KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

DİŞLİ KUTULARININ BLOK İÇİ VE BLOK DIŞI ETMENLİ ARIZA HALLERİNİN AUTOSPECTRUM ÜZERİNDEN BELİRLENMESİ

ALİ İHSAN ENGÜR

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

DİŞLİ KUTULARININ BLOK İÇİ VE BLOK DIŞI ETMENLİ ARIZA HALLERİNİN AUTOSPECTRUM ÜZERİNDEN BELİRLENMESİ

ALİ İHSAN ENGÜR

Prof. Dr. Sedat KARABAY
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. İsmail CÜRGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Recep KOZAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Aysun EĞRİSÖĞÜT TİRYAKİ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.02.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünyada Endüstri 4.0 kapsamında gerçekleşen 4. Endüstri devriminde tüm AR-GE çalışmaları akıllı sistemlere yönelmiştir. Bakım sistemlerinde ise arızanın oluşmadan önce tahmini, işletmelerin bakım maliyetlerini azaltması ve kritik duruşların önlenmesi açısından çok önemli bir konuma gelmiştir.

Öncelikle bana bu konuda çalışma fırsatı veren ve her daim desteğini yanımda hissettiğimdanışman hocam; sayın Prof. Dr. Sedat KARABAY'a, çalışmamı farklı bir vizyondan irdelememi sağlayan sayın Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e, Titreşim konusundaki engin bakış açısı ile çalışmama ışık tutan sayın Prof.Dr. Recep KOZAN'a ve daha lisans derslerinde makine kavramını en ince ayrıntısı ile hayatıma kazıyan sayın hocam Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm bu çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen sevgili eşim Selda ENGÜR'e ve yaşam kaynağım canım kızım Sim Ada ENGÜR'e sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Şubat - 2017 Ali İhsan ENGÜR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 6
1.1. Kestirimci Bakıma Genel Bakış 6
1.2. Sistemde İncelenecek Karakterlere Genel Bakış 8
1.2.1. Titreşim ölçümleri 8
1.2.1.1. Ölçülebilen karakteristiklerin tanımlamaları 8
1.2.1.2. Yönüne göre ölçüm yöntemleri 9
1.2.2. Kullanılan cihazlarla bulunabilecek arızalara genel bakış 9
1.2.2.1. Yüksek eksenel ölçüm seviyeleri 9
1.2.2.2. Arıza çeşitleri 10
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 18
3. MALZEME VE YÖNTEMLER 21
3.1. Deneylerde Kullanılacak Sistemlerin Tasarımı 21
3.1.1. Sistem 1 21
3.1.2. Sistem 2 22
3.1.3. Sistem 3 24
3.1.4. Sistem 4 25
3.2. Portatif İzleme Programında Kullanılan Sensörler 26
3.3. Titreşim Ölçüm Cihazları 28
3.4. Kullanılan Metodlar 28
3.4.1. Taguchi metodu 28
3.4.2. Regresyon analizi 29
3.4.3. Yapay sinir ağları 30
3.4.4. Autospectrum grafikleri 31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 33
4.1. Kurulan Sistemlere Verilen Arızalar 33
4.2. Sistemler Üzerinde Hasar Verilerek Sistemlerde Titreşim Miktarlarının Değiştirilmesi 37
4.3. Sistem 1 İçin Ölçülen Değerler 40
4.3.1. Rulman 1 arızası sonucu alınan deney sonuçları 41
4.3.2. Rulman 2 arızası sonucu alınan deney sonuçları 41
4.3.3. Kaplin arızası sonucu alınan deney sonuçları 42
4.3.4. Dişli kutusu arızası sonucu alınan deney sonuçları 42
4.3.5. SPSS programı ile pearson kolerasyonu ve regresyon analizi 43
4.4. Sistem 1 İçin Hesaplamalar 45
4.4.1. Sistem 1 için L8 tablosu ve sonuçların etkileri 50

4.5. Sistem 2 İçin Ölçülen Değerler 51
4.5.1. Rulman 1 arızası sonucu alınan deney sonuçları 51
4.5.2. Rulman 2 arızası sonucu alınan deney sonuçları 52
4.5.3. Kaplin arızası sonucu alınan deney sonuçları 53
4.5.4. Dişli kutusu arızası sonucu alınan deney sonuçları 53
4.5.5. SPSS programı ile regresyon analizi 55
4.6. Sistem 2 İçin Hesaplamalar 56
4.6.1. Sistem 2 için L8 tablosu ve sonuçların etkileri 60
4.7. Sistem 3'de Rulmana Bilya Arızası Verilmişken Taguchi İle Deney Tasarımı 61
4.7.1. Rulman 1 arızası sonucu alınan deney sonuçları 61
4.7.2. Rulman 2 arızası sonucu alınan deney sonuçları 62
4.7.3. Kaplin arızası sonucu alınan deney sonuçları 63
4.7.4. Dişli kutusu arızası sonucu alınan deney sonuçları 63
4.7.5. SPSS programı ile regresyon analizi 65
4.8. Sistem 3 İçin Hesaplamalar 66
4.8.1. Sistem 3 için L8 tablosu ve sonuçların etkileri 71
4.9. Dişli Kutularında Hareketin Yönü Değiştirilirse Alınacak Sonuçlar 72
4.9.1. Dişli arızası durumunda regresyon analizi 73
4.10. Yapay Sinir Ağları İle Bulunan Sonuçların İspatı 75
4.10.1. Yapay sinir ağları kullanılarak yapılan deneyin algoritması 75
4.10.2. Yapay sinir ağları ile yapılan deneyin ispatı 76
4.11. Auto Spectrum Grafikleri ve yorumlamaları
4.11.1. FFT grafiklerinde frekans-amplitüd karşılaştırmaları 78
4.11.2. Alınan ölçümler sonucunda oluşturulan spectrum grafiklerinde trend analizine örnekler 83
4.12. Ölçülen Değerler ile Hesaplanan Değerlerin Grafik Karşılaştırmaları 92
4.12.1. Dişli kutusu arızalıyken rulmanlardan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırması 92
4.12.2. Birinci rulman arızalıyken ikinci rulmandan dişli kutusundan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırılması 94
4.12.3. İkinci rulman arızalıyken birinci rulmandan dişli kutusundan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırılması 95
4.12.4. Kaplin arızalıyken birinci rulmandan, dişli kutusundan ve ikinci rulmandan alınan ölçümlerin karşılaştırılması 97
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 99
KAYNAKLAR 102
EKLER 106
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 121
ÖZGEÇMİŞ 122

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Makinelerin sınıflandırılması. 6
Şekil 1.2. FFT dönüşümü. 7
Şekil 1.3. Dinamik balanssızlık çeşitleri 10
Şekil 1.4. Statik Balans 11
Şekil 1.5. FFT Dönüşümünde balanssızlığın 1 X RPM'de ortaya çıkması 11
Şekil 1.6. Balanssızlık random grafiği 12
Şekil 1.7. GBM Makine arşivinden sanayide karşılaşılan, yatay düzlemde enine hareket eden bir dikey motordaki salınımı gösteren balanssızlık düzlemi 12
Şekil 1.8. Örnek bir rulman arızası trend grafiği 13
Şekil 1.9. Kaplin ayarsızlığında eksenel-radyal titreşim farkı 17
Şekil 2.1. Yimin Zhan, Viliam Makis tarafından kurulan test düzeneği 18
Şekil 3.1. Deneylerimizde kullanılmak üzere kullanılan 1 nolu deney seti 21
Şekil 3.2. Deneylerimizde kullanılmak üzere kullanılan 2 nolu deney seti 22
Şekil 3.3. Deneylerimizde kullanılmak üzere kullanılan 3 nolu deney seti 24
Şekil 3.4. Deneylerimizde kullanılmak üzere kullanılan 4 nolu deney seti 25
Şekil 3.5. Regresyon analizinde gözlem yapılan değer ile gerçek değer arasındaki ilişki 30
Şekil 4.1. Sistem 1 için ölçüm alınan noktalar 33
Şekil 4.2. Sistem 1'e SKF markalı cihazımızın bağlı hali ve cihazın konumu 34
Şekil 4.3. Sistem 2 için ölçüm alınan noktalar 34
Şekil 4.4. Sistem 3 için ölçüm alınan noktalar 35
Şekil 4.5. Sistem 4 için ölçüm alınan noktalar 36
Şekil 4.6. Sistem 1 dişlisine verilen hasar 37
Şekil 4.7. Dişin hasar verilmiş hali 38
Şekil 4.8. Sistem 3'deki rulman arızası 38
Şekil 4.9. Sistem 3'deki dişli arızası 39
Şekil 4.10. Kaplin arızası 40
Şekil 4.11. Farklı frekans aralıklarında oluşturulan arıza trend analizi 55
Şekil 4.12. Farklı frekanslar için trend analizi 65
Şekil 4.13. Dişli arızası sonrasında dönme esnasındaki basınç değişimleri 72
Şekil 4.14. Arıza verilerek yok edilen dişin ölçüleri 73
Şekil 4.15. Yapay sinir ağları kullanırak yapılan deneyin algoritması 75
Şekil 4.16. 20 Hz orijin spektrum grafiği 78
Şekil 4.17. 20 Hz dişliye hasar verilmişken alınan spektrum grafiği 79
Şekil 4.18. 20 Hz orijin spektrum grafiği 80
Şekil 4.19. 20 Hz 1 nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spektrum grafiği 80
Şekil 4.20. 20 Hz 1 nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spektrum grafiği birinci trend analizi 81
Şekil 4.21. 20 Hz 1 nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spektrum grafiği ikinci trend analizi 82

Şekil 4.22. 40 Hz 1 nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spektrum grafiği trend analizi 83
Şekil 4.23. 40 Hz dişliye hasar verilmişken alınan spektrum grafiği trend analizi 84
Şekil 4.24. 40 Hz 1 nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spektrum grafiği trend analizi 85
Şekil 4.25. Kaplin kaçıklığı verilmişken yüksek frekans güdümlü faz denemesi 86
Şekil 4.26. Kaplin kaçıklığındaki faz farkı 86
Şekil 4.27. Sistem 50 Hz'de çalışırken roller'ımıza uyguladığımız sürtünme ile yük oluşturma 87
Şekil 4.28. Roller'ın çalışma frekansında roller'ın girişinden alınan ölçüm 88
Şekil 4.29. Kaplin kaçıklığı varken alınan spektrum ölçümü 88
Şekil 4.30. Kaplin kaçıklığı varken çalışma frekansındaki genlik artışı 89
Şekil 4.31. 500 Hz'e kadar öğretilmiş spektrum grafiği 90
Şekil 4.32. 20-40 Hz arası kaplin kaçıklığı 91
Şekil 4.33. Dişli kutusu arızalıyken 1. rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 92
Şekil 4.34. Dişli kutusu arızalıyken 2. rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 92
Şekil 4.35. Dişli kutusu arızalıyken kaplinden alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 93
Şekil 4.36. 1. rulman arızalıyken 2. rulmandan alınan ölçümün Hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 94
Şekil 4.37. 1. rulman arızalıyken kaplinden alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 94
Şekil 4.38. 1. rulman arızalıyken dişli kutusundan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 95
Şekil 4.39. 2. rulman arızalıyken 1. rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 95
Şekil 4.40. 2. rulman arızalıyken kaplinden alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 96
Şekil 4.41. 2. rulman arızalıyken dişli kutusundan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 96
Şekil 4.42. Kaplin arızalıyken 2. Rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 97
Şekil 4.43. Kaplin arızalıyken 2. Rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 97
Şekil 4.44. Kaplin arızalıyken dişli kutusundan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması 98

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Titreşim kaynağına göre ölçüm yönü ve faz ilişkisi 10
Tablo 1.2. Örnek kontrol tablosu..... 16
Tablo 1.3. Kaplin kaçıklığı testi 16
Tablo 3.1. SKF 20 mA ivme ölçerin genel özellikleri..... 27
Tablo 3.2. B&K 4366 model ivmeölçer sensörün genel özellikleri 27
Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan, SKF marka titreşim ölçer cihazının özellikleri..... 28
Tablo 3.4. Deneylerde kullanılan Bruel&Kjaer titreşim ölçer cihazın özellikleri..... 28
Tablo 4.1. Rulman 1 arızası sonucunda alınan deney sonuçları..... 41
Tablo 4.2. Rulman 2 arızası sonucunda alınan deney sonuçları..... 41
Tablo 4.3. Kaplin arızası sonucu alınan deney sonuçları 42
Tablo 4.4 Dişli arızası sonucu alınan deney sonuçları 42
Tablo 4.5. X bağımlı değişkeni ile Xo bağımsız değişkeni arasındaki ilişkiyi gösteren pearson kolerasyon tablosu..... 43
Tablo 4.6. X bağımlı değişkeni ile A bağımsız değişkenler arasındaki İlişkiyi gösteren pearson kolerasyon tablosu 43
Tablo 4.7. X bağımlı değişkeni ile Ao bağımsız değişkenler arasındaki İlişkiyi gösteren pearson kolerasyon tablosu 44
Tablo 4.8. X bağımlı değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki katsayıyı regresyon analizi ile tayin etme 45
Tablo 4.9. Taguchi metodu ile deney tasarımı 48
Tablo 4.10. Taguchi metodu L8 tablosu..... 50
Tablo 4.11. Rulman 1 arızası sonucunda alınan deney sonuçları..... 51
Tablo 4.12. Rulman 2 arızası sonucunda alınan deney sonuçları..... 52
Tablo 4.13. Kaplin kaçıklığı varken alınan deney sonuçları 53
Tablo 4.14. Dişli kutusu arızası varken alınan deney sonuçları 54
Tablo 4.15. Taguchi metodu ile deney tasarımı 58
Tablo 4.16. Taguchi metodu L8 tablosu..... 60
Tablo 4.17. Rulman 1 arızalıyken alınan sonuçlar 61
Tablo 4.18. Rulman 2 arızalı iken alınan sonuçlar 62
Tablo 4.19. Kaplin arızası sonucu alınan deney sonuçları 63
Tablo 4.20. Dişli kutusu arızası varken alınan sonuçlar..... 64
Tablo 4.21. Taguchi metodu ile deney tasarımı 69
Tablo 4.22. Taguchi metodu L8 tablosu..... 71
Tablo 4.23. Dişli arızası oluşturduktan sonra sistemden alınan ölçüm değerleri 73
Tablo 4.24. Dişli arızası sonucu SPSS program çıktısı..... 74
Tablo 4.25. Yapay sinir ağları kullanarak yapılan deney sonuçlarının ispatı..... 76
Tablo 4.26. Yapay sinir ağları sonuçları..... 77

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	: Üreticinin Rulman Yük Kapasitesi
d	: Silindirik Eleman Çapı, (mm)
D	: Rulman Bölüm Dairesi Çapı, (mm)
F	: Vibrasyon Frekansı, (Hz)
H	: Rulman Ömrü, (saat/gün)
L	: Serviste Rulman Üzerine Uygulanan Yük
M	: Vibrasyona Maruz Kalan Kütle Ağırlığı
n	: Mil Dönme Devri, (RPM)
N	: Silindirik Eleman Sayısı, (n)
N	: Bilya Sayısı, (n)
S	: Hız, (mm/s)
V	: Vibrasyon Hızı, (mm/san)
ω_c	: Kafes Bilya Geçiş Titreşim Frekansı, (Hz)
ω_b	: Bilya Geçiş Titreşim Frekansı, (Hz)
ω_{bp}	: Dış Bilezik Bilye Geçiş Titreşim Frekansı, (Hz)
ω_{bpi}	: İç Bilezik Bilye Geçiş Titreşim Frekansı, (Hz)
Θ	: Kontak Açısı

Kısaltmalar

BPFI	: Ball Pass Frequency Inner Ring (İç Bilezik Bilya Geçiş Frekansı)
BPFO	: Ball Pass Frequency Outer Ring (Dış Bilezik Bilya Geçiş Frekansı)
BSF	: Ball Spin Frequency (Bilya Geçiş Frekansı)
Bd	: Bilya Roller Çapı
FTF	: Fundamental Train Frequency (Kafes Frekansı)
FFT	: Fast Fourier Trasform (Fast Fourier Çevrimi)
GMF	: Gear Mesh Frequency (Dişli Geçiş Frekansı)
Nb	: Bilya Roller Sayısı
Pd	: Pitch Çapı
RPM	: Revolutions Per Minute **(**Dakika Dönme Devri)

DİŞLİ KUTULARININ BLOK İÇİ VE BLOK DIŞI ETMENLİ ARIZA HALLERİNİN AUTOSPECTRUM ÜZERİNDEN BELİRLENMESİ

ÖZET

Endüstride;kestirimci bakımda titreşim analizinin gün geçtikçe yer etmesi ile önkestirmeye dayalı bakım anlayışında yeni ve gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan bu çalışmada 4 ayrı deney seti kurularak üzerlerinde belirli arızalar verilmiştir. Deney setlerimizde aşama aşama bu arızalar irdelenerek tek başlarına ve birlikte olduklarında sistem dinamiğine etkileri incelenmiştir.

Dinamik bir sistemin işleyişinde belirli bir takım arızalar oluştuğunda sistemin tüm yapısının bozulacağı aşikardır. Yapılan bu çalışmada kaplin arızası, dişli arızası ve rulman arızasının birbirlerine etkileri incelenmiş bunun matematiksel bir karşılığı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan tüm deneyler neticesinde arızalı bölgede oluşan titreşim farklarının sistemin diğer elemanlarını etkilediği görülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmada kaplin, dişli çark ve rulmana ayrı ayrı arızalar verilerek, bu parçalarda oluşan kuvvet değişimleri ve bu kuvvet değişimlerine bağlı olarak o bölgeden alınan spektrum ölçümleri tespit edilerek genlik artışları irdelenmiş buralardan alınan titreşim ölçümleri sayesinde elde etiğimiz veriler değerlendirilmiştir.Tüm bu ölçüm sonuçları Taguchi Metodu ile belirli bir düzene koyularak ve yapılan deneylerin önem sırası oluşturulmuştur. Ayrıca alınan tüm değerler bir paket program olan SPSS programında regresyon analizine tabi tutulmuş sonucunda her sistem için temeli aynı fakat farklı katsayılara sahip ampirik formüller elde edilmiştir. Neticede bulunan değerler yapay sinir ağlarında irdelenilerek çok yakınsak oldukları görülmüş ve ispatı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Autospectrum Grafikleri, Dişli Geçiş Frekansı, Kestirimci Bakım, Titreşim.

INVESTIGATION ON AUTOSPECTRUM FOR ANALAYSIS OF GEARBOX FAULTS CAUSING BY INNER AND OUTER SOURCES

ABSTRACT

Predictive Maintenance needs to be developed and renewed with beginning of the Industry 4.0. at the industrial areas. For this purpose in this study 4 different experiment sets are built and some failures are given by consciously. In this study how these failures affect in themselves and also each other is observed.

It is clear that if there are failures in a dynamic system, all the mechanism will be failed. In this study how coupling failure, gearbox failure, rolling element bearings failure affect each other is observed and then it is controlled whether there is a mathematical equivalent or not. According to all results of the experiments it is observed that the alteration of vibration in the failure areas affects the parts of the system. These measurements are putted in order in charts with Taguchi Methods so which measured part is more important is observed. Also all the measurements are processed with SPSS program and empirical formulas which are similar but have different coefficients are obtained. Finally by studying these results with Artificial Neural Network is observed that they are very close. And then the reliability of these formulas are testified with SPSS program.

Key Words: Graphics of Autospectrum, Gear Mesh Frequency, Predictive Maintenance, Vibration.

GİRİŞ

18. yüzyılda; sanayi devrimi ile, üretimde makinelerin kullanımı tam manası ile öne çıkmıştır. Eskiden el ile veya basit makinelerin kullanımı ile üretilen ürünler, kompleks makinaların kullanımı ile daha kısa sürede, daha fazla sayıda ve daha ucuza üretilmeye başlamıştır. 20.yüzyılın ikinci yarısında şahit olduğumuz teknoloji devrimi ise makinelerin koordinasyonunu ve üretimin gerek niteliğinin gerekse de niceliğinin kontrolünü kolaylaştıran bilgisayar teknolojisini doğurmuş ve üretim verimliliğinin artmasına katkıda bulunmuştur. Bu bağlamda akıllı teknolojilerin kullanılması ile oluşan, sanayideki 4. Devrim olduğu kabul edilen bu devrime ENDUSTRİ 4.0. ismi verilmiş, bununla ilgili tüm endüstriyel alanlarda bir takım bilgisayar ve akıllı teknolojilerde yoğun çalışmalar başlamıştır. Buna paralel olarak da ilk zamanlar da oluşan; arıza anında bakım, periyodik bakım gibi yöntemlerin önüne de arıza olmadan, olacak arızanın tespitini yapma fikri geçmiştir. 1900'lerin başından II. Dünya savaşına (1944-1945) kadar olan süre içerisinde Amerika Birleşik Devletleri maliyeti düşük ve yüksek kaliteli ürün imalatında dünyaya öncülük etmiştir. Ayrıca II. Dünya Savaşı'nda da ABD'nin bu üretim gücü savaşın sonucunda belirleyici bir etken olmuştur. Bu sırada da geleneksel bakım yöntemlerinin negatif etkileri üzerine bir çok çalışma yapılmıştır.

Kobu'ya göre, bakım-onarım faaliyetlerindeki aksaklıkların; üretim akışı, verimlilik ve dolayısıyla maliyetler üzerindeki etkileri şöyle özetlenebilir [1].

a)Makinelerin ve onları çalıştıran operatörlerin boş kalması,

b)Dolaylı işçilik ve imalat genel masraflarının artması,

c)Müşteri taleplerinin karşılanamaması dolayısıyla müşteri memnuniyetinin düşmesi,

d)Aksaklığın meydana geldiği bölümde ve bu bölümle ilgili diğer bölümlerde gecikme ve boş beklemeler olması,

e)Hatalı ürün oranının artması ve beklenen kalitenin yakalanamaması,

f)Zamanında teslim edilemeyen siparişler sebebiyle müşteri kaybı oluşması

Üretimin aksamasını engellemek isteyen bazı tesisler, erken uyarı niteliği olan kestirimci bakım yöntemlerini tercih etmektedirler. Ani arızalarla karşılaşmamak, beklenmeyen üretim kayıplarını engellemek ve bakım onarım işlerini planlanabilir hale getirmek, kestirimci bakımın hedeflerini oluşturur. Kestirimci bakım yöntemleri, kritik süreçler için idealdir. Bu bakım yöntemleri, makinelerin durumlarının düzenli olarak izlenmesine ve önemli değişikliklerin görülmesi durumunda, arıza meydana gelmeden müdahale edilmesine olanak sağlar. Böylece onarımlar arası maksimum süreyi sağlayacak veriler elde edilmiş olunur [2].

Du Pont'un raporuna göre, günümüzde kontrol edilebilir en büyük harcama kalemi bakım onarım bölümüne aittir ve birçok işletmede bakım onarım bütçesi, yıllık net kârdan daha fazladır [3].

Kestirimci bakım stratejisini benimseyerek kullanmanın bir işletmeye temel faydaları şu şekilde sıralanabilir:

a)Ekipmanın hazır bulunma süresi ve sağlıklı olarak çalıştığı zaman artacağından, ekipmanın kendini amorti etme süresi kısalacak ve yatırım daha hızlı geri dönecektir.

b)Hangi parçanın arızalanacağı doğru olarak tespit edilebileceğinden, değişmesi gerekmeyen, kullanım ömrü dolmamış parçaların değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkan gereksiz maliyet artışlarının önüne geçilecektir.

c)Duruşlar planlı olacağından, sürpriz arızaların giderilmesi için ortaya çıkan ekstra maliyetler ortadan kalkacak, bakım maliyetleri azalacak, bununla birlikte üretim ve verimliliğin artması sağlanacaktır.

d)Yapılan bakımın faydası kontrol edilebileceğinden, bakım verimliliği yükselecektir.

e)Arıza trendine giren parçanın bozulma zamanı tahmin edilebileceğinden, bakım malzemelerinin stokları azaltılabilecek buna bağlı olarak riske girmeden stok maliyetinden tasarruf edilebilecektir.

f)Ekipman, kritik noktaya gelip bozulmadan önce tamir edileceğinden, çalışanlar için iş sağlığı ve is güvenliği standartları çerçevesinde daha güvenli çalışma ortamları oluşturulabilecektir.

Mobley'e göre yenilikçi bakım sistemleri, klasik bakım ve önleyici bakım sistemlerinde olmayan birçok avantajı da beraberinde getirir. Bu yöntemleri kullanan

endüstriyel tesislerde makine arıza oranlarında ortalama %55, bakım maliyetlerinde ise %50'leri asan bir düşüş gözlenmiştir.

Makine ömrü %20 ile %40 arasında artmıştır. Bununla beraber verimlilikte %30, kârda ise %60'lara varan bir artış kaydedilmiştir. Bu artışlar bir tesis için azımsanamayacak kazançlar anlamına gelir [4].

Bakım onarım, bir işletmedeki tüm makine, donanım ve sistemlerin işlevlerini tam olarak ve en yüksek performansla yerine getirebilmeleri ve bu hallerini sürdürebilmeleri için gerçekleştirilen faaliyetlerin bütünüdür. Her ne kadar gereken önem verilmese de bir işletmedeki en kritik bölümlerden biri bakım onarım bölümüdür. Üretimin sürekli olarak devam ettirilebilmesi, makine ve donanımlarda meydana gelen beklenmedik arızaların giderilmesi ve arızaların önüne geçilmesi için periyodik bakımlarının yapılması, işletmenin bina ve yardımcı tesislerin bakımı ve işletilmesi ile tezgâhların montajı ve yer değiştirmesi gibi temel görevleri olan bu bölüm, çoğu zaman tezgâhların işleyişini geliştirecek ya da etkinliğini ve verimliliğini arttıracak yeni tasarımlar yapılması, imalatı ve montajı, çevre kirliliğine karşı önlemler alınması, is güvenliği önlemlerinin uygulanması, hurda ve atık malzemelerin yönetimi, bina ve tesislerin yangından korunması gibi işlerden de sorumlu tutulur.

1971 yılında, Japonya'da, Japon Fabrika Bakım Enstitüsü (JIMP) tarafından geliştirilen, Toplam Verimli Bakım, Toplam Kalite Yönetimi kavramından sıfır üretim hatası düşüncesini alıp bunu, hedefin sıfır arıza ve minimum üretim kayıplarına sahip olmak olduğu anlayışıyla ekipmanlara uygulayan bir kavramdır [5].

Toplam Verimli Bakımdaki "toplam" kelimesi ise şu üç anlamı ifade eder; Toplam Etkinlik: Toplam Verimli Bakım'ın ekonomik etkinliği ve karlılığı sağladığını ifade eder. Toplam Bakım Sistemi: Toplam Verimli Bakım'ın önleyici bakımı, bakım geliştirilebilirliğini ve koruyucu bakımı içerdiğini ifade eder. Toplam Katılım: Özellikle operatörlerin otonom bakım faaliyetleri ile önem kazanan küçük grup aktiviteleriyle tüm çalışanların katılımı hedeflenmiştir. Operatörlere sorumluluk vererek takım çalışmasını gerçekleştirmek esastır [6].

Blanchard (1997), imalat sektöründe toplam verimli bakım uygulamaları için bir yöntem geliştirerek, genel teçhizat verimliliğinde artış ve maliyetlerde düşme sağlamıştır[7].

TVB sisteminin başarılı şekilde uygulanmasına ilişkin faktörlerin belirlenmesi amacı ile yapılan bir çalışmada (Bamber vd., 1999), araştırmacılar İngiltere'deki KOBİ'lerdeki uygulamaları esas alarak, TVB geliştirme ve uygulama programları oluşturmuşlardır. McKone vd. (1999), farklı ülkelerdeki 97 tesisteki TVB uygulamalarını baz alarak, TVB sisteminin kullanımı ve JIT, TQM ve çalışan katılımı (EI) kavramları ile ilişkilerini belirleyen bir ara yüz geliştirmişlerdir. Miyake ve Enkawa (1999) yaptıkları çalışmada, toplam kalite kontrol ve toplam verimli bakım anlayışları arasındaki tamamlayıcı ilişkileri vurgulamışlardır. Bu anlayışların uygulandığı işletmelerde incelemeler yaparak, imalat stratejileri üzerindeki etkilerinden bahsetmişlerdir. Chand ve Shirvani (2000), otomotiv sanayi tedarikçisi konumundaki hücresel üretim yapan bir firmada toplam verimli bakım çalışmalarının etkilerini incelemişlerdir [8].

'ROI' Return On Investment – Yatırımın Geri Dönüşü kapsamında; Amerika Birleşik devletlerin'de yapılan kestirimci bakım planlama uygulamalarının istatistiksel değerlendirmelerinde, sektöre göre yatırım maliyetinin 4-12 katında geri dönüş sağladığı gösterilmiştir [9].

Türkiye'nin sanayideki can damarı olan Kocaeli ilinde bir çok işletmede önceleri dışarıdan servis ile kestirimci bakım çalışmaları varken şimdi ise kendi ekipmanları ve uzmanları ile bu işi yapmaktadırlar. Pirelli, Kordsa, Tüpraş, Kartonsan Enerjisa, Ford A.Ş. bu işletmelerin belli başlılarıdır. Kestirimci bakım planlaması, gerçek anlamında kullanıldığında, işletmelere kesinlikle ek kazançlar sağlayacak bir yöntemdir. Bu kazanç, duruşlardan dolayı üretim kaybının önüne geçilmesi, işçilikten ve malzemeden tasarruf ile sağlıklı makinaların daha az enerji harcamasından kaynaklanmaktadır. Arızalı makina daha fazla enerji harcar, daha fazla akım çeker. Bu enerji havaya atılan enerjidir. Ayrıca kestirimci bakım, planlı bakım aralıklarının daha geniş zaman dilimlerine konumlandırılmasını sağlar. Böylece bakıma; bakımdan kaynaklı işçiliğe, ambardaki erken alınan malzeme miktarına ve ambarın büyüklüğüne ödenen para miktarı azalmış olur. En büyük etkisi

ise istenmeyen ani arıza durumlarında fabrikanın duruşuna engel olması ve bu duruştan kaynaklı; üretilen malzeme kaybına, önemli ve kritik ekipman kaybına, iş gücü ve zaman kaybına engel olmasıdır.

Tüm bu gerekçelerden dolayı tüm dünyada ve Türkiye'de son zamanlarda önemli oranda fabrika kestirimci bakım uygulamalarını işletmelerinde arızalardan kaynaklı büyük kayıpları önleme amaçlı olarak uygulamaktadırlar.

Tüm bu sanayi deki geçmiş yöntemlerin incelemeleri göstermektedir ki makinelerde oluşan arıza çeşitleri incelenerek özellikle kritik makinelerin arıza teşhisinde titreşim analizi çok önemli bir yer tutar. Bunun için birincil olarak kabul gören işlem arıza çeşitlerini birer birer incelenmesi olup bu yöntemde, sadece grafik yorumlama metodu kullanılabilir. Bu tezde yapılacak çalışmada rulman arızası(çeşitleri ile), dişli arızası ve kaplin arızasını aynı sistemde denenip birbirine olan etkilerini açıklanacaktır. Bunu yaparken grafik yoğunluğu altında ezilmemek ve tüm elde ettiğimiz değerleri belirli bir şablonda tutabilmek için 'TAGUCHI' metodundan yararlanılacaktır, bu metotla elde edilen grafikleri yorumladıktan sonra elde edilen değerleri regresyon analizine tabi tutarak SPSS programında tek eksenli sistemler için bir ampirik formül elde etmeye çalışılacaktır. Çok eksenli sistemlerde ise bu formülün sisteme göre değişebileceğini işletmedeki her bir sistem için ayrı çalışma yapılarak o sistemdeki formülün kat sayısının bulunması gerektiğinin ispatı yapılmaya çalışılacaktır. Sonrasında tüm bu bulunan sonuçları deney sistemlerimizden elde etiğimiz sonuçlar ile yapay sinir ağları üzerinden karşılaştırarak ve bulduğumuz sonuçların yakınsaklıklarına dayanarak, bulunan formüller ispat edilmeye çalışılacaktır.

1. GENEL BİLGİLER

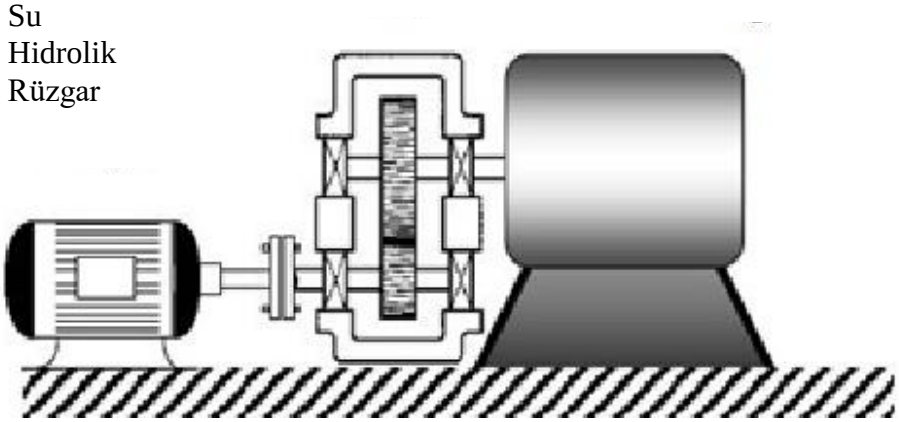
1.1. Kestirimci Bakıma Genel Bakış

Makinelerin arızalanmadan önceki titreşim ölçümlerinde ortaya çıkan grafiklerde çözümleme yapabilmesi için öncelikle bir makineye 3 bölüme ayırabiliriz. Tahriğin olduğu başlangıç kısmını, kuyruğun olduğu işin oluştuğu kısma bağlayan bir iletim mekanizması olması gerekmektedir. Şekil 1.1'de oluşturulan genel sistem deneylerde kullanacak sistemler için genel bir açıklama olarak kabul edilebilir. Kurulacak olan sistemlerde daha sonra açıklanacağı gibi tahrik tarafında elektrik motoru kullanırken, orta bölümde dişli kutuları ve kuyruk bölümünde ise; bir roller, bir hidrolik pompa ve bir fan kullanılacaktır.

Tahrik Tarafı
*Elektirik Motorları
*İçten Yanmalı Motorlar
Dizel
Gaz
*Türbinler
Buhar
Gaz
Su
Hidrolik
Rüzgar

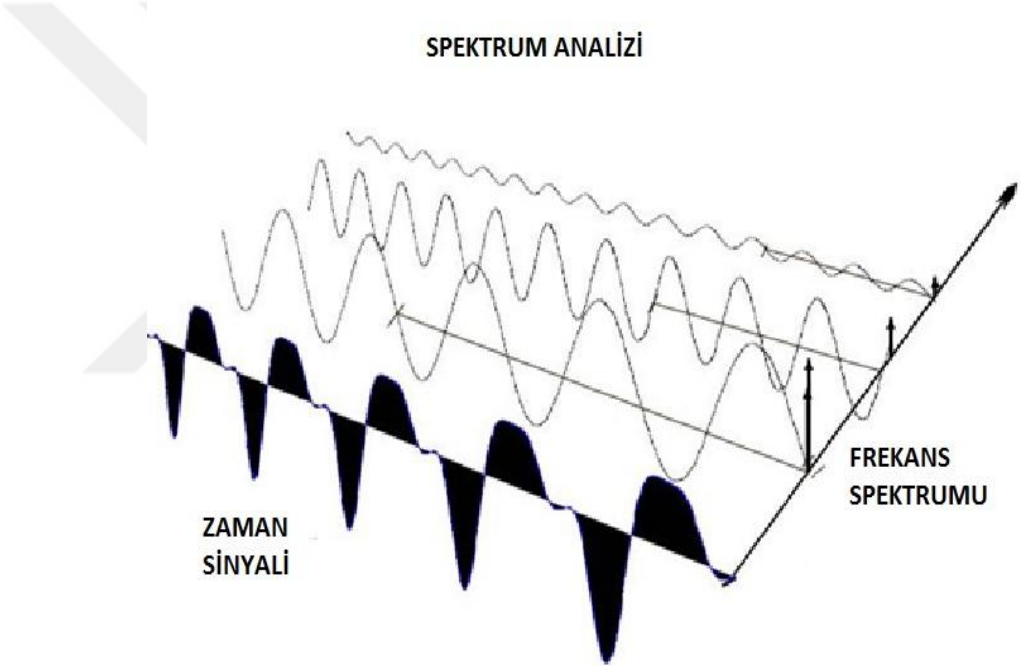
Orta Bölüm
*Kaplinler
Elastik
Sabit
Kardan
*Dişliler
Helis
Düz
Planet
*Kayış

Kuyruk Tarafı
*Pompalar
*Kompresörler
*Generatörler
*Malzeme Nakli
*Diğer
Haddeler
Gemi Pervaneleri
Taşıtlar v.b.



Şekil 1.1. Makinelerin sınıflandırılması

Burada alınacak ölçümlerde her basit hareketten bir sinüs eğrisi şeklinde hareket grafiği oluşturulacaktır. Ancak bileşeninin bu kadar çok olduğu her hangi bir sistemde yüzlerce sinüs eğrisi oluşur. Bunların direk hız sensörleri ile ölçümü bize random grafikleri vermekle birlikte burada oluşan kaba amplitüdün tek bir değeri alınarak genel bir yargıya varılabilir. Ancak bu değer oldukça yanıltıcı bir yargı oluşturacaktır. Bunun yanında her bir sinüs eğrisinin logaritmik ortalaması bir frekansa denk gelmekte, bu frekansı ise Amplitüd-Frekans grafiğinde yerine koyduğumuzda FFT dönüşümünden elde ettiğimiz çok daha açıklayıcı bir grafiği elde etmekteyiz.



Şekil 1.2. FFT Dönüşümü

Şekil 1.2'de ise ölçüm aldığımızda irdeleyeceğimiz spektrum grafiklerinin FFT dönüşümünün ne anlama geldiği ifade edilmiştir. Spektrum ölçümlerinde titreşim kaynağından gelen zaman sinyalleri frekanslara dönüştürülerek bize çok daha anlaşılabilir grafikler sunar. Burada her bir zaman sinyalinin sinüzoidal grafiği negatif ve pozitif taraftaki genlikleri bileşkelenerek, çalışmanın oluşabileceği frekanslardaki genlikler tek tek oluşturulur Böylece çalıştığımız sistemin çalışma frekansında ve katlarında, ayrıca ara frekanslarda, harmoniklerde, yüksek frekans aralıklarında bu sistemin nasıl genlikler vereceğine dair spektrum ismini verdiğimiz

grafikler oluşur. Bu grafiklerin frekans-amplitüd değerleri bize oluşacak arıza hakkında önceden bir takım bilgiler verecektir.

1.2. Sistemde İncelenecek Karakterlere Genel Bakış

1.2.1. Titreşim ölçümleri

Burada ölçülebilen karakteristikler;

Mesafe-Yer Değiştirme : Displacement (mm)
Hız : Velocity (mm/sn)
İvme: : Acceleration (mm/sn^2) ‘dir.

Genelde literatürde bu kavramların kısaltmaları için İngilizcelerinin baş harfleri olan; Hız için ‘V’, ivme için ‘a’, Yer değişimi için ‘D - X’ kısaltmaları kullanılmaktadır.

1.2.1.1. Ölçülebilen karakteristiklerin tanımları

İvme: Yüksek frekanslardaki büyük stresler rulmanda yağ filminin yırtılmasına neden olacağı için hasarlanmaya neden olur. Kuvvet direkt ivme ile orantılıdır. Peak to peak (Oluşan piklerin en uç iki noktası arası) birimi g’dir. 120 kCPM (Cycles Per Minute) üzerindeki frekanslar için özellikle uygundur.

Hız: Metrik skalada genellikle mm/sn ile ifade edilir.

