



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SİNYAL İŞLEME ve GENETİK-YAPAY
SİNİR AĞLARI ile RULMAN
ARIZALARININ TEŞHİSİ

MUHAMMET ÜNAL
(141200420070553)

DOKTORA TEZİ

Elektronik-Bilgisayar Eğitimi
Bilgisayar ve Kontrol Eğitimi

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mustafa ONAT

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Haluk KÜÇÜK

İSTANBUL, 2014

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi Muhammet ÜNAL'ın "SİNYAL İŞLEME ve GENETİK-YAPAY SİNİR AĞLARI ile RULMAN ARIZALARININ TEŞHİSİ" başlıklı tez çalışması, 28.01.2014 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Mustafa ONAT Marmara Üniversitesi	(Danışman)	
Prof.Dr. Fevzi BABA Marmara Üniversitesi	(Üye)	
Prof.Dr. Murat DOĞRUEL Marmara Üniversitesi	(Üye)	
Prof.Dr. Rahmi GÜÇLÜ Yıldız Teknik Üniversitesi	(Üye)	
Doç.Dr. Abdullah BAL Yıldız Teknik Üniversitesi	(Üye)	

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10.02.2014 tarih ve 2014/04-02 sayılı kararı ile Muhammet ÜNAL'ın Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı Bilgisayar ve Kontrol Eğitimi Programında Doktora derecesi alması onanmıştır.


Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Abdülkerim KAR



İÇİNDEKİLER

SAYFA NO

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
YENİLİK BEYANI	ix
SEMBOLLER.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
ŞEKİLLER.....	xiii
TABLO LİSTESİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç	1
1.2. Literatür Araştırması	3
1.2.1. Titreşim verisi ile arıza teşhisi	4
1.2.2. Ses yayılım verisi ile arıza teşhisi	7
1.2.3. Farklı veriler ile arıza teşhisi.....	7
2. MATERYAL VE YÖNTEM	11
2.1. Rulman Arıza Teşhis Sistemi.....	11
2.1.1. Veri işlem, analiz ve karar ünitesi.....	12
2.1.2. Analog ve sayısal veri toplama ünitesi.....	12
2.1.3. Veri ölçme elemanları.....	12
2.1.3.1 Akustik mikrofon	12
2.1.3.2. İvmeölçer	13
2.1.4. Rulman test deney seti	14
2.2. Test Rulmanları	18
2.2.1. Rulman yapısı ve geometrik özelliği.....	18
2.2.2. Rulman hata frekansı karakteristiği	19

2.2.3. Rulman arızalarının oluşturulması	22
2.3. Sinyal Özelliklerinin Çıkarılması	24
2.3.1. Zaman düzlemi	24
2.3.1.1. Tepeden tepeye (Peak to Peak)	25
2.3.1.2. Etkin değer (RMS)	25
2.3.1.3. Çarpıklık (Skewness)	25
2.3.1.6. Basıklık (Kurtosis)	26
2.3.2. Frekans düzlemi	27
2.3.2.1. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)	28
2.3.2.2. Zarf analizi	28
2.3.2.3. Güç Spektrum Yoğunluğu.....	29
2.3.2.5. Frekans düzleminde özellik çıkartma	30
2.4. Yapay sinir ağları (YSA)	34
2.4.1. Yapay sinir ağı hücresi(Perceptron).....	34
2.4.2. Yapay sinir ağı mimarisi	35
2.4.2.1 Çok katmanlı perseptron (Multi Layer Perceptron - MLP)	36
2.4.2.2. Hata geri yayılım öğrenme algoritması	37
2.5. Genetik Algoritma	40
2.6. GA ile YSA optimizasyonu (GA-YSA).....	42
2.6.1. Kullanılan genetik operatörler	43
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
3.1 Deneylerin Yapılandırılması ve Veri Toplama	45
3.2. Titreşim Verileri.....	46
3.2.1. Titreşim verisinin zaman düzlemi özellikleri.....	46
3.2.2. Titreşim verisinin frekans düzlemi özellikleri	55
3.3. Ses Verileri.....	62
3.3.1. Ses verisinin zaman düzlemi özellikleri.....	62
3.3.2. Ses verisinin frekans düzlemi özellikleri	70

3.4. Arıza Teşhisi	77
3.4.1. GA-YSA mimarisi	77
3.4.2. Genetik-YSA performansı	81
4. SONUÇLAR	89
4.1. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	91
KAYNAKLAR	93

ÖZET

SİNYAL İŞLEME ve GENETİK-YAPAY SİNİR AĞLARI ile RULMAN ARIZALARININ TEŞHİSİ

Rulmanlar birçok mekanik sistemin önemli hareketli parçalarını oluşturmakta ve rulman arızalarının teşhisi kestirimci bakım sistemleri için önem arz etmektedir. Bu sebeple, rulman arızasının doğru teşhisi ve hassas ölçüm cihazları ile titreşimin olduğu noktalardan titreşim ve ses verilerinin elde edilebilmesi için genel amaçlı bir rulman arıza teşhis sistemi geliştirilmiştir.

Otomotiv sektöründeki entegrasyon mühendislerinin, araç bakım ve arıza tespit uzmanlarının aracın çalışması sırasında etrafa yaydığı sesleri inceleyerek arıza hakkındaki yorum ve teşhisleri bu tez çalışmasının ilham kaynağı olmuştur. Rulman arıza teşhis sisteminde çeşitli rulman arızaları oluşturularak ortaya çıkan titreşim ve ses sinyallerinin (verilerinin) zaman ve frekans düzlemindeki analizlerinden elde edilen çeşitli verilerin özelliklerinin sınıflandırılması ile rulman arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir. Rulmanın oluşturduğu titreşim ve sesler, ivmeölçer ve mikrofon kullanılarak arızasız (normal), iç ve dış bilezik arızaları için farklı yük ve hızlarda ölçülmüştür.

Tel erozyon yöntemi ile rulman iç ve dış bileziklerinde oluşturulan farklı boyutlardaki rulman arızalarına bağlı olarak ortaya çıkan titreşim ve ses sinyallerinin analizi ile elde edilen genlik ve frekans değerleri, arıza sınıflandırmasının temelini teşkil etmektedir. Zaman düzleminde uygulanan istatistiksel kriterler ve frekans düzleminde gerçekleştirilen Hilbert Dönüşümlü zarf gösterimi ve Hızlı Fourier Dönüşümü gibi veri özelliklerini ortaya çıkaran etkin yöntemler MATLAB ile gerçekleştirilmiştir.

Rulman arızalarının teşhisi için genetik algoritma (GA) tabanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılmıştır. Hedef ve YSA çıkışı arasındaki ortalama kare hatasını minimize eden ve mimarisinde mümkün olduğunca az sayıda gizli katman ve nöron bulunduran YSA modeli elde edilmiştir. GA ve YSA yöntemlerinin birleştirilmesi ile yüksek doğrulukta ve maksimum hızla yakınsama sonucu hedeflenen modele ulaşmada deneme yanılma süresi önemli ölçüde azaltılmıştır. Önerilen GA-YSA tabanlı sınıflandırma algoritmasının performansı, yapay rulman arızaları oluşturularak değişik yüklerde ve farklı devir hızlarında çalıştırılan rulmanlarda test edilmiştir.

Titreşim ve ses verilerinden elde edilen özelliklerin, GA-YSA algoritması kullanılarak döner makinelerde oluşabilecek rulman arızalarının tespitinde başarılı olduğu deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

ABSTRACT

DIAGNOSIS OF BEARING FAULTS BY SIGNAL PROCESS AND GENETIC-NEURAL NETWORK

Bearing rolling elements constitute the major moving parts of many mechanical systems and bearing faults diagnosis is important for predictive maintenance systems. Therefore, a general purpose bearing failure diagnostic system has been developed for accurate diagnosis of bearing failure and obtaining vibration and sound data with precision measuring devices from vibration points where vibration occurs.

Reviews and diagnostics of integration engineers, car maintenance and fault detection experts in automotive industry who examine the sounds emitted during operation of the car has been the source of inspiration for this thesis. In bearing fault diagnostic system the bearing diagnostics was carried out with the classification of extractions of various data obtained from the analysis in the time and frequency domain, resulting vibration and sound signals (data) by forming various bearing faults. The vibrations and sounds generated by the bearing for trouble-free (normal), inner and outer ring faults are measured using the accelerometer and microphone at different load and speeds.

The amplitude and frequency values obtained by analysis of the vibration and sound signals resulting depending on bearing faults that are formed in different sizes on inner and outer rings of the bearing, using electrical discharge machining (EDM) method, constitutes the basis of fault classification. Effective methods extracting data features such as statistical criteria applied in the time domain and an envelope representation based Hilbert transform and Fast Fourier Transform in frequency domain are implemented by MATLAB.

A feed-forward neural network model based Genetic Algorithm (GA) is used for fault diagnostic of rolling element bearing. An ANN model which minimizes the mean square error between the target and ANN output and keeps the number of hidden layer and neurons as low as possible is obtained. The trial and error time is significantly reduced by combining GA and ANN methods resulting with the high accuracy and maximum convergence rate in succeeding the target model. The proposed GA-ANN based classification algorithm performance is tested in the bearing rolling elements at

different speeds and loads, forming artificial bearing faults. The features obtained from vibration and sound data in diagnosing bearing faults that may occur in rotary machines, by using the GA-ANN algorithm, is shown to be successful with experimental studies.

YENİLİK BEYANI

SİNYAL İŞLEME ve GENETİK-YAPAY SİNİR AĞLARI ile RULMAN ARIZALARININ TEŞHİSİ

Literatürde rulman arızaları teşhisinde çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu uygulamalarda genellikle, titreşim verilerinin frekans analizi yapılarak çeşitli tekniklerle rulman arızalarının teşhisi ve sınıflandırılması üzerinedir”. Bu tez çalışmasında ise titreşimle birlikte ses verisi zaman ve titreşim düzleminde analiz edilerek rulman arıza teşhisi yapılmıştır. Literatürdeki çalışmaların pek çoğunda arıza tespiti için laboratuvar ortamında oluşturulan yapay arızalar, nokta veya çizik biçiminde ve bir adet olacak şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmada farklı olarak, tek çizgi yanında rulman iç ve dış bileziğinde aynı anda iki çizgi şeklinde arıza durumları da test edilmiştir. Yapılan benzeri çalışmalarda küresel bilyeli rulmanlar kullanılmış ve rulman sökölüp arıza oluşturulduktan sonra tekrar birleştirilmiştir. Ancak rulmanların sökölüp takılmasıyla oluşan rulman montaj arızaları göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada, fabrikasyon olarak iç ve dış bileziği çıkartılabilen silindirik bilyeli rulmanlar kullanılmış ve arıza oluşturulduktan sonra montaj hatası olmadan gerekli deneyler yapılmıştır.

Literatür incelendiğinde rulman arızalarının, genellikle 1mm ve üstü genişliğinde delik ve çizikler şeklinde oluşturulduğu görülmektedir. Bu büyüklükteki arızalar yüksek genlikli titreşimlere sebep olmaktadır. Bu tez çalışmasında ise 0.3 mm 0.5 mm genişliğinde çizikler oluşturularak daha düşük genlikli titreşim ve ses sinyalleri üzerinde çalışılarak rulman arızalarının başlangıcı ve daha ileri safhaları dahil olmak üzere tespit edilebilirliği gösterilmiştir.

Rulman testlerinde, 1000 d/dk (devir/dakika) ile en fazla 3000 d/dk hızlarında çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında, 1000 d/dk devir hızı ile başlanıp 500 d/dk aralıklarla 4500 d/dk hızlara kadar çalışmalar yapılmış ve bu hızlarda rulman arızaları tespit edilmiştir. Diğer taraftan, 200 ve 400 kg olmak üzere, iki farklı yük uygulanarak farklı hız ve yük altında rulman arızaları incelenmiştir.

Rulman arızalarında deney düzeneğinden kaynaklanan gevşeklik, eksen kaçıklığı, kaplin ayarsızlığı ve dengesizlik gibi mekanik arızaların önüne geçmek amacıyla, özgün bir rulman test deney seti tasarlanmış ve üretilmiştir. Deney düzeneğinde, bahsedilen mekanik arızaların minimize edilecek şekilde fabrikasyon

montajı yapılmış ve rulman test kısmında sadece rulman takıp çıkartılarak diğer kısımların fabrikasyon ayarları değiştirilmemiştir. Böylece deneyler sırasında oluşan titreşim ve ses verilerinin rulman arızası kaynaklı olmasına çalışılmıştır.

Rulman arızası teşhisi çalışmalarında genellikle, arıza var - yok şeklinde veya iç-dış bilezik ve bilye arızası olmak üzere genel sınıflandırma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında farklı olarak, arızanın rulmanın iç veya dış bileziğinin yanında hangi boyutlarda olduğu da tespit edilmiştir.

Yapay sinir ağları (YSA) ile yapılan arızaların sınıflandırılmasında kullanılan YSA modelleri belirli tecrübeler neticesinde deneme yanılma ile uygun mimarinin seçilmesiyle oluşturulmaktadır. Sonuçta sınıflandırma çalışması, tecrübesi olmayan kişilerin zamanını almaktadır. YSA performansı artırılmaya çalışılırken farklı katmanlarda ve her katmanda farklı nöron sayıları denenerek YSA çıkışı ile hedef çıkış arasındaki farkı minimize eden YSA mimarisi tercih edilmektedir. Bu durum farklı kombinasyonların oluşmasına ve ihtimallerin artmasına sebep olmaktadır. Ancak, eğitilen YSA'ların mimarisinde her nöron aynı oranda çıkışı etkilememektedir. Bu sebeple en uygun mimarinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Genetik algoritma ile YSA mimarisi optimize edilmiş ve en iyi sonucu en kısa sürede veren uygun YSA mimarisi elde edilmeye çalışılmıştır. YSA hakkında fazla tecrübesi olmayan araştırmacılara giriş ve çıkış verilerinin sağlanması ile uygun YSA mimarisini elde edebilecekleri bir yöntem geliştirilmiştir.

SEMBOLLER

D	: Rulman dış bilezik çapı
R_b	: Rulman bilye çapı
d_m	: Rulmanda iç bilezikte iki bilye arası düşey mesafe
w	: Rulman dış bilezik genişliği
N	: Rulmanda bulunan bilye adeti
f_r	: Mil dönme frekansı
σ	: Standart sapma
H	: Hilbert Dönüşüm değeri
A	: Sinyalin genlik değeri
\tilde{f}	: Kompleks sinyalin gerçek kısmı
a	: Yapay sinir ağının(YSA) çıkış vektörü
W	: YSA'nın ağırlık matrisi
IW	: YSA'nın giriş katmanının ağırlık matrisi
LW	: YSA'nın gizli katmanının ağırlık matrisi
f	: Yapay sinir ağının aktivasyon fonksiyonu
m	: YSA'nın katman sayısı
s	: YSA'nın her bir katmanının duyarlık değeri
α	: YSA'nın öğrenme oranı
b	: YSA'nın eşik değeri
e	: Hata vektörü
t	: Hedef vektörü
p	: Giriş vektörü
k	: Giriş sayısı
\hat{y}	: Tahmin edilen YSA çıkışı
k_a	: GA-YSA algoritmasında YSA modelinin katman adeti
n_a	: GA-YSA algoritmasında YSA modelinin her katmandaki nöron adeti

KISALTMALAR

TF	: Temel Frekans
YSA	: Yapay Sinir Ağı
GA	: Genetik Algoritma
SGA	: Basit Genetik Algoritma
GA-YSA	: Genetik Algoritma Tabanlı Yapay Sinir Ağı
SVM	: Destek Vektör Makineleri
ACO	: Karınca Kolonisi Algoritması
MLP	: Çok Katmanlı Perseptron
RMS	: Etkin Değer (Root Mean Square)
MSE	: Karesel Hata Ortalaması (Mean Square Error)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
HD	: Hilbert Dönüşümü
PSD	: Güç Spektrum Yoğunluğu
TT	: Tepeden Tepeye
d/dk	: Devir/Dakika

ŞEKİLLER

SAYFA NO

Şekil 1. 1 Tez çalışmasını gösteren blok şeması	2
Şekil 2. 1 Rulman arıza teşhis sisteminin genel görüntüsü	11
Şekil 2. 2 Pulse type 7533 veri toplama cihazı.....	12
Şekil 2. 3 Bruel&Kjaer 4189 L-001 açık alan mikrofonu	13
Şekil 2. 4 Endevco 7253B-10 İvmeölçer.....	13
Şekil 2. 5 Rulman test deney seti	16
Şekil 2. 6 Deneylerde kullanılan rulmanlar	18
Şekil 2. 7 Rulmanın geometrik özellikleri.....	19
Şekil 2. 8 600 d/dk ile döndürülen iç bilezik arızalı rulmandan elde edilen titreşim	21
Şekil 2. 9 600 d/dk ile döndürülen iç bilezik arızalı rulmandan elde edilen titreşimin frekans analizi.....	21
Şekil 2. 10 Rulmanın iç bileziğinde oluşturulan hatalar	23
Şekil 2. 11 Rulmanın dış bileziğinde oluşturulan hatalar.....	23
Şekil 2. 12 İstatistiksel olarak çarpıklık gösterimi [105]	26
Şekil 2. 13 Basıklık durumlarının gösterimi [107].....	27
Şekil 2. 14 Zarf analizi işlem adımları	29
Şekil 2. 15 3000 d/dk hızında elde edilen ses verilerinin frekans spektrumu	30
Şekil 2. 16 Bant geçiren filtre için seçilen frekans aralığı.....	31
Şekil 2. 17 Zarf analizi: bant geçiren filtre çıkışı	31
Şekil 2. 18 Zarf analizi: Hilbert Dönüşümü çıkışı	32
Şekil 2. 19 PSD dönüşümü sonrası güç spektrumu.....	33
Şekil 2. 20 Sınıflandırma için seçilen arıza frekansı ve harmonikleri.....	33
Şekil 2. 21 Biyolojik ve yapay sinir hücreleri [112]	34
Şekil 2. 22 İleri beslemeli bir YSA modeli [112].....	36
Şekil 2. 23 İleri beslemeli çok katmanlı sinir ağı [112]	38
Şekil 2. 24 Genetik algoritma akış diyagramı	41
Şekil 2. 25 GA – YSA algoritması	43
Şekil 3. 1 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin TT değeri değişimi	47
Şekil 3. 2 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin RMS değeri değişimi.....	48
Şekil 3. 3 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin çarpıklık değeri değişimi	49
Şekil 3. 4 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin basıklık değeri değişimi..	50
Şekil 3. 5 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin TT değeri değişimi	51

Şekil 3. 6	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin RMS değeri değişimi ...	52
Şekil 3. 7	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin çarpıklık değeri değişimi	53
Şekil 3. 8	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin basıklık değeri değişimi	54
Şekil 3. 9	1000 d/dk hızında iç bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri	56
Şekil 3. 10	3000 d/dk hızında iç bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri	57
Şekil 3. 11	4500 d/dk hızında iç bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri	58
Şekil 3. 12	1000 d/dk hızında dış bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri.....	59
Şekil 3. 13	3000 d/dk hızında dış bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri.....	60
Şekil 3. 14	4500 d/dk hızında dış bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri.....	61
Şekil 3. 15	İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin TT değeri değişimi.....	62
Şekil 3. 16	İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin RMS değeri değişimi	63
Şekil 3. 17	İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin çarpıklık değeri değişimi	64
Şekil 3. 18	İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin basıklık değeri değişimi.....	65
Şekil 3. 19	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin TT değeri değişimi	66
Şekil 3. 20	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin RMS değeri değişimi.....	67
Şekil 3. 21	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin çarpıklık değeri değişimi ...	68
Şekil 3. 22	Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin basıklık değeri değişimi	69
Şekil 3. 23	1000 d/dk hızında iç bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri.....	71
Şekil 3. 24	3000 d/dk hızında iç bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri.....	72
Şekil 3. 25	4500 d/dk hızında iç bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri.....	73
Şekil 3. 26	1000 d/dk hızında dış bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri	74
Şekil 3. 27	3000 d/dk hızında dış bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri	75
Şekil 3. 28	4500 d/dk hızında dış bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri.....	76
Şekil 3. 29	Titreşim verilerinin sınıflandırılması için seçilen GA-YSA mimarileri	78
Şekil 3. 30	Ses verilerinin sınıflandırılması için seçilen GA-YSA mimarileri	78
Şekil 3. 31	Titreşim verilerinin GA-YSA ile Arıza Var-Yok sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test	82
Şekil 3. 32	Titreşim verilerinin GA-YSA ile Arıza Yeri sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test	83
Şekil 3. 33	Titreşim verilerinin GA-YSA ile Tüm Arızalar sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test	84
Şekil 3. 34	Ses verilerinin GA-YSA ile Arıza Var-Yok sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test	86
Şekil 3. 35	Ses verilerinin GA-YSA ile arıza yeri sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test.....	87

Şekil 3. 36 Ses verilerinin GA-YSA ile Tüm Arızalar sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test 88

TABLO LİSTESİ

SAYFA NO

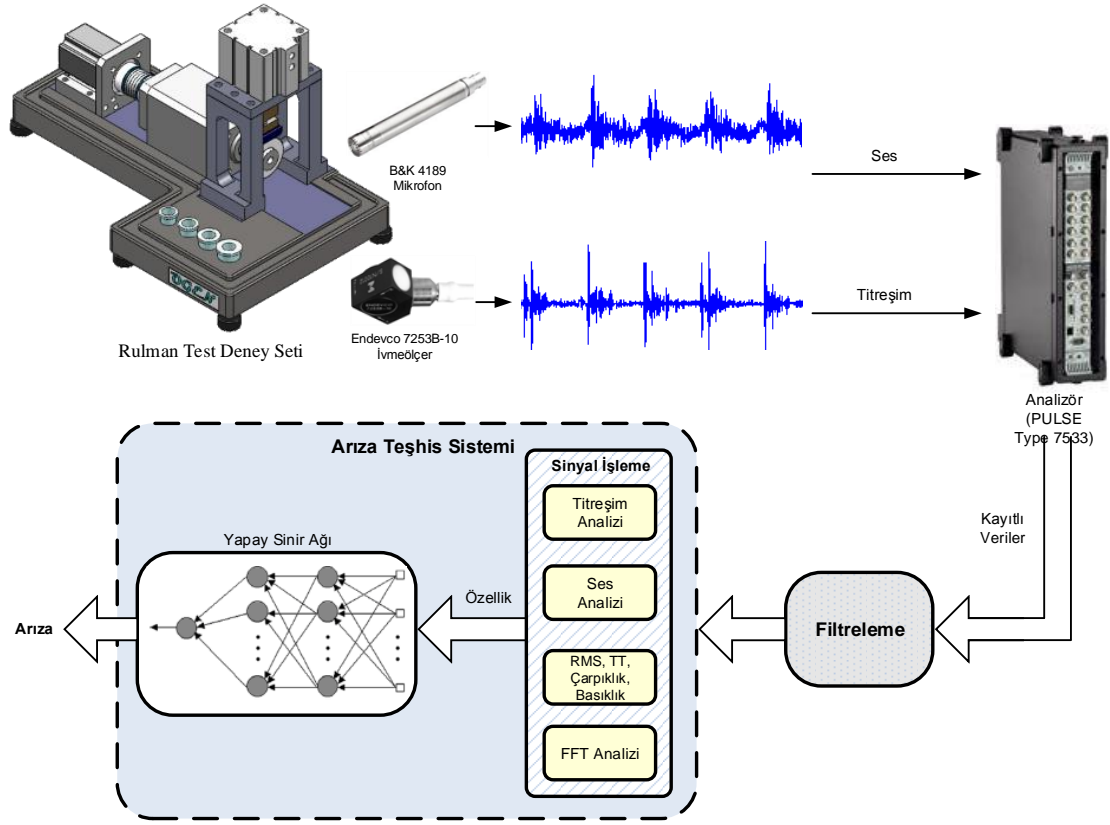
Tablo 2. 1 NU208 -E-TVP2 tipi rulmana ait ölçü değerleri	19
Tablo 2. 2 Rulman arızaları	22
Tablo 2. 3 Rulman arızalarına ait farklı hızlarda hata karakteristik frekansları	24
Tablo 3. 1 Titreşim verilerin sınıflandırması için elde edilen GA-YSA mimarileri.....	80
Tablo 3. 2 Ses verilerin sınıflandırması için elde edilen GA-YSA mimarileri.....	80

1. GİRİŞ

1.1. Amaç

Dinamik sistemlerde işlev gören makine dinamiğinin en önemli elemanlarından olan rulmanların çalışma anında arızalarının tespit edilmesi sistemin verimini ve ömrünü uzatmaktadır. Fabrika ortamında rulmandan kaynaklanan makine arızası güvenlik açısından risk oluşturmaktadır. Bu yüzden rulman arızalarının erken teşhisi ve periyodik bakımları, zaman ve maliyet açısından çok önem arz etmektedir [1, 2]. Bu amaçla çeşitli kestirimci bakım yöntemleri ile rulman arızaları meydana gelmeden belirli periyotlarla kontroller yapılmakta ve arızadan dolayı makine durmadan gerekli onarımlar yapılmaktadır. Sanayide ilkel olarak kullanılan yöntemlerin başında tornavida ile rulman yatağının dinlenilmesi gelmektedir. Bu yöntemde arıza olana kadar rulman çalıştırılmakta ve arıza durumunda rulman değiştirilmektedir. Bilimsel bir yönü olmayan bu sistem daha büyük sorunlara yol açmaktadır. Büyük işletmelerde kestirimci bakım için genellikle operatörler görevlendirilmekte ve özel kestirimci bakım cihazları ile belirli aralıklarla rulmanlar kontrol edilmekte ve rapor çıkartılmaktadır. Bunun neticesinde rulmandan elde edilen veriler yapılan müdahaleye rağmen belirlenen referans seviyenin üstünde ise rulman bozulup makine durmadan önce rulmanlar değiştirilmektedir [3].

Bu çalışma, üzerinde arıza oluşturulan rulmanın sebep olduğu titreşim ve ses gibi fiziki analog değişkenlerin çeşitli algılayıcı cihaz ve elemanlarla elektriksel dönüşümü yapılarak sayısal olarak işlenebilen verilere dönüştürülmesi ve işaret işleme teknikleri ile özellik çıkartılarak arızaların yapay zeka teknikleri ile tespit edilmesine dayanır. Şekil 1.1'de gösterildiği üzere, rulman test deney setinden mikrofon ve ivme ölçer ile elde edilen veriler, bilgisayar ortamına aktarılmakta, sinyal işleme ile çeşitli özellikleri çıkarılmakta ve bu özellikler ile sınıflandırma yapılarak arıza teşhisi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.1 Tez çalışmasını gösteren blok şeması

Deneysel çalışmaların yapıldığı Rulman Arıza Teşhis Sistemi iki uç noktasından rulmanlarla yataklanmış ve bir motor vasıtasıyla kaplin üzerinden tahrik edilen bir milden oluşmaktadır. Şafta dönme hareketi, bir servo motorla verilmektedir. Arıza durumlarının oluşturulması için rulmanların iç ve dış bileziklerine belirli boyutlarda çentikler atılmıştır. Böylece sistem çalıştırılarak farklı boyutlarda arızalar oluşturulmuştur.

Arıza sınıflandırma yöntemleri geliştirilerek yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de yapay zeka sınıfına giren Yapay Sinir Ağları (YSA)'dır. Sınıflandırma için kullanılan YSA modelinin hızlı ve etkin cevap verebilmesi için Genetik Algoritma (GA) ile optimize edilmiştir. GA optimizasyonu ile birçok deneme sonunda elde edilebilecek YSA modeli kısa sürede ve optimum mimaride, yüksek performanslı olarak elde edilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

Rulmanlar dönen makinelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Rulmanların sağlıklı çalışması makinelerin problemsiz çalışmasıyla doğrudan ilgilidir. Arıza yapan makinelerin bakım ve onarımı hem maliyetli hem de zahmetlidir. Beklenmeyen arızalarda bakım ve onarım uzun sürmekte, yedek parça bulmak zorlaşmakta ve üretim kayıpları ile maliyet artmaktadır [1, 2].

Arızalı bir rulman zamanında değiştirilmediği zaman, rulmanın çalıştığı sistemde telafisi oldukça güç hasarlar ortaya çıkabilir. Tecrübeye dayalı bakımlarda zamanından önce değiştirilen rulmanlar üretimin gereksiz yere durmasına yol açabilir. Gerek arıza durumu gerekse de hatalı arıza tespiti sonucu üretimin durması istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, oluşan rulman hatalarının tehlikeli bir boyuta gelmeden tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Bu yüzden rulman arızalarının uygun zamanda tespit ve teşhis edilmesi günümüzde önemini koruyan bir konudur. Rulmanların sağlık durumu gözlemlenerek arızalardan dolayı ortaya çıkabilecek durma zamanları ve katastrofik sonuçlar en aza indirilebilir. Böylelikle gereksiz parça, enerji ve işçilik harcamasının önüne geçilebilir [3].

Arızasız bir rulmanda mil dönme hareketini ve aşırı yükleme gibi durumlardan dolayı düşük frekanslı titreşim sinyalleri oluşmaktadır. Arıza meydana geldiğinde rulman bilyelerinin arızanın üzerinden geçmesiyle birlikte periyodik darbe sinyalleri meydana gelmektedir. Darbenin frekansı, arızanın karakteristiğini vermektedir [4]. Ancak elde edilen sinyalde karakteristik frekansla birlikte gürültülerde bulunmaktadır. Bu sebeple karakteristik hata frekansının tespit edilmesi arızayı tespit etmek için yapılması gereken temel işlemdir. Arızalı rulmanlardan elde edilen sinyallerin analiz edilmesi için çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bunlar; zarf analizi [5-17], spektral basıklık [18-20] ve tek değer ayrıştırma [9, 21-27] yöntemleridir.

Rulman arızalarının tespiti üzerine yapılan çalışmalarda, sistemden toplanan verilerin zaman, frekans ve her ikisinin birlikte oluşturduğu düzlemlerinden çıkartılan özellikler ile arızalar tespit edilemeye çalışılmıştır. Verilerin zaman düzlemindeki istatistiksel bilgileri ile frekans düzleminde arızanın türüne göre oluşan hata karakteristiği elde edilerek sinyal özellik çıkartılmıştır [3, 28-30]. Bunun yanında

dalgacık dönüşümü ile de istatistiksel bilgileri içeren özellikleri çıkartılarak arıza bilgisi elde edilmiştir [31-38].

Arızalı ve arızasız rulmanlardan elde edilen sinyallerin özellikleri çıkartıldıktan sonra çeşitli yöntemlerle arızaların sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları; yapay sinir ağları [39-59], destek vektör makineleri [48, 49, 58, 60-79], bulanık sınıflandırma [80-82] ve karar ağaçlarıdır [70, 83-86].

Döner makineler çalışırken rulman arızalarının tespitinde farklı veriler toplanmıştır. Bu verilerden en sık kullanılanları titreşim ve ses yayılımıdır. Yapılan çalışmaları titreşim, ses yayılımı ve diğer veriler olmak üzere üç kısımda inceleyebiliriz.

1.2.1. Titreşim verisi ile arıza teşhisi

Makineler belli bir hasara maruz kaldıklarında, bu hasarlara yönelik uyarı sinyalleri üretirler. En güvenilir uyarı sinyali de titreşimdir. Titreşim, bir makinenin mekanik aksamalarının iç ve dış kuvvetlere karşı gösterdiği tepki davranışdır [2]. Makine yataklarındaki titreşimler ölçülerek makinenin içyapısında gelişen olaylar hakkında bilgi edinilebilir. Bu amaçla titreşimle arıza tespit konusunda bir takım çalışmalar rapor edilmiştir.

Heng ve arkadaşları rulman arızalarının teşhisi için ses ve titreşim verilerini kullanmışlardır. Elde ettikleri sinyalleri basit ve hızlı sonuç verdiği için istatistiksel yöntemler ile analiz ederek rulmanın hasarlı bölgesini tespit etmişlerdir [87].

Lee ve arkadaşları dönen elemanlarda titreşim analizi çalışmasında oluşan gürültü verilerini en aza indirmek için filtre ve algoritmalar geliştirerek arıza tespiti yapmışlardır [88].

Eugene ve arkadaşları dönen elemanlardan alınan titreşim ve ses yayılımı verisinin istatistiksel yöntemlerle incelenmesi ile arıza teşhisi yapmışlardır. Çalışmalarında klasik titreşim teşhis analizinden farklı olarak ikiz-spektrum (bispectrum) tabanlı istatistik değişim tespit algoritması kullanmışlardır. Bu yöntemde ikiz-spektrum, arıza teşhis ve izolasyonu için kullanılan üçüncü derece istatistiğinin faz-ilişkili spektral bileşenlerini belirlemek için kullanılmaktadır [89].

Liu ve arkadaşı rulmanda oluşan bölgesel hasarları tespit etmek için yaptığı çalışmada rulman titreşim sinyalinin ve titreşim işaretlerini analiz etmek için zaman-frekans bileşenleri ile eşleşme takip (matching pursuit) yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında hasarın varlığını tespit için titreşimin, geçici ve spektral karakteristiklerinin yanında zamanda derecesini de kullanmışlardır. Önerdikleri yaklaşım, rulman hasarlarının erken teşhisi için dalgacık dönüşümü ve zarf analizine göre daha hassas ve başarılı olduğunu göstermiştir [90].

Yang ve diğerleri rulmanın iç bilezik, dış bilezik ve bilye hasarları ile bu bunların birleşiminden oluşan hasar durumları neticesinde rulmanda oluşan titreşimlerden çeşitli özellik çıkarımları ile arıza teşhisi yapmışlardır. Sınıflandırma algoritması için çeşitli yapay sinir ağlarını karşılaştırmıştır. Art-Kohonen yapay sinir ağının diğerlerine göre performansının yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [91].

Mazanoğlu, normal ve hasarlı rulmanlarda gerçekleştirdiği farklı yükleme deneyleri ile elde ettiği titreşim verisi analizinden rulman üzerindeki bölgesel hasarların tespitini yapmıştır. Titreşim verilerinin frekans düzleminde oluşan tepe değerlerini zarf analizi ile inceleyerek arızanın karakteristik frekansını tespit etmiştir [92].

Kıral ve arkadaşı, rulmanın farklı bölgelerinde oluşturdukları tekli ve çoklu hasarın etkisini dengesiz kuvvet altında incelemişlerdir. Dönüş hızı, sensör yeri, açılal pozisyonu, dış bilezikteki hasar miktarı ve hasar çeşidi gibi parametrelerin titreşim verisine etkilerini zaman ve frekans düzleminde incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde, dış ve iç bilezikteki hasarların zarf metodu ile verimli bir şekilde tespit edilebildiği ancak, bilye arızalarının tespitinin pek kolay olmadığını göstermişlerdir [93].

Orhan ve arkadaşları titreşim görüntüleme ve spektral analiz yöntemi ile bilye ve silindirik makaralı rulmanların arıza teşhisini incelemiştir. Titreşim verileri ile bilye dış yüzeyi hasar frekansının frekans düzleminde çakıştığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında bilye gevşekliliğini ve silindir biçimli makaranın dış yüzey hasarını başarılı bir şekilde teşhis etmişlerdir. Ayrıca bir yıl içinde rulmanda oluşan hasar durumlarını incelemişler ve titreşim analizinin erken teşhiste büyük avantaj sağladığını belirlemişlerdir [94].

Arslan ve arkadaşları rulman sistemleri için model oluşturmuş ve bu modele göre bir simülasyon programı geliştirmişlerdir. Bu program, deney setinde kullanılan mil ve rulman boyutları girilerek çalışmakta ve farklı mil hızları için milin titreşim spektrumlarını belirlemektedir [95].

Lei ve diğerleri çeşitli rulman arızalarından elde ettikleri titreşim verisi üzerinden zaman ve frekans düzleminde sinyal işleme teknikleri ile farklı özellikler elde etmişlerdir. Bu özellikleri arıza sınıflandırması sırasında ANFIS için giriş parametresi olarak kullanmışlardır. ANFIS uygulaması GA ile geliştirilmiş ve sade ANFIS ve GA-ANFIS yöntemlerinin performansı karşılaştırılmıştır. GA esaslı yöntemin yüksek performansa sahip olduğunu göstermişlerdir [4].

Aliustaoğlu ve arkadaşları rulman arızaları için titreşim analizi tekniğini kullanmışlardır. Sinyallerin frekans spektrumuna bakarak hasarlı rulmanların tespitine çalışmışlardır. İstatistiksel yöntemler ile titreşim verilerinden çeşitli özellikler çıkarıp yapay zeka yöntemleri ile hata tespit algoritmalarının karşılaştırmalı analizini yapmışlardır [96, 97].

Zhen ve diğerlerinin yaptıkları rulman arıza teşhis çalışmasında, rulmanın iç ve dış bileziğinde hasar oluşturarak rulmanın çalışması esnasında elde edilen titreşim verilerinin dalgalı yöntemiyle filtrelenmesi sonucu frekans düzlemindeki arızayı teşhis eden baskın frekansları tespit belirleyerek farklı arıza durumlarını tespiti yarayan bir yöntem geliştirmişlerdir [36]. Zhen ve arkadaşlarının diğer çalışmasında ise rulman arızası teşhisinde kullanılan şok darbe metodunun (shock pulse method) eksikliklerini gidermek için klasik artık amplifikasyon metoduna (redundant lifting scheme) normalizasyon faktörü ekleyerek geliştirdikleri yöntemle rulman arızasını başarılı bir şekilde tespit ettiklerini göstermişlerdir [98].

He ve arkadaşları rulman arızasında kullanılan titreşim verisinin, başlangıç aşamasında olan hasarlarda çok etkili olmadığı için ses yayılım sensörü ile arıza teşhisi yapmışlardır. Farklı hasarlarda, rulman arızasının ses yayılım karakteristiğini farklı ses yayılım parametreleri ile incelemişlerdir. Titreşim karakteristiğinin analizinde ses yayılım sinyali, RMS değeri ve otokorelasyon fonksiyonunu kullanmışlardır [99].

Zhang ve diğerleri lokomotif rulmanında, destek vektör makineleri (SVM) kullanarak arıza teşhisi yapmışlardır. Rulmanda iç bilezik, dış bilezik ve silindirik bilye

üzerinde oluşan hasarlar SVM ile tespit edilmiştir. SVM'nin performansını artırmak için en uygun parametreler, karınca kolonisi optimizasyon (ACO) algoritmasıyla belirlenmiştir [100].

1.2.2. Ses yayılım verisi ile arıza teşhisi

Ses yayılımı arıza durumu teşhisinde sık kullanılan tekniklerden biridir. Ses yayılım tekniği, mekanik arızaların erken teşhisindeki yüksek hassaslığı ile diğer titreşim tekniklerinden ayrılan en önemli özelliklerden biridir. Ses yayılımı, ses kaynağı ve malzeme arasındaki ani gerilim enerjisinin boşalmasından dolayı geçici elastik dalga üretimi olayıdır. Tipik ses yayılım frekans aralığı 100 kHz ile 1 MHz arasındadır.

Choudhury ve arkadaşı rulmanın iç ve dış bileziğinde kıvılcım erozyon yöntemi ile oluşturdukları hasarların tespiti için ses yayılım sensörü kullanmışlardır. Çalışmalarında elde ettikleri verilerin, sinyal işleme teknikleri ile özelliklerini çıkartıp zaman ve frekans düzleminde incelemişlerdir. Hasarlı rulmanlarda tepe değerlerinin büyüklüğü ve sayısının diğer durumlara göre artış gösterdiğini tespit etmişlerdir [101].

Al-Ghamd ve arkadaşı rulmanda farklı boyutta ve derinlikte oluşturdukları hasarlar ile farklı yük ve hızda elde ettikleri ses yayılım verisi ile arıza teşhisi yapmıştır. Ayrıca çalışmalarında ses yayılımı ile titreşim verilerini karşılaştırmıştır. Ses yayılım verisinin maksimum genlik ve kurtosis değerlerinin, arızanın büyüklüğüne göre hata teşhisinde daha belirgin bir rol oynadığı belirlenmiştir [30].

Saxena ve arkadaşı rulman üzerinde 8 farklı hasar meydana getirmişler ve rulmanın çalışması sırasında titreşim ve ses yayılım bilgisini toplamışlardır. Elde ettikleri bilgilerden özellik çıkartarak farklı arızaları yapay sinir ağları ile sınıflandırmışlardır [102].

1.2.3. Farklı veriler ile arıza teşhisi

Rulman arızalarının tespiti için titreşim ve ses yayılımı verilerinin yanında çeşitli çalışmalarda farklı veriler de kullanılmıştır. Önel yapmış olduğu çalışmada, üç fazlı asenkron motorda kullanılan rulmanda meydana gelen arızayı motorun şebekeden çektiği akıma göre tespit etmiştir. Arıza durumlarında motorun, çalışırken çektiği

nominal akımdan daha fazla akım çektiğini, akım verisinin FFT analizi ile X-Y dönüşümü ve yapay sinir ağı kullanarak tespit etmiştir [103].

İnal, rulmanda farklı sayıda çiziklerden oluşan arızalar meydana getirerek rulmanın çalışması sırasında oluşan sesi incelemiştir. Elde edilen ses şiddeti, basıncı ve frekansının verilerini inceleyerek rulmanda oluşan arızanın şiddetini tespit etmiştir [104].

Benko ve arkadaşları, elektrikli süpürge motoru ile yaptıkları çalışmada farklı arıza durumlarında elde ettikleri ses verilerini analiz etmişlerdir. Arıza sınıflarından birisi de rulmanın çeşitli bölgelerinde oluşturdukları hasar durumlarıdır. Yalıtımlı ortamda mikrofon ile motordan elde edilen ses bilgisinin RMS, güç spektrumu, kısa zamanlı FFT ve Hilbert dönüşüm bilgileri ile çeşitli özellikler çıkarmışlar ve arıza durumlarını birbirinden ayırmışlardır [28]. Diğer çalışmalarında farklı arıza durumlarında titreşim, ses ve motorun çektiği akım bilgisi ile özellik çıkararak arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir [29].

