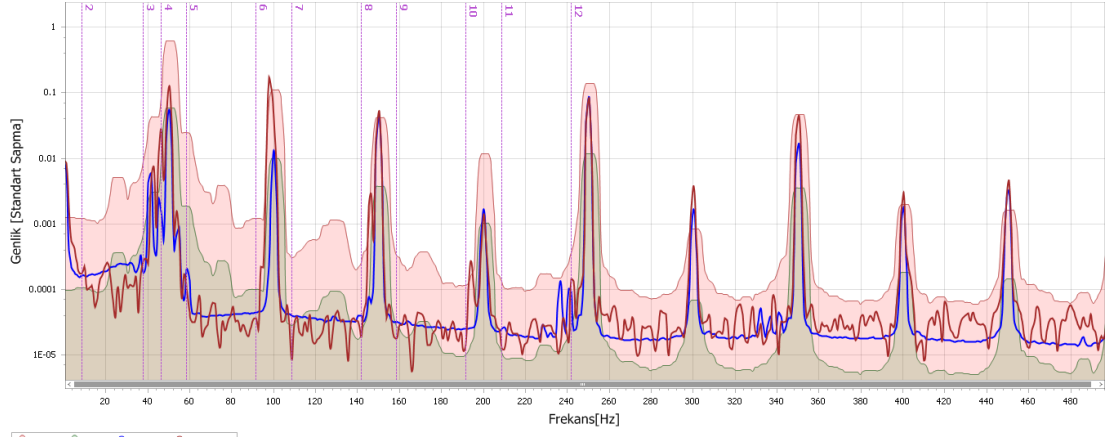
(b) Spektrum görünümü

Şekil 4.57: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,1 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri

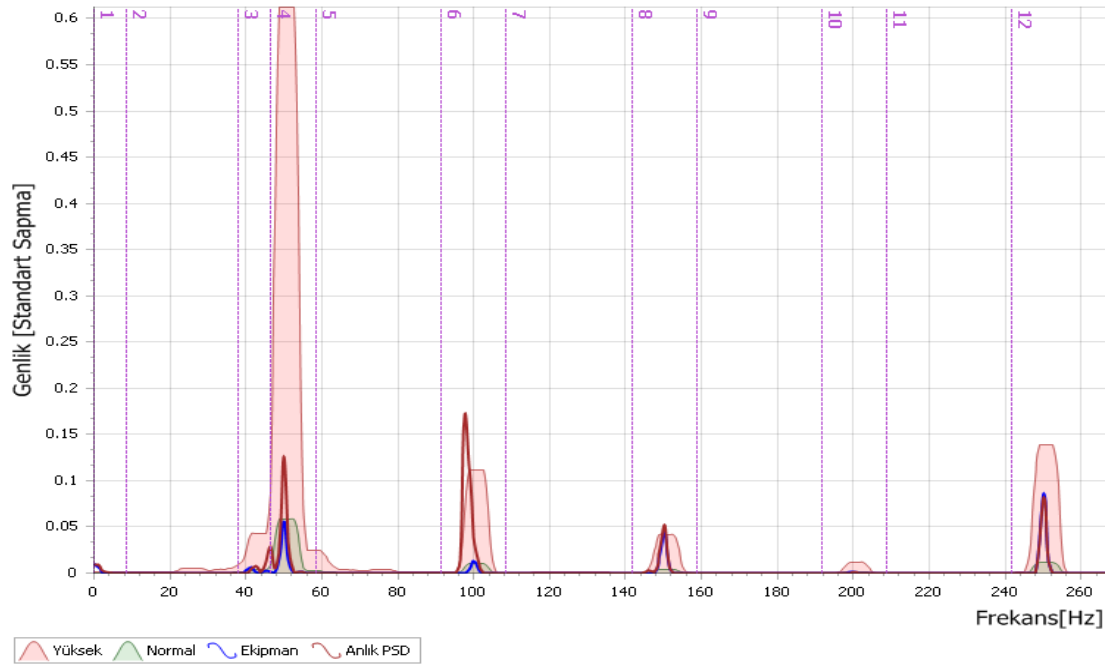
50 Hz elektrik frekansında 2880 min⁻¹ devir sayısı ile dönen test düzeneğinden alınan verilere ait logaritmik ve logaritmik olmayan spektrumlar incelendiğinde 6 numaralı frekans bant aralığında eksen kaçıklığından kaynaklanan genlik değerinin normal ve ekipman değerinin üstüne çıktığı, yüksek sınırını ise aşmadığı görülmüştür. Genlik standart sapma değeri incelendiğinde, eksen kaçıklığından kaynaklanan sinyalin 0,1 değerinin biraz üzerinde olduğu görülmektedir. Eksen kaçıklığı etkisinden

kaynaklanabilecek rotor etkileri 4 numaralı bant aralığı incelendiğinde, normal dışı bir değişim gözlenmemiştir. 12 numaralı diğer bandında ise beşinci ve üstündeki harmoniklerde düşük de olsa limit aşımaları görülmüştür.

b) Eksen kaçıklığı seviyesi 0,2 mm



(a) Logaritmik görünüm

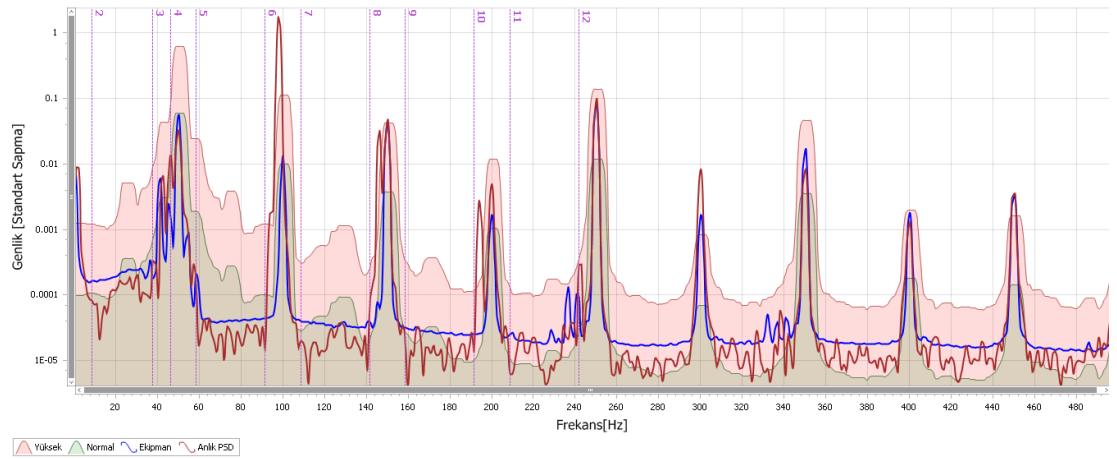


(b) Spektrum görünümü

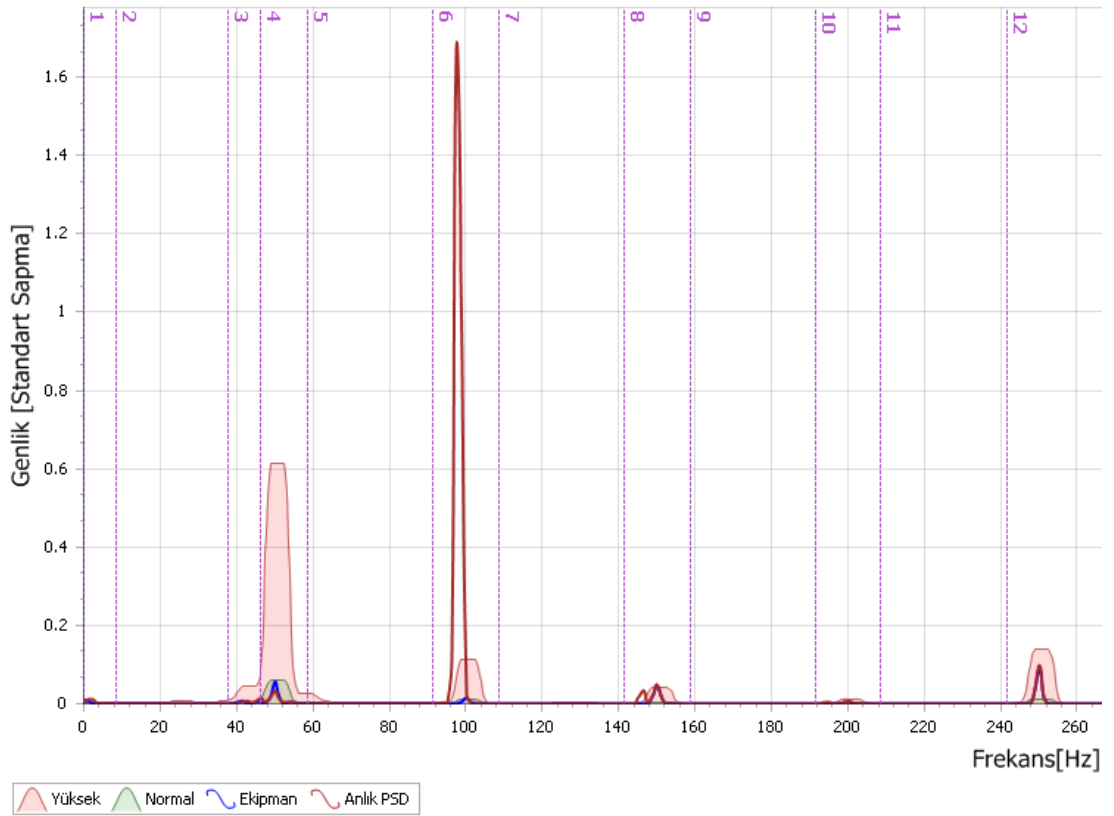
Şekil 4.58: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri

Grafiklere göre, 0,2 mm eksen kaçıklığı etkisi, ikinci harmonik olan 100 Hz'te 0,1 değerinden yaklaşık olarak 0,15 - 0,20 aralığına artışa geçmiştir. Bunun yanında 4 numaralı bantta görülen rotor etkisi sinyali normal değerlerin üzerine yükselmiştir.

