

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RULMAN ARIZALARININ GERÇEK ZAMANDA ANALİZİ VE ARIZA
KAYNAKLARININ TESPİT EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cüneyt ALIUSTAOĞLU

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. H. Metin ERTUNÇ

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RULMAN ARIZALARININ GERÇEK ZAMANDA ANALİZİ VE ARIZA
KAYNAKLARININ TESPİT EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cüneyt ALIUSTAOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 18 Eylül 2008

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. H. Metin ERTUNÇ



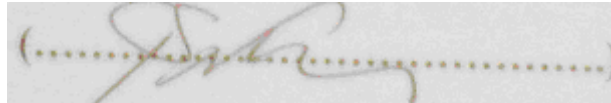
Üye

Yrd. Doç. Dr. Hasan OCAK



Üye

Yrd. Doç. Dr. Şeref Naci ENGİN



KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yuvarlanma esasına göre çalışan makine elemanlarına yuvarlanmalı yatak ya da rulman denilir. Rulmanlar mekanik sistemlerde sıklıkla kullanılan makina elemanlarıdır. Günümüzde çeşitli üreticilerin özel imalatları yanı sıra standart olarak kolayca bulunabilmekte ve montajları sorunsuz yapılabilmektedir. Bu elemanların kullanıldıkları sistemlerde bazı sorunlar ile karşılaşmaları durumunda kullanıldıkları yapıya da zarar vermeleri söz konusudur. Bu istenmeyen durumlara karşı çeşitli hata gözlemlene sistemleri geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da frekans ve zaman uzayında tanımlı ve yapay zeka tekniklerini kullanan yeni çözüm önerileri ortaya atılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan test cihazı ve sarf gereçleri 106M208 no'lu Tübitak projesinden karşılanmıştır. Bu katkılarından dolayı Tübitak kurumuna, deneyler sırasında beni yönlendiren Yrd. Doç. Dr. H. Metin Ertunç'a, yeni fikirlerle destekleyen Yrd. Doç. Dr. Hasan Ocak'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SEMBOLLER	vi
RULMAN ARIZALARININ GERÇEK ZAMANDA ANALİZİ VE ARIZA KAYNAKLARININ TESPİT EDİLMESİ	vii
THE REAL TIME ANALYSIS and DIAGNOSIS OF BEARING FAULTS.....	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Bakım Yöntemleri ve Kestirimci Bakım	2
1.2 Literatürde Bulunan Çalışmalar	5
2. TEORİK ESASLAR	8
2.1 Frekans/Zaman Analiz Yöntemleri	8
2.1.1 Yüksek frekans demodülasyonu.....	9
2.1.2 Rulman hata karakteristikleri	11
2.1.3 Dalgacık dönüşümü	12
2.1.4 Yaklaşık entropi.....	14
2.2 Yapay Zeka Teknikleri	15
2.2.1 Bulanık mantık	15
2.2.2 Yapay sinir ağları.....	18
3. DENEY DÜZENEGİ	23
3.1 Veri Toplama Sistemi	24
3.2 Bölgesel Hataların Oluşturulması	25
3.3 Termal Görüntüleme	28
4. YÖNTEM VE DENEYSEL SONUÇLAR	29
4.1 Frekans Analizi	29
4.2 Gerçek Zamanda Hata Tespiti.....	37
4.3 Yaklaşık Entropi Analizi	42
4.4 Yapay Zeka Teknikleri	46
4.4.1 Bulanık mantık	46
4.4.2 Yapay sinir ağları.....	52
4.5 Termal Görüntüleme Yöntemi	56
5. GENEL SONUÇLAR	60
6. KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	62
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Rulman ve Bölümleri	1
Şekil 2.1: Titreşimlerin oluşması.....	10
Şekil 2.2: Zarf Analizi.....	11
Şekil 2.3: Temas açısı 0° , bilya sayısı $N=9$ olan rulmana ait temel özellikler. (6205).	12
Şekil 2.4: Ayrık dalgacık dönüşümü.....	13
Şekil 2.5: Dalgacık paket dönüşümü	14
Şekil 2.6: Klasik küme örneği.	16
Şekil 2.7: Bulanık küme örneği.	16
Şekil 2.8: Üçgen ve yamuk ÜF.....	17
Şekil 2.9: YSA yapısı.....	19
Şekil 2.10: Geri yayılım algoritması.....	20
Şekil 3.1: Deney düzeneği.....	24
Şekil 3.2: İç bilezik hatası	26
Şekil 3.3 Dış bilezik hatası.....	26
Şekil 3.4: Bilya hatası	27
Şekil 4.1: Yüksek frekans demodülasyonuna tabi tutulmuş normal rulman titreşim verilerinin frekans spektrumu (1600 devir/dk hızında).	30
Şekil 4.2: Dış bilezik hata frekansları (1600 devir/dk).	32
Şekil 4.3: İç bilezik hata frekansları (1600 devir/dk).	33
Şekil 4.4: Dış bilezik hata frekansları (2000 devir/dk).	34
Şekil 4.5: Dış bilezik hata frekansları (2000 devir/dk).	35
Şekil 4.6: Frekans spektrumunda temel hata harmoniklerine ait genliklerin hatanın genişliği ile değişimi (1600 devir/dk).	36
Şekil 4.7: Kullanıcı ara yüzü.	37
Şekil 4.8: Katsayıların hesaplanması.	39
Şekil 4.9: 0.3mm iç ve dış bilezik hatasına sahip rulmana ait titreşim verisi ve bu veriye ait frekans cevabı.	40
Şekil 4.10: Normal rulmana ait titreşim verisi ve bu veriye ait frekans cevabı.	41
Şekil 4.11: Gerçek zamanda hata tespiti.	42
Şekil 4.12: 1200 devir/dk için ApEn değerleri.....	43
Şekil 4.13: 1600 devir/dk için ApEn değerleri.....	44
Şekil 4.14: 2000 devir/dk için ApEn değerleri.....	45
Şekil 4.15: Bulanık mantık kullanıcı ara yüzü.	47
Şekil 4.16: Bulanık sisteme ait giriş üyelik fonksiyonları	48
Şekil 4.17: Bulanık sisteme ait çıkış üyelik fonksiyonları.....	48
Şekil 4.18: Az kullanılan rulmana ait ham veriler	50
Şekil 4.19: 0.1mm yapay dış bilezik hatasına sahip rulmana ait ham veriler	51
Şekil 4.20: Çevrimiçi bulanık hata gözlemeleme sistemi.	52
Şekil 4.21: Hatasız rulmanın YSA ile tespiti	55
Şekil 4.22: İç bilezik hatalı rulmanın YSA ile tespiti.....	55
Şekil 4.23: Dış bilezik hatalı rulmanın YSA ile tespiti.....	56