Yapılan çalışmalarda rulman arızaları çoğunlukla titreşim verisinden elde edilen sinyal özellikleri ile tespit edilmiştir. Ses sinyalleri ile arıza tespiti, çevresel gürültülerden kolay etkilenmesi sebebiyle çok tercih edilmemiştir. Bu tez çalışmasında ise titreşim verisinin yanında ses verisinin de analiz edilmesiyle rulman arıza teşhisinin yüksek performansta gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda, rulman arızalarında sağlam rulmanın sökölüp hasardan sonra tekrar birleştirilmesiyle elde edilen küresel bilyeli rulmanlarla deneyler yapılmış ve sökölüp takmada oluşan montaj arızaları yok kabul edilmiştir. Bu çalışmada, özel üretim, iç ve dış bileziği sökölüp takılabilen silindirik bilyeli rulmanlar kullanılmıştır. Böylece rulman montajından kaynaklanan arızaların önüne geçilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda oluşturulan rulman arızaları 1mm ve üstü genişlikte olan delik ve çizik şeklindeki arızalardır. Ancak bu büyüklükteki arızaların yüksek genlikli titreşimlere sebep olmasından dolayı bu çalışmada 0.3mm ve 0.5mm genişliğinde çizikler oluşturulmuş ve rulman arızalarının başlangıç ve ileri safhalarında arıza durumları incelenmiştir. Bunun yanında deney düzeneğinde gevşeklik, eksen kaçıklığı, kaplin arızası ve dengesizlik gibi mekanik hasarları minimize edecek şekilde özgün bir rulman deney seti tasarlanmış ve

üretilmiştir. Deney setinde test rulmanın kolay takılıp çıkartılabileceği bir düzenek oluşturulmuş ve toplanan verilerin rulman arızası kaynaklı olmasına çalışılmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda rulman testlerinin 1000 d/dk ile 3000 d/dk arasındaki hızlarda yapıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında ise rulman devir hızı 1000 d/dk'dan 500 d/dk aralıklarla 4500 d/dk'ya çıkılmış ve 200 kg ile 400 kg yükte rulmandan elde edilen titreşim ve ses verileri analiz edilmiştir.

Rulman arızalarının tespiti genellikle sınıflandırma yöntemleri ile yapılmaktadır. Bunlardan bir tanesi de YSA yöntemidir. Ancak YSA mimarisinde seçilecek gizli katman sayısı ve her katmanda bulunacak nöron sayısı yüksek sayıda gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle YSA ile yapılan sınıflandırmalarda seçilen mimari belirli bir tecrübe ve deneme yanılma neticesinde oluşturulmaktadır. Ayrıca fazla sayıda gizli katman ve nöron içeren mimarilerde gereksiz işlem yapılmakta, küçük mimarilerde ise istenilen performansta sonuçlar alınamamaktadır. Bu amaçla, GA ile optimize edilen YSA modeli ile en iyi sonucu en kısa sürede veren uygun YSA mimarisi elde edilerek rulman arızaları sınıflandırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde araştırma platformunu oluşturan arıza teşhis sisteminin bileşenleri kısımlar halinde tanıtılmıştır. Arıza teşhis sistemine dâhil edilen araştırma araçları ile özellik çıkarmak ve sınıflandırma yapmak için kullanılan materyal ve yöntemler anlatılmıştır.

2.1. Rulman Arıza Teşhis Sistemi

Rulman arıza teşhis sistemi, endüstride rulman arızalarını başarıyla teşhis etmek üzere tasarlanan deneysel amaçlı ve küçük ölçekli bir test düzeneğidir ve Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1 Rulman arıza teşhis sisteminin genel görüntüsü

Rulman arıza teşhis sistemi 4 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

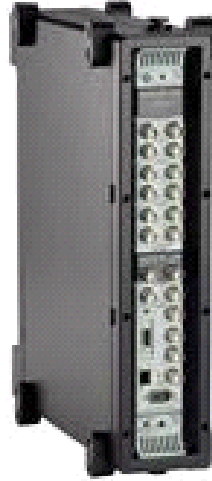
1. Veri işlem, analiz ve karar ünitesi
2. Analog ve sayısal veri toplama ünitesi
3. Veri ölçüm elemanları (Akustik mikrofon ve İvmeölçer)
4. Rulman yükleme testi ve ölçüm ünitesi

2.1.1. Veri işlem, analiz ve karar ünitesi

Sistemden toplanan verilerin görüntülenmesi, analizi, sinyal işleme ve arıza teşhis amaçlı kullanılmaktadır. AMD Sempron 3000+ 1.8 Ghz işlemci ve 1 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

2.1.2. Analog ve sayısal veri toplama ünitesi

Bruel&Kjaer firması tarafından geliştirilen Pulse type 7533 modeli 6 analog giriş ve 1 analog çıkıştan oluşan bir veri toplama cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.2'de gösterilen cihaz, girişlerine bağlanan transduserlerden gelen sinyali sinyal işleme teknikleri ile anlamlı hale getirmekte ve bilgisayara aktarmaktadır. Veri toplama cihazı, Pulse 10.2 yazılımı ile elde edilen sinyalleri analiz etmektedir.



Şekil 2. 2 Pulse type 7533 veri toplama cihazı

2.1.3. Veri ölçme elemanları

2.1.3.1 Akustik mikrofon

Bruel&Kjaer firması tarafından üretilmiş olan ve Şekil 2.3'de gösterilen 4189L001 1/2-inch açık alan mikrofonu, ortamda bulunan 6 - 20 kHz arasındaki seslerinin bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan polarizeli yüksek hassasiyete sahip bir mikrofondur.



Şekil 2. 3 Bruel&Kjaer 4189 L-001 açık alan mikrofonu

2.1.3.2. İvmeölçer

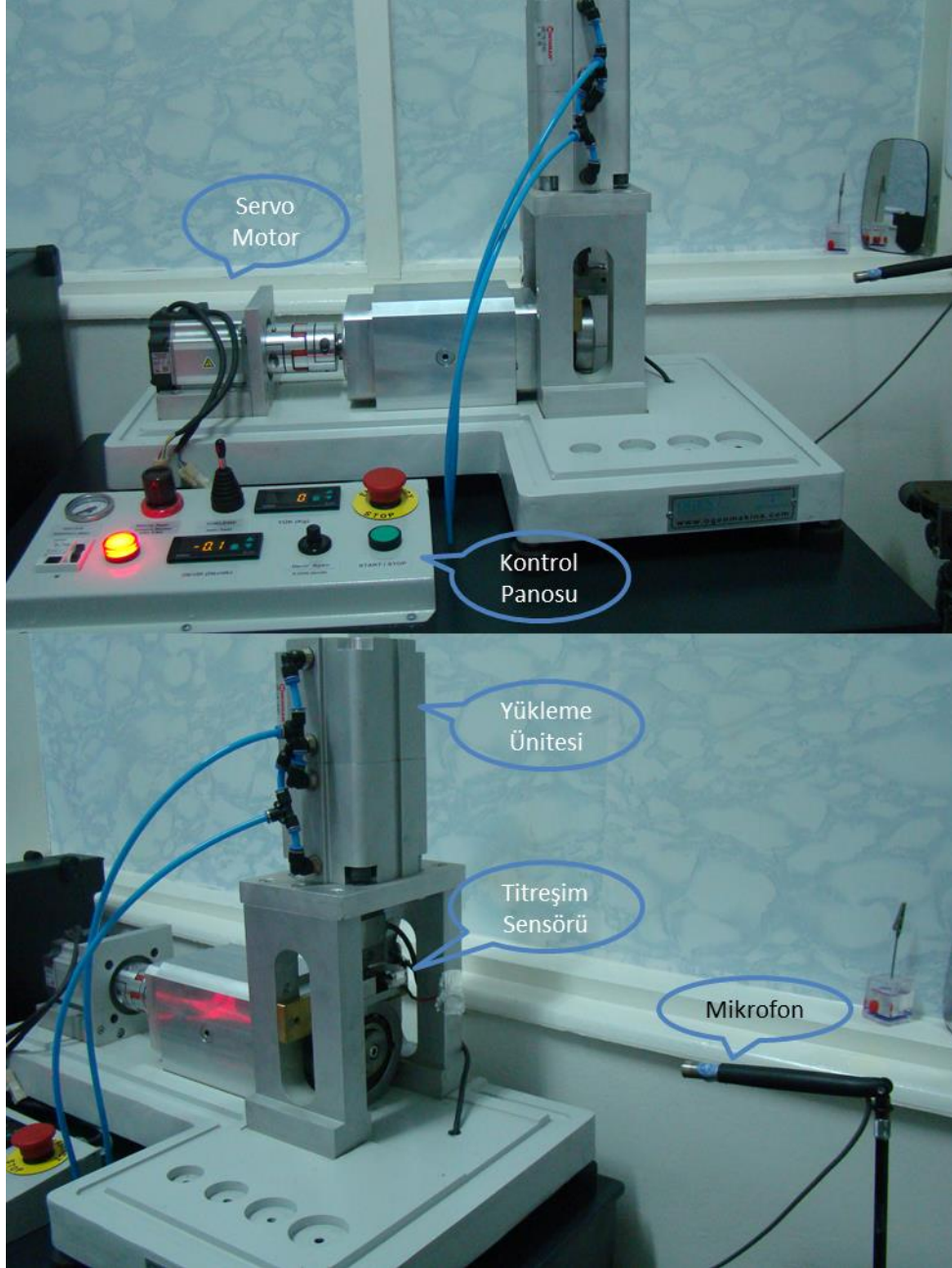
Endevco firması tarafından üretilmiş olan 7253B-10 ivmeölçeri (Şekil 2.4), birden fazla ölçüm gerektiren kompozit yapıların üç eksenli model analiz ölçümleri için tasarlanmıştır. Tek yuva içinde üç tane ayrı ivmeölçerin yerleştirilmesiyle oluşturulan sensör, üç farklı eksenin dik olarak titreşimi 10 mV/g hassasiyetle ölçmektedir.



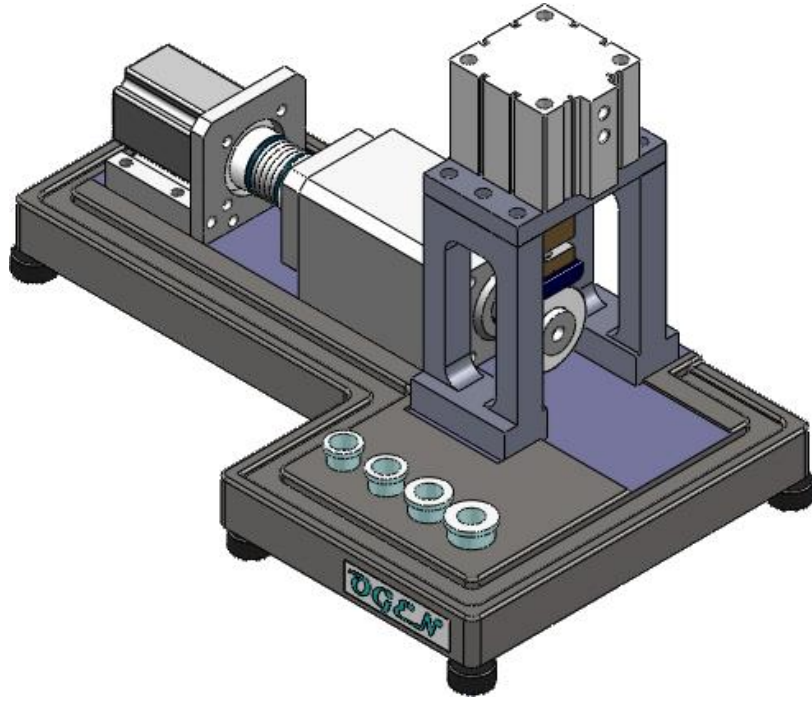
Şekil 2. 4 Endevco 7253B-10 İvmeölçer

2.1.4. Rulman test deney seti

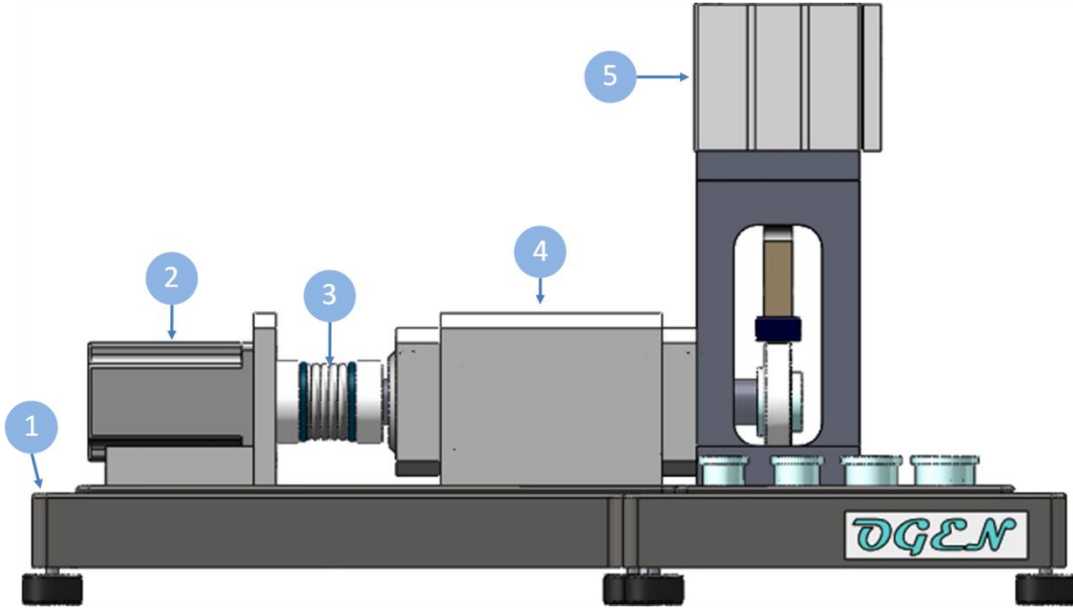
Rulman arızasının titreşim-akustik karakteristiğini incelemek için Şekil 2.5’de gösterilen rulman yükleme test ünitesi kullanılmıştır.



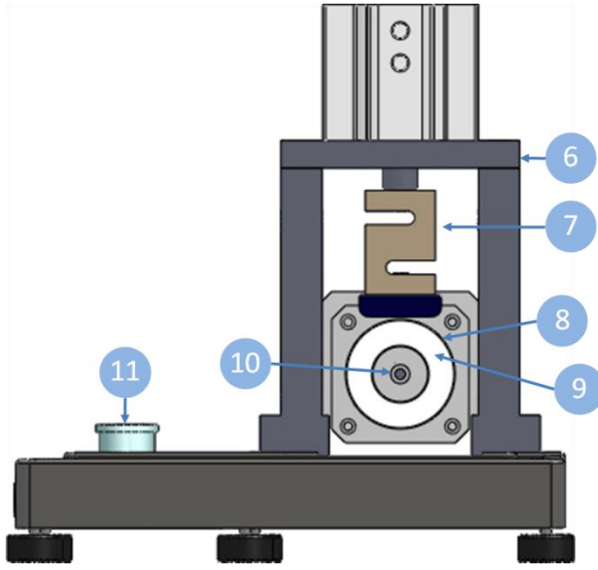
a) Deney seti fotoğrafı



b) Genel görünüm



c) Yandan görünüm



1. Taşıyıcı tabla
2. AC Servo motor
3. Kaplin
4. Mil yatağı
5. Yük uygulama silindiri
6. Yük silindiri yatağı
7. Yük hücresi
8. Test rulmanı yatağı
9. Test rulmanı
10. Hareket mili
11. Rulman bağlantı aparatı

d) Önden görünüm

Şekil 2. 5 Rulman test deney seti

Deney setinde kullanılan taşıyıcı tabla 240x700x400 mm ölçülerinde, 30kg ağırlığında, L formunda ve toplam 55mm kalınlığındadır. Tabla sfero dökümden yapılmış olup ilgili bölümler talaşlı imalat yöntemleriyle ± 0.02 mm toleransla işlenmiştir. Tablanın 5 adet titreşim sönümlenme özelliği olan 40 mm çaplı kauçuk ayakları bulunmaktadır.

Tahrik elemanı olarak 0,75 KW gücünde 3 fazlı MSMD082P1S model Panasonic servo motor kullanılmıştır. Servo motor 5000 d/dk (maksimum) hızda dönme ve 2,5 Nm tork üretme kapasitesine sahiptir.

Deney esnasında motorun üreteceği olası titreşimlerin test rulmanına ulaşmaması için motor yataklama ünitesi bağımsız şekilde tasarlanmış ve irtibatları titreşimleri iletmeyen esnek ve boşluksuz özel bir kaplin ile sağlanmıştır. Kullanılan kaplin en az 50 Nm tork ve 10000 d/dk devir iletebilecek kapasitede seçilmiştir. Kaplin 55 mm çapında ve 75 mm uzunluğundadır. Kaplinin esnek yapısını oluşturan kısımları paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Kaplinin motor ve ana mil sabitleme bölümleri 19 mm çapta ve ± 0.02 mm toleransla işlenmiştir.

Mil yatağı monoblok yapıda ve titreşimleri absorbe edebilen 6063 serisi 120x120x150 mm ölçülerinde alüminyum malzemedendir yapılmıştır. Mil yatağında 2

adet 70207 BW tipi hem radyal hem de aksel kuvvetleri taşıyabilecek özellikte bilyeli rulman, yağlayıcı malzemenin ünite dışına sızması için 10x68x10 mm ölçülerinde 6063 serisi alüminyum malzemedan yapılmış rulman sabitleme kapakları içerisine montajlanmış yağ keçeleri ve rulman kapakları bulunmaktadır. Mil yatağındaki rulmanlar kapaksız olup sıvı yağlayıcı ile yağlanmaktadır. Mil yatağındaki rulman yuvaları ± 0.01 mm toleransa sahiptir. Sağ ve sol rulman yuvası eksen kaçıklığı toleransı ± 0.01 mm'dir.

Hareket mili 292 mm boyda, en büyük çapı 45mm genişlikte ve ST4140 çelik malzemedan imal edilmiştir. Hareket mili kaba tornalama işlemine müteakip indüsiyonla 54HRC sertlikte yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Sertleştirme işleminden sonra rulman yatakları 35 mm çapta ve ± 5 μ m hassasiyetinde taşlanmıştır. Taşlama işlemi sonrasında hareket milinin balans dengelemesi 10000 d/dk'da 0.5 gr hassasiyetle yapılmıştır. Milin test ucu farklı boyuttaki rulmanların montajına olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Yükleme ünitesinde 1 adet pnömatik silindir ile test rulmanına radyal yönde 600 kg yük uygulanabilmektedir. Test rulmanı ve yatağı ana mil yataklama rulmanlarıyla irtibatlı olmadığı için uygulanan yük doğrudan test rulmanına etki etmektedir. Yük uygulayıcı olarak 80 mm piston çapına sahip pnömatik silindir kullanılmakta ve 6bar hava basıncı ile beslenmektedir. Yük silindiri en az 750 kg kuvvet yük üretme kapasitesine sahiptir. Pnömatik sistemde 1 adet 0-10 bar ve 0.1 bar hassasiyetli basınç ayar manometresi bulunmaktadır. Pnömatik silindirin test düzeneğine sağlam bir şekilde montajlanmasına uygun yapı bulunmaktadır ve 1 adet dijital kuvvet indikatörü ile test rulmanına uygulanan kuvvet ölçülebilmektedir.

Rulman yatağı ve silindir arasına yerleştirilen yük sensörü (load cell) ile yatağa uygulanan kuvvet kg cinsinden ölçülebilmektedir. Kullanılan yük hücresi S tipi ve 750 kg kapasitelidir. Yük hücresinin; hassasiyeti 2.0 ± 0.2 mV/V, giriş direnci 350 ± 3.5 Ω , çıkış direnci 350 ± 3.5 Ω ve çalışma sıcaklığı $-10 +40$ °C 'dır.

2.2. Test Rulmanları

Rulman, verilmesi gereken hareketin minimum sürtünmeyle veya en az güç kaybıyla verilmesini sağlayan, dairesel veya aksenal hareketle iş yapan makine elemanıdır. Makine imalatı, otomotiv sektörü, sanayi makineleri, küçük ev aletleri gibi birçok alanda makine aksamının dönebilmemesi ve makinenin işlevini yürütebilmesi için rulmana ihtiyaç vardır.

Deney çalışmalarında kullanılan dış (N208) ve iç (NU208) bileziği çıkarılabilen rulmanlar Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu bileziklerin birbiri içerisinde rahatça dönebilmemesi için ara kısma makara serisi yerleştirilmiştir ve silindirik bilyeler bu makaralara tutturulmuştur.



a) N208 Dış bileziği ayrılabilen

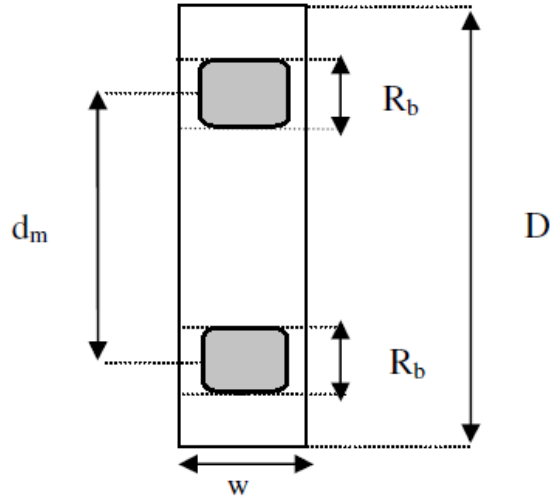


b) NU208 İç bileziği ayrılabilen

Şekil 2. 6 Deneylerde kullanılan rulmanlar

2.2.1. Rulman yapısı ve geometrik özelliği

Rulman arıza teşhis sisteminde FAG firmasının üretmiş olduğu NU208-E-TVP2 tipi iç bileziği ayrılabilen ve N208-E-TVP2 tipi dış bileziği ayrılabilen rulmanlar kullanılmıştır. Rulmanın geometrik özellikleri ve ölçüleri sırasıyla Şekil 2.7 ve Tablo 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 7 Rulmanın geometrik özellikleri

Tablo 2. 1 NU208 -E-TVP2 tipi rulmana ait ölçü değerleri

Parametre	Değer (mm)
D	80
R_b	11
d_m	62,1
w	18
N	14

2.2.2. Rulman hata frekansı karakteristiği

Rulmanda bir arıza meydana geldiğinde veya zamanla sürtünmeden kaynaklanan aşınmanın etkisiyle farklı frekanslarda titreşimler meydana gelir. Titreşim, rulmanın iç ve dış kuvvetlere karşı gösterdiği tepki davranışdır. Bu titreşimler, dış bilezik, iç bilezik ve yuvarlanma elemanlarının üzerinde rulmanın fiziksel ve geometrik yapısına bağlı olarak birbirinden bağımsız frekans bileşenleri oluşur. Bu bileşenler hatanın türü ve gelişimi hakkında bilgi vermektedir. Rulman hata frekansları ile rulmanın dönüş hızı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Rulmanın dönüş hızı arttıkça yuvarlanma elemanlarının hatalı bölge üzerinden geçiş sıklığı artar. Bu duruma bağlı olarak rulman hata frekansı da değişir [3].

Geometrik yapısı Şekil 2.7’de verilen rulmanın genel hata frekansları (2.1), (2.2), (2.3) ve (2.4) denklemlerinde verilmiştir. Burada f_r rulmanın dönme frekansdır.

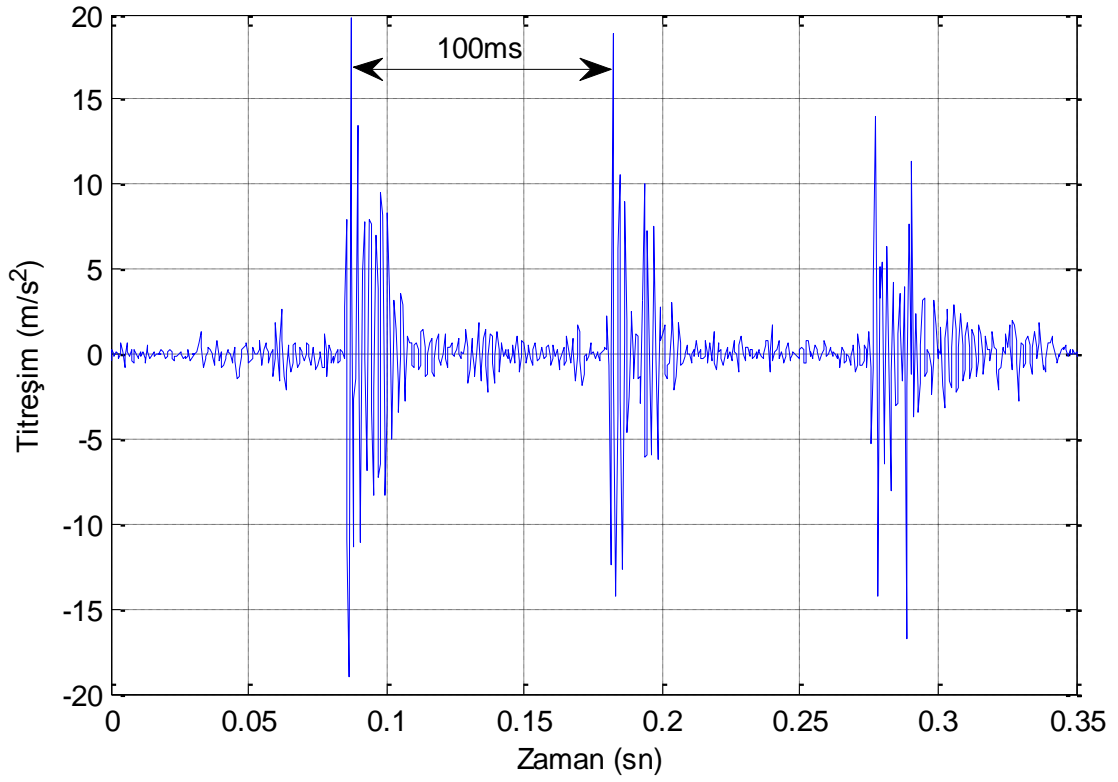
Temel Frekans	$TF = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{R_b}{d_m} \right)$	(2.1)
---------------	---	-------

İç Bilezik Dönme Frekansı	$IBF = \frac{N}{2} f_r \left(1 + \frac{R_b}{d_m} \right)$	(2.2)
---------------------------	--	-------

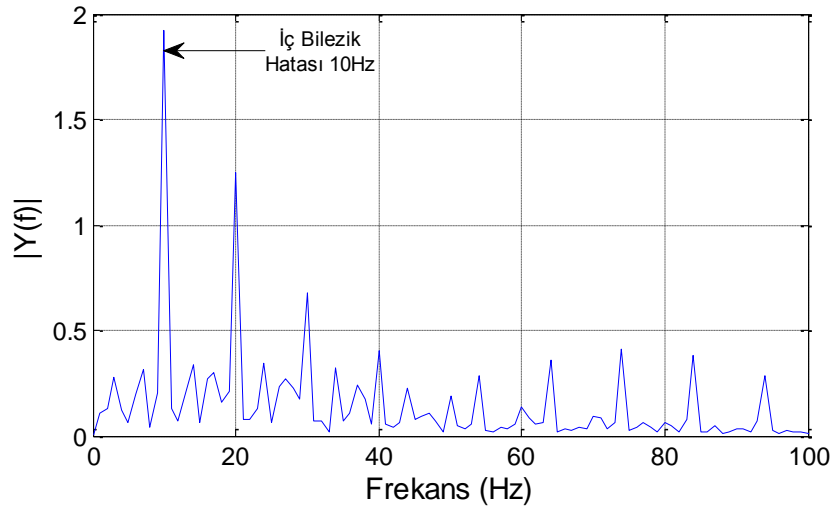
Dış Bilezik Dönme Frekansı	$DBF = \frac{N}{2} f_r \left(1 - \frac{R_b}{d_m} \right)$	(2.3)
----------------------------	--	-------

Bilye Dönme Frekansı	$TF = \frac{d_m}{2R_b} f_r \left(1 - \frac{R_b^2}{d_m^2} \right)$	(2.4)
----------------------	--	-------

Şekil 2.5’de gösterilen sistemde dış bilezik sabit durmakta ve mile bağlı olan iç bilezik dönmektedir. Bu özelliği ile sistem çalıştırıldığında iç bilezikte oluşan arıza mil frekansına eşit olmaktadır. Çünkü mil ile birlikte dönen iç bilezik üzerindeki arıza her dönüşte titreşimde tepe oluşturacak şekilde meydana gelmektedir ve bu da dönme frekansına eşit olmaktadır. Rulmanın 600 d/dk hızla döndürülmesi sonucu elde edilen iç bilezik hata karakteristik frekansı hesaplama ile $600/60 = 10$ Hz olarak hesaplanmış ve titreşim verisi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Titreşimin oluşma sıklığına bakıldığında 100ms’de bir yeni titreşimlerin oluştuğu görülmektedir. Elde edilen titreşim verileri frekans düzleminde incelendiğinde 10 Hz’de en büyük genliğe sahip frekans bileşeni olduğu Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2. 8 600 d/dk ile döndürülen iç bilezik arızalı rulmandan elde edilen titreşim



Şekil 2. 9 600 d/dk ile döndürülen iç bilezik arızalı rulmandan elde edilen titreşimin frekans analizi

2.2.3. Rulman arızalarının oluşturulması

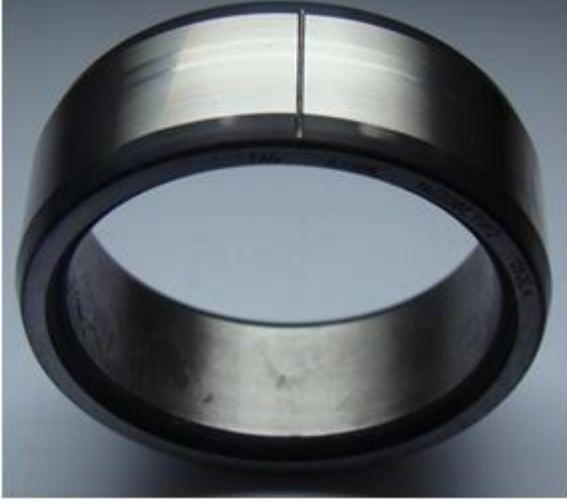
Rulman arızaları yağlama hatası ve aşırı yükleme gibi durumlarda rulman elemanlarının üzerinde bulunan ince film tabakasının erimesi ve yuvarlanma elemanı ile bilezikler arasındaki sürtünmenin artmasına neden olan aşınma ve oksitlenme oluşumuyla, yuvarlanma yüzeylerinden parçacık kopması sonucu meydana gelmektedir. Bu hasar durumları, dönme sırasında oluşan sürtünme kuvvetini artırmakta ve sistemin çalışma performansını düşürmektedir. Bu durumda sistemde bozucu titreşimler artmakta ve hasarın erken teşhis edilip müdahale edilmemesi durumunda, yıkıcı hasarlara neden olmaktadır [3].

Arıza çalışmalarında rulman bileziklerinde oluşan çatlakları incelemek için özel olarak farklı boyutlarda gerçekleştirilen çizikler ile deneyler yapılmıştır. İlk olarak hatasız ve normal olarak adlandırılan rulman ile deneyler yapılmıştır. Sonrasında yeni rulman üzerine sırasıyla Tablo 2.2 'de gösterilen boyutlarda deneysel amaçlı çizikler tel erozyon yöntemiyle oluşturulmuştur. Rulmanın iç ve dış bileziklerinde oluşturulan hatalar Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Çizikler oluşturulduktan sonra rulmanlar yeniden monte edilerek eşit miktarda yağlama yapılmıştır. Tel erozyon, geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek parçaların ve sert metallerin işlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada tel erozyon yöntemi, rulman üzerinde yapay hatalar oluşturma amaçlı olarak kullanılmıştır.

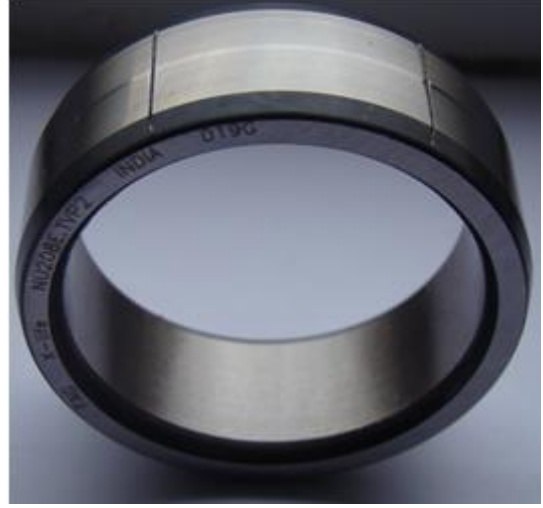
Tablo 2. 2 Rulman arızaları

Çizik Boyutu (mm) (Genişlik X Derinlik)	Çizik Yeri	Arıza Adı
-	Arıza Yok	İç Normal
0,3x0,3 Tek Çizik	İç Bilezik	İç 03x03 Tek
0,5x0,5 Tek Çizik	İç Bilezik	İç 05x05 Tek
0,3x0,2 Çift Çizik	İç Bilezik	İç 03x022 Çift
-	Arıza Yok	Dış Normal
0,3x0,3 Tek Çizik	Dış Bilezik	Dış 03x03 Tek
0,5x0,5 Tek Çizik	Dış Bilezik	Dış 05x05 Tek
0,3x0,2 Çift Çizik	Dış Bilezik	Dış 03x02 Çift

Deneyler 200, 300 ve 400 kg olmak üzere 3 farklı yükte ve 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 ve 4500 d/dk olmak üzere 8 farklı hızda 3'er defa tekrarlanarak yapılmıştır. Deneyler sırasında ivmeölçer ve mikrofondan veri toplanmıştır.

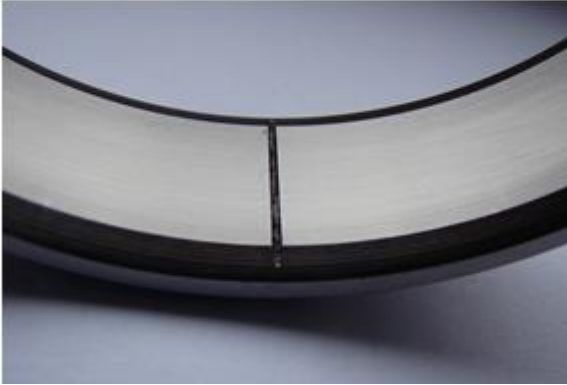


a) İç 05x05 Tek

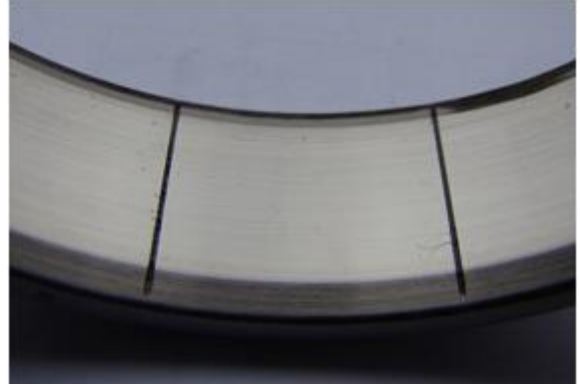


b) İç 03x02 Çift

Şekil 2. 10 Rulmanın iç bileziğinde oluşturulan hatalar



a) Dış 05x05 Tek



b) Dış 03x02 Çift

Şekil 2. 11 Rulmanın dış bileziğinde oluşturulan hatalar

Oluşturulan yapay arızalarla rulmanlar belirtilen yük ve hızda 3'er defa çalıştırılmıştır. Rulman hata karakteristiğine göre farklı hızlarda çalıştırılan rulmanların motor mil hızına göre karakteristik hata frekansları Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 Rulman arızalarına ait farklı hızlarda hata karakteristik frekansları

Arıza Adı	Rulman Dönme Hızı (d/dk)							
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
İç 03x03 Tek	17 Hz	25 Hz	33 Hz	42 Hz	50 Hz	58 Hz	67Hz	75 Hz
İç 05x05 Tek	17 Hz	25 Hz	33 Hz	42 Hz	50 Hz	58 Hz	67Hz	75 Hz
İç 03x022 Çift	17 Hz	25 Hz	33 Hz	42 Hz	50 Hz	58 Hz	67Hz	75 Hz
Dış 03x03 Tek	96 Hz	144 Hz	192 Hz	240 Hz	288 Hz	336 Hz	384 Hz	431 Hz
Dış 05x05 Tek	96 Hz	144 Hz	192 Hz	240 Hz	288 Hz	336 Hz	384 Hz	431 Hz
Dış 03x02 Çift	96 Hz	144 Hz	192 Hz	240 Hz	288 Hz	336 Hz	384 Hz	431 Hz

2.3. Sinyal Özelliklerinin Çıkarılması

Rulman arızalarının tespiti için elde edilen verilerin analizinde çeşitli istatistiksel özellikler kullanılmaktadır. Arıza teşhisi için sistemden elde edilen verilerden özellik çıkarmak için kullanılan yöntemler zaman ve frekans düzleminde olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

2.3.1. Zaman düzlemi

Sistemden elde edilen titreşim, ses yayılımı ve ses gibi sinyallerin zaman düzleminde incelenmesi ile arızaların tespitinde kullanılacak önemli bilgiler elde edilmektedir. Özellikle titreşim sinyallerinde normal duruma göre arızalı durumlarda belirgin farklar ortaya çıkmaktadır [3].

Zaman düzleminde yapılan özellik çıkarmada istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemde, istatistiksel parametreler genellikle işaretin tamamını veya bir kısmını temsil etmektedir. İstatistiksel yöntemlerden etkin değer (RMS), ortalama değer, standart sapma, maksimum değer, basıklık (kurtosis), çarpıklık (skewness) gibi özellikler sıklıkla kullanılan ölçütlerdir. Sağlıklı bir rulmanda bu değerler düşük seviyelerde seyrederken, yerel bir hataya sahip olan rulmanda artması ve arızanın büyüklüğüne göre giderek yükselen bir çizgiyi izlemesi ya da belli bir karakteristiğe sahip olması beklenir. Ortalama ve RMS değerleri rulmandaki hasarın büyüklüğüyle doğru orantılı artmakta ancak çarpıklık ve basıklık gibi değerler ise hasarı karakterize etmektedir [95].

2.3.1.1. Tepeden tepeye (Peak to Peak)

Tepeden Tepeye (TT) değeri verinin hangi iki değer arasında olduğunu gösteren istatistiksel bir ölçüttür. Elde edilen verinin maksimum ve minimum değeri arasındaki farkı göstermektedir.

2.3.1.2. Etkin değer (RMS)

Kuadratik ortalama olarak da bilinen karelerin ortalamasının karekökü, değişken verinin genliğini ölçen istatistiksel bir yöntemdir. RMS değeri (2.5)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.5)$$

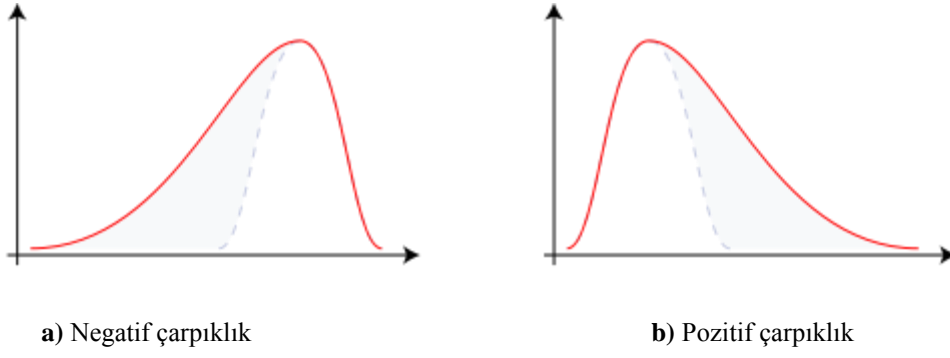
2.3.1.3. Çarpıklık (Skewness)

İstatistiksel olarak dağılımın üçüncü momenti olan çarpıklık, reel değerli bir değişkenin olasılık dağılımının asimetri ölçüsüdür. Aynı zamanda verilerin, aritmetik ortalama çevresindeki dengeden uzaklaşma eğilimini göstermekte olup ve (2.7) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2} \quad (2.6)$$

$$\text{çarpıklık} = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.7)$$

Şekil 2.12'de çarpıklık durumları gösterilmektedir. Negatif çarpıklık, sistemden toplanan verilerin negatif yöndeki ağırlığını gösterirken pozitif çarpıklık ise, elde edilen verilerin negatife nazaran daha yoğun olduğunu gösterir. Normal durumda verilerin pozitif ve negatif dağılımı dengededir.



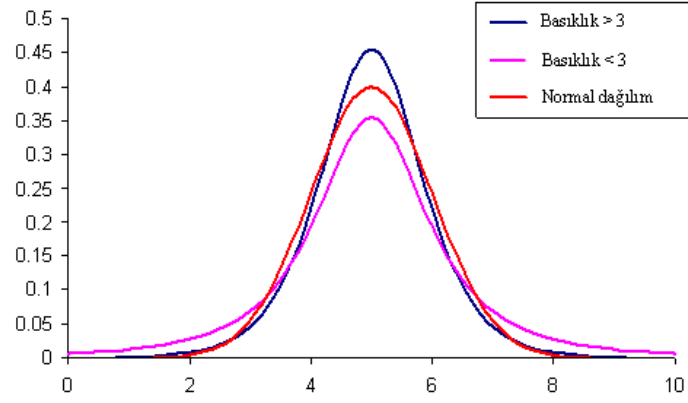
Şekil 2.12 İstatistiksel olarak çarpıklık gösterimi [105]

2.3.1.6. Basıklık (Kurtosis)

Basıklık, istatistiksel olarak dağılımın 4. momentidir ve verilerin normal dağılımına göre basıklık veya sivrilik derecesini gösterir. Basıklık (2.8)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Basıklık, dağılım büyüklüğünün ölçülmesini sağlar ve verinin içindeki başlıca tepeleri göstermektedir. Hasar şiddetine bağlı titreşim verisinin basıklık değeri artmaktadır [106].

$$basıklık = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.8)$$

Basıklık durumları Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Normal dağılımın basıklık değeri 3, pozitif basıklığın değeri ise 3'ten büyüktür. Pozitif basıklık, verilerin içinde fazla sayıda tepe değerleri bulunduğunu yani titreşimin fazla olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 2.13 Basıklık durumlarının gösterimi [107]

2.3.2. Frekans düzlemi

Zaman düzleminde elde edilen istatistiksel parametrelerin motor hızıyla orantılı olarak artması rulman hasarı hakkında bilgi edinmeyi olumsuz etkilemektedir. Düşük motor hızında çalışan hasarlı bir rulman ile yüksek hızda çalışan hasarsız bir rulmanın istatistiksel parametreleri birbirinden ayırt edilemeyebilir [3]. Zaman düzleminde oluşan bu problemin üstesinden gelmek için elde edilen sinyallerin güç spektrumunda frekans bileşenlerine bakarak, hasar hakkında daha güvenilir bilgi alınabilmektedir.