Mesafe-Yer Değiştirme: Genel olarak piyasada yapılan hatalardan biri bu kavramı çok basit olarak ele almaktan kaynaklanır. Sistemimizde oluşan titreşim sonucu nominal hareketin dışında hareketler oluşacaktır. Buradaki yer değiştirme miktarı bizim X olarak kabul ettiğimiz amplitüd değeridir. Oysa FFT dönüşümü yapılmış bir grafikte dikey eksende mm/s cinsinden hız yorumlanmaktadır. Yani burada gördüğümüz değer direk ampitud değeri olarak düşünülmemelidir. 1 sn’de sistemde hareket tekrarlanabilmektedir. Mesela parçada 2 mm’lik bir hareket söz konusu olsun. 1 sn’de ise bu hareketi 3 kez tekrarladığını düşünürsek sistemin hızı 6 mm/s iken, ampitud 2 mm olacaktır. Burada parçanın hızı 1 saniyede kat ettiği yol olmakta dolayısı ile 3x2=6 mm/sn olmaktadır. Ama amplitüd parçanın ulaştığı genlik olacaktır.

1.2.1.2. Yönüne göre ölçüm yöntemleri

Eksenel ölçümler: Eksenel titreşim ölçümleri , ideal şartlar altında kuvvetlerin çoğu şafta dik olduğundan dolayı çok az titreşim genliği gösterirler. Bununla birlikte eksen kaçıklığı ve şaft eğilmesi gibi durumlarda eksenel olarak vibrasyon yaratırlar.

Yatay ölçümler: Yatay vibrasyon ölçümleri, makinenin yatay yönde daha esnek olması nedeniyle daha çok titreşim gösterirler. Üstelik çok yaygın makine problemlerinden olan balanssızlık, radyal titreşim üretir. Buna kısmen dikey kısmen de yatay konumlandırılmış titreşim genlikleri olarak bakmak doğru olacaktır ve bu neden ile bu tezin uygulanmasında radyal ölçümlere yer verilecektir.

1.2.2. Cihazlarımızla Bulabileceğimiz Arızalara Genel Bakış

1.2.2.1. Yüksek eksenel ölçüm seviyeleri

1xRPM ya da 2xRPM de yüksek genlikte oluşan titreşim, kaplin etrafında eksenel'de ya da radyal'de 180 derece oluşan faz farkı ile kendini gösterir.

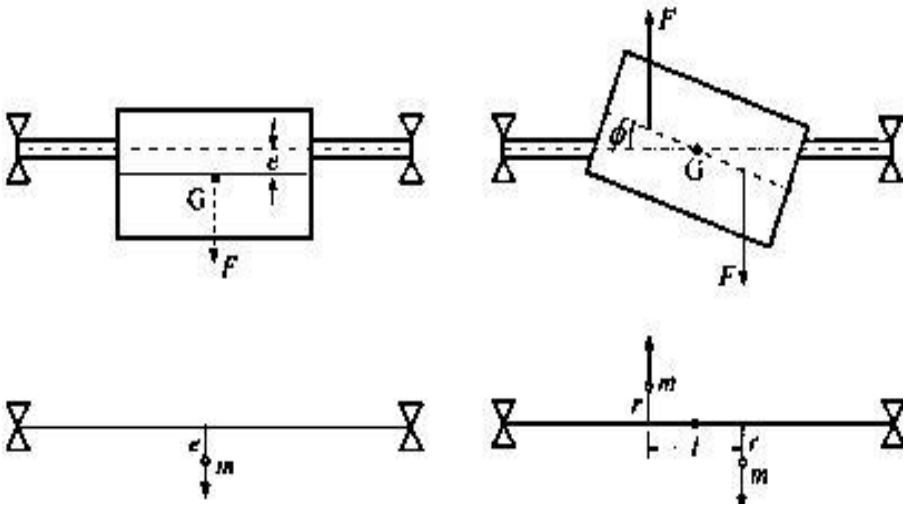
Her dönüşte tekrar edilen periyodik dalga formu bir ya da üç deve hörgücünü andıran belirgin tepecikler şeklinde oluşur. Bunları birbirinin harmonikleri şeklinde düşünürsek, bu harmonikleri incelediğimizde eğer 1 x R P M , 2 x R P M , 3xRPM harmoniklerinin genlik değerleri birbirine yakın ve belirgin, diğerleri belirgin değilse sorunu tespit etmiş oluruz. Sorunun ne derecede olduğunu belirlemek için referanslara bakmak ya da trendi takip etmek gerekir. Genellikle makine üreticiler ürettikleri makinelerin hangi titreşim değerleri arasında çalışması gerektiği ile ilgili bir katalog hazırlarlar. Örneğin rulman üreticilerinin ürettikleri rulmanların her biri için çalışma şartlarında alınmış ayrı FFT grafikleri vardır ve özellikle yüksek frekanslarda rulmanların çalışmaları ile ilgili bize bir bilgi verirler.

Tablo 1.1. Titreşim kaynağına göre ölçüm yönü ve faz ilişkisi

Titreşim Kaynağı	BaskınTitreşim Frekansı	Ölçüm Yönü	Faz İlişkisi	Genlik
Paralel	1x,2x,3x RPM	Radyal	Radyalde 180^0	Sabit
Açısal	1x,2x,3x RPM	Eksenel	Eksenelde 180^0	Sabit
Her ikisi	1x,2x,3x RPM	Radyal ve/veya Eksenel	Radyal+Eksenel180^0	Sabit
Kaymalı yataklar	1x,2x,3x RPM	Radyal ve/veya Eksenel	Eksenelde 180^0	
Bilyalı yataklar	1x,2x,3x RPM, 30-60 bin RPM	Eksenel	Eksenelde 180^0	

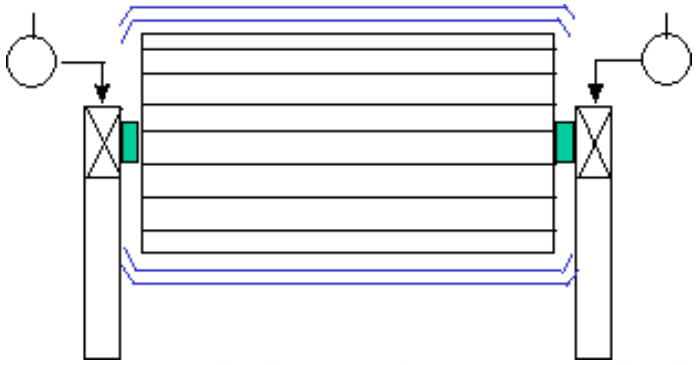
1.2.2.2. Arıza çeşitleri

Balanssızlık; sıcaklık, basınç, akış vb. operasyonel durumlar balanssızlığa etki eder. Balanssızlık giderme normal çalışma koşullarında yapılmalıdır. Fan kanatlarındaki hatvenin ve açının değişimi ‘’Aerodinamik balanssızlık ‘’ yaratacaktır.Balanssızlık sadece devrin 1.katında görülür 1x rpm’deki genlik balanssızlıkla orantılıdır.Radyal yöndeki titreşim genliği yüksektir.Faz ölçümleri stabil kalacaktır. Zaman-dalga grafiğinde ise sinüs eğrisi görülür.Balans bozukluğu, mekanik problemler içinde önemli bir yer tutmaktadır. Meydana geliş sebebi, geometrik merkez hattı(dönme ekseni) ile milin kütle merkez hattının birbirleriyle çakışmamasıdır.



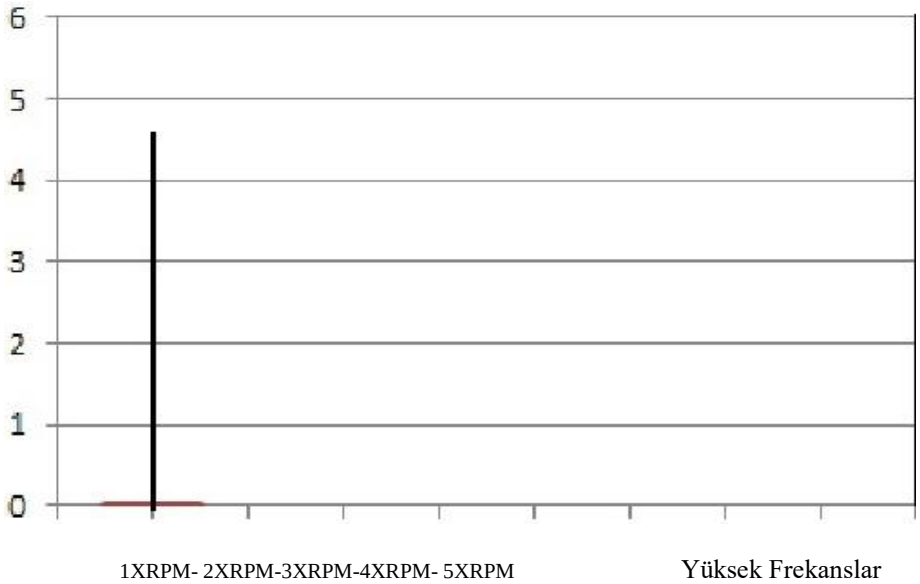
Şekil 1.3. Statik ve dinamik balanssızlık oluşumu

Çalışma şartlarında dinamik balanssızlık sabit faz açılarında kalacaktır.Genlik, hızın karesiyle birlikte doğru orantılı olarak artacaktır. 1X RPM (makinenin çalışma devri) her zaman görülecek ve baskın olacaktır.

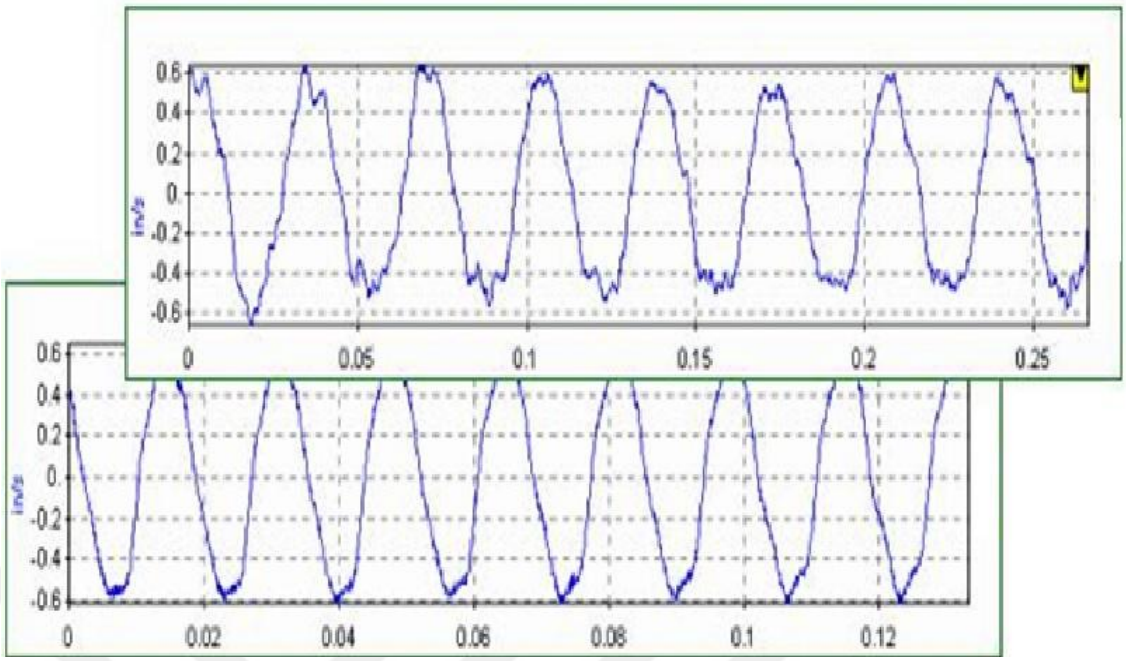


Şekil 1.4. Statik Balans

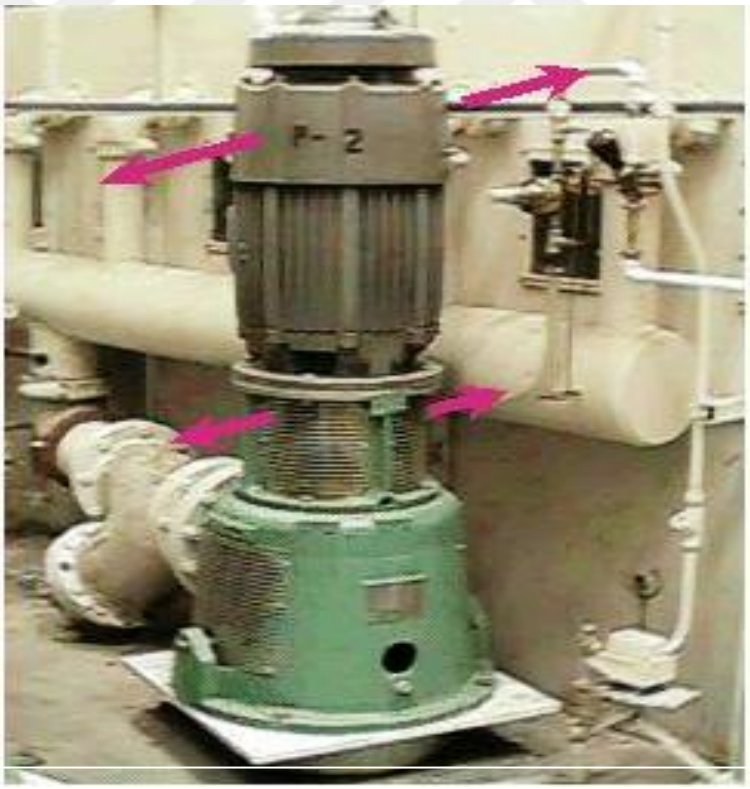
Şekil 1.4'e göre statik balanssızlık durumunda iki yataktaki vibrasyon aynı fazda ve sabittir. Titreşim genliği devrin karesiyle orantılı olarak artar. 1XRPM spektrumda her zaman mevcuttur ve baskındır. Rotor ağırlık merkezine koyulacak tek bir balans kütlesi ile düzeltilebilir**.** Statik balanssızlık durumunda iki yataktaki vibrasyon aynı fazda ve sabittir. Vibrasyon genliği devrin karesiyle orantılı olarak artar. 1XRPM spektrumda her zaman mevcuttur ve baskındır. Rotor ağırlık merkezine koyulacak tek bir balans kütlesi ile düzeltilebilir. Ayrıca balanssızlık kendini çalışma devrinde göstereceği için sadece 1xRPM'de ortaya çıkar.



Şekil 1.5. FFT Dönüşümü balanssızlığın 1XRPM'de ortaya çıkması



Şekil 1.6. Balanssızlık Random Grafiği

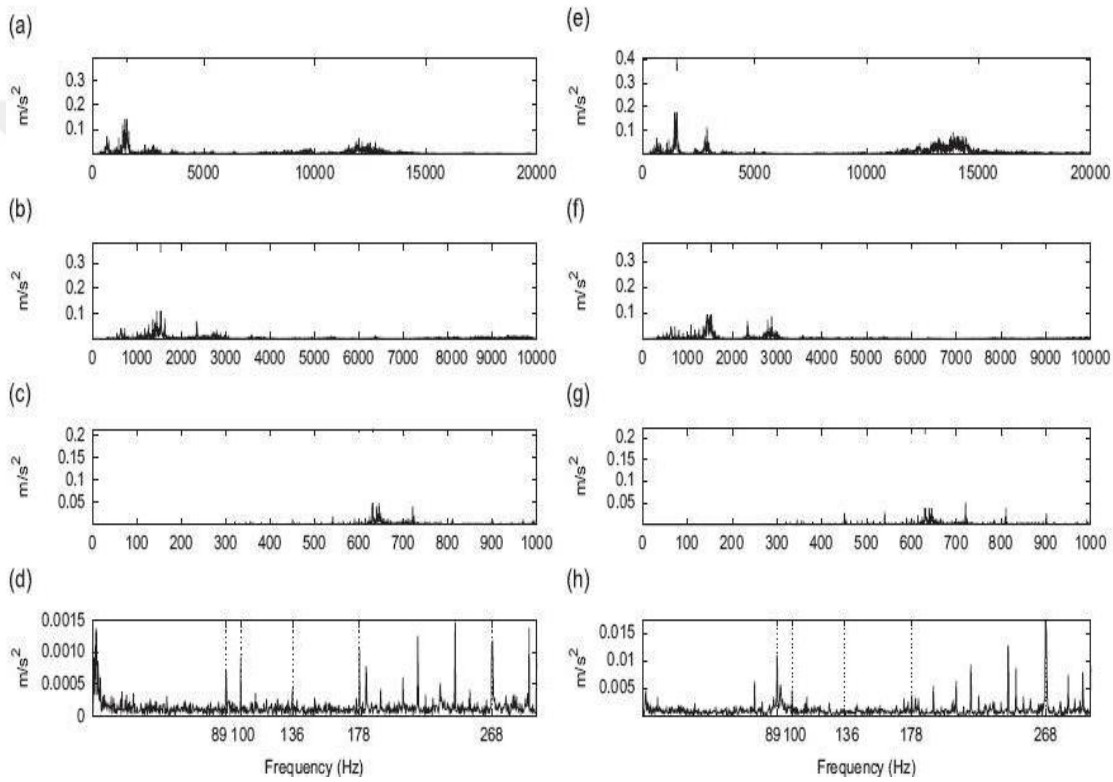


Şekil 1.7. GBM Makine arşivi, sanayide karşılaşılan, yatay düzlemde enine hareket eden dikey motordaki salınımı gösteren

Sanayide sık sık karşılaşılan balanssızlık kendini şekil 1.5'deki gibi 1XRPM'de çok net gösterir. Makinenin çalışma devri olarak kabul ettiğimiz bu frekansta oluşan

genlik artışları trend takibi ile gözlemlenebileceği gibi GBM Makine gibi Şekil 1.7'de verilen bir dikey motor uygulamasında göz ile fark edilebilir. Özellikle dikey uygulamalarda bu duruma çok rastlanabilir. Ayrıca bu tür motor üreticilerinin de çoğunlukla katalog değerlerinde hangi frekans aralıklarında hangi genlik değerleri arasında çalışabilecekleri yer almaktadır.

Rulmanlarda oluşabilecek arızalar ise, özellikle kendilerini yüksek frekanslarda karıncalanmalar halinde göstermeye başlarlar.



Şekil 1.8. Örnek bir rulman arızası trend grafiği

Rulman arızaları en genel arıza tiplerindendir. Rulmanlar senkron olmayan görünür harmonikler, geniş band enerji yığılmaları gibi karakteristik özellikler gösterirler. Dalgaform grafiklerinde vuruntu sinyalleri de söz konusu olabilir. Hasarlı rulman erken sinyalleri, düşük genliktedir. Bu durumda spektrum ve dalgaform grafikleri bize bilgi verecektir. Bunun için yüksek frekans aralıklarında oluşacak karıncalanmalara dikkat etmek gereklidir. Titreşim analizi ile rulmanlarda aşağıda belirtilen arızaları teşhis edebiliriz;

1. Bilya yatak yollarındaki hasarlar
2. Hareketli dönen elemanlardaki hasarlar
3. Kafes hasarları
4. Yataklamada ki mekanik gevşeklikler
5. İç toleranslardaki artışlar düzensizlikler
6. Rulmanın şaft üzerinde dönmesi
7. Merkez kaçıklığı yada kazıklama
8. Yağlama problemleri

İç bilezik dönerken dış bilezik sabit kalıyorsa;

$$FTF=\frac{S}{2}(1-\frac{B_d}{P_d})\cos\theta \quad (1.1)$$

$$BPFO=\frac{N_b}{2}S(1-\frac{B_d}{P_d})\cos\theta \quad (1.2)$$

$$BSF=\frac{P_d}{2B_d}S(1-\frac{B_d}{P_d})^2\cos\theta \quad (1.3)$$

$$BPFI=\frac{N_b}{2}S(1+\frac{B_d}{P_d}\cos\theta) \quad (1.4)$$

İç bilezik sabit, dış bilezik dönüyorsa;

$$FTF=\frac{S}{2}(1+\frac{B_d}{P_d})\cos\theta \quad (1.5)$$

$$BPFO=\frac{N_b}{2}S(1+\frac{B_d}{P_d})\cos\theta \quad (1.6)$$

$$BSF=\frac{P_d}{2B_d}S(1+\frac{B_d}{P_d})^2\cos\theta \quad (1.7)$$

$$BPFI=\frac{N_b}{2}S(1-\frac{B_d}{P_d}\cos\theta) \quad (1.8)$$

Rulman Yük Ömrü Hesabı:

Rulman ömrü, yük (küpü ile etkiler) ve hızın artması ile düşer.

$$H=\left(\frac{C}{L}\right)^{3}\left(\frac{1667}{RPM}\right) \tag{1.9}$$

A) Titreşimin rulman ömrüne etkisi:

$$H=\left(\frac{C}{L+6{,}7753.10^{-5}MVF}\right)^{3}\left(\frac{1667}{RPM}\right) \tag{1.10}$$

B)Rulmanlarda Hasarlanma Gelişimi ve Önemi

a. Rulmanlar normalde şu sıra ile hasarlanır; Bilezik hasarı, Bilya hasarı, kafes hasarı
b. İç bilezik hasar genlikleri dış bilezik genliklerinden düşüktür.
c. Erken uyarı, hasar frekansında yer alır ve tek bilezik harmoniklerinde genelde görünür.
d. Hasar frekans harmoniklerinin büyümesi ya hasarın büyümesinden yada parça sayısının artmasındandır.
e. Diğer hasar frekanslarının oluşması arızanın adım adım geliştiğini gösterir. Kafes frekansı en son çıkacak arızadır. Bu spektrumda kaymalar şeklinde görünür. Dağılmadan önce sesli uyarı alınmaya başlanır.
f. Bilezik frekansı dönme devri frekansı üzerinde modüle olabilir. Bu yan bandlar şeklinde görünür. Hasar arttıkça yan band sayısı artacaktır.
g. Tepeciklerin kaybolması ve yada zemin gürültüsü rulman geometrisinin değişimindendir.
h. Düzensiz hatalı yağlama hasarın gelişimini hızlandırır.

$$W_c=\frac{N}{2}\left(1-\frac{d}{D}\right) \tag{1.11}$$

Tablo 1.2. Örnek kontrol tablosu

Ölçüm ile elde edilen hasar frekansları (Hz)	Denklem 1.1. ile elde edilen hasar frekansları ve karşılıkları (Hz)
181,32	183,10 - $2x\omega_{bp}$
271,99	274,65 - $3x\omega_{bp}$
362,64	366,20 - $4x\omega_{bp}$
453,23	457,75 - $5x\omega_{bp}$
543,98	549,29 - $6x\omega_{bp}$
634,57	640,84 - $7x\omega_{bp}$
725,29	732,39 - $8x\omega_{bp}$
815,96	823,94 - $9x\omega_{bp}$
906,46	915,49 - $10x\omega_{bp}$
997,26	1007,04 - $11x\omega_{bp}$
1088	1098,59 - $12x\omega_{bp}$
1178,4	1190,13 - $13x\omega_{bp}$

Tablo 1.2'de SKF Firmasına tarafından ölçülen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır[10]. Kaplin kaçıklığı ise, çalışma devrinin harmoniklerinde görülür.

Tablo 1.3. Kaplin Kaçıklığı tespiti

ÖLÇÜM	FREKANS	AMPİTÜD
1. ÖLÇÜM	1 *x* RPM	2 mm/s
	2 *x* RPM	1 mm/s
	3 *x* RPM	2 mm/s

Tablo 1.3'de kaplin kaçıklığı sonrası ilk 3 RPM'de genlik değerleri verilmiştir [11].

Eksenel kaçıklık ve Kaplin Kaçıklığı kıyaslaması aşağıdaki gibi yapılabilir. Birbirinden farklı üç tip eksenel kaçıklık mevcuttur;

I. Ofset kaçıklık

II.Açısal kaçıklık

III.Rulmanda kaçıklık

Aradaki farklar şu şekilde ayırt edilebilir;

i. Eksenel-Radyal titreşim farkı

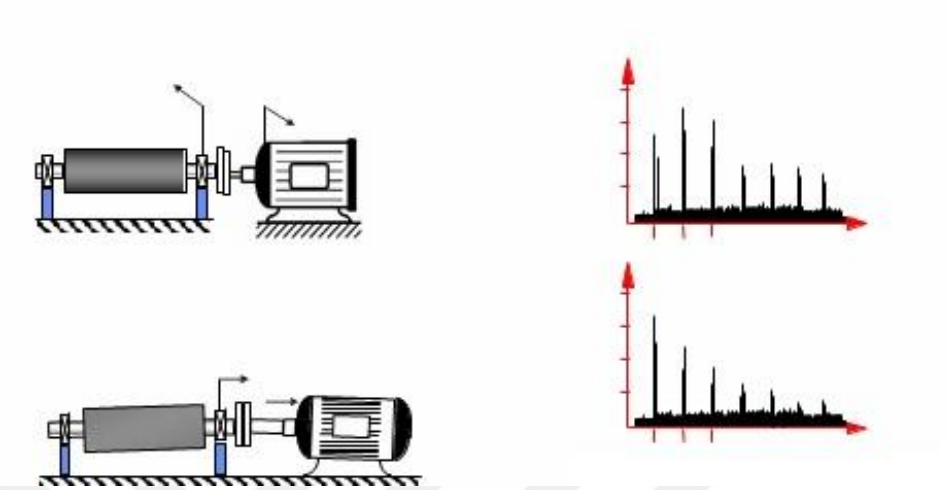
ii. Radyal titreşim, 180º faz kayması

iii. 2XRPM maksimum tepe

iv. Eksenel titreşim, 0º faz kayması

v. 1,2,3 X RPM sıralı tepecikler

vi. Ayarsızlık 1xRPM ile başlar.



Şekil 1.9. Kaplin ayarsızlığında eksenel-radyal titreşim farkı

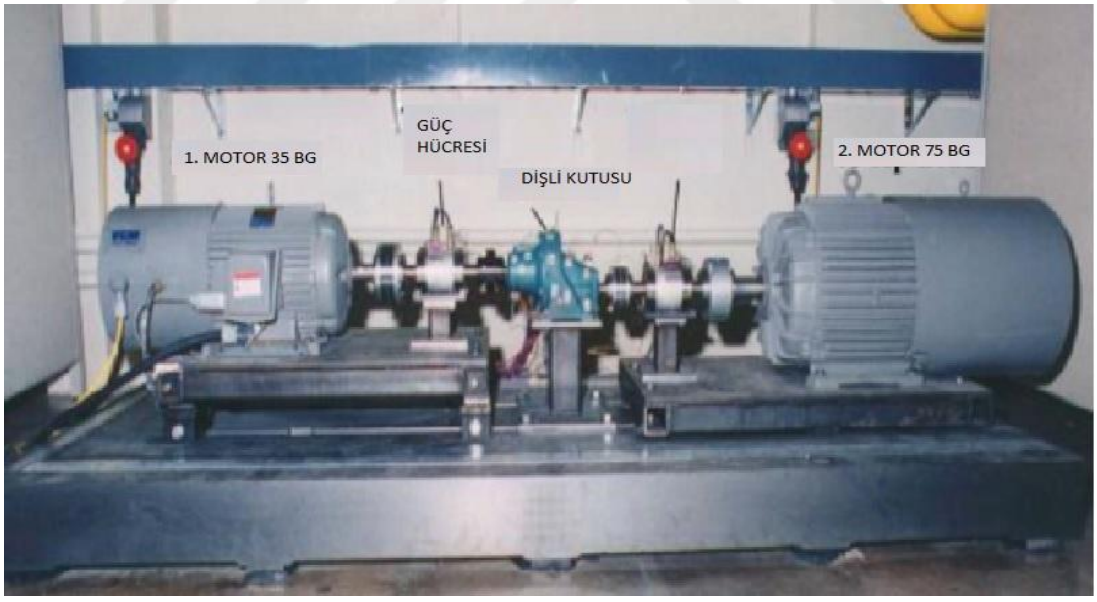
Radyal kaçıklığın spektrum grafiğinde genel karakterleri şöyledir;
a-Yüksek radyal ölçüm seviyeleri
b- 2XRPM'de 1XRPM ve 3XRPM'den yüksek seviyede ölçülen tepe
c-vibrasyon, kaplin etrafında eksenelde ya da radyalde 0º faz farkı

Eksenel kaçıklığın spektrum grafiğinde genel karakterleri şöyledir;
a-Yüksek Eksenel Ölçüm Seviyeleri
b- 1XRPM, 2XRPM, 3XRPM sıralı tepecikler
c- Titreşim, kaplin etrafında eksenel'de ya da radyal'de 180º faz farkı ile kendini gösterir.

Her dönüşte tekrar edilen periyodik dalgaformu bir, yada üç deve hörgücünü andıran belirgin tepecikler, harmoniklerini gösterecektir. Bu harmonikleri incelediğimizde eğer 1xRPM, 2xRPM, 3xRPM harmoniklerinin genlik değerleri birbirine yakın ve belirgin, diğerleri belirgin değilse sorunu tespit etmiş oluruz. Sorunun ne derecede olduğunu belirlemek için referanslara bakmak ya da trendi takip etmek gerekir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kestirimci bakımda titreşim analizi ile yapılan teorik ve deneysel uygulamalarda Dünya'da daha tam anlamıyla istenilen noktaya gelinememiş olup yapılan çalışmalar genelde aynı eksen etrafında dönüp dolaşmaktadır. Şekil 2.1'de, en özgün makalelerden biri olarak görülen ve yazarları Yimin Zhan, Viliam Makis [12] olan; Dişli kutuları titreşim değerleri konulu makalelerinde 2 adet motoru birbirine ters bağlayıp belirli bir tepki kuvveti oluşturarak dişli kutusu üzerindeki zorlanmaları test etmiş bu paralelde elde ettikleri kepstrum grafiklerindeki zamanla kuvvet artışları sonucu sistemin arızalandıktan sonra ek kuvvetler tarafından zorlandıklarını ispat etmişlerdir. Yalnız yapılan bu çalışma ile sistemdeki zorlanmanın ispatı yapılmış olup, zorlanmanın sisteme etkileri incelenmemiştir.



Şekil 2.1. Yimin Zhan, Viliam Makis tarafından kurulan deney test düzeneği

Chinmaya Kar, A.R. Mohanty; [13] makalelerinde hız zaman grafiklerinin yerine FFT dönüşümü ile sağladıkları amplitüd frekans grafiklerinin trend analizindeki yararını incelemişler bunu incelerken yine bir dişli arızası sonucu elde ettikleri grafikleri kullanmışlardır.

Yuan H. Guana, Teik C. Limb,_, W. Steve Shepard, Jr. [14] ise spectrum grafiklerinde dişli geçiş frekansındaki amplitüd artışını irdeleyerek dişli arızalarının kestirimci bakımı üzerine çalışmışlardır.

Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim üyeleri tarafından Engin Yıldırım, Mustafa Mehmet Fatih Karahan [15] 2015 yılında yazılan makalelerinde gücü 90 kW devri 2970 d/d olan bir kompresörde belirli periyotlarda gerçekleştirilen titreşim ölçümlerine dayandırılarak rulmanlardaki arızaların kestirimci bakım uygulamaları ile tespitine yer verilmiştir.

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi öğretim üyesi Doç.Dr. Sadettin ORHAN [16] çalışmasında örnek sistemlerdeki rulmanlara şikeler yaparak yüksek frekanslarda bu rulmanlarda oluşan titreşim arızalarını göstermiştir.

Yine Sadettin Orhan, Hakan Arslan ve Nizami Aktürk [17] ile birlikte Haziran 2003'de Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi konusunda rulman arızalarını inceleyen Türkçe bir makale yayınlamıştır. Bu makalede yüksek frekanslarda kendini gösteren rulman arızaları belirlenmiştir.

Bundan önce yapılan tez çalışmalarına baktığımızda ise kestirimci bakımda titreşim analizi konusunda çok az sayıda tez konusuna rastlamaktayız. 2015 yılında Murat Çimen'in[18] İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yaptığı bilyeli rulman hasarlarının titreşim analizi ile tespiti ve gemi makinelerinde kestirimci bakım uygulaması konulu yüksek lisans tezinde rulman hasarlarının türlerine göre autospektrum grafiklerine yansımaları ve bu grafiklerdeki harmoniklerin oluşum şekillerine göre farkları incelenmiş, 2 rulman ve bir basit doğru akım motorundan oluşan sistemde şikeler yapılmış (Rulman iç bilezik arızası, dış bilezik arızası, bilya arızası) bunun neticesinde oluşan grafiklerde bu farklılıklar ortaya konulmuştur.

2012 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Emrah KURT [19] kestirimci bakım yöntemi kullanılarak egzos fanında arıza teşhisi yaptığı yüksek lisans çalışmasında Afşin Elbistan B Termik Santrali Baca Gazı Arıtma sisteminde bulunan bir egzos fanını kullanarak burada daha önce oluşan fandaki titreşim sorunları Autospektrum grafikleri ile incelenerek Alfer Mühendislik tarafından imal edilen fandaki sorunlar bulunmuş, buradaki sorunlu yataklardaki rulmanların değişimine karar verilmiştir

Sadettin Orhan'ın [20] 2002 Yılında Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsünde yazdığı rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titreşim analizi İle kestirimci bakımı'' isimli doktora tezinde ise pompa ve fan gibi çeşitli sanayi ekipmanlarında ki rulman arızası durumlarında titreşimsel olarak verdikleri tepkiler autospektrum ve kepstrum grafikleri ile irdelenilerek rulman arızasının kestirimci bakımdaki analizine geniş bir inceleme yapılmıştır

Yapılan tüm çalışmalar göstermektedir ki kestirimci bakımda titreşim analizi ve ölçüm yöntemleri konusunda daha çalışılacak çok alan vardır. Yapılması gereken bir çok çalışma bulunmaktadır. Özellikle Yapılan Çalışmaların kestirimci bakımda rulman hasar tespitinin ön plana çıkması diğer arıza tespitleri konusunda eksikliği göz önüne sermiştir. Tüm bu incelemelerin neticesinde kestirimci bakımda titreşim analizi ile incelenen yöntemlerin genel olarak tek bir yöntem ve sonuçlarının irdelenmesi şeklinde olduğu görülmüştür. Oysa herhangi bir kompleks makinede bir parçada arızanın oluşması o makinenin tüm dinamiğini bozacaktır. Herhangi bir parçadan çıkan kuvvet değişimi ve buna bağlı olarak o bölgeden alınacak spektrum ölçümleri ile tespit edilecek genlik artışları irdelenerek kombine arızalarda ortaya çıkacak birbirini tetiklemeler ve destek noktaları tespit edilebilir. Bunun için farklı deney setleri kurularak gerekli ispatlar yapılabilirse tüm piyasada kullanılan makinelerdeki arıza teşhisleri de daha kademeli ve ayrıntılı olarak tespit edilebilir ve ayrıca büyük dişli kutuları içeren sistemlerde ulaşılamayan noktaların diğer noktalarda yapacağı genlik artışları ile daha önce teorikte mümkün olup erişim problemleri yüzünden pratikte mümkün olmayan parçaların arıza teşhisleri yapılabilir.

3. MALZEME VE YÖNTEMLER

3.1. Deneylerde Kullanılacak Sistemlerin Tasarımı

3.1.1. Sistem 1

Şekil 3.1'de gösterilen 1 nolu sistemin içeriği şu bölümlerden oluşur;



Şekil 3.1. Deneylerimizde kullanılmak üzere kurulan 1 nolu deney seti

A)Tahrik Tarafı:

Elektrik motoru tarafından tahrik sağlanmaktadır. Elektrik motoru, devir düzenleyici aparatı ile birlikte kullanılmıştır. 1.Sistemimizde GAMAK marka 3000 d/d'lık (50 Hz) motor kullanılmıştır. Koruma derecesi IP 55 olup, yalıtım sınıfı F (155 ˚C) ve Isı artışı sınıfı (B) 80 ˚K'dir

B) İletim Mekanizması:

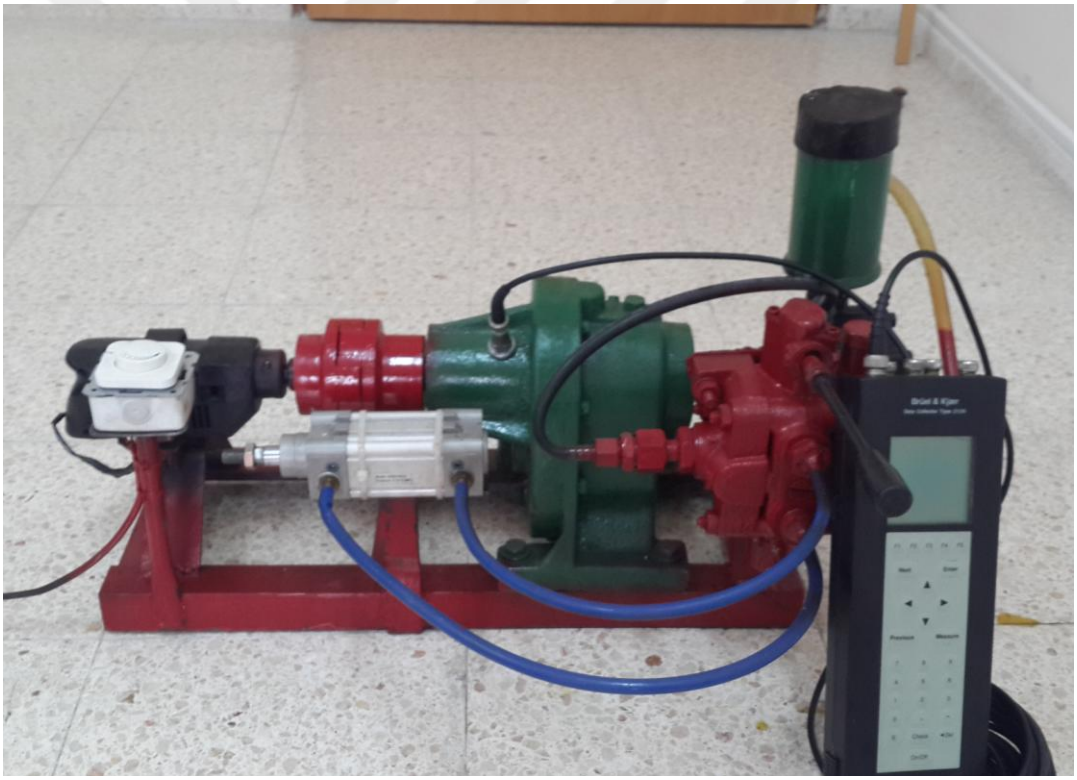
Çift Kademeli Dişli Kutusu, 2 adet yatakları ile birlikte rulman ve kaplinden oluşmaktadır. 2 Adet Sökülüp Takılabilir Dıştan Yivli Rulman: Kullandığımız rulmanlar FAG marka olup 16002 nolu modeldir.

C) Kuyruk Tarafı:

Konveyör; el ile yapılmış gerekli sürtünme sağlanarak bir iş elde edilmiş, yükün oluştuğu parça olarak imal edilmiştir.

3.1.2. Sistem 2

Şekil 2.2'de gösterilen 2 nolu sistemin içeriği şu bölümlerden oluşur;



Şekil 3.2. Deneylerde kullanmak üzere kurulan 2 nolu deney seti

A)Tahrik Tarafı:

Elektrik motoru tarafından tahrik sağlanmaktadır. Elektrik motoru, devir düzenleyici aparatı ile birlikte kullanılmıştır. 220V'luk bir vidalama tipi matkap motoru, elektrik motoru kullanılarak, evlerde aydınlatma ayarlamada kullandığımız dimer ile uyumlu

hale getirilmiş, böylelikle ölçülen değerlerde Hz olarak sonuç alabileceğimiz bir elektrik motoru seçilmiştir.

Marka Adı:OEM
Verim:IE 1
Sürekli Akım (A):60ma
Voltaj (V):220v
Model Numarası: 1140250

B) İletim Mekanizması:

Çift Kademeli dişli kutusu, iki aşamalı sikloid dişli kutusu özellikleri;
Marka Adı: uho
Tipi :AC
Model:Integral
Yıl:1996

C) Kuyruk Tarafı:

Kuyruk tarafında yük oluşturmak için bir hidrolik pompa monte edilmiş, bunu için bir küçük yağ tankı, pompa, hidrolik kontrol kolu ve KDNC 40 X 25 ISO manyetik yastıklı silindir kullanılmıştır. Kullandığımız silindir Manyetikli ve yastıklamalı pnömatik silindirdir ve 4 kanallı olup ISO standardındadır.