a) Eksen kaçıklığı seviyesi 0,3 mm



(a) Logaritmik görünüm



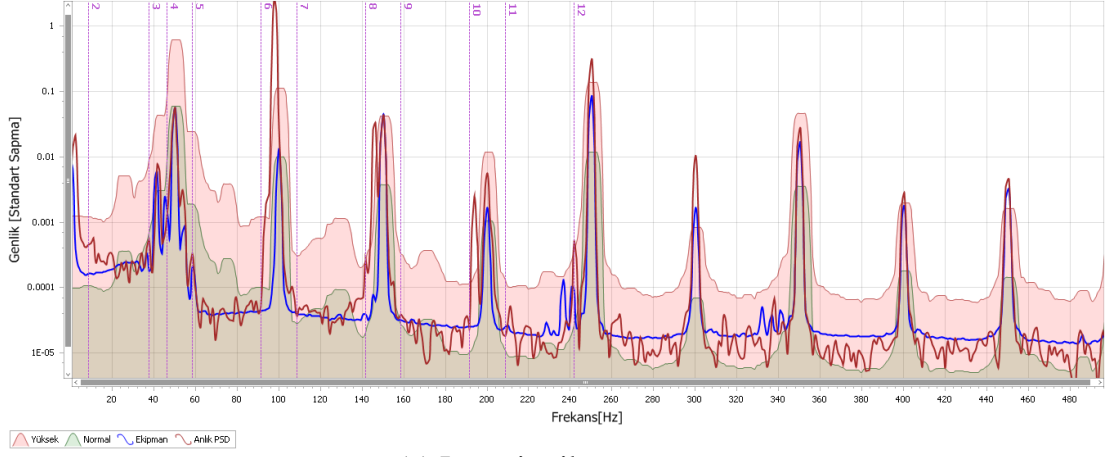
(b) Logaritmik görünüm

Şekil 4.59: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri

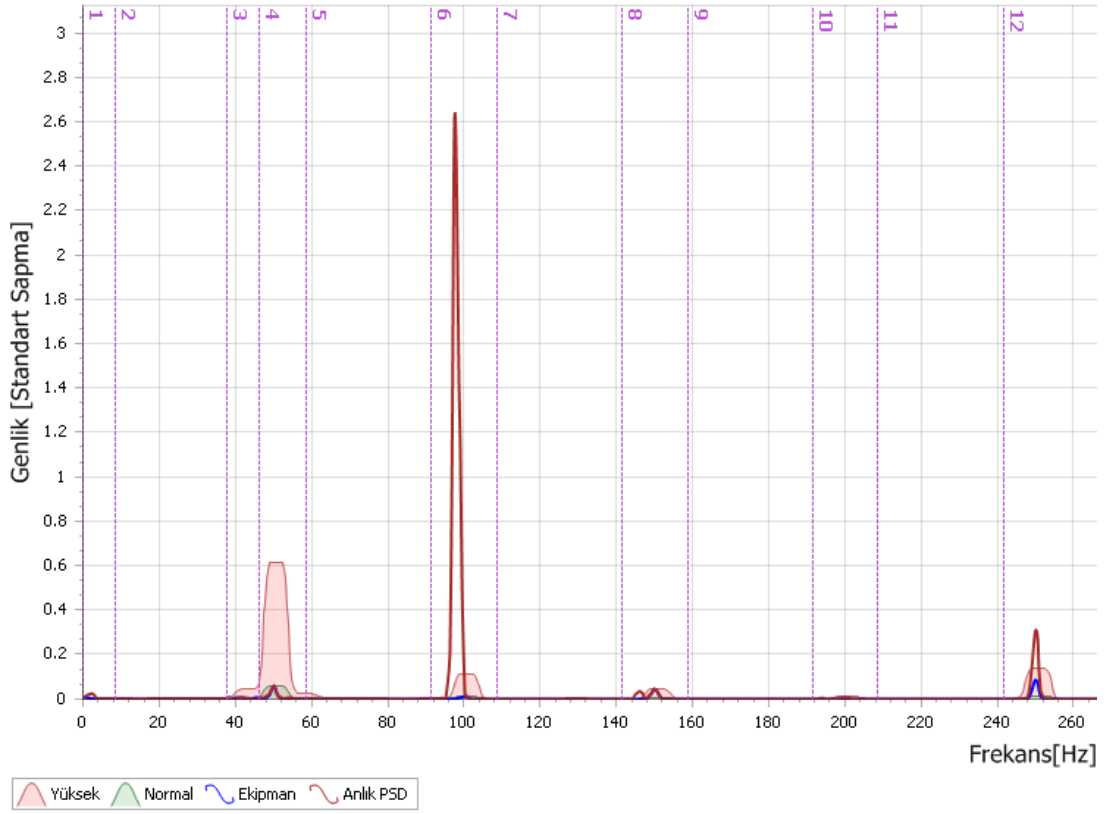
Test düzeneğinde, eksen kaçıklığı etkisi 0,3 mm'ye çıktığında, eksen kaçıklığı sinyali olan ikinci harmonik frekansı 100 Hz'teki değer belirgin farkla yükselerek 0,15 - 0,20 aralığında 1,6 değerinin üzerine çıkmıştır. 4 numaralı rotor bölgesinde herhangi

bir normal dışı durum gözlenmemiştir. 10 ve 12 numaralı diğer bantlarında normal değerin üzerine artışlar görülmüştür.

d) Eksen kaçıklığı seviyesi 0,4 mm



(a) Logaritmik görünüm



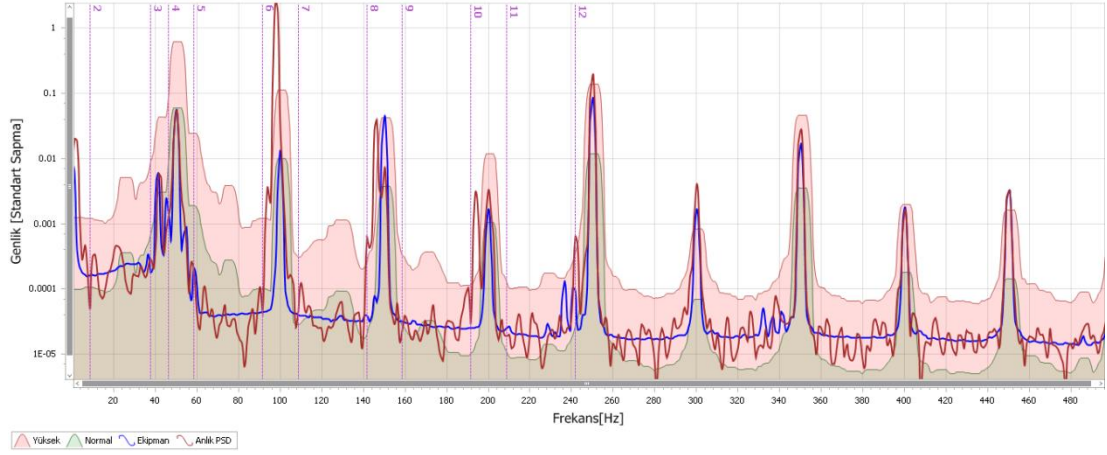
(b) Spektrum görünümü

Şekil 4.60: 2880 min^{-1} devir sayısında 0,4 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri

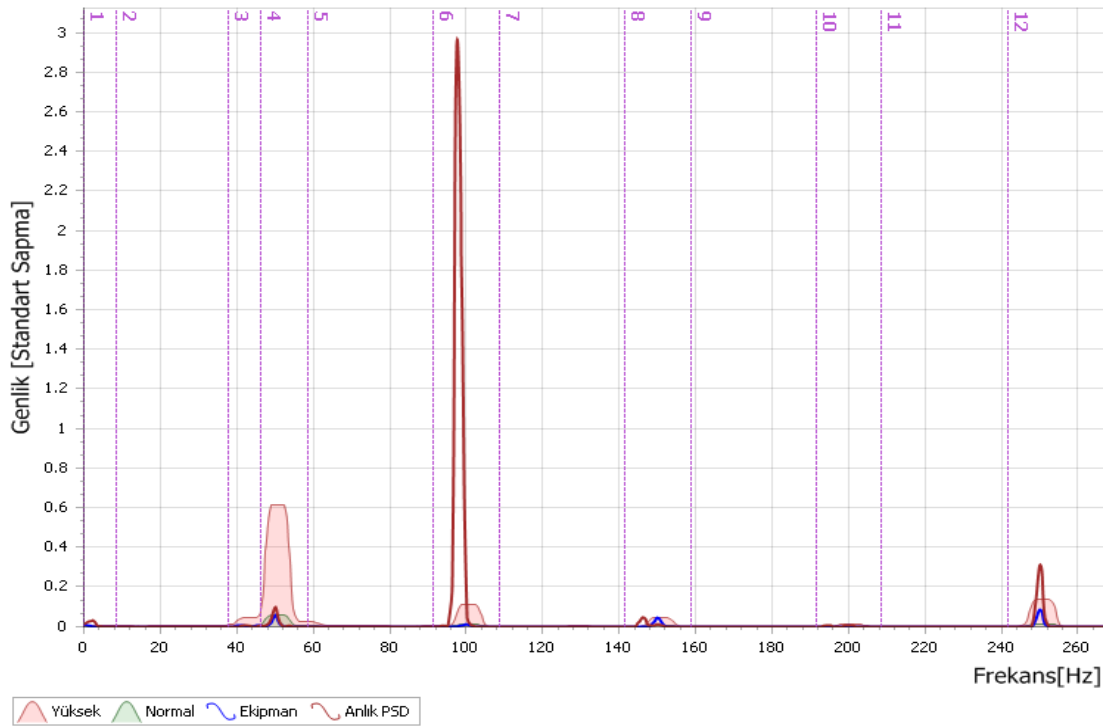
Test düzeneğinde, eksen kaçıklığı etkisi 0,4 mm'ye çıktığında, eksen kaçıklığı sinyali olan ikinci harmonik frekansı 100 Hz'teki değer belirgin farkla yükselerek 1,6 - 1,8 aralığından 2,6 değerinin üzerine çıkmıştır. 4 numaralı rotor bölgesinde herhangi bir

normal dışı durum gözlenmemiştir. 10 ve 12 numaralı diğer bantlarında normal değerlerin üzerine artışlar görülmüştür.

e) Eksen kaçıklığı seviyesi 0,5 mm



(a) Logaritmik görünüm



(b) Spektrum görünümü

Şekil 4.61: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,5 mm eksen kaçıklığı PSD değerleri

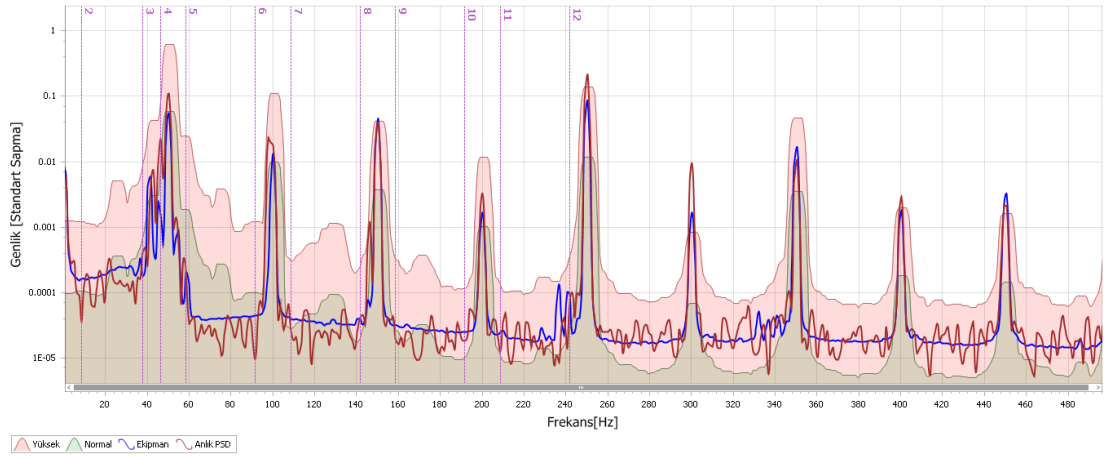
Test düzeneğinde, eksen kaçıklığı etkisi 0,5 mm'ye çıktığında, eksen kaçıklığı sinyali olan ikinci harmonik frekansı 100 Hz'teki değer belirgin farkla yükselerek 2,6 - 2,8 aralığından 3 değerine yaklaşmıştır. 4 numaralı rotor bölgesinde herhangi bir normal

dışı durum gözlenmemiştir. 10 ve 12 numaralı diğer bantlarında normal değer in üzerine artışlar görülmüştür.