Döner makinelere kutusundan yeni çıkmış yeni bir rulman takılsa bile rulmanlarda gözle görülmeyen düzeyde yüzey pürüzlülüğü bulunmakta ve rulman çalışırken elde edilen titreşim sinyallerinde düşük genliklerde rulman hasar frekansları bulunabilmektedir. Rulmanlarda mekanik veya yağlama gibi problemlerden dolayı oluşan hasar durumlarında elde edilen titreşim sinyalinin frekans spektrumunda normalden daha fazla sayıda tepeler görülmektedir. Dengesizlik, eksen kaçıklığı ve gevşeklik gibi mekanik problemlerin etkisi mil dönme frekansı ve katlarında görülebilmektedir [95].

Rulmandan elde edilen titreşim sinyalinin frekans spektrumu elde edilerek yerel hataların frekans analizi yapılabilmektedir. Bu yöntemde rulmanın geometrik değerleri ve mil dönme frekansı bilinirse rulman hasar frekansları hesaplanabilmektedir. Hasarın boyutuna bağlı olarak hasar frekanslarının genliklerinin arttığı görülmektedir [3].

2.3.2.1. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)

Titreşim işaretinin frekans bileşenleri, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile hesaplanabilmektedir. Rulmanın çalışması sırasında etrafa yaymış olduğu sinyallerin frekans bileşenleri MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Sürekli zamanda işaretin FFT 'si (2.9)'da gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.9)$$

Eğer titreşim işareti n adet örnek içeren ayrık işaret ise ayrık FFT 'si (2.10) yardımıyla bulunabilir.

$$DFT[x(k\Delta t)] = X(k) = \sum_{i=0}^{n-1} x(i) e^{-j\frac{2\pi ki}{n}} \quad 0 < k < n \quad (2.10)$$

2.3.2.2. Zarf analizi

Titreşim sinyallerinin taşıyıcı frekansı ve genlik modülasyonu, mekanik sistemin rezonans frekansını oluşturmaktadır. Bu nedenle, modülasyon sinyalini taşıyıcı frekanstan ayırmak için yüksek frekans demodülasyonu olarak da bilinen zarf analizi yöntemi kullanılmaktadır [108]. Yüksek frekans demodülasyonunda ilk işlem sinyalin doğrultulmasıdır ve bu işlem Hilbert Dönüşümü (HD) ile gerçekleştirilir. HD, sinyalin genliğini değiştirmeden sadece fazını doksan derece kaydıran matematiksel bir dönüşüm işlemidir ve (2.11)'de zaman fonksiyonu olan $x(t)$ 'nin HD'si gösterilmektedir.

$$H^{(x(t))} = p.v. \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau = \frac{1}{\pi} p.v. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2.11)$$

Burada $p.v.$ integral işleminin Cauchy prensibi değeri, $x(t)$ sinyal ve $H^{(x(t))}$ Hilbert Dönüşümü değeridir. $x(t)$ basit harmonik sinyali,

$$x(t) = A \cos(2\pi ft) \quad (2.12)$$

Bu sinyal $\tilde{f}(t)$ kompleks sinyalinin gerçek kısmı olarak gösterilebilir.

$$\tilde{f}(t) = Ae^{j2\pi ft}$$

Euler açılımı ile gerçek kısım kolayca elde edilebilir.

$$\tilde{f}(t) = A \cos(2\pi ft) + jA \sin(2\pi ft) \quad (2.13)$$

$$|\tilde{f}(t)| = A$$

Bu analitik sinyalin sanal kısmı gerçek kısmın Hilbert Dönüşümüdür. Analitik sinyalin genliği olan A, orijinal sinyalin zarfıdır. Zarf analizinin adımları Şekil 2.14’de gösterilmektedir. İlk olarak bant-geçiren filtre ile dengesizlik ve eksen kaymasından kaynaklanan düşük frekanslı yüksek genlikli sinyallerin ve gürültülerin filtrelenmesi gerçekleştirilmektedir. Bant-geçiren filtre frekansı sistemin rezonans frekansı olarak seçilmekte ve böylece titreşime neden olan frekans bileşenleri korunmaktadır. Bant-geçiren filtreden sonra HD ile doğrultma işlemi yapılmaktadır. Son olarak doğrultulmuş ve bant-geçiren filtreden geçirilen sinyalin spektrumu hesaplanmaktadır [109].



Şekil 2. 14 Zarf analizi işlem adımları

2.3.2.3. Güç Spektrum Yoğunluğu

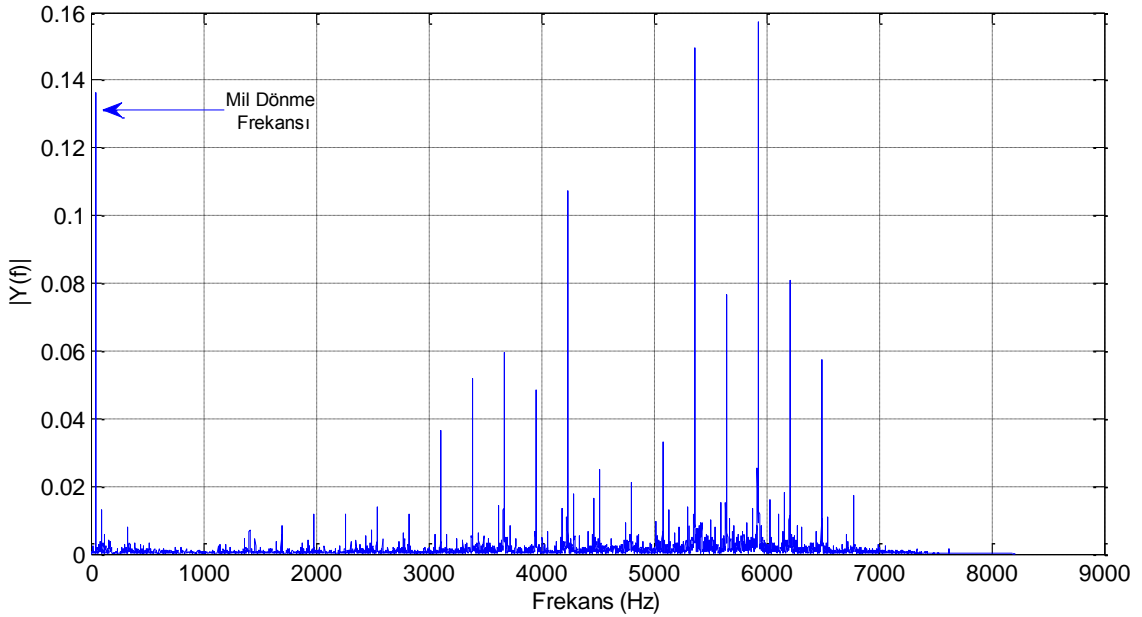
Frekans spektrumunda elde edilen frekans bileşenlerinin daha belirgin hale getirilmesi ve hangi frekans aralığında bileşen yoğunluğu bulunduğunu güç spektrum yoğunluğu (Power Spectrum Density - PSD) göstermektedir. $x(t)$ sinyalinin PSD’si (2.14)’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$PSD = \frac{1}{N\Delta t} |DFT[x(k\Delta t)]|^2 \quad (2.14)$$

Burada $DFT[x(k\Delta t)]$, $x(\Delta t)$ sinyalinin ayrık FFT’sini göstermektedir [28].

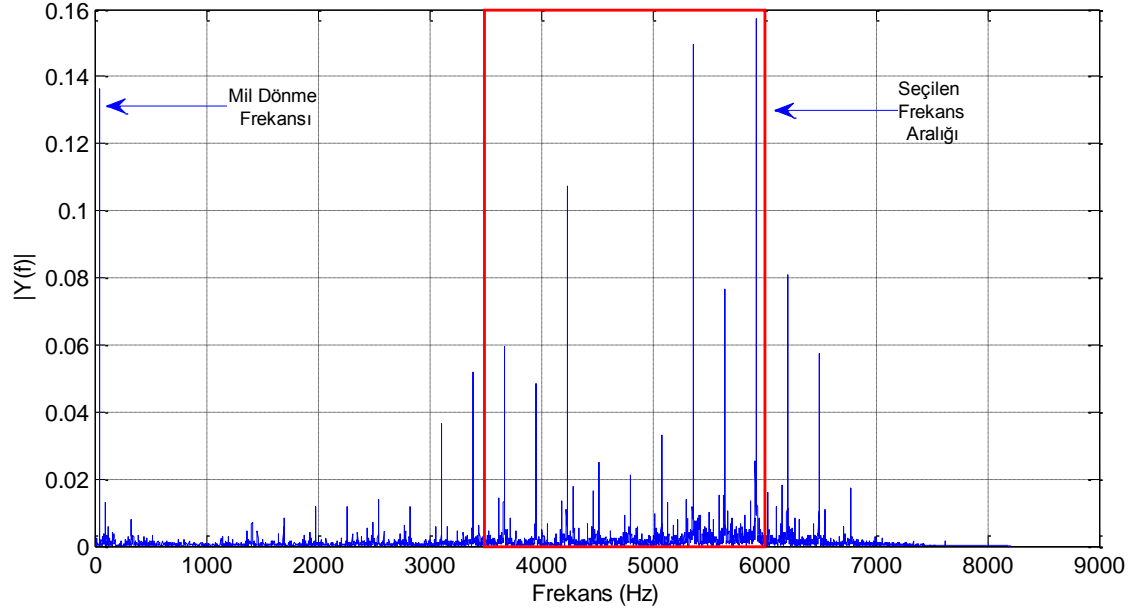
2.3.2.5. Frekans düzleminde özellik çıkartma

Rulmanların çalışması sırasında geometrik değerleriyle arızanın yerine bağlı titreşim frekansları tespit edilebilmektedir. Arıza frekanslarıyla birlikte mil frekansı birleşerek farklı frekans aralıklarında yan bantlar oluştururlar. Arızanın büyüklüğüne bağlı olarak arıza frekansları ve yan bantlarda bulunan frekans bileşenlerinin genliklerinde artış olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir [3]. Arızalı rulmandan (Dış 03x03 Tek) 300 kg yükte 3000 d/dk hızında çalıştırılması sırasında elde edilen ses verisinin güç spektrumu Şekil 2.15’de gösterilmektedir. Mil dönme frekansı ($3000/60 = 50$ Hz) bileşeni diğer frekans bileşenlerine nazaran daha baskın olduğu gözükmemektedir. Ayrıca arızaya bağlı olarak 3500-6000 Hz arasında da rezonans frekanslarının olduğu anlaşılmaktadır. İlk durumda hesaplama yolu ile elde edilen dış bilezik arıza frekansı (282 Hz) Şekil 2.15’de görülmemektedir. Arıza frekansını netleştirmek ve elde edilen veriler hakkında teşhis konulabilmesi için sırasıyla verilerin zarf analizi ve PSD dönüşümleri yapılmaktadır.



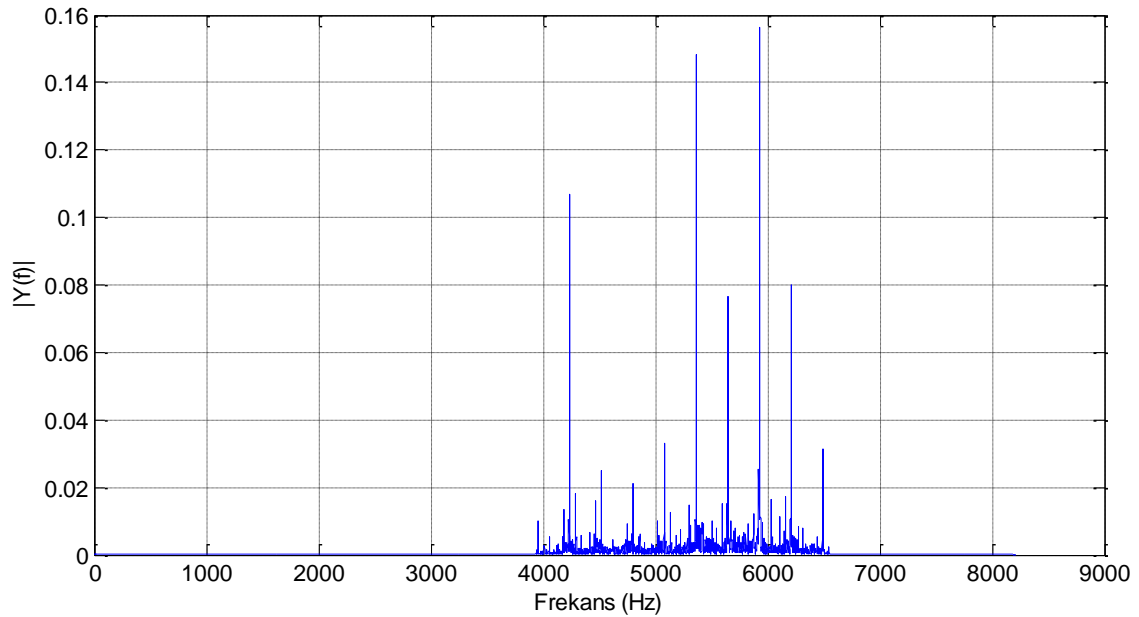
Şekil 2. 15 3000 d/dk hızında elde edilen ses verilerinin frekans spektrumu

Zarf analizinin ilk adımı olan bant geçiren filtre için frekans aralığı Şekil 2.16'da gösterildiği gibi 3500-6000 Hz arası seçilmiştir ve 200. derecede FIR filtre kullanılmıştır.



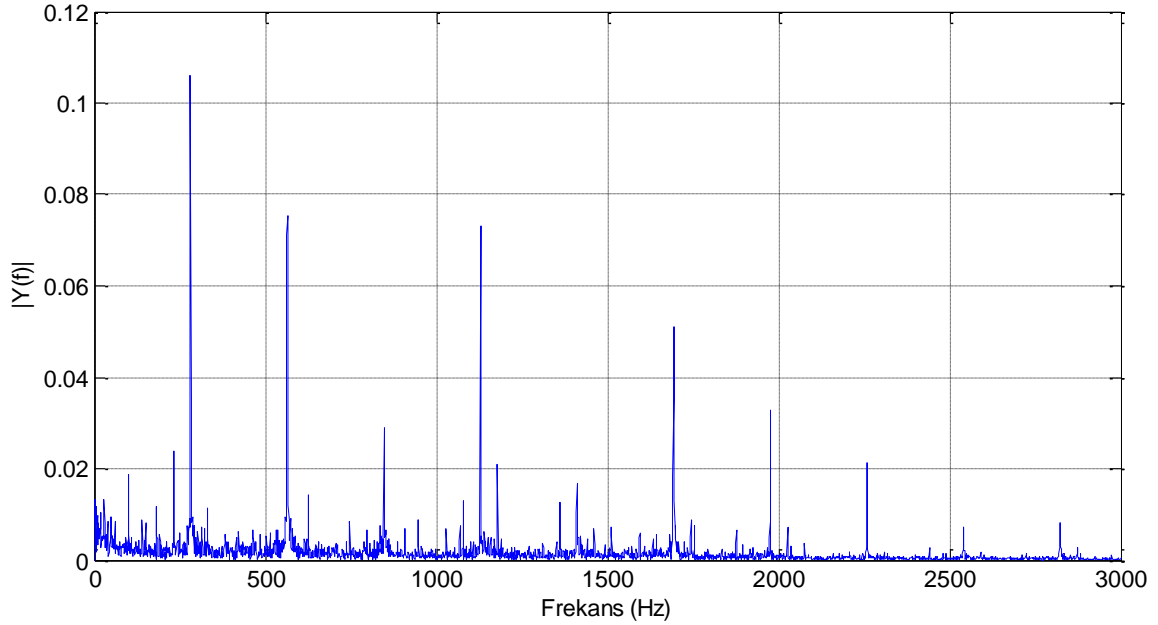
Şekil 2. 16 Bant geçiren filtre için seçilen frekans aralığı

Ses verisinin filtreleme sonucunda elde edilen frekans bileşenleri Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere rezonans frekans bileşenleri korunmuş diğer bileşenler ise başarılı bir şekilde filtrelenmiştir.



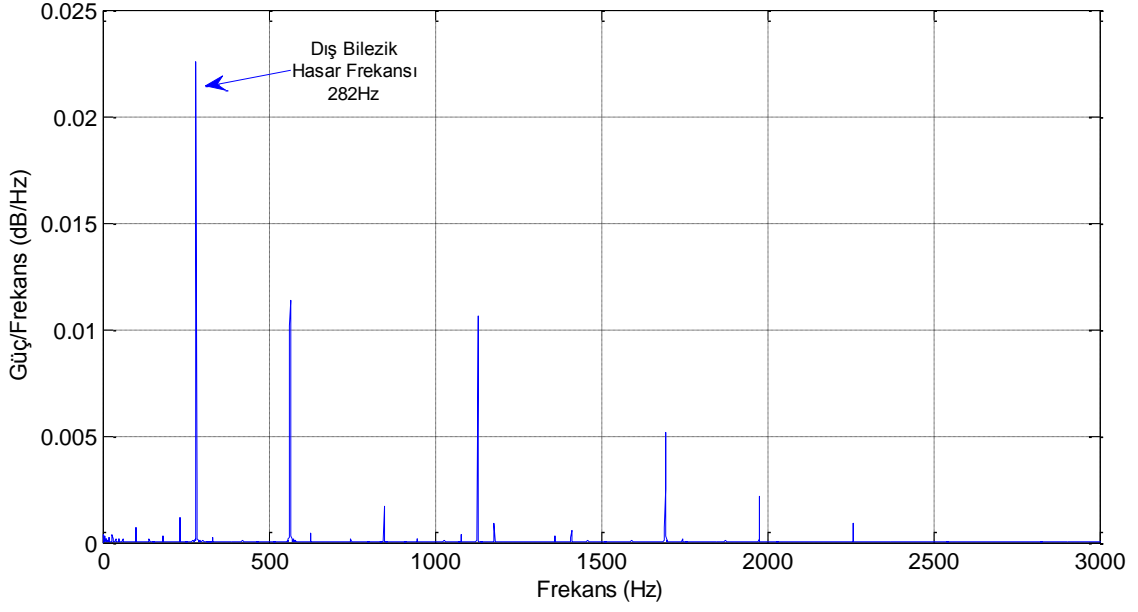
Şekil 2. 17 Zarf analizi: bant geçiren filtre çıkışı

Elde edilen filtreli veriye zarf analizinin ikinci aşaması olan HD uygulanmaktadır. HD işlemi neticesinde elde edilen verinin frekans spektrumunda, dış bilezik arıza frekansı olan 282 Hz'lik frekans bileşeni ve harmoniklerine ait genliklerin diğer frekans bileşenlerine nazaran daha büyük olduğu Şekil 2.18'de görülmektedir.



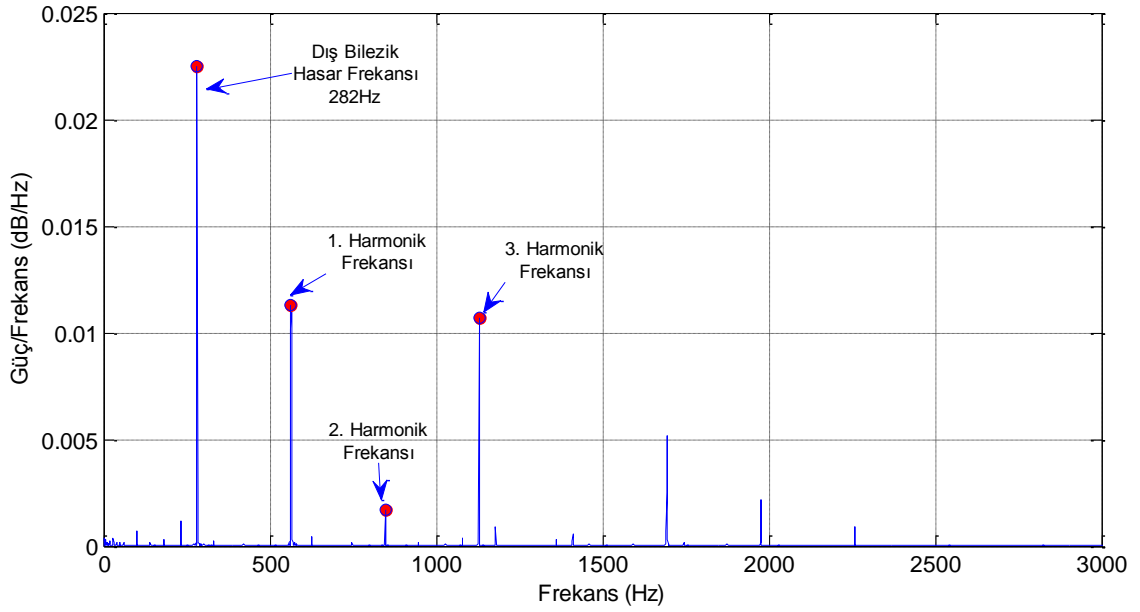
Şekil 2.18 Zarf analizi: Hilbert Dönüşümü çıkışı

Tez çalışmasının bundan sonraki kısmında anlatıldığı gibi, arıza teşhisinde gerçekleştirilen sınıflandırma işleminde verinin daha anlamlı hale gelmesi ve arıza frekanslarının diğerlerine göre daha belirgin olması için PSD dönüşümü yapılmaktadır. PSD dönüşümü sonrasında elde edilen güç spektrumunu Şekil 2.19'da gösterilmektedir. Grafik ilişkisinden, hasar frekansı ve harmoniklerinin diğer frekans bileşenlerine göre genliklerinin daha yüksek hale geldiği net olarak görülmektedir.



Şekil 2. 19 PSD dönüşümü sonrası güç spektrumu

Sınıflandırma işlemi için sırasında giriş verisi olarak seçilen frekanslar ve genlikleri Şekil 2.20’de gösterilmektedir.



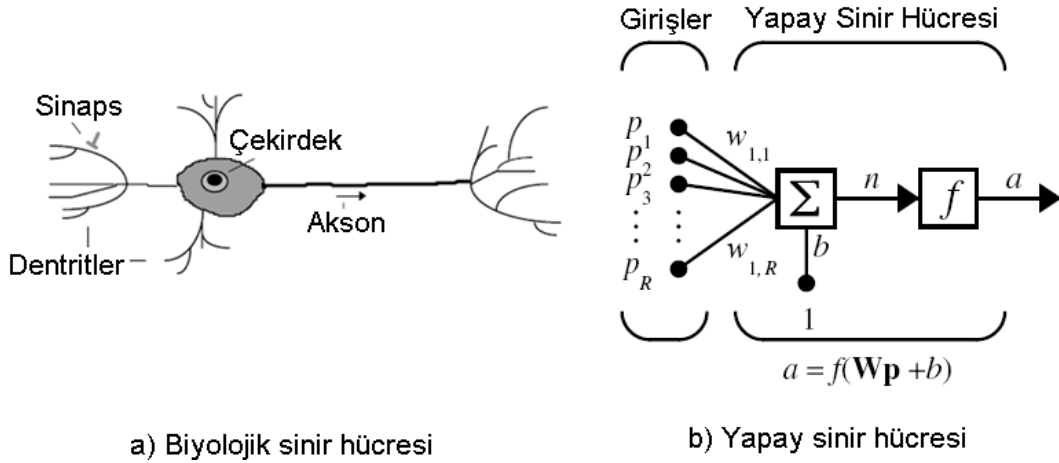
Şekil 2. 20 Sınıflandırma için seçilen arıza frekansı ve harmonikleri

2.4. Yapay sinir ağları (YSA)

YSA'lar, belirli katsayılar ile ağırlıklandırılarak birbirlerine bağlanmış birçok işlem biriminden (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem birimi, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem birimi, diğer nöronlardan sinyalleri alıp; bunları birleştirip, dönüştürmekte ve sayısal bir sonuç ortaya çıkarmaktadır. Genelde, işlem birimleri kabaca gerçek nöronlara karşılık gelir ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır. YSA'ların davranışları temel olarak girdi verisinin çıktı verisine ilişkilendirme biçiminden, nöronların transfer fonksiyonlarından, birbirlerine nasıl bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenmektedir [110].

2.4.1. Yapay sinir ağı hücresi(Perceptron)

Tek katmandan oluşan ve basit bir aktivasyon fonksiyonuna sahip yapay sinir ağı hücresine perseptron (perceptron) adı verilmektedir. Temel bir yapay sinir ağı hücresi biyolojik sinir hücresine göre çok daha basit bir yapıya sahiptir. Şekil 2.21(a)'da biyolojik sinir hücresinin en temel nöron modeli Şekil 2.21(b)'de gösterilmektedir [111].



Şekil 2. 21 Biyolojik ve yapay sinir hücreleri [112]

Bir yapay sinir ağı hücresinde temel olarak, Şekil 2.21'de gösterildiği gibi, dış ortamdan ya da diğer nöronlardan alınan veriler yani girişler (p), ağırlıklar (w), toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu (f) ve çıkışlar (a) yer almaktadır. Dış ortamdan alınan veriler, ağırlıklar aracılığıyla nörona bağlanır ve bu ağırlıklar ilgili girişin etkisini

belirler. Toplam fonksiyonu ise net (n) girişi hesaplar. Net (n) giriş, girişlerle ilgili ağırlıkların çarpımı ile eşik değerinin (b) toplamından oluşur. Aktivasyon fonksiyonu (f) işlem süresince net çıkışı hesaplar ve bu işlem aynı zamanda nöron çıkışı (a) verir. Genelde aktivasyon fonksiyonu doğrusal olmayan (nonlinear) bir fonksiyondur. Şekil 2.21 (b)' de görülen b (eşik) bir sabittir ve aktivasyon fonksiyonunun eşik değeri olarak adlandırılır.

Ağın giriş sayısı R ile aktivasyon fonksiyonu f ile ve ağın çıkışı da a ile gösterilirse;

$$a = f (\mathbf{Wp} + \mathbf{b}) \quad (2.17)$$

Burada;

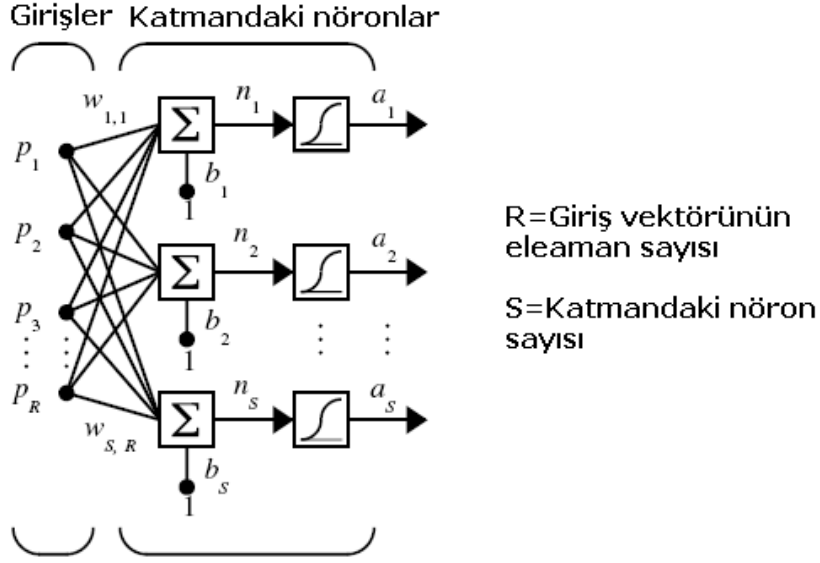
$\mathbf{W} = w^1, w^2, w^3, \dots, w^R$ ağırlık matrisi,

$\mathbf{p} = p^1, p^2, p^3, \dots, p^R$ girişler vektörü,

$\mathbf{b} = b^1, b^2, b^3, \dots, b^R$ eşik vektörüdür.

2.4.2. Yapay sinir ağı mimarisi

En basit ve en genel yapay sinir ağları, tek yönlü sinyal akışını kullanırlar. İleri beslemeli yapay sinir ağlarında gecikmeler yoktur, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Çıkış değerleri, öğreticiden alınan arzu edilen çıkış değeriyle karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilerek ağ ağırlıkları güncellenir. Şekil 2.22'de ileri beslemeli bir ağ modeli görülmektedir.



Şekil 2. 22 İleri beslemeli bir YSA modeli [112]

2.4.2.1 Çok katmanlı perseptron (Multi Layer Perceptron - MLP)

Çok katmanlı perseptron ağı çeşitli sayıda yapay sinir ağı hücresi (nöron) bulunan bir YSA mimarisidir. MLP’de bulunan her YSA hücresi kendi giriş (x) toplamını hesaplamaktadır. YSA hücresi çıkışının değerlendirilmesi için giriş toplamı ve eşik değeri bir aktivasyon fonksiyonundan (f) geçirilmektedir. YSA çıkışı (a) matris formunda (2.18)’deki gibi gösterilebilir;

$$a = f^2(\mathbf{W}^1 f^1(\mathbf{W}^1 \mathbf{p} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2) \quad (2.18)$$

Burada $\mathbf{W}_{(i,j)}$ ağırlık matrislerinin dizisidir.

$$(\mathbf{W}^1 = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,S_0} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & w_{2,S_0} \\ w_{S_1,1} & w_{S_1,2} & \dots & w_{S_1,S_0} \end{bmatrix}, \mathbf{W}^2 = [w_{1,1} \ w_{1,2} \dots \ w_{1,S_1}]),$$

$b_{(i)}$ eşik vektörüdür ($b_1 = [b_1 \ b_2 \dots \ b_{S_1}]^T, b_2 = [b_1]$).

Aktivasyon fonksiyonu (f) uygulamaya göre logaritmik veya doğrusal olabilir (f^1 logaritmik, f^2 doğrusal).

$(W_{(i,j)})$ gösteriminde giriş (i)'ye ve çıkış (j)'ye karşılık gelmektedir. Üst simgeler katman sayısını temsil etmektedir. MLP ağları verilen girişlere karşılık hedef çıkışları verebilmesi için geri yayılım yöntemi ile eğitilmektedir [111, 113].

2.4.2.2. Hata geri yayılım öğrenme algoritması

Hata geri yayılım öğrenme algoritması ileri beslemeli çok katmanlı ağların eğitilmesi için kullanılan en genel algoritmadır.

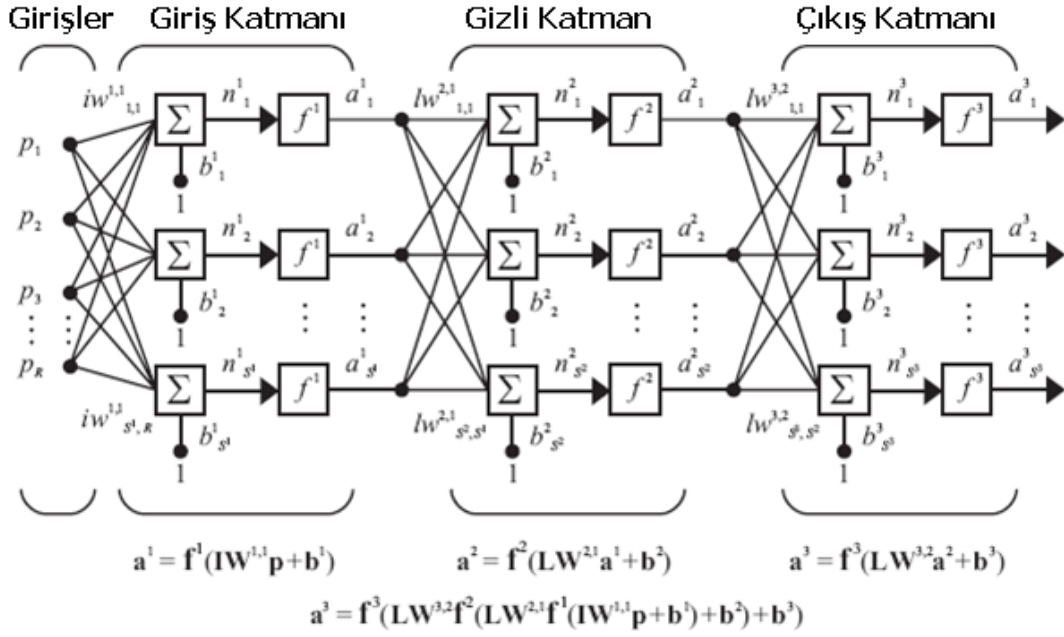
Öğrenme fazında, giriş örnekleri ağa belirli bir sırada sunulur. Her bir çalışma örneği çıktı örneği hesaplanana kadar katman katman ileri yayılır. Hesaplanan çıktı daha sonra hedef çıktı ile karşılaştırılarak hata sinyali bulunur. Hata $e(k)$, arzu edilen ($t(k)$) çıkışı ile sinir ağının çıkışı ($a(k)$) arasındaki farktır.

$$e(k) = t(k) - a(k) \quad (2.19)$$

Hatalar, katman katman sinaptik ayarlamaların yapıldığı geri besleme bağlantılarına 'girdiler' olarak sunulmaktadır.

Geri yayılım öğrenme algoritması ile çıkış katmanından başlayıp kendinden önceki katmanların hataları kullanılarak geriye doğru ilk gizli katmana kadar sırayla katman ağırlık düzeltmeleri yapılır. Belirlenen ve 'toplam hata' en aza indirilinceye kadar bu işlemler tekrarlanır an çalışma süresi içinde 'toplam hata' en aza indirilinceye kadar bu işlemler tekrarlanır [114].

Şekil 2.23'de birçok sinir hücresinin bir birine bağlandığı ileri yönlü çok katmanlı bir yapay sinir ağı görülmektedir [115]. Giriş katmanı ile çıkış katmanı arasındaki katman veya katmanlar gizli katman olarak adlandırılır. Sinir ağlarında kaç tane gizli katman kullanılacağı ve her bir gizli katmanda kaç nöronun yer alacağı probleme ya da modele göre değişen ve deneme-yanılma yoluyla bulunan niceliklerdir.



Şekil 2. 23 İleri beslemeli çok katmanlı sinir ağı [112]

Şekil 2.23'deki çok katmanlı ağı düşünürsek ağın eğitilmesi 4 adımda gerçekleşir;

1) İleri Yön Değerleri Hesaplanır;

$$\begin{aligned}
 a^0 &= p && ; \text{giriş katmanı için} \\
 a^{m+1} &= f^{m+1}(W^{m+1}a^m) && ; m=1,2, \dots, M-1 \\
 a^0 &= a^M && ; \text{çıkış katmanı için}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Burada k=giriş sayısı, m=katman sayısıdır.

2) Hata bulunur;

$$e = t - a$$

Burada t hedef çıkış ve a ağın çıkışıdır.

3) Hatanın Geriye Yayılması;

$$s^M = -2F^M(n^M)e \quad ; \text{çıkış katmanı için} \tag{2.21}$$

$$s^m = F^m(n^m)(w^{m+1})^T s^{m+1} \quad ; m=M-1, \dots, 1 \tag{2.22}$$

Burada s 'ler her bir katmanın duyarlılık değerleridir. F 'ler her bir katman için aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F^M(n^M) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f^m(n_1^m)}{(n_1^m)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial f^m(n_2^m)}{(n_2^m)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f^m(n_s^m)}{(n_s^m)} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

4) Ağırlıklar ayarlanır;

$$\mathbf{W}^m(k+1) = \mathbf{W}^m(k) - \alpha s^M (a^{M-1})^T \quad (2.24)$$

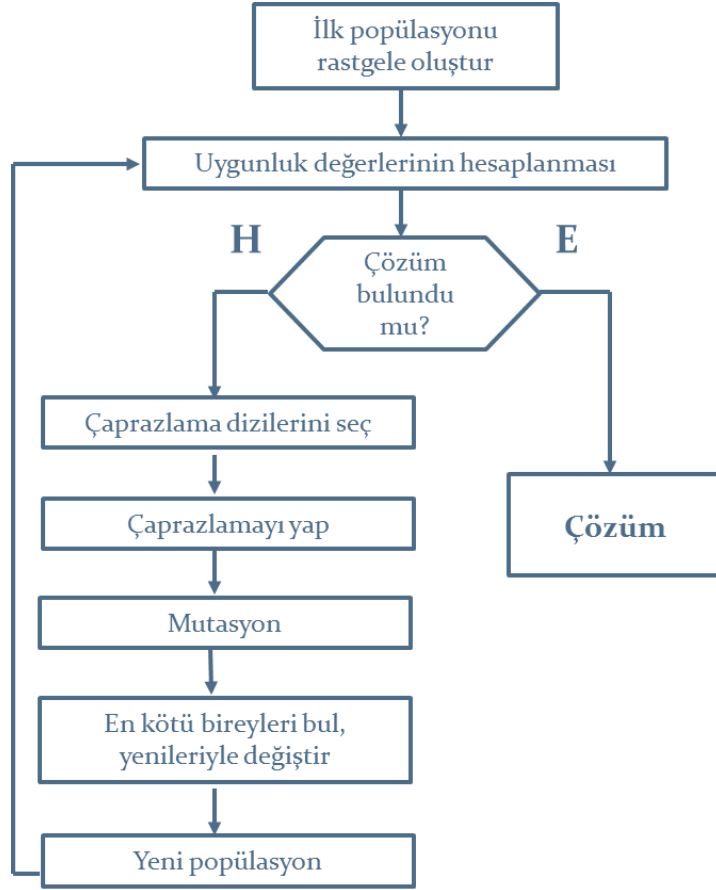
Burada α öğrenme oranıdır ve 0 ile 1 arasında bir değerdir. Tüm öğrenme algoritmalarında şu adımlar izlenir. İlk önce (2.20) kullanılarak giriş ileri yönde yayılır, sonra (2.21) kullanılarak geri yönde katman ağırlık düzeltmeleri yapılır ve son olarak ağırlıklar (2.24) kullanılarak güncellenir [111].

2.5. Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), doğal seçim ilkelerine dayanan ve temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmış bir optimizasyon yöntemidir. GA, canlıların **en iyi olan yaşar** prensibini örnek alarak iyi bireylerin kendi yaşamlarını muhafaza edip kötü bireylerin yok olmasına dayanmaktadır. Kısaca GA, rastlantısal arama teknikleri kullanarak çözüm bulmaya çalışan, parametre kodlama esasına dayanan sezgisel bir arama tekniğidir [116].

Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre farklılıkları olan genetik algoritma, olasılık kurallarına göre çalışır ve parametre kümesini değil kodlanmış biçimlerini kullanarak yalnızca uygunluk fonksiyonuna gereksinim duyar. GA bir grup üzerinde çözümü arar ve bu sayede çok sayıda çözümün içinden en iyiyi seçer. Optimizasyon sırasında çözüm uzayının tamamı değil belirli bir kısmı taranarak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşılmaktadır [117]. GA'nın diğer bir üstünlüğü de, çözümlerden oluşan popülasyonu eş zamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel en iyi çözümlere takılmadan global en iyi çözümleri bulmalarıdır.

Pek çok GA uygulamasında Simple Genetic Algorithm (SGA) modeli kullanılır. SGA, D. E. Goldberg tarafından tanımlanmıştır ve diğer ardışık genetik algoritma türleri için referans oluşturan bir algoritmadır [11]. SGA'ya ait akış diyagramı Şekil 2.24'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 24 Genetik algoritma akış diyagramı

Genel olarak GA, çözüm bilgisinin hiç olmadığı veya çok az olduğu bir duruma aramaya başlar. Çözüm çevreden gelen etkileşime ve genetik operatörlere bağlıdır. GA, aramaya paralel bir şekilde, birbirinden bağımsız noktalardan başlar. Bu nedenle, GA'nın alt optimal çözümlere takılma olasılığı azdır ve birden çok alt çözüm kümesi olan karmaşık arama problemleri için en iyi optimizasyon tekniği olarak bilinir. GA'yı diğer optimal arama algoritma türlerinden farklı kılan özellikleri şunlardır:

- GA, parametre kodlarıyla uğraşır, parametrelerin kendileriyle doğrudan ilgilenmez.
- GA, tek bir alana bağımlı kalarak çözüm aramaz. Yığının tamamında çözüm arar.
- GA, ne yaptığını değil nasıl yapıldığını bilir. Yani GA amaç işlevini kullanır, sapma değerleri veya diğer hata faktörlerini kullanmaz.