3.1.3. Sistem 3

Şekil 3.3'de gösterilen 3 nolu sistemin içeriği şu bölümlerden oluşur;



Şekil 3.3.Deneylerde kullanmak üzere kurulan dişli kutusu çift eksenli 3 nolu deney seti

A)Tahrik Tarafı:

Elektrik Motoru (Devir Düzenleyici Aparatı ile Birlikte)

3.Sistemimizde VOLT marka 3000 d/d'lık (50 Hz) motor kullanılmıştır. Koruma derecesi IP 55 olup, yalıtım sınıfı F (150 ˚C) ve Isı artışı sınıfı (B) 80 ˚K'dir

B) İletim Mekanizması:

Dişli Kutusu: Kare gövde içerisinde sonsuz vida ve dişli çarktan oluşan Tramec marka dişli kutusu kullanılmıştır.

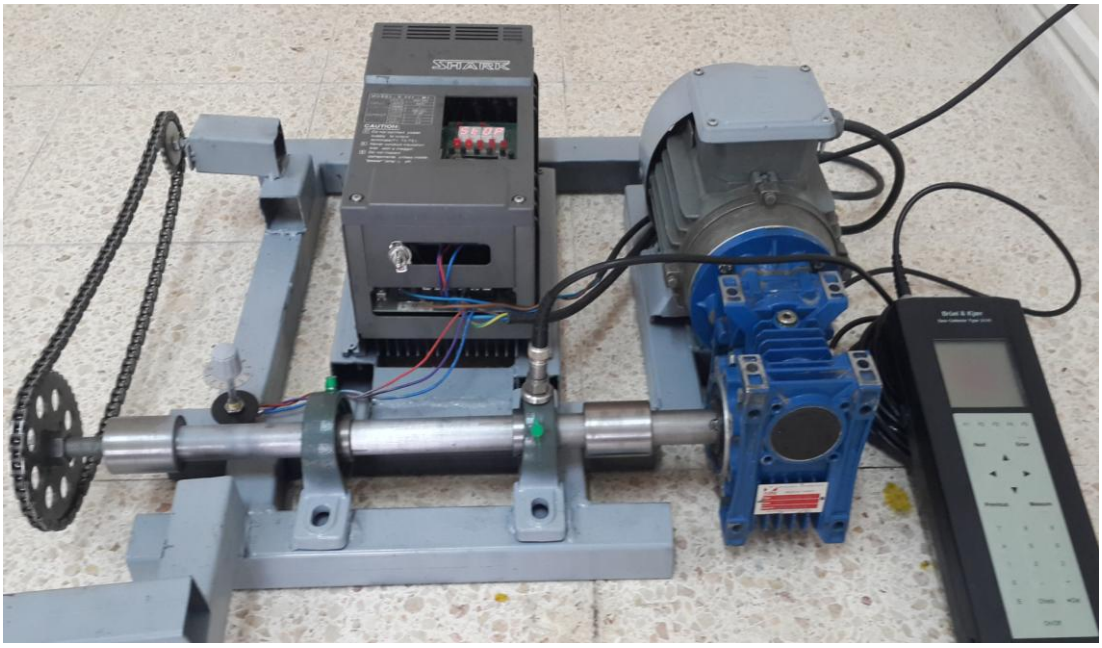
2 Adet Sökülüp Takılabilir Dıştan Yivli Rulman: Kullandığımız rulmanlar FAG marka olup 16002 numaralı modeldir

C) Kuyruk Tarafı:

Dişli zincir sistemi; el ile yapılmış gerekli sürtünme sağlanarak bir iş elde edilmiş, yükün oluştuğu parça olarak imal edilmiştir.

3.1.4. Sistem 4

Şekil 3.4'de gösterilen 4 nolu sistemin içeriği şu bölümlerden oluşur;



Şekil 3.4. Deneylerde kullanmak üzere kurulan dişli kutusu çift eksenli 4 nolu deney seti (Zincir bağlantısında sürtünme verilerek yük sağlanmıştır.)

A)Tahrik Tarafı:

Elektrik Motoru (Devir Düzenleyici Aparatı ile Birlikte)

3.Sistemimizde VOLT marka 3000 d/d'lık (50 Hz) motor kullanılmıştır. Koruma derecesi IP 65 olup, yalıtım sınıfı F (150 ˚C) ve Isı artışı sınıfı (B) 80 ˚K'dir

B) İletim Mekanizması:

Dişli Kutusu: Kare gövde içerisinde iki adet konik dişli'den oluşan Yılmaz Redüktör marka dişli kutusu kullanılmıştır.

2 Adet Sökülüp Takılabilir Dıştan Yivli Rulman: Kullandığımız rulmanlar FAG marka olup 16002 nolu modeldir

C) Kuyruk Tarafı:

Dişli zincir sistemi; el ile yapılmış gerekli sürtünme sağlanarak bir iş elde edilmiş, yükün oluştuğu parça olarak imal edilmiştir.

Kullandığımız sistemlerde motorda ve iletim mekanizmasında kullanılan rulmanlarda oluşabilecek arızalar, redüktör arızası ve kaplin kaçıklığının birbirine etki edip etmediği incelenmektedir. Örnek grafiklerde bu arızaları teşhis etmekte kullandığımız spectrum yöntemi için yüksek frekans ve 1xRPM, 2xRPM, 3xRPM deki değişikliklere göre her bir deneyde değişebilecek parametre sayısı 4 olmaktadır**.**

3.2. Portatif İzleme Programında Kullanılan Sensörler:

Portatif vibrasyon izleme cihazlarında genellikle bir güç çevirgesinde olduğu gibi piezoelektrik sensörler kullanılır. Kısaca sensör; bir etkiye maruz kaldığında, o etkiye orantılı olarak bir voltaj yayımlayan kristalden ibaret ayarlanmış elektromanyetik bir alettir. Mekanik olarak piezoelektrik bir kristal ve bir kütleden oluşur. Bir makine de vibrasyon dış bölgeye doğru yayılır ve kütle ile kristal arasındaki etkileşim ölçülebilir bir yük üretir. Deneylerimizde kullandığımız cihazlarımızdaki sensörlerimiz 20 mA=25 mm/sn ve 20 mA=50 mm/sn'lik 2 farklı modeldir. Tablo 3.1'de SKF cihazımızın ivmeölçer sensörünün genel özellikleri, Tablo 3.2'de B&K cihazımızın 4366 modelli ivme ölçer sensörünün genel özellikleri verilmiştir. Kullanılan sensörlerin limit değerleri yaptığımız ölçüm değerleri içerisinde olup her iki sensörden de beklenilen aynı değerleri vermesidir.

Tablo 3.1. SKF 20mA ivme ölçer sensörün genel özellikleri

Çalışma Sahası:	Fanlar, dişli kutuları, pompalar, elektrik motorları
En Düşük Frekans:	2Hz
En Yüksek Frekans:	1,000 Hz
MIN Sıcaklık:	-25°C
MAX Sıcaklık:	+90°C
Çıkış:	DC, 4-20mA
Giriş Tipi:	Üstten Giriş

Tablo 3.2. B&K 4366 model ivme ölçer sensörün genel özellikleri

AÇIKLAMA	DEĞER
Şarj Hassasiyeti	5 pC/ms^{-}
Voltaj Hassasiyeti	4 mV/ms^{-}
Rezonans Değeri	16 kHz
Frekans Aralığı -5%	0.02 Hz ile 5000 Hz
Frekans Aralığı -10%	0.1 Hz ile 8000 Hz
Direnç	1100 pF
Makimum dioganal hassasiyet	>2%
Piezoelektik malzemesi	Pz23
Geçici Sıcaklık Dalga Hassasiyeti	0,02 ms^{-2}/C^{o}
Manyetik Hassasiyet (50 Hz -0.03T)	1ms^{-2}/tesla
Akustik Hassasiyet	0,001 ms^{-2}
Kasa Malzemesi	Paslanmaz Çelik Alaşım
Ağırlık	28 gr

Bruel&Kjaer markalı cihazımızda kullanılan sensörümüz 25mm'sn modeli 62GB ingiliz konnektörlü, SKF markalı cihazımızda kullandığımız sensörümüz 1185C modeli sabit kablolu modeldir.

3.3.Titreşim Ölçüm Cihazları

Bu çalışmada kurulan 4 adet deney setinde 2 adet farklı cihaz ile ölçüm yapılmıştır. Buradaki amaç; hem farklı cihazlardan elde edilen değerlerin karşılaştırılmasının yapılması hem de cihazımızın birinde ekstradan bulunan kepstrum ölçümü özelliği ile dişli arızalarını incelerken farklı açılardan durum analizi yapabilmektir.

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan, SKF Marka titreşim ölçer cihazının özellikleri

Cihazın Markası	SKF
Cihazın Modeli	CMXA44
Cihazın Ölçüm Yöntemleri	Autospektrum
Cihazın Ölçüleri / ağırlığı	186*93*134 mm / 715 g
Cihazın İşlemcisi	400 MHz Intel Xscale PXA255

Tablo 3.4. Deneylerde kullanılan Bruel&Kjaer Marka titreşim ölçer cihazının özellikleri

Cihazın Markası	Bruel&Kjaer
Cihazın Modeli	Datacollector 2526
Cihazın Ölçüm Yöntemleri	Autospektrum - Kepstrum
Cihazın Ölçüleri / ağırlığı	215*90*108 mm / 925 g
Cihazın İşlemcisi	266 MHz Intel Xscale PXC125

3.4. Kullanılan Metodlar

3.4.1. Taguchi metodu

Bu çalışmada oluşturulan sistemlerde her bir arıza tek tek incelenebileceği gibi ikili ve üçlü kombinasyonlarda da incelenmelidir. Bunu iki ayrı sistemde 5 farklı frekansta (10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz) incelemek hem deney sayılarını çok yükselteceği gibi hem de her bir olay için ayrı bir grafik oluşacağından yapılan bu çalışmayı grafik yoğunluğu ile boğacaktır. Bunun için sadece gerekli olabilecek ve sonucumuza etki etmeyecek grafiklerin optimum düzeyde sınıflandırılması hedeflenmiştir.

Taguchi Yöntemi (Taguchi, 1986 ve Ross, 1988) yukarıda sayılan olumsuz yanları bulundurmaması nedeniyle sıklıkla kullanılan bir deney tasarımı yöntemidir. Bu yöntemde veriler ortogonal diziler kullanılarak elde edilmektedir. Ortogonal diziler daha az sayıda ve daha ucuza mal olan deneyler yapılmasına, böylece deney tasarımı uygulamalarının yaygınlaşmasına imkan sağlamaktadır [21]. Taguchi Yöntemi sinyal gürültü oranı (SN) kullanarak yanıt değişkenin hem ortalaması hem de varyansı ile ilgili bilgilere yoğunlaşmaktadır. Bu yöntem kullanılarak elde edilen en iyi faktör/seviye kombinasyonu, yanıt ortalamasını hedef değerine taşırken; bir yandan da değişkenliğinin azaltılmasını sağlar [22].

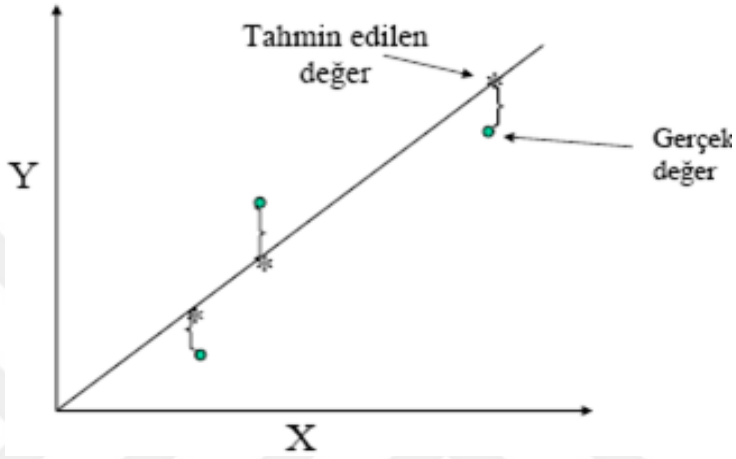
Taguchi yöntemi birçok alanda kullanılmıştır. Bununla birlikte, yayınlanmış çalışmalar çoğunlukla tek bir başarım özelliğinin en iyileşmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Oysa, gerçek yasam problemlerini genellikle birdençok basarım özelliğinin eş zamanlı olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Deney tasarımı çalışmasının tek basarım özelliği göz önüne alınarak gerçekleştirilmesi durumunda diğer basarım özellikleri için istenenden uzak sonuçlar elde edilebilmektedir. Çoklu basarım özelliklerinin en iyileşmesi için önerilmiş değişik yaklaşımlar bulunmaktadır. Tong ve digerleri (1997) ve Antony (2001) tarafından önerilen Eklemeli Yöntem kalite kayıplarının normalizasyonu ve önem katsayılarıyla çarpılarak tekbir sinyal gürültü oranı altında toplanarak analizine dayanmaktadır. Aynı şekilde Lin ve diğerleri (2000) tarafından önerilen yöntem de Bulanık Mantık kullanılarak çoklu basarım özelliklerine ait basarım özelliklerinin tek bir sinyal gürültü oranı altında toplamayı öngörmektedir. Bunun yanında karmasık analitik yöntemler ya da Genetik Algoritmalar ve Sinir Agları gibi yapay zeka yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [23].

3.4.2. Regresyon analizi

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler ya da kestirimler yapabilmek amacıyla yapılır. Bir regresyon modeli oluşturulurken genelde en-küçük kareler ve en büyük olabilirlik teknikleri olarak bilinen iki yaklaşımdan birisi kullanılır. Eğer hata teriminin normal dağılım göstermesi seklinde bir varsayım varsa en büyük olabilirlik, hata teriminin dağılışı ile

ilgili herhangi bir varsayım söz konusu değilse en-küçük kareler tekniği kullanılarak parametreler tahmin edilir. En küçük kareler yönteminde;

Kurulan regresyon modeli ilgilenilen problemle ilgili örnek olarak alınmış gözlem değerleri kullanılarak hesaplanmaya çalışılır. Bu nedenle kurduğumuz modeldeki değerler tahmini değerler olacaktır.



Şekil 3.5. Regresyon analizinde gözlem yapılan değer ile gerçek değer arasındaki ilişki

Bu çalışmada kurulan sistemlerde alınan değerler, bu yöntemi kullanan SPSS programının IBM tarafından üretilen 17.0.3 nolu versiyonunu kullanarak regresyon analizi uygulanmıştır. SPSS isimli programın isminin açılımı ‘’Statistical Package for the Social Sciences’’ olup genelde istatiksel yöntemlerde kullanılır. Farklı değerleri bir bütün olarak ele alıp bir takım çıktılar oluşturulur. Bunun için katsayılara bağlı bir takım denklemler ortaya çıkabilir.

3.4.3. Yapay sinir ağları

Donald Hebb (1949) bugünün sinir ağı teorisinin babası olarak bilinmektedir. Nörolog olan Hebb, beynin nasıl öğrendiği ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarına beynin en temel birimi olan sinir hücresini ele alarak başlamıştır. İki sinir hücresinin birbirleriyle nasıl bir korelasyon sergilediklerini incelemiş ve sinir ağı teorisini bu temel üzerine oturtmuştur. Bu temel kuskusuz tek gerçek değildir. Çünkü beynin, nasıl bir çalışma sergilediği şu an dahi teoriler yardımıyla açıklanmaktadır. Ancak Hebb’in yardımıyla bu fikir ile yola çıkılmış ve günümüzdeki yüzlerce ayrı teoriyle geniş bir yelpazeye hitap eder hale gelmiştir.

Şu an gerçek yasamda kullanılan ve başarı oranı %99'lar ile ifade edile gelen bir sürü yapay sinir ağı modeli mevcuttur. Tüm geliştirilen modeller bilgisayar dünyasında "çözümsüz" veya "np karmaşık" olarak nitelendirilen problemlerin çözümünü hedeflemekte ve hatta bir kısmını başarıyla çözmektedir [24].

Yapay sinir ağı; insan beyninin sinir hücrelerinden oluşmuş katmanlı ve paralel olan yapısının tüm fonksiyonlarıyla beraber sayısal dünyada gerçeklenmeye çalışılan modellenmesidir. Sayısal dünya ile belirtilmek istenen donanım ve yazılımdır. Bir başka ifadeyle yapay sinir ağı hem donanımsal olarak hem de yazılım ile modellenebilir. Bu bağlamda, yapay sinir ağları ilk elektronik devreler yardımıyla kurulmaya çalışılmış ancak bu girişim kendini yavaş yavaş yazılım sahasına bırakmıştır. Böylesi bir kısıtlanmanın sebebi; elektronik devrelerin esnek ve dinamik olarak değiştirilememesi ve birbirinden farklı olan ünitelerin bir araya getirilememesi olarak ortaya konmaktadır.

Yazılım yardımıyla daha kolay kurulabilen yapay sinir ağları, yine yazılımsal olarak çalıştırılabilmesi de rahat olabilecek modellerdir. Ancak elektronik devrelerle kurulan yapay sinir ağı modelleri doğal olarak yazılım ile kurulan modellere kıyasla daha hızlı sonuca ulaşabilecektir. Bu sebepten dolayı, yapay sinir ağları günümüzde yazılımsal olarak kurulup, çalıştırılıp, test edilmekte ve gerekli tüm değişiklikler ve dinamik güncellemeler yapılmakta, ardından sonuçlara göre karar verilmektedir. Eğer elde edilen sonuçların başarısı %99'la ifade edilebiliniyorsa, o zaman gerekli görüldüğü takdirde model, elektronik devreler üzerine aktarılmaya çalışılabilir. Böylece yapay sinir ağı modelleri, gerçek yasama uygulanmak üzere fiziksel bir platform üzerinde hazır hale getirilmiş olmaktadır.

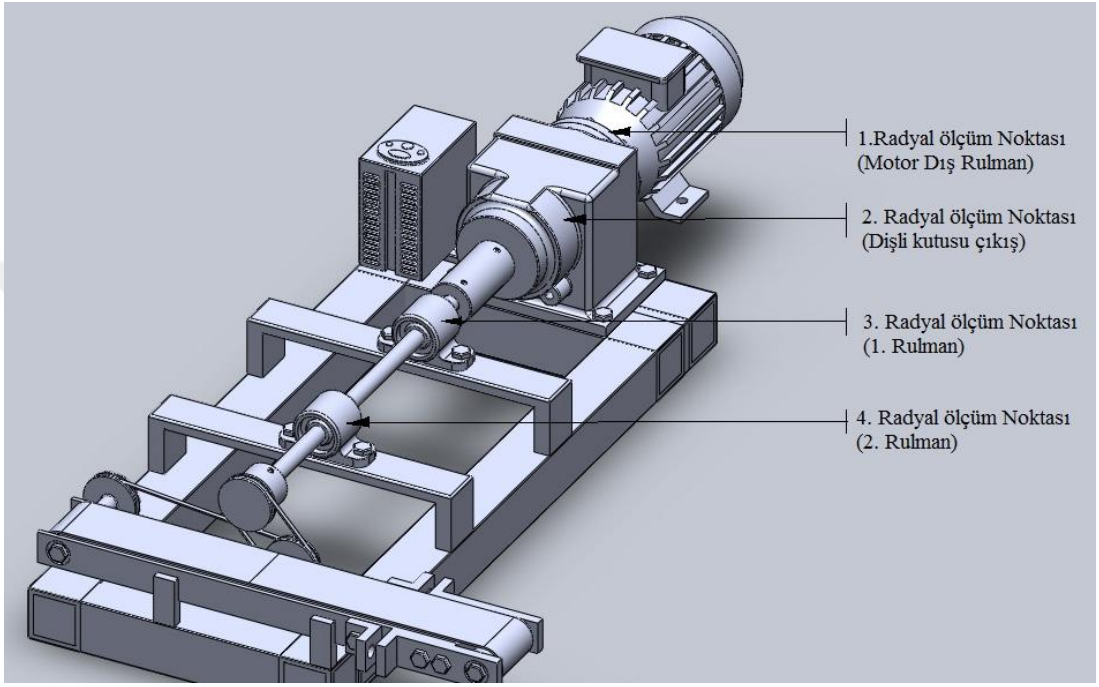
3.4.4. Autospektrum grafikleri

Fourier analizörlerinde, dijital işaret işleme teknikleri kullanılarak ölçmeler yapılmaktadır. Bunlarla çok küçük titreşimler ölçülebildiği gibi , gürültülü çalışma konumundaki makinelerde ölçülebilmektedir. Ayrıca iki veya daha fazla titrşim arasındaki ortak özellik de Fourier analizörleri ile belirlenebilir. Spektrum analizöründe harmoniklerin genlik ve enerjileri hakkında bilgi edinilir ve cihaz aracılığı ile bilgisayar ekranında bir grafik görüntü elde edilebilir. Spektrum analizörü sınırları, filtre sayısına ve filtrelerin bant genişliklerine bağlıdır.

Kullanacağımız cihazlardaki bir analizörde 32 filtre bulunur. Spektrum analizöründe, temel ve 2. harmoniklerin genlikleri elde edilir. Belirlediğimiz frekanslara kadar titreşim durumlarındaki genlik tespitleri yapılır. Kullandığımız 2 adet ölçüm cihazı da bize sistemlerimizden spectrum garafikleri verecektir. Bu anlayışta, bölüm 2 de bahsedilen balansızlık, kaplin kaçıklığı, rulman arızası ve dişli kutusu arızası gibi arızaları bu spectrum grafiklerinde gösterdikleri pikleri yorumlayarak ölçüm yaptığımız makinenin ileride ne gibi arızalar vereceğini tahmin edilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

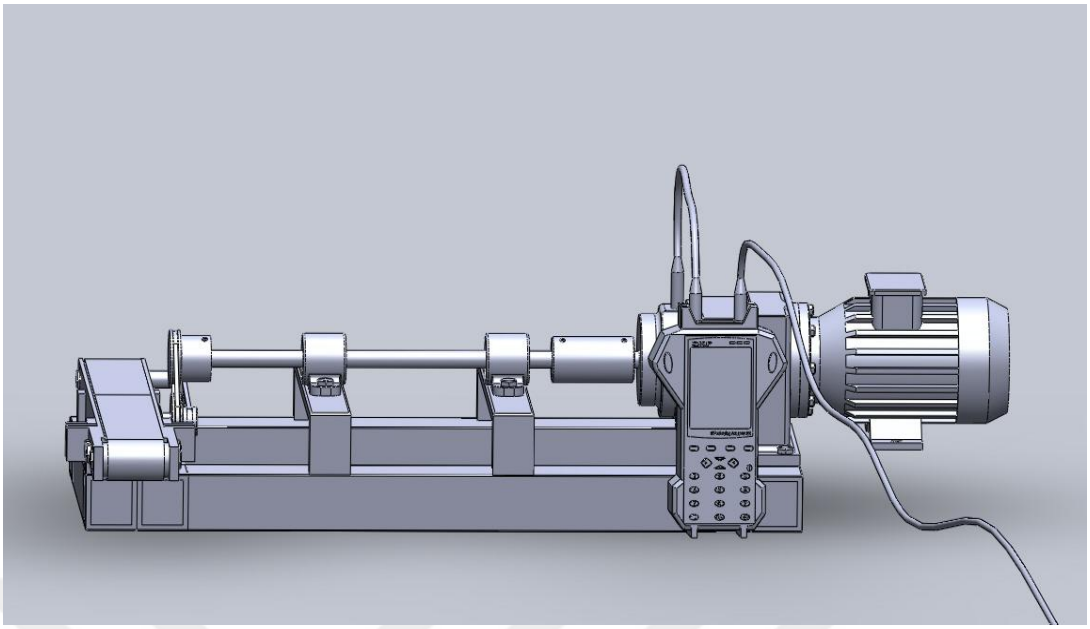
4.1. Kurulan Sistemlerde Verilen Arızalar



Şekil 4.1. Sistem 1 için ölçüm alınan noktalar

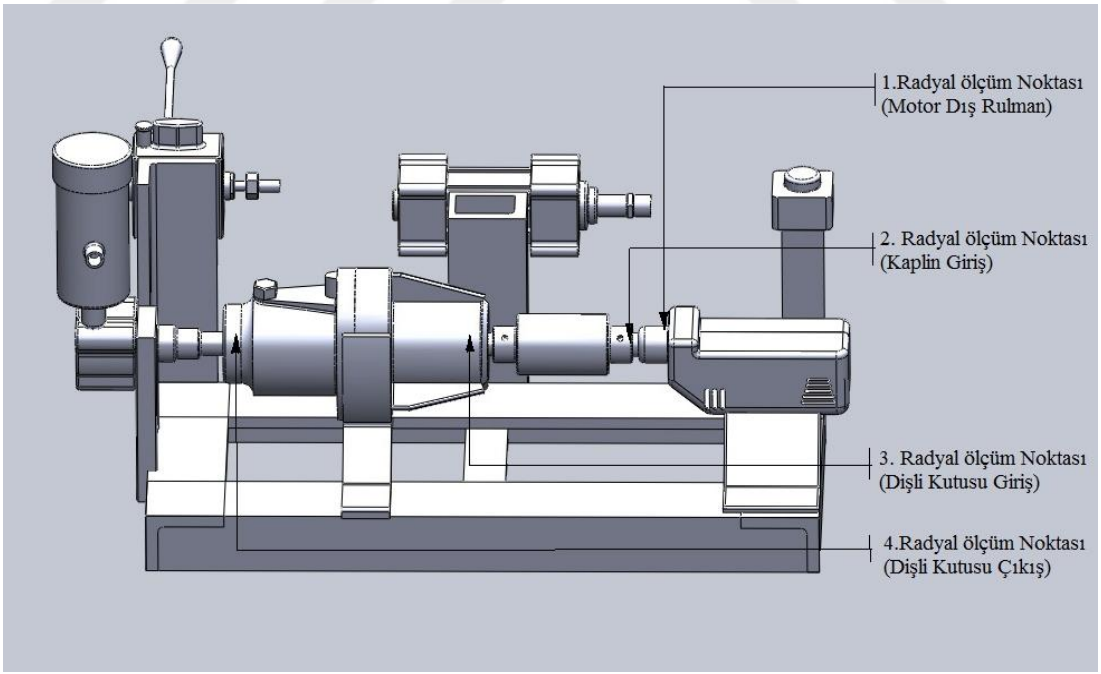
Şekil 4.1'de sistem 1 de ölçüm alınan noktalar verilmiştir. Bu noktaların hepsinin ortak özelliği ölçüm alınan temas noktası altında mutlaka dönen bir dönel eleman bulunmaktadır. Böylelikle ivme ölçerimiz bu noktalardan aldığı sinyalleri işleyip bize spektrum grafikleri halinde verir.

Birinci ölçüm noktamız motor çıkışındaki rulmandır. Bu bölgedeki rulman yatağından radyal eksende spektrum ölçümleri alınır. İkinci ölçüm noktamız ise dişli kutusu çıkışındaki rulman yatağıdır. Yine bu bölge üzerinden radyal ölçümler alınır. Üçüncü ve dördüncü ölçüm noktalarımız 1. ve 2. rulmanlarımızdır. Bu rulmanlarında üzerinden ivme ölçerimizle radyal ölçümler alınarak irdelenir.



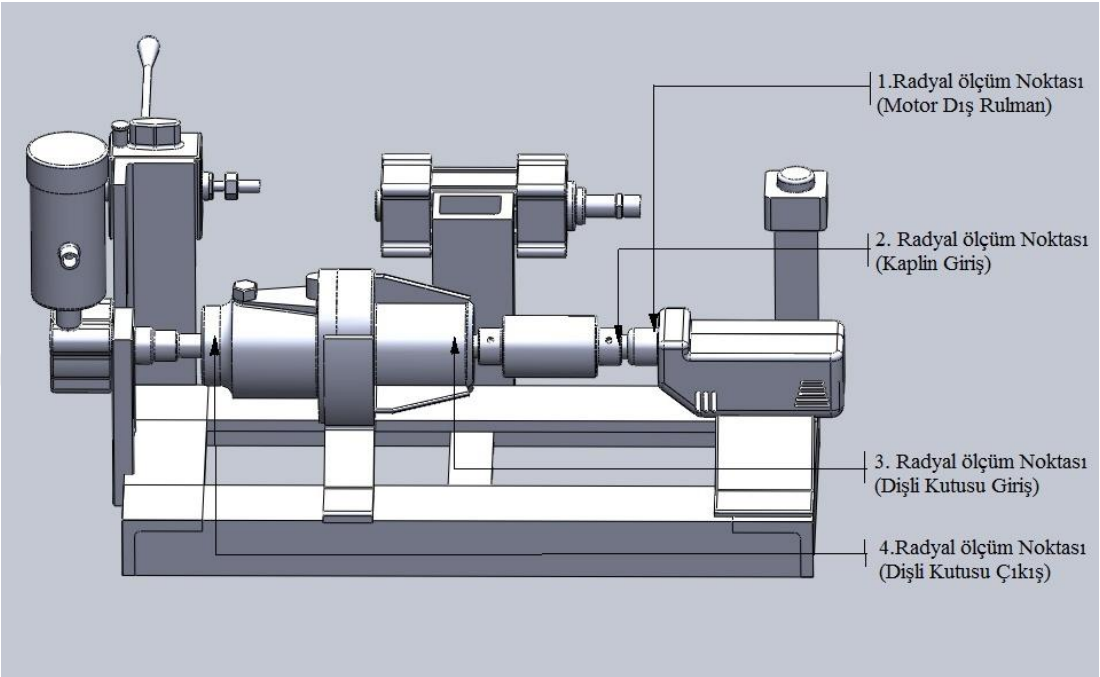
Şekil 4.2. Sistem 1'e SKF markalı cihazın bağlı hali ve cihazın konumu

Şekil 4.2'de ise Sistem 1'de dişli kutumuza SKF marka cihazımızın bağlı haldeki konumu gözükmektedir. Aynı zamanda cihazımızdan bilgisayarımıza da bir data aktarım kablosu gitmektedir.



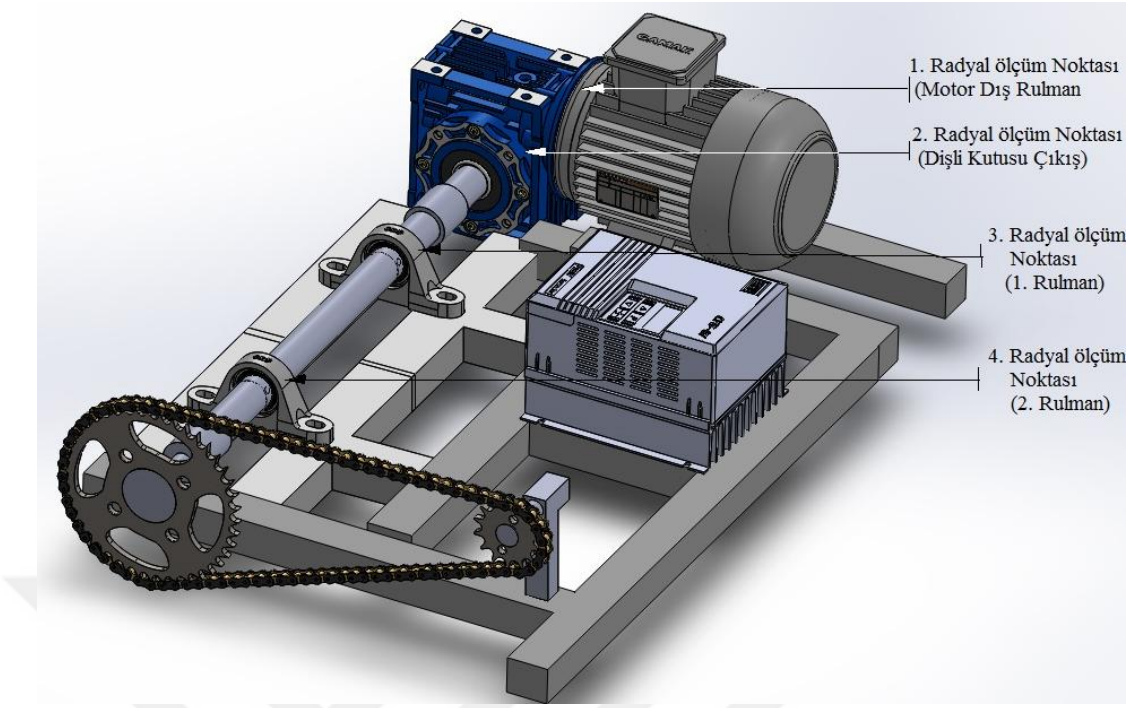
Şekil 4.3. Sistem 2'deki ölçüm noktaları

Şekil 4.3’ de gösterildiği gibi kaplin kaçıklığını görebilmek için kaplin girişinden, dişli çark arızası ve rulman arızalarını tespit edebilmek için ise dişli kutusunun hem girişinden hem de çıkışından ölçüm alarak değerleri irdelenmelidir.



Şekil 4.4. Sistem 3 için ölçüm noktaları

Şekil 4.4’de sistem 3 için kullanılan ölçüm noktaları verilmiştir. Bu sistemin sistem 1 ve sistem 2’den farkı motor çıkışına konulan bir dişli kutusu ile sistemin yönü değişmiştir. Bu nedenle bu sistemde 2 eksenli dişli kutularını daha rahat irdelenip deney sonuçları karşılaştırılabilinir.



Şekil 4.5. Sistem 4 için ölçüm noktaları

Şekil 4.5'te yine motor çıkışında eksen değiştiren çift eksenli bir dişli kutusu içeren 4. Sistemimizde kullanacak olduğumuz ölçüm noktaları verilmiştir.

Böylelikle Sistem1 ve Sistem 2'de alacağımız ölçümler ile motordan çıkan, eksen değişmeden tek eksenli bir dişli kutusu kullanarak oluşan sistemleri incelenebileceği gibi Sistem 3 ve Sistem 4 ile de motordan çıktıktan sonra hareketin yön değiştirdiği yani çift eksenli dişli kutularını içeren sistemleri incelenecektir.

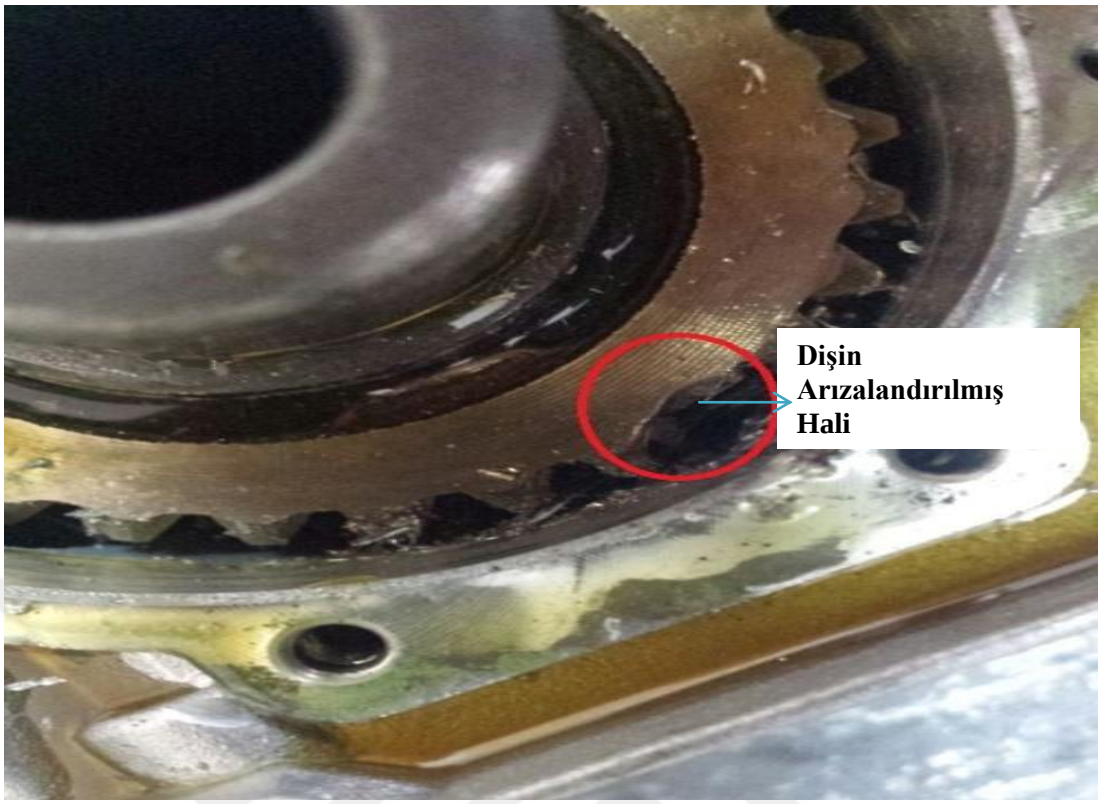
4.2. Sistemler Üzerinde Hasar Verilerek Sistemlerde Titreşim Miktarlarının Değiştirilmesi

Oluşturulan 4 sistemde de öncelikle başlangıç değerlerini ölçebilmek için sistemler ideal duruma en yakın konumda çalıştırılarak ölçümlerimiz yapılıp değerler alınır. Sonra elimizdeki sistemlere teker teker her bir durum için bilerek hasar oluşturulur ve her aşamada tekrar tekrar ölçüm alınarak elimizdeki veri bankası oluşturulur.



Şekil 4.6. Sistem 1 dişlisine matkap tezgahında verilen hasar

Şekil 4.6'da sistem 1 de kullanılan dişli kutusu matkap tezgahında bir dişi yok edilerek arızalandırılmıştır. Burada bir diş komple alınarak bu bölgenin karşı sonsuz dişliye teması anlarında titreşim farklılığı oluşmuştur.



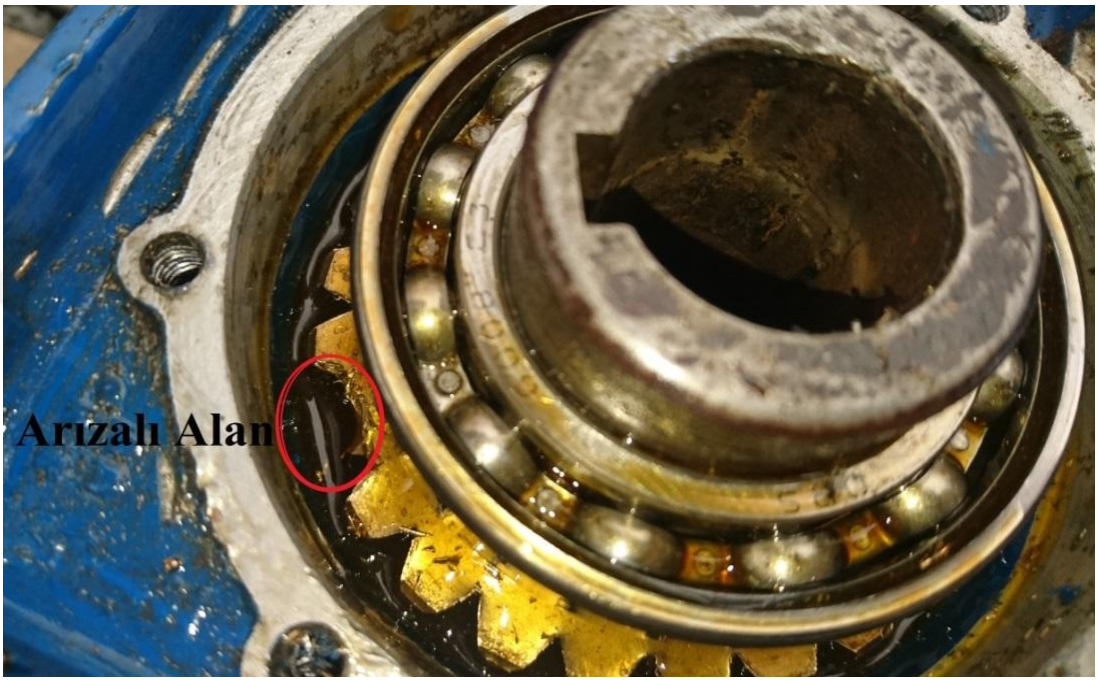
Şekil 4.7. Dişin hasar verilmiş hali

Şekil 4.7'de sistem 1 deki dişli kutusu matkap tezgahına bağlanarak dişlilerde biri tamamen yok edilmiştir. Sistemdeki dişli bir eksik diş ile sisteme tekrar bağlanarak yapılan ölçüm sonuçları toplanmıştır.