Şekil 4.24: Hatasız rulmana ait termal görüntü.	57
Şekil 4.25: 0.3 mm genişliğinde iç bilezik hatasına sahip rulman.	57
Şekil 4.26: 1 mm genişliğinde dış bilezik hatasına sahip rulman.	58
Şekil 4.27: 2 mm genişliğinde iç bilezik hatasına sahip rulman.	58
Şekil 4.28: Hata büyüklüğü – sıcaklık ilişkisi.	59

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Kullanılan rulmana ait temel ölçüler	12
Tablo 3.1: PCB Model 352C65 titreşim sensörü	25
Tablo 3.2: Rulman hata frekansları	27
Tablo 4.1: XML dosya biçimi	38
Tablo 4.2: Bulanık kurallar	49
Tablo 4.3: Sistem test sonuçları	50
Tablo 5.1: Karşılaştırmalı sonuçlar	61

SEMBOLLER

N	: Rulmandaki dönen eleman (bilya) sayısı
d_m	: Rulman yatak merkezinin rulman merkezine olan uzaklığı (mm)
D	: rulman çapı (mm)
R_b	: bilya çapı (mm)
w	: rulman kesit uzunluğu (mm)
μ	: üyelik fonksiyonu

Kısaltmalar

FFT	: Fast Fourier Transform
ANFIS	: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
rms	: Karelerin ortalamasının karekökü
TF	: Temel Frekans
BDF	: Bilya dönme frekansı
DBF	: Dış Bilezik Frekansı
İBF	: İç Bilezik Frekansı
WPD	: Wavelet Packet Decomposition
DWT	: Discrete Wavelet Transform
A	: Alçak geçiren filtrenin çıkışı
D	: Yüksek geçiren filtrenin çıkışı
AA	: Yaklaşımın yaklaşımı
AD	: Yaklaşımın detayı
DA	: Detayın yaklaşımı
DD	: Detayın detayı
ApEn	: Approximate Entropy
ÜF	: Üyelik Fonksiyonu
YSA	:Yapay sinir ağları