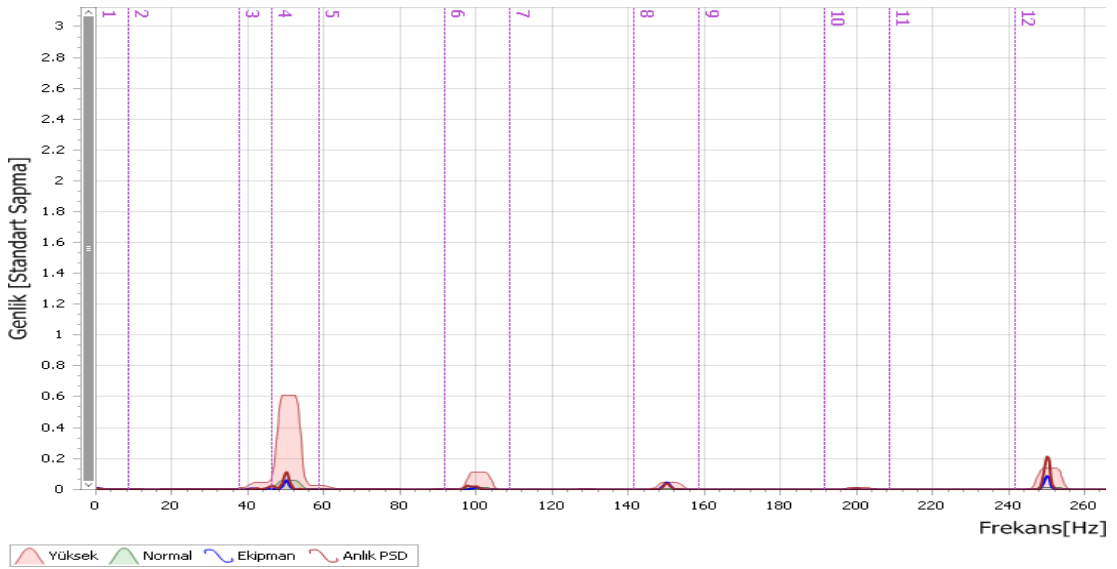
4.2.2.5 Mekanik gevşeklik etkisi altında elektriksel PSD değişimi

Mekanik gevşeklik durumunda anlık PSD değeri normal değerin üzerine çıkmıştır. Mekanik gevşeklik seviyesi arttıkça da anlık PSD değeri oransal olarak yükselmiştir. Veri grafikleri Şekil 4.62 – Şekil 4.66’da verilmiştir.

a) Mekanik gevşeklik seviyesi 0,1 mm



(a) Logaritmik görünüm

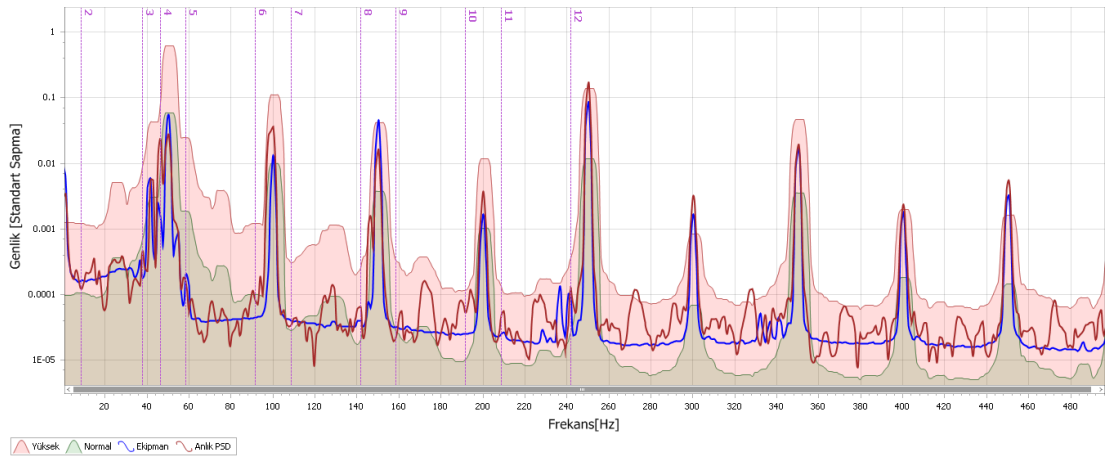


(b) Spektrum görünümü

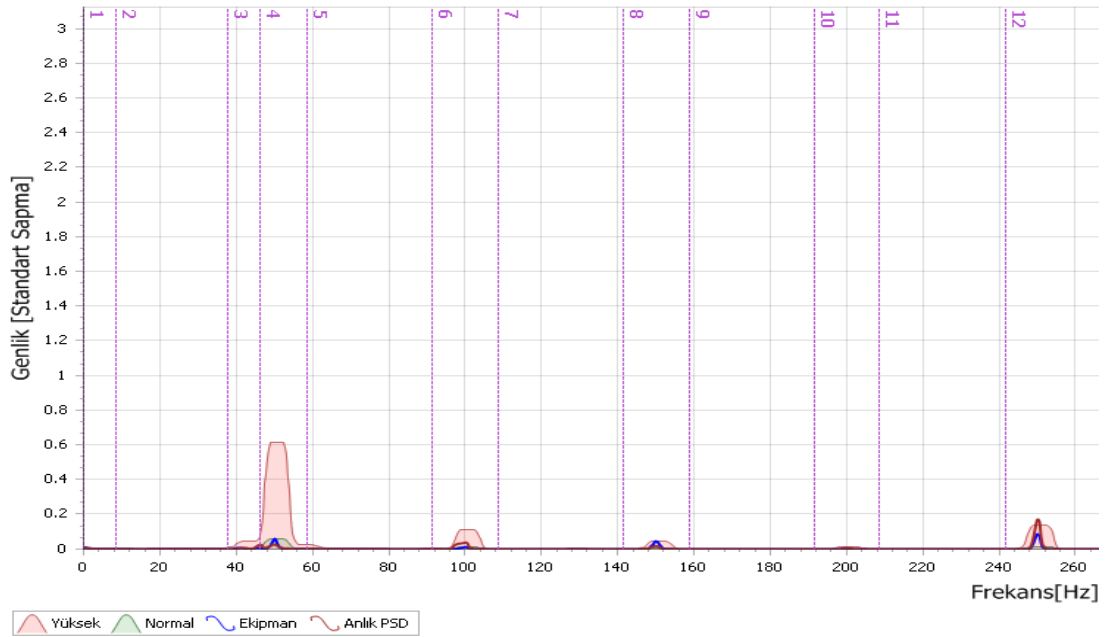
Şekil 4.62: 2880 min^{-1} devir sayısında 0,1 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri 50 Hz elektrik frekansında 2880 min^{-1} devir sayısı ile dönen test düzeneğinden alınan verilere ait logaritmik ve logaritmik olmayan spektrumlar incelendiğinde 6

numaralı frekans bant aralığında mekanik gevşeklikten kaynaklanan genlik değerinin normal ve ekipman değerinin üstüne çok az bir farkla çıktığı ve yüksek sınırını aşmadığı görülmüştür. Genlik standart sapma değeri incelendiğinde, mekanik gevşeklikten kaynaklanan sinyal değerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Mekanik gevşeklik etkisinden kaynaklanabilecek rotor etkileri 4 numaralı bant aralığı incelendiğinde, normal değer in üzerine çıkan bir değişim gözlenmiştir. 10 ve 12 numaralı diğer bandındaki harmoniklerde düşük de olsa limit aşmaları görülmüştür.

b) Mekanik gevşeklik seviyesi 0,2 mm



(a) Logaritmik görünüm

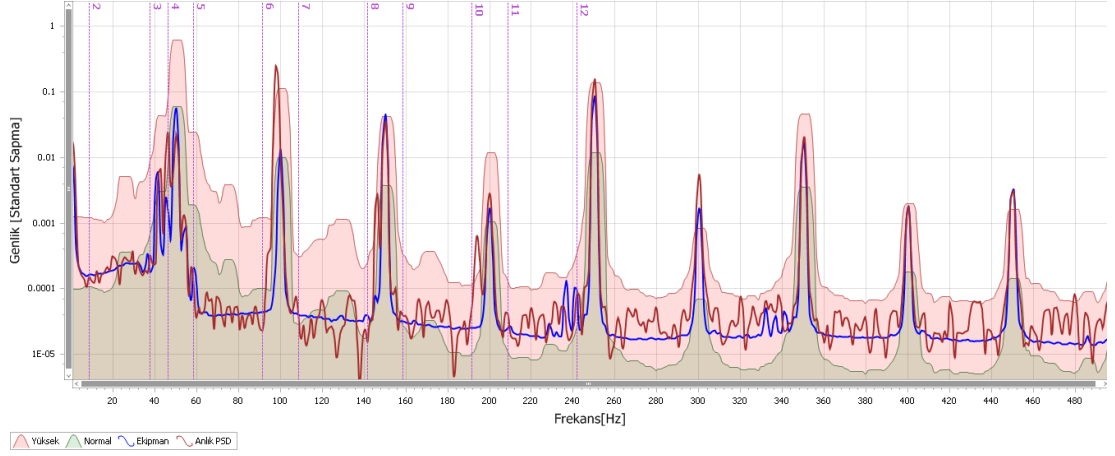


(b) Spektrum görünümü

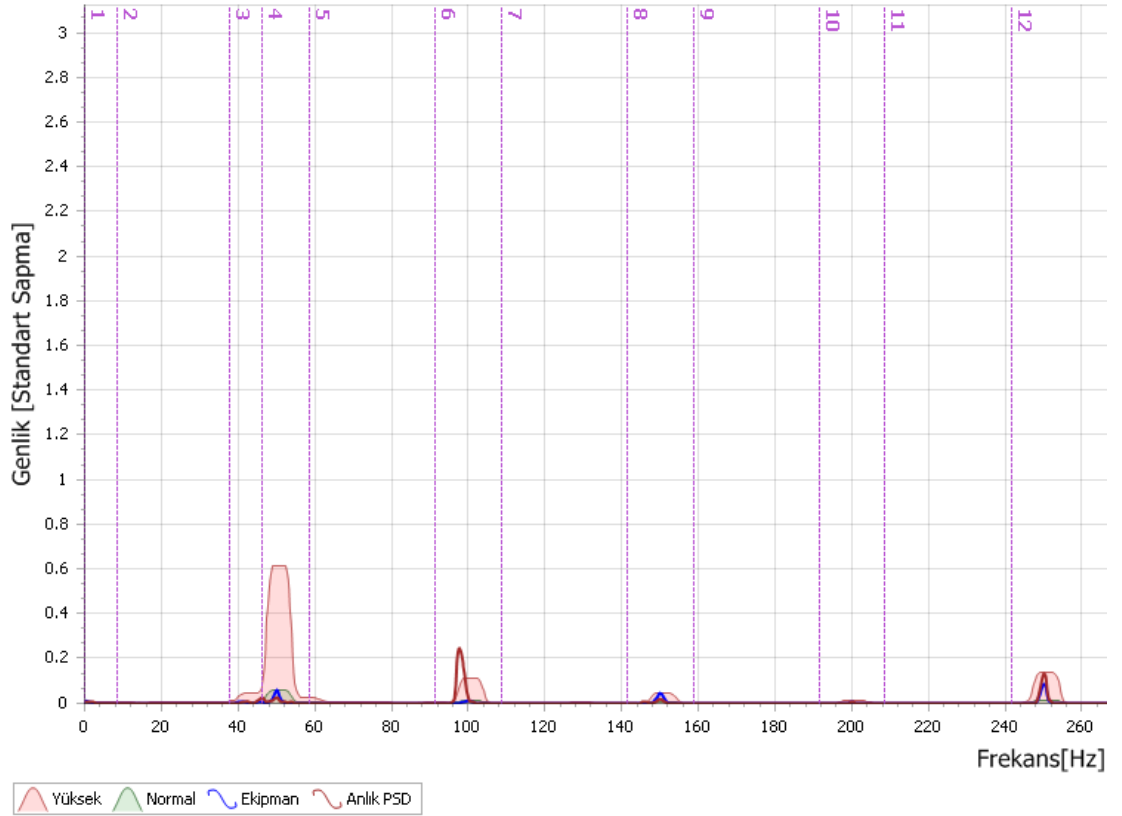
Şekil 4.63: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,2 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri

0,2 mm mekanik gevşeklik seviyesine geçildiğinde, ikinci harmonik 100 Hz frekansındaki sinyalde 0,1 mm seviyesine göre 0,1 değerine doğru bir miktar artış meydana gelmiştir. 10 ve 12 numaralı diğer bantlarındaki bazı harmoniklerdeki sinyal genliklerinde bir miktar normal değer üzerine artışlar olmuştur.

c) Mekanik gevşeklik seviyesi 0,3 mm



(a) Logaritmik görünüm

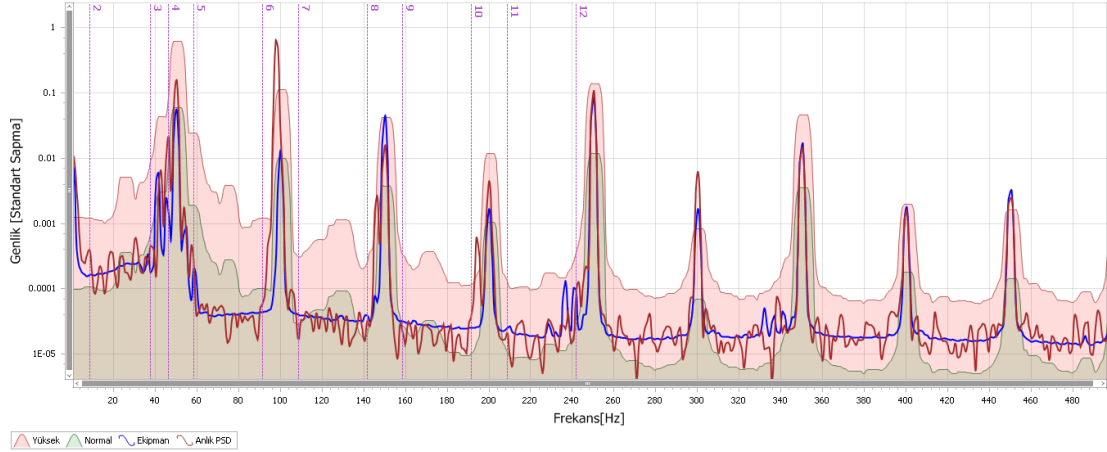


(b) Spektrum görünümü

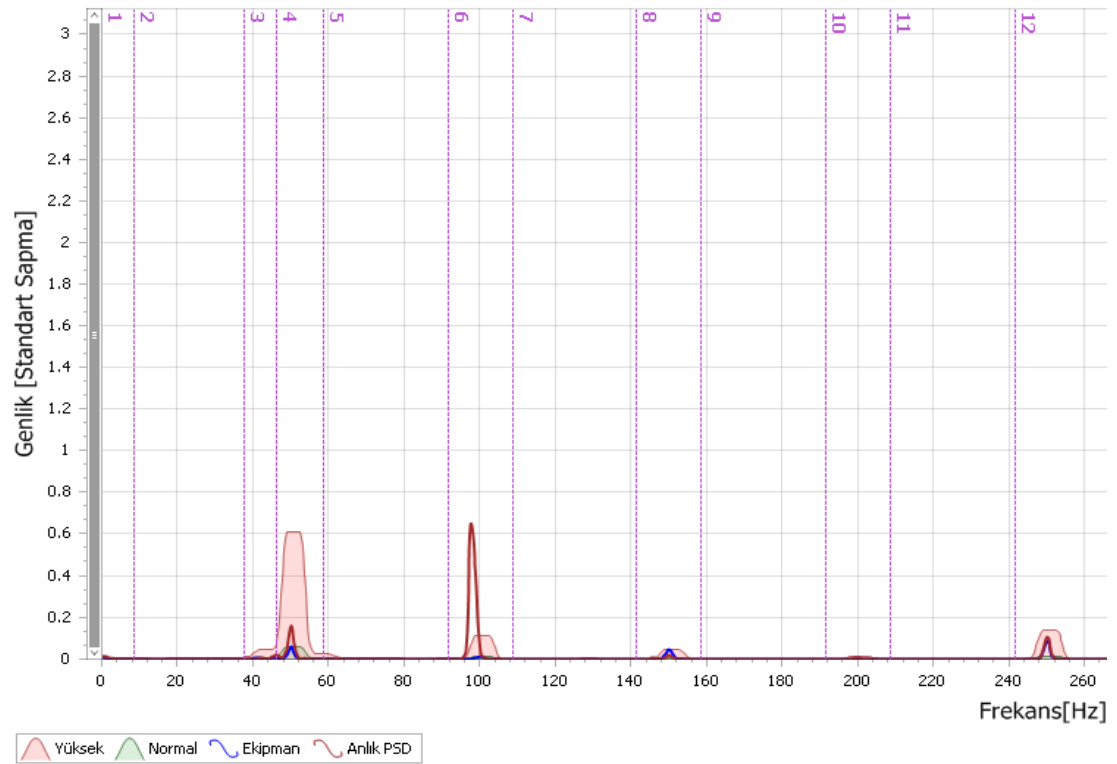
Şekil 4.64: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,3 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri

0,3 mm mekanik gevşeklik seviyesinde temel harmoniğin ikinci katı olan 100 Hz frekansındaki sinyalde bir önceki seviyeye göre artış meydana gelmiş ve standart sapma değeri 0,2 değerinin üzerine çıkmıştır.

d) Mekanik gevşeklik seviyesi 0,4 mm



(a) Logaritmik görünüm



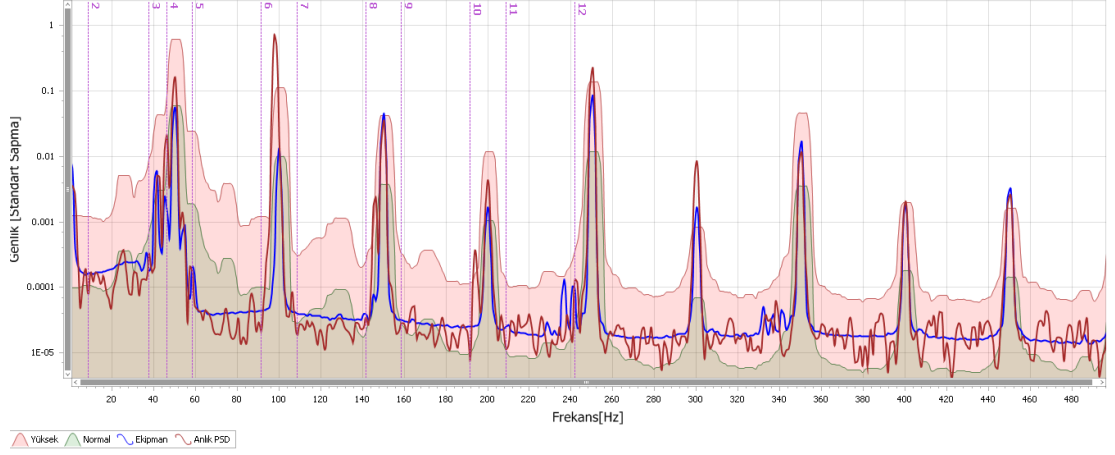
(b) Spektrum görünümü

Şekil 4.65: 2880 min⁻¹ devir sayısında 0,4 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri

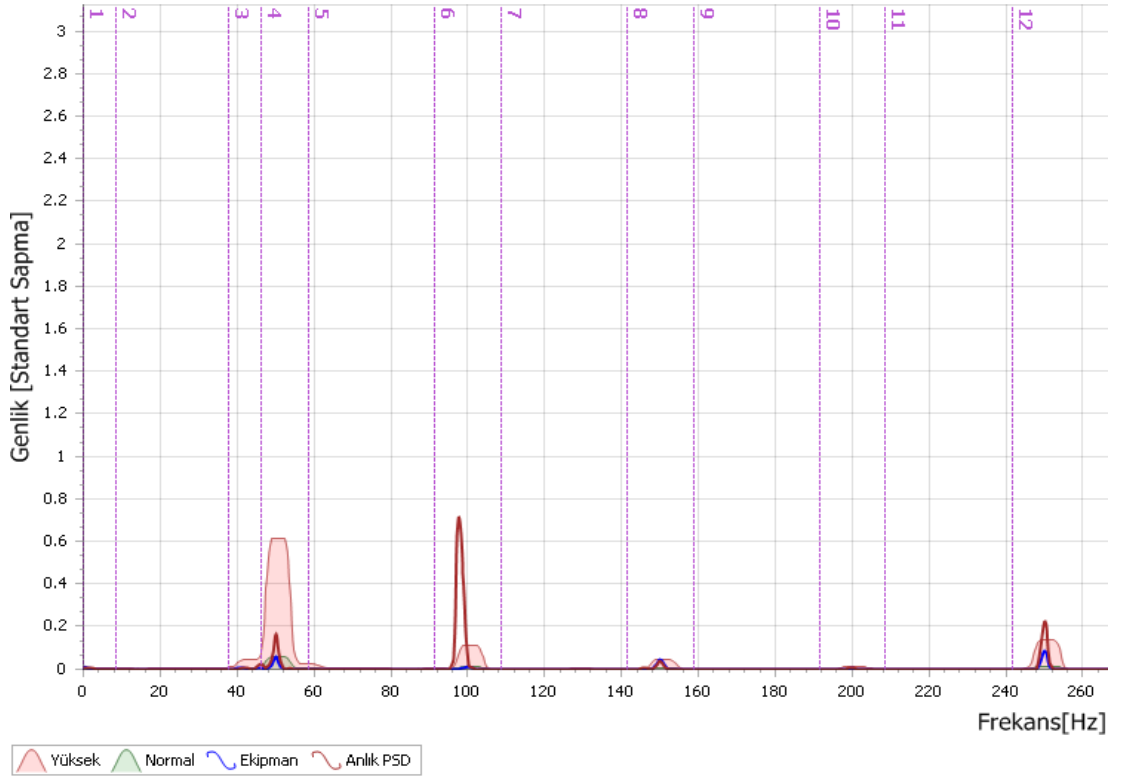
0,4 mm mekanik gevşeklik seviyesinde temel harmoniğin ikinci katı olan 100 Hz frekansındaki sinyal bir önceki seviyeye göre artış meydana gelmiş ve standart

sapma değeri 0,2 - 0,4 aralığındaki değerden 0,6 değerinin üzerine çıkmıştır. 4 numaralı rotor bölgesi harmonik sinyalinde ise normal değerlerin üzerine artış görülmüştür, bu testteki mekanik gevşeklik etkisi rotor üzerindeki zorlanmaların normalin üzerine çıkmaya başladığını göstermektedir.