Şekil 4.8. Sistem 3'deki Rulman Arızası

Şekil 4.8'de sistem 3 de rulman sökülerek dış bileziğe 0.8 x 1.6 cm büyüklüğünde baskı oluşturularak çökme sağlanmış, böylelikle dış bilezik hasarlandırılmıştır. Her döngüde bu hasarlı bölgeden geçen bilyaların ivme ölçerden geçtiği andaki titreşim değişimleri amplitüd olarak kurulan sisteme her frekans için ayrı ayrı yansımış bunlar teker teker not edilmiştir.



Şekil 4.9. Sistem 3'deki Dişli Arızası

Şekil 4.9'da yine sistem 3'deki dişli kutusu matkap tezgahına bağlanarak 1 adet diş alınmış, dişli kutusu kapatılarak sisteme takılmış ve bu şekilde alınan titreşim ölçümlerinin amplitüd değişimleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.10. Kaplin arızası

Şekil 4.10'da kaplinin iki tarafındaki vidalarda sökülerek iki tarafta da 5 ^{o}'lik serbestisite sağlanarak kaplinin başlangıç dinamiği bozulmuştur.

Tüm bu parçalara arızaları verdikten sonra alınan deneyler, not edilerek Taguchi yöntemi ile işlenir.

4.3. Sistem 1 İçin Ölçülen Değerler

4.3.1. Rulman 1 arızası sonucunda alınan deney sonuçları

Öncelikle kullandığımız kısaltmaları açıklarsak:

A: Arızalı parçadan alınan ölçüm (mm/s)

Ao: Arızalı parçanın arıza yapmadan önceki amplitüd değeri (mm/s)

Xo: Ölçüm alınan Parçanın arıza öncesi orijin değeri (mm/s)

L: Arıza yapan parça ile ölçüm alınan parça arasındaki uzaklık

X: ölçüm alınan parçadaki amplitüd değeri

Tablo 4.1. Rulman1 arızası sonucunda alınan deney sonuçları

A	Ao	Xo	L	X	Arızalı Parça(A)	Ölçüm Alınan Yer(X)
1,69	0,74	0,76	0,195	2,0716	Rulman 1	Rulman 2
1,69	0,74	1,02	0,275	2,9650	Rulman 1	Kaplin
1,69	0,74	1,05	0,415	3,3900	Rulman 1	Dişli kutusu
2,21	0,88	0,89	0,195	2,6700	Rulman 1	Rulman 2
2,21	0,88	1,08	0,275	3,4552	Rulman 1	Kaplin
2,21	0,88	1,07	0,415	3,8010	Rulman 1	Dişli kutusu
2,34	0,97	0,99	0,195	2,8527	Rulman 1	Rulman 2
2,34	0,97	1,12	0,275	3,4417	Rulman 1	Kaplin
2,34	0,97	1,08	0,415	3,6834	Rulman 1	Dişli kutusu
2,47	1,08	1,11	0,195	3,0309	Rulman 1	Rulman 2
2,47	1,08	1,17	0,275	3,4098	Rulman 1	Kaplin
2,47	1,08	1,11	0,415	3,5892	Rulman 1	Dişli kutusu
2,47	1,17	1,19	0,195	2,9900	Rulman 1	Rulman 2
2,47	1,17	1,19	0,275	3,2000	Rulman 1	Kaplin
2,47	1,17	1,13	0,415	3,3727	Rulman 1	Dişli kutusu

4.3.2. Rulman 2 arızası sonucunda alınan deney sonuçları

Tablo 4.2. Rulman 2 arızası sonucunda alınan deney sonuçları

A	Ao	Xo	L	X	Arızalı Parça(A)	Ölçüm Alınan Yer(X)
1,64	0,76	0,74	0,195	1,9012	Rulman 2	Rulman 1
1,64	0,76	1,02	0,080	2,3714	Rulman 2	Kaplin
1,64	0,76	1,05	0,220	2,7598	Rulman 2	Dişli kutusu
1,88	0,89	0,88	0,195	2,2198	Rulman 2	Rulman 1
1,88	0,89	1,08	0,080	2,4613	Rulman 2	Kaplin
1,88	0,89	1,07	0,220	2,7526	Rulman 2	Dişli kutusu
2,06	0,99	0,97	0,195	2,4094	Rulman 2	Rulman 1
2,06	0,99	1,12	0,080	2,5123	Rulman 2	Kaplin
2,06	0,99	1,08	0,220	2,7368	Rulman 2	Dişli kutusu
2,25	1,11	1,08	0,195	2,6122	Rulman 2	Rulman 1
2,25	1,11	1,17	0,080	2,5592	Rulman 2	Kaplin
2,25	1,11	1,11	0,220	2,7403	Rulman 2	Dişli kutusu
2,42	1,19	1,17	0,195	2,8405	Rulman 2	Rulman 1
2,42	1,19	1,19	0,080	2,6108	Rulman 2	Kaplin
2,42	1,19	1,13	0,220	2,8012	Rulman 2	Dişli kutusu

4.3.4. Kaplin arızası sonucunda alınan deney sonuçları

Tablo 4.3. Kaplin arızası sonucunda alınan deney sonuçları

A	Ao	Xo	L	X	Arızalı Parça (A)	Ölçüm Alınan Yer(X)
2,48	1,02	0,74	0,275	2,2900	Kaplin	Rulman 1
2,48	1,02	0,76	0,080	1,9905	Kaplin	Rulman 2
2,48	1,02	1,05	0,140	2,9089	Kaplin	Dişli kutusu
2,57	1,08	0,88	0,275	2,6658	Kaplin	Rulman 1
2,57	1,08	0,89	0,080	2,2835	Kaplin	Rulman 2
2,57	1,08	1,07	0,140	2,9000	Kaplin	Dişli kutusu
2,68	1,12	0,97	0,275	2,9554	Kaplin	Rulman 1
2,68	1,12	0,99	0,080	2,5556	Kaplin	Rulman 2
2,68	1,12	1,08	0,140	2,9432	Kaplin	Dişli kutusu
2,77	1,17	1,08	0,275	3,2586	Kaplin	Rulman 1
2,77	1,17	1,11	0,080	2,8348	Kaplin	Rulman 2
2,77	1,17	1,11	0,140	2,9902	Kaplin	Dişli kutusu
2,89	1,19	1,17	0,275	3,6201	Kaplin	Rulman 1
2,89	1,19	1,19	0,080	3,1189	Kaplin	Rulman 2
2,89	1,19	1,13	0,140	3,1257	Kaplin	Dişli kutusu

4.3.5. Dişli kutusu arızası sonucunda alınan deney sonuçları

Tablo 4.4. Dişli kutusu arızası sonucunda alınan deney sonuçları

A	Ao	Xo	L	X	Arızalı Parça (A)	Ölçüm Alınan Yer(X)
3,450	1,05	0,74	0,415	3,4378	Dişli kutusu	Rulman 1
3,450	1,05	0,76	0,220	3,0442	Dişli kutusu	Rulman 2
3,450	1,05	1,02	0,140	3,8186	Dişli kutusu	Kaplin
3,486	1,07	0,88	0,415	4,0512	Dişli kutusu	Rulman 1
3,486	1,07	0,89	0,220	3,5342	Dişli kutusu	Rulman 2
3,486	1,07	1,08	0,140	4,0000	Dişli kutusu	Kaplin
3,547	1,08	0,97	0,415	4,5042	Dişli kutusu	Rulman 1
3,547	1,08	0,99	0,220	3,9648	Dişli kutusu	Rulman 2
3,547	1,08	1,12	0,140	4,1902	Dişli kutusu	Kaplin
3,565	1,11	1,08	0,415	4,9054	Dişli kutusu	Rulman 1
3,565	1,11	1,11	0,220	4,3462	Dişli kutusu	Rulman 2
3,565	1,11	1,17	0,140	4,2812	Dişli kutusu	Kaplin
3,592	1,13	1,17	0,415	5,2602	Dişli kutusu	Rulman 1
3,592	1,13	1,19	0,220	4,6117	Dişli kutusu	Rulman 2
3,592	1,13	1,19	0,140	4,3100	Dişli kutusu	Kaplin

4.3.6. SPSS programı ile pearson kolerasyonu ve regresyon analizi

SPSS programı kullanarak öncelikle X bağımlı değişkeni ile bağımsız değişkenler; A, Ao, Xo için teker teker aralarındaki kolerasyon bulunması gerekmektedir. Bunun için kullanılacak yöntem pearson kolerasyonu olup, bu kolerasyonun uygulanma amacı bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler ile ilişkili olarak -1 ile 1 arasında değerler vermesi -1 için tam ters orantı söz konusuyken 1 için doğru orantı söz konusu olmasıdır. Ayrıca sonrasında regresyon analizi ile bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arsındaki katsayı bulunacaktır.

Tablo 4.5. X bağımlı değişkeni ile Xo bağımsız değişkeni arasındaki ilişkiyi gösteren Pearson kolerasyon tablosu

KOLERASYON	**X**	**Xo**
Pearson kolerasyonu	1,000	,988**
Kareler toplamı	2168,47	18,727
Kovaryans	86,885	,475
N (girilen değer sayısı)	88	88
Pearson kolerasyonu	,988	1,000
Kareler toplamı	18,727	,175
Kovaryans	,475	8,905E-03
N (girilen değer sayısı)	88	88
Kolerasyon 0,01 düzetinde hata payı ile uygulanmıştır		

Tablo 4.6. X bağımlı değişkeni ile A bağımsız değişkeni arasındaki ilişkiyi gösteren Pearson kolerasyon tablosu

KOLERASYON	X	A
Pearson kolerasyonu	1,000	,978**
Kareler toplamı	2147,85	18,905
Kovaryans	88,721	,247
N (girilen değer sayısı)	88	88
Pearson kolerasyonu	,978	1,000
Kareler toplamı	18,905	,147
Kovaryans	,247	8,905E-03
N (girilen değer sayısı)	88	88
Kolerasyon 0,01 düzetinde hata payı ile uygulanmıştır		

Tablo 4.7. X bağımlı değişkeni ile Ao bağımsız değişkeni arasındaki ilişkiyi gösteren Pearson kolerasyon tablosu

KOLERASYON	X	Ao
Pearson kolerasyonu	1,000	,982**
Kareler toplamı	2186,88	16,885
Kovaryans	86,885	,488
N (girilen değer sayısı)	88	88
Pearson kolerasyonu	,982**	1,000
Kareler toplamı	16,885	,175
Kovaryans	,488	8,905E-03
N (girilen değer sayısı)	88	88
Kolerasyon 0,01 düzetinde hata payı ile uygulanmıştır		

Uygulanan 3 pearson kolerasyonunda da %1 güven düzeyi uygulanmış olup değerler 1 ve -1 değerlerine çok yakındır. En uzaksak değer olan 0.978, 1'den 0,022 kadar uzak olup bulunan ampirik formülün rahat kullanılabilmesi için (kabul edilen sapma bulunan genlik değerleri arasında ihmal edilebilir değerlerdir) ve istatistik biliminde kabul edilen sapma değerleri olduğu bilindiğinden 0,022 sapma ile X bağımlı değişkeni ile A ve Ao bağımsızlık değerleri arasında kabul edilen 1 kolerasyon katsayısına göre tam bir doğru orantı, X bağımlı değişkeni ile Ao bağımsız değişkeni arasından kabul edilen -1 kolerasyon katsayısı ile tam bir ters orantı olduğu görülür. Buradan sonra Y=a+bx regresyon formülüne göre x yerine A ve Xo ile pozitif yönde bir orantı kurulurken yine x yerine Ao arasında negatif yönlü bir orantı kurulur.

Tablo 4.8'de Regresyon analizinde Y yerine X değerleri girilirken, X_1 yerine ise bu kurulan orantı değerleri girilir. Burada SPSS programında regression yaptığımızda ve bulunan değerler üzerinden GOIP analizi oluşturduğumuzda a ihmal edilebilecek kadar küçük ve b değeri (coefficients) sütununda % 1 hata payı ile 1+ 0,195; 1+ 0,275; 1+0,415 olarak görülür.

Yine kurulan sistemdeki uzunluklar için %1 hata payı, en büyük uzaklık olarak 0,41 mm'ye denk geleceğinden rahatlık ile ihmal edilebilir.

Tablo 4.8. X bağımlı değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki katsayıyı regresyon analizi ile tayin etme

Model	Katsayılar (standartlaştırılmamış)	Standart Sapma	Girdi ve gizli katman arası sigmoid fonksiyonu sapma	Sonuç:
1. sabit	,00231		0,001	a ihmal
	1,19625	-,320	0,0023	b 1+0,195 yakınsak
2. sabit	,00172		0,001	a ihmal
	1,27732	-,280	0,0012	b 1+0,275 yakınsak
3. sabit	,00242		0,001	a ihmal
	1,41645	-,300	0,0018	b 1+0,415 yakınsak

Buradaki sistem arızalı bir parça, o parça üzerinden alınan random genlik değerleri ve arıza yapan parça ile birlikte diğer parçalardan alınan genlik değerlerinin ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur. Örneğin Rulman 1 arızalıyken Rulman 1 üzerinden alınan değerler ile kaplin ve Dişli kutusu üzerinden alınan değerler ve bu parçalar arızalı değilken oluşan orjin değerler karşılaştırılmıştır. L uzunluğu ise arızalı parça ve bu parça ile ölçüm alınan parçanın arasındaki uzaklığı simgelemektedir. Sonuç olarak Pearson Kolerasyonu ve Regresyon Analizi arka arkaya uygulandığında Ampirik Formül 4.1 elde edilmektedir.

Burada:

$$X=\left(\frac{A}{A_0}(1+L)\right)X_o \qquad (4.1)$$

4.4. Sistem 1 İçin Hesaplamalar

Rulman 2'nin Rulman 1'e etkisi

$$X=\left(\frac{A_{r2}}{A_{r20}}(1+L)\right)X_{ro}$$

$$X=\left(\frac{1,64}{0,76}(1+0,195)\right)0,74$$

$$X=1,9012$$

Kaplin'in Rulman 1'e etkisi

$$X=\left(\frac{A_{k}}{A_{k0}}(1+L)\right)X_{ro}$$

$$X=\left(\frac{2,48}{1,02}(1+0,275)\right)0,74$$

$$X=2,29$$

Dişli kutusu'nun Rulman 1'e etkisi

$$X=\left(\frac{A_{g}}{A_{go}}(1+L)\right)X_{ro}$$

$$X=\left(\frac{3,45}{1,05}(1+0,415)\right)0,74$$

$$X=3,4405$$

Rulman 1'in arızası durumunda Rulman 1'den alınan ölçüm

$$X=1,69$$

Kaplin Ve Dişli kutusu Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$$X=\left(\frac{A_{k}}{A_{ko}}(1+L)+\frac{A_{g}}{A_{go}}(1+L)\right)A_{ro}$$

$$X=X_{kr1}+X_{gr1}=2,29+3,4405$$

$$=5,73059$$

Rulman 1 ve Dişli kutusu birlikte arızalıyken rulman 1'e etkileri

$$X=\left(\frac{A_{r1}}{A_{r1o}}(1+L)+\frac{A_g}{A_{go}}(1+L)\right)A_{r1o}$$

$$X=A_g+A_{r1}=3.4405+1.69$$

$$=5.1305$$

Rulman 1 ve kaplin birlikte arızalıyken rulman 1'e etkileri

$$X=\left(\frac{A_{r1}}{A_{r10}}(1+L)+\frac{A_k}{A_{ko}}(1+L)\right)A_{r1o}$$

$$X=A_k+A_{r1}=2,29+1,69$$

$$=3,98$$

Rulman 1, Dişli kutusu ve Kaplin Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$$X_{kgr1}=A_k+A_{r1}+A_g$$

$$=2,29+3,4405+1,69$$

$$=7,4205$$

Faktör ve Seviyelerin belirlenmesinde ; gerekli yükler ve bu yüklere göre seviyeler belirlenmelidir. Faktör olarak; Yük 1 için seviye 1 , Yük 2 için seviye 2, yük olarak yük 1 ve yük 2 kabul edilip, makine arızaları olarak da rulman arızasına A, kaplin arızasına B, dişli arızasına C denilebilir.

Gözlem Sayısı =10 alınsın.

Serbestlik Derecesi 3-1=2

Toplam Serbestlik Derecesi =2+2+2+2=8 (4 Ayrı Makine İçin)

Arızaların sonuçta alınan random ölçüme etkileri;

Faktörler (k=3)

A: Rulman Arızası

B: Kaplin Kaçıklığı

C: Dişli Arızası

Tablo 4.9. Taguchi metodu ile deney tasarımı

SIRA	A	B	C	GÖZLEM DEĞERİ (RANDOM ÖLÇÜM DEĞERİ)
1	-	-	-	0,7400 mm/s
2	-	-	+	3,4378 mm/s
3	-	+	-	2,2900 mm/s
4	-	+	+	5,7305mm/s
5	+	-	-	1,6900mm/s
6	+	-	+	5,1305mm/s
7	+	+	-	3,9800 mm/s
8	+	+	+	7,4205 mm/s

A'nın Gözlem Değerine Etkisi:

A_1=(0,74+3,4378+2,29+5,7305)/4=3,049575

A_2= (1,69+5,1305+3,98+7,4205)/4=4,55525

A'nın Net Ortalama Etkisi:

Etki A = A_2-A_1 =4,55525-3,049575=1,505675

B'nin Gözlem Değerine Etkisi:

B_1=(0,74+3,4378+1,69+5,1305)/4= 2,749575

B_2= (2,29+5,7305+3,98+7,4205)/4= 4,85525

B’nin Net Ortalama Etkisi:

Etki B= $B_2 – B_1$ = 4,85525-2,749575=2,105675

C’nin Gözlem Değerine Etkisi:

C_1= (0,74+2,29+1,69+3,98) = 2,175

C_2= (3,4378+5,7305+5,0305+7,4205)/4=5,404825

C’nin Net Ortalama Etkisi

Etki C= $C_2 – C_1$ = 5,404825-2,175=3,229825

AB’NİN Gözlem değerine Etkisi:

ETKİ AB = (+0,74+3,4378-2,29-5,7305-1,69-5,1305+3,98+7,4205)/4= 0,184325

AC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ AC= (+0,74-3,4378+2,29-5,7305-1,69+5,1305-3,98+7,4205)/4 = 0,185675

BC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ BC=(+0,74-3,4378-2,29+5,7305+1,69-5,1305-3,98+7,4205)/4= 0,185675

ABC’NİN Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ ABC=(-0,74+3,4378+2,29-5,7305+1,69-5,1305-3,98+7,4205)/4 = -0,18567

A’nın Gözlem Değerine Etkisi:

A_1=(0,74+3,4378+2,29+5,7305)/4=3,049575

A_2= (1,69+5,1305+3,98+7,4205)/4=4,55525

A’nın Net Ortalama Etkisi:

Etki A = A_2-A_1 =4,55525-3,049575=1,505675

B’nin Gözlem Değerine Etkisi:

B_1=(0,74+3,4378+1,69+5,1305)/4= 2,749575

B_2= (2,29+5,7305+3,98+7,4205)/4= 4,85525

B’nin Net Ortalama Etkisi:

Etki B= $B_2 – B_1$ = 4,85525-2,749575=2,105675

C’nin Gözlem Değerine Etkisi:

C_1= (0,74+2,29+1,69+3,98) = 2,175

C_2= (3,4378+5,7305+5,0305+7,4205)/4=5,404825

C’nin Net Ortalama Etkisi

Etki C= $C_2 – C_1$ = 5,404825-2,175=3,229825

AB’NİN Gözlem değerine Etkisi:

ETKİ AB = (+0,74+3,4378-2,29-5,7305-1,69-5,1305+3,98+7,4205)/4= 0,184325

AC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ AC= (+0,74-3,4378+2,29-5,7305-1,69+5,1305-3,98+7,4205)/4 = 0,185675

BC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ BC=(+0,74-3,4378-2,29+5,7305+1,69-5,1305-3,98+7,4205)/4= 0,185675

ABC’NİN Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ ABC=(-0,74+3,4378+2,29-5,7305+1,69-5,1305-3,98+7,4205)/4 = -0,185

4.4.1. Sistem 1 için L8 tablosu ve sonuçların etkileri

Tablo 4.10. Taguchi Metodu L8 Tablosu

		A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
SIRA	GÖZLEM														
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	0,7400 mm/s	0,7400		0,7400		0,7400			0,7400		0,7400		0,7400	0,7400	
2	3,4378 mm/s	3,4378		3,4380			3,4380		3,4380	3,4380		3,4380			3,4400
3	2,2900 mm/s	2,2900			2,2900	2,2900		2,2900			2,2900	2,2900			2,2900
4	5,7305 mm/s	5,7305			5,7310		5,7310	5,7310		5,7310			5,7310	5,7310	
5	1,6900 mm/s		1,6900	1,6900		1,6900		1,6900		1,6900			1,6900		1,6900
6	5,1305 mm/s		5,1305	5,1310			5,1310	5,1310			5,1310	5,1310		5,1310	
7	3,9800 mm/s		3,9800		3,9800	3,9800			3,9800	3,9800		3,9800		3,9800	
8	7,4205 mm/s		7,4205		7,4210		7,4210		7,4210		7,4210		7,4210		7,4200
TOPLAM	31,4193	13,1980	18,2210	11	19,4200	8,7000	21,7200	14,8400	15,5800	14,8400	15,5800	14,8400	15,5800	15,5800	14,8000
SAYI	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ORTALAMA	3,9300	3,0500	4,5600	2,7500	4,8600	2,1800	5,4300	3,7100	3,8900	3,7100	3,9000	3,7100	3,9000	3,9000	3,7100
ETKİ		1,5100		2,1100		3,2500		0,1800		0,1900		0,1900		-0,1900	
SIRA		**3**		**4**		**5**		**2**		**2**		**2**		**1**	

4.5. Sistem 2 İçin Ölçülen Değerler

4.5.1. Rulman 1 arızalı iken alınan sonuçlar

1 numaralı rulman arızalıyken yapılan ölçüm sonucunda ortaya çıkan amplitüd değerleri tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Rulman 1 arızalı iken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Rulman 1 Arızalı	1,6900	2,0716	2,9650	3,3900
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Rulman 1 Arızalı	2,2100	2,6700	3,4552	3,8010
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Rulman 1 Arızalı	2,3400	2,8527	3,4417	3,6834
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Rulman 1 Arızalı	2,4700	3,0309	3,4098	3,5892
50 Hz	rulman 1	rulman 2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Rulman 1 Arızalı	2,4700	2,9900	3,2000	3,3727

4.5.2. Rulman 2 arızalı iken alınan sonuçlar

2 numaralı rulman arızalıyken yapılan ölçüm sonucunda ortaya çıkan amplitüd değerleri tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Rulman 2 arızalı iken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Rulman 2 Arızalı	1,9012	1,6400	2,3714	2,7598
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Rulman 2 Arızalı	2,2198	1,8800	2,4613	2,7526
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Rulman 2 Arızalı	2,4094	2,0600	2,5123	2,7368
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Rulman 2 Arızalı	2,6122	2,2500	2,5592	2,7403
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Rulman 2 Arızalı	2,8405	2,4200	2,6108	2,8012

4.5.3. Kaplin arızası sonucunda alınan deney sonuçları

Kaplin arızalıyken yapılan ölçüm ile ortaya çıkan amplitüd değerleri tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.13.Kaplin kaçıklığı varken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Kaplin Arızalı	2,2900	1,9905	2,4800	2,9089
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Kaplin Arızalı	2,6658	2,2835	2,5700	2,9000
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Kaplin Arızalı	2,9554	2,5556	2,6800	2,9432
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Kaplin Arızalı	3,2586	2,8348	2,7700	2,9902
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Kaplin Arızalı	3,6201	3,1189	2,8900	3,1257

4.5.4. Dişli kutusu arızası sonucunda alınan deney sonuçları.

İncelediğimiz spektrum grafiklerinde Dişli Geçiş Frekansı (Gear Mesh Frequency-GMF) = Diş Sayısı X RPM formülüne dayanarak bize Diş sayısının makinenin devir sayısı ile çarpımı, bize o dişliye özgü Dişli Kavrama Frekansını verir. Farklı diş sayılarındaki her dişlinin makinenin devrine göre kendine özgü bir dişli kavrama frekansı vardır. Burada dikkat etmemiz gereken Bizim dişli kavrama frekansımızda (71520 cpm) oluşan yan bantlardır. Bu yan bantların olması bize kırık dişli olduğunu gösterir. Bunun dışında GMF'nin harmoniklerinin de oluştuğu yerde dişli ayarlarının yanlış yapıldığından söz edebiliriz. Buradaki genlik modülasyonu bizim ilk olarak dişli arızasına dikkat etmemizi gerektirmektedir.

Dişli sayısı 48'dir.

600 x48= 28800 (10 Hz için Dişli geçiş frekansı)

1200x48 =57600 (20 Hz için Dişli geçiş frekansı)

1800x48 = 86400 (30 Hz için Dişli geçiş frekansı)

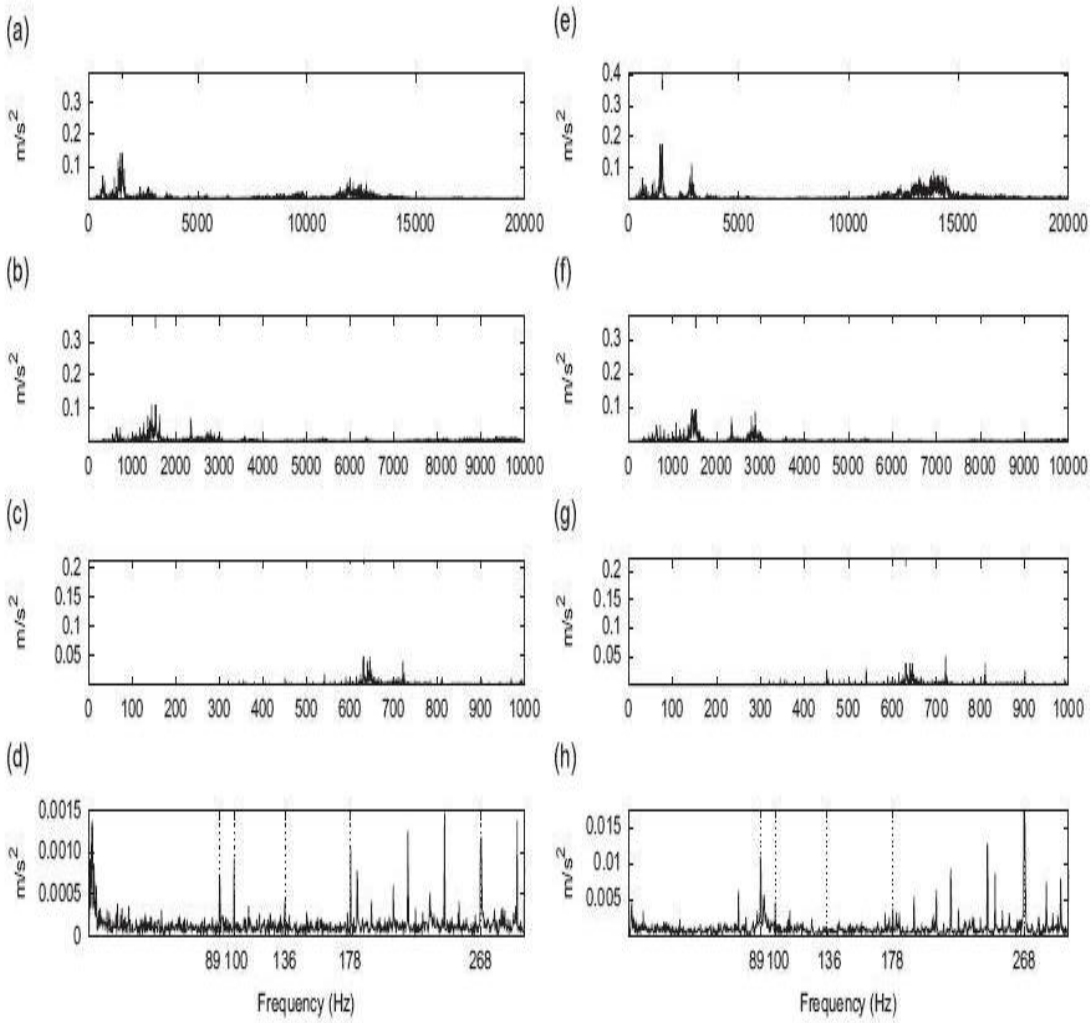
2400x48 =115200 (40 Hz için Dişli geçiş frekansı)

3000x48=144000 (50 Hz için Dişli geçiş frekansı)

Değerleri en yüksek genlikli modülasyona oturmaktadır.

Tablo 4.14. Dişli kutusu arızası varken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Dişli arızalı	3,4378	3,0442	3,8186	3,4500
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Dişli arızalı	4,0512	3,5342	4	3,4860
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Dişli arızalı	4,5042	3,9648	4,1902	3,5470
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Dişli arızalı	4,9054	4,3462	4,2812	3,5650
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Dişli arızalı	5,2602	4,6117	4,3100	3,5920



Şekil 4.11. Farklı frekans aralıklarında oluşturulan arıza trend analizi

0-1000Hz arası, Şekil 4.12'de farklı frekanslar arası alınan ölçümler trend takibi halinde verilmiştir.

4.5.5. SPSS programı ile regresyon analizi

SPSS programında tüm verilerimizi girdiğimizde ortaya çıkan sonuca göre aşağıdaki formüller elde edilmiştir. Buradaki sistem arızalı bir parça, o parça üzerinden alınan random genlik değerleri ve arıza yapan parça ile birlikte diğer parçalardan alınan genlik değerlerinin ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur. Örneğin Rulman 1 arızalıyken Rulman 1 üzerinden alınan değerler ile kaplin ve Dişli kutusu üzerinden alınan değerler ve bu parçalar arızalı değilken oluşan orjin değerler karşılaştırılmıştır. L uzunluğu ise arızalı parça ve bu parça ile ölçüm alınan parçanın arasındaki uzaklığı simgelemektedir

Burada:

$$X=\left(\frac{A}{A_0}(1+L)\right)X_{ro} \qquad (4.2)$$

4.6. Sistem 2 için Hesaplamalar

Kaplin'in Rulman 1'e Etkisi

$$X=\left(\frac{A_k}{A_{k0}}(1+L)\right)X_{ro}$$

$$X=\left(\frac{2,48}{1,02}(1+0,275)\right)0,74$$

$$X=2,29$$

X=Kaplin arızası durumunda rulman 1'den alınan ölçüm

Dişli kutusu'nun Rulman 1'e Etkisi

$$X=\left(\frac{A_g}{Ag_0}(1+L)\right)X_{ro}$$

$$X=\left(\frac{18,25}{8,15}(1+0,415)\right)4$$

$$X=12,674$$

Rulman 1 Arızası Durumunda

X=8,024

Kaplin Ve Dişli kutusu Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$$X=\left(\frac{A_k}{A_{k0}}(1+L)+\frac{A_g}{A_{g0}}(1+L)\right)A_{ro}$$

$$X=\left(3,02+3,99\right)4$$

$$X=28,039$$

veya;

$X_{kR1} + X_{gR1} = 12,08 + 15,96$

$=28,04$

Rulman 1 Ve Dişli kutusu Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$X_{gr1} = A_g + A_{r1} = 12,674 + 8,024$

$= 20,698$

Rulman 1 Ve Kaplin Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$X_{kr1} = A_k + A_{r1} = 12,08 + 8,024$

$= 20,104$

Rulman 1, Dişli kutusu Ve Kaplin Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$X_{kgr1} = A_k + A_{r1} + A_g$

$= 12,08 + 12,674 + 8,024$

$= 32,778$

Faktör ve Seviyelerin belirlenmesinde ; gerekli yükler ve bu yüklere göre seviyeler belirlenmelidir. Faktör olarak; Yük 1 için seviye 1 , Yük 2 için seviye 2, yük olarak yük 1 ve yük 2 kabul edilip, makine arızaları olarak da rulman arızasına A, kaplin arızasına B, dişli arızasına C denilebilir.

Gözlem Sayısı =10 alınsın.
Serbestlik Derecesi 3-1=2
Toplam Serbestlik Derecesi =2+2+2+2=8 (4 Ayrı Makine İçin)
Arızaların sonuçta alınan random ölçüme etkileri;
Faktörler (k=3)

A: Rulman Arızası

B: Kaplin Kaçıklığı

C: Dişli Arızası

Tablo 4.15. Taguchi Metodu ile deney tasarımı

SIRA	A	B	C	GÖZLEM DEĞERİ (RANDOM ÖLÇÜM DEĞERİ)
1	-	-	-	4 mm/s
2	-	-	+	15,960 mm/s
3	-	+	-	12,080 mm/s
4	-	+	+	28,040mm/s
5	+	-	-	8,024mm/s
6	+	-	+	23,984mm/s
7	+	+	-	20,104 mm/s
8	+	+	+	36,064 mm/s

A'nın Gözlem Değerine Etkisi:

A1=(4+15,96+12,08+28,04)/4=15,02

A2= (8,024+23,984+20,104+36,064)/4=22,044

A'nın Net Ortalama Etkisi:

Etki A = A2-A1 =22,044-15,02= 7,024

B'nin Gözlem Değerine Etkisi:

B1=(4+15,96+8,024+20,104)/4= 12,022

B2= (12,08+28,04+20,104+36,064)/4=24,072

B'nin Net Ortalama Etkisi:

Etki B= B2 – B1 = 24,072-12,022 = 12,05

C’nin Gözlem Değerine Etkisi:

C1= (4+12,08+8,024+20,104)/4= 11,052

C2= (15,96+28,04+23,984+36,064)/4=26,012

C’nin Net Ortalama Etkisi:

Etki C= C2 – C1 = 26,012-11,052 = 14,96

AB’NİN Gözlem değerine Etkisi:

ETKİ AB = (+4+15,96-12,08-28,04-8,024-23,984+20,104+36,064)/4= 1

AC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ AC= (+4-15,96+12,08-28,04-8,024+23,984-20,104+36,064)/4 = 1

BC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ BC=(+4-15,96-12,08+28,04+8,024-23,984-20,104+36,064)/4= 1

ABC’NİN Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ ABC=(-4+15,96+12,08-28,04+8,024-23,984-20,104+36,064)/4 =-1

4.6.1. Sistem 2 için L8 tablosu ve sonuçlarının etkileri

Tablo 4.16. Taguchi metodu L8 tablosu

		A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
SIRA	GÖZLEM														
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	4 mm/s	4		4		4			4		4		4	4	
2	15,9600 mm/s	15,9600		15,9600			15,9600		15,9600	15,9600		15,9600			15,9600
3	12,0800 mm/s	12,0800			12,0800	12,0800		12,0800			12,0800	12,0800			12,0800
4	28,0400 mm/s	28,0400			28,0400		28,0400	28,0400		28,0400			28,0400	28,0400	
5	8,0240 mm/s		8,0240	8,0240		8,0240		8,0240		8,0240			8,0240		8,0240
6	23,9840 mm/s		23,9800	23,9800			23,9800	23,9800			23,9800	23,9800		23,9800	
7	20,1040 mm/s		20,1000		20,1000	20,1000			20,1000	20,1000		20,1000		20,1000	
8	36,0640 mm/s		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600
TOPLAM	87	61,0800	36,0600	52,9700	96,2900	40,2100	104	72,1300	76,1300	72,1300	76,1300	72,1300	76,1300	76,1300	72,1300
SAYI	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ORTALAMA	10,88	15,2700	9,0200	13,2400	24,0700	10,0500	26,0100	18,0300	19,0300	18,0300	19,0300	18,0300	19,0300	19,0300	18,0300
ETKİ		7,0240		12,0500		14,9600		1		1		1		-1	
SIRA		3		4		5		2		2		2		1	

4.7. Sistem 3'de Rulmana Bilya Arızası verilmişken Taguchi ile Deney Tasarımı

4.7.1. Rulman 1 arızalı iken alınan sonuçlar (Bilya Arızası)

1 numaralı rulman arızalıyken yapılan ölçüm sonucunda ortaya çıkan amplitüd değerleri tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Rulman 1 arızalı iken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Rulman 1 Arızalı	1,6900	2,0716	2,9650	3,3900
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Rulman 1 Arızalı	2,2100	2,6700	3,4552	3,8010
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Rulman 1 Arızalı	2,3400	2,8527	3,4417	3,6834
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Rulman 1 Arızalı	2,4700	3,0309	3,4098	3,5892
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Rulman 1 Arızalı	2,4700	2,9900	3,2000	3,3727

4.7.2. Rulman 2 arızalı iken alınan sonuçlar

2 numaralı rulman arızalıyken yapılan ölçüm sonucunda ortaya çıkan amplitüd değerleri Tablo 4.18'de verilmiştir.

Tablo 4.18. Rulman 2 arızalı iken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Rulman 2 Arızalı	1,9012	1,6400	2,3714	2,7598
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Rulman 2 Arızalı	2,2198	1,8800	2,4613	2,7526
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Rulman 2 Arızalı	2,4094	2,0600	2,5123	2,7368
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Rulman 2 Arızalı	2,6122	2,2500	2,5592	2,7403
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Rulman 2 Arızalı	2,8405	2,4200	2,6108	2,8012

4.7.3. Kaplin arızası sonucunda alınan deney sonuçları

Kaplin arızalıyken yapılan ölçüm ile ortaya çıkan amplitüd değerleri Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.19. Kaplin kaçıklığı varken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Kaplin Arızalı	2,2900	1,9905	2,4800	2,9089
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Kaplin Arızalı	2,6658	2,2835	2,5700	2,9000
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Kaplin Arızalı	2,9554	2,5556	2,6800	2,9432
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Kaplin Arızalı	3,2586	2,8348	2,7700	2,9902
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Kaplin Arızalı	3,6201	3,1189	2,8900	3,1257

4.7.4. Dişli kutusu arızası sonucunda alınan deney sonuçları

İncelediğimiz spektrum grafiklerinde Gear Mesh Frequency (GMF) = Diş Sayısı X RPM formülüne dayanarak bize Diş sayısının makinenin devir sayısı ile çarpımı, bize o dişliye özgü Dişli Kavrama Frekansını verir. Farklı diş sayılarındaki her dişlinin makinenin devrine göre kendine özgü bir dişli kavrama frekansı vardır. Burada dikkat etmemiz gereken Bizim dişli kavrama frekansımızda (71520 cpm) oluşan yan bantlardır. Bu yan bantların olması bize kırık dişli olduğunu gösterir. Bunun dışında GMF'nin harmoniklerinin de oluştuğu yerde dişli ayarlarının yanlış yapıldığından söz edebiliriz. Buradaki genlik modülasyonu bizim ilk olarak dişli arızasına dikkat etmemizi gerektirmektedir.

Dişli sayısı 48'dir.