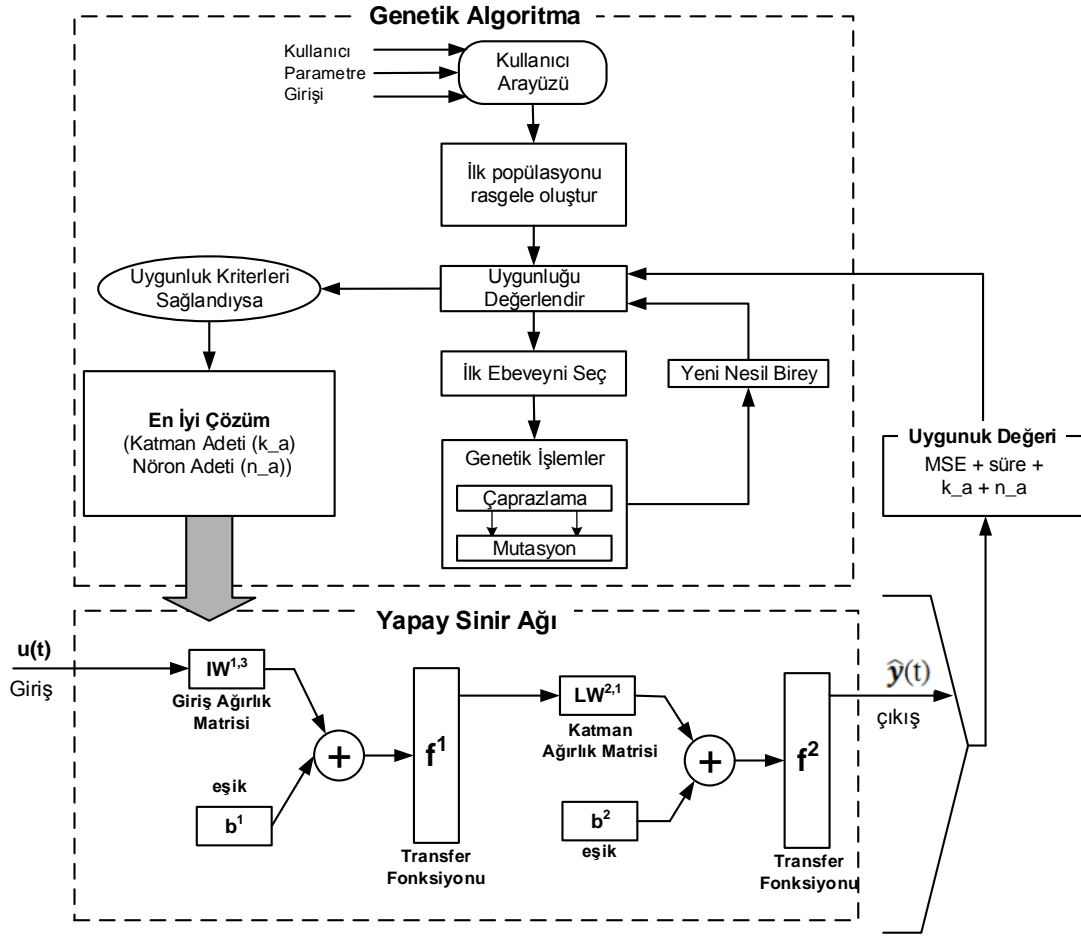
- GA' nın uygulanmasında kullanılan operatörler rastlantısal yöntemlere dayanır, belirli ve kesin yöntem kullanmaz.

2.6. GA ile YSA optimizasyonu (GA-YSA)

GA araştırmalarının önemli bir bölümü fonksiyon optimizasyonu ile ilgilidir. GA, geleneksel optimizasyon tekniklerine göre zor, süreksiz ve gürültü içeren fonksiyonları çözmeye daha etkindir. Optimize edilecek uygunluk fonksiyonunun süreksiz olması halinde, süreksizlik noktalarında fonksiyonun türevi alınamayacağından, türev almaya dayalı optimizasyon yöntemleri kullanılamamaktadır. Oysa GA, problemlerin çözümü için türev veya diğeryardımcı bilgilere gereksinim duymadığından özellikle bu tip problemlerin çözümünde geleneksel yöntemlere göre önemli bir üstünlük sağlamaktadır [118].

YSA'nın performansı artırılmaya çalışılırken farklı katmanlarda ve her katmanda farklı nöron sayıları denenerek YSA çıkışı ile hedef çıkış arasındaki farkı minimize eden YSA mimarisi tercih edilmektedir. Bu durum farklı kombinasyonların oluşmasına ve ihtimallerin artmasına sebep olmaktadır. Ancak eğitilen YSA'ların mimarisinde her nöron aynı oranda çıkışı etkilememektedir. Bu sebeple eğitim sonunda elde edilen YSA'nın yapısında sırasıyla nöronlar kopartılmakta ve çıkışın değışip değışmediğı kontrol edilmektedir. Böylece hızlı cevap veren optimum bir ağı mimarisi gerçekleştirilmektedir [119].

GA tabanlı/ayarlı YSA optimizasyon algoritması Şekil 2.25'de gösterilmiştir. GA tabanlı YSA mimarisi optimize edilirken ilk olarak rastgele oluşturulan farklı mimarideki YSA'lar sırasıyla eğitilmekte ve her YSA'nın çıkışı değıerlendirilmekte ve uygunluk fonksiyonuna göre hesaplamalar yapılmaktadır. İstenilen uygunluk değıeri elde edilmemişse, popülasyondaki bireylerden yeni bir nesil üretmek için ebeveyn bireyler seçilir ve sırasıyla GA operatörleri çalıştırılarak yeni bir popülasyon üretilir. Üretilen popülasyondaki her birey, farklı bir YSA yapısını temsil etmektedir ve GA döngüsü istenilen YSA çıkış değıerini verene kadar devam etmektedir [120].



Şekil 2. 25 GA – YSA algoritması

2.6.1. Kullanılan genetik operatörler

GA’ da temel olarak kodlama, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi genetik operatörler kullanılmaktadır. GA ile YSA optimizasyonu sırasında seçilen genetik operatörler değerleri şu şekildedir.

- ✓ Kodlama: YSA mimarisi çift vektör yöntemi ile kodlanarak popülasyondaki bireyleri oluşturmaktadır.
- ✓ Popülasyon büyüklüğü: Farklı deneyler sonucunda en uygun popülasyon büyüklüğü 15 olarak seçilmiştir.
- ✓ Çaprazlama: Dağılık çaprazlama operatörü kullanılmış ve çaprazlama kesir değeri 0.8 olarak alınmıştır.
- ✓ Mutasyon: Adaptif uygulanabilir mutasyon operatörü kullanılmıştır.

- ✓ Üreme: Popülasyondaki en iyi bireylerin seçilip değişikliğe uğramadan bir sonraki kuşağa aktarıldığı elit modele dayalı bütünüyle yer değiştirme üreme operatörü kullanılmıştır. Elit model, en uygun birey kromozomlarının seçim etkisi ile sonraki jenerasyonlara aktarılmadan yok edilmesinin önüne geçilmesini sağlar. Elit birey seçim değeri 2 olarak alınmıştır.
- ✓ Seçim: Seçim operatörü için turnuva yöntemi kullanılmıştır. Turnuva yöntemi rasgele seçilen 4 bireyin uygunluk değeri düşük olanının bir sonraki kuşağa geçişi engellenmiştir. Böylece daha iyi performansa ve daha kısa sürede cevap veren YSA mimarisine ulaşılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde silindirik bilyeli rulman bilezikleri üzerinde çeşitli boyutlarda yapay kusurlar oluşturularak yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sinyal ölçümleri sunulmuştur. Çeşitli yapay hasarlı rulmanlar farklı yük ve devirlerde çalıştırılmaları sırasında, arıza verilerinin değişimleri incelenmiştir. Ardından, elde edilen sinyal özelliklerinin GA-YSA ile sınıflandırılması gerçekleştirilerek arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada, öncelikle rulmanın arızalı olup olmadığı tespit edilmiş ve arıza durumunda rulmanın hangi bölgesinde ve hangi seviyede olduğu tespit edilmiştir.

3.1 Deneilerin Yapılandırılması ve Veri Toplama

Farklı büyüklüklerde oluşturulan arızalarla ilgili yapılan deneyler listesi Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Her birinden 3 adet olacak şekilde iç bilezik ve dış bilezik arızalı rulman seti ve her birinden 1 adet olmak üzere sağlam iç ve dış bilezikli rulman olmak üzere toplam sekiz adet rulman üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Deney düzeneğinde iki farklı yük ve sekiz farklı devirde deneyler yapılmıştır. GA-YSA’nın eğitiminde kullanılmak üzere yeterli sayıda veri elde edebilmek için her deney üç defa tekrar edilmiştir. Toplamda $8 \times 3 \times 8 \times 3 = 576$ deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen titreşim ve ses verilerinin zaman ve frekans düzlemlerindeki grafik sayısının çok fazla olması sebebiyle her bir deneyden elde edilen grafiklerin gösterimi yerine grafik yorumlarını etkilemeyecek şekilde grafik sayıları azaltılmıştır. Bu sebeple 200 kg ve 400 kg yükte yapılan deneyler grafiksel olarak yorumlanmıştır. Frekans düzleminde ise hız deneylerinden ilk, son ve orta hız kademesinde elde edilen verilerin grafikleri gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Tablo 3. 1 Yapılan deneylerin sınıflandırılması

Rulman Arızası	Yük (kg)	Hız (d/dk)	Deney Sayısı
İç Normal	200	1000	Deney 1
İç 03x03 Tek	300	1500	Deney 2
İç 03x02 Çift	400	2000	Deney 3
İç 05x05 Tek		2500	
Dış Normal		3000	
Dış 03x03 Tek		3500	
Dış 03x02 Çift		4000	
Dış 05x05 Tek		4500	

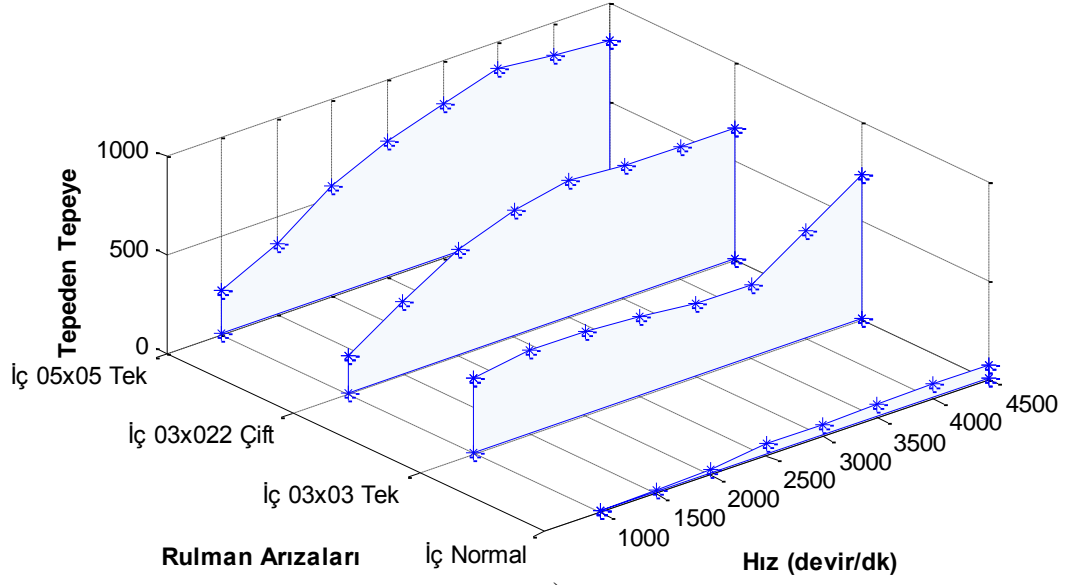
Rulman test deney düzeneğinin Tablo 2.2’de belirtilen yapay arızalı rulmanlarla çalıştırıldığında toplanan titreşim ve ses verilerinin Zarf analizi ve PSD dönüşümü sonrasında elde edilen zaman ve frekans analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak göstermek için üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Yatay eksenlerde hız ve rulman arızaları, dikey eksenlerde ilgili istatistiksel değer gösterilmiştir. Grafikler sayesinde hızın değişimiyle istatistiksel özelliklerin rulman arızalarına göre karşılaştırmalı sonuçları elde edilmiştir. Şekillerin ilk bölümlerinde 200 kg yükte elde edilen verilerin istatistiksel değerleri ve ikinci bölümünde ise 400 kg yükte elde edilen istatistiksel değerleri gösterilmiştir. Böylece yükün değişimiyle değerlerin nasıl değiştiği karşılaştırılmaktadır.

Frekans bileşenlerini incelemek için verilen şekillerde aynı yük ve hızda yan yana karşılaştırmalı olarak yorumlamak için üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerde yatay iki eksenle rulman arızaları ve frekans değerleri, dikey eksenle ise rulman arızalarının verilen frekanslardaki genlik değerleri gösterilmektedir. Şekillerin ilk bölümünde 200 kg yükte elde edilen frekans bileşenleri ve ikinci bölümünde ise 400kg yükte elde edilen frekans bileşenleri gösterilmektedir.

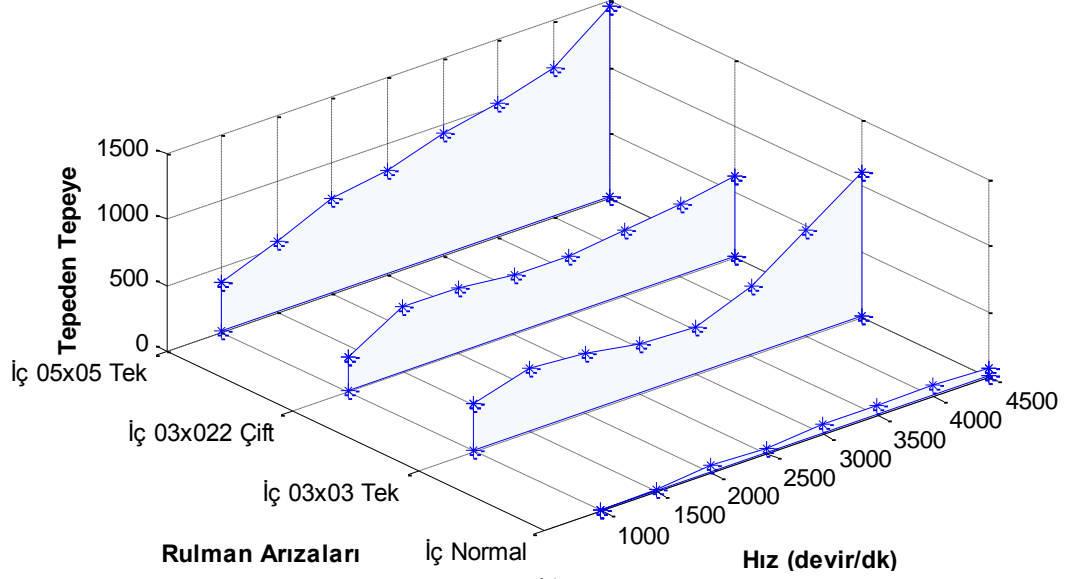
3.2. Titreşim Verileri

3.2.1. Titreşim verisinin zaman düzlemi özellikleri

Elde edilen titreşim verileri zaman düzleminde incelendiğinde; iç bilezik arızalarında devir hızının, hatanın boyutunun ve rulman üzerine uygulanan yükün artmasıyla TT ve RMS değerlerinde artış olduğu Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir. Buna karşın, iç bilezik arızalarında çarpıklık ve basıklık değerlerinde hızın ve uygulanan yükün artmasıyla düşüş olduğu, hatanın boyutunun artmasıyla değerlerin arttığı Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görülmektedir.



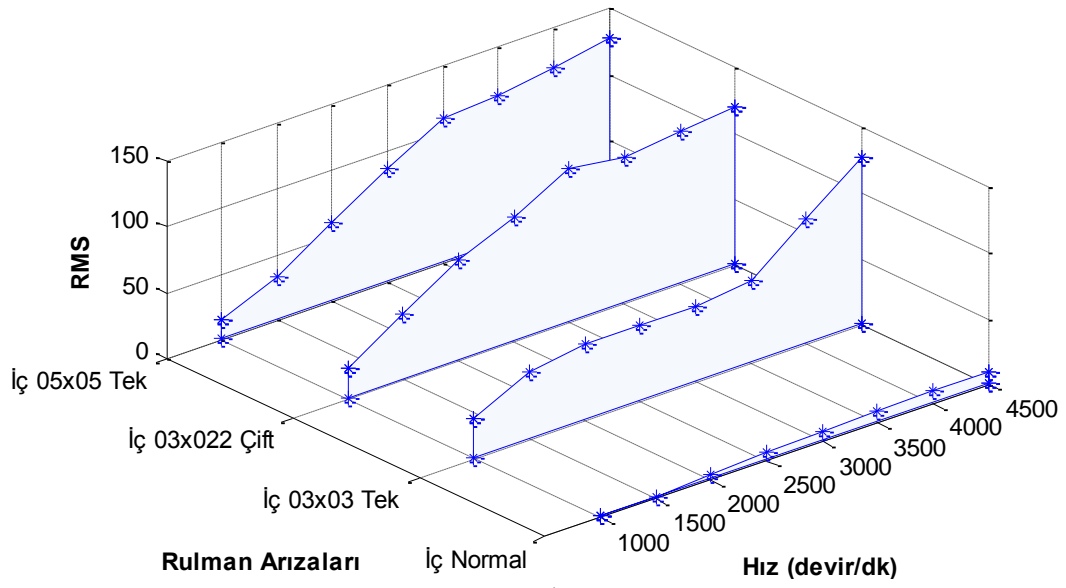
a)



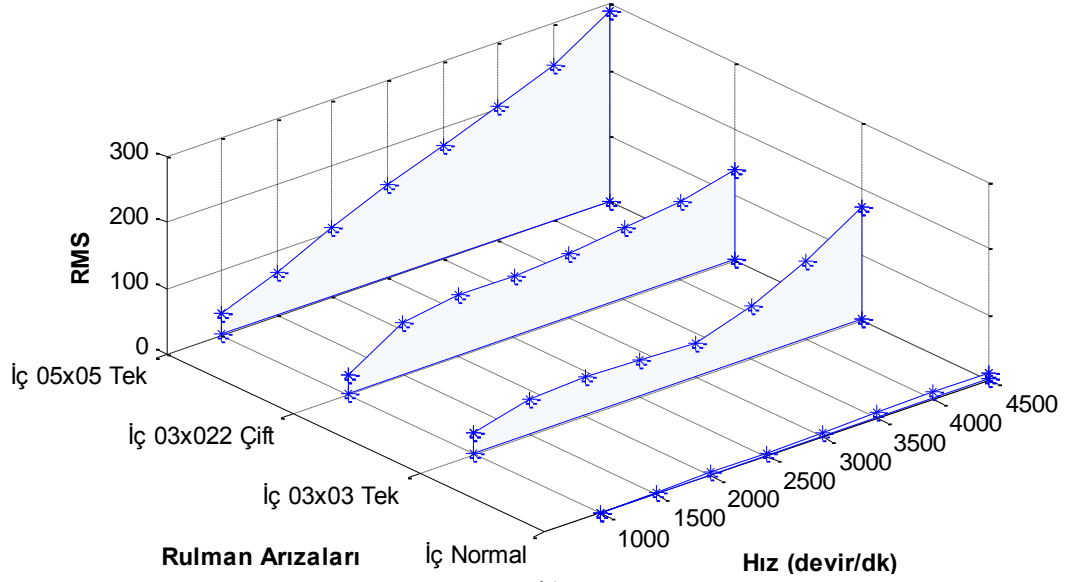
b)

Şekil 3. 1 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin TT değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



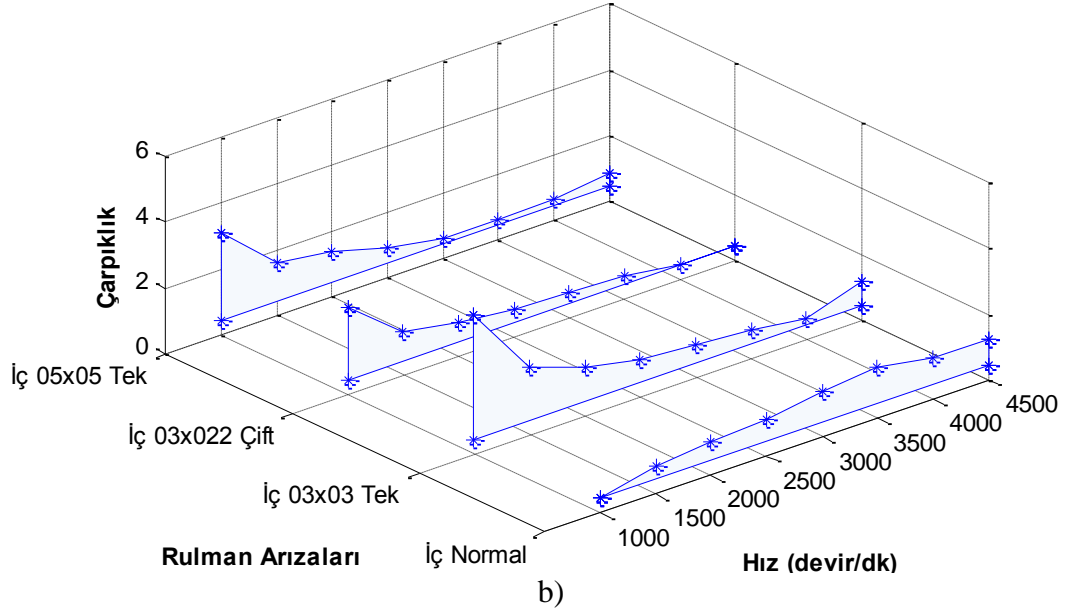
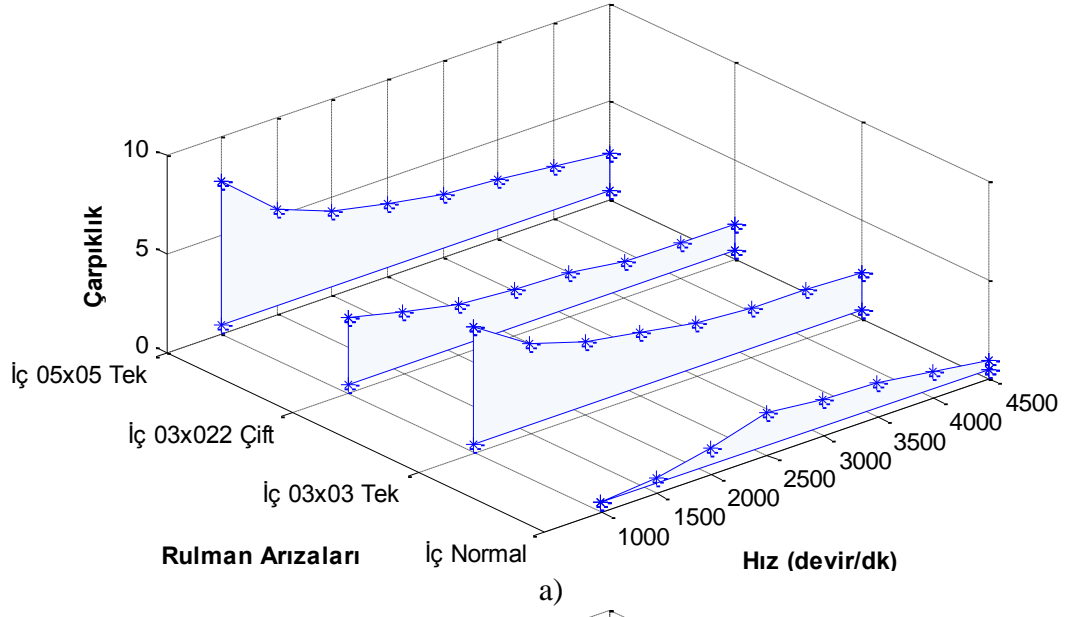
a)



b)

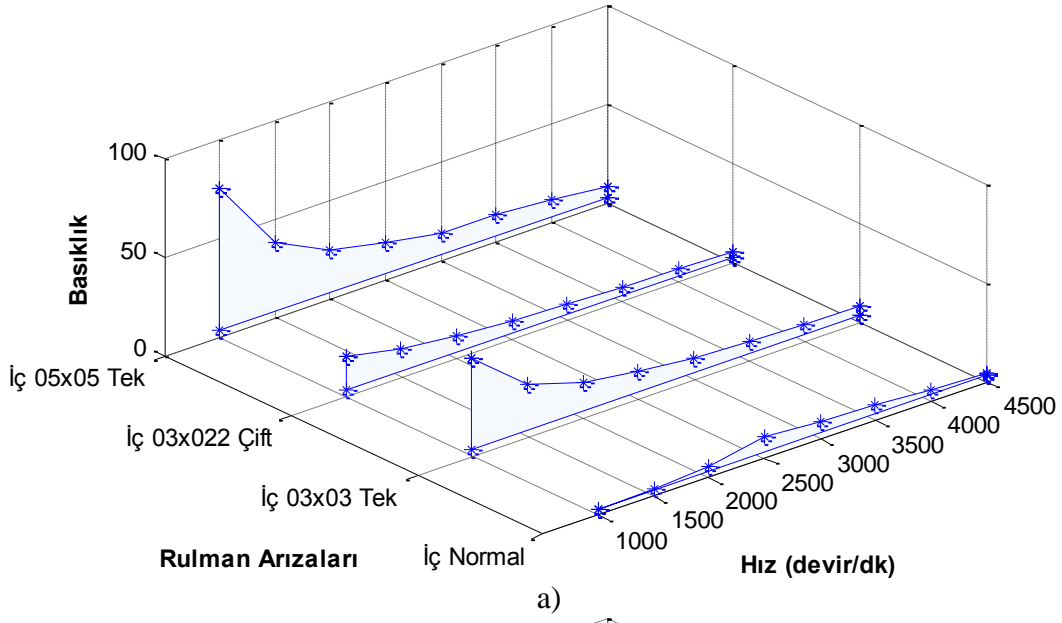
Şekil 3. 2 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin RMS değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

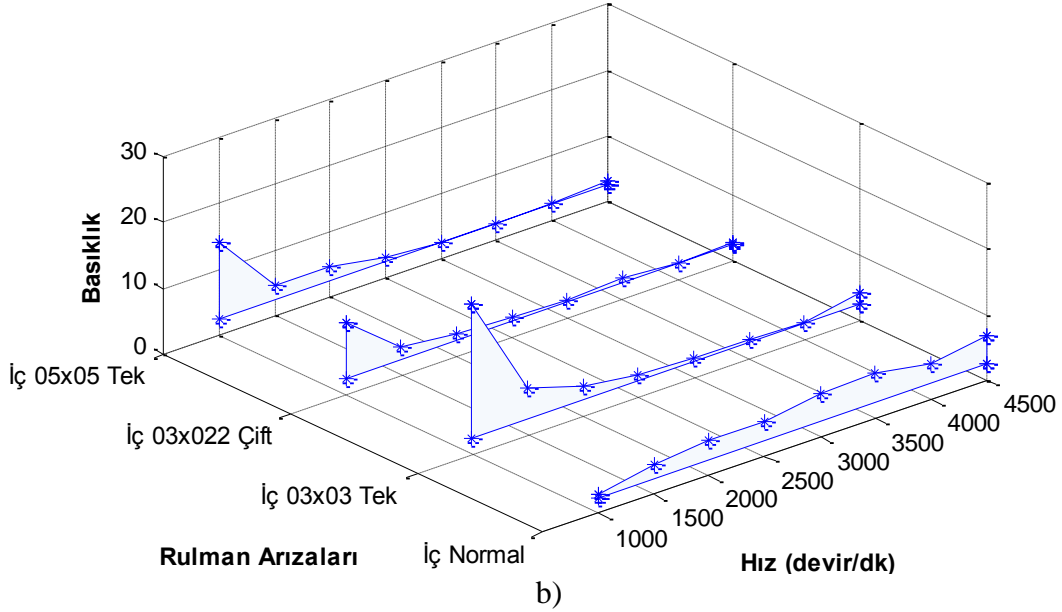


Şekil 3. 3 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin çarpıklık değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



a)



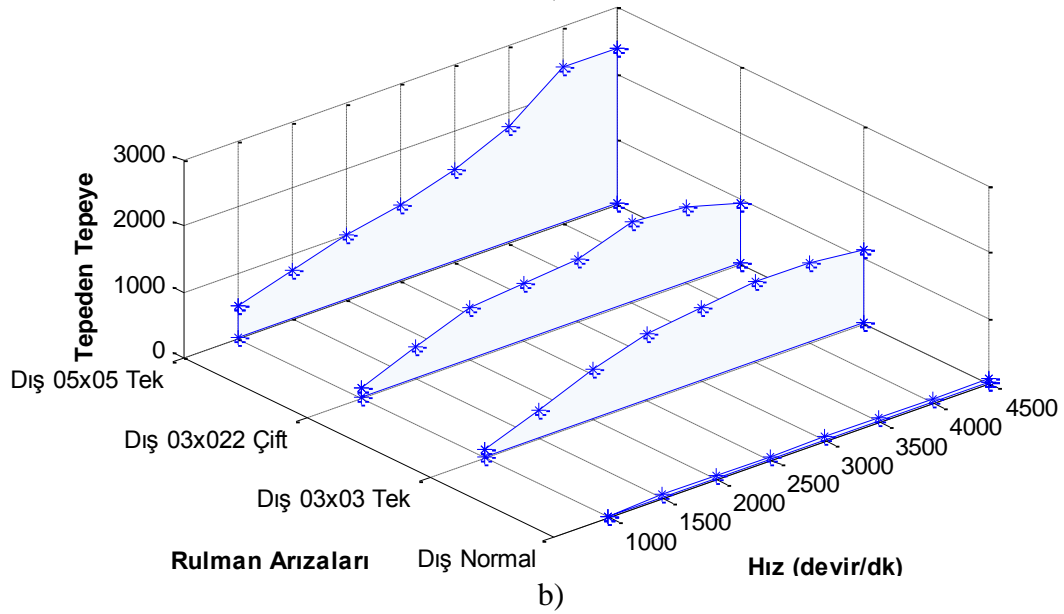
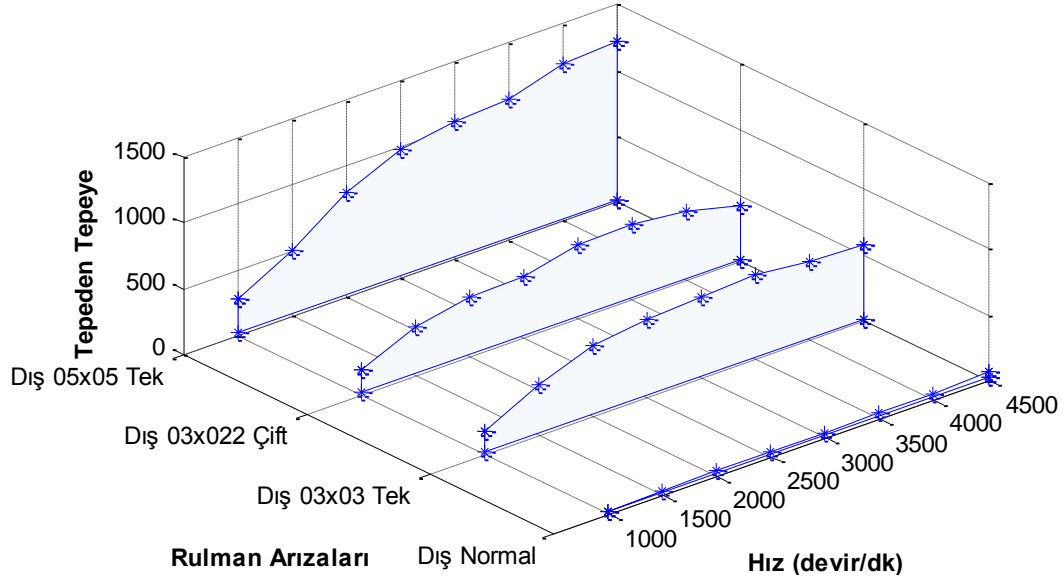
b)

Şekil 3. 4 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin basıklık değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

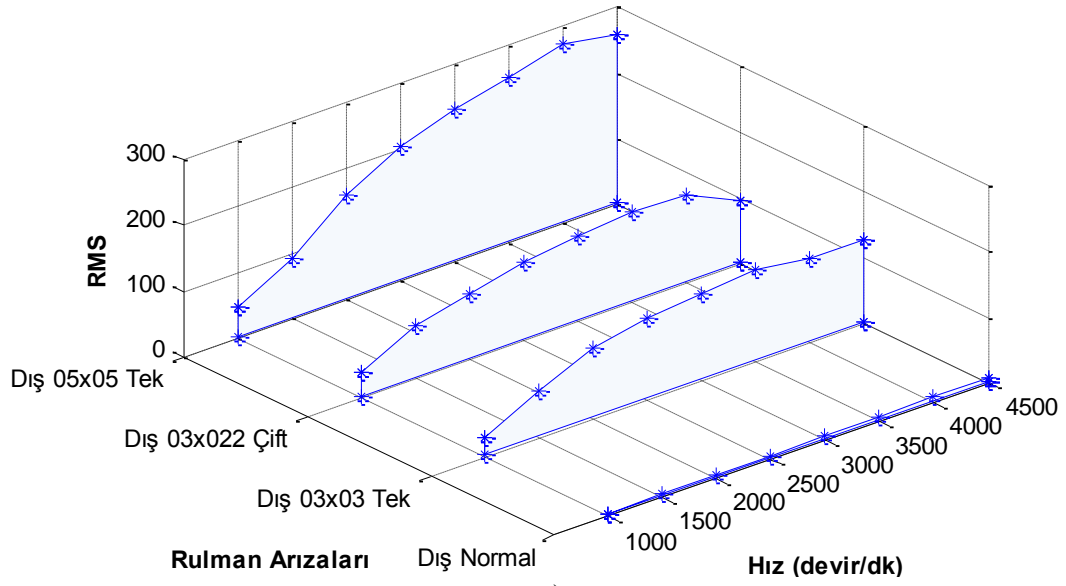
Elde edilen titreşim verileri incelendiğinde, dış bilezik arızalarında iç bilezik arızalarına benzer şekilde sonuçların çıktığı ancak, elde edilen değerlerin iç bileziktekinin yaklaşık iki olduğu gözlenmektedir. Dış bilezik arıza durumlarında devir hızının, hatanın boyutunun ve rulman üzerine uygulanan yükün artmasıyla TT ve RMS değerlerinde artış olduğu Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'de görülmektedir. Buna karşın, dış bilezik arıza durumunda devir hızının ve uygulanan yükün artmasıyla çarpıklık ve

basıklık değerlerinde düşüş olduğu, hata boyutunun artmasıyla değerlerin arttığı Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görülmektedir. Ayrıca, çentik genişliğinin artmasıyla basıklık değerinin büyüdüğü Şekil 3.8’de görülmektedir.

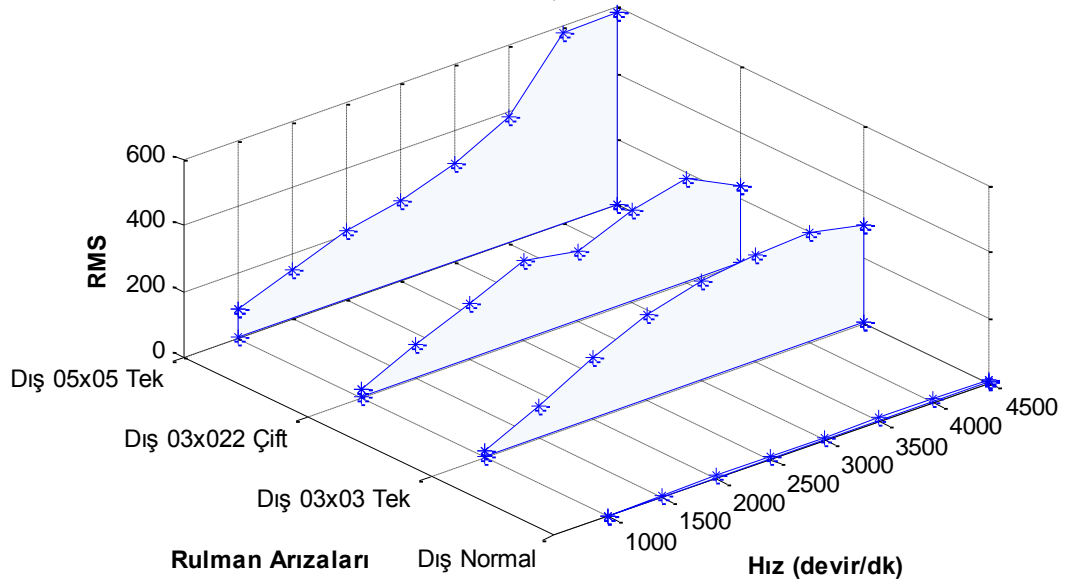


Şekil 3. 5 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin TT değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



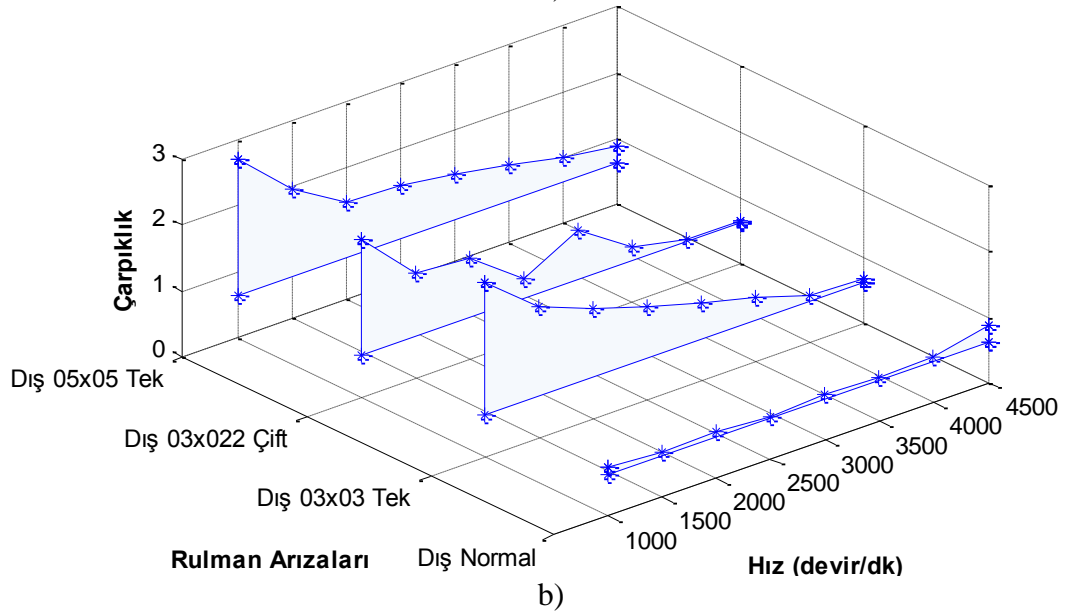
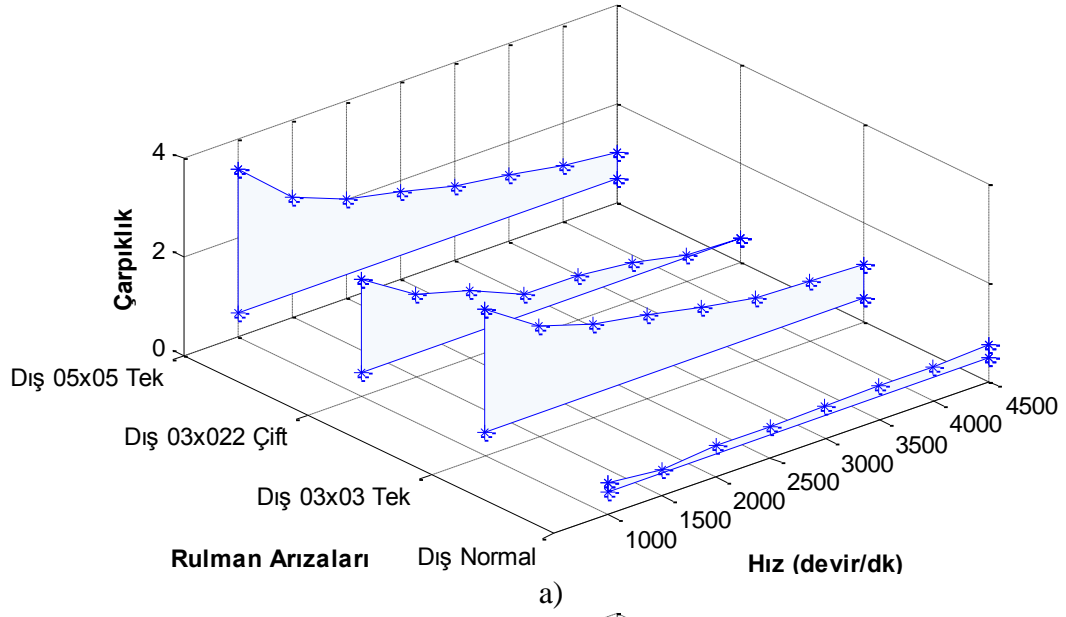
a)



b)