RULMAN ARIZALARININ GERÇEK ZAMANDA ANALİZİ VE ARIZA KAYNAKLARININ TESPİT EDİLMESİ

Cüneyt ALIUSTAOĞLU

Anahtar Kelimeler: rulman, kestirimci bakım, arıza, dönen makineler, arıza gözlemlene, bulanık mantık, yapay sinir ağları

Özet: Rulmanlar dönen makinelerde, güç iletim elemanlarından millerin yataklanması gibi birçok uygulamada oldukça sık kullanılan önemli makine elemanlarıdır. Rulmanların sağlıklı çalışması dönen makinelerin performansını, yani parçası oldukları sistemi, doğrudan etkilemektedir. Arızalı rulmanlar, parçası olduğu dönen makinelerin normalden fazla titreşmesine ve gereksiz enerji israfına neden olmaktadır. Bununla beraber, ileri seviyedeki rulman arızaları dönen makinelerde hayati hasarlar oluşturabilmektedir. Rulman arızaları bütün endüstri dallarında üretim düşmesine ve dolayısıyla büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu yüzden rulmanlarda oluşabilecek arızaların tehlikeli boyutlara ulaşmadan tespit edilmesi ve rulmanın tamamen bozulmasından veya kırılmasından önce önlem alınması gerekmektedir. Bu bağlamda endüstride çeşitli iş kollarında kullanılan makinelerin bakım zamanını azaltmak ve üretim sürecini aksatmamak amacıyla, titreşim ölçümlerinden giderek artan bir şekilde yararlanılmaktadır.

Bu tez kapsamında rulmanların gerçek zamanda gözlemlenmesine ve olası arızalara karşı gerekli önlemlerin alınmasına imkân sağlayacak yeni bir sistem geliştirilmesi planlanmaktadır. Gelişmiş titreşim ölçüm ve analiz teknikleri kullanılarak geliştirilecek sistemle, dönen makinelerin kritik sonuçlar doğurabilecek arızalara karşı korunması ve rulman arızalarından dolayı ortaya çıkabilecek durma zamanlarının ve katastrofik sonuçların en aza indirgenmesi hedeflenmektedir. Bu sayede dönen makinelerin performansı artırılarak üretim maliyetlerinin düşürülmesine, üretim kapasitesinin artırılmasına, gereksiz parça, enerji ve işçilik harcamasının önüne geçilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

THE REAL TIME ANALYSIS and DIAGNOSIS OF BEARING FAULTS

Cüneyt ALIUSTAOĞLU

Keywords: Bearings, predictive maintenance, bearing faults, rotating machines, condition monitoring systems

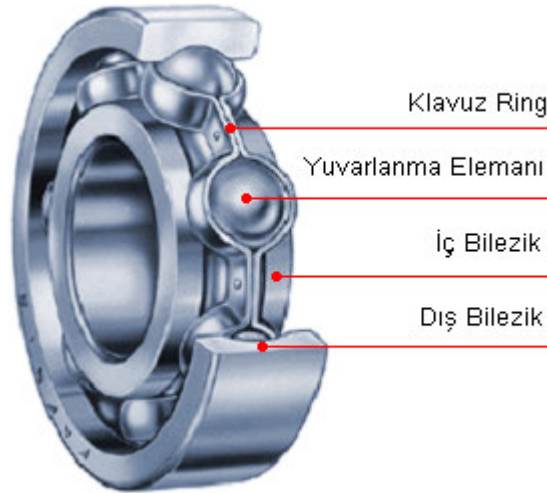
Abstract: Bearings are vital elements that are widely used in rotating machinery for applications ranging from power transmission to shaft housing. The healthy operation of the bearing directly affects the performance of the rotating machinery in which they reside. Faulty bearings cause the rotating machinery to vibrate more than usual, which results in unnecessary energy consumption. In addition to this, bearing faults at advanced stages can vitally damage the rotating machinery. In all industrial sectors, bearing faults can also cause production loss, and hence great economic losses. For that reason, it is very important to detect and diagnose bearing faults and take necessary measures before they reach to critical level or completely fail. Therefore, in order to reduce the maintenance time and not to slow down the production process, vibration measurements have been increasingly used for condition monitoring.