600 x48= 28800 (10 Hz için Dişli geçiş frekansı)

1200x48 =57600 (20 Hz için Dişli geçiş frekansı)

1800x48 = 86400 (30 Hz için Dişli geçiş frekansı)

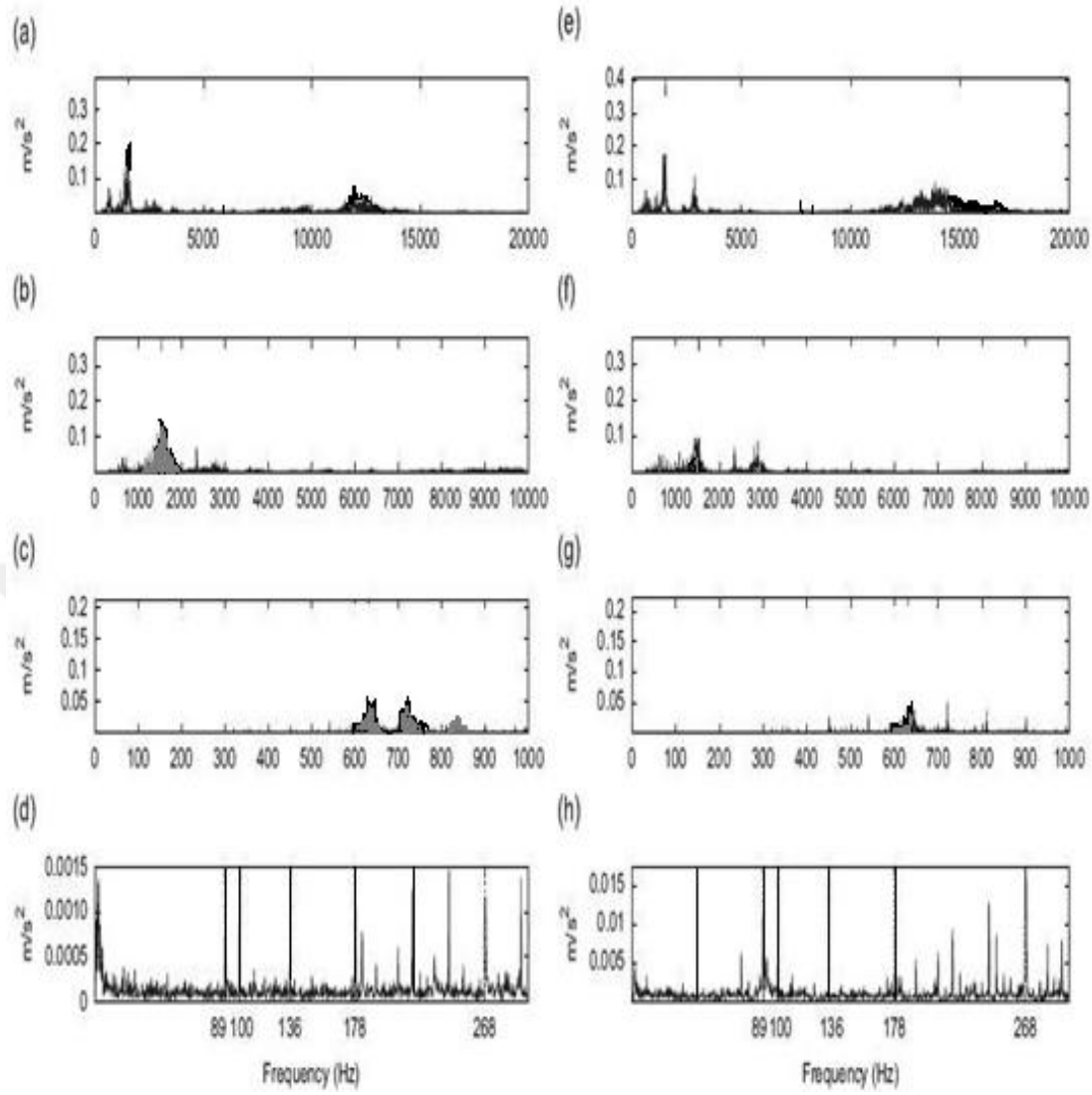
2400x48 =115200 (40 Hz için Dişli geçiş frekansı)

3000x48=144000 (50 Hz için Dişli geçiş frekansı)

Değerleri en yüksek genlikli modülasyona oturmaktadır.

Tablo 4.20.Dişli kutusu arızası varken alınan sonuçlar

10 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,7400	0,7600	1,0200	1,0500
Dişli arızalı	3,4378	3,0442	3,8186	3,4500
20 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,8800	0,8900	1,0800	1,0700
Dişli arızalı	4,0512	3,5342	4	3,4860
30 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	0,9700	0,9900	1,1200	1,0800
Dişli arızalı	4,5042	3,9648	4,1902	3,5470
40 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,0800	1,1100	1,1700	1,1100
Dişli arızalı	4,9054	4,3462	4,2812	3,5650
50 Hz	rulman 1	rulman2	kaplin	Dişli Kutusu
Orjin	1,1700	1,1900	1,1900	1,1300
Dişli arızalı	5,2602	4,6117	4,3100	3,5920



Şekil 4.12. Farklı Frekans aralıklarında oluşturulan trend analizi

Şekil 4.12.a'da 0-20000 Hz arası, Şekil 4.12.b'de 0-10000Hz arası, Şekil 4.12.c'de 0-1000 Hz arası, Şekil 4.12.d'de 0-300Hz arası alınan ölçümler trend takibi halinde verilmiştir.

4.7.5. SPSS programı ile regresyon analizi

SPSS programında tüm verilerimizi girdiğimizde ortaya çıkan sonuca göre aşağıdaki formüller elde edilmiştir. Buradaki sistem arızalı bir parça, o parça üzerinden alınan random genlik değerleri ve arıza yapan parça ile birlikte diğer parçalardan alınan genlik değerlerinin ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur.

Örneğin Rulman 1 arızalıyken Rulman 1 üzerinden alınan değerler ile kaplin ve Dişli kutusu üzerinden alınan değerler ve bu parçalar arızalı değilken oluşan orjin değerler karşılaştırılmıştır. L uzunluğu ise arızalı parça ve bu parça ile ölçüm alınan parçanın arasındaki uzaklığı simgelemektedir.

Burada:

$$X=\left(\frac{A}{A_0}(1+L)\right)X_{r0} \tag{4.3}$$

4.8. Sistem 3 İçin Hesaplamalar

Kaplin'in Rulman 1'e Etkisi

$$X=\left(\frac{A_k}{A_{k0}}(1+L)\right)X_{r0}$$

$$X=\left(\frac{2,48}{1,02}(1+0,275)\right)0,74$$

$$X=2,29$$

X=Kaplin arızası durumunda rulman 1'den alınan ölçüm

Dişli kutusu'nun Rulman 1'e Etkisi

$$X=\left(\frac{A_g}{A_{g0}}(1+L)\right)X_{r0}$$

$$X=\left(\frac{18,25}{8,15}(1+0,415)\right)4$$

$$X=12,674$$

Rulman 1 Arızası Durumunda

X=8,024

Kaplin Ve Dişli kutusu Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$$X=\left(\frac{A_k}{A_{k0}}(1+L)+\frac{A_g}{A_{g0}}(1+L)\right)A_{r0}$$

X=(3,02+3,99)

X=28,39

veya

$X_{KR1}+X_{gr1}$=12,08+15,96

=28,04

Rulman 1 Ve Dişli kutusu Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$X_{gr1} = A_g + A_{r1}$ =12,674 + 8,024

=20,698

Rulman 1 Ve Kaplin Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$X_{kr1} = A_k + A_{r1}$=12,08 + 8,024

=20,104

Rulman 1, Dişli Kutusu ve Kaplin Birlikte Arızalıyken Rulman 1'e Etkileri

$X_{kgr1} = A_k + A_{r1} + A_g$

=12,08 + 12,674 + 8,024

=32,778

Faktör ve Seviyelerin belirlenmesinde ; gerekli yükler ve bu yüklere göre seviyeler belirlenmelidir. Faktör olarak; Yük 1 için seviye 1 , Yük 2 için seviye 2, yük olarak yük 1 ve yük 2 kabul edilip, makine arızaları olarak da rulman arızasına A, kaplin arızasına B, dişli arızasına C denilebilir.

Gözlem Sayısı =10 alınsın.
Serbestlik Derecesi 3-1=2
Toplam Serbestlik Derecesi =2+2+2+2=8 (4 Ayrı Makine İçin)
Arızaların sonuçta alınan random ölçüme etkileri;
Faktörler (k=3)

A: Rulman Arızası
B Kaplin Kaçıklığı
C: Dişli Arızası

Tablo 4.21. Taguchi Metodu ile deney tasarımı

SIRA	A	B	C	GÖZLEM DEĞERİ (RANDOM ÖLÇÜM DEĞERİ)
1	-	-	-	4 mm/s
2	-	-	+	15,960 mm/s
3	-	+	-	12,080 mm/s
4	-	+	+	28,040mm/s
5	+	-	-	8,024mm/s
6	+	-	+	23,984mm/s
7	+	+	-	20,104 mm/s
8	+	+	+	36,064 mm/s

A'nın Gözlem Değerine Etkisi:

A1=(4+15,96+12,08+28,04)/4=15,02

A2= (8,024+23,984+20,104+36,064)/4=22,044

A'nın Net Ortalama Etkisi:

Etki A = A2-A1 =22,044-15,02= 7,024

B'nin Gözlem Değerine Etkisi:

B1=(4+15,96+8,024+20,104)/4= 12,022

B2= (12,08+28,04+20,104+36,064)/4=24,072

B'nin Net Ortalama Etkisi:

Etki B= B2 – B1 = 24,072-12,022 = 12,05

C’nin Gözlem Değerine Etkisi:

C1= (4+12,08+8,024+20,104)/4= 11,052

C2= (15,96+28,04+23,984+36,064)/4=26,012

C’nin Net Ortalama Etkisi

Etki C= C2 – C1 = 26,012-11,052 = 14,96

AB’NİN Gözlem değerine Etkisi:

ETKİ AB = (+4+15,96-12,08-28,04-8,024-23,984+20,104+36,064)/4= 1

AC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ AC= (+4-15,96+12,08-28,04-8,024+23,984-20,104+36,064)/4 = 1

BC’nin Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ BC=(+4-15,96-12,08+28,04+8,024-23,984-20,104+36,064)/4= 1

ABC’NİN Gözlem Değerine Etkisi:

ETKİ ABC=(-4+15,96+12,08-28,04+8,024-23,984-20,104+36,064)/4 =-1

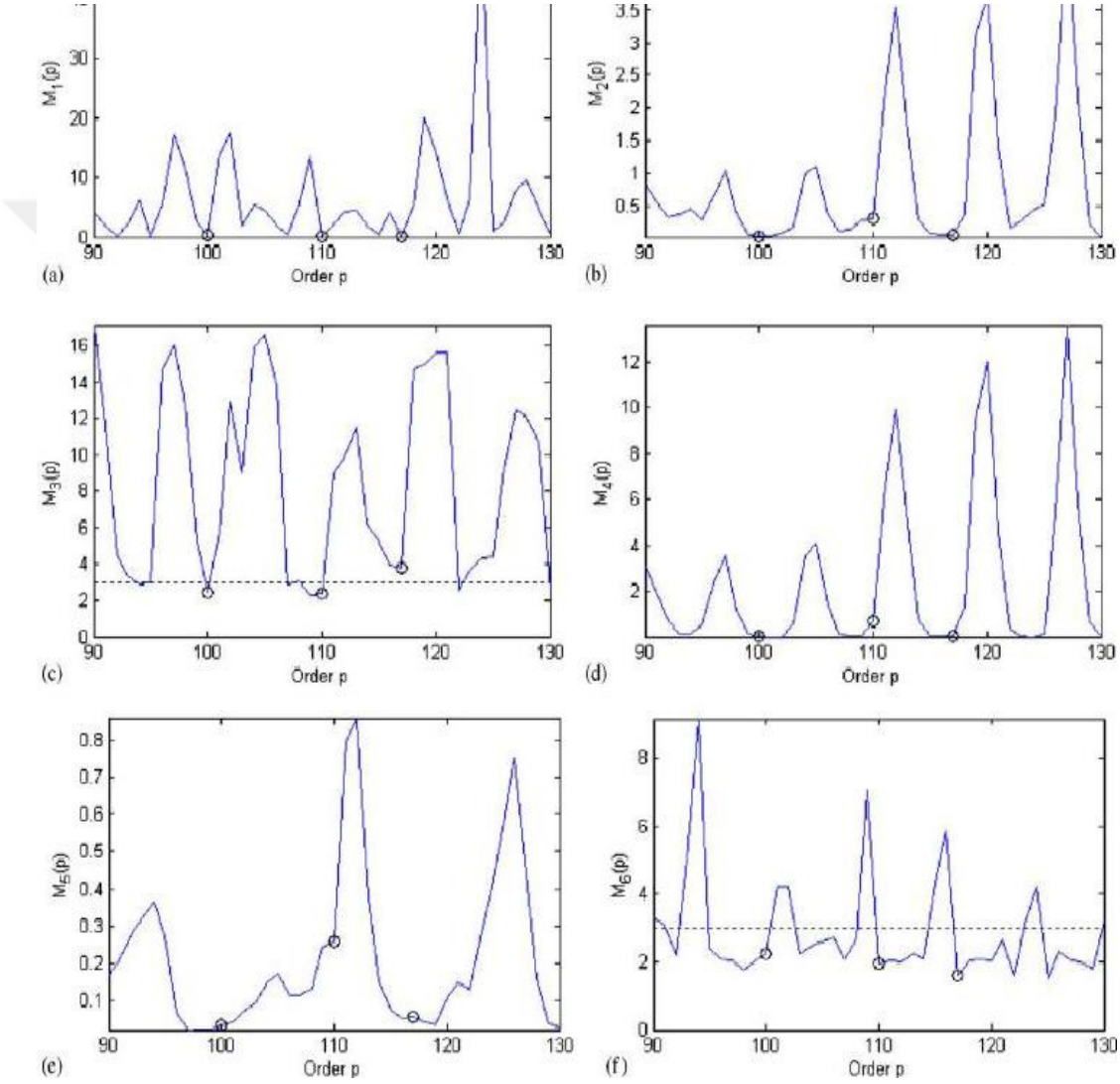
4.8.1. Sistem 2 için Bilya arızası durumunda L8 tablosu ve sonuçlarının etkileri

Tablo 4.22. Taguchi metodu L8 tablosu

		A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
SIRA	GÖZLEM														
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	4 mm/s	4		4		4			4		4		4	4	
2	15,9600 mm/s	15,9600		15,9600			15,9600		15,9600	15,9600		15,9600			15,9600
3	12,0800 mm/s	12,0800			12,0800	12,0800		12,0800			12,0800	12,0800			12,0800
4	28,0400 mm/s	28,0400			28,0400		28,0400	28,0400		28,0400			28,0400	28,0400	
5	8,0240 mm/s		8,0240	8,0240		8,0240		8,0240		8,0240			8,0240		8,0240
6	23,9840 mm/s		23,9800	23,9800			23,9800	23,9800			23,9800	23,9800		23,9800	
7	20,1040 mm/s		20,1000		20,1000	20,1000			20,1000	20,1000		20,1000		20,1000	
8	36,0640 mm/s		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600		36,0600
TOPLAM	87	61,0800	36,0600	52,9700	96,2900	40,2100	104	72,1300	76,1300	72,1300	76,1300	72,1300	76,1300	76,1300	72,1300
SAYI	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ORTALAMA	10,88	15,2700	9,0200	13,2400	24,0700	10,0500	26,0100	18,0300	19,0300	18,0300	19,0300	18,0300	19,0300	19,0300	18,0300
ETKİ		7,0240		12,0500		14,9600		1		1		1		-1	
SIRA		3		4		5		2		2		2		1	

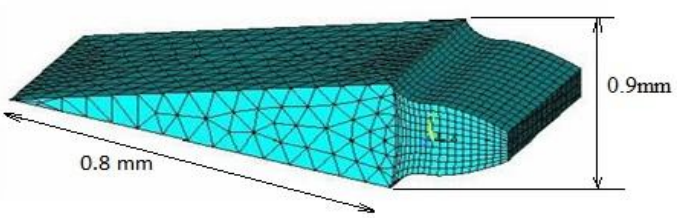
4.9. Dişli Kutusunda Hareketin Yönü Değişirse Alınacak Sonuçlar

Sistem 1 ve sistem 2 de Motordan çıktıktan sonra dişli kutusuna giren hareket yine aynı doğrultuda iletiliyordu. Kurulan sistem 3 ve sistem 4'de ise dişli kutusuna giren hareket başka bir eksende yön değiştirmektedir. 90 derecelik bu yön değiştirmeler sonucunda elde edilen sistem sonuçları aşağıda verilmiştir



Şekil 4.13.Dişli arızası verildikten sonra dönme esnasındaki basınç değişimleri

Şekil 4.13'de Dişlilerden biri matkap tezgahında alındıktan sonra oluşan basınç değişimi verilmiştir



Şekil 4.14. Arıza verilerek yok edilen dişin ölçüleri

Şekil 4.14'de matkap tezgahı kullanarak aldığımız 1 adet dişin ölçüleri gösterilmektedir.

Tablo 4.23. Dişli arızası oluşturduktan sonra sistemden alınan ölçüm değerleri

Xetkilenen	Aarızalı	Aoarızalı	$Xo^{etkilenen}$
3,6839	4,5316	1,2362	0,76
3,5762	4,5316	1,2362	0,74
4,9542	4,5316	1,2362	1,02
3,8002	3,486	1,07	0,88
3,824	3,486	1,07	0,89
4,652	3,486	1,07	1,08
4,2124	3,547	1,08	0,97
4,3006	3,547	1,08	0,99
4,864	3,547	1,08	1,12
4,5866	3,565	1,11	1,08
4,7142	3,565	1,11	1,11
4,9688	3,565	1,11	1,17
4,9179	3,592	1,13	1,17
5,002	3,592	1,13	1,19
5,102	3,592	1,13	1,19

Tablo 4.23'de dişli arızası sonucunda oluşan sistem dinamiğine göre alınan sonuçlar verilmiştir.

4.9.1. Dişli Arızası Durumunda Regresyon Analizi

SPSS programında tüm verilerimizi girdiğimizde ortaya çıkan sonuca göre aşağıdaki formüller elde edilmiştir. Buradaki sistem dişli arızası, o parça üzerinden alınan random genlik değerleri ve arıza yapan parça ile birlikte diğer parçalardan alınan genlik değerlerinin ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur.

Tablo 4.24. Dişli Arızası Sonucu SPSS Program Çıktısı- GOIB Analizi

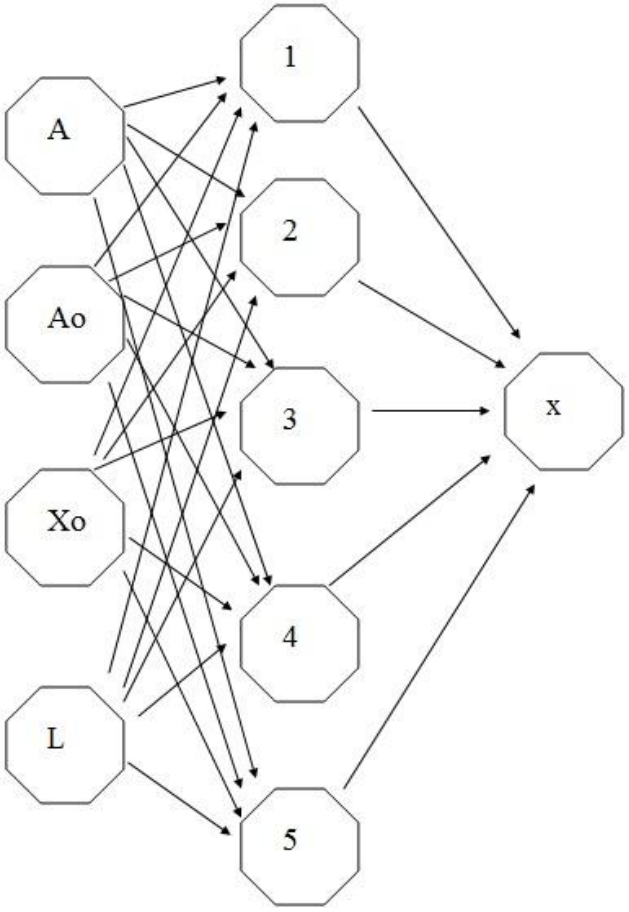
XNLS														
SPSS		G1=G3xG4x1,322312/G2												
		SP	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	0,005	0,001	0,003	0,001	
			SP+	SP+	SP+	SP+	SP+	SP+	SP+	SP-	SP+	SP+	SP+	
			1,320,	1,021	0,623	0,32156	0,021	1231	1234	0,123	0,241	0,253	0,326	
0,001	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003								
SP+	SP+	SP+	SP+	SP+	SP+	SP+								
0,241	0,253	0,123	0,241	0,326	0,2146	0,3611								

Bu çıktıya göre oluşan formül ;

$$X=\left(\frac{A}{A_0}.\theta\right)X_0 \qquad (4.4)$$

4.10. Yapay Sinir Ağları ile Bulunan sonuçların İspatı

4.10.1. Yapay sinir ağları kullanarak yapılan deneyin algoritması



Şekil 4.15.Yapay Sinir Ağları Kullanarak Yapılan Deneyin Algoritması

Şekil 4.15'de girdilerimiz ; A: Arızalı parçadan alınan ölçüm (mm/s), Ao: Arızalı parçanın arıza yapmadan önceki amplitüd değeri (mm/s), Xo: Ölçüm alınan Parçanın arıza öncesi orijin değeri (mm/s), L: Arıza yapan parça ile ölçüm alınan parça arasındaki uzaklık olarak verilmiştir. Bunun değerlendirilebilmesi için Yapay sinir ağlarında 5 adet ara elemana ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun belirlenmesinin ardından bilgisayara tüm girdiler eksiksiz olarak girilir ve ara eleman sayısı 5 seçilir. Aradığımız çıktı ise tektir. X: ölçüm alınan parçadaki amplitüd değeri. Bunun için her bir değer orijin olarak ve her hasardan sonra oluşan ölçüm noktamızdan aldığımız değer bilgisayara tek tek girilir. Ölçüm noktamız ve amplitüd artışının olacağını beklediğimiz yatak arası mesafeler girilir. Ve sonuçta bir önceki tablolarda oluşan sonuçlar elde edilir.

4.10.2.Yapay Sinir Ağları Kullanarak Yapılan Deney Sonuçlarının İspatı

Tablo 4.25. Yapay sinir ağları

1. ANN parametre optimizasyonu										
'hardlim'	0,03693	0,03693	0,03693	0,03693						
'logsig'	0,067377	0,071385	0,040032	0,060963						
'tansig'	0,074577	0,051054	0,076847	0,112558						
'tribas'	0,081987	0,052074	0,052647	0,096781						
'radbas'	0,038463	0,050816	0,067089	0,089719						
Elman										
	5	10	15	20						
'hardlim'	0,051296	0,051296	0,051296	0,051296						
'logsig'	0,078578	0,162235	0,090471	0,070703						
'tansig'	0,095567	0,056372	0,168354	0,115358						
'tribas'	0,127109	0,154916	0,11571	0,190397						
'radbas'	0,112961	0,252774	0,149718	0,228348						
	0,1	02	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Rb accuracy	0,225618	0,210002	0,204254	0,203992	0,204754	0,204826	0,204764	0,204574	0,204395	0,204258
Grn accuracy	0,512855	0,51309	0,515322	0,502913	0,480381	0,453235	0,426841	0,403817	0,384713	0,369185

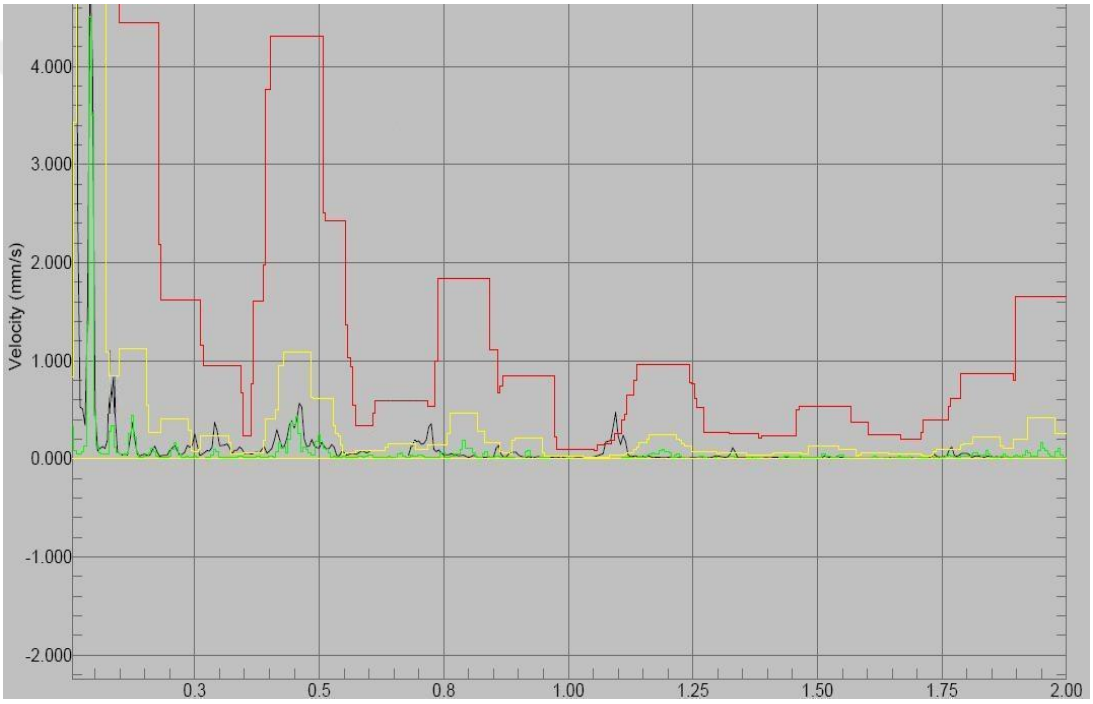
Tablo 4.26. İleri Beslemeli ve geri beslemeli yapay sinir ağları uygulaması

1. ANN (feed forward neaural network) parametre optimizasyonu											
	5	10	15	20							
'hardlim'	0,022595	0,022595	0,022595	0,022595							
'logsig'	0,045151	0,033145	0,060385	0,040277							
'tansig'	0,045959	0,043764	0,029796	0,083093							
'tribas'	0,026397	0,046484	0,029885	0,048881							
'radbas'	0,044808	0,046477	0,092724	0,036041							
Elman											
	5	10	15	20							
'hardlim'	0,079365	0,079365	0,079365	0,079365							
'logsig'	0,1051	0,131126	0,107327	0,146499							
'tansig'	0,236618	0,13668	0,080625	0,129065							
'tribas'	0,148558	0,207876	0,327109	0,105644							
'radbas'	0,083495	0,217545	0,100305	0,252198							
	spread	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
rb	accuracy	0,093588	0,175253	0,129123	0,13576	0,146074	0,158265	0,168449	0,176144	0,174797	0,17653
grn	accuracy	0,160051	0,123739	0,100217	0,089485	0,085887	0,084662	0,083697	0,082459	0,080967	0,07937

Tablo 4.25’de ve 4.26’da yer alan hardlim, logsis, tansig, tribas, radbas birer transfer fonsiyonu olmak üzere yapay sinir ağlarında tüm bu transfer fonksiyonları ileri beslemeli ve geri beslemeli olarak hem giriş fonksiyonu hem de çıkış fonksiyonu olarak kullanılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4.25’de ve 4.26’da verilen değerler mean absolute error değerleri olup, burada en yakınsak değerler hardlim transfer fonksiyonunda oluşmuş ve karşılaştırmalarda bu fonksiyon kullanılmıştır.

4.11. Autospektrum Grafikleri ve Yorumlamaları

4.11.1. FFT grafiklerinde frekans-amplitüd karşılaştırmaları

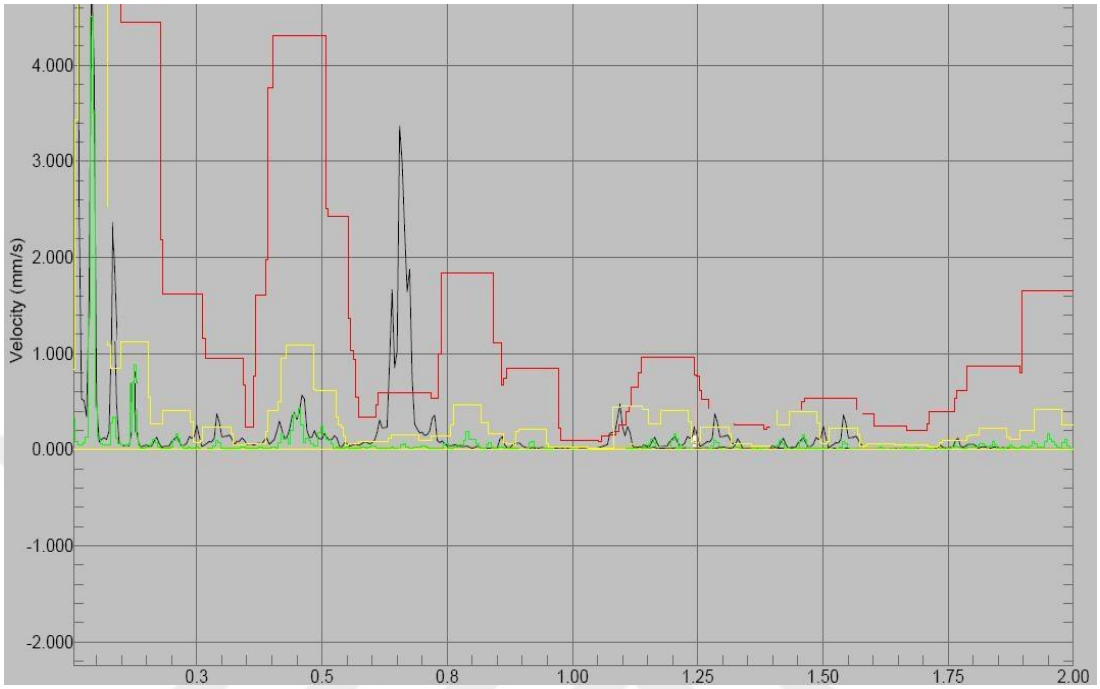


Şekil 4.16. 20 Hz orijin spectrum grafiği

Şekil 4.16’da herhangi bir hasar verilmeden 20 Hz'de spectrum ölçümü alınmış grafik gözükmektedir. Burada 1XRPM değerinin 4.72mm/sn olduğu 2XRPM ve 3XRPM değerlerinin 1 mmsn'nin altında olduğu görülmektedir. Bu değerler normal salınım değerleri için kabul edilebilir limitlerde olduğu için red line'nımızın altında yer almakta ve orijin ampitud değerleri olarak kabul edilmektedir.

Şimdi yapacağımız işlem dişlide 1 çentik oluşturmak olacaktır. Oluşturduğumuz bu çentik her kavramada ivme ölçerimize bir pik verecektir. Bununda yapılan

araştırmalarda Diş sayısı X Devir 'e denk gelen frekanstaki amplitüd artışı olarak oluşacağı görülmüştür.



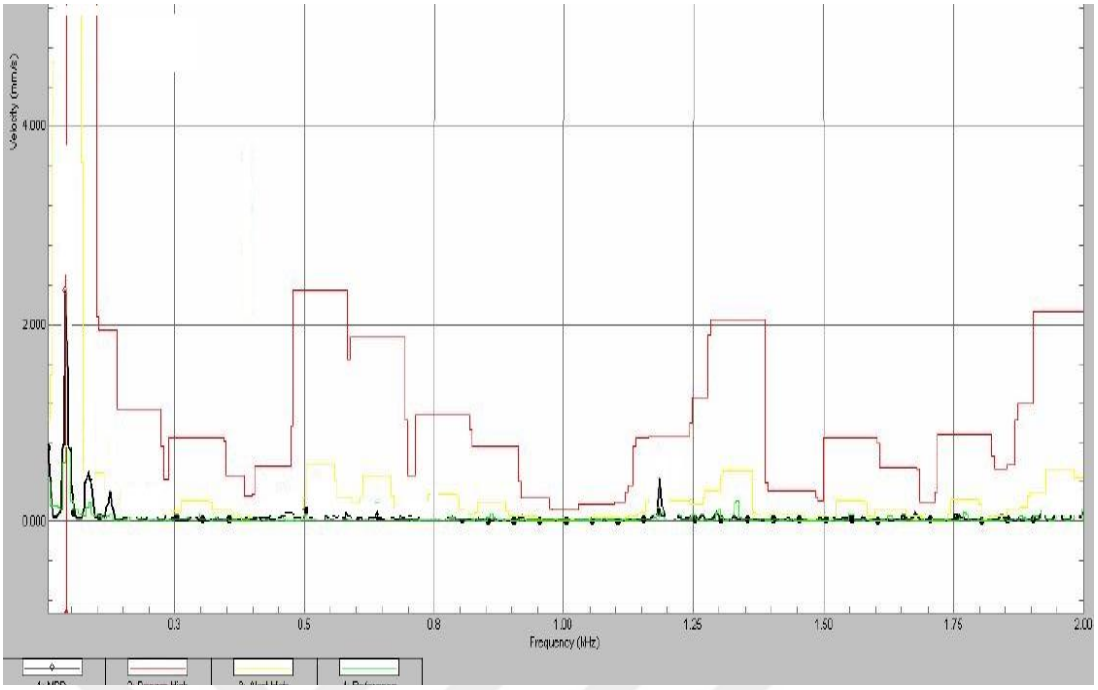
Şekil 4.17. 20 Hz dişliye hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği

Şekil 4.17'de 0,76 kHz'de oluşan pik dişli geçiş frekansı olarak adlandırılır. Bizim kullandığımız dişli çark'ta 38 diş bulunmaktaydı. Sistemimizi 20 Hz'de çalıştırılmıştır.

DGF=20X38=760 Hz

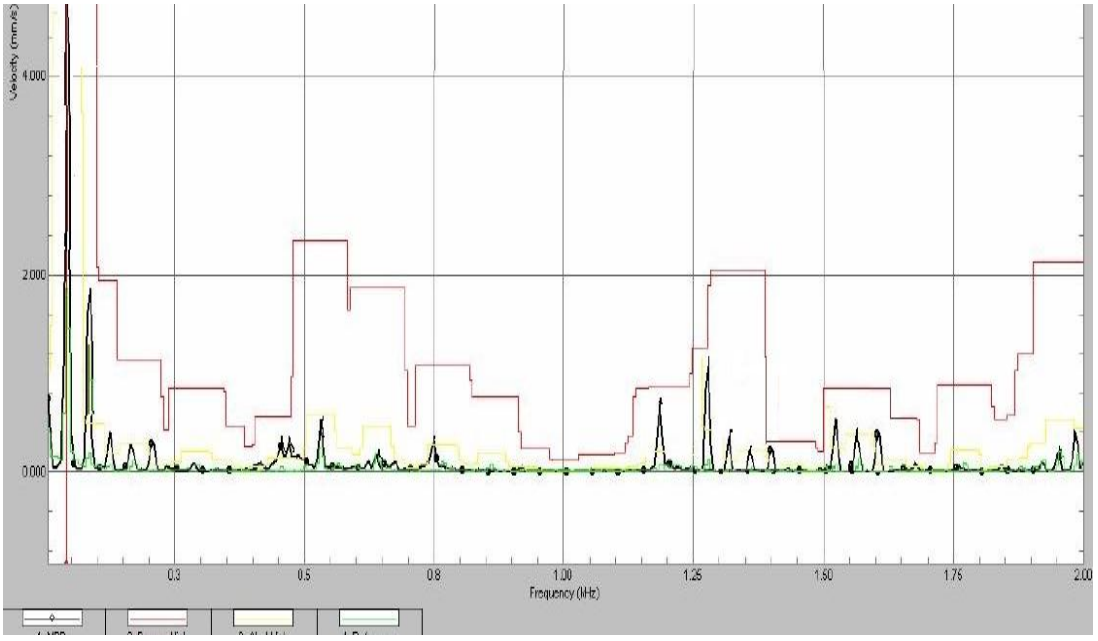
$f_{(Hz)} = f_{(kHz)} \times 1000$

0,76X1000=760 Hz



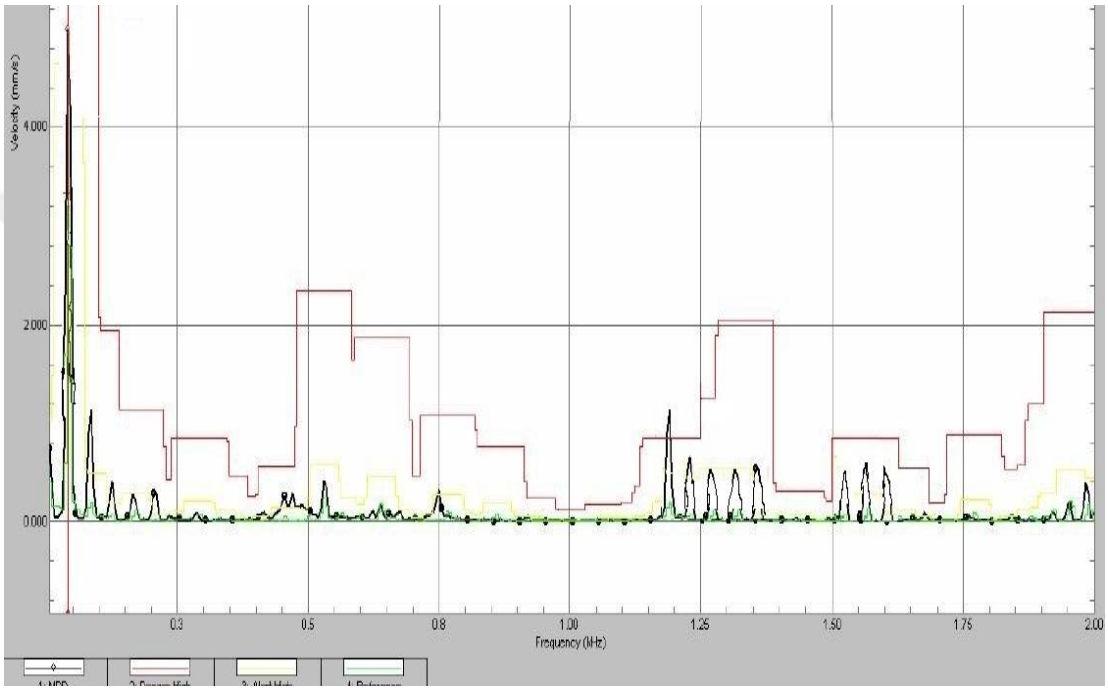
Şekil 4.18. 20 Hz orijin spectrum grafiği

Şekil 4.18'de Yine 20 Hz'de çalışan ve herhangi bir hasar verilmeden çalıştırılmış sistemimizden alınan Spectrum grafiği görülmektedir. Burada yine 1XRPM değerinde 2 mm/sn'nin az üstünde bir ampitid görülmekle birlikte 2XRPM ve 3XRPM değerleri çok küçüktür ve yüksek frekanslarda is çok küçük bir pik'in dışında başka bir hareket görülmemektedir.



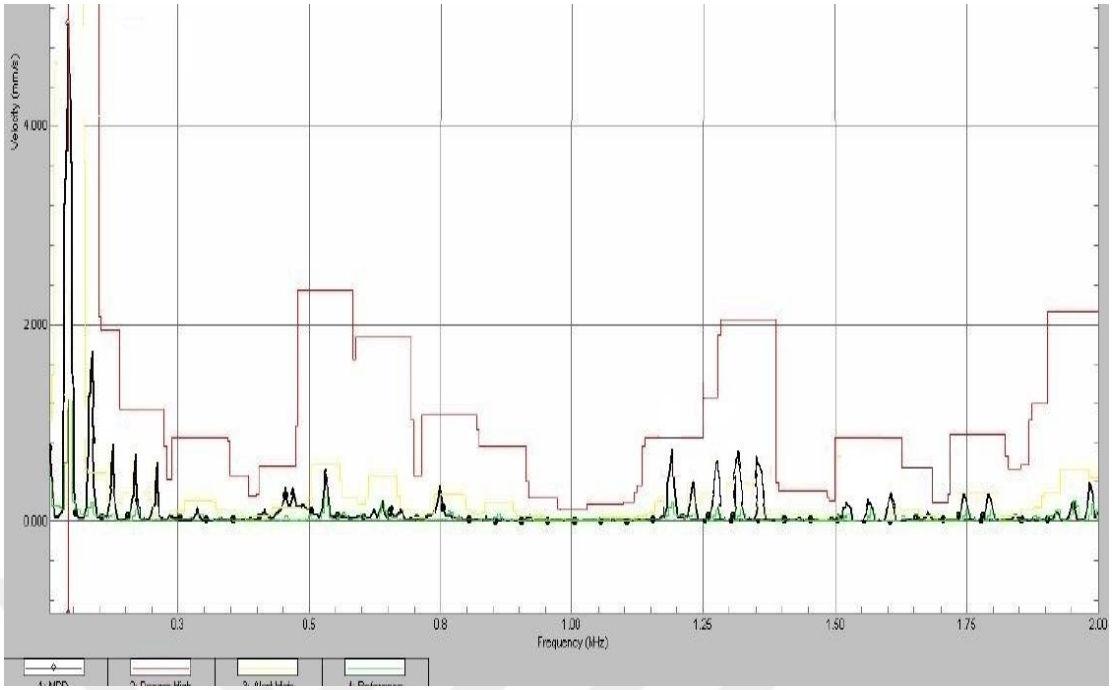
Şekil 4.19. 20Hz 1nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği

Şekil 4.19’da 1 numaralı rulmana yaptığımız şike sonucunda 1XRPM 'de 4mm/sn'nin üstüne çıkan bir pik ve yüksek frekanslarda bir karıncalanma gözükmektedir. Bu grafiği yorumladığımızda yüksek frekanslardaki karıncalanmanın bizim yaptığımız fiziksel etkiden kaynaklandığı aşikardır. ama aynı anda 1XRPM, 2XRPM, 3XRPM ve harmoniklerin de ortaya çıkan artış rulman bölgesindeki fiziksel tesirimizden doğan atalet momentine tepkidir.