e) Mekanik gevşeklik seviyesi 0,5 mm



(a) Logaritmik görünüm



(b) Spektrum görünümü

Şekil 4.66: 2880 min^{-1} devir sayısında 0,5 mm mekanik gevşeklik PSD değerleri

0,5 mm mekanik gevşeklik seviyesinde, temel harmoniğin ikinci katı olan 100 Hz frekansındaki standart sapma değerinde 0,4 mm seviyesine göre artış meydana gelmiştir ve standart sapma değeri 0,6 değerinden 0,8 değerine yaklaşmıştır. 4 numaralı rotor bölgesi harmonik sinyalinde ise normal değerın üzerine artış görülmüştür. 0,4 mm mekanik gevşeklik etkisinde görüldüğü gibi bu testteki gevşeklik seviyesinde de rotordaki zorlanmaların normal üzeri seviyeleri çıktığı tespit edilebilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma için önce literatür ve saha araştırması yapılmıştır; teorik ve pratik altyapı kurma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yurt içi, yurt dışından temin edilen mekanik ekipmanlar ve yüksek teknoloji tabanlı elektronik devreler içeren cihazlar ile laboratuvar ortamında uluslararası düzeyde kabul görebilecek bir kestirimci bakım test düzeneği ve durum izleme sistemi kurulmuştur.

Çoğunluğu ön testler olmak üzere yaklaşık bin adet uygulamalı test gerçekleştirilmiştir. Ön testler boyunca ilgili eksiklikler, hatalar tespit edilmiş ve giderilmiştir.

Bu çalışmada titreşim ve elektrik (akım, gerilim) tüketim sinyalleri bazlı iki durum izleme tekniği çalışılmıştır. Elde edilen veriler esas alınarak yapılan analizlere ait sonuçlar testler kapsamındaki teknik koşullar altında geçerlidir. Test edilen elektrik motorunun gücü vb. gibi koşullar değiştiği takdirde titreşim ve elektrik analizleri farklı sonuçlar verebilir. Mekanik kusurlardan balanssızlık, eksen kaçıklığı, mekanik gevşeklik ve rulmanda yağsızlık problemleri çeşitli seviyelerde yapay olarak oluşturulup farklı devir sayılarında veri toplanması ile ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu iki durum izleme tekniğinde titreşim analizi sonuçları ve elektrik tüketim sinyalleri PSD analizi sonuçlarında paralellik tespit edilmiştir. Diğer taraftan, MDİC'ye ait asıl kusur tespit aracı olan trend seyirinde beklenen sonuçlar elde edilemediğinden çalışma sonunda titreşim analizi tekniği daha başarılı bulunmuştur. Tandon vd. [35] ve Han vd. [36] de, uygulamalı hasar tespiti çalışmalarında titreşim analizini elektriksel veri analizine göre daha başarılı bulmuşlardır. Titreşim analizinde incelen kusurların farklı seviyelerde sağlıklı bir şekilde tespit edilebileceği ve elektriksel PSD verilerinin de bu testlerde destekleyici sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Özellikle titreşim verisi toplamanın mümkün olmadığı yerlerde elektrik tüketim verileri üzerinden değerlendirme yapılabilir ve ayrıca elektriksel arızaların tespitinde titreşim analizi değerlendirmelerine destek olabilir. Bu açıdan bakıldığında bu teknikler ayrı ayrı kullanılabilirliği gibi

kompleks arıza tiplerinin tespitinde daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek amacıyla kombine olarak kullanılmalarının daha ayırt edici sonuçlar ortaya koyabileceği düşünülmektedir. Arıza tespiti yapılırken eş zamanlı farklı arıza durumlarının da ortaya çıkabileceği gözönünde bulundurularak veri analizlerinin farklı tekniklerle yapılması hata yapma oranını düşürebilme imkanı sunacaktır.

5.1 Titreşim ve Elektrik Tüketim Analizi Sonuçları

Bu kısımda testlerden elde edilen sonuçların veri tiplerine göre analiz değerlendirilmesi verilmiştir.

5.1.1 Eksen kaçıklığı test sonuçlarının irdelenmesi

Titreşim analizi sonuçlarına göre; gerçekleştirilen tüm testler devir sayısı bazında incelendiğinde, test edilen devir sayısı yükseldikçe en baskın sinyalin üst frekanslardan temel frekansa (1x) doğru yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, test devir sayısı yükseldikçe radyal ve eksenel yön baskın sinyalleri arasındaki farkın azaldığı görülmektedir, düşük devir sayısında eksen kaçıklığı tespiti eksenel yön sinyallerinde radyal yön sinyallerine kıyasla daha iyi netice verirken, devir sayısı yükseldikçe her iki yönde de iyi netice vermeye başlamıştır. RMS değerleri incelendiğinde ise kusur şiddeti ve devir sayısı arttıkça genel olarak RMS değerinin de arttığı görülmüştür, buradan yola çıkarak bozulma, hasar görme şiddetinin de kademeli olarak arttığı söylenebilir. Yağsızlık kusurunun uygulandığı testlerde, sürtünmeden dolayı titreşim genlik seviyeleri arttığından rulman komponentlerinden gelen sinyallerin belirginleşmesine bağlı doğal frekanslarda uyarılmalar ve rezonanslar meydana gelmiştir. Genel olarak bakıldığında rulman frekanslarının uyardığı doğal frekanslardaki titreşim sinyalleri mekanik gevşeklik testlerinde baskın harmonikler arasında daha az görülmüştür, rulman frekanslarından kaynaklanan doğal frekanslar daha çok yağsızlık testlerinde baskın harmonikler arasında yer alırken devir sayısının artmasıyla sayıları yükselmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan testlerde 0.1-0.5 mm aralığı eksen kaçıklığı etkisi paralel kaçıklık belirtileri göstermiştir. Elbhah ve Jyoti [30], balanssızlık ve eksen kaçıklığı kusurlarının titreşim analizi ile başarılı bir şekilde tespit edildiğini belirtmiştir.

Elektrik tüketim analizi sonuçlarına göre; eksen kaçıklığı koşulları oluşturulup testler gerçekleştirildiğinde hassas verilere ulaşılmıştır. Bu verilerle belirlenen koşullar

altında eksen kaçıklığı kusurunun başlangıç testlerinde trend analizi ile tespit edilemediği, ilerleyen testlerde devir sayısı ve kusur seviyesi artışları beraber kısmen tespit edilebildiği ortaya konulmuştur. Bu yetersizliğin anlaşılması üzerine elektriksel PSD analizine geçilmiş ve testlerdeki kusur değişimlerinin elektriksel PSD analizi ile daha hassas ve başarılı olarak tespit edilebildiği görülmüştür.

5.1.2 Mekanik gevşeklik test sonuçlarının irdelenmesi

Titreşim analizi sonuçlarına göre; genel olarak mekanik gevşeklik ve rulmandan kaynaklanan karakteristik sinyaller radyal yönde daha iyi tespit edilirken, eksenel yönde de destekleyici veriler tespit edilmiştir. Mekanik gevşeklik testlerinde 1900 min^{-1} ve 2880 min^{-1} devir sayılarında tipik olarak genel mekanik gevşeklik göstergesi olan en baskın harmonik 2x frekansı olarak gözlemlenirken, 2880 min^{-1} devir sayısında 0,5 mm seviyesindeki kusurda ve 3510 min^{-1} devir sayısında mekanik gevşeklik etkisinin devam etmesiyle beraber en baskın sinyal olarak balanssızlık belirtisi olan temel frekans (1x) gözlemlenmiştir. Sinyal tabloları incelendiğinde tüm frekanslarda üçüncü baskın sinyalden itibaren görülen doğal frekanslardaki sinyallerin belirgin olarak rulman frekanslarının uyarması ile meydana gelmiş olması, rulmanların mekanik gevşeklik kusurundan hasar görmeye yatkın olduğu izlenimi yaratmaktadır.

Elektrik tüketim analizi sonuçlarına göre; mekanik gevşeklik testleri esnasında kusur tespiti trend analiziyle yakalanamamıştır. Elektriksel PSD analizi ile kusur başlangıçları tespit edilebilmiştir.

5.1.3 Balanssızlık test sonuçlarının irdelenmesi

Titreşim analizi sonuçlarına göre; tatbik edilen yük etkisi test edilen tüm devir sayılarında balanssızlık belirtisi olan 1x harmoniğindeki titreşim sinyali genliğini kademeli olarak yükseltirken, eksenel yönde eksen kaçıklığı 2x, 3x harmoniklerindeki sinyal genliklerini yükselttiği görülmüştür. Dönen elemanlarda balanssızlık yani dengesizlik olarak nitelendirilen durumda en ufak sapmanın belirgin olarak farklılıklar meydana getirdiği görülmüştür. Bunun yanında balanssızlık etkisinin var olabilecek eksen kaçıklığı kusurlarının da etkilerini arttıracığı görülmüştür. RMS değerleri de radyal yönde daha kararlı olmak üzere hasar şiddetinin arttığını göstermiştir.

Elektrik tüketim analizi sonuçlarına göre; balanssızlık testleri esnasında kusur tespiti trend analiziyle yakalanamamıştır. Elektriksel PSD analizi ile kusur başlangıçları tespit edilebilmiştir.

5.1.4 Yağsızlık test sonuçlarının irdelenmesi

Titreşim analizi sonuçlarına göre; yağsızlık kusurunun oluşması neticesinde titreşim genliklerinde ve RMS değerlerinde artış tespit edilmiştir. Yağsızlık kusuru altında hem rulman kaynaklı sinyallerin baskınlığında, hem de titreşim genlikleri ve RMS değerlerinde artış meydana gelmiştir. Özellikle rezonans durumunun meydana gelmesinde yağsızlık durumunun etkili olduğu düşünülmektedir.

Elektrik tüketim analizi sonuçlarına göre; yağsızlık testleri esnasında kusur tespiti trend analiziyle yakalanamamıştır. Elektriksel PSD analizi ile kusur başlangıçları tespit edilebilmiştir.