In this thesis, a novel system that allows for real time monitoring of bearings and for providing necessary actions to possible faults will be developed. The system that will be developed using advanced vibration measurements and analysis techniques will protect the rotating machinery against vital failures; reduce the downtime related to bearing failures and decrease catastrophic results to minimal levels. This way, the reduction of production cost, increase of the manufacturing capacity, avoiding of unnecessary part replacement, energy and labor consumption are aimed by increasing the performance of the rotating machinery.

1. GİRİŞ

Günümüz otomasyon sistemlerinde kullanılan makinalarda, hareket büyük oranda dönme kuvveti ile gerçekleştirilmektedir. Rulmanlar bu dönme hareketini gerçekleştiren motor sistemlerinde yaygın olarak kullanılan, yuvarlanma esasına göre çalışan makina elemanlarıdır. Kelime, Fransızca “roulement” kelimesinden türemiş olup dönme, dönüş gibi anlamlara karşılık gelir.

Rulman ana parçaları iç bilezik, dış bilezik ve yuvarlanma elemanlarıdır. (Şekil 1.1) Bazı rulmanlarda yuvarlanma elemanlarının mile paralel dönmesini ve yükün eşit dağılmasını sağlayan kılavuz ring, rulman parçalarını toz, talaş vs. gibi elemanlardan korunmasını sağlayan koruma kapağı gibi ilave parçalar bulunabilir.



Şekil 1.1: Rulman ve Bölümleri

Gelişmiş ülkelerde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %60'ı diğer enerji formlarına dönen makineler tarafından çevrilmektedir. Bu tür makinelerin performansında rulmanlar önemli rol oynamaktadırlar. Rulmanların endüstriyel alanda dönme kuvvetinin kullanıldığı yerlerde sıklıkla kullanılması ve kullanımının her anında mekanik sürtünmeye maruz kalması bakım sorununu ortaya çıkarmaktadır. Dönel

makina elemanlarındaki bozuklukların sebep olduğu üretim kaybı ve bakım masrafları büyük oranda rulman kaynaklıdır. Yapılan bir araştırmaya göre rulman kaynaklı arızaların oranı %40 olarak rapor edilmiştir [1]. İmalat veya montaj sırasında rulman parçaları üzerinde çeşitli hatalar oluşabileceği gibi, rulmanların sürekli bir mekanik sürtünme içerisinde olması da zaman içinde aşınmasını kaçınılmaz kılacaktır. Kullanım şartları ve ortam yapısı da rulman hatalarına sebebiyet verebilir.

Hatalı bir rulman zamanında değiştirilmediği takdirde üzerinde çalışılan parçanın ya da bağlı bulunduğu sistemin üzerinde onarılamaz arızalara neden olabilir. Zamanından önce değiştirilen rulman ise üretimin gereksiz yere durmasına yol açar. Gerek arıza 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.

Rulman arızaları genel olarak yuvarlanma elemanı ile bilezikler arasındaki sürtünmenin artmasına neden olan aşınma ve oksitlenme oluşumuyla, yüzey basıncından kaynaklanan ve pitting aşınması denilen yuvarlanma yüzeylerinden parçacık kopması sonucu meydana gelmektedir. Bu hasar mekanizmaları, sistemin çalışması esnasında rotorlarda dönme esnasındaki sürtünme kuvvetlerini artırmakta ve dolayısıyla performansı düşürmektedirler. Hasarın erken teşhis edilip müdahale edilmemesi durumunda, tüm sistem çalışma süresi boyunca bozucu titreşimlere maruz kalarak etkilenmekte ve katastrofik hasarın oluşumuyla ciddi hasara uğramaktadır. 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 üretim kapasitesi artırılabilir, gereksiz parça, enerji ve işçilik harcamasının önüne geçilebilir.

1.1 Bakım Yöntemleri ve Kestirimci Bakım

Rulman hatalarını tespit etme amaçlı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunların en ilkel olanı ve halen bazı işletmelerde sıklıkla kullanılan tornavida ile dinleme yöntemidir. Herhangi bir bilimselliğe dayandırılmayacak bu yöntem tamamen tecrübe ile sabittir.