Şekil 4.20. 20 Hz 1nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği trend analizi

Şekil 4.20’de çalışma süresi arttıkça red line'ı geçen pikler oluşmaya başlamış, yüksek frekanslarda karıncalanma artmış, yine orijin ölçüme göre 1XRPM, 2XRPM, 3XRPM ve harmoniklerindeki artış devam etmiştir.

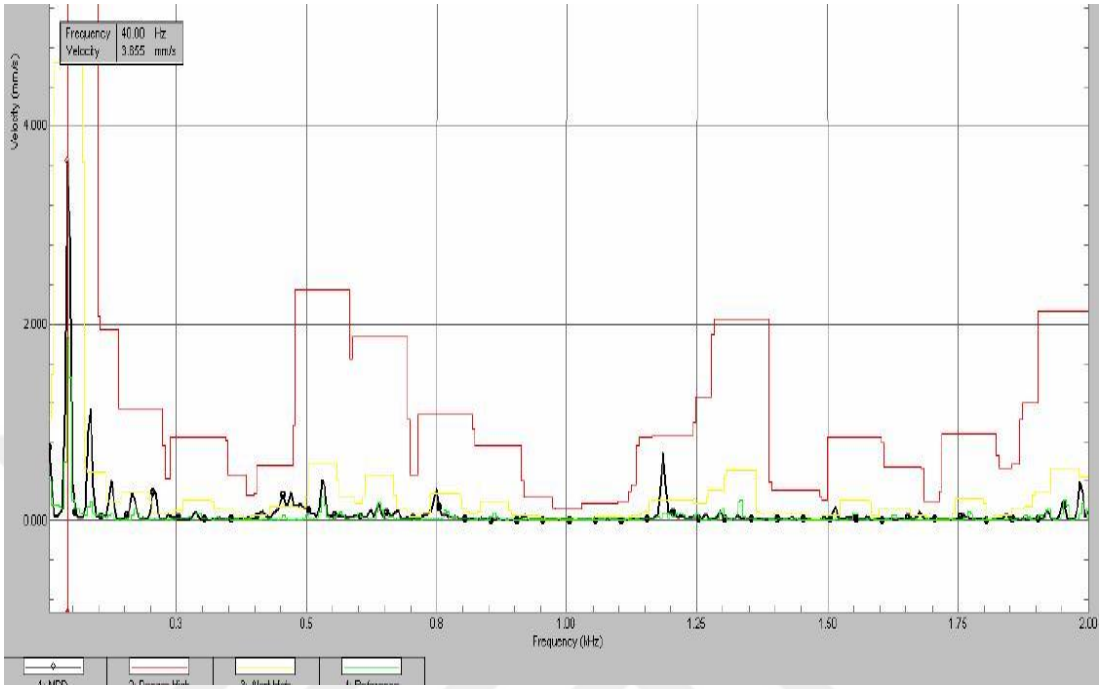


Şekil 4.21. 20 Hz 1nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği trend analizi

Şekil 4.21'de artan zamanla oluşan hasar büyümüş ve 1XRPM, 2XRPM, 3XRPM ve harmoniklerindeki amplitüdler daha belirgin olmuş ara frekanslarda artışlar gözükmüş ve yüksek frekanslarda karıncalanmalar iyicene artmıştır.

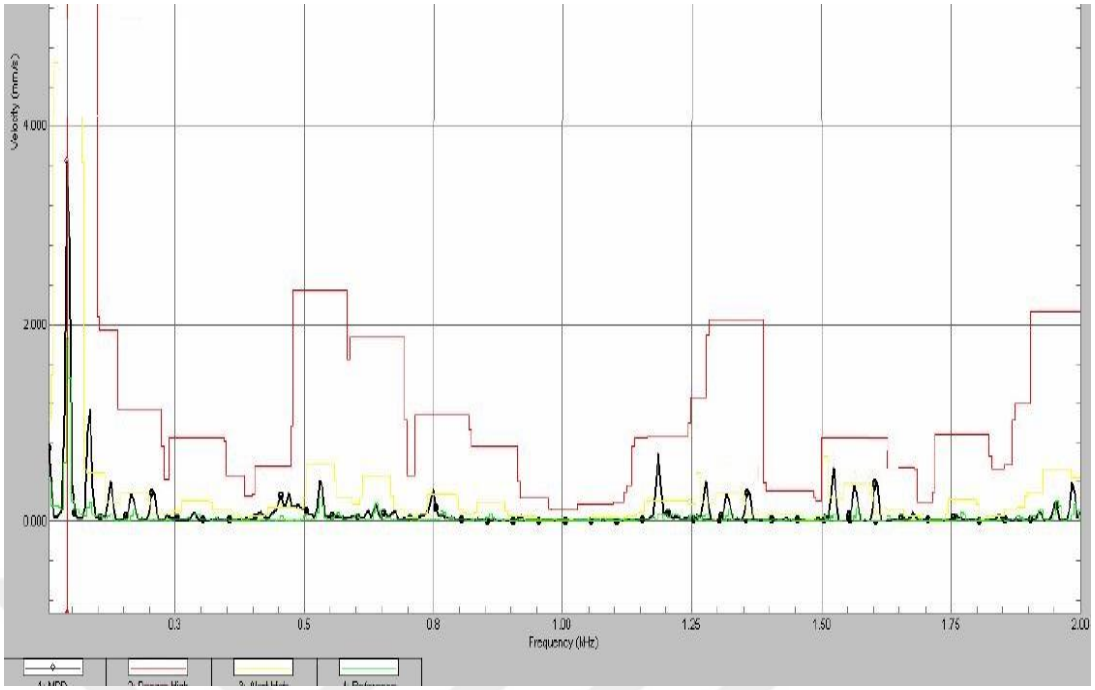
Tüm bu grafiklerden algılayacağımız gibi öncelikle arıza bölgesinde sert ampitud artışları oluşmakta bununla beraber diğer bölgelerde etkilenmekte ve diğer hasar gösteren spesifik frekanslarda da ampitud artışları oluşmaktadır.

4.11.2. Alınan Ölçümler Sonucu Oluşturulan Spektrum Grafikleri Trend Analizine Örnekler



Şekil 4.22. 40 Hz 1nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği trend analizi (Makine çalışma frekansını tayin etme)

Şekil 4.22'de Deney cihazımız 40 Hz'de çalıştırılırken 1. Rulmanımızda dış bilezik arızası oluşturularak alınan ölçüm gösterilmiştir. Burada makinemizin 1 XRPM'deki çalışma frekansını görebiliriz. 40 Hz'de çalışmakta olan makinemiz 1 X RPM'de 3.855 mm/s'lik bir pik vermiş olup bu pikin oluştuğu frekansımız makinemizin çalışma frekansına denk gelmektedir. Ayrıca 1.20 kHz'in hemen önünde meydana gelen pik ise bize rulman dış bileziğinde basit bir kuvvet artmasını işaret eder. Bu grafik bu arıza verildikten hemen sonra alınmıştır. Bu nedenle orijin grafiğimiz olarak da görülebilir. Aynı zamanda rulman arızasının hemen başında daha grafiğimizdeki tepkiler keşfedilmek istenmiştir. İleride trend analizine devam ettiğimizde bu grafiğin harmonikler şeklinde yan bantlar oluşturacağını göreceğiz.

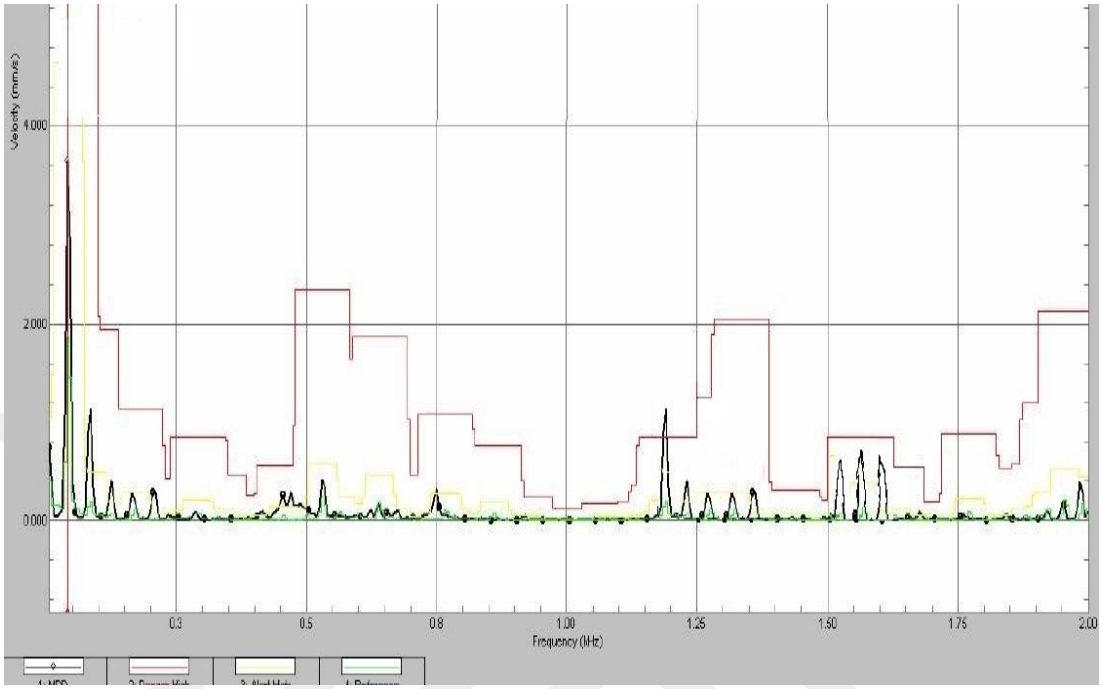


Şekil 4.23. 40 Hz Dişliye hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği trend analizi

Şekil 4.23'de grafikte ise 1 saat sonraki durum ortaya çıkmıştır. Genelde sanayide makinelerin daha kompleks olduğunu düşünürsek bu grafiğin ortaya çıkması bazen günler sürmektedir. Bizim deney testimizde isi tüm bileşenler tarafımızdan tamamen bilinmekte olup harici etkileri minimumda tutup sonucun ortaya çıkması hızlandırılmıştır. Burada sistemde kayıp enerji ya da oluşan ataletlerin diğer makine elemanları tarafından sönümlenmesi söz konusu değildir. Oysa herhangi bir işletmede oluşan atalet kuvvetlerinin yansımaları diğer makine elemanları tarafından da bölüşülebileceği için grafiği ilk zamanlarda bu kadar net alınamayabilir.

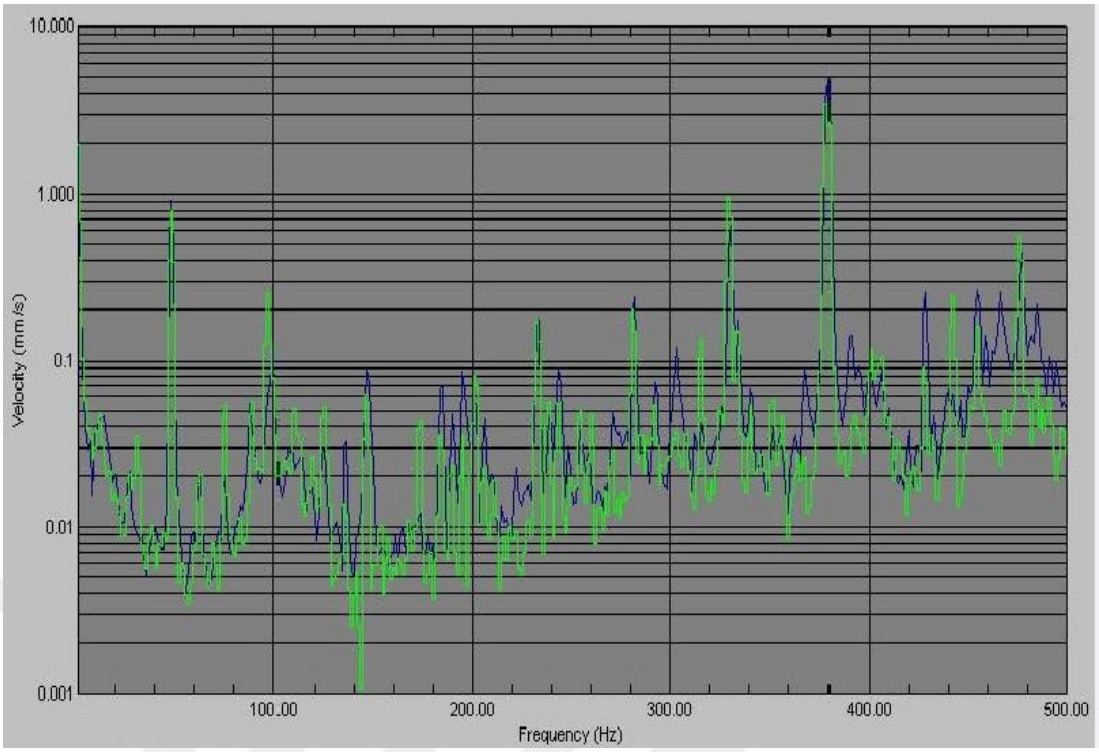
Ayrıca Şekil 4.23'de 1,25 kHz'in hemen yanında harmonikler şeklinde yan batların oluştuğunu görülmektedir ve bu yan batlar belirli aralıklarla tekrarlanmaktadır. Buradaki harmoniklerin ilk piklerinin yüksek, ikinci piklerinin alçak, üçüncü piklerinin ise tekrar yüksek olduğunu görmekteyiz. Oluşan bu şeklin sebebi rulmana verdiğimiz arızanın şeklidir. Biz bu sistemde rulmana duş bilezik arızası verdik. Dış bilezik arızası is kendini spesifik olarak bu şekilde göstermektedir. Ayrıca her bir seferinde bu arızalı noktaya rulmanda ki bilyelerin dönerken temas etmesi söz konusudur. Bu temas anında her bir rulman için arızalı bölgeyi geçerken bir hız değişimi dolayısı ile bir ivme değişimi olacaktır. Bu da bize her bir bilyenin temasında 1 noktadan ivme ölçer tipi sensör ile aldığımız piklerin oluşan frekansını

yükseltecektir. Böylelikle makinenin çalıştığı frekansın çok üzerinde frekanslarda bu arızaların kendini gösterdiğine tanık olunmaktadır.



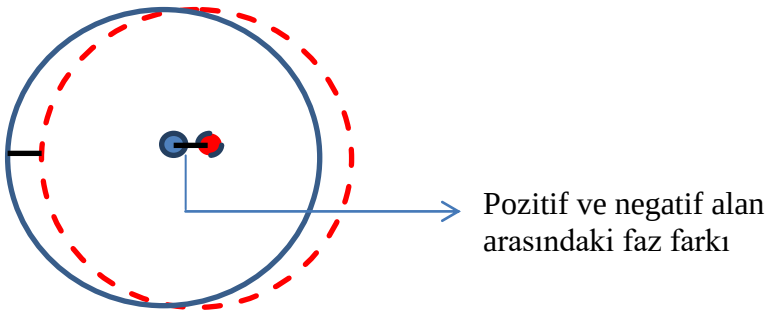
Şekil 4.24. 40 Hz 1nolu rulmana hasar verilmiş durumdayken alınan spectrum grafiği trend analizi

Şekil 4.24'de ise artık harmonikler kısmen red line hattını geçmiştir. Böylelikle tehlikeli seviyenin üzerinde bir takım pikler oluşmuştur. Burada dikkat edeceğimiz yer artık arıza büyüdüğü için oluşan harmoniklerde ki pikler gelişi güzel sıralanmaktadır. Arıza olması artık an meselesidir. Makinede rulmanın değişmesi gerekmektedir. Eğer bir işletmenin kestirimci bakımda titreşim analizi raporunu tutuyorsak raporumuzda bu arıza kırmızı olarak belirtilir ve ivedilikle bakım bölümü tarafından müdahale edilmesi gerektiği gözükmektedir.

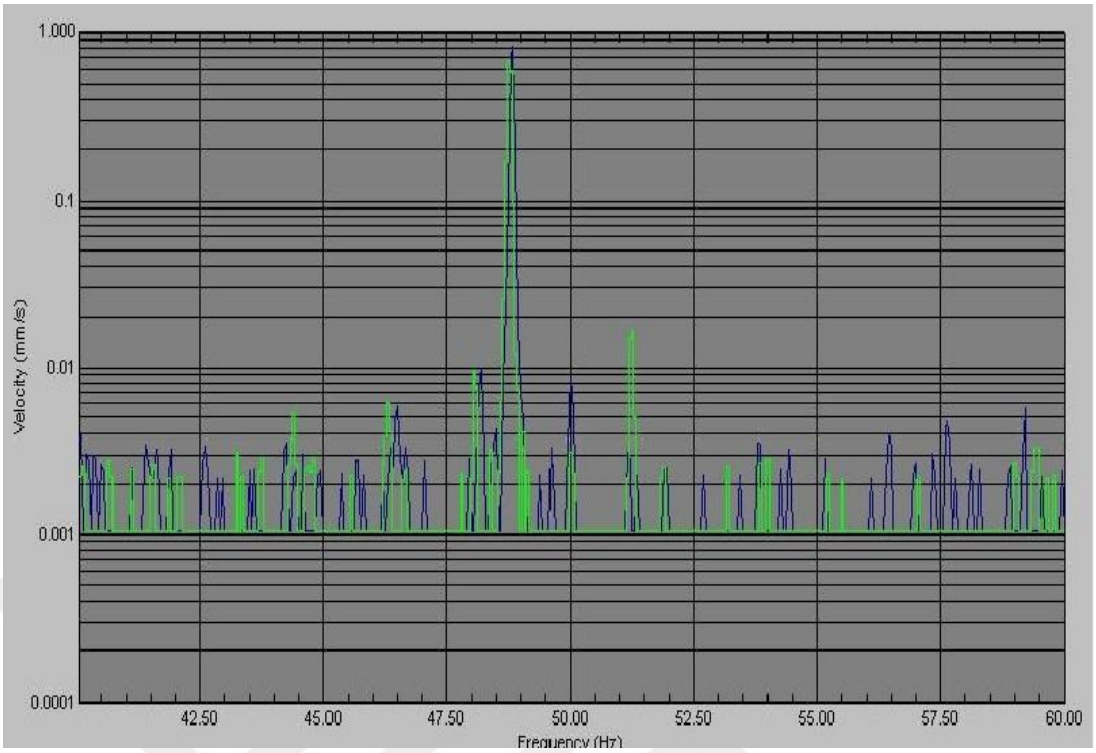


Şekil 4.25. Kaplin Kaçıklığı verilmiş iken yüksek frekans güdümlü faz denemesi

Şekil 4.25'de siteme küçük bir miktar kaplin kaçıklığı verilmiştir. Burada spectrum grafiklerinde devrin 1XRPM,2XRPM ve 3XRPM kat frekanslarında piklerin görüleceği aşikardır. Ancak kaplin kaçıklığında faz değişimi de söz konusudur. Bunun için herhangi bir çalışma anında random bir grafik alınarak bu grafikte ki yer değiştirmelerin hem pozitif bölgede hem de negatif bölge de seyrettiğini görebiliriz. Burada pozitif alandaki maksimum genlik 5 mm/s iken negatif bölgedeki genlik bunu karşılamayacaktır. Kaplin kaçıklığı sırasında zaten çok düzenli bir yol izlenmesi beklenemez. Aradaki faz farkı kadar değişimde sapma olur. Eğer ki çalışma anındaki dönme şekli ile kaçıklık anındaki dönme şeklini üst üste koyarsak bu kadar bir fark meydana gelecektir.

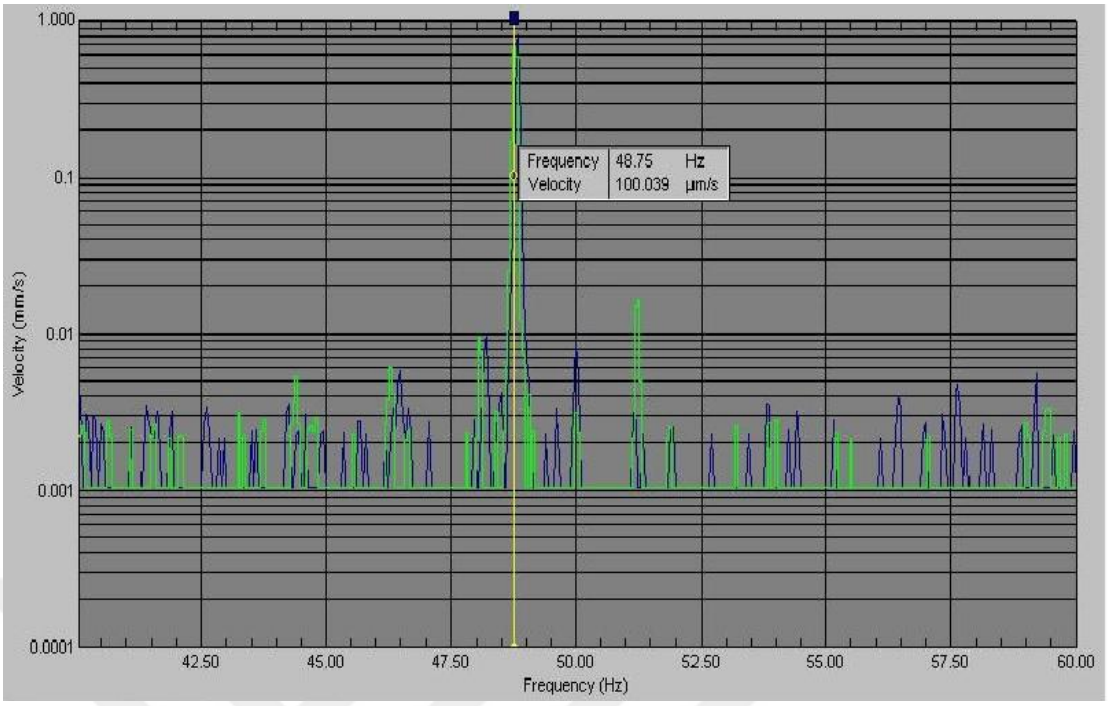


Şekil 4.26. Kaplin kaçıklığındaki faz farkı



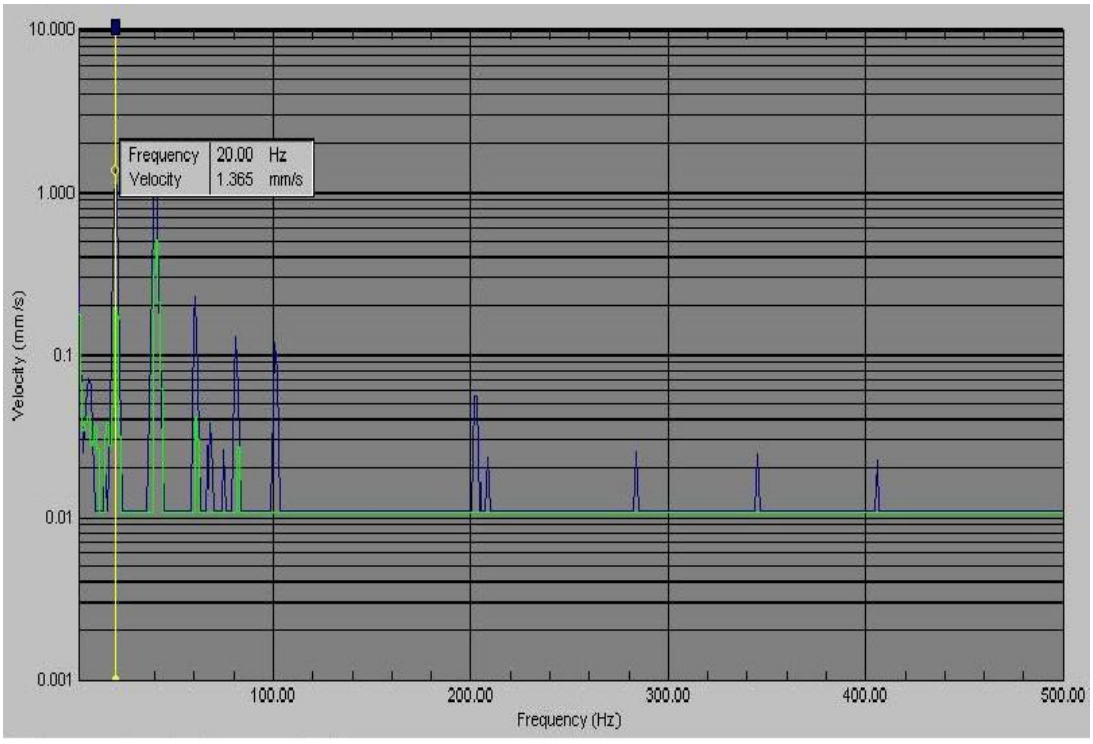
Şekil 4.27. Sistem 50 Hz'de çalışırken roller'ımıza uyguladığımız sürtünme ile yük oluşturma

Şekil 4.27'de sistemde roller'a yapılan müdahale sonucunda daha rahat çalıştığı 48.75 Hz de alınmış hız-frekans grafiğinde görülmektedir. Sistem 50 Hz'e ayarlanmışken tüm sistemin aynı frekansta çalışacağı aşikardır. Ancak sistemde bir yük oluşması istenmektedir. Bu nedenle roller'ın sürtünmesi arttırılarak normal çalışma devri 48.75 Hz'e kadar düşürülmüştür. Bu Frekansstart-up ölçümü ile genlik-frekans diyagramına aktarılmaktadır. Böylelikle sistem 50 Hz'de çalışırken roller daha düşük bir frekansta çalışmak isteyerek sistem için bir yük oluşturacaktır. Bu da sistem, roller'ın çalıştığı frekansta çalıştırılarak sistemin tüm genliklerinin minimal bir düzeyde olduğunu görülerek anlayabilinir. Bu esnada cihazdan alınan frekans ölçümü 48.75 göstermektedir. Sistemin çalışma frekansı, 50 Hz'e çıkartıldığında ise artık sistemde yük oluşturulmuştur.



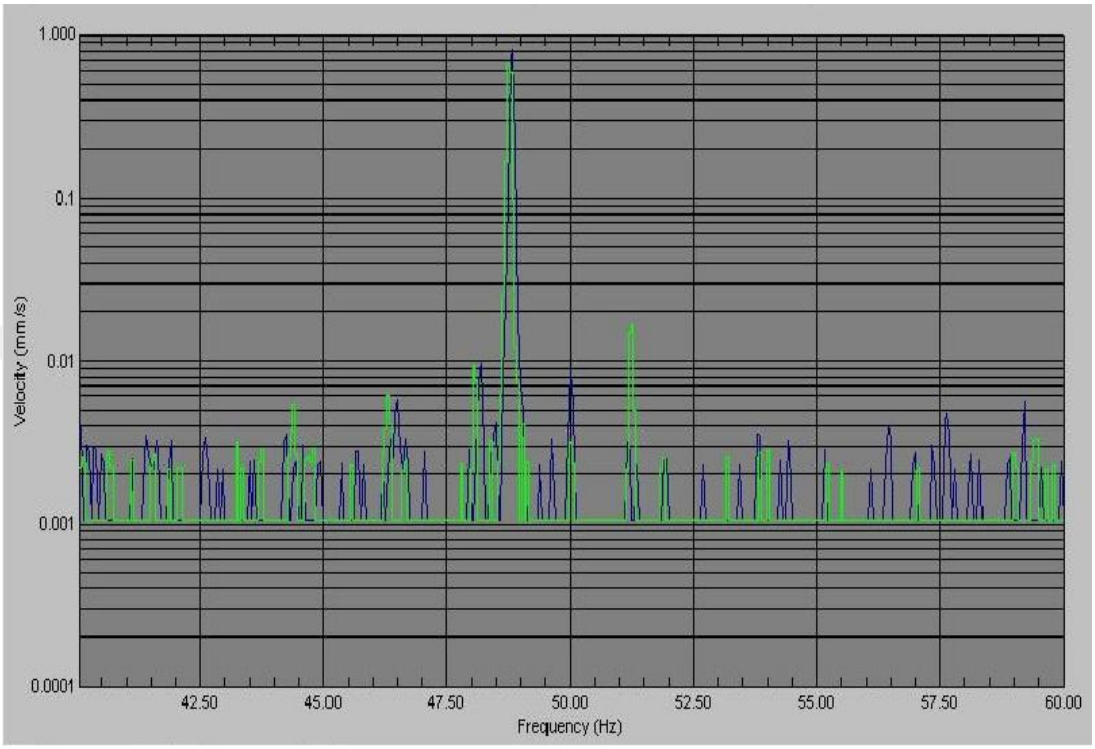
Şekil 4.28. Roller'ın çalışma frekansında roller'ın girişinden alınan ölçüm

Şekil 4.28'de ise roller'ın çalışma frekansında oluşan hızın 1mm/s'ye ulaştığını görülmektedir. Bu gerçek çalışma şartlarında sorun teşkil etmeyen bir hız iken sadece sistemin boşa dönmesini engelleyen bir uygulamadır.



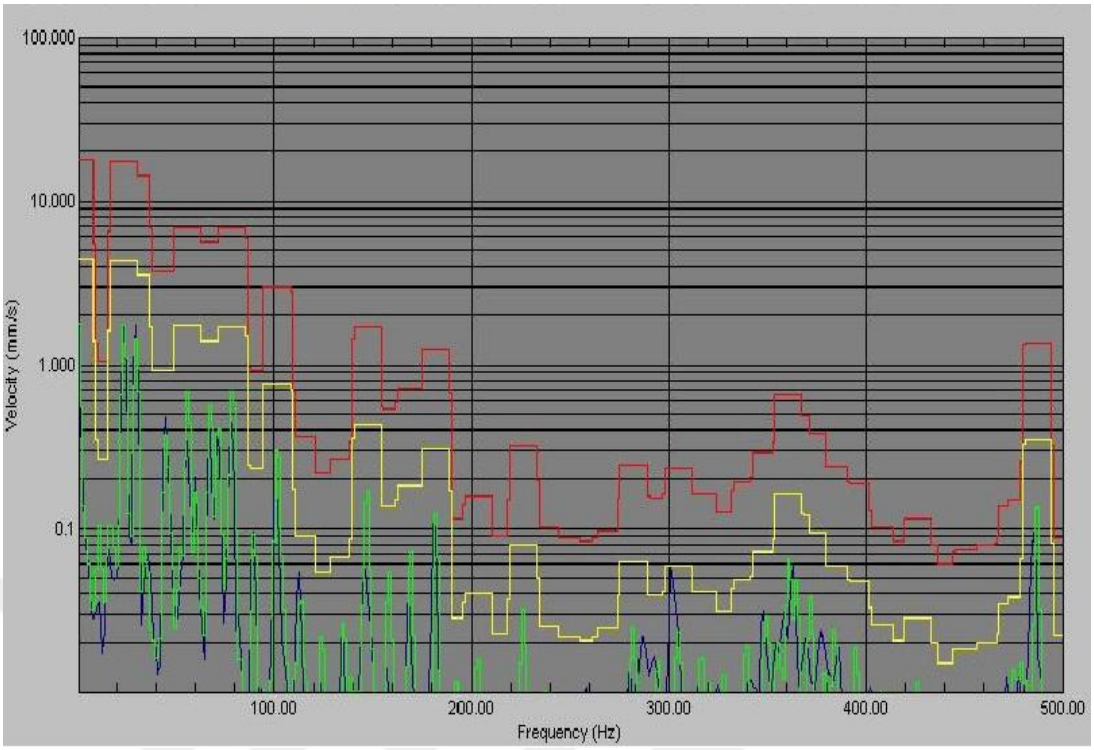
Şekil 4.29 Kaplin Kaçıklığı varken alınan spektrum ölçümü

Şekil 4.29’da kaplin kaçıklığı vermişken sistemin, 20 Hz’de çalışma devri ve katlarında (1XRPM,2XRPM,3XRPM) oluşan pikler görüntülenmiştir. Burada önemli olan, sistemi etkileyecek kadar büyük bir genlik oluşmamaktadır. Ancak sistemin çalışma devri katlarında oluşan kaplin kaçıklığı net bir şekilde gözükmektedir.



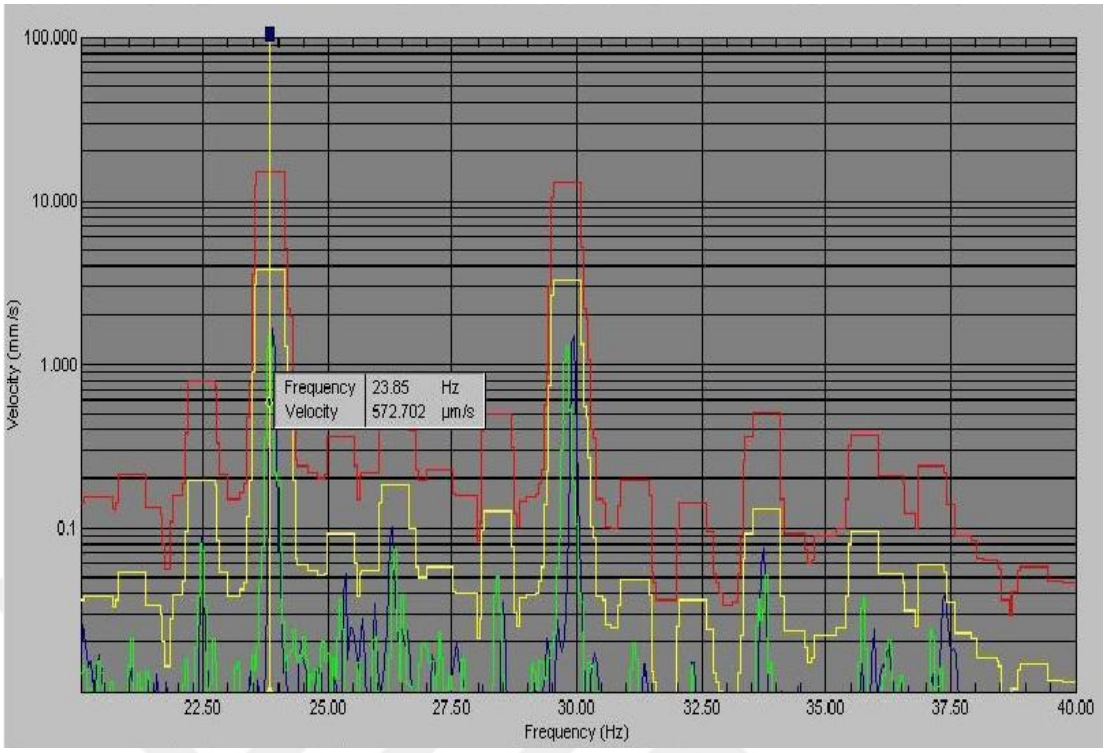
Şekil 4.30. Kaplin kaçıklığı oluşmuşken çalışma frekansındaki genlik artışı

Şekil 4.30’da kaplin kaçıklığını daha net görebilmek için çalışma frekansındaki genlik değerine bakılmıştır. Buradaki genlik değeri yine 1mm/s’nin az altında seyretmektedir. Bu pik’i anlık grafikle inceleme gerekmektedir. Çünkü sistemde bu arızanın büyümesi ve etkilerinin ortaya çıkması çok uzun zaman alabilecekken başka çalışma koşulları altında çok daha hızlı büyüyerek sorun yaratabilecektir. Bu nedenle anlık bir yüksek frekans grafiğine bakmak gerekebilir. Burada daha yüksek frekanslarda makinenin nelere maruz kalabileceğini görülebilir. Öğrenme metodu denilen bu metot makinenin çalışma frekasında alınan ölçümlerin, titreşim ölçüm makinesinin grafik yorumlama programı tarafından alınan değerlerin yüksek frekans aralıklarında modellenmesi sonucu oluşturulur.



Şekil 4.31. 500 Hz'e kadar öğretilmiş spektrum grafiği

Şekil 4.31'de cihazımızdan sistemin 500 Hz'e kadar olan davranışlarını göstermesini istedik. Burada Hızın ancak 2mm/s'yi ancak yakalamaya çalışabileceğini 100 Hz'e kadar olan frekanslarda daha büyük karıncalanmaların olduğunu görülmüştür. Böylelikle kurulan sistem için oluşabilecek tehlikenin çok yakın olmadığını ama sanayide bu kadar sık aralıklarla ortaya çıkacak genliklerin istenmeyeceğini bunun ileride sorun yaratabileceği unutulmamalıdır. Bunun üzerine daha düşük frekanslarda oluşan piklere ve değerlerine bakarak oluşabilecek tehlike daha önceden sezilebilir. Küçük frekanslarda oluşabilecek harmonikler bize bu sistem hakkında daha net bilgiler verecektir.

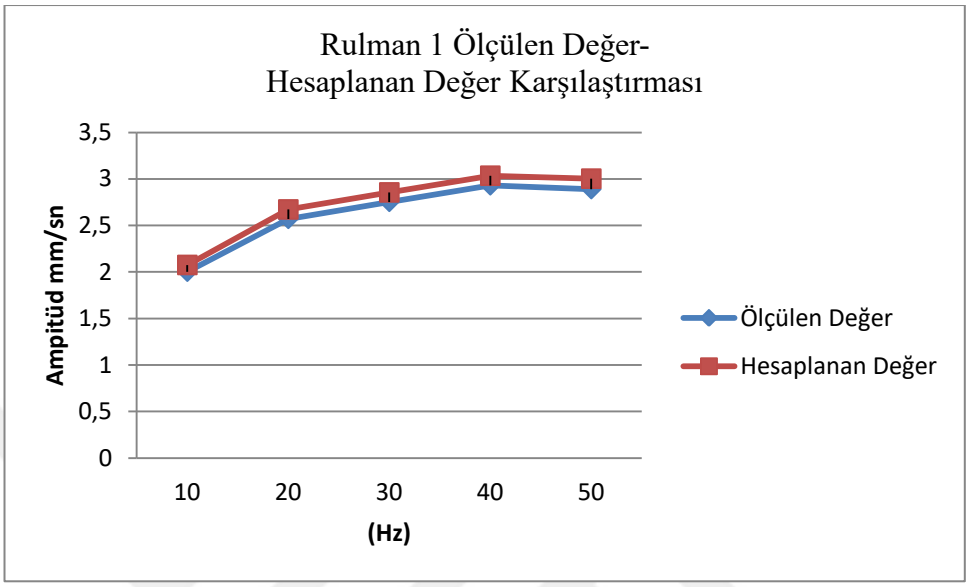


Şekil 4.32. 20-40 Hz arası kaplin kaçıklığı

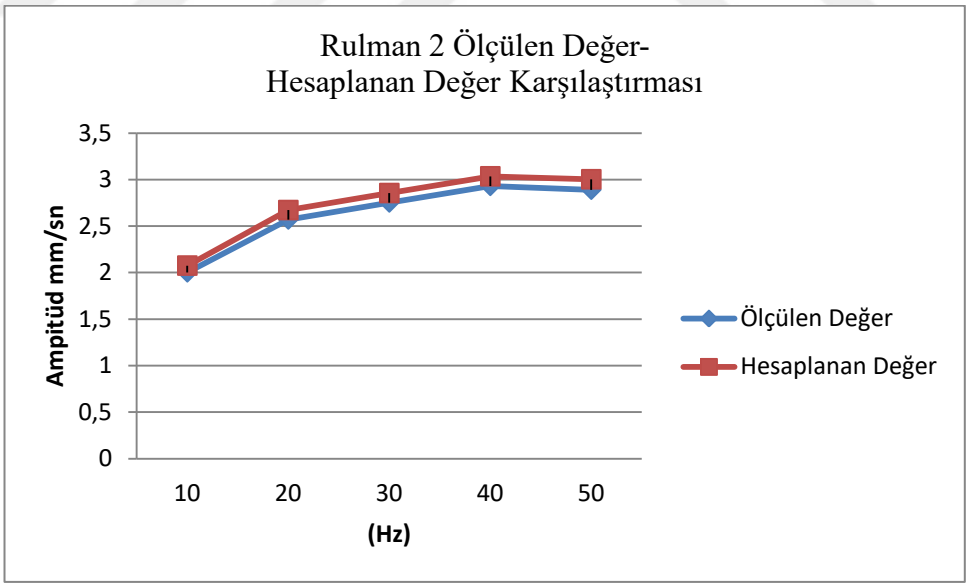
Şekil 4.32'de 23,85 Hz ile 30 Hz frekanslarında ve bunların komşu tepeciklerinde harmonikler oluşmuştur. Bunlar da Kaplin kaçıklığı hakkında kesin bilgi verir. Şekil 1.9'dan hatırlanacağı gibi radyal kaçıklık söz konusu olunca oluşan harmonikler sıralıdır ve 2 faz arasında 180^{o} vardır. Burada Harmoniklerin sıralı olmasından dolayı kaplin'de ki eksenel kaçıklık net bir şekilde gözükmektedir. Eğer grafikte çalışma frekansı ve katlarındaki frekanslardaki genlik değerleri daha komplike olsaydı faz ölçümü yapılarak oluşan arızanın türü teşhis edilebilirdi.