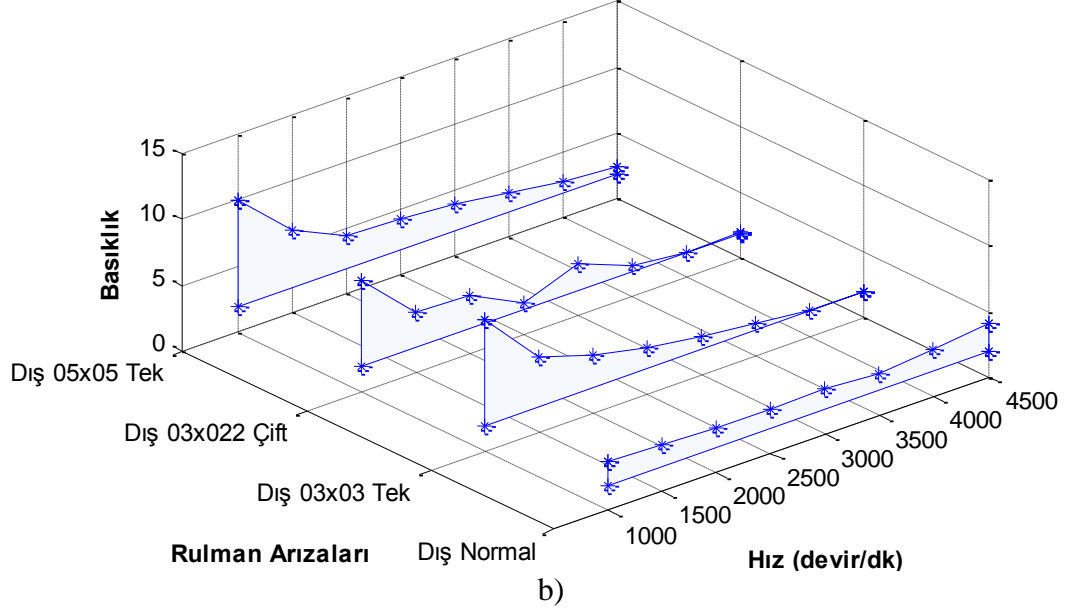
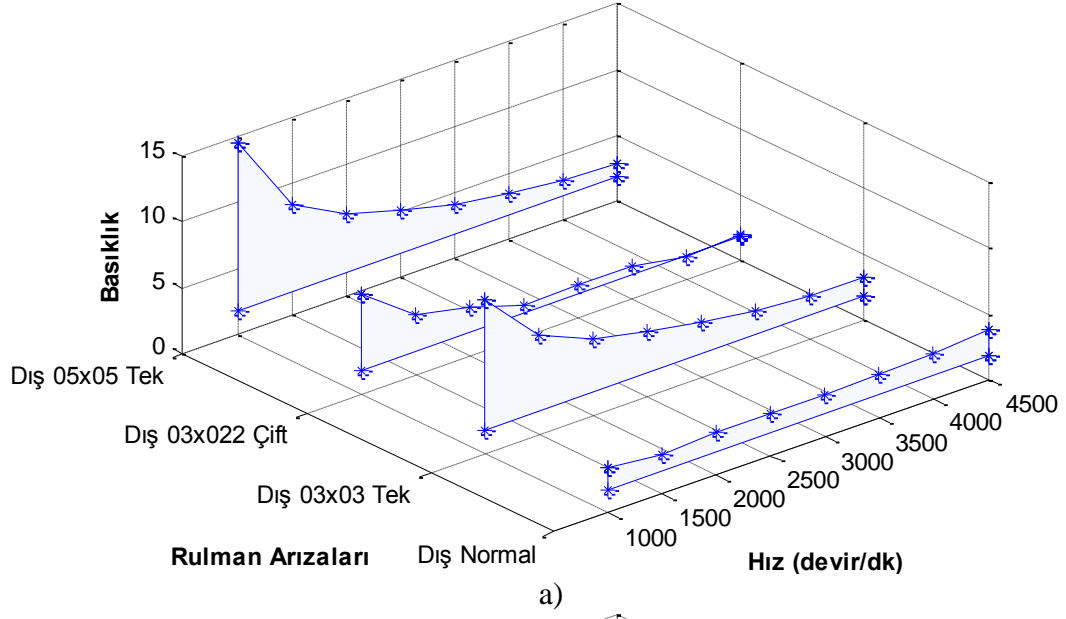
Şekil 3. 6 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin RMS değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



Şekil 3. 7 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin çarpıklık değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



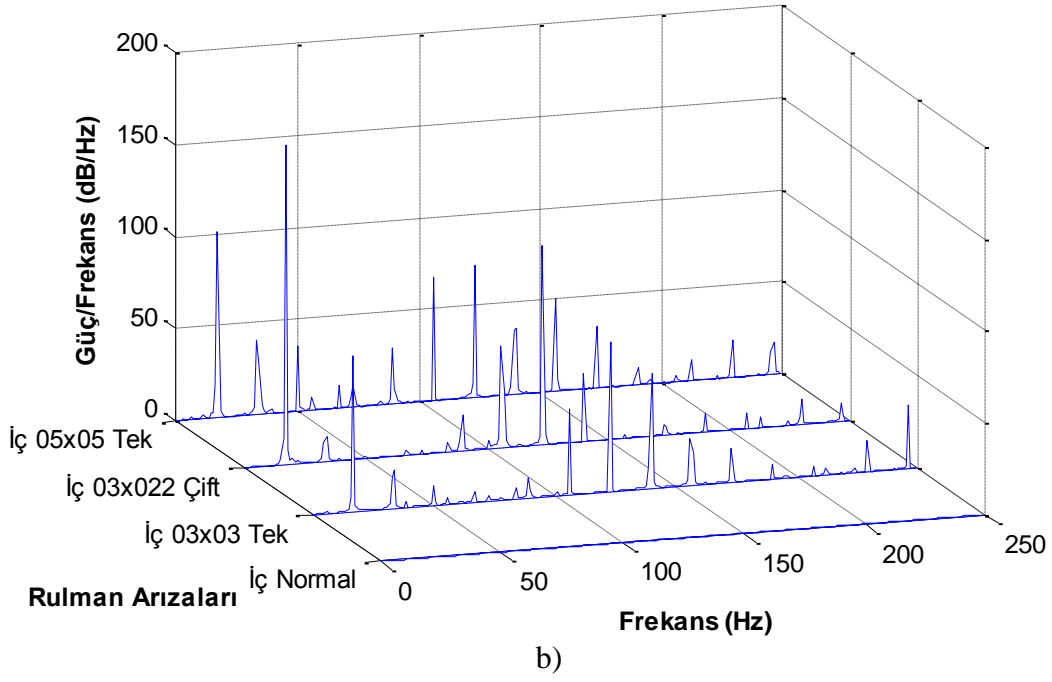
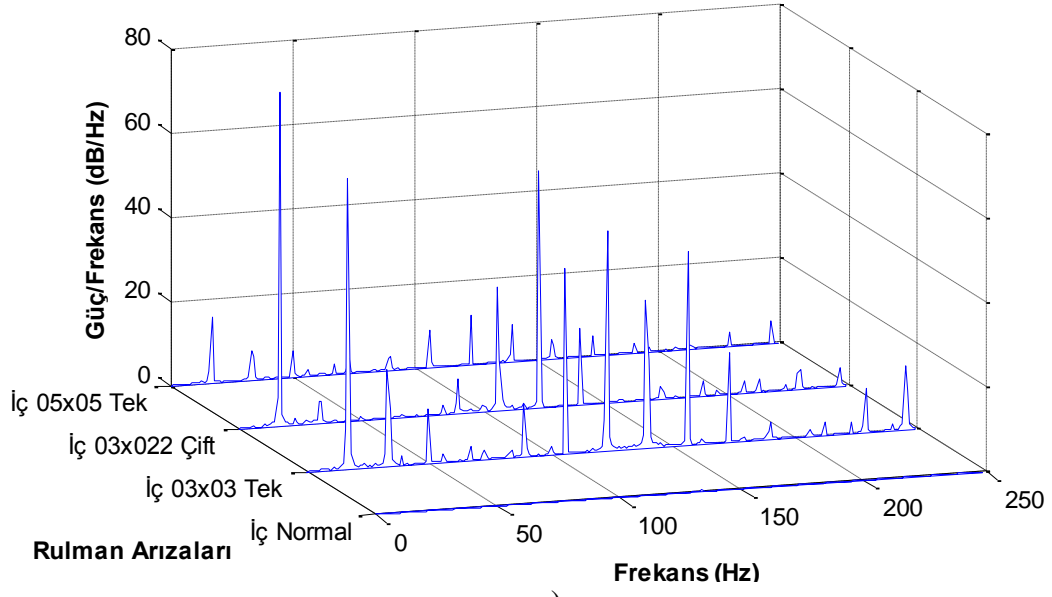
Şekil 3. 8 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı titreşim verisinin basıklık değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

3.2.2. Titreşim verisinin frekans düzlemi özellikleri

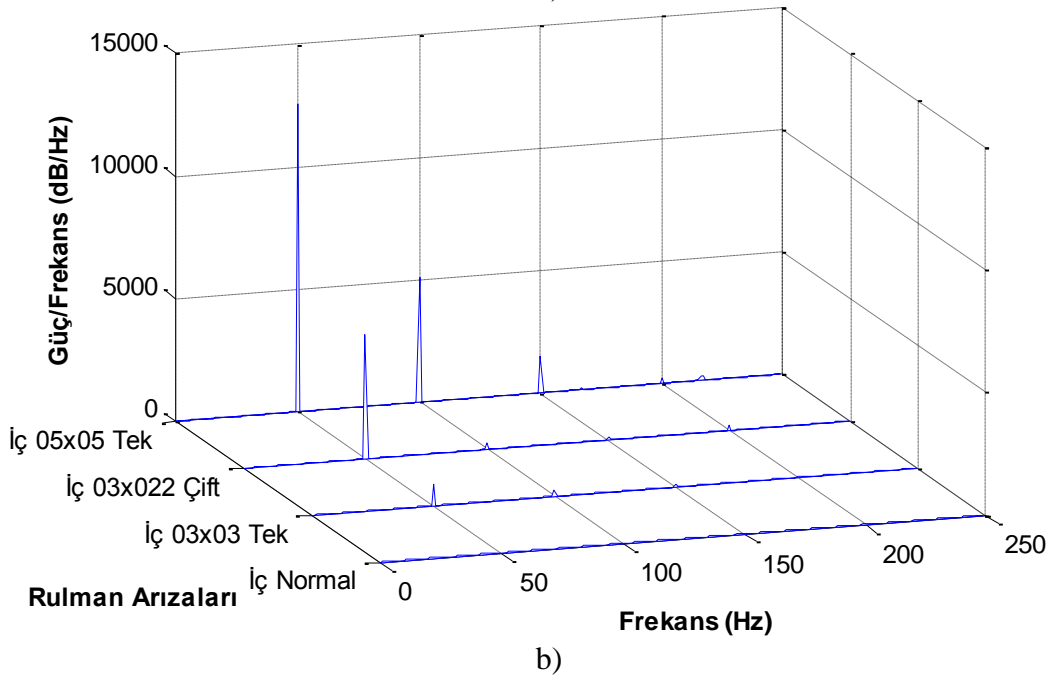
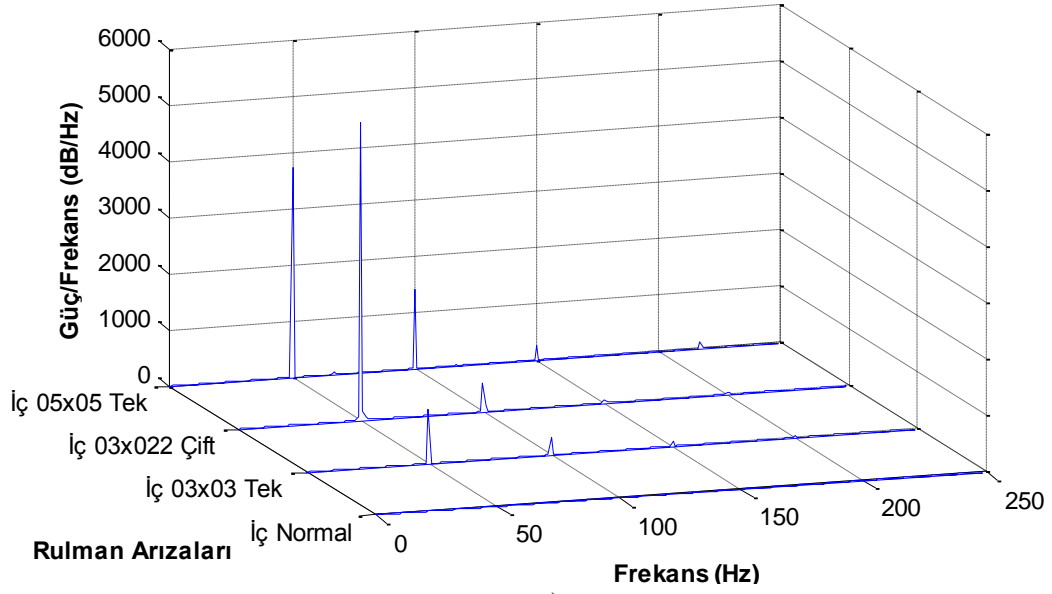
Frekans düzleminde gösterilen şekiller incelendiğinde Tablo 2.3’de verilen karakteristik hata frekanslarının diğer bileşenlere nazaran daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca karakteristik hata frekansının harmoniklerinin de olduğu ve özellikle birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.9’da iç bilezik arızalarının 200 kg ve 400 kg yükte değişimi gösterilmektedir. Rulman üzerine uygulanan yükün artmasıyla karakteristik hata frekanslarının genliklerinin arttığı Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Yükün artmasıyla birlikte hata frekanslarının genliklerinin arttığı ve İç 03x022 Çift rulman arızasının düşük hızlarda diğer arızalara nazaran daha belirgin görünürken hızın artmasıyla tek çentik içeren diğer iki arızalı rulman karakteristik frekansının göreceli olarak daha belirginleştiği Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’den anlaşılmaktadır. Hızın artmasıyla büyük arızalı olan İç 05x05 Tek rulman numunesinin diğerlerine göre daha büyük seyrettiği Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Ayrıca yük ve hızın artmasıyla karakteristik hata frekans harmonikleri genliklerinin karakteristik hata frekans genliğine göre azaldığı ve ikincil harmoniklerden itibaren genliğin azaldığı anlaşılmaktadır.



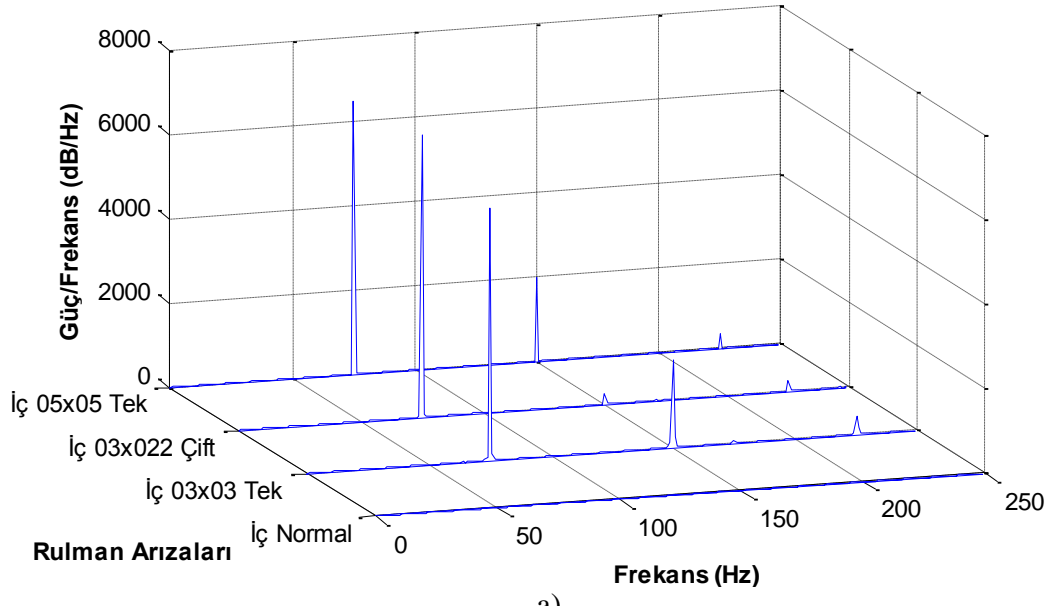
Şekil 3. 9 1000 d/dk hızında iç bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

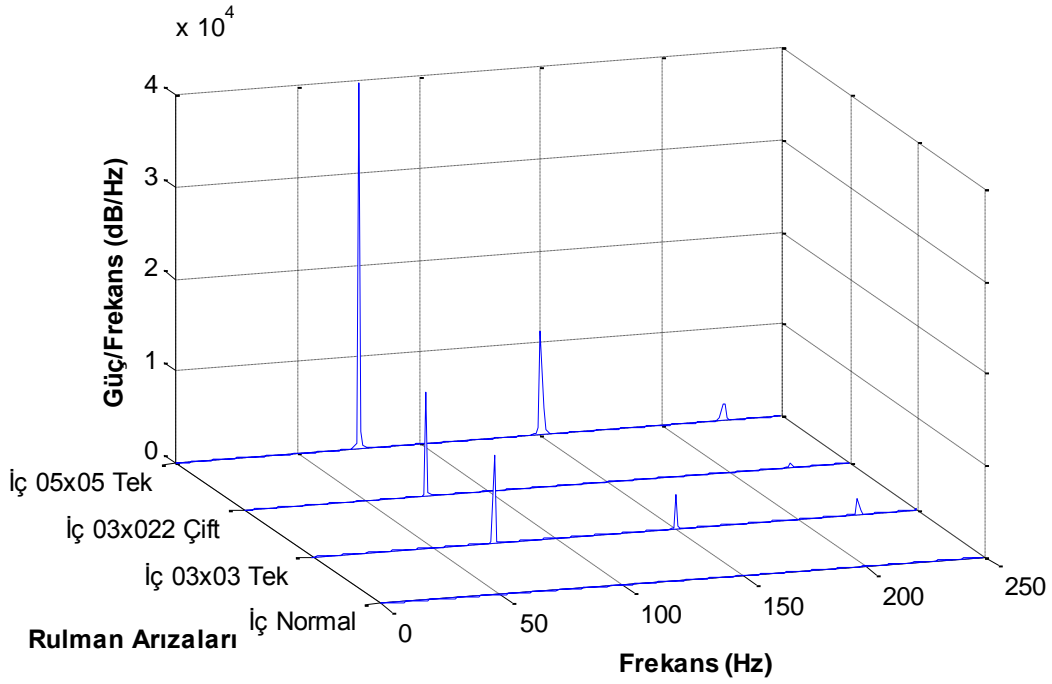


Şekil 3. 10 3000 d/dk hızında iç bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



a)

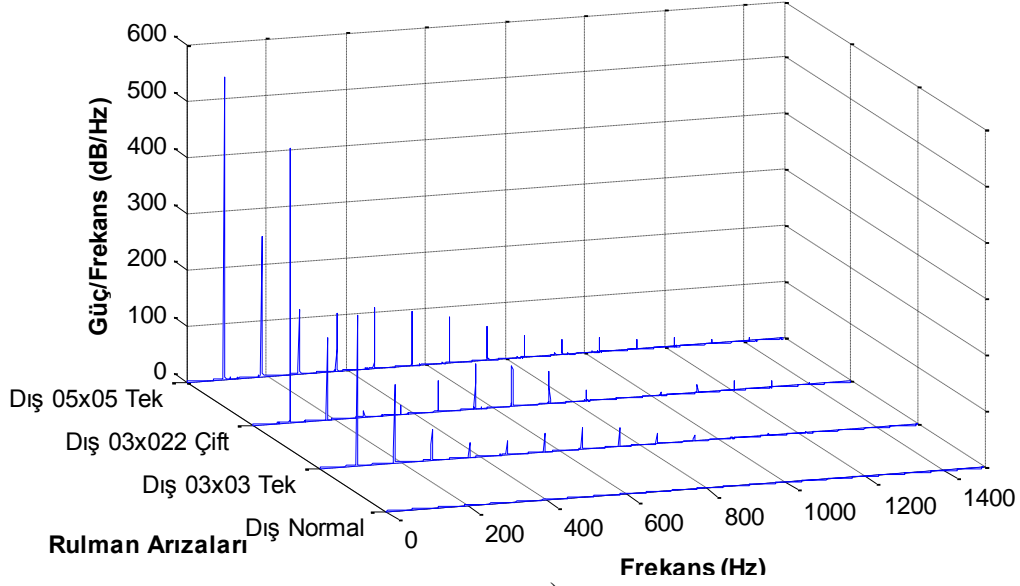


b)

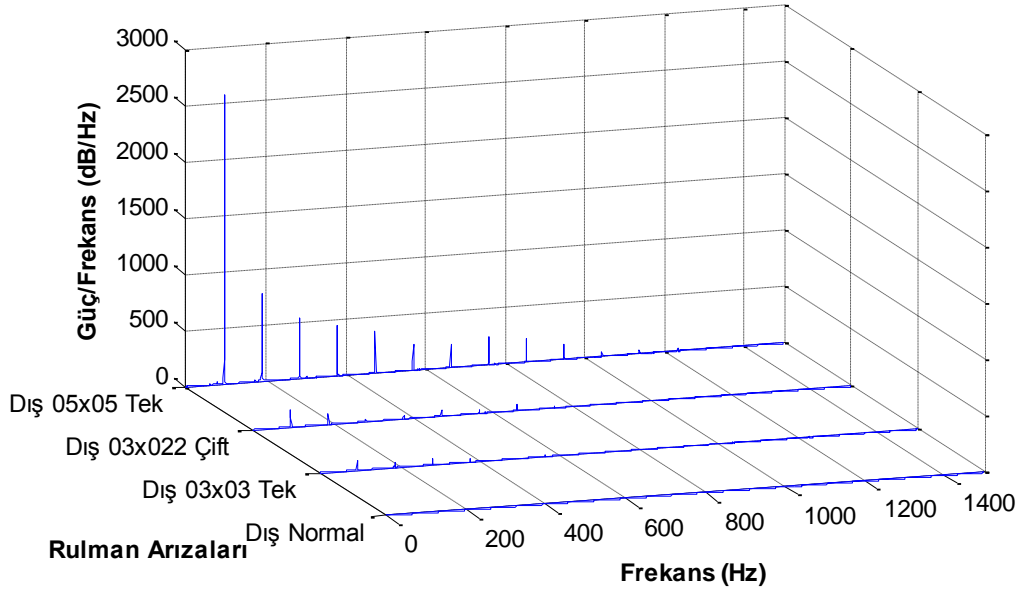
Şekil 3. 11 4500 d/dk hızında iç bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

Dış bilezik arızalarından elde edilen titreşim verileri frekans düzleminde incelendiğinde iç bilezik arızalarına nazaran dış bilezik arızalarının genliğinin daha büyük değerlere çıktığı Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'den anlaşılmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte hata frekanslarının genliklerinin belirgin bir şekilde arttığı, hız artışıyla birlikte boyut olarak büyük hatalı olan Dış 05x05 Tek arızalı rulman verilerinin diğer rulmanlara nazaran genliğinin büyüdüğü anlaşılmaktadır.



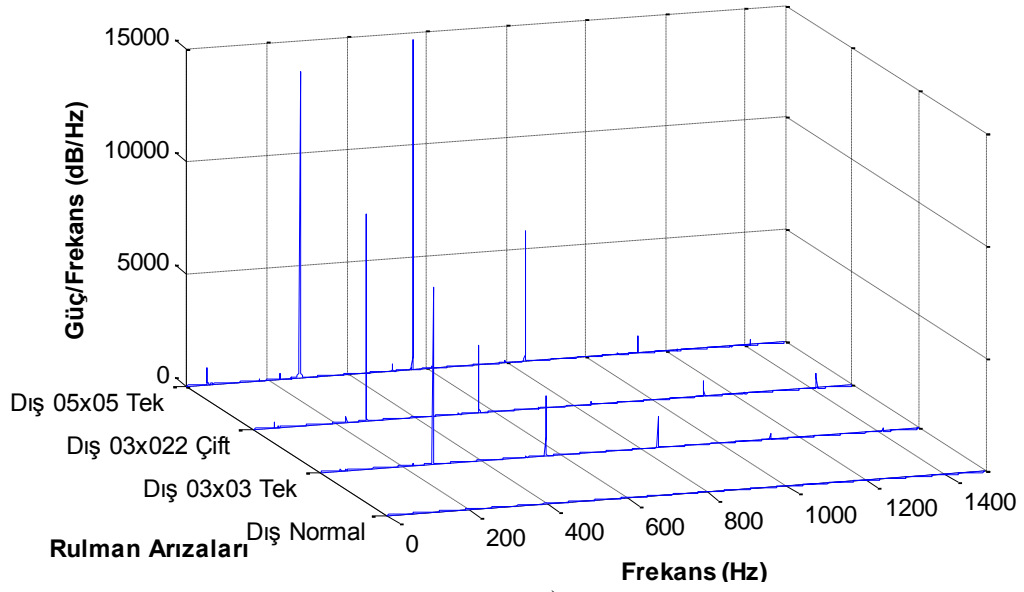
a)



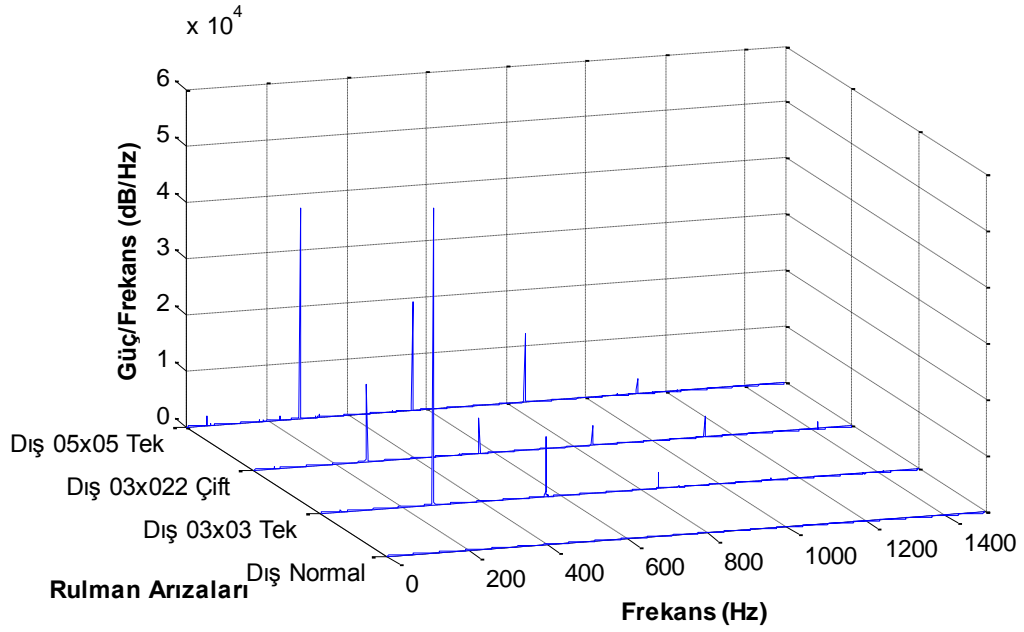
b)

Şekil 3. 12 1000 d/dk hızında dış bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



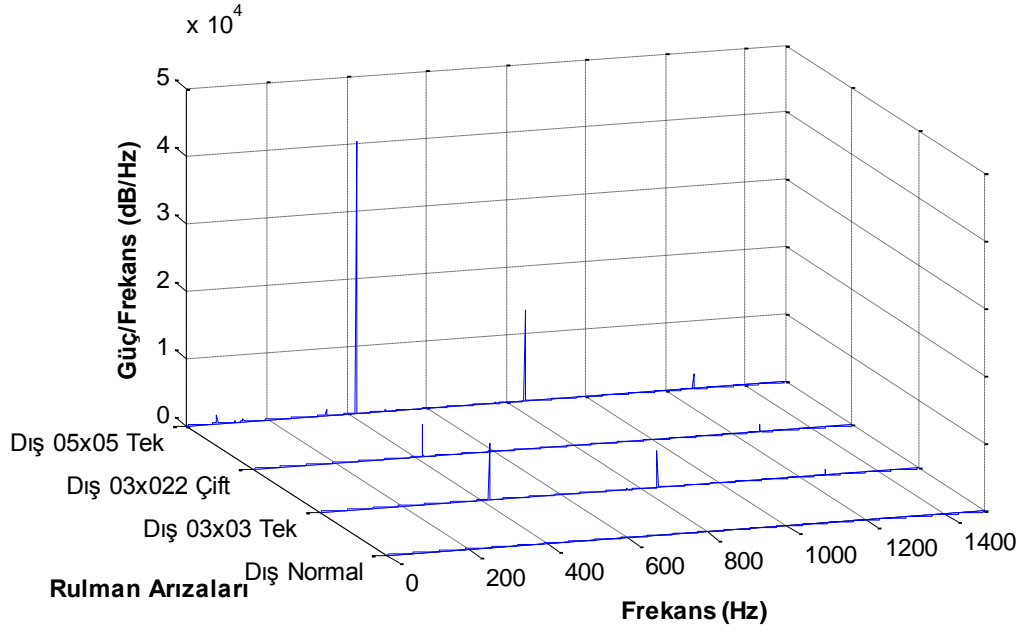
a)



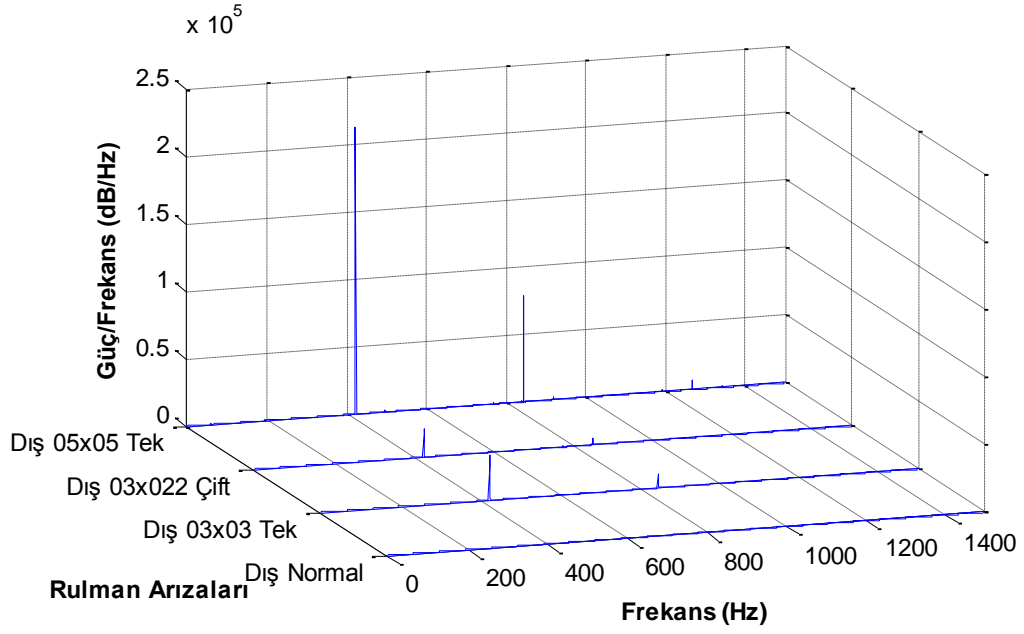
b)

Şekil 3. 13 3000 d/dk hızında dış bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



a)



b)

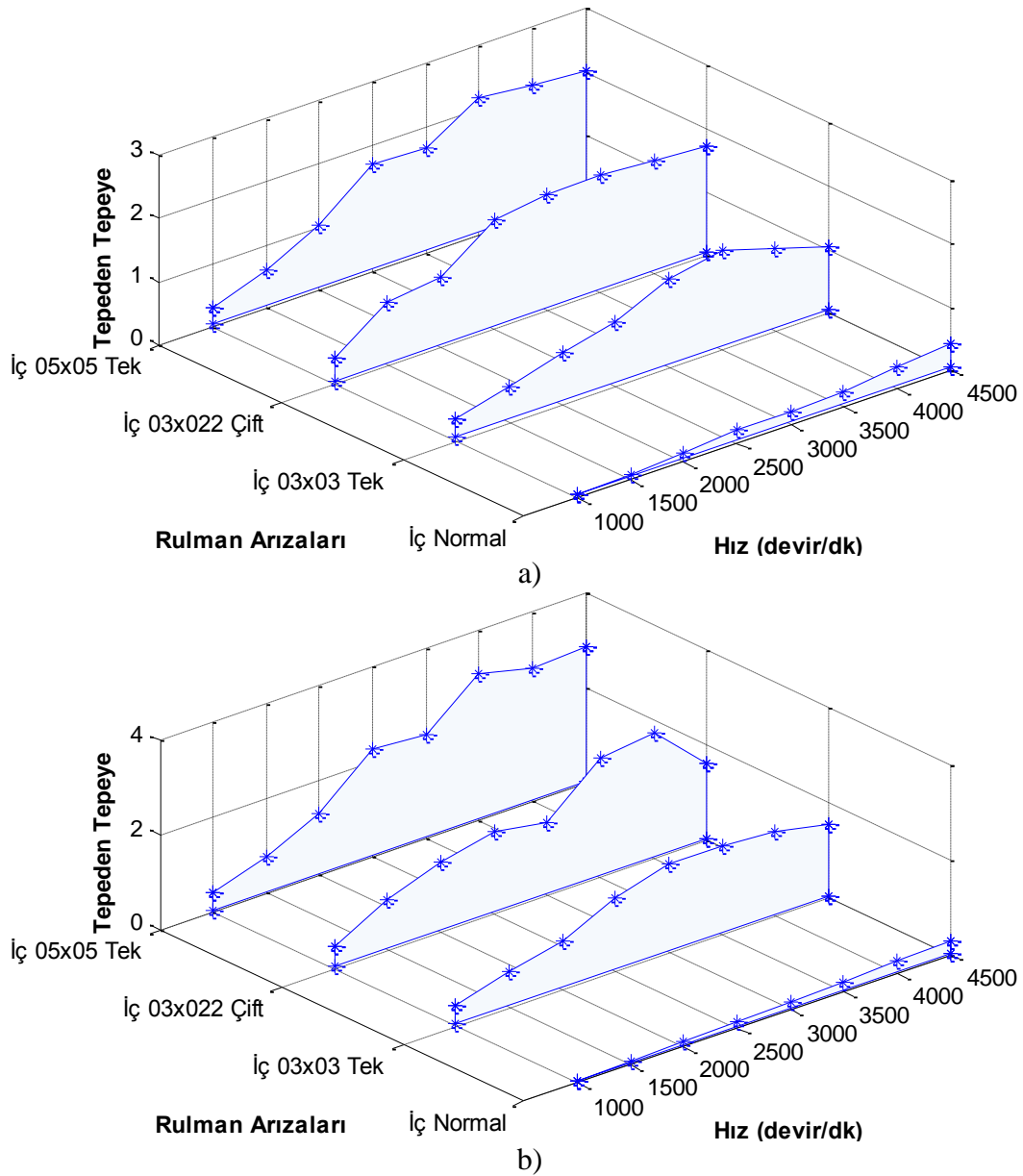
Şekil 3. 14 4500 d/dk hızında dış bilezik arızaları titreşim verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

3.3. Ses Verileri

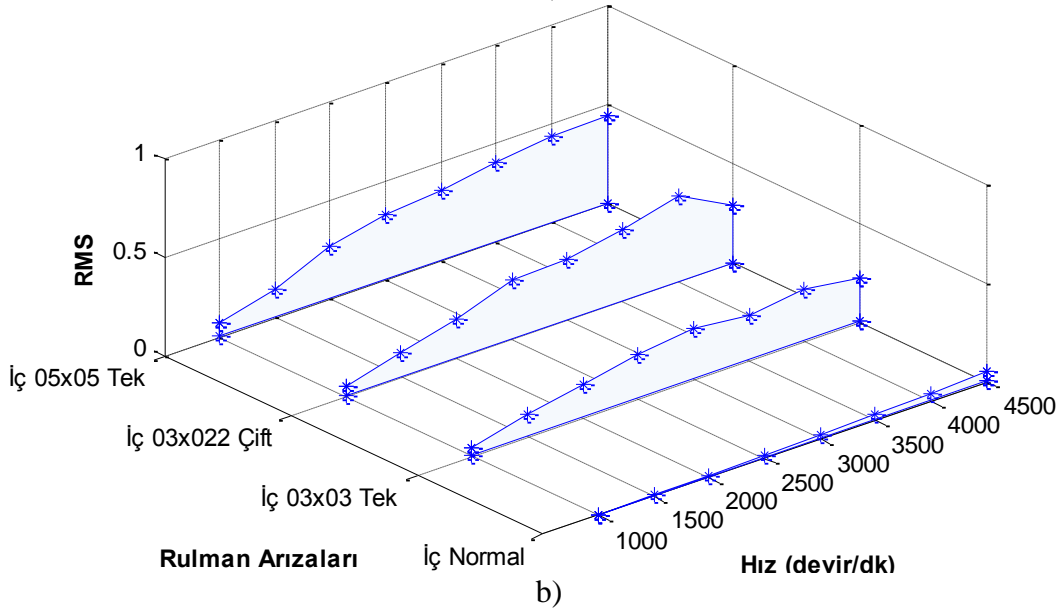
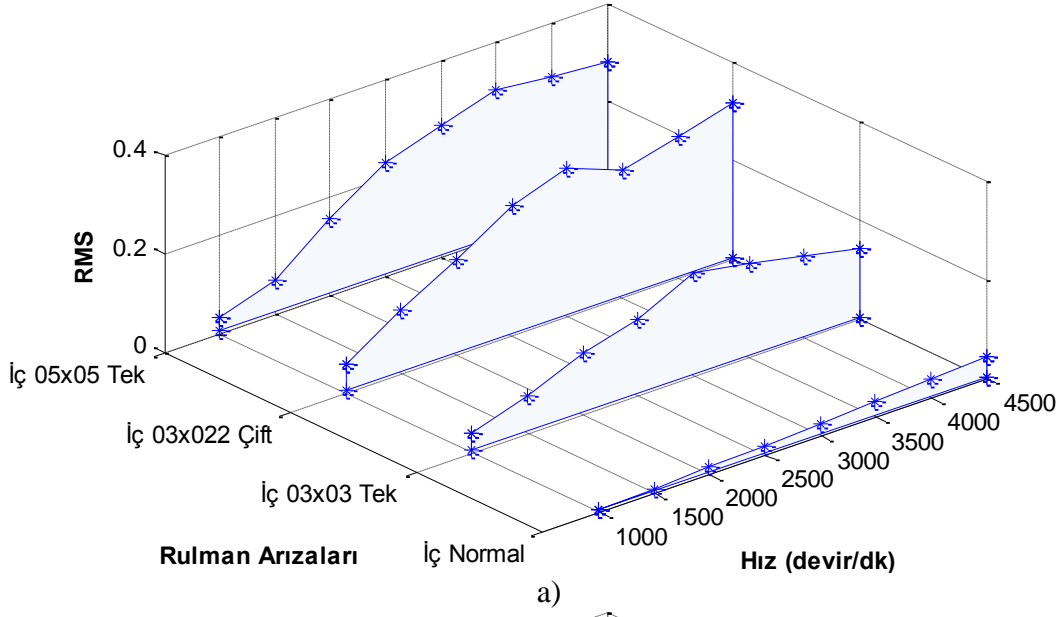
3.3.1. Ses verisinin zaman düzlemi özellikleri

Elde edilen ses verileri incelendiğinde, titreşim verilerinin zaman düzlemi verilerine benzer bir değişim gösterdiği görülmektedir. İç bilezik arızalarında devir hızının, hatanın boyutunun ve rulman üzerine uygulanan yükün artmasıyla TT ve RMS değerlerinde artış olduğu Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3. 15 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin TT değeri değişimi

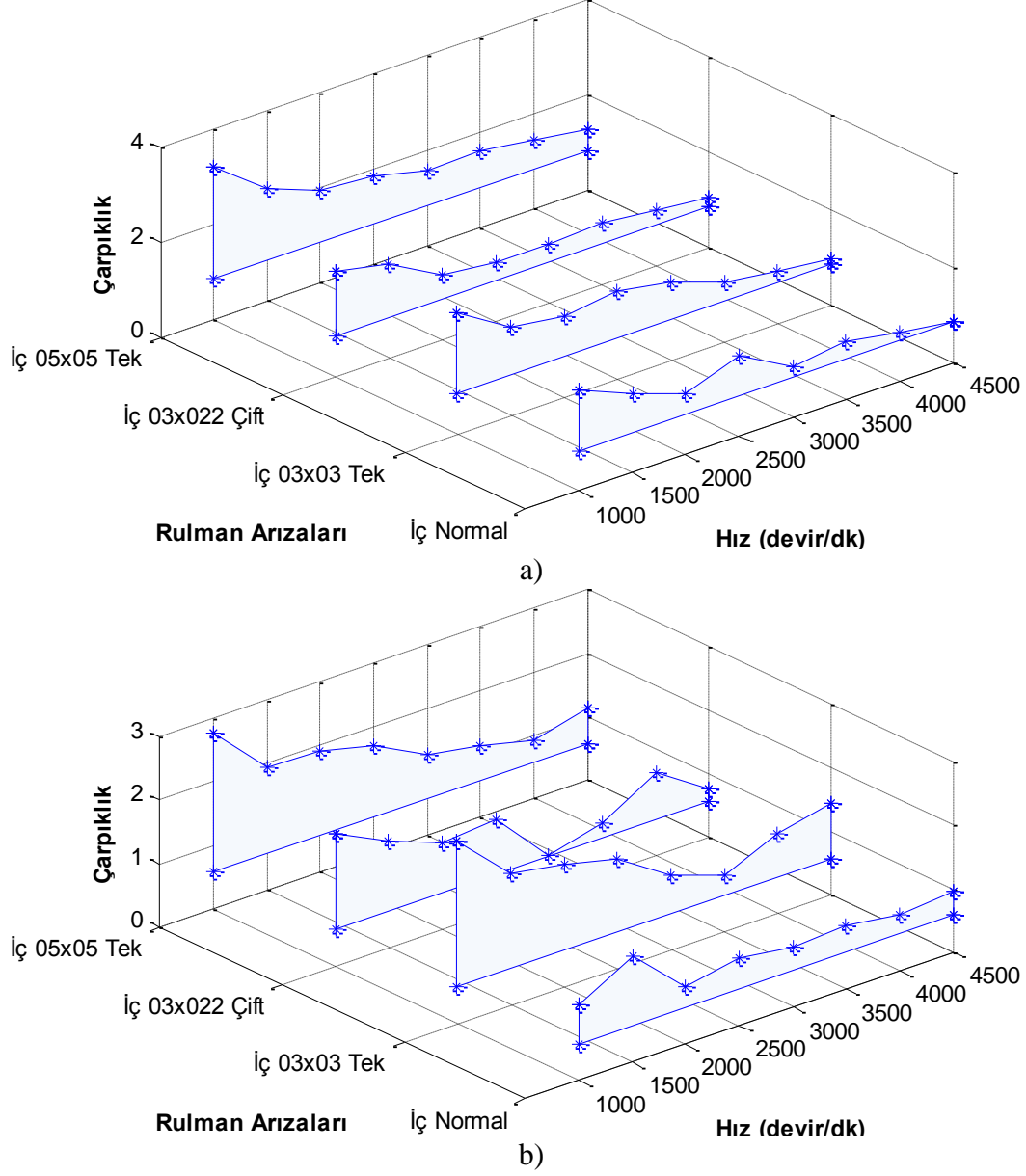
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



Şekil 3. 16 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin RMS değeri değişimi

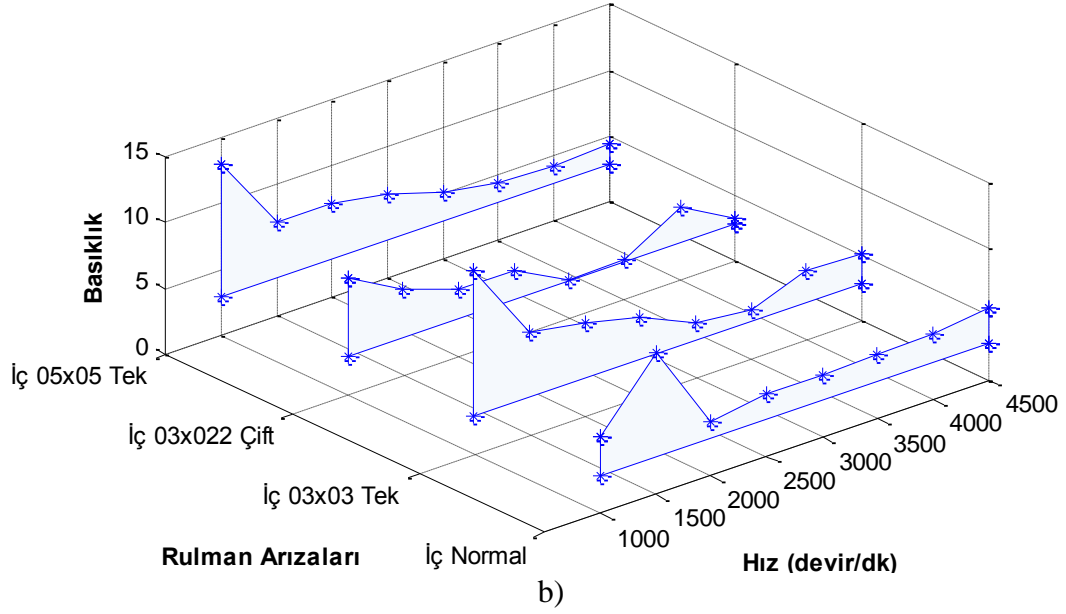
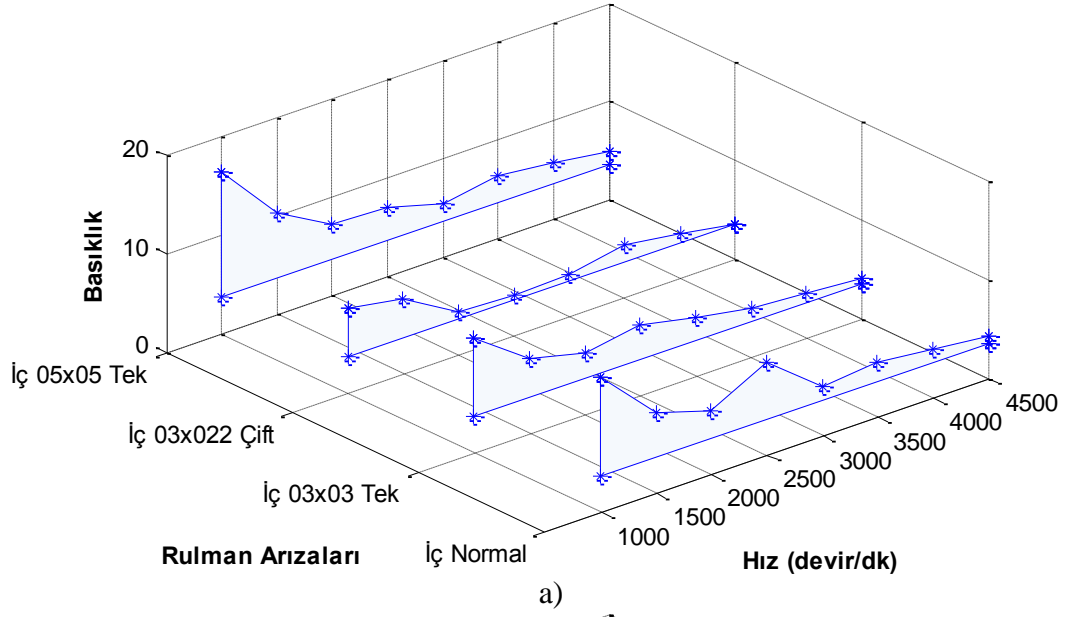
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

İç bilezik arıza durumlarında hızın ve uygulanan yükün artmasıyla, TT ve RMS değerleri artarken, çarpıklık ve basıklık değerlerinde düşüş olduğu, hatanın boyutunun artmasıyla bu değerlerin artış gösterdiği (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18) görülmektedir.