5.2 Genel Sonuç Değerlendirmesi ve Literatüre Özgün Katkıları

Bu çalışma, titreşim analizi ile gerek zaman-bölgesi, gerek frekans-bölgesinde elde edilen veri haritaları ile anlık ya da ileriye dönük kompleks sinyallerin işlenip analiz edilebileceği olgusunu ortaya çıkarmaktadır. Kompleks sinyaller sadece bir arıza ana sebebine dönük sinyale ait Fourier dönüşümü genlik ve frekans ayırımından ibaret değildir; eş zamanlı olarak birden fazla mekanik ya da elektriksel arıza başlangıcının oluşabileceği ve zaman-bölgesi ile frekans-bölgesindeki belirtilerin birbirine karışabileceği aşıkardır. Yanlış teşhis hastayı ölüme götürebileceği gibi dönen mekanik elemanlarda da yaşam döngüsünü kısaltacak maddi kayıplara yol açabilecektir. Bu açıdan araştırma bulgularının ve felsefesinin gelecek çalışmalara ışık tutacağı umulmaktadır. Test bazlı çalışmada, titreşim tekniğine dayalı durum bazlı kestirimci bakım dalgaform ve spektrum verileri ile yağsızlık, balanssızlık, eksen kaçıklığı kusurlarının ve kusur şiddeti değişim etkilerinin teşhis edilebildiği görülmüştür. Trend bazlı elektrik tüketim analizi tekniği ile ise yeterli teşhis başarısı elde edilememiştir ancak anlık elektriksel PSD değerlerindeki değişimlerin izlenmesi başarılı sonuçlar sunmaktadır. Bunun yanında PSD değerlerindeki artış aynı zamanda elektriksel tüketim artışını yansıttığından, arıza ana sebeplerinin elektriksel kayıpları arttırdığı tezini desteklemektedir ve bu açıdan kestirimci bakım yoluyla arıza

gelişimlerinin önüne geçildiğinde kayıplar kısa ve uzun vadede ciddi kazançlara dönüşebilecektir.

Çalışmanın literatüre katkısı açısından değerlendirme yapıldığında benzer çalışmalardan test koşulları, test düzeneği ve tezin amacı yönünden ayrılmaktadır. Doktora düzeyindeki benzer ulusal çalışmalarda ise rulman kusurlarının zamana bağlı olarak gelişiminin incelendiği görülmüştür; bu çalışmada ise durum bazlı izleme teknolojisiyle rulman arızalarına neden olabilecek hasar ana sebeplerindeki hassas değişimlerin incelenmesi öne çıkmaktadır. Ayrıca ulusal düzeydeki benzer doktora çalışmalarından ayrılan önemli bir diğer yönü kestirimci bakım uygulamalarında titreşim analiz tekniği ile elektriksel tüketim analiz tekniğinin karşılaştırılması ve sonuçların irdelenmesi olmuştur. Uluslar arası çalışmalar ile karşılaştırma yapıldığında titreşim analizi ve elektriksel tüketim analizinin karşılaştırılmalı olarak uygulandığı kusur hassaslık seviyeleri ve test düzeneği bileşenlerinin özellikleri açısından ayrılmaktadır. Bu çalışma literatür açısından, test edilen koşullar altında karşılaştırmalı olarak durum bazlı izleme teknolojilerinin hasar ana sebeplerindeki hassas değişimlerin ortaya koyduğu sonuçların tespitinde ve öneminin vurgulanmasında hem akademik hem de sanayi çevrelerine rehberlik edebilecektir. Öneminin vurgulanması ölçüsünde ülkemiz sanayi çevrelerinde ilgili kestirimci bakım uygulamalarının yaygınlaşmasına katkıda bulunabilecektir.

5.3 İleride Yapılabilecek Çalışmalar İçin Öneriler

- Bu çalışma, test bazlı koşullar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Test koşulları değiştirilerek kusur başlangıçlarının etkileri genişletilebilir.
- Rulman tipi değiştirilerek titreşim cevaplarındaki değişim incelenebilir.
- Titreşim analizi verimliliği başka durum izleme teknikleri ile karşılaştırılabilir.
- Farklı motor ve kaplin tipleri kullanılarak farklı kombinasyonlar oluşturulabilir.
- Farklı sensör ve veri işleme teknikleri testlerde kullanılabilir.
- Durum izleme teknikleri, altı sigma ve yalın üretim felsefeleri altında çalışılabilir.

- Toplam kaliteli bakım felsefesi, maliyet muhasebesi açısından optimizasyon teknikleri ile geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] **Hess, A.**, 2002: Prognostics, From the Need to Reality— From the fleet users and PHM System Designer/Developers Perspectives. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, BigSky, MT, USA, **6**, 2791–2797.
- [2] **Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H., and Liao, H.**, 2006: Intelligent prognostics tools and e-maintenance. *Computers in Industry*, **57**, 476-489.
- [3] **Moubray, J.**, 2005: *Reliability Centred Maintenance, 2nd edition*. Butterworth-Heinemann Ltd., Great Britain.
- [4] **Duffuaa, S. O., Ben-Daya, M., Al-Sultan, K. S., and Andijani, A. A.**, 2001: A generic conceptual simulation model for maintenance systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **7(3)**, 207–219.
- [5] **Campos, J.**, 2009: Development in the application of ICT in condition monitoring and maintenance. *Computers in Industry*, **60**, 1–20.
- [6] **Rao, B.K.N.**, 1996: *Handbook of Condition monitoring*, Elsevier, Oxford.
- [7] **Tsang, A. H. C.**, 1995: Condition-based maintenance tools and decision making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **1(3)**, 3–17.
- [8] **Collacott, R.A.**, 1977: *Mechanical Fault Diagnosis*, Chapman&Hall, London, s405.
- [9] **Christer, A.H., Wang, W., Sharp, J.M.**, 1997: A state space condition monitoring model for furnace erosion prediction and replacement. *European Journal of Operational Research*, **101**, 1 –14.
- [10] **Lebold, M., Reichard, K., Boylan, D.**, 2003: Using DCOM in an open system architecture framework for machinery monitoring and diagnostics. *IEEE Aerospace Conference*, 1227–1235.
- [11] **Sudhar, G.N.D.S., Sekhar, A.S.**, 2011: Identification of unbalance in rotor bearing system. *Journal of Sound and Vibration*, **330**, 2299-2313.
- [12] **Goodenow, T., Hardman, W., Karchnak, M.**, 2000: Acoustic emissions in Broadband vibration as an indicator of bearing stress, in: *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, **6**, 95–122.

- [13] **Hardman, W., Hess, A., Sheaffer, A.**, 2000: A helicopter powertrain diagnostics and prognostics demonstration, in: *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, **6**, 355–366.
- [14] **Acosta, G.G., Verucchi, C.J., Gelso, E.R.**, 2006: A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **20**, 953–965.
- [15] **Velarde-Suarez S., Ballesteros-Tajadura R., Hurtado-Cruz J.P.**, 2006: A predictive maintenance procedure using pressure and acceleration signals from a centrifugal fan. *Applied Acoustics*, **67**, 49-61.
- [16] **Tandon, N., Choudhury, A.**, 1999: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, **32**, 469-480.
- [17] **Beards, C.F.**, 1995: *Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems*, London, Hodder Headline PLC.
- [18] **Al-Hussain K.K.**, 2003: Dynamic stability of two rigid rotors connected by a flexible coupling with angular misalignment. *Journal of Sound and Vibration*, 217-234.
- [19] **Sinha, J.K.**, 2002: Health Monitoring Techniques for Rotating Machinery, *Ph.D. Thesis*, University of Wales Swansea (Swansea University), Swansea, UK.
- [20] **Bonnett, A.H., Soukup, G.C.**, 1998: Analysis of rotor failures in squirrel cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **24(6)**, 1124–1130.
- [21] **Siddique, A., Yadava, G.S., Singh, B.**, 2005: A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20(1)**, 106–114.
- [22] **Schoen, R.R., Lin, B.K., Habetler, T.G., Schlag, J.H., Farag, S.**, 1995: An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31(6)**, 1280–1286.
- [23] **Bateman, J.**, 1995: Preventive maintenance: Stand alone manufacturing compared with cellular manufacturing. *Industrial Management*, **37(1)**, 19-21.
- [24] **A. Heng, A., Zhang, S., Tan, A.C.C., Mathew, J.**, 2009: Rotating machinery prognostics: state of the art, challenges and opportunities. *Mech. Syst. Signal Process*, **23**, 724–739.
- [25] **A.K.S. Jardine, A.K.S., Lin, D., Banjevic, D.**, 2006: A review on machinery

diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mech. Syst. Signal Process*, **20**, 1483–1510.

- [26] **Orhan, S., Aktürk, N., and Çelik, V.**, 2006: Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: comprehensive case studies. *NDT&E International*, **39**, 293-298.
- [27] **Karaçay, T., Aktürk, N.**, 2009: Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and spectral methods. *Tribology International*, **42**, 836-843.
- [28] **Kalkat, M. ve Yiğiter, N.**, 2000: Kütle dengesizliğinden kaynaklanan şaft Mekanik titreşimlerinin yapay sinir ağları ile analizi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt **4**, Sayı 1, 51-59.
- [29] **Arslan, H., Aslan, E., ve Aktürk, N.**, 2006: Bilyalı rulman hasarlarının titreşim Analizi yoluyla incelenmesi. *Gazi Univ.Müh.Mim.Fak. Dergisi*, Cilt **21**, No 3, 541-552.
- [30] **Elbhah, K., Jyoti, K.S.**, 2013: Vibration based condition monitoring of rotating machines using a machine composite spectrum. *Journal of Sound and Vibration*, **332**, 2831-2845.
- [31] **Yang J.G., Zhou Y.C.**, 1994: *Internal combustion engine vibration monitoring and fault diagnosis*. Dalian: Dalian Maritime University Press.
- [32] **Bachshimid, N., Pennacchi, P. and Vanai, A.**, 2002: Identification of multiple faults in rotor system. *Journal of Sound and Vibration*, **254(2)**, 327-366.
- [33] **Boskoski, P., Petrovic, J., Musizza, B. And Juricic, B.**, 2010: Detection of Lubrication starved bearings in electrical motors by means of vibration analysis. *Tribology International*, **43**, 1683-1692.
- [34] **Al-Ghamd, A. ve Mba, D.**, 2006: A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **20**, 1537-1571.
- [35] **Tandon, N., Yadava, G.S. and Ramakrishna, K.M.**, 2007: A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**, 244-156.
- [36] **Han, T., Yang, B.S. and Yin, Z.J.**, 2007: Feature based fault diagnosis system of induction motors using vibration signal. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **13**, No. 2, 163-175.
- [37] **Elbhah K. and Sinha J.K.**, 2013: Vibration based condition monitoring of rotating machines using a machine composite spectrum. *Journal of*

Sound and Vibration, **332**, 2831-2845.