Konu ile ilgili personel mekanik sistemin titreşimlerini tornavida ile dinleyerek geçmiş deneyimlerinin ışığı altında tespitte bulunur. Söz konusu yöntem herhangi bir bilimsel çalışmada, istatistiksel bilgi dışında atıfta bulunulması söz konusu değildir. Buna benzer diğer bir yöntem ise arıza sonucu bakımdır. Herhangi bir izleme sistemine sahip olmayan bu yöntemde makinalar arıza yapana dek çalıştırılır. Arıza gerçekleştiğinde makina bakıma sokularak ilgili sorun giderildikten sonra üretime devam edilir. Seri üretimin gerçekleştirildiği ciddi işletmelerde bu yöntemin uygulanması teklif dahi edilemez. Üretimin sürekli olarak kesilmesinin yanında maddi ve hayati tehlikeleri de bulunmaktadır. Diğer bir yöntem ise makina elemanlarının, üreticilerin belirlediği birtakım parametrelerle ömrünün hesaplanması ve buna göre periyodik bakıma sokulmasıdır. Bu yöntemin sakıncası, makina elemanlarının çalışma ömürlerinin hesaplanan çalışma ömrüyle tam olarak örtüşmemesidir. Bu durumda kimi zaman hesaplanan daha önce arızalanan eleman kimi durumlarda çalışma potansiyelinin çoğunu tamamlayamadan değiştirilmektedir.

Sonuç olarak, adı geçen tüm bu yöntemlerin sisteme getirdiği maliyet ve zamansız duruşların önüne geçmek için genel olarak kestirimci bakım olarak bilinen yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemde sistemden elde edilen titreşim, akım, akustik emisyon, sıcaklık yağ vs. gibi değerlerin takibi yapıp rulman arızası gerçekleşmeden kısa bir süre önce prosesin durdurulması sağlanır. İlgili sorun giderildikten sonra prosese devam edilir.

Kestirimci bakım, arızaların oluşmadan önce öngörülebilmesi amacıyla sistem üzerinden periyodik ölçümlerin alınarak, proses ve makina parametrelerinin incelenmesi işlemlerini kapsar. Başta titreşim analizi ve akım analizi olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılabilir. Son yıllarda teknolojik alanda yaşanan gelişmelerin elektronik algılayıcılar ve hızlı işaret işleme olanağı sağlayan bilgisayarlar üzerindeki etkisi, dolaylı olarak kestirimci bakım tekniklerinde kendisini göstermekte ve geliştirilen algoritmaların gerçek zamanda uygulanmasına imkan sağlamaktadır.

Hatalı rulman bağlı olduğu elektrik motorunun arızalanarak yanmasına sebep olabilir. Motorun yanması üzerinde çalışılan parçanın da zarar görmesine sebep olacak ve üretim bir süre kesintiye uğrayabilecektir. Bütün bu sonuçlar maliyetin katlanmasına

neden olacaktır. Bu nedenle, oluşan rulman hatalarının tehlikeli bir boyuta gelmeden tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Rulman hatalarını tespit etme amaçlı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Genel olarak kestirimci bakım olarak bilinen bu yöntemler arasında en etkili olanı titreşim analizidir [2].

Titreşim analizi günümüzde en çok kullanılan ve güvenilirliği en yüksek oranda kabul görmüş bir erken arıza izleme yöntemi olup dönen elemanların, dönme devri ve geometrik yapısına bağlı olarak belirli bir frekansa sahip olması temeline dayanır.

Çalışan makinalarda titreşimden kaçınmak oldukça zordur. Bu titreşimler sistem dinamiklerinin doğal bir etkisi olarak gerçekleşmektedir. Sisteme ait parçalar üzerinde hata oluşması veya parçaların zamanla aşınması, oluşan titreşimlerin genel karakteristiği üzerinde hissedilir ve yorumlanabilir etkiler yaratır. Titreşen makina, titreşimi az bir makinaya göre daha fazla enerji harcayacaktır. Bu durumun enerjinin kaynağında kendisini göstermesi beklenir. Dolayısıyla, hareketin elektrik enerjisi ile sağlandığı makinelerde akım analizi ile titreşime neden olan unsurların varlığı ispatlanabilir. Uygulanacak çeşitli tekniklerle de hata kaynakları tespit edilebilir.

Kızıl ötesi görüntülemenin bir çeşidi olan termal görüntüleme yöntemi bir cismin etrafına yaydığı ısı enerjisini resmederek sıcaklık farklarının belirlenmesini sağlayan bir tekniktir. En yaygın kullanımı askeri alanda olmakla beraber tıpta ve sanayide de kullanılmaktadır.