Şekil 3. 17 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin çarpıklık değeri değişimi

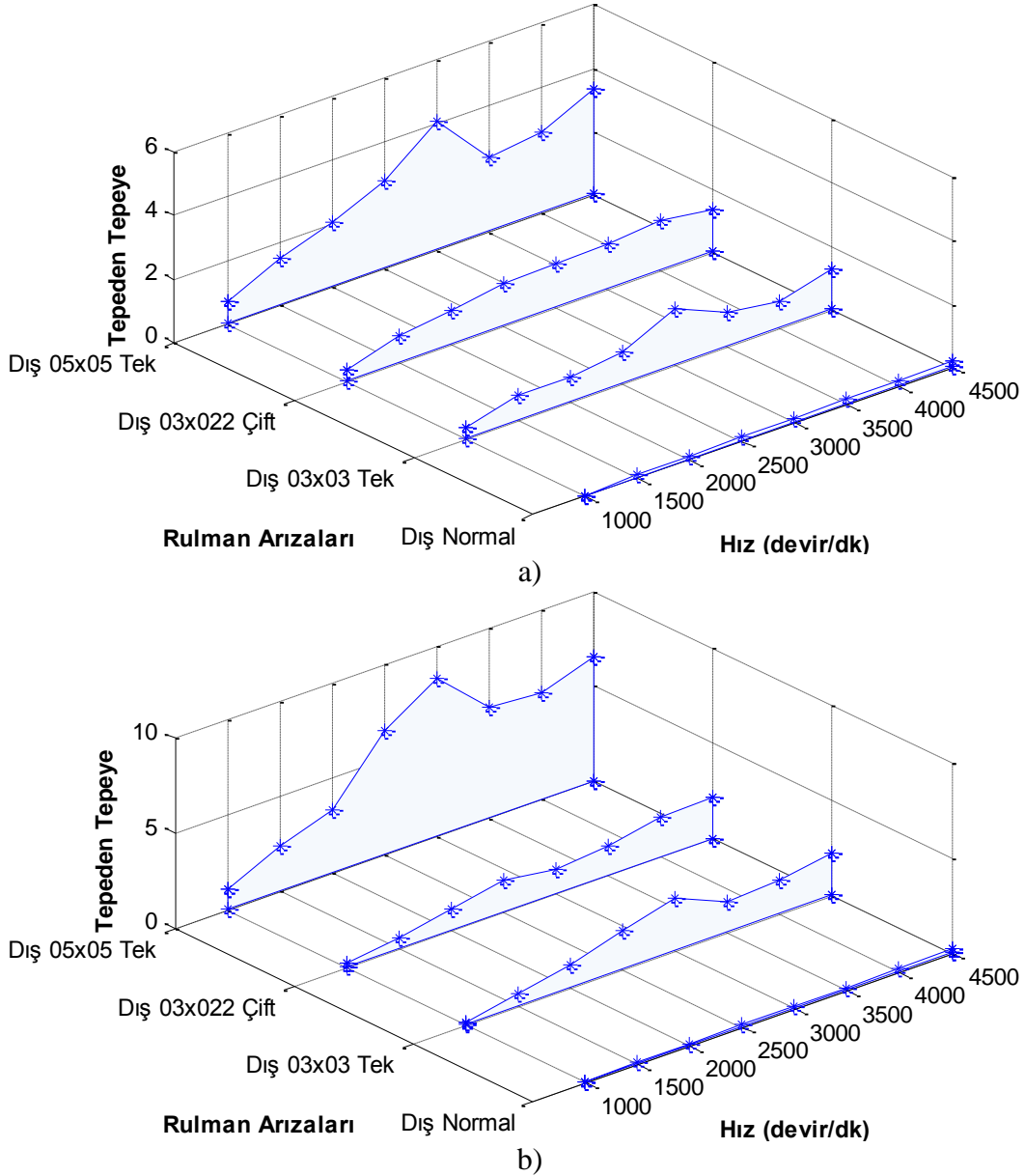
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



Şekil 3. 18 İç bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin basıklık değeri değişimi

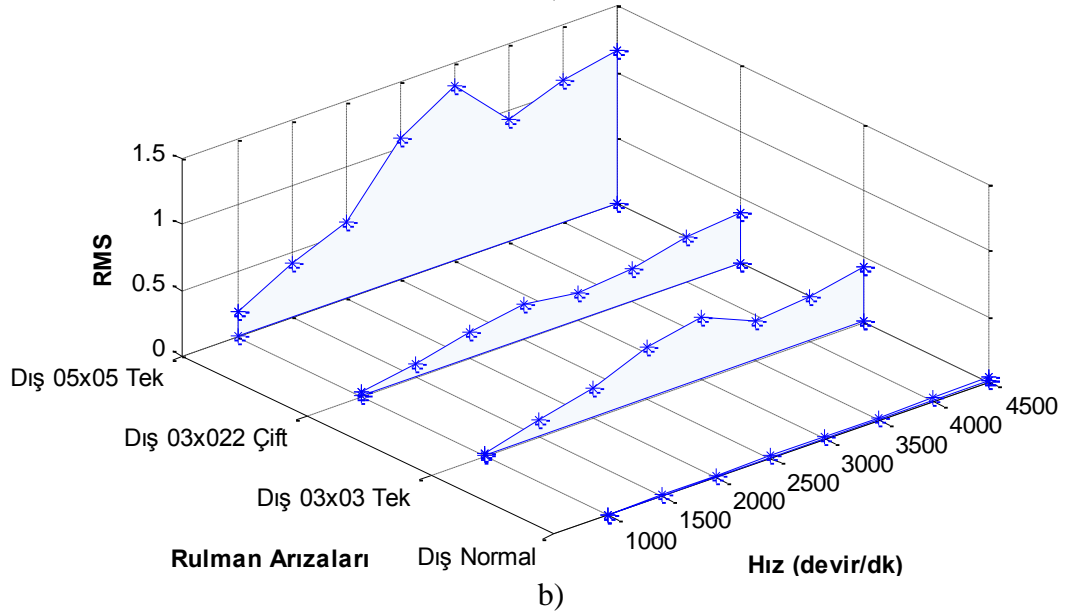
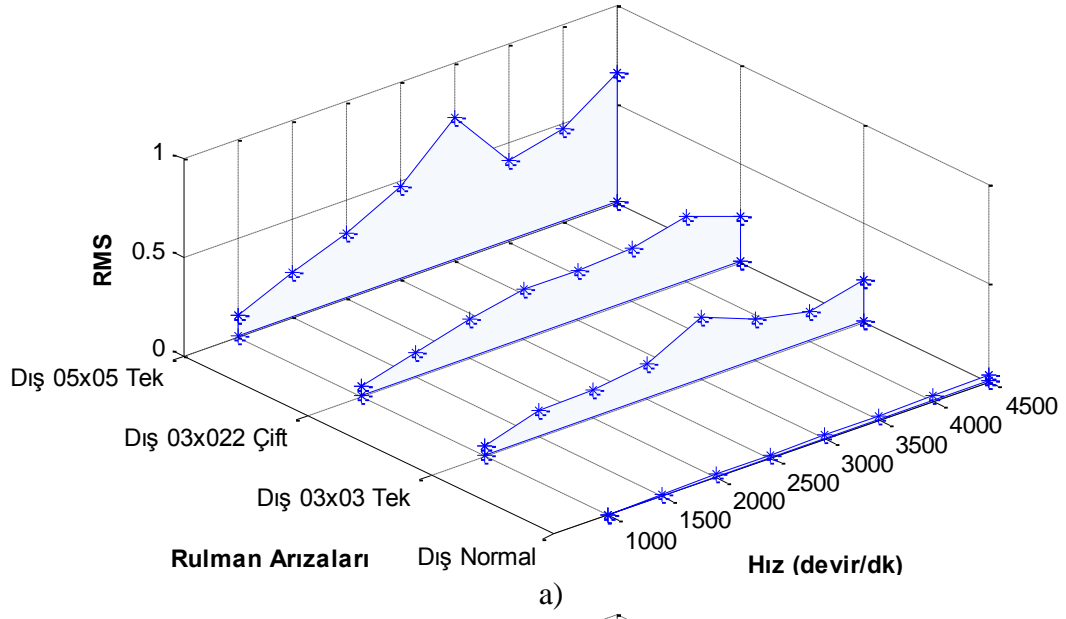
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

Elde edilen ses verileri incelendiğinde, dış bilezik arıza ölüm değerlerinin iç bilezik arızalarına benzer bir seyir izlediği ancak, elde edilen değerlerin iç bilezik ölçümlerinin yaklaşık iki katı seviyelerinde gerçekleştiği gözlenmektedir. Dış bilezik arızalarında devir hızının, hatanın boyutunun ve rulman üzerine uygulanan yükün artmasıyla TT ve RMS değerlerinde artış olduğu Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de görülmektedir.



Şekil 3. 19 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin TT değeri değişimi

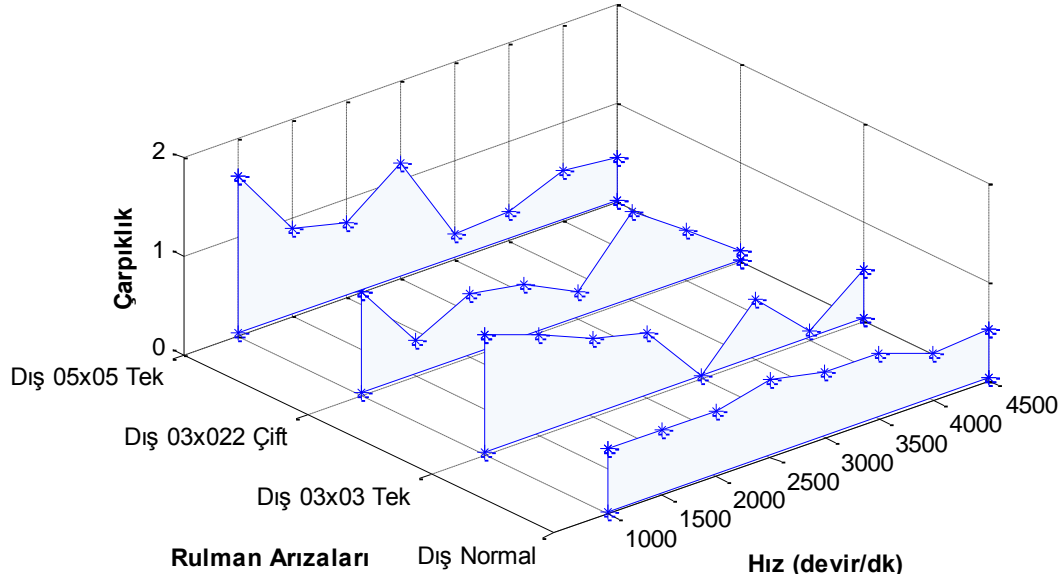
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



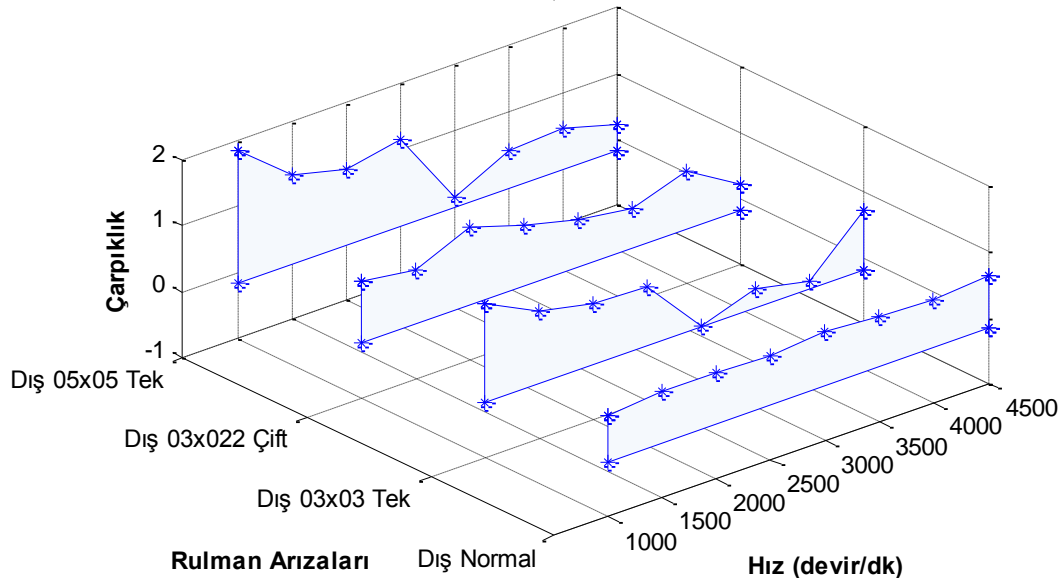
Şekil 3. 20 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin RMS değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

Dış bilezik arızaları çarpıklık ve basıklık değerlerinde ise devir hızın ve uygulanan yükün artmasıyla düşüş olduğu, hata boyutunun artmasıyla değerlerin arttığı Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de görülmektedir. Ayrıca, çentiğin genişliğinin artmasıyla, basıklık değerinin büyüdüğü Şekil 3.22’de görülmektedir.



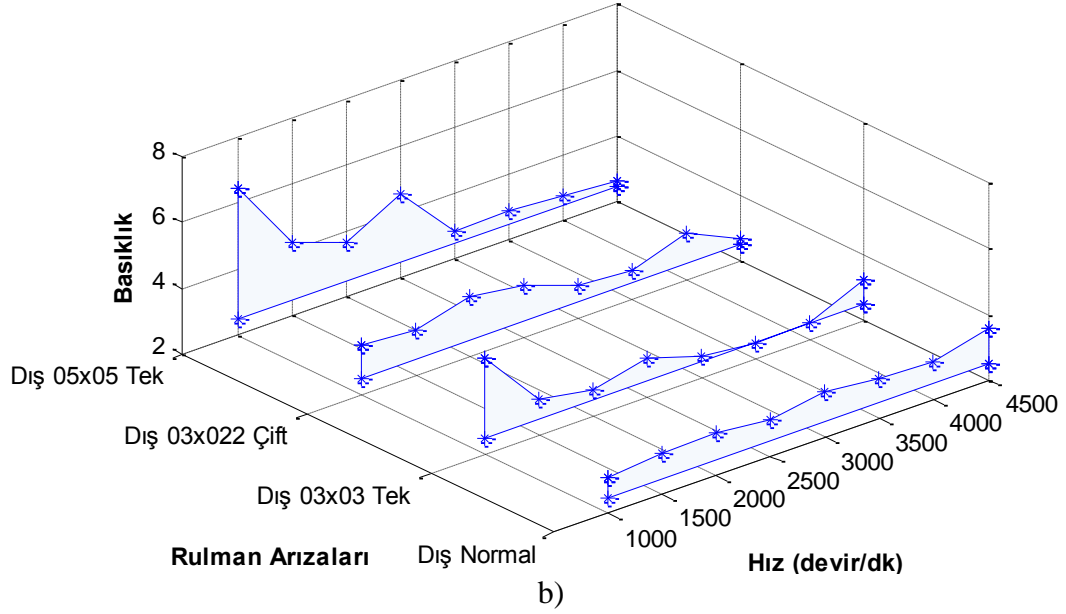
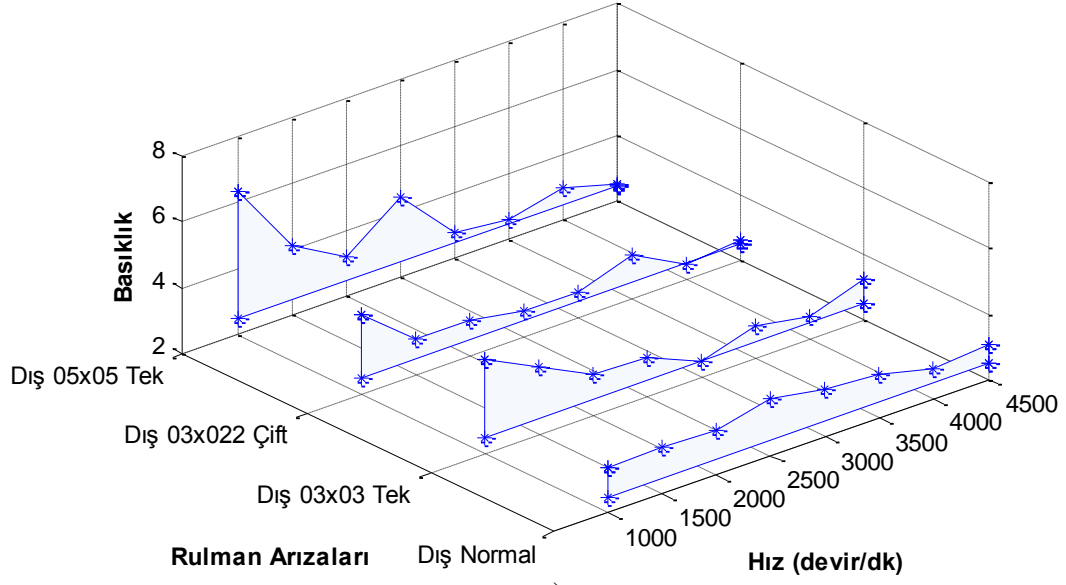
a)



b)

Şekil 3. 21 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin çarpıklık değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



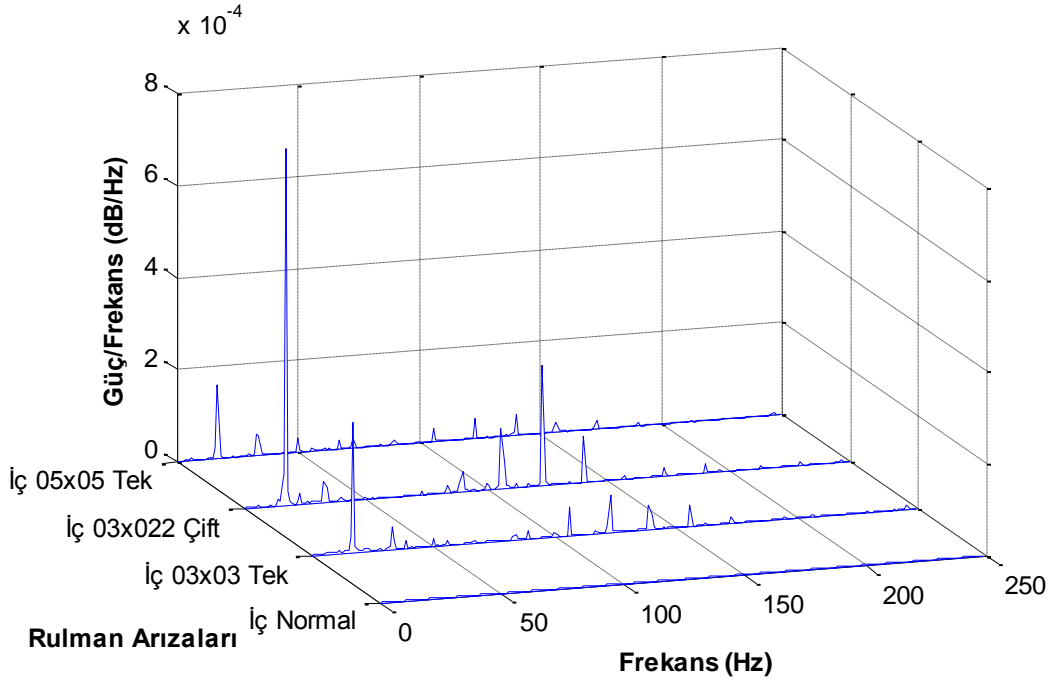
Şekil 3. 22 Dış bilezik arızaları ve hıza bağlı ses verisinin basıklık değeri değişimi

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

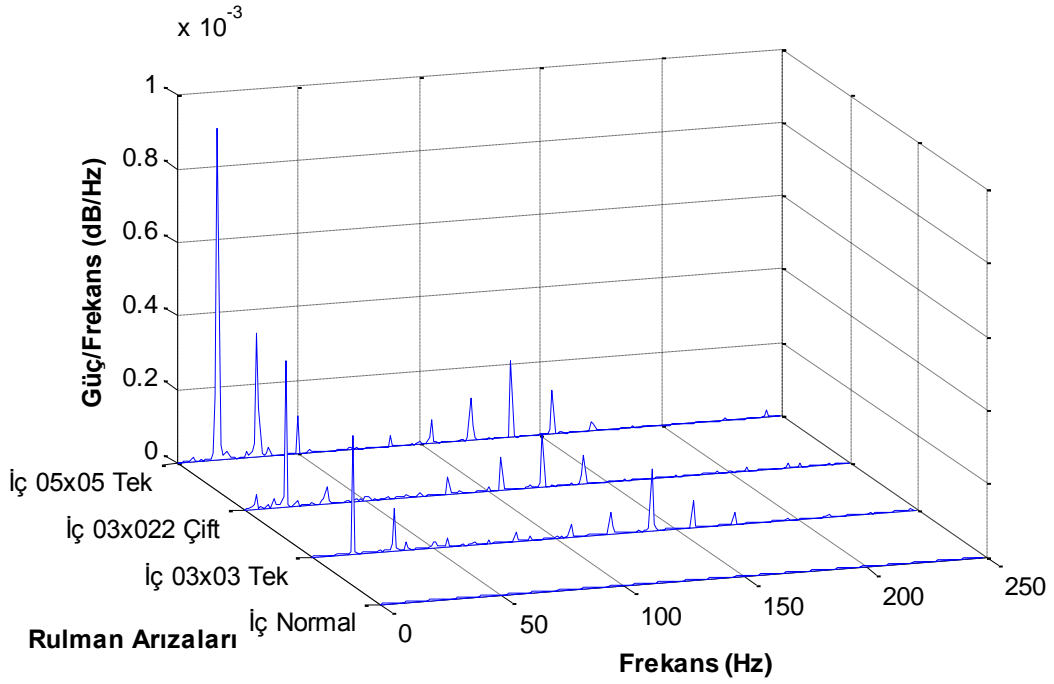
3.3.2. Ses verisinin frekans düzlemi özellikleri

Frekans düzleminde gösterilen şekiller incelendiğinde Tablo 2.3’de verilen karakteristik hata frekanslarının diğer bileşenlere nazaran daha büyük çıktığı görülmektedir. Ayrıca karakteristik hata frekansının harmoniklerinin oluştuğu ve özellikle birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.23’de iç bilezik arızalarının 200 kg ve 400 kg yükte değişimi gösterilmektedir. Rulman üzerine uygulanan yükün artmasıyla birlikte titreşim verilerine benzer şekilde karakteristik hata frekanslarının genliklerinin arttığı Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de gösterilmektedir. Ancak İç 03x022 Çift rulman arızasının düşük hızlarda diğer rulman arızalarına nazaran daha belirgin görünürken devir hızın artmasıyla tek çentiklerin bulunduğu diğer iki arızalı rulmanların karakteristik hata frekansının göreceli olarak daha belirginleştiği Şekil 3.23, Şekil 3.24ve Şekil 3.25’den anlaşılmaktadır. Hızın artmasıyla büyük arızalı olan İç 05x05 Tek rulman arızasının diğerlerine göre daha büyük çıktığı Şekil 3.25’de gösterilmektedir. Ayrıca yük ve hızın artmasıyla karakteristik hata frekans harmonikleri genliklerinin karakteristik hata frekans genliğine göre azaldığı ve ikinci harmoniklerden itibaren genliğin daha düşük seviyelere gerilediği anlaşılmaktadır.



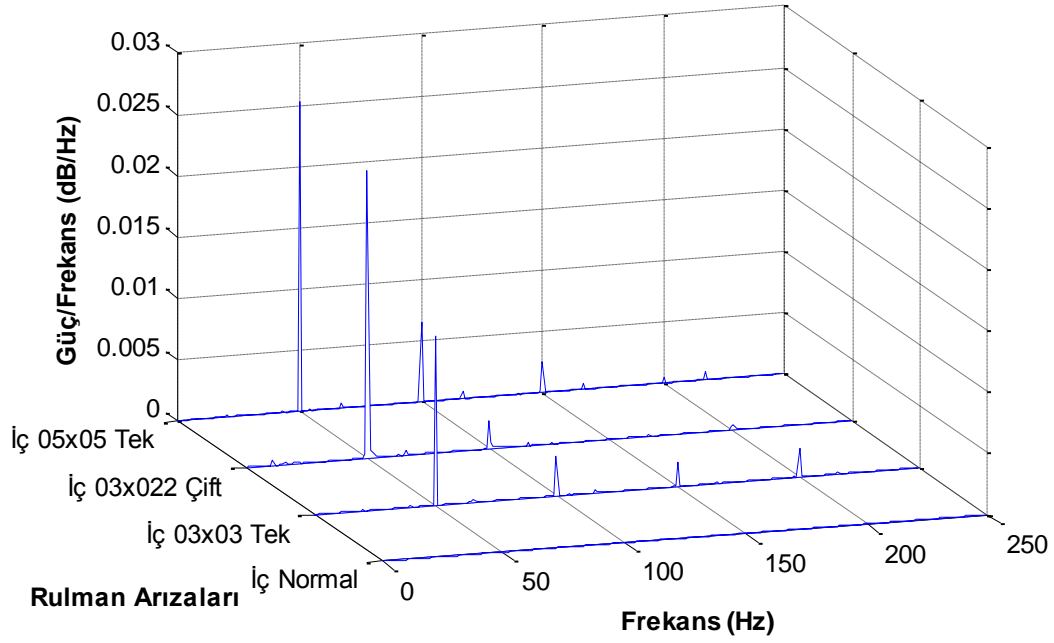
a)



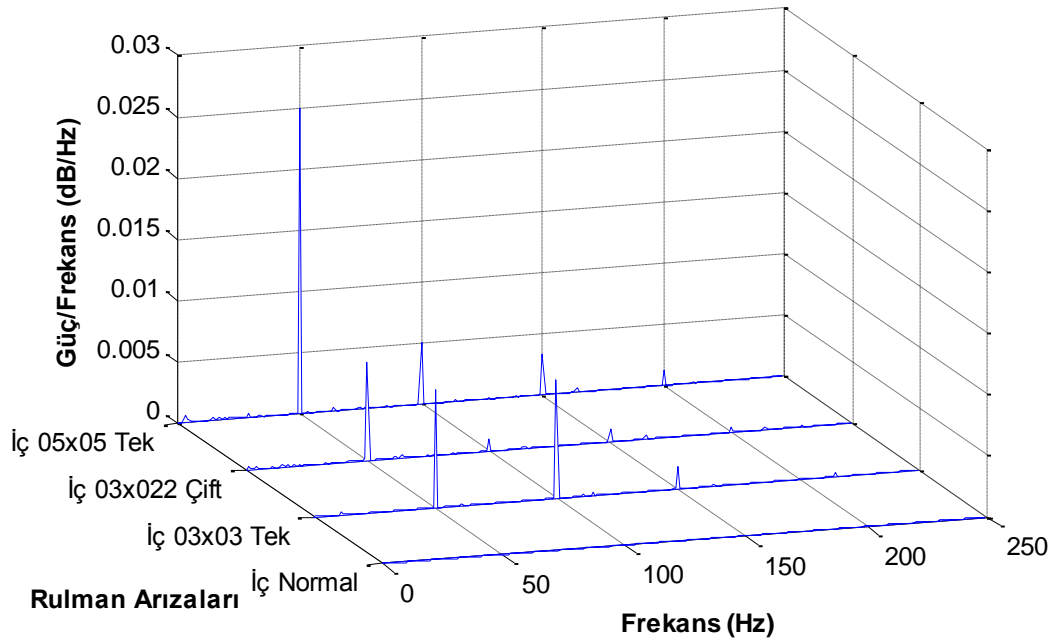
b)

Şekil 3. 23 1000 d/dk hızında iç bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



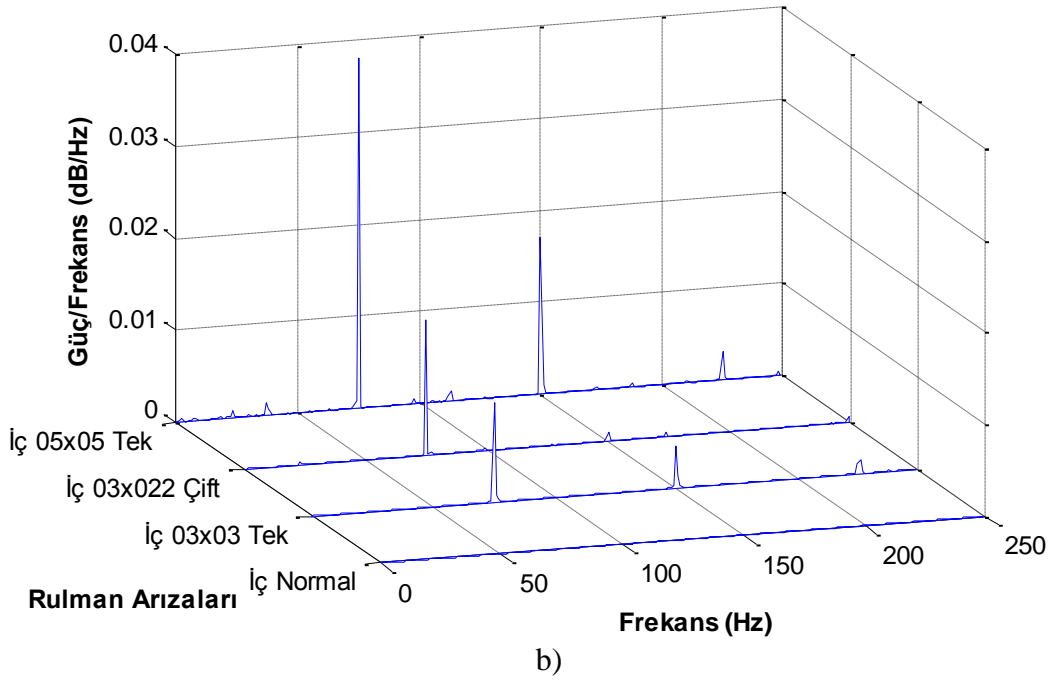
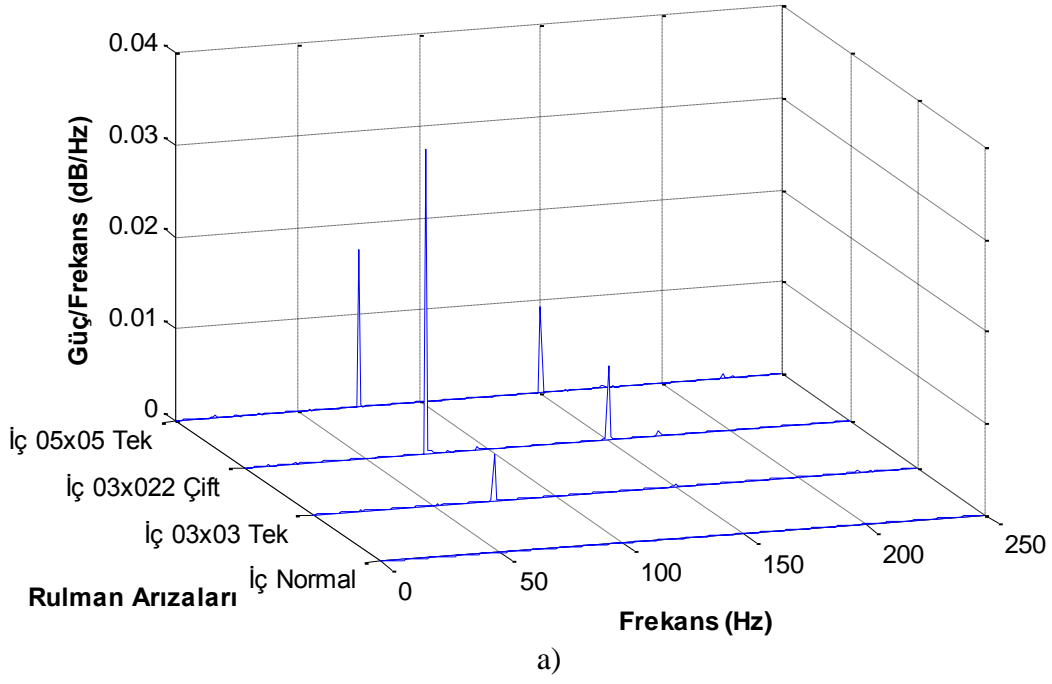
a)



b)

Şekil 3. 24 3000 d/dk hızında iç bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

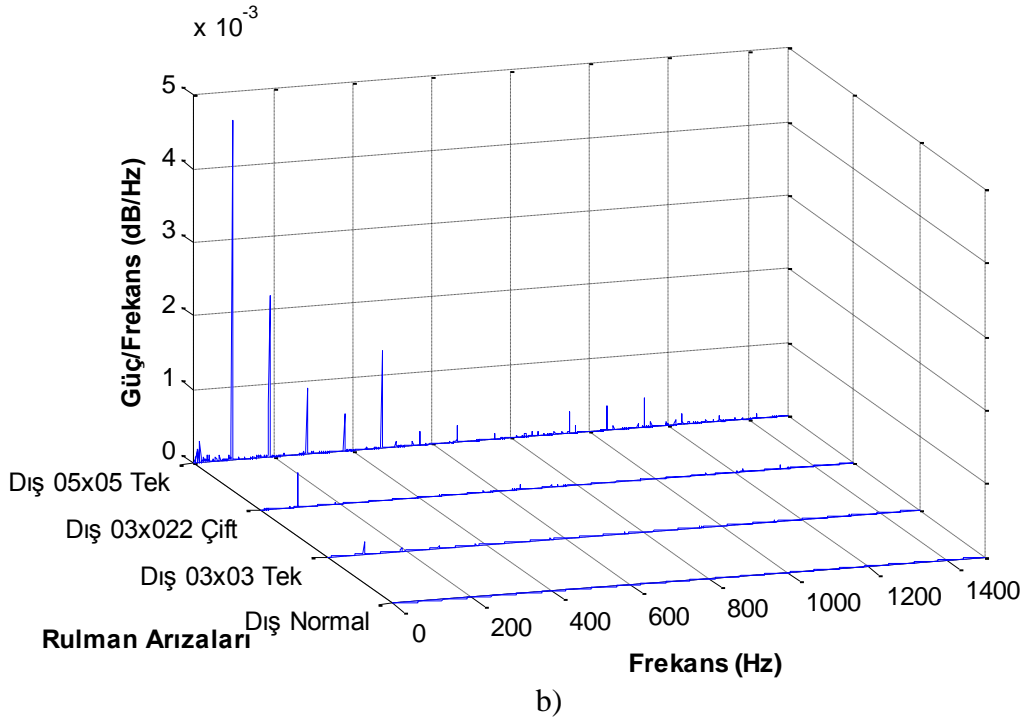
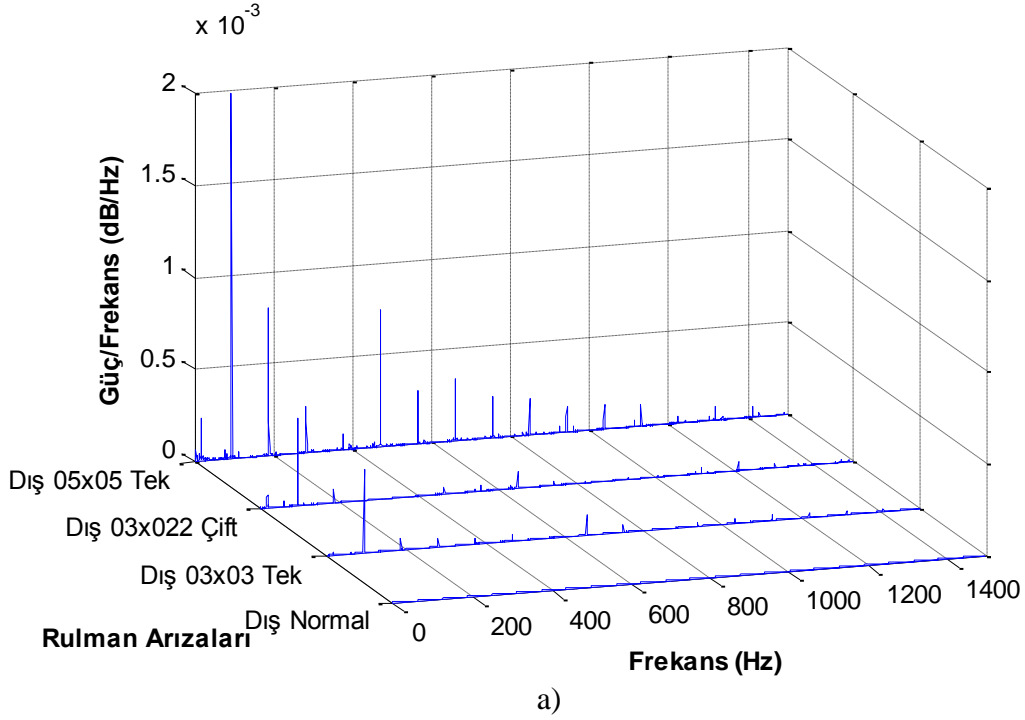


Şekil 3. 25 4500 d/dk hızında iç bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri

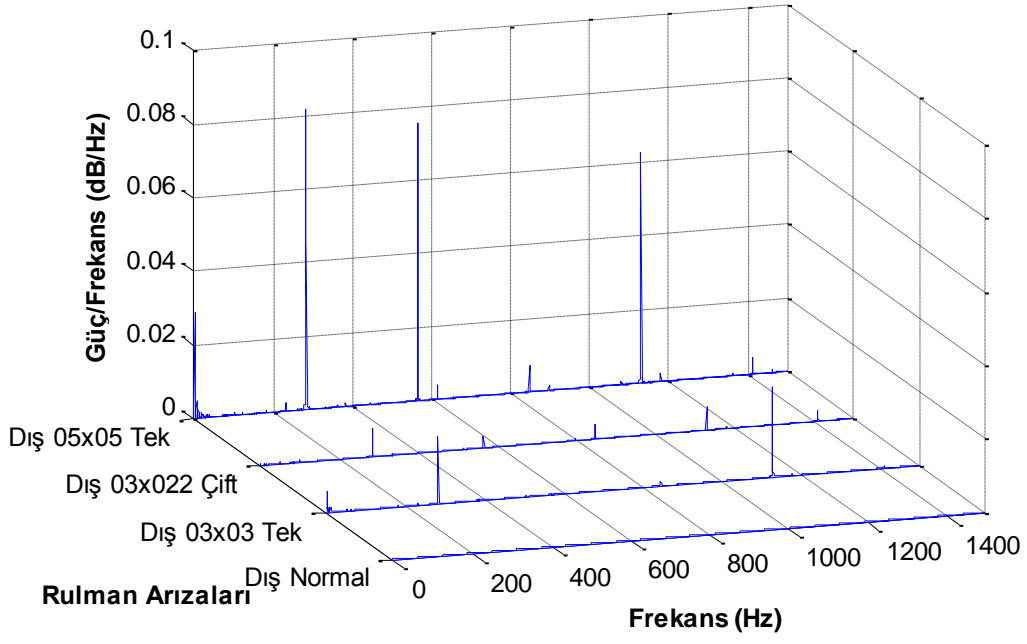
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