- [38] **Hariharan V. and Srinivasan P.**, 2009: Vibration analysis of misaligned shaft-ball bearing system. *Indian Journal of Science and Technology*, **2** No.9, 45-50.
- [39] **Patel T.H. and Darpe A.K.**, 2009: Vibration response of misaligned rotors. *Journal of Sound and Vibration*, **325**, 609-628.
- [40] **Xu, M., Marangoni, R.D.**, 1994: Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance, Part I: theoretical model analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 663–679.
- [41] **Sinha, J.K. Lees, A.W. Friswell, M.I.**, 2004: Estimating unbalance and misalignment of a flexible rotating machine from a single run-down. *Journal of Sound and Vibration*, **272**, 967–989.
- [42] **Randall RB.**, 2004: State of the art in monitoring rotating machinery – Part 1. *Sound Vib. Mag.*;38(3): pp.14–20.
- [43] **Behzad, M., Bestami, A.R.**, 2004: Effect of centrifugal force on natural frequency of lateral vibration of rotating shafts. *Journal of Sound and Vibration* 274, pp.985-995
- [44] **Green, R.B.**, 1948: Gyroscopic effects on the critical speeds of flexible rotors. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 70, pp.369–376.
- [45] **Fearn, R.L., Millsaps, K.T.**, 1967: Constant acceleration of an undamped simple vibrator through resonance. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, pp.567–573.
- [46] **Jimeng, L., Xuefeng, C., Zhengjia, H.**, 2013: Multi-stable stochastic resonance and its application research on mechanical fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration* 332, pp.5999–6015.
- [47] **Littmann, W.E.**, 1969: The mechanism of contact fatigue, in: *P.M.Ku(Ed.), Interdisciplinary Approach to the Lubrication of Concentrated Contacts*, no.NASASP- 237, Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration, pp.309–378.
- [48] **Bai, C.Q., Xu, Q.Y.** 2006: Dynamic model of ball bearing with internal clearance and waviness. *Journal of Sound and Vibration* 294 (1–2), pp.23–48.
- [49] **Lioulios, A.N., Antoniadis, I.A.**, 2006: Effect of rotational speed fluctuations on the dynamic behaviour of rolling element bearings with radial clearances. *International Journal of Mechanical Sciences* 48 (8), pp.809–829.

- [50] **Wang, L.Q., Cui, L., Gu, L.**, 2008: Study on dynamic characteristics of angular ball bearing with non-linear vibration of rotor system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science* 222 (9), pp.1800–1819.
- [51] **Chen, G.**, 2009: Study on nonlinear dynamic response of an unbalanced rotor supported on ball bearing. *ASME Journal of Vibration and Acoustics* 131, pp.1–9.
- [52] **Movchan, A.V., Filatov, V.V.**, 1983: Subharmonic vibrations of a rotor in roller bearings. *Mechanics of Solids* 18 (4), pp.76–78.
- [53] **Lalwani, R.J.**, 1986: Subharmonic vibrations caused by ball bearings, in: *Proceedings of the Third Cairo University MDP Conference*, Cairo University, Cairo, Egypt, pp. 197–202.
- [54] **Ehrich, F.F.**, 1987: High order subharmonic response of high speed rotors in bearing clearance. *American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division 2* (1), pp.167–174.
- [55] **Ji, J.C., Leung, A.Y.T.**, 2003: Non-linear oscillations of a rotor-magnetic bearing system under super harmonic resonance conditions. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 38, pp.829–835.
- [56] **Agaston, K.**, 2014: Fault detection with vibration transducers. *Procedia Technology* 12, pp.119 – 124.
- [57] **Forbes, G., Randall, R.**, 2012: Estimation of turbine blade frequencies from casing pressure and vibration measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing* 36, pp.549–561.
- [58] **Kostek, R.**, 2013: Analysis of the primary and superharmonic contact resonances-Part 1. *Journal Of Theoretical and Applied Mechanics* 51, 2, pp. 475-486, Warsaw.
- [59] **Kıral, Z.**, 2002: Simulation and Analysis of Vibration Signals Generated by Rolling Element Bearings with Defects, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [60] **Orhan, S.**, 2002: Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analizi ile Kestirimci Bakımı, *Doktora Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi.
- [61] **Arslan, H.**, 2003: Şaft Rulman Sistemindeki Bilyalı Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi Metodu ile Tespiti, *Doktora Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi.
- [62] **Karaçay, T.**, 2006: Açısal Temaslı Rulmanlarla Yataklanmış Şaftların Dinamiği ve Rulman Hatalarının Deneysel Analizi, *Doktora Tezi*,

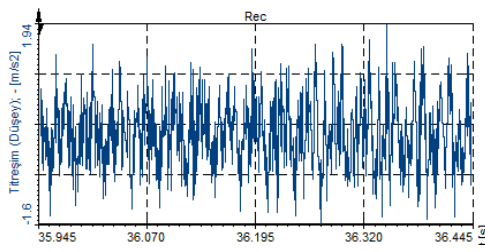
Gazi Üniversitesi.

- [63] **Fidlin, A.**, 2006: *Non linear Oscillations in Mechanical Engineering*, Springer, The Netherlands, p.24.
- [64] **FAG Rulman Kataloğu**, 2007: 192 Sayfa, 4 Nokta Grafik Matbaacılık.
- [65] **Bevilacqua M. And Braglia M.**, 2000: The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, **70**, 71-83.
- [66] **Mobley, R.K.**, 2002: *An Introduction to Predictive Maintenance*. Woburn, Ma, USA.
- [67] **Engür A.İ.**, 2007: Kestirimci Bakımda Titreşim Analizi. *Mühendis ve Makina*, Cilt **48**, Sayı 570, Sayfa 27-31, 2007.
- [68] **Köse R.K.**, 2004: Makine arızalarının belirlenmesinde titreşim analizi. *Mühendis ve Makine*, Cilt **45**, Sayı 538, 24-32.
- [69] **Mortada, M.A., Yacout. S., and Lakis, A.**, 2011: Diagnosis of rotor bearings using logical analysis of data. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **17**, No.14, 371-297.
- [70] **Liu, Y., Guo, L., Wang, Q., An, G., Guo, M., Lian, H.**, 2010: Application to induction motor faults diagnosis of the amplitude recovery method combined with FFT. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **24(8)**, 2961–2971.
- [71] **Lebold, M., McClintic, K., Campbell, R., Byington, C. And Maynard, K.**, 2000: Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics. *Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia Beach, VA, May 1-4, p. 623-634.
- [72] **Kalyoncu M.**, 2006: Titreşim Analizi ile Makine Elemanları Arızalarının Belirlenmesi. *Mühendis ve Makina*, Cilt **47**, Sayı 552, Sayfa 28-35.
- [73] **Adams, M.**, 2001: *Rotating Machinery Vibration*. New York, Marcel Dekker Inc.
- [74] **Skf Aptitude Exchange Newsletter**, 2003: Bearing lubrication. *SKF Reliability Systems*, **25**.

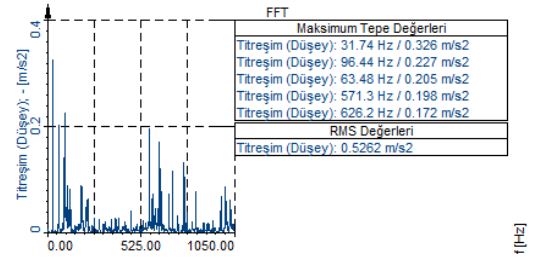
EKLER

EK (A)

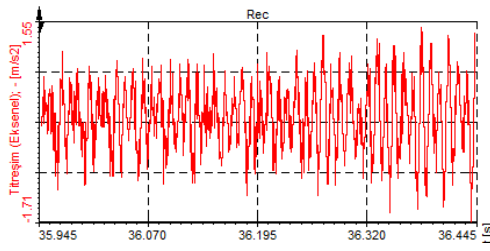
a) 1900 min⁻¹ devir sayısında referans verileri (T1)



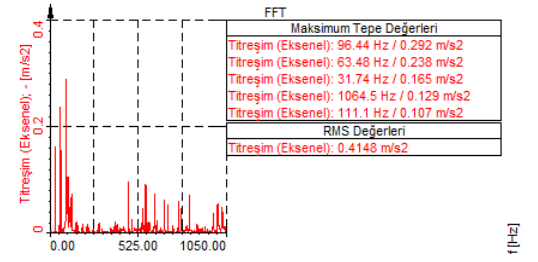
(a) Düşey yön dalgaform grafiği



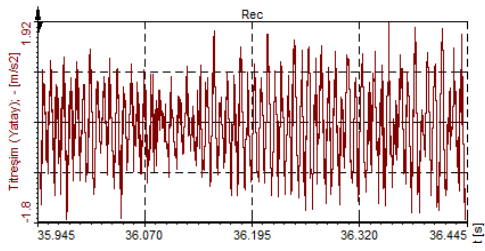
(b) Düşey yön spektrum grafiği



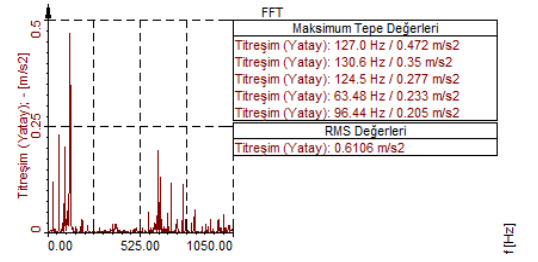
(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



(d) Eksenel yön spektrum grafiği



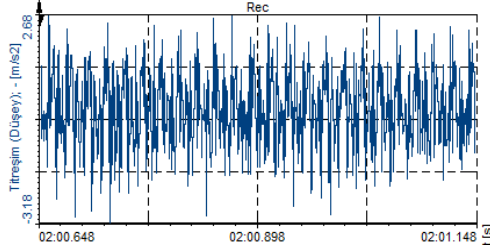
(e) Yatay yön dalgaform grafiği



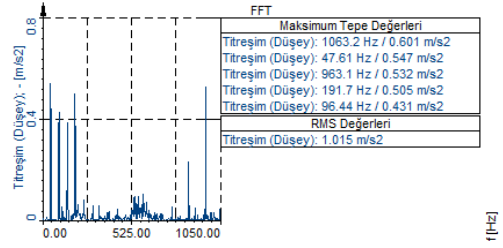
(f) Yatay yön spektrum grafiği

Şekil A.0.1: 1900 min⁻¹ devir sayısında referans titreşim verileri

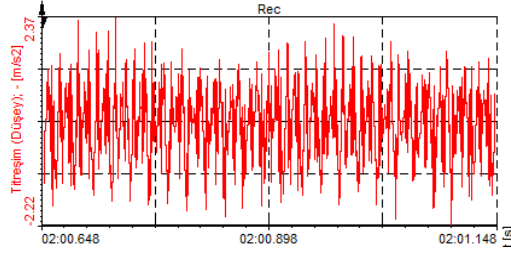
b) 2880 min⁻¹ devir sayısında referans verileri (T2)



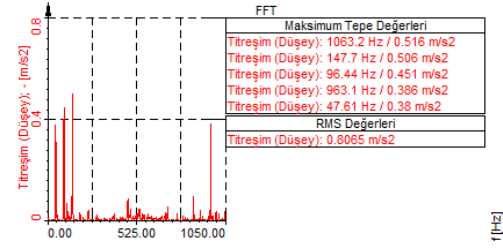
(a) Düşey yön dalgaform grafiği



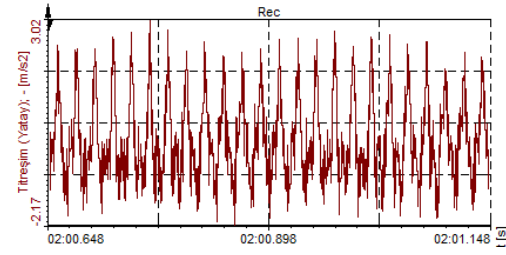
(b) Düşey yön spektrum grafiği



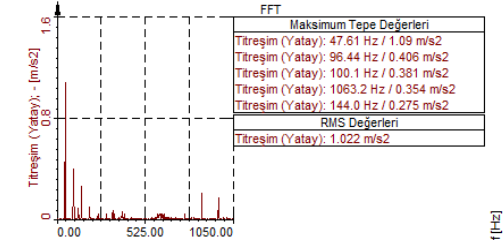
(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