Sürtünmenin var olduğu ideal olmayan ortamlarda birbirine sürtünen cisimler enerji kaybeder. Bu enerji ısı, ışık, ses vs. olabilir. Bu enerjilerin büyüklüğünün sürtünme kuvvetinin büyüklüğü ile orantılı olarak artması beklenir. Rulmanda oluşan hata, rulmanın normalde yaptığı harekete direnç gösterecek ve bu direnç de enerji kaybını ortama ısı kaynağı olarak yansıtacaktır. Bu nedenle termal izleme yöntemi ile rulman hataları tespit edilebilir.

1.2 Literatürde Bulunan Çalışmalar

Rulman hatalarını tespit etmeye yönelik çalışmalar zaman düzlemi, frekans düzlemi ve hem zaman hem frekans düzlemi bilgileri ile çalışan yöntemleri içerir. Genellikle, farklı düzlemlerde bulunan istatistiksel parametreler çıkartılarak hata karakteristiklerini içeren bilgi elde edilir ve sistemin güvenilirliğinin artırılması sağlanır.

Frekans düzlemini esas alan çalışmalar, makina titreşimlerinin rulman geometrisi ve motor hızına bağlı olarak rulman bölgesel hata karakteristiklerini incelemeye yönelik biçimde gerçekleştirilirken, zaman düzleminde yapılan çalışmalar genel olarak titreşimlerin istatistiksel analizi üzerinde durur. Dalgacık dönüşümü gibi hem zaman hem frekans bilgilerini içeren çeşitli teknikler de sıklıkla başvurulan yöntemlerden biridir.

Rulman hatalarını büyük ölçüde tespit eden yöntemlerden birisi frekans analizidir. FFT (Fast Fourier Transform) ise frekans analizi tekniklerinden en temel olanıdır. Titreşim verilerini FFT ve zarf analizi olarak da bilinen yüksek frekans demodülasyonu yöntemi ile izlemek endüstride yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır [3]. Rulman, üzerinde oluşan hatalardan dolayı belirli frekanslarda titreşim üretir. Ancak, bu frekanslardaki titreşimler gürültü ya da makinanın mekanik özelliklerinden dolayı oluşan çeşitli frekans bileşenleri ile bastırılabilir [4]. Bu nedenle yalnızca FFT yöntemi ile rulman hatalarını tespit etmek oldukça güçtür. Bu durum da araştırmacıları, zaman ve frekans analizi yöntemlerini daha etkili kullanacak yöntemler geliştirmeye yönlendirmiştir.

Arslan ve diğ. [5] radyal bilyalı rulmanlardaki bölgesel yüzey kusurlarını titreşim yöntemi ile inceleyerek sistem için teorik bir model oluşturmuşlar ve bu modele göre sistemin benzetimini gerçekleştiren bilgisayar programı geliştirmişlerdir. McInerny ve Dai [6], işaretlerin zarf (envelope) analizini inceleyerek, rulman hata frekanslarının genlik modülasyonu/ demodülasyonu ile olan ilişkilerini açıklamışlardır. Orhan ve diğ. [7] gerçek bir sistemde hata oluşan rulman üzerinde titreşim davranışını incelemişlerdir. Ocak ve Loparo [8] titreşim işaretlerini analiz ederek rulman iç bilezik dönme hızını ve hata frekanslarını tahmin etmeyi başarmışlardır. Bir diğer

çalışmalarında ise, Saklı Markov Modelleri [9] kullanarak rulman hataları başarılı bir şekilde teşhis edilmiştir.

Hem zaman hem de frekans bilgilerini içeren bir teknik olan dalgacık dönüşümünün hata tespit uygulamalarındaki yeri giderek önem kazanmaktadır. Bu konu pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir [10-14]. Hong ve Liang dalgacık dağılımı ve Fourier dönüşümü ile çoklu periyodik hata sinyallerinin birbirinden ayrılmasını gerçekleştirmişlerdir [15]. Nikolaou ve Antoniadis dalgacık paket dönüşümü kullanarak bölgesel rulman hatalarını optimum hesaplama yükü ile tespit eden bir çalışma yayınlamışlardır [16]. Bazı uygulamalarda dalgacık dönüşümü zarf analizi [17] ya da gürültü engelleme [18] gibi farklı yöntemlerle birleştirilerek geliştirilme yoluna gidilmiştir.