Dış bilezik arızalarından elde edilen ses verileri frekans düzleminde incelendiğinde iç bilezik arızalarına nazaran dış bilezik arızalarının daha büyük

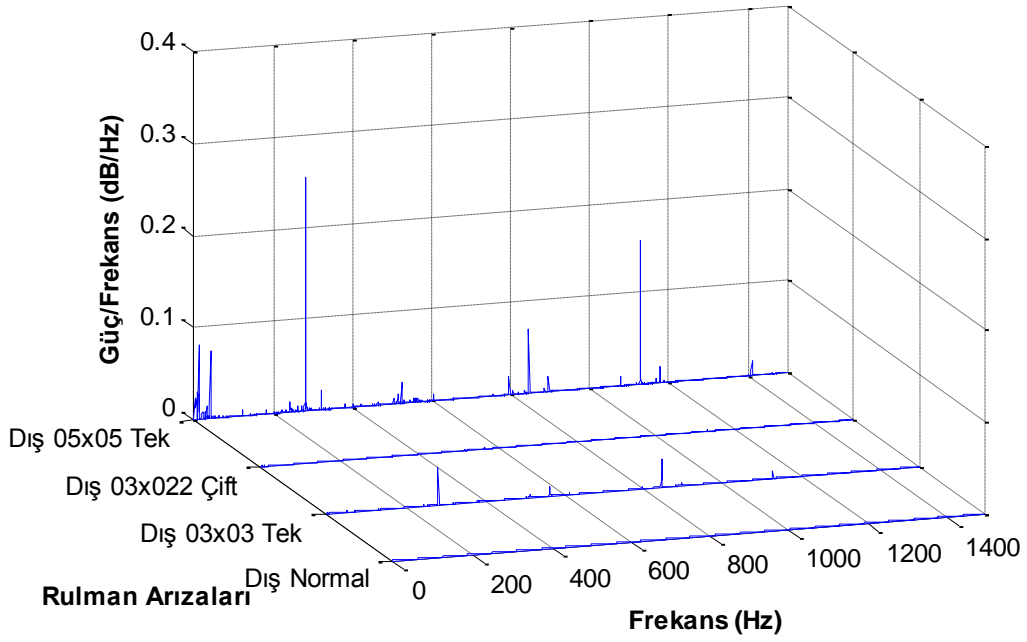
değerlere çıktığı Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'den anlaşılmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte hata frekanslarının genliklerinin belirgin bir şekilde arttığı, hız artışıyla birlikte boyut olarak büyük hatalı olan Dış 05x05 Tek arızalı rulman verilerinin diğer rulmanlara nazaran genliğinin büyüdüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 26 1000 d/dk hızında dış bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri
a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



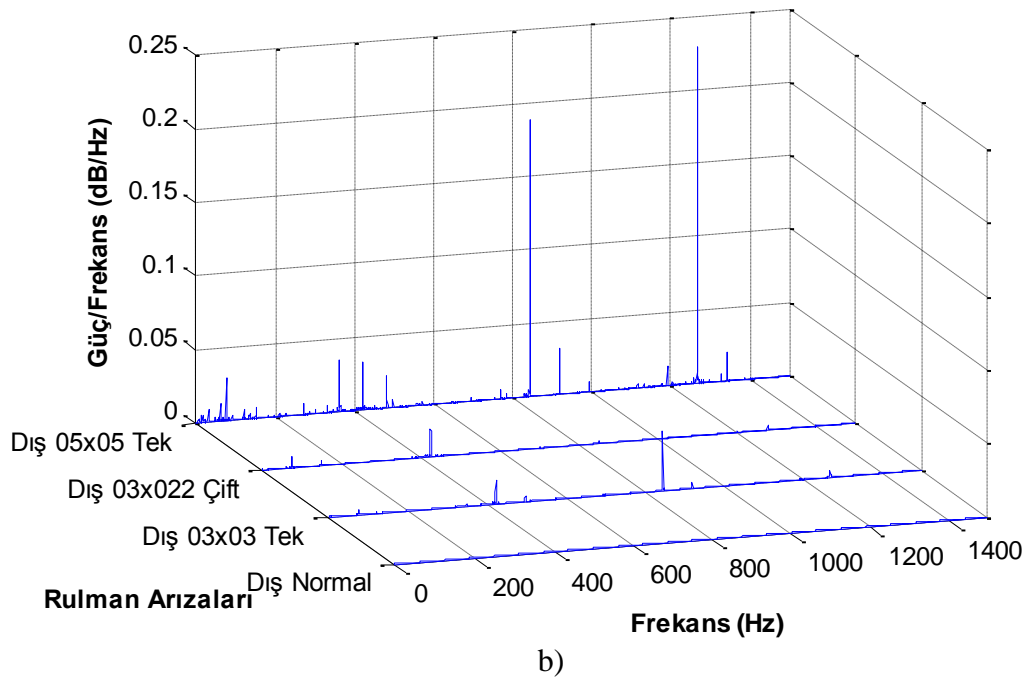
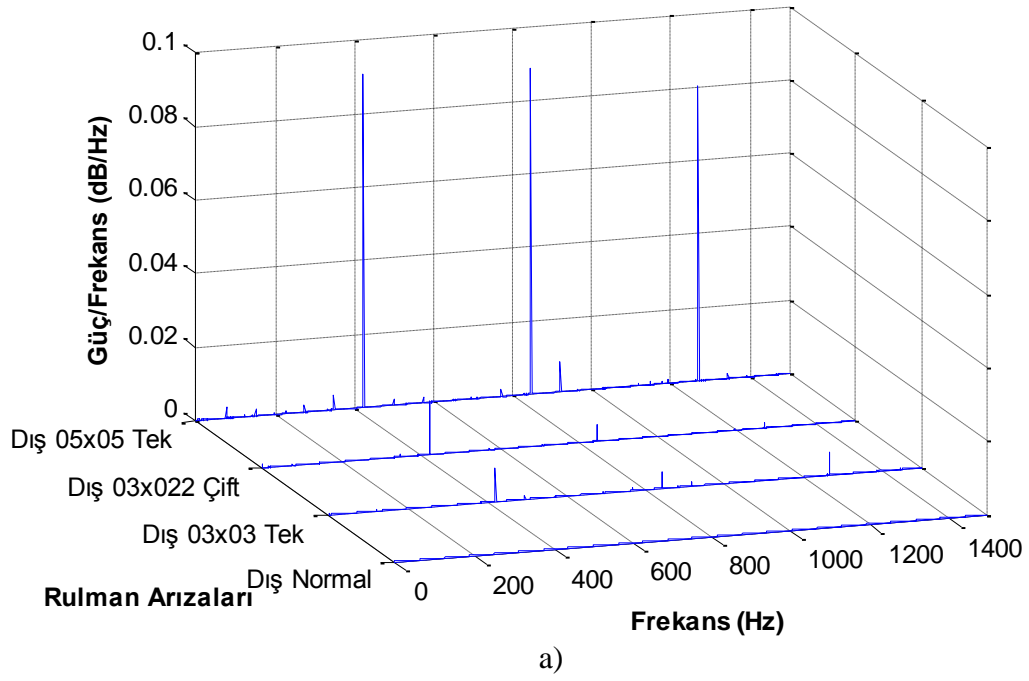
a)



b)

Şekil 3. 27 3000 d/dk hızında dış bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte



Şekil 3. 28 4500 d/dk hızında dış bilezik arızaları ses verisinin PSD değeri

a) 200 kg yükte, b) 400 kg yükte

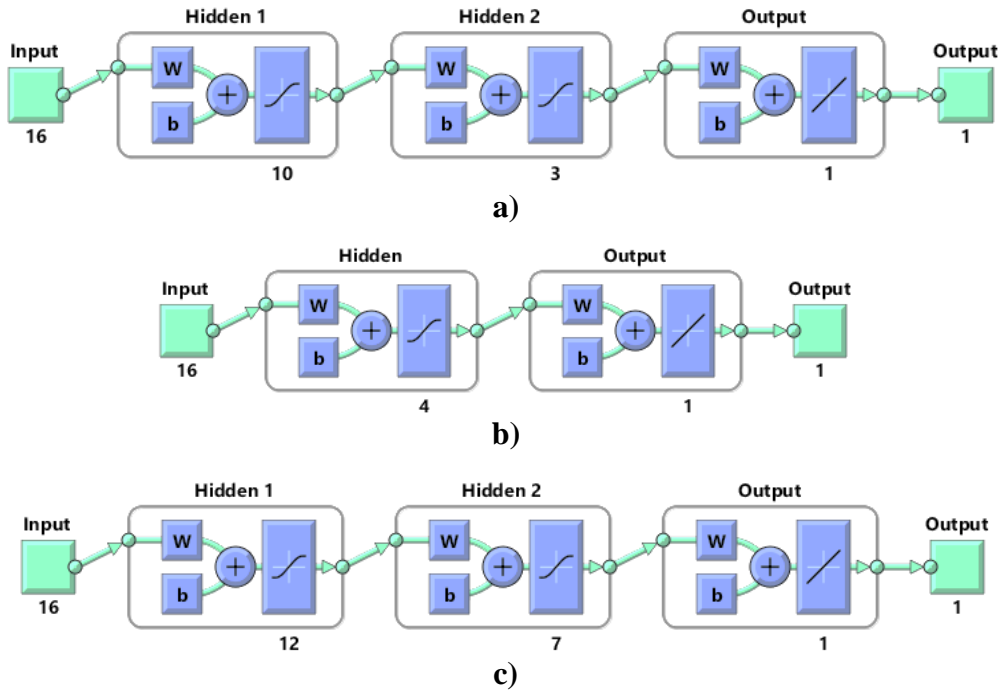
3.4. Arıza Teşhisi

Bu çalışmada; YSA, rulman arıza teşhis sistemi üzerinden ölçülen titreşim ve ses sinyallerinin zaman ve frekans düzleminde elde edilen sinyal karakteristik özellikleri arıza sınıfını belirlemede kullanılmaktadır. YSA'nın çalışma süresini azaltmak ve en verimli mimariyi oluşturmak için GA tabanlı optimizasyon yapılmaktadır. Bu amaçla elde edilen GA-YSA ile rulmandan elde edilen veriler kullanılarak arıza teşhisi gerçekleştirilmektedir.

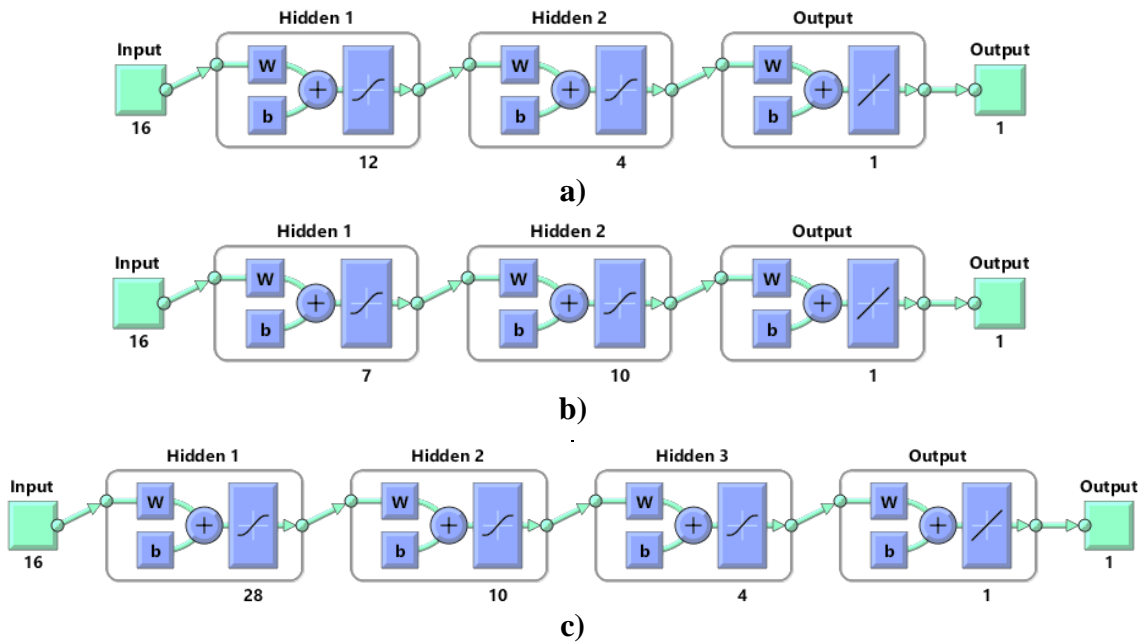
Arızaların sınıflandırılması, çok katmanlı YSA mimarisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. YSA'nın eğitimi, zaman düzleminde 4 ve frekans düzleminde 12 olmak üzere toplam 16 özelliğin birleştirilmesiyle oluşturulan veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma çalışmaları titreşim ve ses verisi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. GA-YSA mimarisi

GA optimizasyonunda 3 gizli katman ve her katmanda en fazla 30 tane nöron olabilecek şekilde YSA mimari denemeleri gerçekleştirilmiştir. GA-YSA ile arıza teşhisi uygulaması için yapılan optimizasyon neticesinde elde edilen YSA modelleri 16 girişten ve bir çıkıştan oluşmaktadır. Farklı sınıflandırma işlemleri için farklı sayıda gizli katmana ve her katmanda farklı nöron sayısına sahip YSA mimarileri elde edilmiştir. GA optimizasyonu neticesinde elde edilen YSA modelleri Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da gösterilmektedir. Elde edilen YSA modelleri, Karesel Hata Ortalaması (MSE-Mean Square Error) ve hedef çıkış ile YSA çıkışı arasındaki verilerin korelasyon değeri kullanılarak değerlendirilmiş, minimum MSE hatasına ve 1'e yakın korelasyon değerine sahip en hızlı çalışan YSA modeli elde edilmiştir. YSA modellerinin gizli katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak çıkışı -1 ve 1 aralığında değişen hiperbolik tanjant fonksiyonu ve çıkış katmanında ağı net girdisini doğrudan çıkış olarak veren doğrusal aktivasyon fonksiyonu seçilmiştir. GA ile optimizasyon yaparken YSA mimarisinin arama sınırları, katman adeti 1'den 3'e kadar ve nöron sayısı da 3'den 30'a kadar olacak şekilde seçilmiştir. Elde edilen YSA modelleri Levenberg-Marquardt eğitim algoritmasıyla MSE değerine göre eğitilmiştir.



Şekil 3. 29 Titreşim verilerinin sınıflandırılması için seçilen GA-YSa mimarileri
a)Var-Yok, b) Arıza yeri, c) Tüm arızalar



Şekil 3. 30 Ses verilerinin sınıflandırılması için seçilen GA-YSa mimarileri
a)Var-Yok, b) Arıza yeri, c) Tüm arızalar

Eğitim verileri YSA modelinin ağırlıklarının ve eşik değerlerinin ayarlanması sırasında kullanılan verilerdir. Eğitilen YSA modelinin eğitim verilerini ezberlememesi için değerlendirme verisi kullanılmakta ve YSA'nın giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi öğrenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca eğitim sonunda YSA'nın hiç görmediği verilerin test olarak verilmesiyle YSA çıkışının hedef ıkışları ne kadar doğrulukla tahmin ettiği test edilmektedir. Bu amaçla giriş-çıkış veri seti eğitim, değerlendirme ve test amaçlı olmak üzere sırasıyla %60, %20 ve %20 olarak bölünmüştür. Veri setinin bölünmesi, rasgele olacak şekilde belirtilen oranlarda verinin seçilmesiyle yapılmıştır.

Başlangıç YSA modelleri oluşturulurken ağırlıklar ve eşik değerler rasgele seçilmekte ve bu sebeple aynı katman ve nöron sayısına sahip YSA modellerinin eğitim sonrası performansları farklı olmaktadır. Bu da, GA optimizasyonu uygunluk değerini hesaplanmasında aynı YSA mimarilerin farklı sınıflandırma performansı göstermesine sebep olmaktadır. Bu durumu gidermek için YSA modellerinin eğitiminden önce ağırlık ve eşik değerleri aynı olacak şekilde ayarlanmaktadır. Bu amaçla, seçilebilecek en büyük YSA mimarisi olarak 3 adet gizli katman ve her katmanda 30 adet nöron içeren YSA modeli referans olacak şekilde oluşturulmaktadır. GA optimizasyonu sırasında oluşturulan farklı mimarideki modellerin ağırlık ve eşik değerleri eğitimden önce referans modelin değerlerine eşitlenmekte ve sonrasında eğitim gerçekleştirilmektedir. YSA eğitimi sonunda aynı mimariye sahip YSA modelleri aynı ağırlık ve eşik değerlerine sahip olmaktadır. Böylece aynı mimarilerin sınıflandırma yetenekleri sabitlenmektedir. Bu işlemede, GA optimizasyonunda YSA mimarisini temsil eden bireylerin uygunluk değerinin düzgün bir şekilde hesaplanmasını sağlanmaktadır.

Rulman arızaları sınıflandırılırken titreşim ve ses verileri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve titreşim ve ses verilerinin performansı karşılaştırılmıştır. Sınıflandırma yapılırken ilk olarak arızalı ve arızasız durumların birbirinden ayrılması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra arızalı verilerden arızanın iç bilezik mi yoksa dış bilezik mi olduğu tespit edilmiştir. Son olarak da verilerin hepsi birlikte sınıflandırılmış ve arızanın doğrudan teşhis edilmesi sağlanmıştır.

GA-YSA optimizasyonu sonucunda titreşim ve ses verilerinden elde edilen özelliklerin sınıflandırılması sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Sınıflandırma işlemleri 3 farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak rulman arızası

var-yok şeklinde sınıflandırma yapılmış ve arızasız durum ile arızalı durumlar birbirinden ayrılmıştır. İkinci olarak arızalı rulmanların hasar bölgelerini tespit etmeye yönelik sınıflandırma yapılmış ve rulman arızasının rulmanın iç veya dış bileziğinde olduğu tespit edilmiştir. Son olarak da arızasız durum ve tüm arızaların tümünün birlikte sınıflandırılması sonucu arıza varsa, yeri ve arıza boyutu hakkında bilgi veren sınıflandırma yapılmıştır.

Tablo 3.1’de titreşim verilerinin sınıflandırılması için GA optimizasyonu sonucu elde edilen YSA modelleri incelendiğinde, arıza yerini tespit etmeye yönelik modelin mimarisinin küçük olması iç ve dış bilezik arızasının titreşim verilerinde kolay bir şekilde ayrıldığını göstermektedir. Diğer sınıflandırma durumlarında ise 2 gizli katman bulunan YSA modellerinin seçildiği görülmektedir.

Tablo 3. 1 Titreşim verilerin sınıflandırması için elde edilen GA-YSA mimarileri

Arıza Sınıfları	Gizli Katman Adeti	Gizli Katmandaki Nöron Adeti	MSE Değeri			Korelasyon Değeri		
			Eğitim	Değerlendirme	Test	Eğitim	Değerlendirme	Test
Var-Yok	2	10 - 3	0.0001	0.0005	0	1	1	1
Arıza Yeri	1	4	0.0042	0.0031	0.0042	0.9923	1	1
Tüm Arızalar	2	12 - 7	0.1131	0.2529	0.3387	0.9883	0.9665	0.9567

Tablo 3.2’de titreşim verilerinin sınıflandırılması için GA optimizasyonu sonucu elde edilen YSA modelleri incelendiğinde, tüm arızaların bulunduğu verilerin tespit etmeye yönelik modelin mimarisinin 3 gizli katman ve ilk katmanda 28 nöron bulunması, ses verileri ile tüm arızaların diğer durumlara göre kolay ayrılmadığını göstermektedir. Diğer sınıflandırma durumlarında ise 2 gizli katman bulunan YSA modellerinin seçildiği görülmektedir.

Tablo 3. 2 Ses verilerin sınıflandırması için elde edilen GA-YSA mimarileri

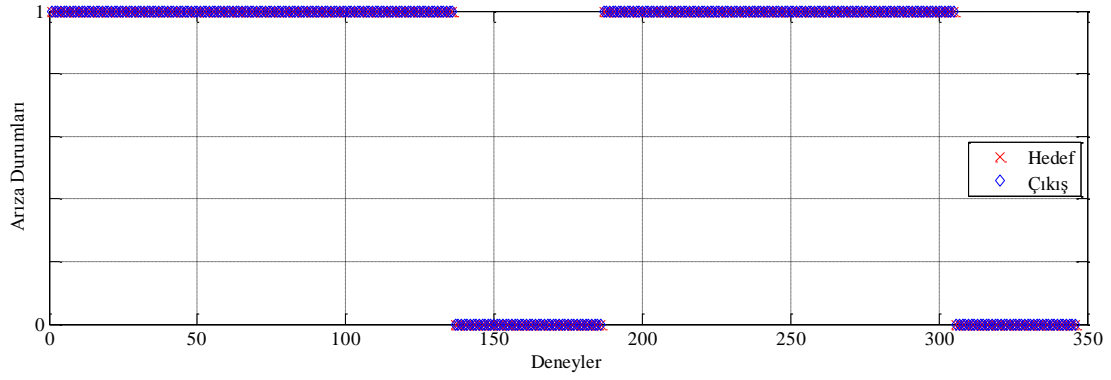
Arıza Sınıfları	Gizli Katman Adeti	Gizli Katmandaki Nöron Adeti	MSE Değeri			Korelasyon Değeri		
			Eğitim	Değerlendirme	Test	Eğitim	Değerlendirme	Test
Var-Yok	2	12 - 4	0.0008	0.0001	0.0001	1	1	1
Arıza Yeri	2	7 - 10	0.0039	0.0048	0.0001	0.9923	0.9769	1
Tüm Arızalar	3	28 - 10 - 4	0.2746	0.4467	0.5143	0.9632	0.9411	0.9374

YSA eğitimleri sonucunda Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de gösterilen modellerin MSE değerlerinin tüm verilerde düşük ve korelasyon değerlerinin 1’e yakın çıkması sınıflandırma işlemlerinin hem titreşim verilerinde hem de ses verilerinde başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir.

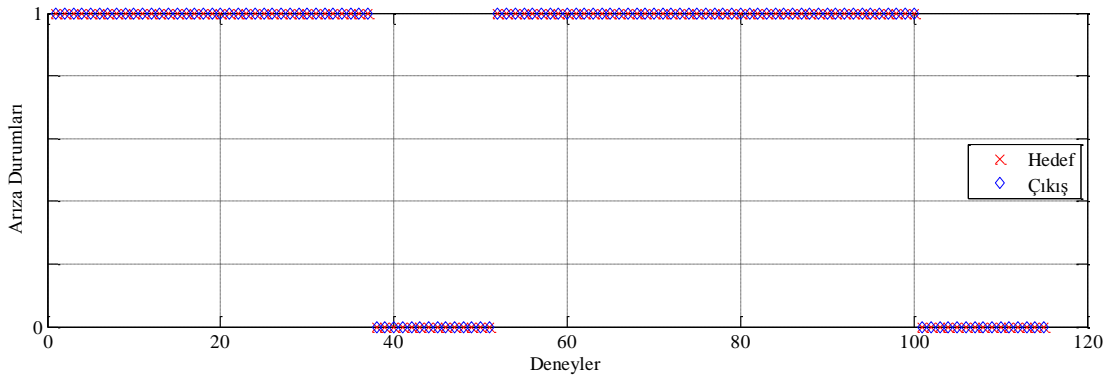
3.4.2. Genetik-YSA performansı

Bu kısımda GA optimizasyonu sonrasında elde edilen GA-YSA modelinin sınıflandırma başarısı eğitim, değerlendirme ve test performansları incelenmektedir. Titreşim verilerinin arıza var-yok, arıza yeri ve tüm arızalar olmak üzere sırasıyla Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’de gösterilmiştir. Şekillerde eğitim, değerlendirme ve test verileri sırasıyla ilgili şeklin a, b ve c kısımlarında gösterilmiştir. Arıza var-yok ve arızanın yeri tüm arızalara nazaran daha yüksek performansla sınıflandırıldığı Tablo 3.1’de verilen korelasyon değerleri ve Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’de gösterilen sınıflandırma sonuçlarından anlaşılmaktadır.

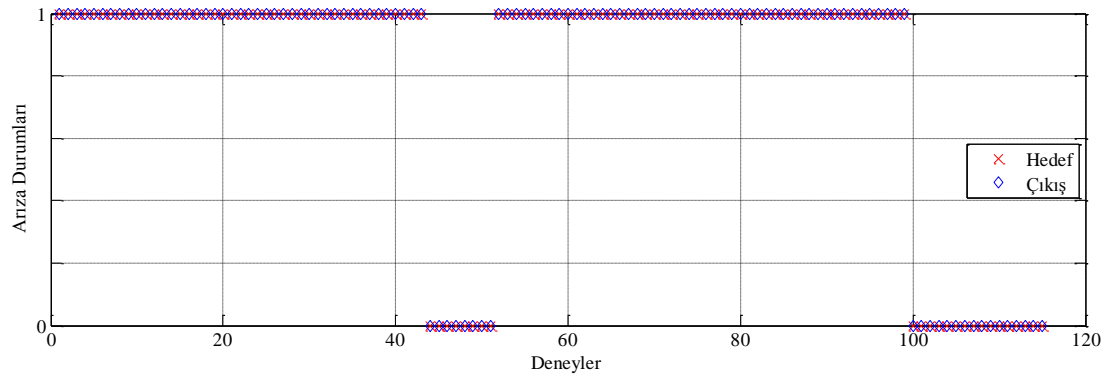
Şekil 3.31’de gösterilen arıza var-yok sınıflandırmasında 0 arızasız durumu, 1 de arızalı durumu temsil etmektedir.



a)



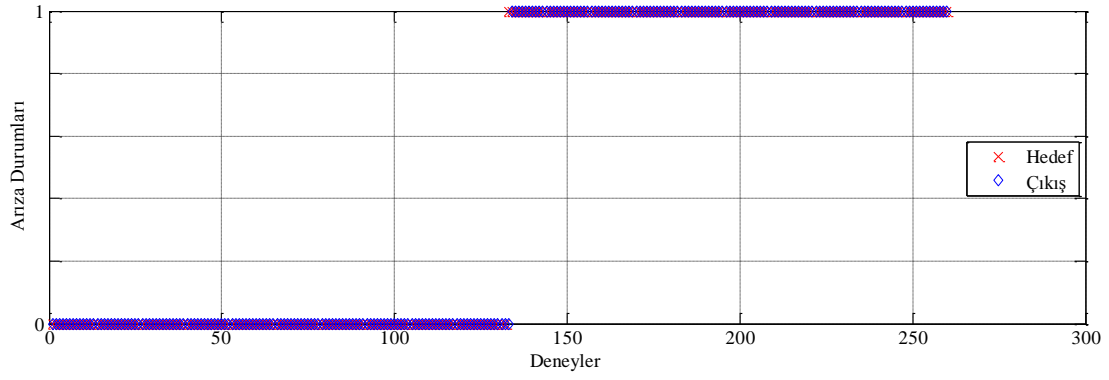
b)



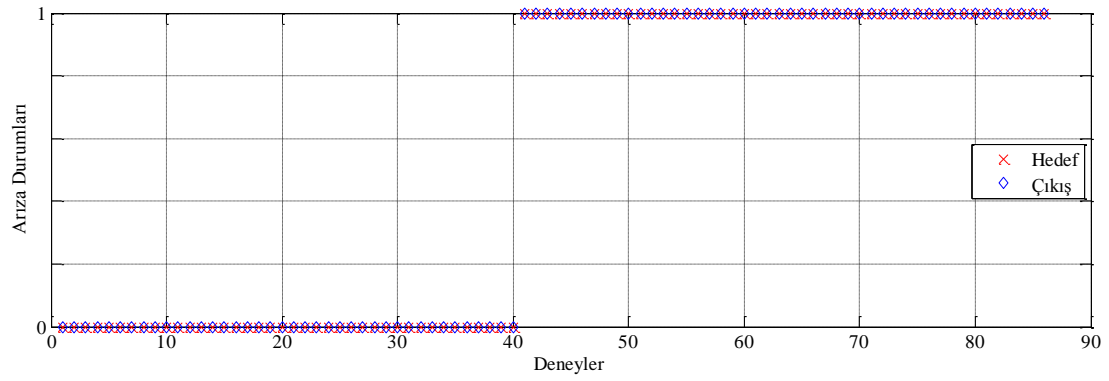
c)

Şekil 3. 31 Titreşim verilerinin GA-YSA ile Arıza Var-Yok sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test

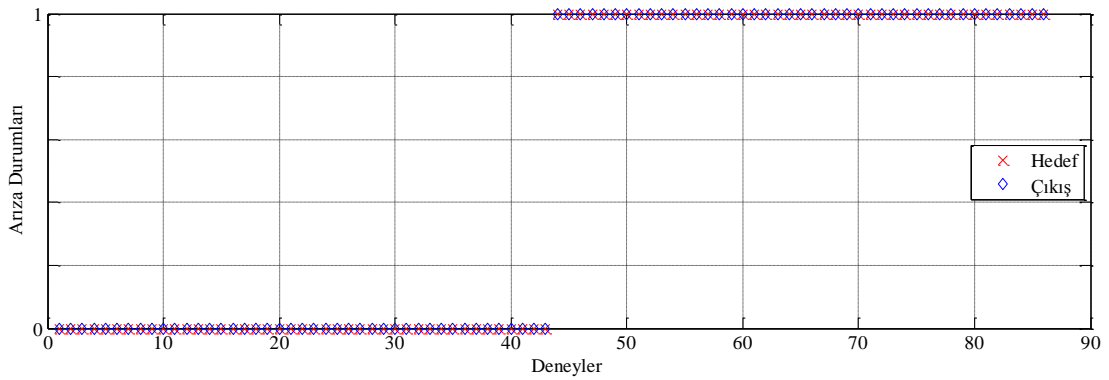
Şekil 3.32’de gösterilen grafikte arızalı durumlardan elde edilen deneylerden 0 iç bilezik arızasını, 1 de dış bilezik arızasını göstermektedir.



a)



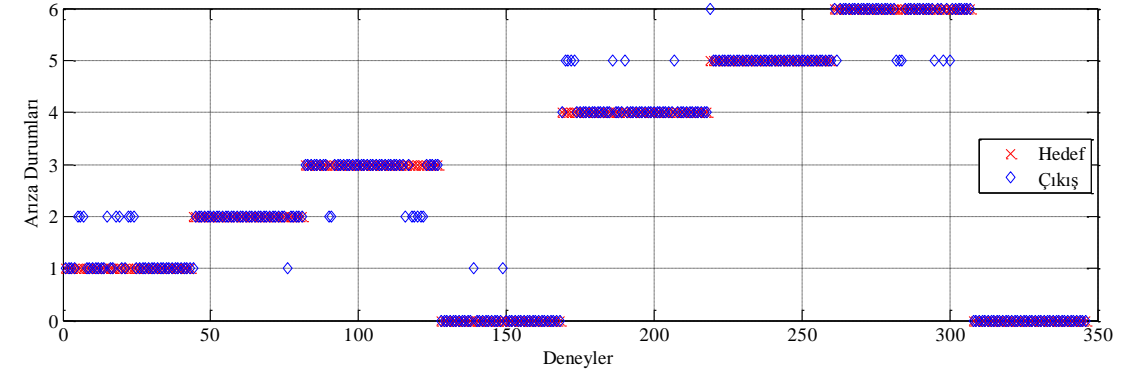
b)



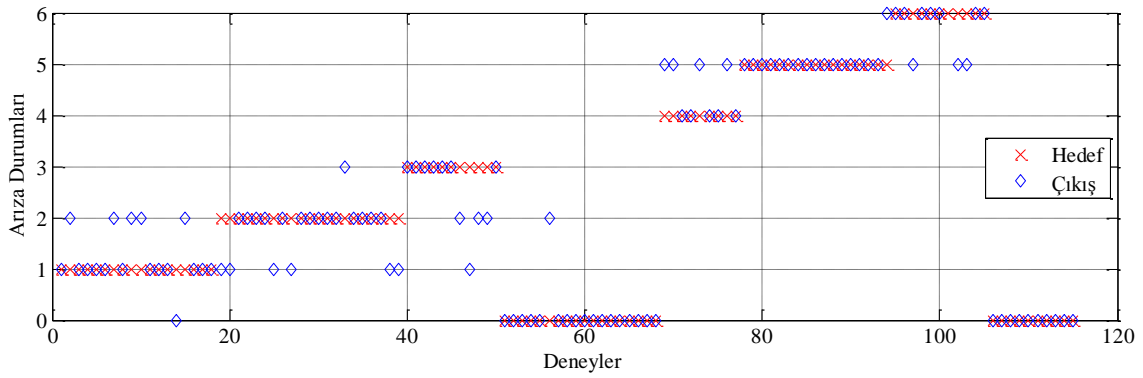
c)

Şekil 3. 32 Titreşim verilerinin GA-YSA ile Arıza Yeri sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test

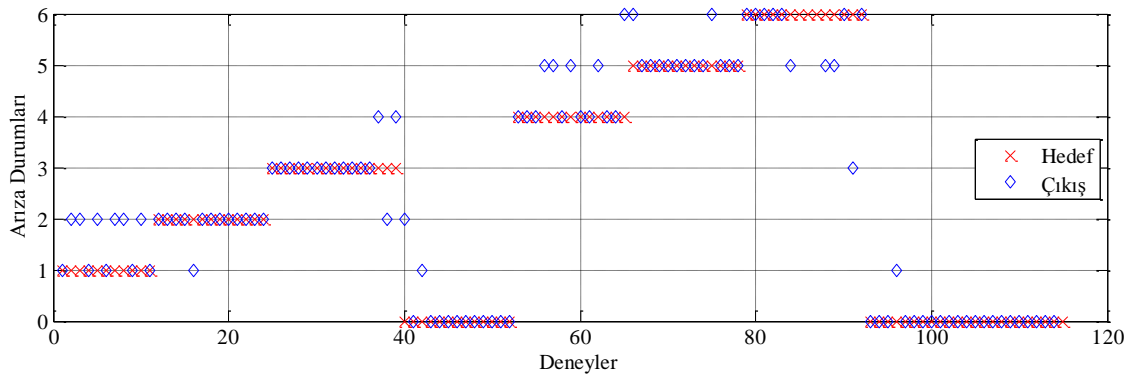
Şekil 3.33’de verilen grafikte ise arızasız ve tüm arızaların bulunduğu deneylerden sırasıyla 0 arızasız durumu, 1 İç 03x03 Tek arızasını, 2 İç 05x05 Tek arızasını, 3 İç 03x022 Çift arızasını, 4 Dış 03x03 Tek arızasını, 5 Dış 05x05 Tek arızasını, 6 Dış 03x02 arızasını temsil etmektedir.



a)



b)

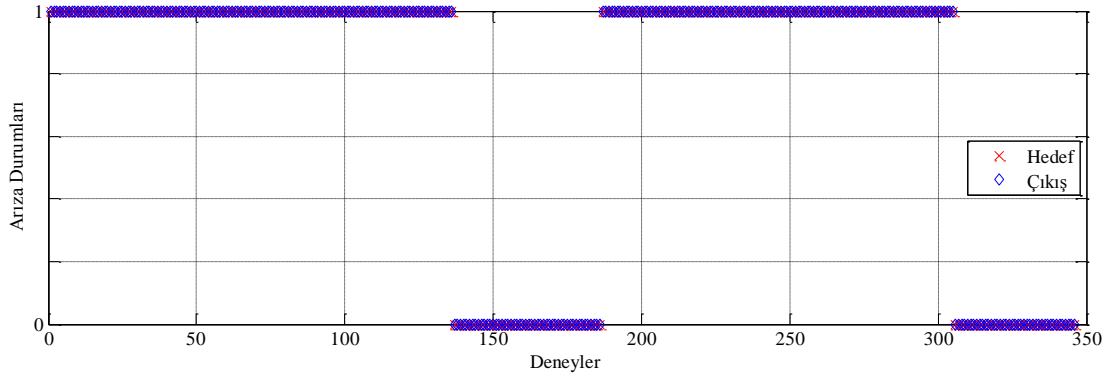


c)

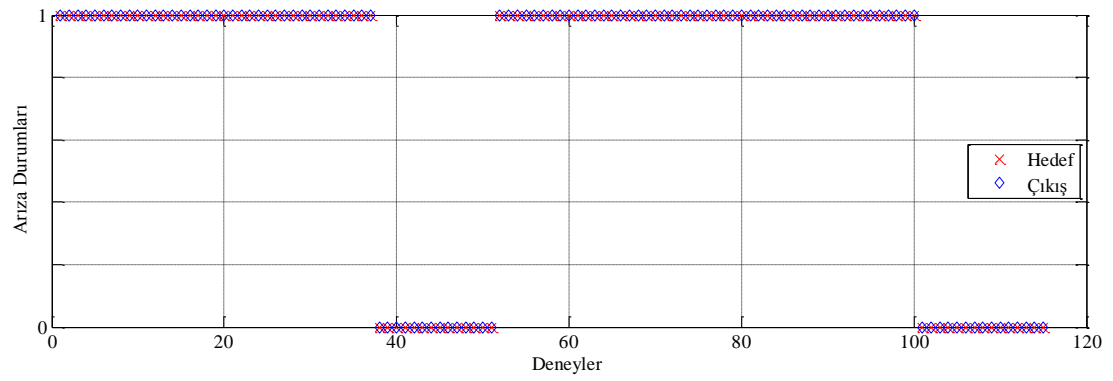
Şekil 3. 33 Titreşim verilerinin GA-YSA ile Tüm Arızalar sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test

Ses verilerinin arıza var-yok, arıza yeri ve tüm arızalar olmak üzere sırasıyla Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da gösterilmiştir. Şekillerde eğitim, değerlendirme ve test verileri sırasıyla ilgili şeklin a, b ve c kısımlarında gösterilmiştir. Arıza var-yok ve arızanın yeri tüm arızalara nazaran daha yüksek performansla sınıflandırıldığı Tablo 3.2'de verilen korelasyon değerleri ve Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da gösterilen sınıflandırma sonuçlarından anlaşılmaktadır.