4.12. Ölçülen Değerler İle Hesaplanan Değerlerin Grafik Karşılaştırmaları

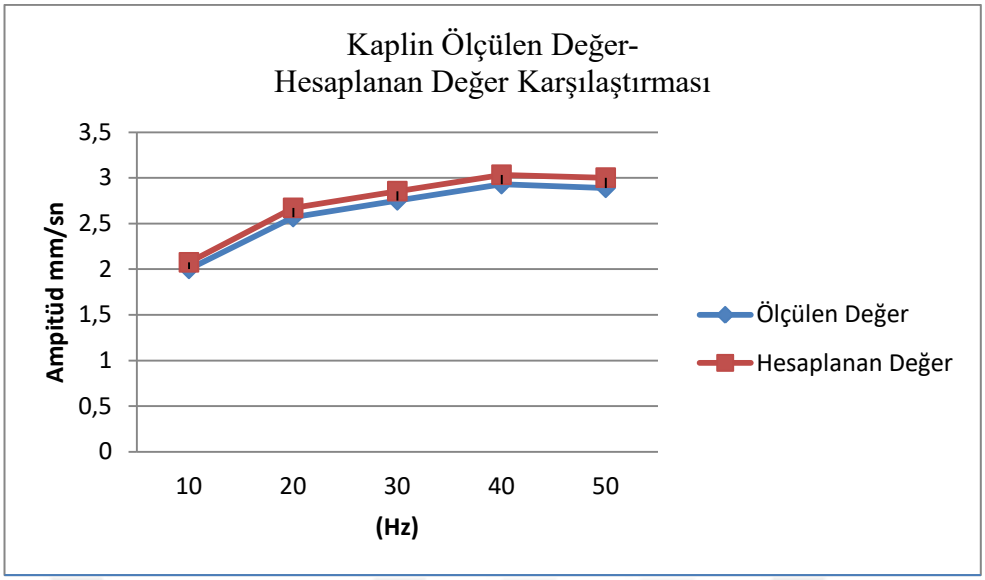
4.12.1. Dişli kutusu arızalıyken rulmanlardan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırılması



Şekil 4.33. Dişli kutusu arızalıyken 1. rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



Şekil 4.34. Dişli kutusu arızalıyken 2. rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması

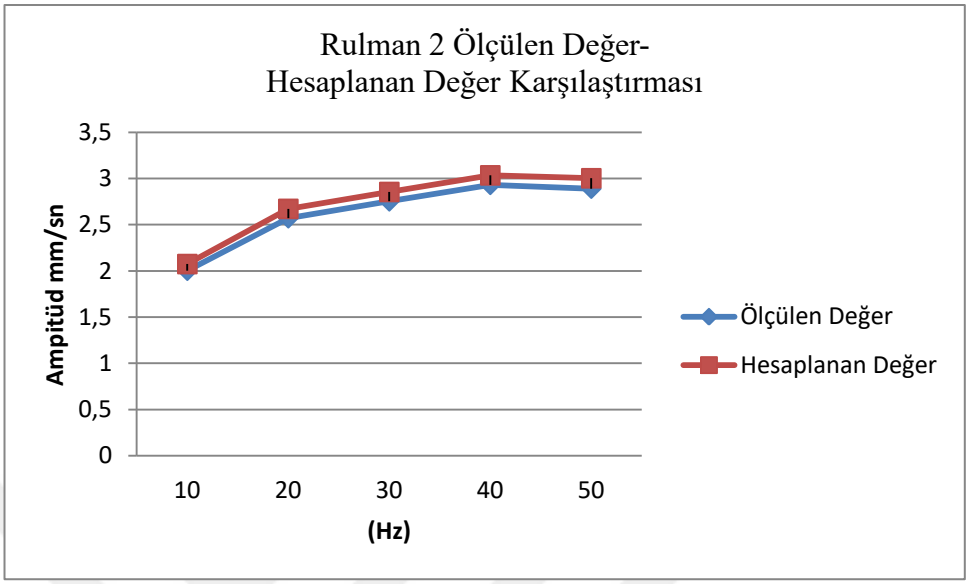


Şekil 4.35. Dişli kutusu arızalıyken kaplinden alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması

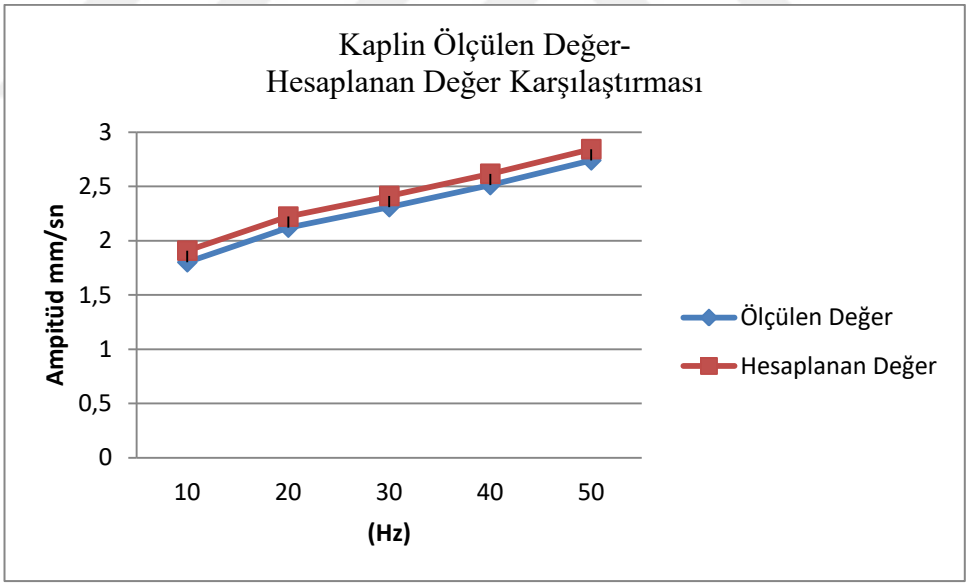
Şekil 4.33, 4.34, 4.35'de dişli kutusu arızalıyken 2 rulmandan ve kaplinden alınan ölçümler ile SPSS analizi ile bulunan formülde hesaplanan değerlerin karşılaştırıldığı grafikleri aşağıda gözükmektedir. Değerlerin arasındaki farkların yer yer 1/100 seviyelerine kadar düşmesinden dolayı kimi yerlerde grafikler çakışık gibi gözükmektedir. Teorikte tamamen çakışık olabilecek bu grafikler mobilite kavramından dolayı zaman zaman ayrışmaktadır. Unutulmamalıdır ki kurulan 4 sistemde elde insan güdümünde kurulmuştur. Bu nedenle yapılan eksenleme ve çalışma tam olarak %100 ideal şartlarda olmayabilir. Ayrıca ölçüm alınırken oluşturulan sistemler beton zeminler üzerinde çalıştırılmıştır. Kurulan deney setleri yere sönümleme elemanları ile monte edilmemiştir. Bu da titreşim davranışlarında yer ile oluşan tepkimelerin sistemleri direk etkilemesi ile sonuçlanmış olabilir.

Mobilite; çevresel ve sistemin içinde oluşabilecek faktörlerdir. Örneğin, yer ile olan tepkimeler, mekanik gevşeklikler, eksenel bozukluklar, ölçüm anında probun tam olarak verileri alamaması gibi sorunlar ölçüm değerlerinin %100 doğruluğunu engeller. Her ne kadar kurulan sistemler titizlikle kurulmuş olsa ve ölçümler titizlikle alınmış olsa bile genellikle teorikte yapılan hesaplamalar pratikte tam olarak uygulanamazlar.

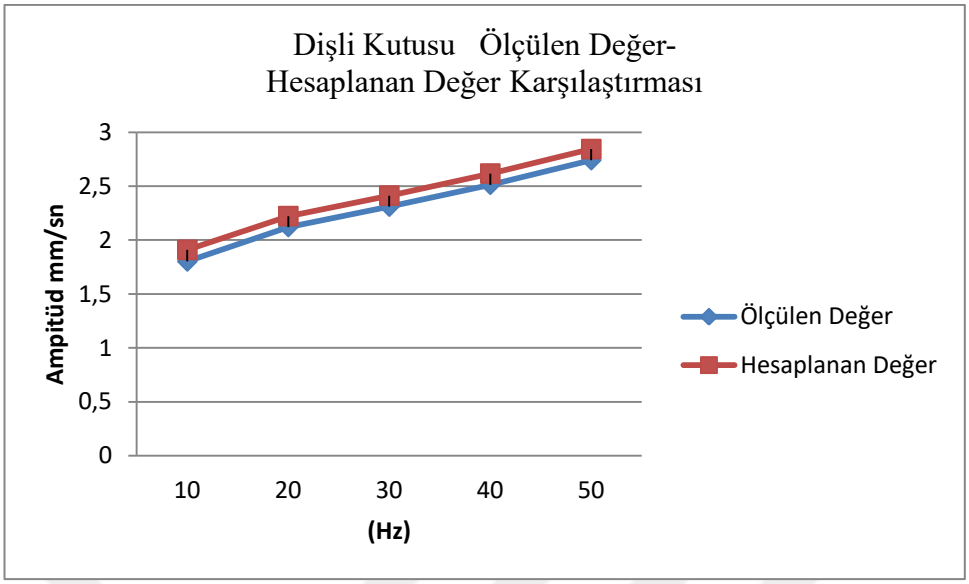
4.12.2. Birinci Rulman arızalıyken 2. rulmandan, dişli kutusu'ndan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırılması.



Şekil 4.36. Birinci rulman arızalıyken ikinci rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



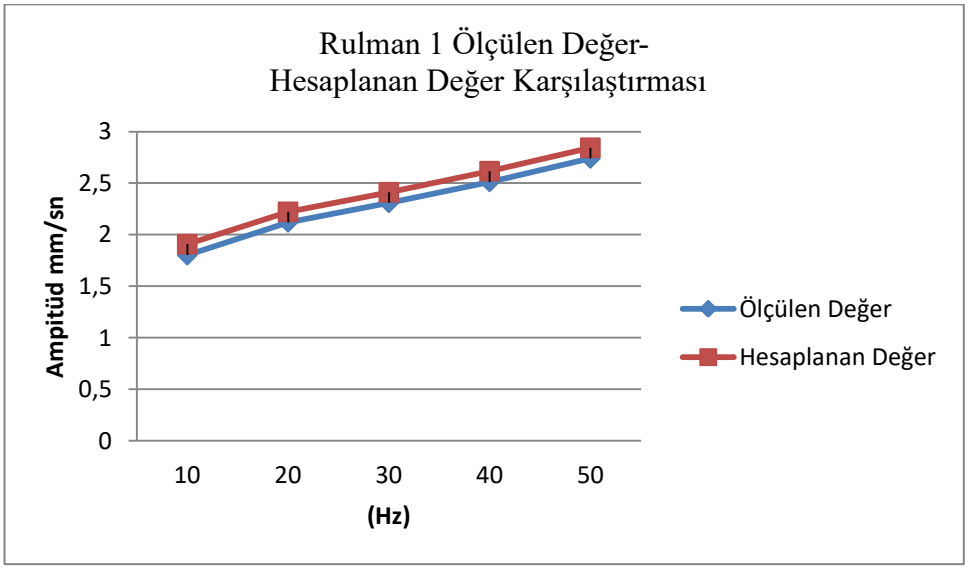
Şekil 4.37. Birinci rulman arızalıyken kaplinden alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



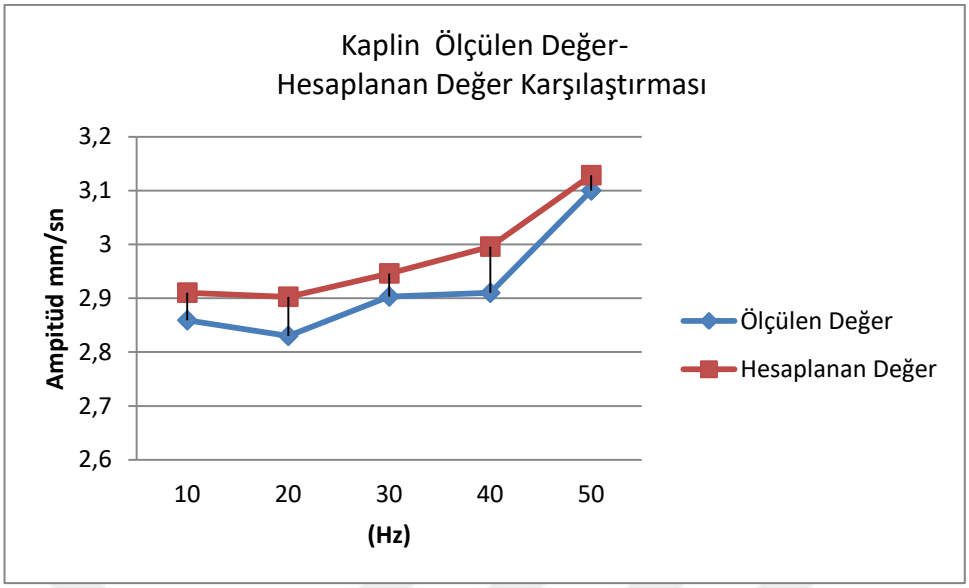
Şekil 4.38. Birinci rulman arızalıyken dişli kutusun'dan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması

Şekil 4.36, 4.37 ve 4.38'de Birinci rulman arızalıyken dişli kutusu, ikinci rulmandan ve kaplinden alınan ölçümler ile bulunan formülde hesaplanan değerlerin karşılaştırıldığı grafikleri görülmektedir. Değerlerin arasındaki farkların yer yer 1/100 seviyelerine kadar düşmesinden dolayı kimi yerlerde grafikler çakışık gibi gözükmektedir.

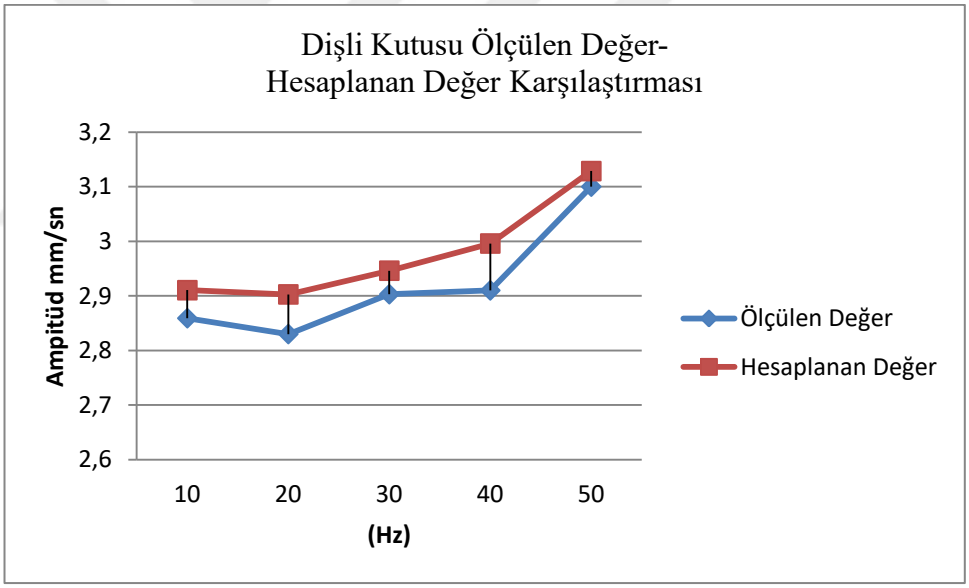
4.12.3. İkinci Rulman arızalıyken birinci rulmandan, dişli kutusundan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırılması



Şekil 4.39. İkinci rulman arızalıyken birinci rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



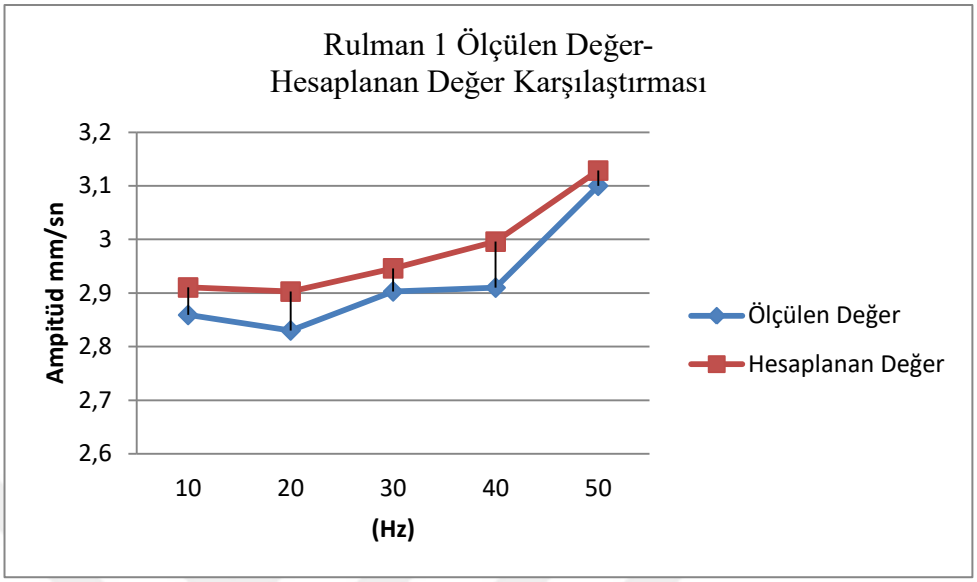
Şekil 4.40. İkinci rulman arızalıyken kaplinden alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



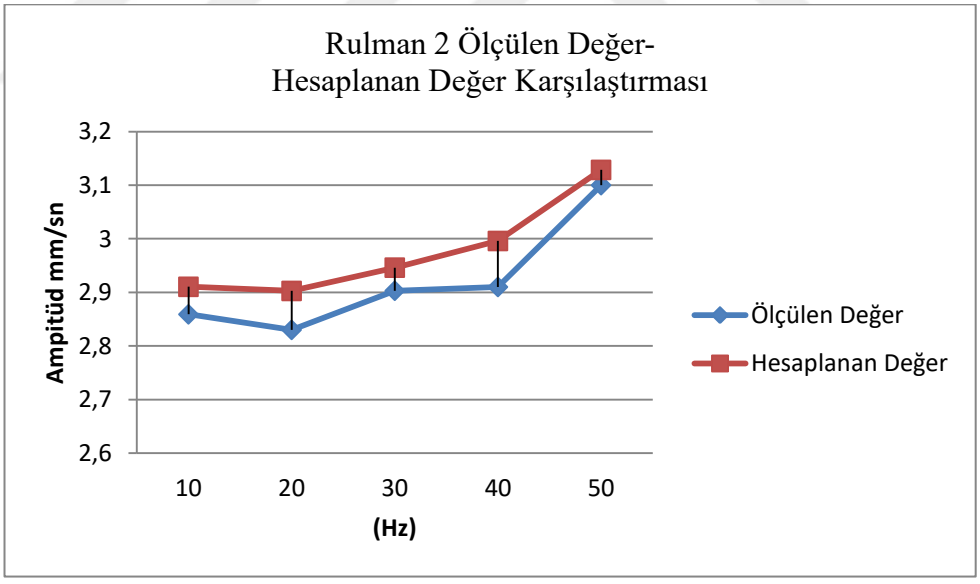
Şekil 4.41. İkinci rulman arızalıyken dişli kutusundan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması

Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41'de İkinci rulman arızalıyken dişli kutusu, birinci rulmandan ve kaplinden alınan ölçümler ile bulunan formülde hesaplanan değerlerin karşılaştırılan grafikler görülmektedir. Değerlerin arasındaki farkların yer yer 1/100 seviyelerine kadar düşmesinden dolayı kimi yerlerde grafiğimiz çakışık gibi gözükmektedir.

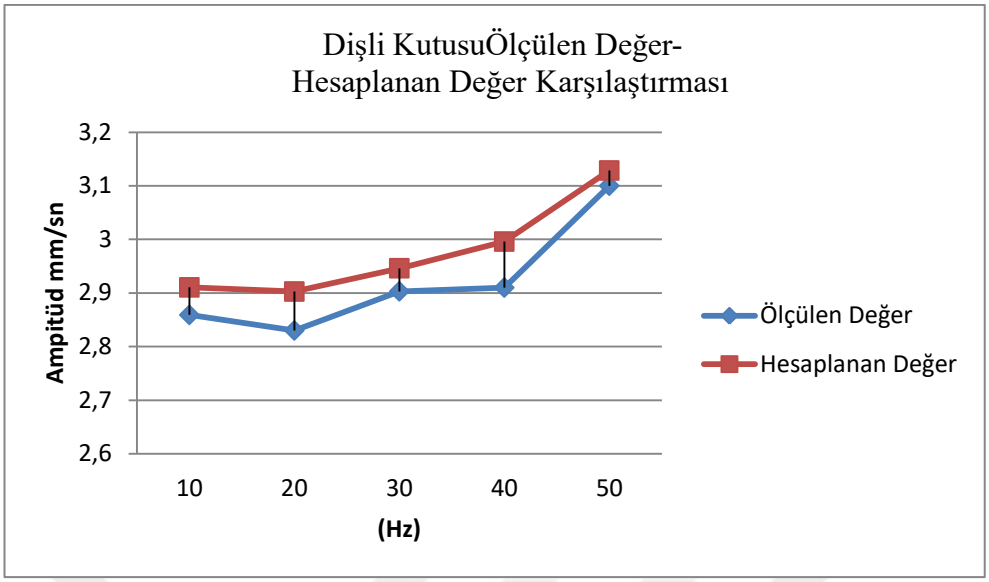
3.12.4. Kaplin arızalıyken birinci rulmandan, dişli kutusun'dan ve kaplinden alınan ölçümlerin karşılaştırılması.



Şekil 4.42. Kaplin arızalıyken birinci rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



Şekil 4.43. Kaplin arızalıyken ikinci rulmandan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması



Şekil 4.44. Kaplin arızalıyken dişli kutusundan alınan ölçümün hesaplanan değerler ile frekanslara göre karşılaştırılması

Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'de kaplin arızalıyken dişli kutusu ve rulmanlardan alınan ölçümler ile bulunan formülde hesaplanan değerlerin karşılaştırıldığı grafikleri görülmektedir. Değerlerin arasındaki farkların yer yer 1/100 seviyelerine kadar düşmesinden dolayı kimi yerlerde grafikler çakışık gibi gözükmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kurulan 4 adet deney seti üzerinde 2 adet farklı cihazdan alınan tüm veriler titizlikle incelenmiştir ve hareketin yönüne göre 2 farklı sonuca ulaşılmıştır. Ancak elde edilen birbirinden farklı 2 adet ampirik formül bize göstermiştir ki hareketin olduğu yerde sistem dinamiği bozulduğunda sistemdeki tüm elemanlar etkilenmektedir. Hareketin bir bölgede değişimi o bölgede oluşabilecek moment ve titreşim değişimlerinden dolayı hareketi ileten tüm mekanizmada oluşan genlik değerlerini etkiler ve bu değişen genlik değerleri ister grafiksel olarak ister matematiksel olarak yorumlanabilir.

Yukarıda yapılan açıklama çerçevesinde bu çalışmada;

i.Kapalı kutu içerisinde bulunan ve arızalı olduğundan şüphelenilen dişlilerin; arızalı olup olmadığını sistemi sökmeden tanımlayabilen kepstrum analizinin yanı sıra, autospektrum tekniği ile de, ulaşılamayan dişli kutusu yataklarından daha uzak bir noktadan alınan genlik değerleri ile arıza oluşumunun başlangıç safhalarında tespit edilebileceği gösterilmiştir.

ii. Ayrıca dişlilerin bağlı olmuş olduğu eksenlerin konstrüksiyon durumları farklılaşma gösterdiğinde bile dişli arızalarının kapalı kutu dışındaki bir yataktan alınan autospektrum ölçümü ile tespit edilebileceği sonucu elde edilmiştir. Bunun için 2 ayrı çeşit sistem ele alınmış; birinci sistemde hareketin yönü değiştirilmemiş ve sonuçta;

$X=\left(\frac{A}{A_0}(1+L)\right)X_o$ ampirik formülü elde edilmiş,

ikinci sistemde ise dişli kutusunda hareketin yönü değiştirilmiş ve θ her bir sistem için ayrı bir kat sayı olmak üzere;

$X=\left(\frac{A}{A_0}.\theta\right)X_0$ şeklinde bir ampirik formül elde edilmiştir.

iii. Bu çalışmada regresyon analizi tekniği ve pearson kolerasyonu ile elde edilmiş olan ve deney sistemlerinde kullandığımız rulman, kaplin, ve dişli parametrelerinin ölçümleri ile ilişkili olarak elde edilen değerler makinelerin ilk montajından itibaren düzenli olarak ölçümlendiği taktirde makine dişli arızalarının durumu ve dişli kutusu içerisinde bulunan elemanlardan etkilenme seviyeleri de ölçümlenmiş bulunmaktadır. Ayrıca bu arızaların Taguchi yöntemi ile sisteme etki değerleri hesaplanmıştır.

iv. Elde edilen tüm denklemler yapay sinir ağları yönteminde alınan değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağları çalışmasında bulunan sonuçlar bizim bulduğumuz sonuçlara göre daha uzaktır, bir başka değişle bizim bulduğumuz sonuçlar yapay sinir ağları ile her bir aşama için oluşturulan değerlerden daha yakınsaktır. Bu bağlamda yapay sinir ağları tekniğinde hem ileri beslemeli hem de geri beslemeli sonuç tahmin yöntemleri kapsamında bulduğumuz ve uyguladığımız formül sonuçlarının güvenirliği test edilmiştir.

v. Bu çalışmada aynı zamanda bir sistemde çalışan elemanların arıza durumunda diğer elemanlara olan etkileri izlenmiştir. Böylelikle oluşan ilk arızanın zaman içinde sistemdeki diğer elemanlara zarar verebileceği görülmüş olup kestirimci bakımda titreşim analizi yöntemi uygulanırken sadece bir eleman üzerinden değil sistemdeki belli başlı diğer elemanlar ile ilişkilendirilerek uygulanması gerektiği görülmüştür.

Bu çalışmada, titreşim analizi ile elde edilen sonuçların birer karşılaştırması yapılmıştır ve kurulan sistemler ile bu değişikliklerin boyutları incelenmiştir. Basit sistemlerde bunun yüksek zararlar vermeyeceği ama komplike sistemlerde ve kritik makinelerde daha çok önem arz edebileceği, sistemdeki çok basit bir rulman arızasının tespit edilmez ise sistemin başka yerlerinde büyük sorunlar oluşturabileceği görülmüştür. Tek düzlemli makinelerde arızalanan parçanın ölçüm aldığımız parça ile arasındaki uzaklıktan yola çıkarak tespit edilebileceği, çift ve daha fazla eksenli sistemlerde ise her bir makine için orjin değerler ve trend analizindeki değerler ile farklı ampirik formüllerin oluşturulabileceği görülmüştür. Böylece bununda fabrikalardaki kritik ve kritik üstü makinelerin arızalarının ön kestirmeye dayalı bakımlarda etkin olabileceği görülmüştür.

Böylelikle makinede çıkabilecek hasarı önceden belirleyerek bakımdan kaynaklı duruşlar arasında daha uzun süre, bakım süresinde azalma, yedek parça stoklarında azalma, beklenmeyen duruşlarda azalma ve daha az makina hasarı gibi işletmelerde bir çok iyileştirmeye sebep olunabilir.

Bundan sonra bu doğrultuda yapılacak çalışmalarda küçük dişli kutularının yerine daha kompleks planet mekanizmalar üzerine kestirimci bakımda titreşim analizi çalışmaları yapılabilir. Böylelikle büyük planet mekanizmalarda, dişli arızası yaşandığında hangi dişlinin arızalandığının önceden tespit edilip edilemeyeceği araştırılabilir.

Ayrıca bundan sonra yapılacak çalışmalarda bulunan formüller piyasada kullanılmakta olan cihazlara bir yazılım ile yüklenilerek ya da titreşim ölçüm cihazlarının ara yüzlerine veya sistemlerine uygulanılarak, önce ölçüm alınıp sonra bu formüllerin uygulanması gibi oluşacak iki aşamanın önüne geçip tek seferde alınan ölçüm ile makineden gerekli değerler görülebilir. Bunun için Türkiye'de titreşim ölçümü yapan cihazların üretimi olmadığı için yurt dışındaki titreşim ile ilgilenen firmalar ile iş birliğine gidilmeli, bir programlama dili uzmanı yardımı ile şu anda kullanılan cihazlara ekstra olarak bu özellik yüklenmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Kobu B., *Bakım Yöntemleri,* 2nd ed., Fatih Yayınevi, İstanbul, 67-71, 1994.

[2] Belek H. T., Endüstriyel Tesislerin Bakımında Modern Yaklaşım, *Mühendis ve Makine*, 1988, **29**, 29-36.

[3] Belek H. T., Karadoğan H., Endüstriyel Vantilatörlerde Uyarıcı Dinamik Bakım, *Ulusal Makine Teorisi*, 1988, **94**, 94-105.

[4] Smith R., Mobley K., *Endüstriyel Makinelerde Bakım ve Onarım*, 1st ed., Bileşim Yayınevi, İstanbul, 111-119, 2014.

[5] Çağlayan H. D., Değişik Tip Pompalarda Titreşim Ölçüm ve Analizi ile Arıza Tanımı, *Vibratek Teknik*, 2005, **11**, 14-16.

[6] Mobley K., *Vibration Fundamentals*, 1st ed., Newnes Publishers, London, 232-239, 1999.

[7] Edwards D. J., Holt G. D., Harris F. C., Journal of Quality in Maintenance Engineering, *MCB UP*, 1995, **21**, 35-42.

[8] Chand G., Shirvani B., Implementation of TPM in Cellular Manufacture, *Journal of Materials Processing Tecnology*, 2006, **34**,42-47.

[9] Köse K., Proaktif Bakım Elemanları ile Lazerli Kaplin Ayarı ve Yerinde Balans, *Makine Teknolojileri*, 2004, **77**, 34-39.

[10] Baron R., *Engineering Condition Monitoring*, 1st ed., Longman Publishers, London, 56-64, 1996.

[11] Orhan S., Aktürk N., Aktarma Organları Dişlilerinde Oluşan Fiziksel Hataların Titreşim Analizi ile Belirlenmesi, *Gazi Üni. Müh. Fak. Dergisi*, 2003, **3**, 97-106.

[12] Arthur R., A New Approach in Maintanance of Nuclear Power Plants, *IS on Nuclear Energy*, 2005, **11**, 21-29.

[13] Crawford A., Arthur R., The *Simplified Handbook of Vibration Analysis*, 1st ed., CSI Publishers, New York, 432-443, 2005.

[14] Crawford A., Arthur R., The *Simplified Handbook of Vibration Analysis*, 1st ed., CSI Publishers, New York, 111-117, 2005.

[15] Belek H. T., Toprak T., Endüstriyel Tesislerde Makine Performansına Dayalı Bakım Planlaması, *D.T.Ü. SEKN*, 1997, **20**, 20-22.

[16] Orhan S., Arslan H., Aktürk N., Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi, *Gazi Üni. Müh Fak. Dergisi*, 2003, **18**, 39-48.

[17] Engür A. İ., Kestirimci Bakımda Kalite Anlayışının Bakım Takvimlerine ve MTBF Analizine Etkisi., *5. Bakım Kongresi*, Denizli, Türkiye, 6-9 Ekim 2007.

[18] Çimen M., Bilyeli Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi ile Tespiti ve Gemi Makinelerinde Kestirimci Bakım Uygulaması, *YLT*, 2015,**11**, 34-39.

[19] Kurt E., Kestirimci Bakım Yöntemi Kullanılarak Egzoz Fanında Arıza Teşhisi, *YLT*, 2012,**1**, 45-49.

[20] Orhan S., Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analizi İle Kestirimci Bakımı, *DT*, 2002,**1**, 89-95.

[21] Perry D., Peace S., An Application of Taguchi Method of Experimental Design for New Product Design and Development Process, *Engineering*, 2002, **23**, 56-61.

[22] Mobley K., *Introduction to Engineering Through Case Studies*, 1st ed., Tavenner Publishers, London, 123-140, 2003.

[23] Wowk V., Mechinery Vibration, *Measurement and Analysis*,1991, **07**, 19-36

[24] Bellman R., Casti J., Differential Quadrature And Long Term Integration., *Journal of Mathematical Analysis And Applications*,1971, **34**, 235-238.

[25] Engür A. İ., Kestirimci Bakımda Titreşim Analizi , *Mühendis ve Makina*, 2005, **570**, 27-31.

[26] Engür A. İ., Kestirimci Bakımda Kalite Anlayışının Bakım Takvimlerine ve MTBF Analizine Etkisi., *5. Bakım Teknolojileri* , Denizli, Türkiye, 6-9 Ekim 2007.

[27] Taptık Y., Başantı S., Kalite Fonksiyonlarını Geliştirme Tekniği, Yüksek Lisans Tezi, Istanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul, 2005, 232659.

[28] Fag E., *FAG Rolling Bearing Damage*, 1 st ed., WL Publishers, Berlin, 27-26, 1995.

[29] Karabay S., *Mekanik Titreşimler*, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İzmit, 78-96, 2011.

[30] Bert C. W., Jang S. K., Striz A. G., Two New Approximate Methods For Analyzing Free Vibration of Structural Components, *AIAA Journal*, 1987, **26**, 612-18.

[31] Civalek Ö., *Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Harmonik Diferansiyel Quadrature (HDQ) Metodu ile Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi*, 1. ed., DT Yayınevi ,İzmir, 45-54, 2003.

[32] Civalek Ö., Ülker, M., Harmonic Differential Quadrature (HDQ) For Axisymmetric Bending Analysis Of Thin Isotropic Circular Plates, *International Journal of Structural Engineering and Mechanics*, 2004,**17**, 1-14.

[33] Civalek Ö., Ülker, M., Free Vibration Analysis Of Elastic Beams Using Harmonic Differential Quadrature (HDQ), *Mathematical and Computational Applications*, 2004, **9**, 257- 264.

[34] Bert C. W., Malik M., Differential Quadrature Method in Computational Mechanics: A Review, *Applied Mechanics Review*, 1996, **25**, 32-35.

[35] Du H., Lim M. K., Lin R. M., Application of Generalized Differential Quadrature Method to Structural Problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1994, **25**, 32-36.

[36] Smith R., Mobley K., *Endüstriyel Makinelerde Bakım ve Onarım*, 1st ed., Bileşim Yayınevi, İstanbul, 115-124, 2014.

[37] Leissa A. W., *Vibration of Plates*, 1st ed. NASA, Washington, 312-378, 1969.

[38] Chen C. N., Vibration of Prismatic Beam on an Elastic Foundation by the Differential Quadrature Element Method, *Computers and Structures*, 2000, **77**, 1-9.

[39] Striz A. G., Wang X., Bert C. W., Harmonic Differential Quadrature Method and Applications to Analysis of Structural Components, *Acta Mechanica*; 1995, **11**,85-94.

[40] Blevins R. D., *Formulas For Natural Frequency And Mode Shapes*, 1st ed., Malabur, Florida, 168-172, 1984.

[41] Bellman R., Kashef B. G., Casti J., Differential Quadrature: A Technique For The Rapid Solution Of Nonlinear Partial Differential Equation., *Journal Of Computational Physics*, 1972, **10**, 40-52.

[42] Shu C., Richards B., Application of Generalized Differential Quadrature To Solve Two- Dimensional Incompressible Navier -Stokes Equations, *International Journal For Numerical Methods In Fluids*,1992, **15**, 791-798.

[43] Civalek Ö., Çatal H. H., Linear Static And Vibration Analysis Of Circular And Annular Plates By The Harmonic Differential Quadrature (HDQ) Method, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2003, **6**, 45-76.

[44] Bert C. W., Wang Z., Striz A. G., Static and Free Vibrational Analysis of Beams and Plates by Differential Quadrature Method, *Acta Mechanica*, 2016, **102**, 11-24.

[45] Civalek Ö., Çatal H. H., Diferansiyel Quadrature Yöntemleriyle Yapıların Karşılaştırmalı Dinamik Analizi, *5.Ulusal Deprem Mühendisliği* Kongresi, İstanbul, Türkiye, 24-25 Mayıs 2015.

[46] Ugural A. C., *Stress in Plates and Shells*, 2nd ed., McGraw Hill Company., Madrid, 34-41, 1999.

[47] Shu C., Xue H., Explicit Computations of Weighting Coefficients in the Harmonic Differential Quadrature, *Journal of Sound and Vibration*; 1997, **204**, 549-55.

[48] Paz M., *Structural Dynamics*, 1st ed., Theory and Computation Publishers, London, 56-78, 1997.

[49] Chen T. C., Hsien C., Tsai M. C., A New Driver Based on Dual - mode Frequency and Phase Control for Travelling-wave Type Ultrasonic Motor, *Energy and Conversion and Management*, 2015, **49**, 2767-2775.

[50] Hang L., Weng W. H., Chan Y. C. ve Fang C. H., *Self–Constructingre Current Fuzzy Neural Network Forultrasonic Motor Drive*, 1 st ed., Sice Annual Pub, Taipei, 234-248, 2010.