Zarei ve Poshtan [19] ise stator akım verilerini dalgacık dönüşümü ile kullanarak hata tespitinde bulunan bir çalışma yapmışlardır. Böylelikle hem motor akımının mil titreşim verilerine bir alternatif olarak kullanılabileceğini, hem de Dalgacık Dönüşümünün Fourier analizine göre avantajlarını rapor etmişlerdir.

Son yıllarda yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritmalar gibi yapay zeka tabanlı gerek zaman gerekse de frekans düzleminde uygulanan yöntemler giderek önem kazanmaktadır.

Ayaz ve diğ. [20] titreşim ve akım sinyallerinin, istatistiksel ve dalgacık analizi ile özellik çıkarma işlemine tabi tutularak melez bir yapay zeka sistemi ile izlenmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Chow ve diğ. [21] ise yapay sinir ağları tabanlı bir sistem oluşturmuşlar ve bu sistemi benzetim sonuçlarıyla da destekleyerek rulman hata tespiti için kullanılacak stratejilerini eniyileme yolunu seçmişlerdir. Daha sonra gerçek ölçümlerden alınan işaretleri inceleyerek yapay sinir ağlarının hata tespitindeki önemini vurgulamışlardır. Lou ve Loparo [22] dalgacık dönüşümü ve sinirsel bulanık mantık (ANFIS) kullanarak rulman hata tanısında bulunan bir sistem gerçekleştirmişlerdir. Dalgacık dönüşümüyle özellik vektörü çıkartarak, sistemi ANFIS kullanarak eğitmişler ve eğitilmiş sistemi de hata tanılamak için kullanmışlardır.

Literatürde bulunan yöntemler oldukça etkili olsalar da gerek kullanılan parametrelerin elde edilmiş yöntemlerinin gerekse de uygulama yöntemlerinin sisteme getirdiği hesapsal yükler oldukça fazladır. Yapılan çalışmaların yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda, etkinlik ve uygulanabilirlik arasındaki optimum oranı gerçekleştirebilenlerin sayısı çok fazla değildir. Bu durum gerçek zamanda çevrimiçi hata tespitini olumsuz yönde etkilemekte hatta bazı durumlar için imkansız kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında hata tespitine yönelik çevrimiçi ve çevrimdışı zaman/frekans yöntemleri incelenmiş, birbirlerine olan üstünlükleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu amaçla bir mil-rulman düzeneği oluşturulmuş, veri toplama düzeneği ile titreşim ve akım verileri elde edilerek veri işlemede kullanılmıştır. Çalışmanın amacı rulmanların gerçek zamanda gözlemlenerek olası arızalara karşı gerekli önlemlerin alınacağı yeni sistemlerin geliştirilmesidir.

Bu tez çalışmana ait içerik organizasyonu aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

2. bölümde, kullanılan tekniklerin altında yatan teorik esaslardan bahsedilmiştir. Bu bağlamda FFT ve dalgacık paket dönüşümleri, yaklaşık entropi, bulanık mantık ve yapay sinir ağları teorileri sunulmuştur.

3. bölümde, deney düzeneğinden ve veri toplama ile ilgili teknik ayrıntılarda bahsedilmiştir.

4. bölümde kullanılan teknikler, bu tekniklerle yapılan deneyler ve ilgili sonuçlar sunulmuş her bir deneyin başarımından bahsedilmiştir.

Son bölümde ise elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirilmiştir.