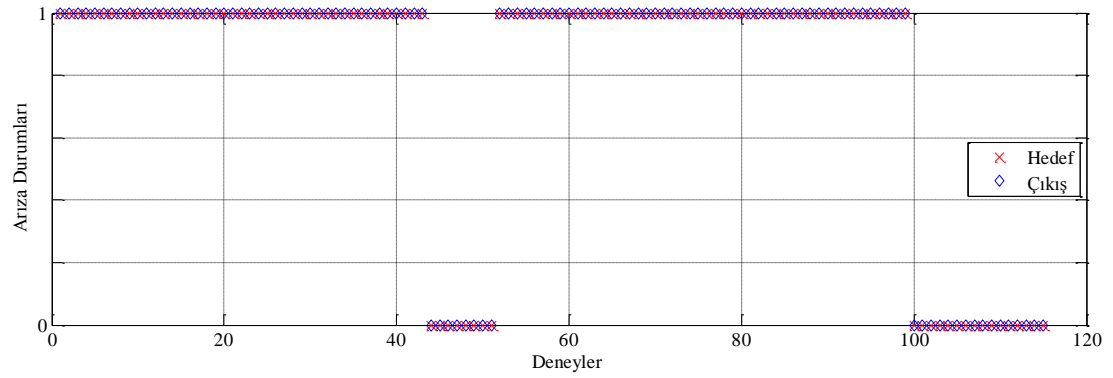
Şekil 3.34’de gösterilen arıza var-yok sınıflandırmasında 0 arızasız durumu, 1 de arızalı durumu temsil etmektedir.



a)



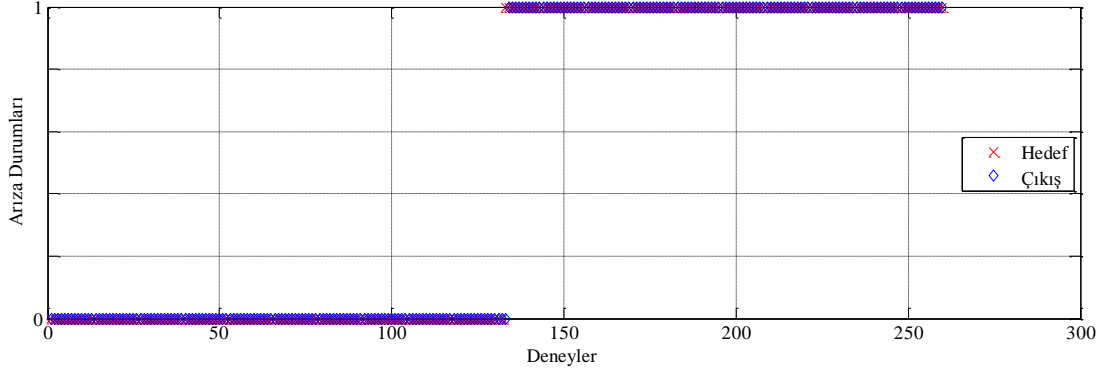
b)



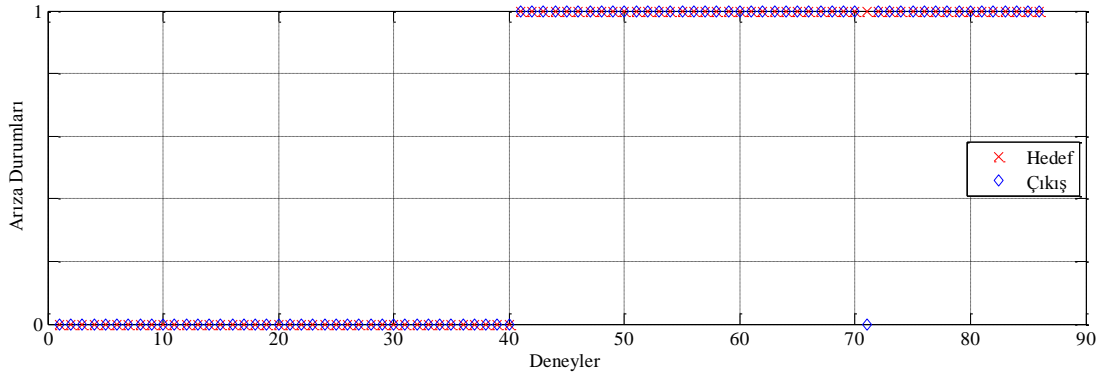
c)

Şekil 3. 34 Ses verilerinin GA-YSA ile Arıza Var-Yok sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test

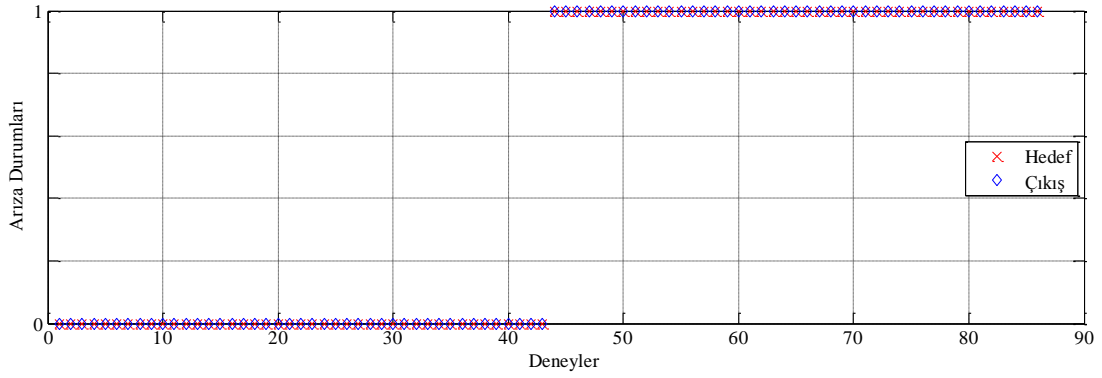
Şekil 3.35’de gösterilen grafikte arızalı durumlardan elde edilen deneylerden 0 iç bilezik arızasını, 1 de dış bilezik arızasını göstermektedir.



a)



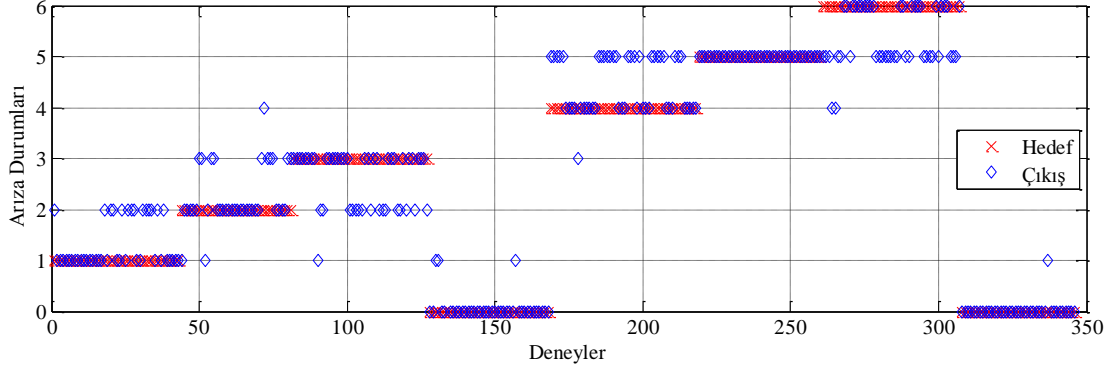
b)



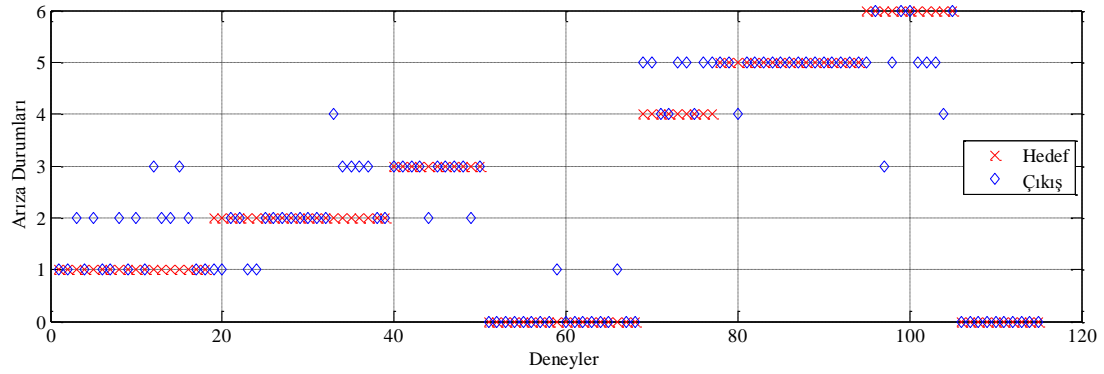
c)

Şekil 3. 35 Ses verilerinin GA-YSA ile arıza yeri sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test

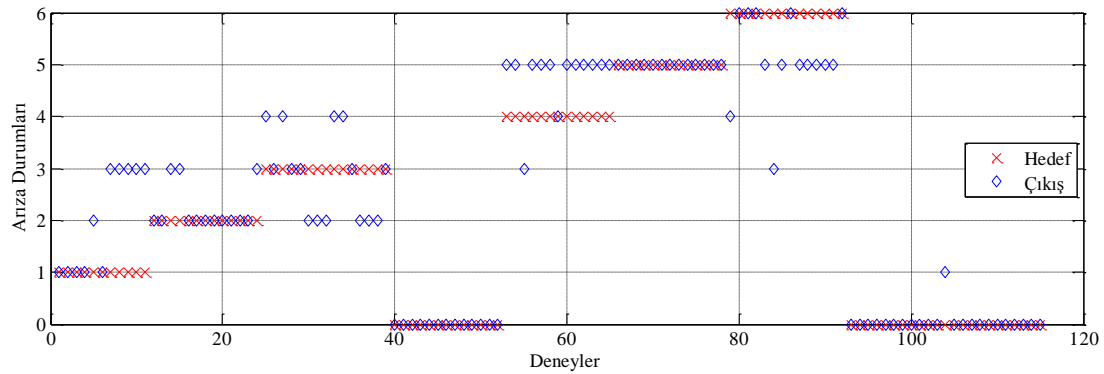
Şekil 3.36’da verilen grafikte ise arızasız ve tüm arızaların bulunduğu deneylerden sırasıyla 0 arızasız durumu, 1 İç 03x03 Tek arızasını, 2 İç 05x05 Tek arızasını, 3 İç 03x022 Çift arızasını, 4 Dış 03x03 Tek arızasını, 5 Dış 05x05 Tek arızasını, 6 Dış 03x02 arızasını temsil etmektedir.



a)



b)



c)

Şekil 3. 36 Ses verilerinin GA-YSA ile Tüm Arızalar sınıflandırma performansı; a) Eğitim, b) Değerlendirme, c) Test

4. SONUÇLAR

Rulmanın iç ve dış bileziğinde EDM ile oluşturulan farklı boyutlardaki arızaların teşhis edilmesi konusunda, rulman arıza deney seti geliştirilerek amaca yönelik tatmin edici sonuçlara ulaşmaya kadar deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, rulman test deney setinde 1000 ile 4500 d/dk arası 8 farklı devir hızlarında 200 ve 400 kg yük ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında rulmandan etrafa yayılan titreşim ve ses verileri algılayıcılar ve veri toplama cihazları üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen veriler Matlab programı kullanılarak sinyal işleme teknikleri ile incelenip rulman arıza teşhisi için başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Titreşim ve ses verileri ilk olarak zaman düzleminde TT, RMS, çarpıklık ve basıklık gibi farklı istatistiksel hesaplamalar kullanılarak farklı yük ve hızlarda elde edilen özellikler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ardından, arıza sinyali özelliklerinin daha net olarak ortaya konabilmesi için veriler frekans düzleminde incelenmiştir. Frekans düzleminde ilk olarak, verilerin bant-geçiren bir filtreden geçirilmesi neticesinde Hilbert dönüşümü ile zarf analizi yapılmış ve karakteristik hata frekanslarının daha belirgin hale gelmesi için güç spektrum yoğunluğu elde edilmiştir. Bu işlemler neticesinde, elde edilen karakteristik hata frekansı ve ilk üç harmoniğinin frekans ve genlik değerlerinin rulman arızalarını ayırt edecek özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen titreşim ve ses verileri incelendiğinde, zaman düzleminde incelenen TT, RMS, çarpıklık ve basıklık değerlerinin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. TT ve RMS değerlerinin, devir hızı, hata boyutu ve rulman üzerine uygulanan yüklemeye paralel arttığı, çarpıklık ve basıklık değerlerinde hızın ve uygulanan yükün artmasıyla bu değerlerde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Benzer bir durumun dış bilezik arızalarında da olduğu ve değişimin yaklaşık iki katı seviyelerine çıktığı belirlenmiştir.

Frekans düzleminde gösterilen şekiller incelendiğinde Tablo 2.3'de verilen karakteristik hata frekanslarının diğer bileşenlere nazaran daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca karakteristik hata frekansının harmoniklerinin de olduğu ve özellikle birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

Zaman ve frekans düzleminde elde edilen özellikler, YSA kullanılarak sınıflandırılmıştır. YSA mimari yapısının belirli tecrübelerle dayanarak oluşturulması ve nihai yapının en verimli çalışmayı temini noktasında minimum sayıda katman ve nöron içermesi gerekliliğinden YSA mimarisi GA ile optimize edilmiştir.

GA-YSA ile rulman arızaları sınıflandırılırken ilk olarak arızasız rulman ile arızalı rulmanlar birbirinden ayrılmıştır. Korelasyon sonuçlarının tüm verilerde 1 çıkması sınıflandırmanın her iki veride de %100 başarı ile gerçekleştirildiğini göstermektedir. İkinci olarak arızalı durumların arıza yerini tespit etmek için sınıflandırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Her iki veride de başarı yüksek olsa da titreşim verileri göreceli olarak daha yüksek doğrulukta sınıflandırılmıştır. Son olarak, bütün arıza durumlarının sınıflandırıldığı çalışmada ise her iki veride de performans diğer sınıflandırma çalışmalarına nazaran düşse de korelasyon değerleri 1'e yakın çıkmıştır. Sınıflandırma sonuçları, elde edilen titreşim ve ses verileri ile yüksek performansta sonuçlar alındığını göstermektedir.

Elde edilen sınıflandırma performansları değerlendirildiğinde ses verilerinin de titreşim verileri gibi yüksek doğrulukla rulman arızalarını tespit edebildiği gösterilmiştir. Ayrıca GA-YSA yönteminin döner makinelerde oluşan rulman arızalarını tespit etmede başarılı bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

4.1. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, farklı boyutlarda rulman arızalarını tespit etmek için öncelikle deneylerin yapılabileceği bir rulman test deney seti tasarlanmış ve üretilmiştir. Rulman test deney seti, rulmanlara tandem bağlantılı bir pnömatik silindir ile 200kg ve 500kg arasında yük uygulayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca rulman milinin bağlı olduğu servo motor ile rulman 200 ile 5000 d/dk arasında değişik hızlarda çalıştırılabilmektedir. Tasarlanan deney setinde eksen kaçıklığı, gevşeklik ve dengesizlik gibi titreşim oluşturabilecek mekanik arızaların üretim aşamasında mümkün olduğunca en aza indirilmesi sağlanmıştır. Böylece, rulmanların testleri sırasında oluşan titreşim ve sesin mümkün olduğunca rulman arıza kaynaklı olması sağlanmıştır.

Arızasız ve arızalı rulmanların farklı yük ve devirlerde çalışırken etrafa yaydığı titreşim ve ses değerleri, sinyal işleme teknikleri kullanılarak zaman ve frekans düzleminde incelenmiş ve arızaların ayırt edileceği karakteristik özellikleri elde edilmiştir. Bu özellikler GA-YSA kullanılarak sınıflandırılmış ve arızalarının yeri ve boyutu hakkında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. YSA tabanlı ile zaman kaybını minimum seviyeye indiren optimum bir mimari ile eğitim sınıflandırma modelini oluşturma sürecinde GA kullanılarak işlem süresini minimum seviyeye indirilmiştir. Elde edilen optimum bir mimari ile eğitim parametreleri bulunarak arıza teşhisi oldukça yüksek bir performansla gerçekleştirilmiştir.

Rulman arıza teşhis düzeneği tasarımı, imalatı, yapılan deneylerin yürütülmesi ve sonuçların elde edilmesi sürecinde çeşitli zorluklarla karşılaşmış olup bazılarını aşağıda kısaca işaret edilmiştir

Rulmana verilen arızanın boyutları, deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Aşırı boyutlu arızalar, çok yüksek titreşim ve sese sebep olmuş ve test düzeneğine zarar verecek sonuçlar doğurmuştur. Rulman arıza boyutlarının çok küçük seçilmesi durumunda ise, arıza boyutlarını ayırt edecek karakteristik özelliklerin elde edilmesi zorlaşmaktadır.

İvmeölçer ve mikrofondan veri alınırken, mil dönme frekansına uygun bir örnekleme zamanının seçilmesi yine deneme yanılma yoluyla gerçekleştirilmiştir. Örnekleme zamanının büyük seçilmesiyle veri sayısı artmış ve sinyal işleme süresi uzamıştır. Düşük ve yüksek hızlarda karakteristik hata frekansını elde etmek için farklı

sayılarda deneyler yapılmış ve bu deneyler neticesinde en uygun örnekleme zamanı elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmaya ilave olarak yapılacak bazı ekler, ileriki çalışmalarda daha verimli sonuç alınmasını sağlayabilir. Bunlar;

- Arızasız rulmanın kirli ortamlarda (kum, toz, demir tozu, nem vb.) uzun süre çalıştırılması sonucu elde edilecek farklı rulman arızaları üzerinde çalışılabilir.
- Sanayi ortamında farklı koşullarda çalışan rulmanlar üzerinde çalışma yapılarak online arıza teşhisi yapılabilir.
- Gerçekleştirilen yöntem ve algoritmalar bilgisayar ortamından gömülü sistemlere aktarılarak paralel işlem yapısı sayesinde daha hızlı arıza teşhisleri gerçekleştirilebilir.
- Mevcut rulman test deney setine modüler eklemeler yaparak eksen kaçıklığı, kaplin ayarsızlığı ve dengesizlik gibi çeşitli diğer mekanik arızaların tespitinde arıza daha geniş araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Kalyoncu, "Titreşim analizi ile makina elemanları arızalarının belirlenmesi," *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Mühendis ve Makina Dergisi*, vol. 47, pp. 28-35, (2006).
- [2] S. Orhan, H. Arslan ve N. Aktürk, "Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi," *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 18, p. 39, (2003).
- [3] C. Aliustaoğlu, "Rulman arızalarının gerçek zamanda analizi ve arıza kaynaklarının tespit edilmesi," in *Fen Bilimleri Enstitüsü Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi*, (2008).
- [4] Y. Lei, Z. He, Y. Zi ve Q. Hu, "Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, pp. 2280-2294, (2007).
- [5] F. Immovilli, A. Bellini, R. Rubini ve C. Tassoni, "Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1350-1359, (2010).
- [6] G.-L. Huang, Y.-B. Zhou, H. Guo ve X.-J. Shi, "Diagnosis method research on real modulation zoom envelope spectrum of rolling bearings," *China Measurement & Test*, vol. 5, p. 026, (2011).
- [7] Y. Ming, J. Chen ve G. Dong, "Weak fault feature extraction of rolling bearing based on cyclic Wiener filter and envelope spectrum," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 1773-1785, (2011).
- [8] X. Wang, Y. Zi ve Z. He, "Multiwavelet denoising with improved neighboring coefficients for application on rolling bearing fault diagnosis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 285-304, 1// (2011).
- [9] F. Cong, J. Chen, G. Dong ve F. Zhao, "Short-time matrix series based singular value decomposition for rolling bearing fault diagnosis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, (2012).
- [10] W.-C. Tsao, Y.-F. Li, D. D. Le ve M.-C. Pan, "An insight concept to select appropriate IMFs for envelope analysis of bearing fault diagnosis," *Measurement*, vol. 45, pp. 1489-1498, (2012).
- [11] G. Feng, A. Mustafa, J. Gu, D. Zhen, F. Gu ve A. Ball, "The real-time implementation of envelope analysis for bearing fault diagnosis based on wireless sensor network," in *Automation and Computing (ICAC), 2013 19th International Conference on*, (2013), pp. 1-6.
- [12] R. Jiang, J. Chen, G. Dong, T. Liu ve W. Xiao, "The weak fault diagnosis and condition monitoring of rolling element bearing using minimum entropy deconvolution and envelop spectrum," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 227, pp. 1116-1129, (2013).
- [13] W. Li, Z. Huang, H. Lin ve K. Ding, "Envelope analysis by wavelet-filter based spectral kurtosis for bearing health monitoring," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International*, (2013), pp. 1721-1724.

- [14] M.-C. Pan ve W.-C. Tsao, "Using appropriate IMFs for envelope analysis in multiple fault diagnosis of ball bearings," *International Journal of Mechanical Sciences*, (2013).
- [15] W. Sun, G. A. Yang, Q. Chen, A. Palazoglu ve K. Feng, "Fault diagnosis of rolling bearing based on wavelet transform and envelope spectrum correlation," *Journal of Vibration and Control*, vol. 19, pp. 924-941, (2013).
- [16] J. Z. Xiang, H. Zhu, M. J. Gao, F. J. Chen, X. J. Shi ve Y. L. Zhao, "EMD and Zoom Envelope Spectrum for Rolling Bearing Fault Diagnosis," *Advanced Materials Research*, vol. 791, pp. 841-844, (2013).
- [17] H. Li, J. Zhao, X. Zhang, H. Teng, R. Yang ve L. Hao, "Bearing Fault Diagnosis Method Using Envelope Analysis and Euclidean Distance," *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, (2014).
- [18] X. Wang, Z. He ve Y. Zi, "Spectral kurtosis of multiwavelet for fault diagnosis of rolling bearing," *Journal of Xi An Jiaotong University*, vol. 44, pp. 77-81, (2010).
- [19] Y. Cai, A. Li, L. Shi, X. Bai ve J. Shen, "Roller bearing fault detection using improved envelope spectrum analysis based on EMD and spectrum kurtosis," *J Vibr Shock*, vol. 30, pp. 167-172, (2011).
- [20] Z. Zhang, D. Wang, T. Wang, J. Lin ve D. Jiang, "Application of Delayed Autocorrelation and Spectral Kurtosis in Fault Diagnosis of Rolling Bearing," in *Proceedings of the 2012 Second International Conference on Electric Information and Control Engineering-Volume 01*, (2012), pp. 366-369.
- [21] Y. Jiang, B. Tang, Y. Qin ve W. Liu, "Feature extraction method of wind turbine based on adaptive Morlet wavelet and SVD," *Renewable energy*, vol. 36, pp. 2146-2153, (2011).
- [22] E.-L. Chen, X. Zhang, Y.-J. Shen ve X.-M. Cao, "Fault diagnosis of rolling bearings based on SVD denoising and blind signals separation," *Zhendong yu Chongji(Journal of Vibration and Shock)*, vol. 31, pp. 185-190, (2012).
- [23] Z.-F. Li, Y. Chai ve H.-F. Li, "Fault feature extraction method of rolling bearing based on singular value decomposition and morphological filtering," *Application Research of Computers*, vol. 4, p. 033, (2012).
- [24] B. Muruganatham, M. Sanjith, B. Krishnakumar ve S. Satya Murty, "Roller element bearing fault diagnosis using singular spectrum analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, (2012).
- [25] X. L. Wang, Y. X. Zhang, J. P. Zhu ve Z. Q. Shi, "Research on Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition and Kurtosis Criterion," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 432, pp. 304-309, (2013).
- [26] Z. Wang, C. Lu, Z. Wang, H. Liu ve H. Fan, "Fault diagnosis and health assessment for bearings using the Mahalanobis–Taguchi system based on EMD-SVD," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, (2013).
- [27] C. Wen ve C. D. Zhou, "Rolling Bearing Fault Feature Extraction Based on SVD-EEMD," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 411, pp. 1067-1071, (2013).
- [28] U. Benko, J. Petrovcic, D. Juricic, J. Tavcar, J. Rejec ve A. Stefanovska, "Fault diagnosis of a vacuum cleaner motor by means of sound analysis," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 276, pp. 781-806, (2004).

- [29] U. Benko, J. Petrovic, D. Juricic, J. Tavcar ve J. Rejec, "An approach to fault diagnosis of vacuum cleaner motors based on sound analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, pp. 427-445, **(2005)**.
- [30] A. M. Al-Ghamd ve D. Mba, "A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1537-1571, **(2006)**.
- [31] L. Cheng, S. Zhihuan ve L. Ping, "Bearing fault detection via wavelet packet transform and rough set theory," in *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on*, **(2004)**, pp. 1663-1666 Vol.2.
- [32] X. Lou ve K. A. K. A. Loparo, "Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 1077-1095, **(2004)**.
- [33] P. W. Tse, W. Yang ve H. Y. Tam, "Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 277, pp. 1005-1024, **(2004)**.
- [34] S. Abbasion, A. Rafsanjani, A. Farshidianfar ve N. Irani, "Rolling element bearings multi-fault classification based on the wavelet denoising and support vector machine," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, pp. 2933-2945, **(2007)**.
- [35] C. Junsheng, Y. Dejie ve Y. Yu, "Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, pp. 920-929, **(2007)**.
- [36] L. Zhen, H. Zhengjia, Z. Yanyang ve W. Yanxue, "Customized wavelet denoising using intra- and inter-scale dependency for bearing fault detection," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 313, pp. 342-359, **(2008)**.
- [37] H. Hong ve M. Liang, "Fault severity assessment for rolling element bearings using the Lempel-Ziv complexity and continuous wavelet transform," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 320, pp. 452-468, **(2009)**.
- [38] J. D. Wu ve J. J. Chan, "Faulted gear identification of a rotating machinery based on wavelet transform and artificial neural network," *Expert systems with applications*, vol. 36, pp. 8862-8875, **(2009)**.
- [39] Z. Yang, H. Si ve H. Zhao, "Condition Monitoring and Diagnostics for Complex System using Neural Networks," *Journal of Applied Sciences*, vol. 13, **(2013)**.
- [40] M. C. S. Reddy ve A. Sekhar, "Application of Artificial Neural Networks for Identification of Unbalance and Looseness in Rotor Bearing Systems," *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 11, pp. 69-84, **(2013)**.
- [41] A. Mohammed, R. Neilson, W. Deans ve P. MacConnell, "Crack detection in a rotating shaft using artificial neural networks and PSD characterisation," *Meccanica*, pp. 1-12, **(2013)**.
- [42] B. Huang, W. Xu ve X. Zou, "Rolling Bearing Diagnosis Based on LMD and Neural Network," **(2013)**.
- [43] M. Delgado Prieto, G. Cirrincione, A. Garcia Espinosa, J. Ortega ve H. Henao, "Bearing faults detection by a novel condition monitoring scheme based on statistical-time features and neural networks," **(2013)**.

- [44] M. Barakat, M. El Badaoui ve F. Guillet, "Hard competitive growing neural network for the diagnosis of small bearing faults," *Mechanical Systems and Signal Processing*, (2013).
- [45] M. Amar, I. Gondal ve C. Wilson, "Multi-size-window spectral augmentation: Neural network bearing fault classifier," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on*, (2013), pp. 261-266.
- [46] L. Zhang, X. Zhuang, B. Zhang ve Y. Yan, "Fault Diagnosis Method of Rolling Bearing Based on Immune Neural Network and DS Evidential Reasoning," in *Proceedings of the 2012 Second International Conference on Electric Information and Control Engineering-Volume 03*, (2012), pp. 412-415.
- [47] B. Rao, P. S. Pai ve T. Nagabhushana, "Failure Diagnosis and Prognosis of Rolling-Element Bearings using Artificial Neural Networks: A Critical Overview," in *Journal of Physics: Conference Series*, (2012), p. 012023.
- [48] P. K. Kankar, S. C. Sharma ve S. P. Harsha, "Vibration-based fault diagnosis of a rotor bearing system using artificial neural network and support vector machine," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 15, pp. 185-198, (2012).
- [49] K. C. Gryllias ve I. A. Antoniadis, "A Support Vector Machine approach based on physical model training for rolling element bearing fault detection in industrial environments," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, pp. 326-344, (2012).
- [50] H. M. Ertunc, H. Ocak ve C. Aliustaoglu, "ANN-and ANFIS-based multi-staged decision algorithm for the detection and diagnosis of bearing faults," *Neural Computing and Applications*, pp. 1-12, (2012).
- [51] M. Delgado, G. Cirrincione, A. Garcia, J. Ortega ve H. Henao, "Accurate bearing faults classification based on statistical-time features, curvilinear component analysis and neural networks," in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, (2012), pp. 3854-3861.
- [52] G. Bin, J. Gao, X. Li ve B. Dhillon, "Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets—Empirical mode decomposition feature extraction and neural network," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 27, pp. 696-711, (2012).
- [53] K. Zhang, Y. Li, P. Scarf ve A. Ball, "Feature selection for high-dimensional machinery fault diagnosis data using multiple models and radial basis function networks," *Neurocomputing*, vol. 74, pp. 2941-2952, (2011).
- [54] G. Vijay, S. P. Pai, N. Sriram ve R. B. Rao, "Bearing diagnostics—a radial basis function neural network approach," (2011).
- [55] P. Jayaswal, S. Verma ve A. Wadhvani, "Development of EBP-Artificial neural network expert system for rolling element bearing fault diagnosis," *Journal of Vibration and Control*, vol. 17, pp. 1131-1148, (2011).
- [56] E. De Moura, C. Souto, A. Silva ve M. Irmao, "Evaluation of principal component analysis and neural network performance for bearing fault diagnosis from vibration signal processed by RS and DF analyses," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 1765-1772, (2011).
- [57] C.-C. Wang, Y. Kang, P.-C. Shen, Y.-P. Chang ve Y.-L. Chung, "Applications of fault diagnosis in rotating machinery by using time series analysis with neural network," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 1696-1702, (2010).

- [58] N. Saravanan, V. Siddabattuni ve K. Ramachandran, "Fault diagnosis of spur bevel gear box using artificial neural network (ANN), and proximal support vector machine (PSVM)," *Applied Soft Computing*, vol. 10, pp. 344-360, **(2010)**.
- [59] C. Castejon, O. Lara ve J. Garcia-Prada, "Automated diagnosis of rolling bearings using MRA and neural networks," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, pp. 289-299, **(2010)**.
- [60] Z. Shen, N. Yao, H. Dong ve Y. Yao, "Application of Twin Support Vector Machine for Fault Diagnosis of Rolling Bearing," in *Mechatronics and Automatic Control Systems*: Springer, **(2014)**, pp. 161-167.
- [61] X. Zhang ve J. Zhou, "Multi-fault diagnosis for rolling element bearings based on ensemble empirical mode decomposition and optimized support vector machines," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 41, pp. 127-140, **(2013)**.
- [62] H. Ao, J. Cheng, Y. Yang ve T. K. Truong, "The support vector machine parameter optimization method based on artificial chemical reaction optimization algorithm and its application to roller bearing fault diagnosis," *Journal of Vibration and Control*, p. 1077546313511841, **(2013)**.
- [63] S.-D. Wu, P.-H. Wu, C.-W. Wu, J.-J. Ding ve C.-C. Wang, "Bearing fault diagnosis based on multiscale permutation entropy and support vector machine," *Entropy*, vol. 14, pp. 1343-1356, **(2012)**.
- [64] Y. Wang, S. Kang, Y. Jiang, G. Yang, L. Song ve V. Mikulovich, "Classification of fault location and the degree of performance degradation of a rolling bearing based on an improved hyper-sphere-structured multi-class support vector machine," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 29, pp. 404-414, **(2012)**.
- [65] J. Ma, J. Wu, Y. Fan, X. Wang ve Z. Shao, "Fault diagnosis of rolling bearing based on the PSO-SVM of the mixed-feature," in *Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), 2012 4th*, **(2012)**, pp. 131-134.
- [66] H. Kumar, T. R. Kumar, M. Amarnath ve V. Sugumaran, "887. Fault diagnosis of antifriction bearings through sound signals using support vector machine," **(2012)**.
- [67] T. Guishuang, S. Wang ve C. Zhang, "A method for rolling bearing fault diagnosis based on the power spectrum analysis and support vector machine," in *Industrial Informatics (INDIN), 2012 10th IEEE International Conference on*, **(2012)**, pp. 546-549.
- [68] Y.-j. Xu ve S.-d. Xiu, "A new and effective method of bearing fault diagnosis using wavelet packet transform combined with support vector machine," *Journal of computers*, vol. 6, pp. 2502-2509, **(2011)**.
- [69] V. Sugumaran ve K. Ramachandran, "Effect of number of features on classification of roller bearing faults using SVM and PSVM," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 4088-4096, **(2011)**.
- [70] M. Saimurugan, K. Ramachandran, V. Sugumaran ve N. Sakthivel, "Multi component fault diagnosis of rotational mechanical system based on decision tree and support vector machine," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 3819-3826, **(2011)**.
- [71] L.-H. Lai, H.-S. Wu, J.-X. Lv, F. Liu ve Y.-R. Zhu, "SVM Recognition Method Based on EMD and Sample Entropy in Rolling Bearing Fault Diagnosis," *Coal Mine Machinery*, vol. 1, p. 110, **(2011)**.

- [72] P. Konar ve P. Chattopadhyay, "Bearing fault detection of induction motor using wavelet and Support Vector Machines (SVMs)," *Applied Soft Computing*, vol. 11, pp. 4203-4211, **(2011)**.
- [73] P. Kankar, S. C. Sharma ve S. Harsha, "Rolling element bearing fault diagnosis using autocorrelation and continuous wavelet transform," *Journal of Vibration and Control*, vol. 17, pp. 2081-2094, **(2011)**.
- [74] G. Jia, S. Yuan ve C. Tang, "Fault Diagnosis of Roller Bearing Based on PCA and Multi-class Support Vector Machine," in *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*: Springer, **(2011)**, pp. 198-205.
- [75] R. Hao, Z. Peng, Z. Feng ve F. Chu, "Application of support vector machine based on pattern spectrum entropy in fault diagnostics of rolling element bearings," *Measurement Science and Technology*, vol. 22, p. 045708, **(2011)**.
- [76] X. Zhang, X. Chen ve Z. He, "Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimization by an ant colony algorithm," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 224, pp. 217-229, **(2010)**.
- [77] G.-m. Xian, "Mechanical failure classification for spherical roller bearing ofhydraulic injection molding machine using DWT-SVM," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 6742-6747, **(2010)**.
- [78] S. Wang, Q. Zhang, T. Jin ve S. Song, "Study on the fault diagnosis based on wavelet packet and support vector machine," in *Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on*, **(2010)**, pp. 3457-3461.
- [79] R. Hao, Z. Feng ve F. Chu, "Application of support vector machine based on pattern spectrum entropy in fault diagnostics of bearings," in *Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM'10.*, **(2010)**, pp. 1-6.
- [80] B. Li, P.-y. Liu, R.-x. Hu, S.-s. Mi ve J.-p. Fu, "Fuzzy lattice classifier and its application to bearing fault diagnosis," *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 1708-1719, **(2012)**.
- [81] V. Sugumaran ve K. Ramachandran, "Fault diagnosis of roller bearing using fuzzy classifier and histogram features with focus on automatic rule learning," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 4901-4907, **(2011)**.
- [82] Y. Pan, J. Chen ve X. Li, "Bearing performance degradation assessment based on lifting wavelet packet decomposition and fuzzy c-means," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, pp. 559-566, **(2010)**.
- [83] B. Manju, A. Rajan ve V. Sugumaran, "A new wavelet feature for fault diagnosis of roller bearings using decision tree," *International Journal*, **(2013)**.
- [84] M. Demetgul, "Fault diagnosis on production systems with support vector machine and decision trees algorithms," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-12, **(2012)**.
- [85] M. Amarnath ve V. Sugumaran, "of the Paper: Exploiting Sound Signals for Fault Diagnosis of Bearings Using Decision Tree," *Measurement*, **(2012)**.
- [86] M. Boumahdi, J.-P. Dron, S. Rechak ve O. Cousinard, "On the extraction of rules in the identification of bearing defects in rotating machinery using decision tree," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 5887-5894, **(2010)**.
- [87] R. B. W. Heng ve M. J. M. Nor, "Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition," *Applied Acoustics*, vol. 53, pp. 211-226, **(1993)**.

- [88] S. K. Lee ve P. R. White, "The enhancement of impulsive noise and vibration signals for fault detection in rotating and reciprocating machinery," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 217, pp. 485-505, (1998).
- [89] B. Eugene Parker, H. A. Ware, D. P. Wipf, W. R. Tompkins, B. R. Clark, E. C. Larson ve H. Vincent Poor, "Fault Diagnostics Using Statistical Change Detection in the Bi-spectral domain," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, pp. 561-570, (2000).
- [90] B. Liu, S. F. Ling ve R. Gribonval, "Bearing failure detection using matching pursuit," *Ndt & E International*, vol. 35, pp. 255-262, (2002).
- [91] B. S. Yang, T. Han ve J. L. An, "ART-KOHONEN neural network for fault diagnosis of rotating machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 645-657, (2004).
- [92] K. Mazanoğlu, "Roller bearing failure detection using vibration analysis," in *Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi*, (2004).
- [93] Z. Kiral ve H. Karagülle, "Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1967-1991, (2006).
- [94] S. Orhan, N. Akturk ve V. Celik, "Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies," *Ndt & E International*, vol. 39, pp. 293-298, (2006).
- [95] H. Arslan, E. Aslan ve N. Aktürk, "Bilyalı Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi Yöntemiyle İncelenmesi," *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 21, pp. 541-552, (2006).
- [96] C. Aliustaoğlu, H. M. Ertunç ve H. Ocağ, "Arıza gözlemlenmeye yönelik rulman hata tespit algoritmalarının karşılaştırmalı analizi," in *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'08*, İstanbul, (2008).
- [97] C. Aliustaoğlu, H. Ocağ ve H. M. Ertunç, "Rulman Titreşim Analizi İle Bölgesel Hataların İncelenmesi," in *TOK'07, 5-7 Eylül Sabancı Üniversitesi*, İstanbul, (2007).
- [98] L. Zhen, H. Zhengjia, Z. Yanyang ve C. Xuefeng, "Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 79, pp. 318-338, (2008).
- [99] Y. He, X. Zhang ve M. I. Friswell, "Defect Diagnosis for Rolling Element Bearings Using Acoustic Emission," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 131, pp. 061012-10, (2009).
- [100] X. L. Zhang, X. F. Chen ve Z. J. He, "Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimization by an ant colony algorithm," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 224, pp. 217-229, (2010).
- [101] A. Choudhury ve N. Tandon, "Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings," *Tribology International*, vol. 33, pp. 39-45, (2000).
- [102] A. Saxena ve A. Saad, "Evolving an artificial neural network classifier for condition monitoring of rotating mechanical systems," *Applied Soft Computing*, vol. 7, pp. 441-454, (2007).
- [103] İ. Y. Önel, "Üç fazlı asenkron motorlarda rulman arızalarını tespit etmek üzere X-Y dönüşümü ve RTFA yapay sinir ağı algoritması içeren yeni bir yöntemin

- tasarlanması ve uygulanması," in *Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi*, (2005).
- [104] S. T. İnal, "Diagnosing the cause of the bearing defects by means of signal analysis of online vibro-acoustic records," in *Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul: Marmara Üniversitesi*, (2008).
- [105] Wikipedia, "Çarpıklık," <http://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87arp%C4%B1k%C4%B1k>, (2013).
- [106] M. Lebold, K. McClintic, R. Campbell, C. Byington ve K. Maynard, "Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics," in *54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia Beach, VA, (2000), pp. 623-634.
- [107] C. B. Blog, "Risk Analysis," <http://www.calgarybusinessblog.com/articles/risk-analysis-calculating-m.html>, (2013).
- [108] C. Aliustaoğlu, H. Ocak ve H. M. Ertunç, "Rulman Titreşim Analizi ile Bölgesel Hataların İncelenmesi," in *TOK'07*, İstanbul, (2007), pp. 451-456.
- [109] S. A. McInerny ve Y. Dai, "Basic vibration signal processing for bearing fault detection," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 149-156, (2003).
- [110] http://tr.wikipedia.org/wiki/Yapay_sinir_a%C4%9Flar%C4%B1, "Yapay Sinir Ağları," (25.05.2007).
- [111] M. T. Hagan, H. B. Demuth ve M. Beale, *Neural Network Design*. Boston: PWS, (1997).
- [112] M. H. Beale, M. T. Hagan ve H. B. Demuth, *Neural Network Toolbox™ User's Guide*, (2013).
- [113] M. Ünal, H. Erdal ve V. Topuz, "Trajectory Tracking Performance Comparison Between Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization for PID Controller Tuning on Pressure Process," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. DOI 10.1002/cae.20420, (2010).
- [114] Ç. Elmas, *Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Uygulama)* Seçkin Yayınları, (2003).
- [115] Matlab, "Neural Network," (2006).
- [116] O. Engin, "Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma ile Çözüm Performansının Arttırılmasında Parametre Optimizasyonu," (2001).
- [117] M. Dorigo, "Ant Algorithms for Discrete Optimization," *Artificial Life*, vol. 5, p. 137, (1999).
- [118] V. Topuz, "Bulanık Genetik Proses Kontrolü," in *Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul: Marmara Üniversitesi*, (2002).
- [119] P. M. Norgaard, "The Neural Network Based System Identification Toolbox: For use with MATLAB," 1997.
- [120] M. Demetgul, M. Unal, I. N. Tansel ve O. Yazıcıoğlu, "Fault diagnosis on bottle filling plant using genetic-based neural network," *Advances in Engineering Software*, vol. 42, pp. 1051-1058, 12// (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammet ÜNAL
Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli, 1983
Yabancı Dili : İngilizce
E-Posta : munal@marmara.edu.tr

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite/Lise	Mezuniyet Yılı
Lise	Sayısal	Denizli Türk Eğitim Vakfı Anadolu Lisesi	2001
Üniversite	Bilgisayar ve Kontrol Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2005
Y. Lisans	Bilgisayar ve Kontrol Eğitimi	Marmara Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü	2008

İş Deneyimi

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005	Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi	Araştırma Görevlisi

Bilimsel Eserler:

1. Kitap

- ✓ Ünal, M., Ak, A., Topuz, V. & Erdal, H. (2012). Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms. Springer Almanya

2. Makale (Uluslararası SCI Kapsamında Taranan Dergilerde)

- ✓ Ünal, M., Erdal, H. & Topuz, V. (2012). Trajectory tracking performance comparison between genetic algorithm and ant colony optimization for PID controller tuning on pressure process. Computer Applications in Engineering Education. Sayı 3. Cilt 20 sf 518-528
- ✓ M.Demetgul, Ünal, M., Tansel, I. N. & Yazıcıoğlu, O. (2011). Fault diagnosis on bottle filling plant using genetic-based neural network. Advances in Engineering Software. Sayı 12. Cilt 42 sf 1051-1058

3. Kongre(Sempozyum) Etkinlikleri

- ✓ Ünal, M., Onat, M., Demetgül, M. & Küçük, H. (2013). Faults Diagnosis of Bearing by Sound Analysis and Artificial Neural Networks, 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13). Istanbul, Turkey
- ✓ Ünal, M., Demetgul, M., Onat, M. & Küçük, H. (2013). Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Feature Extraction and Neural Network Algorithm. The 6th International Conference on Sensors and Signals (SENSIG '13), Lemesos, Cyprus
- ✓ Ünal, M., Sarıcaıyr, H., Barutcuoglu, S. & Uce, M. (2011). Modelling of the Effect of Concentration and Temperature on Reaction Time By Means of Artificial Neural Networks World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications. Lisbon, Portugal
- ✓ Ünal, M., Yıldız, Z., Yıldız, K. & Dal, V. (2011). Modeling of Seam Strength and Elongation at Break Values in Poplin Fabrics by Using Artificial Neural Network AUTEX 2011. Mulhouse, FRANCE,
- ✓ Ünal, M., Onat, M. & Bal, A. (2010). Karınca Kolonisi Algoritması ile Hücresel Yapay Sinir Ağı Eğitimi IEEE 18.Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2010). Diyarbakır, Türkiye
- ✓ Kement, C., Kazdal, F., Yanlık, Ş., Ünal, M. & Onat, M. (2010). Dağınık Görüntü Parçalarından Bütün Görüntünün Oluşturulması IEEE 18.Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2010). Diyarbakır, Türkiye
- ✓ Ünal, M., Savaş, K., Topuz, V. & Erdal, H. (2010). Web Based Control Simulations Environment (WBCSE) for Control Education with MATLAB International Educational Technology Conference. İstanbul, Türkiye
- ✓ Şenyürek, V. Y., Ünal, M. & Varol, H. S. (2010). Genetic Optimized Wavelet Denoising for FOG Signals International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications. Kayseri, Türkiye
- ✓ Demetgül, M., Ünal, M., Onat, M. & Tansel, İ. N. (2010). Fault Diagnostics of a Small Scale Model of Industrial Temperature Control System 1 th International Symposium on Computing in Science & Engineering. Kuşadası, Aydın, Türkiye
- ✓ Ünal, M., Erdal, H., Topuz, V. & Ergüzel, T. T. (2007). ISAC Robot Kolunun Yörünge Takibi İçin PID Kontrolörün Genetik Algoritma ile Optimizasyonu UMES. Kocaeli, Türkiye