EKLER

EK - A

Tablo A.1. Yapay sinir ağları çıktıları

1. ANN (feedforwardneaural network) parametre optimizasyonu				
'hardlim'	0,03693	0,03693	0,03693	0,03693
'logsig'	0,067377	0,071385	0,040032	0,060963
'tansig'	0,074577	0,051054	0,076847	0,112558
'tribas'	0,081987	0,052074	0,052647	0,096781
'radbas'	0,038463	0,050816	0,067089	0,089719
Elman				
	5	10	15	20
'hardlim'	0,051296	0,051296	0,051296	0,051296
'logsig'	0,078578	0,162235	0,090471	0,070703
'tansig'	0,095567	0,056372	0,168354	0,115358
'tribas'	0,127109	0,154916	0,11571	0,190397
'radbas'	0,112961	0,252774	0,149718	0,228348

1. ANN (feed forward neaural network) parametreoptimizasyonu				
	5	10	15	20
'hardlim'	0,022595	0,022595	0,022595	0,022595
'logsig'	0,045151	0,033145	0,060385	0,040277
'tansig'	0,045959	0,043764	0,029796	0,083093
'tribas'	0,026397	0,046484	0,029885	0,048881
'radbas'	0,044808	0,046477	0,092724	0,036041
Elman				
	5	10	15	20
'hardlim'	0,079365	0,079365	0,079365	0,079365
'logsig'	0,1051	0,131126	0,107327	0,146499
'tansig'	0,236618	0,13668	0,080625	0,129065
'tribas'	0,148558	0,207876	0,327109	0,105644
'radbas'	0,083495	0,217545	0,100305	0,252198

Tablo A.2. Yapay sinir ağları çıktıları

spread	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
accuracy	0,225618	0,210002	0,204254	0,203992	0,204754	0,204826	0,204764	0,204574
accuracy	0,512855	0,51309	0,515322	0,502913	0,480381	0,453235	0,426841	0,403817

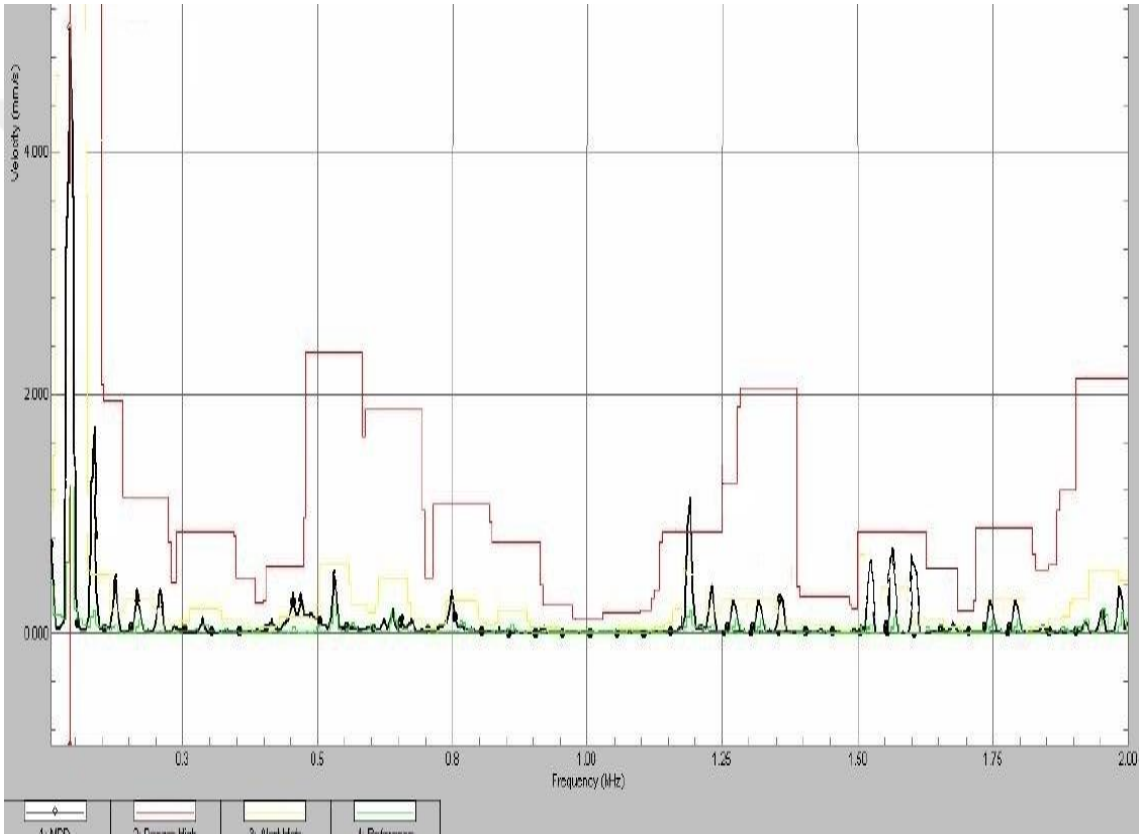
	spread	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
rb	accuracy	0,093588	0,175253	0,129123	0,13576	0,146074	0,158265	0,168449	0,176144
grn	accuracy	0,160051	0,123739	0,100217	0,089485	0,085887	0,084662	0,083697	0,082459

EK - B

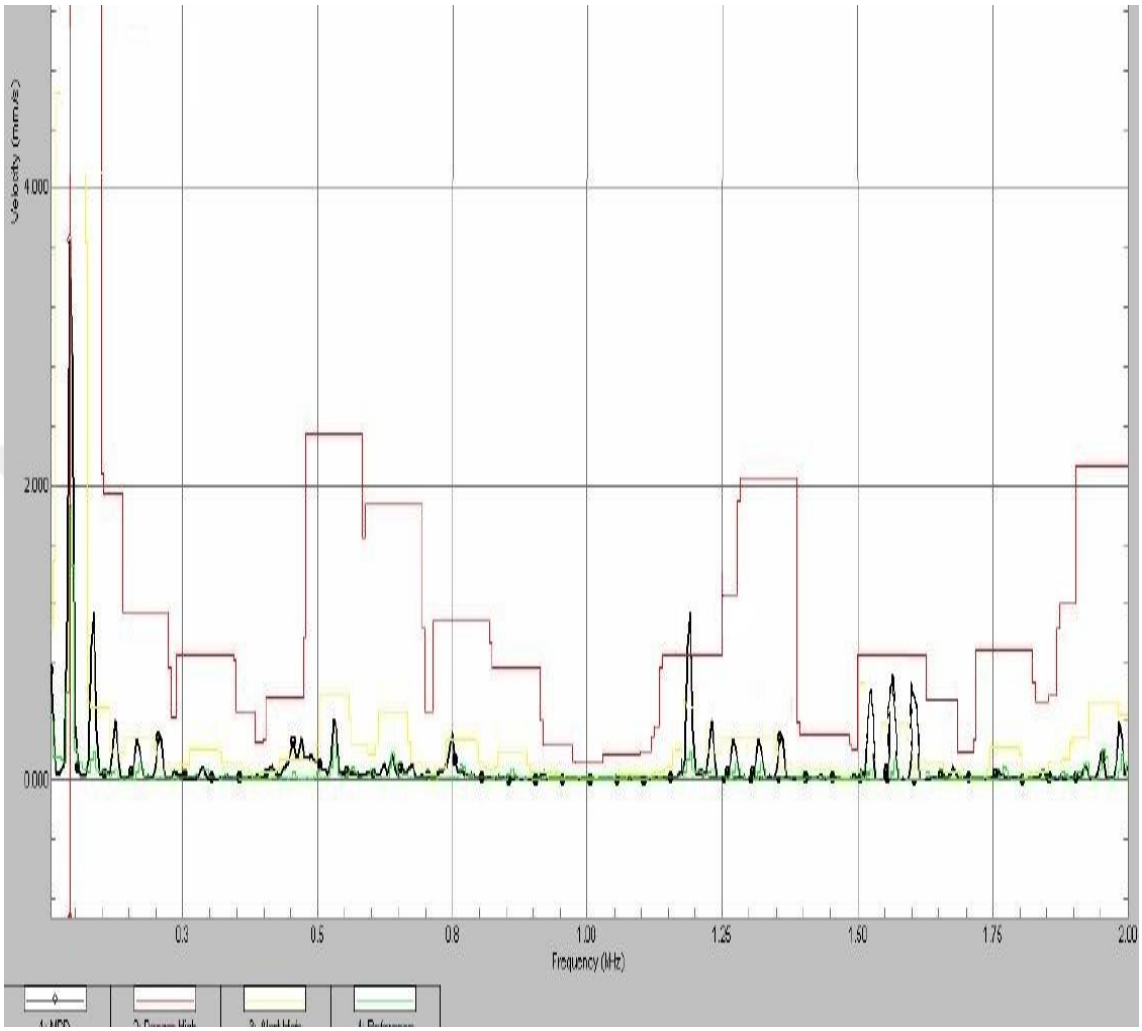
AUTO SPEKTRUM GRAFİKLERİ

SENTİNEL PROGRAMI BİLGİSAYAR ÇIKTILARI

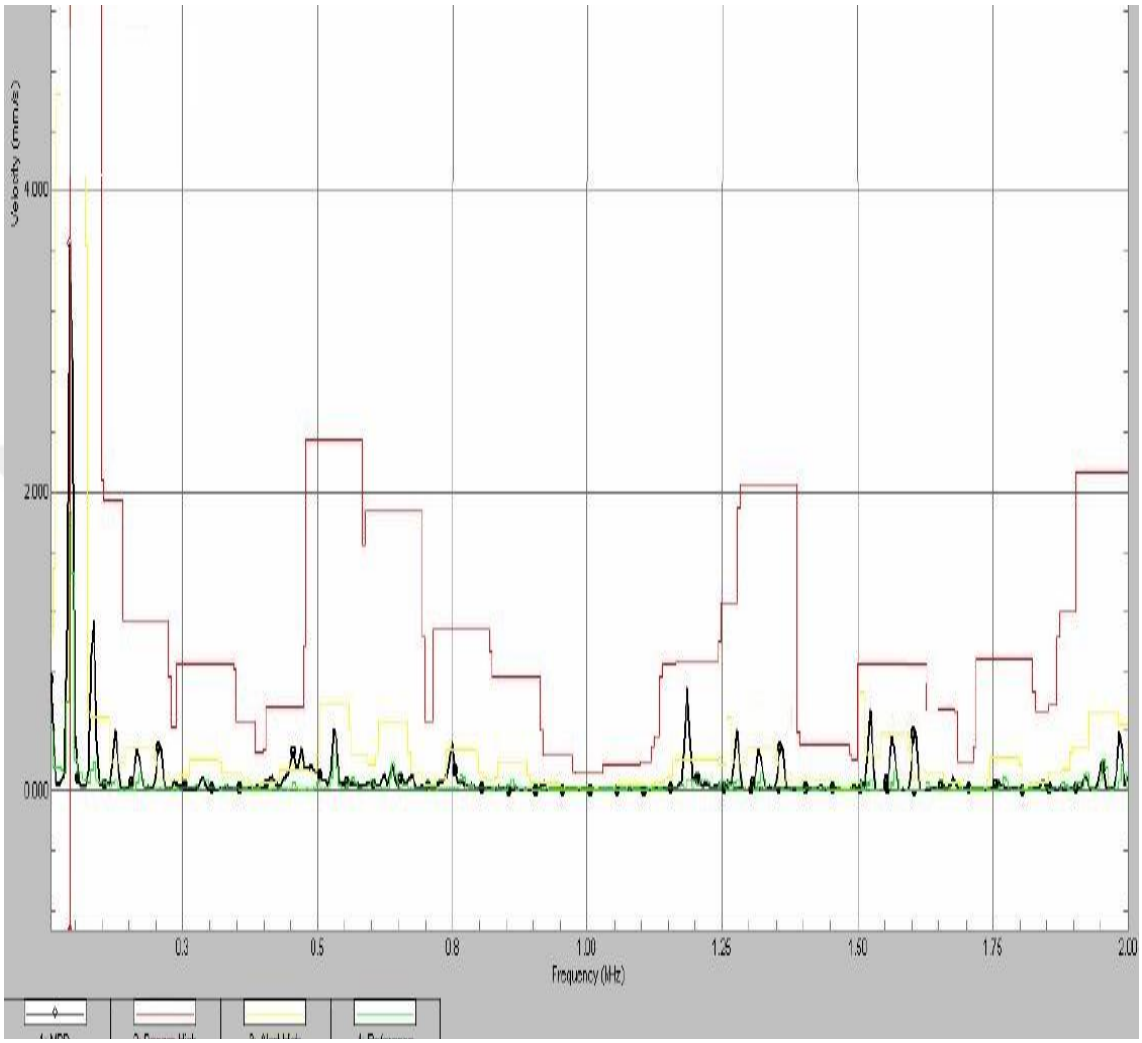
BRUEL&KJAER Marka titreşim ölçme cihazı ile alınan spektrum ölçümleri



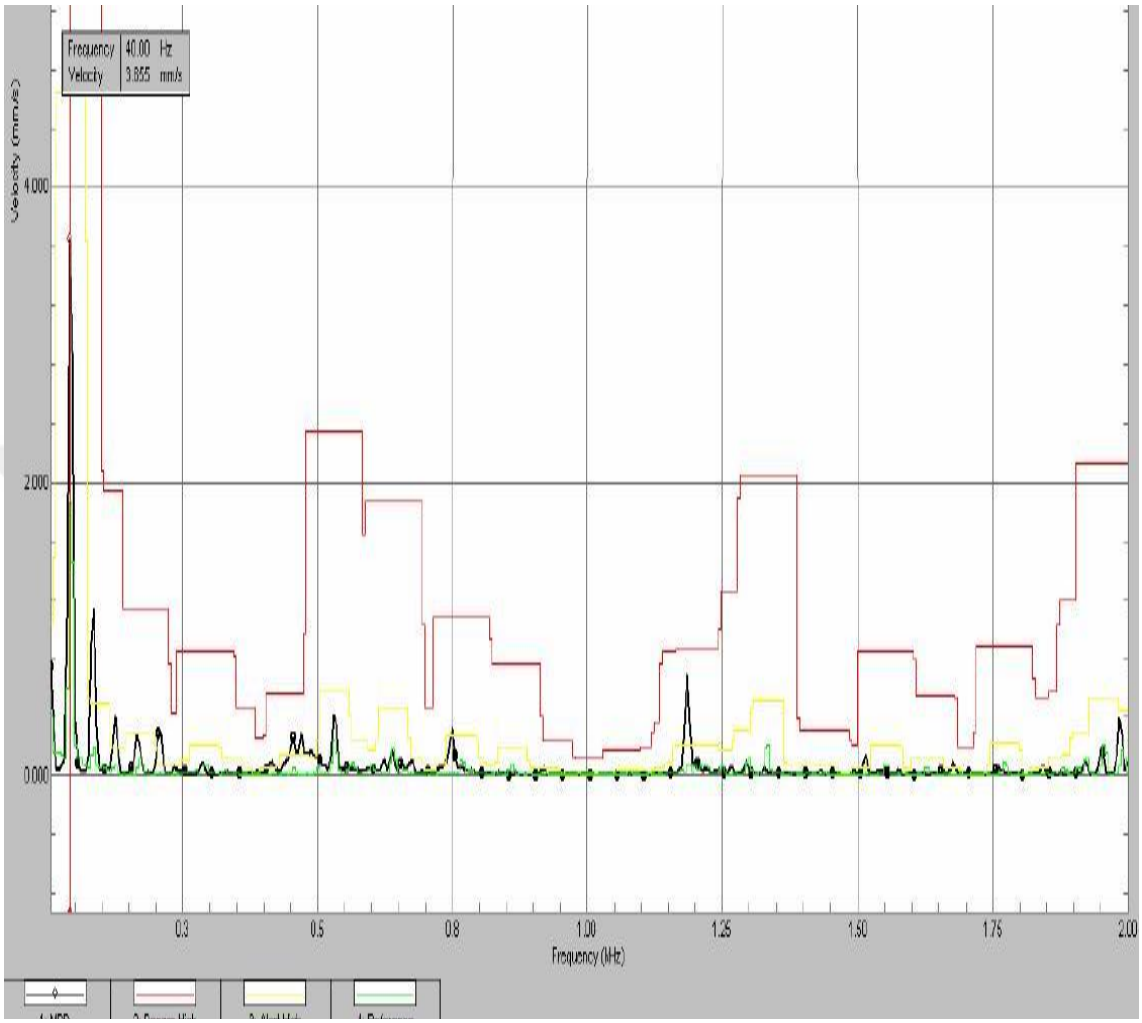
Şekil B.1. 10 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik



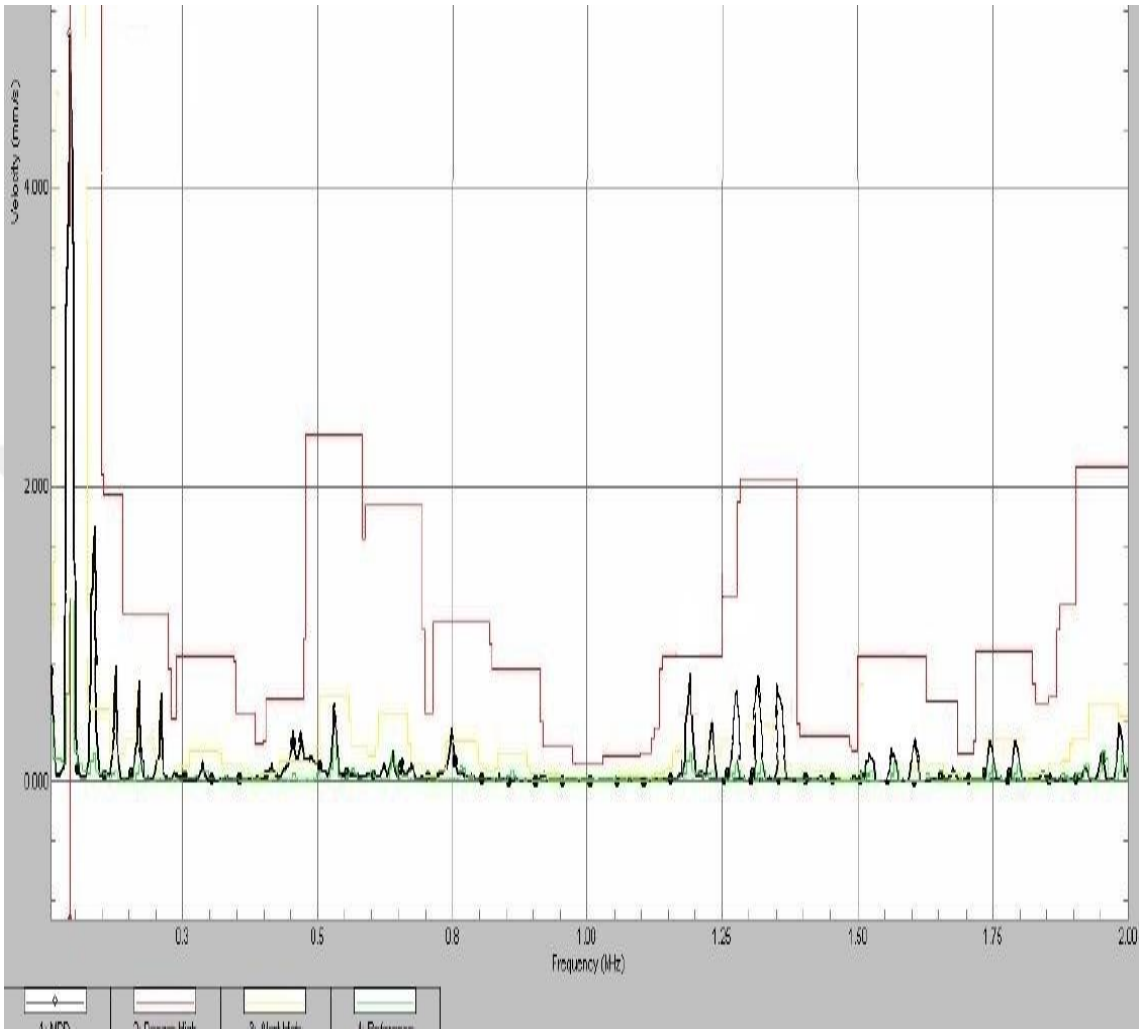
Şekil B.2. 10 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik (trend grafiği)



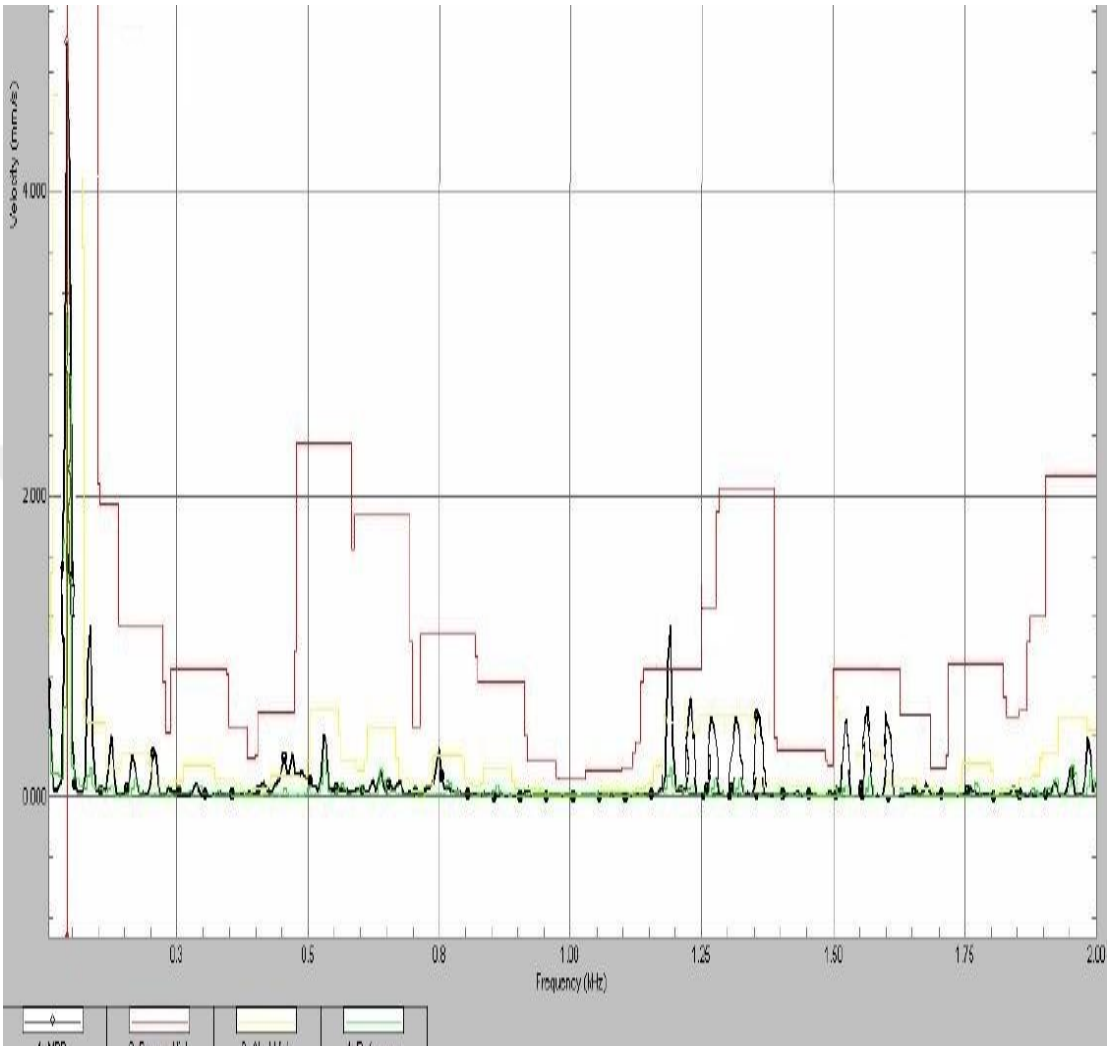
Şekil B.3. 10 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik (trend grafiği)



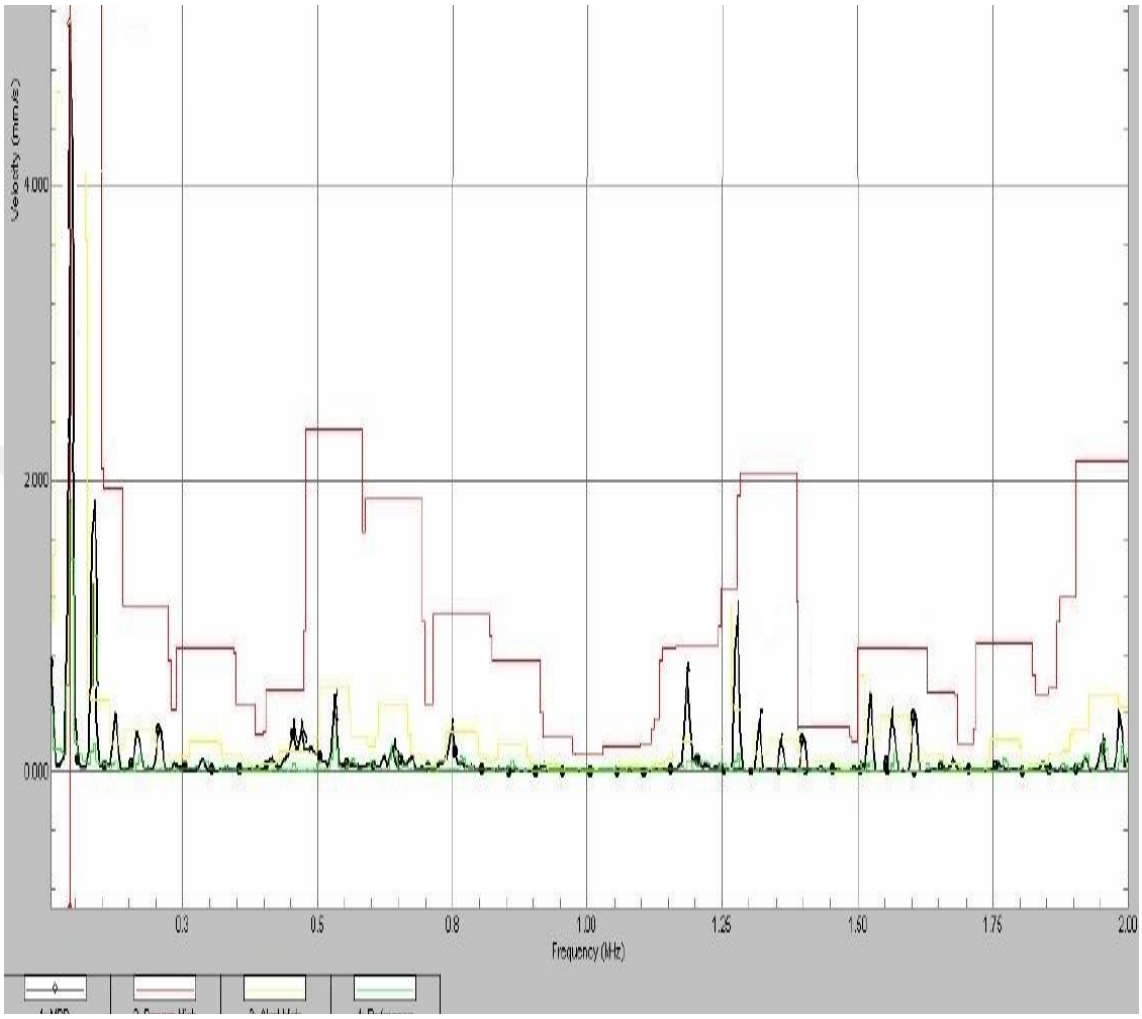
Şekil B.4. 40 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik



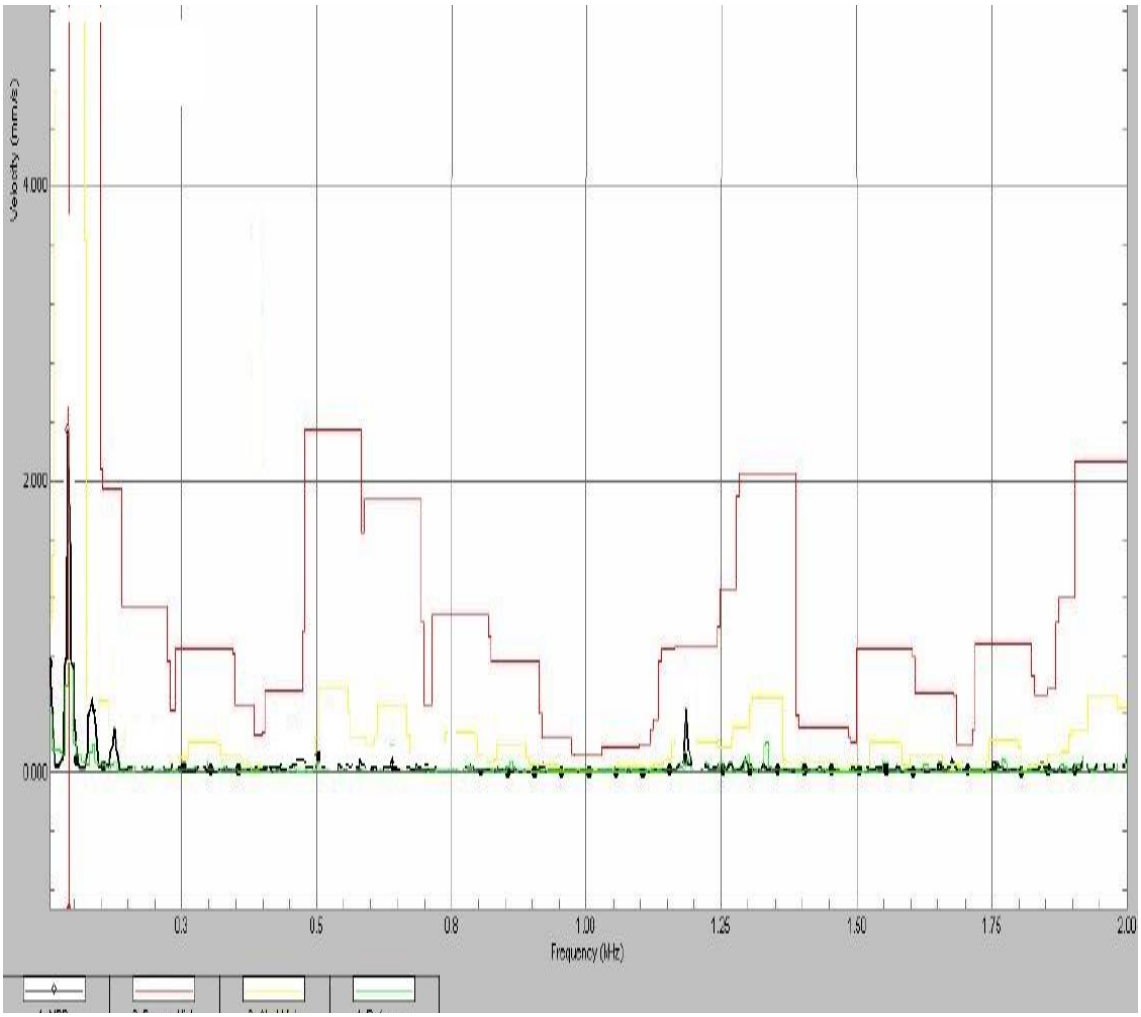
Şekil B.5. 40 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik (trend grafiği)



Şekil B.6. 40 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik (trend grafiği)



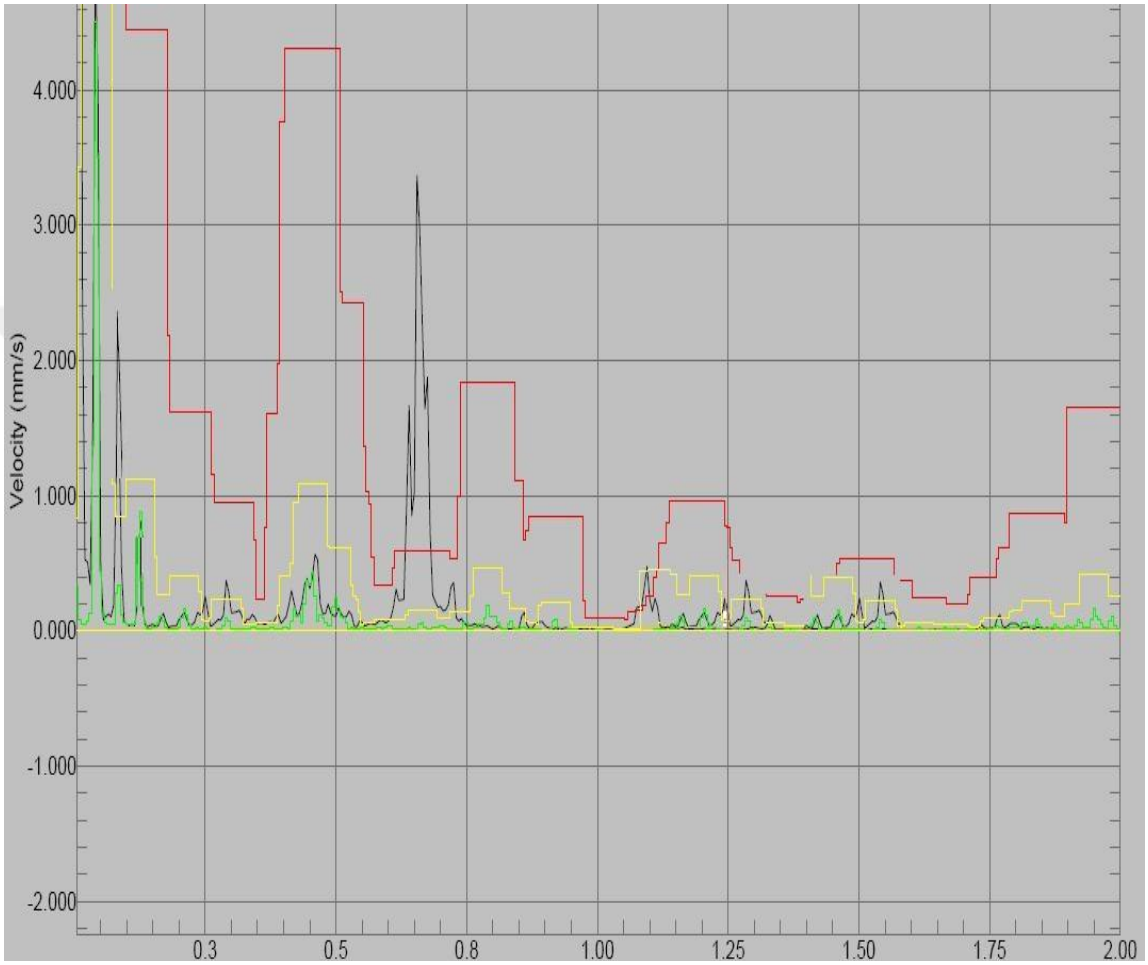
Şekil B.7. 40 Hz rulman , kaplin ve dişli arızasını ortak gösteren grafik (trend grafiği)



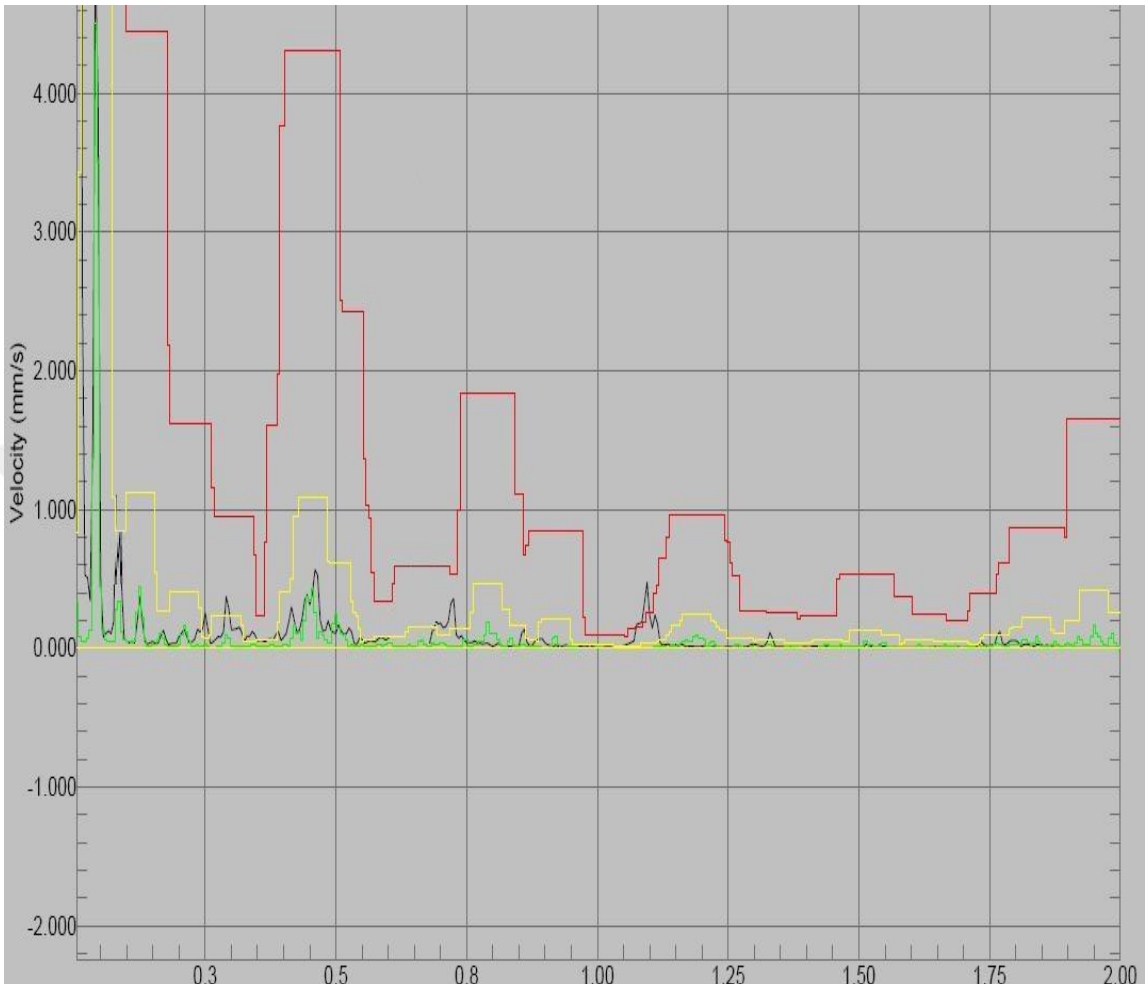
Şekil B.8. 38 dişli bulunan sistem 3'de 30 Hz'de dişli arızasını ortak gösteren grafik

SKF Marka titreşim ölçüm cihazı ile alınan spektrum ölçümleri

(Sentinel programından gri fonlu çıktı alınabilmektedir.)



Şekil B.9. 10Hz Dişli Arızası grafiği



Şekil B.10. 10 Hz Dişli Arızasını gösteren grafik (trend grafiği)

EK - C

SPSS Analizi Program Çıktısı

(Girdiler :A,A0,X0,LO / Çıktı: X)

Tablo C.1. SPSS veri girişleri

A	Ao	Xo	L	X
1,64	0,76	0,74	0,195	1,9012
1,64	0,76	1,02	0,080	2,3714
1,64	0,76	1,05	0,220	2,7598
1,88	0,89	0,88	0,195	2,2198
1,88	0,89	1,08	0,080	2,4613
1,88	0,89	1,07	0,220	2,7526
2,06	0,99	0,97	0,195	2,4094
2,06	0,99	1,12	0,080	2,5123
2,06	0,99	1,08	0,220	2,7368
2,25	1,11	1,08	0,195	2,6122
2,25	1,11	1,17	0,080	2,5592
2,25	1,11	1,11	0,220	2,7403
2,42	1,19	1,17	0,195	2,8405
2,42	1,19	1,19	0,080	2,6108
2,42	1,19	1,13	0,220	2,8012

Tablo C.2. Pearson kolerasyonu sonrası GOIB Analizi

SPSS	G1=G3*G4*1,322312/G2														
	SP	0,002 SP+ 1,320,	0,003 SP+ 1,021	0,001 SP+ 0,623	0,0023 SP+ 0,32156	0,003 SP+ 0,021	0,002 SP+ 1231	0,003 SP+ 1234	0,005 SP-0,123	0,001 SP+ 0,241	0,003 SP+ 0,253	0,002 SP+ 0,123	0,003 SP+ 0,241	0,001 SP+ 0,326	0,002 SP+ 0,2146	0,003 SP+ 0,3611

X=[A1/B1(1+1.001334536D1)]C1

XNLS SPSS	G1=G3*G4*1,322312/G2														
	SP	0,002 SP+ 1,230,	0,003 SP+ 1,011	0,001 SP+ 0,822	0,0023 SP+ 0,23456	0,003 SP+ 0,451	0,002 SP+ 1113	0,003 SP+ 1213	0,005 SP-0,123	0,001 SP+ 0,121	0,003 SP+ 0,123	0,002 SP+ 0,124	0,003 SP+ 0,125	0,001 SP+ 0,234	0,002 SP+ 0,154	0,003 SP+ 0,1311

X=[A1/B1(1+1.0011172643D1)]C1

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yayınlar:

[1] **Engür A. İ.**, Kestirimci Bakımda Titreşim Analizi*, Mühendis ve Makina*, 2005 **570**, 27-31.

Bildiriler:

[1] **Engür A. İ.**, Kestirimci Bakımda Kalite Anlayışının Bakım Takvimlerine ve MTBF Analizine Etkisi, *III. Bakım Teknolojileri Kongresi*, Denizli, Türkiye, 26-27 Mayıs 2007.

[2] **Engür A. İ**., Karabay S., Effective Management of Industrial Plants Using Vibration Control for Diagnosis of Machine Failures: Case Studies, *APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-27 Nisan 2013.

[3] **Engür A. İ**., Karabay S., Effective Management of Industrial Plants Using Vibration Control for Diagnosis of Machine Failures: Case Studies, *SAP FORUM*, Skopje, Macedonia, 10-14 Haziran 2013

ÖZGEÇMİŞ

Ali İhsan ENGÜR, 03.06.1978 tarihinde İzmit/Kocaeli'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2002-2004 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı ve 2008 yılında aynı bölümde doktora eğitimi aldı. Ali İhsan ENGÜR, 2000-2005 yılları arasında BrisaA.Ş'de üretim mühendisi, Hyundai A.Ş.'de satın alma mühendisi ve TLV Japan'da Kestirimci Bakım ve Buhar Hatlarından Sorumlu Anadolu Bölge Müdürü olarak görev yaptı. 2005 yılından bugüne Kocaeli Üniversitesi Gölcük Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.