(d) Eksenel yön spektrum grafiği



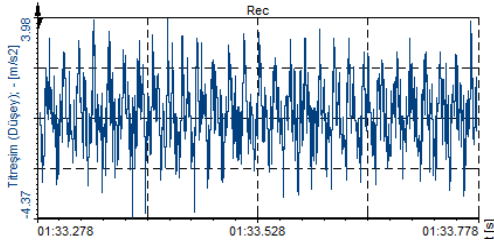
(e) Yatay yön dalgaform grafiği



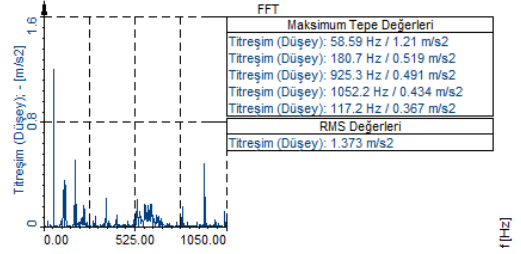
(f) Yatay yön spektrum grafiği

Şekil A.0.2: 2880 min⁻¹ devir sayısında referans titreşim verileri

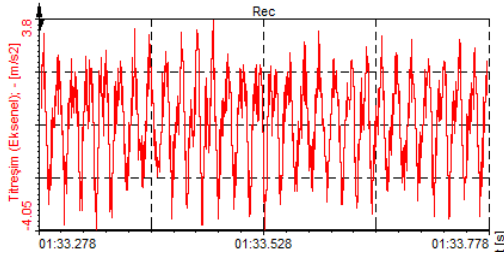
c) 3510 min⁻¹ devir sayısında referans verileri (T3)



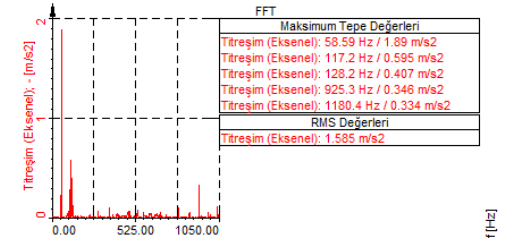
(a) Düşey yön dalgaform grafiği



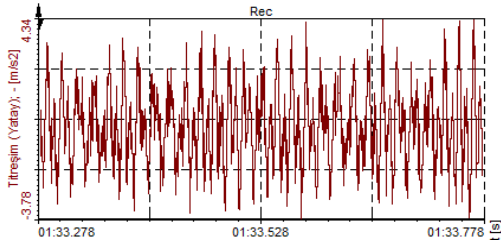
(b) Düşey yön spektrum grafiği



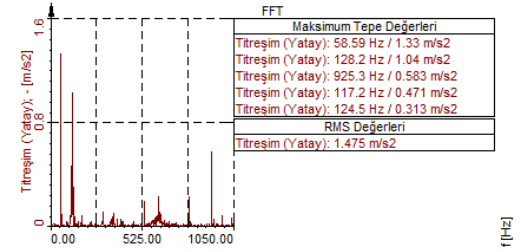
(c) Eksenel yön dalgaform grafiği



(d) Eksenel yön spektrum grafiği



(e) Yatay yön dalgaform grafiği



(f) Yatay yön spektrum grafiği

Şekil A.0.3: 3510 min⁻¹ devir sayısında referans titreşim verileri

(EK B) Arıza frekanslarıTablo B.1: 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devirlerinde arıza frekansları

Kat	1900 min ⁻¹						2880 min ⁻¹						3510 min ⁻¹					
	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}
1	12,06	96,49	157,44	62,32	31,74	317,4	19	152	248	98,16	47,61	476,1	24,24	193,95	316,45	125,26	58,59	585,9
2	24,12	192,98	314,88	124,64	63,48	634,8	38	304	496	196,3	95,22	952,2	48,48	387,90	632,90	250,52	117,18	1172
3	36,18	289,47	472,32	186,96	95,22	952,2	57	456	744	294,5	142,8		72,72	581,85	949,35	375,78	175,77	
4	48,24	385,96	629,76	249,28	126,96		76	608	992	392,6	190,4		96,96	775,80		501,04	234,36	
5	60,30	482,45	787,2	311,6	158,7		95	760	1240	490,8	238,1		121,2	969,75		626,30	292,95	
6	72,36	578,94	944,64	373,92	190,44		114	912		589	285,7		145,44	1163,70		751,56	351,54	
7	84,42	675,43	1102,08	436,24	222,18		133	1064		687,1	333,3		169,68			876,82	410,13	
8	96,48	771,92		498,56	253,92		152	1216		785,3	380,9		193,92			1002,08	468,72	
9	108,54	868,41		560,88	285,66		171			883,4	428,5		218,16			1127,34	527,31	
10	120,60	964,9		623,2	317,4		190			981,6	476,1		242,4			125,26	585,90	
11	132,66	1061,39		685,52	349,14		209			1080	523,7		266,64			125,26	644,49	
12	144,72	1157,88		747,84	380,88		228			1178	571,3		290,88			250,52	703,08	
13	156,78	1254,37		810,16	412,62		247				618,9		315,12			375,78	761,67	
14	168,84	1350,86		872,48	444,36		266				666,5		339,36			501,04	820,26	
15	180,90	1447,35		934,8	476,1		285				714,2		363,6			626,30	878,85	
16	192,96	1543,84		997,12	507,84		304				761,8		387,84			751,56	937,44	
17	205,02	1640,33		1059,44	539,58		323				809,4		412,08			876,82	996,03	
18	217,08			1121,76	571,32		342				857		436,32			1002,08	1054,62	
19	229,14				603,06		361				904,6		460,56			1127,34	1113,21	
20	241,20				634,8		380				952,2		484,8				1171,80	

Tablo B,1: (devam) 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devirlerinde arıza frekansları

Kat	1900 min ⁻¹						2880 min ⁻¹						3510 min ⁻¹					
	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bphi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bphi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bphi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}
21	253,26				666,54		399				999,8		509,04				1230,39	
22	265,32				698,28		418				1047		533,28					
23	277,38				730,02		437				1095		557,52					
24	289,44				761,76		456				1143		581,76					
25	301,50				793,5		475				1190		606					
26	313,56				825,24		494				1238		630,24					
27	325,62				856,98		513						654,48					
28	337,68				888,72		532						678,72					
29	349,74				920,46		551						702,96					
30	361,80				952,2		570						727,2					
31	373,86				983,94		589						751,44					
32	385,92				1015,68		608						775,68					
33	397,98				1047,42		627						799,92					
34	410,04				1079,16		646						824,16					
35	422,10				1110,9		665						848,4					
36	434,16				1142,64		684						872,64					
37	446,22						703						896,88					
38	458,28						722						921,12					
39	470,34						741						945,36					
40	482,40						760						969,6					
41	494,46						779						993,84					
42	506,52						798						1018,08					
43	518,58						817						1042,32					
44	530,64						836						1066,56					
45	542,70						855						1090,8					

Tablo B,1: (devam) 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devirlerinde arıza frekansları

Kat	1900 min ⁻¹						2880 min ⁻¹						3510 min ⁻¹					
	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}
46	554,76						874						1115,04					
47	566,82						893						1139,28					
48	578,88						912						1163,52					
49	590,94						931						1187,76					
50	603,00						950						1212					
51	615,06						969						1236,24					
52	627,12						988											
53	639,18						1007											
54	651,24						1026											
55	663,30						1045											
56	675,36						1064											
57	687,42						1083											
58	699,48						1102											
59	711,54						1121											
60	723,60						1140											
61	735,66						1159											
62	747,72						1178											
63	759,78						1197											
64	771,84						1216											
65	783,90						1235											
66	795,96																	
67	808,02																	
68	820,08																	

Tablo B.1: (devam) 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devirlerinde arıza frekansları

Kat	1900 min ⁻¹						2880 min ⁻¹						3510 min ⁻¹					
	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bphi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bphi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bphi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}
69	832,14																	
70	844,20																	
71	856,26																	
72	868,32																	
73	880,38																	
74	892,44																	
75	904,50																	
76	916,56																	
77	928,62																	
78	940,68																	
79	952,74																	
80	964,80																	
81	976,86																	
82	988,92																	
83	1000,98																	
84	1013,04																	
85	1025,10																	
86	1037,16																	

Tablo B.1: (devam) 1900 min⁻¹, 2880 min⁻¹ ve 3510 min⁻¹ devirlerinde arıza frekansları

Kat	1900 min ⁻¹						2880 min ⁻¹						3510 min ⁻¹					
	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}	ω_c	ω_{bpfo}	ω_{bpfi}	ω_{bsf}	ω_s	ω_{bpf}
87	1049,22																	
88	1061,28																	
89	1073,34																	
90	1085,40																	
91	1097,46																	
92	1109,52																	
93	1121,58																	
94	1133,64																	
95	1145,70																	
96	1157,76																	
97	1169,82																	
98	1181,88																	
99	1193,94																	
100	1206,00																	
101	1218,06																	
102	1230,12																	
103	1242,18																	

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Salih Seçkin EROL

Doğum Yeri ve Tarihi: Afyonkarahisar - 1976

Yabancı Dil: İngilizce (KPDS: 86,25 - 2012 ; IELTS Academic: 6,5 - 2007)

Adres: Asmalevler Mh. Şehit Pilot Teğmen İbrahim Öztürk Cd. No: 8 / Denizli

Doktora Araştırma / Üniversite: Makine Mekaniği / Ferrara Üniversitesi - İtalya

Yüksek Lisans / Üniversite: Toplam Kaliteli Bakım / Vaxjö (Linnaeus) Üniversitesi - İsveç

Lisans / Üniversite: A. Endüstri Mühendisliği / Hacettepe Üniversitesi - Ankara

Lise: Sekine Evren Anadolu Lisesi - Salihli/Manisa

Yayın Listesi:

*SCI_e

Erol, S.S., Meran, C., 2014: Tribological Approach on Electrical Consumption and Vibration Response of Experimental Misalignment and Unbalance Failure Modes, *Journal of the Balkan Tribological Association*. (Basımda)

*Diğer Yayınlar

Meran, C., **Erol, S.S.**, 2009: Türkiye’de ve Dünya’da Bakım Mühendisliği Eğitimi–Önemi, *IV. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, Denizli , 22-24 Ekim.

Meran, C., **Erol, S.S.**, 2009: Türkiye’de ve Dünya’da Bakım Mühendisliği Eğitimi–Önemi, *Makine Mühendisleri Odası Aylık Yayın Organı - Mühendis ve Makine*, cilt: **50**, sayı: 598, s.45-48.

Meran, C., Güngör, A., Gültekin E., **Erol, S.S.**, 2009: Bakım Alanında Anahtar Performans Göstergelerinin (APG) Kullanımı, *IV. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, Denizli , 22-24 Ekim.

Editörlük:

Meran, C., **Erol, S.S.**, 2012: *XIV. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı*, Denizli.