2. TEORİK ESASLAR

Frekans/Zaman Analiz Yöntemleri

Titreşim ya da akım sinyallerinin doğrudan zaman düzleminde analizi, sinyal işleme teknikleri arasında en ucuz ve en kolay olanı olarak yer alır. Genellikle, işaretten elde edilen istatistiksel parametrelerin işaretin tamamını veya bir kısmını temsil etmesi şeklinde gerçekleşir. Karelerin ortalamasının karekökü (RMS), ortalama değer, standart sapma, maksimum değer, kurtosis (yatıklık), skewness (çarpıklık) gibi özellikler bahsi geçen istatistiksel parametrelerin sıklıkla kullanılanlarıdır. Paketinden yeni çıkarılmış normal bir rulmanda bu değerler düşük seviyelerde seyrederken, yerel bir hataya sahip rulmanda artması ve hatanın genişliğine göre giderek yükselen bir çizgiyi izlemesi ya da belli bir karakteristiğe sahip olması beklenir. Nitekim ortalama değer ve RMS gibi değerler hatayla orantılı bir biçimde artma eğilimine girerken kurtosis, skewness gibi değerler hatayı karakterize eden bir yapıya bürünürler. İşaretlerin sadece zaman düzleminde işlenmesinin en büyük dezavantajlarından biri istatistiksel parametrelerin motor hızıyla da orantılı olarak artmasıdır. Düşük hızda çalıştırılan bir motora bağlı milde bulunan hatalı rulman ile yüksek hızda çalıştırılan bir motora bağlı milde bulunan hatasız rulmana ait istatistiksel parametrelerin ayırt edici özelliğinin kalmadığı söylenebilir.

Titreşim ya da akım sinyallerinin frekans analizini yapmak, rulman hatalarının daha sağlıklı belirlenmesini sağlayan önemli bir etmendir. FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) kullanılarak yerel hataların frekansları incelenerek hata durumu çözümlenebilir. Bu yöntemde, motor çalışma hızı ve rulman geometrisi daha hesaplanabilir olmalıdır. Bu sayede her rulman tipi için yerel hatalar karakterize edilebilir ve bu hataların frekans genlikleri incelenerek hata durumu tespit edilir. Hata boyutu arttıkça hatalı frekans bileşenlerine ait genliklerin artma eğilimine girdikleri görülür.

Yüksek frekans demodülasyonu

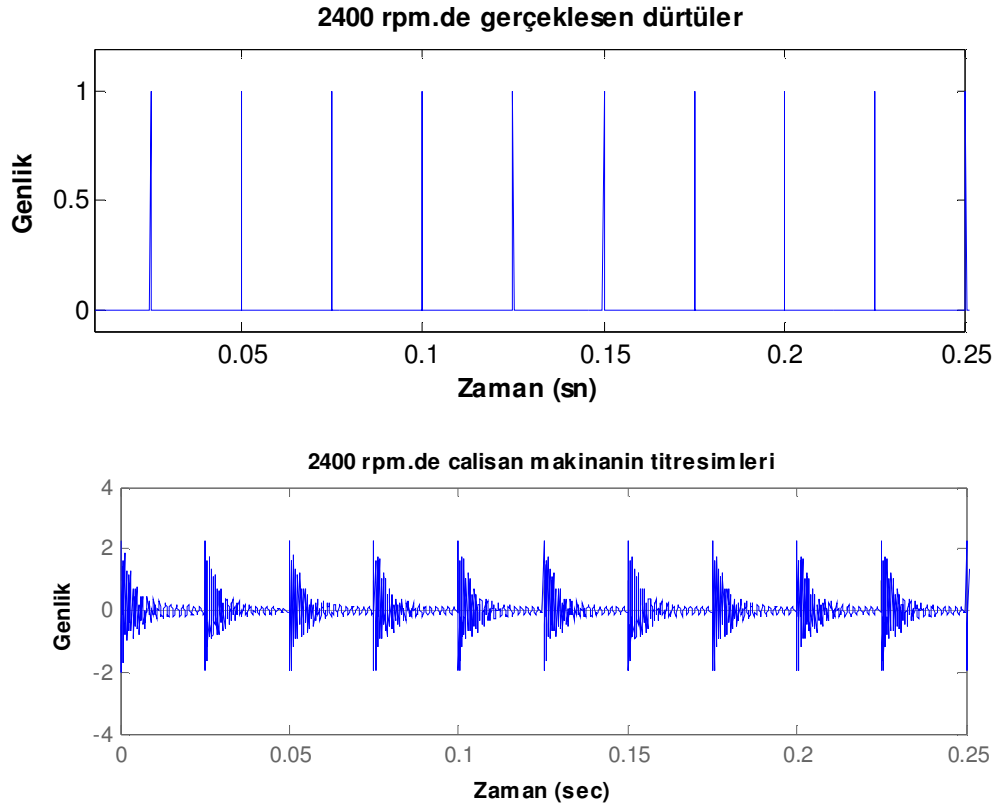
Yüksek frekans demodülasyonu ya da daha bilinen adıyla zarf analizi, hata kaynaklı frekans bileşenlerini tespit etme amacıyla kullanılan bir yöntemdir.

Fiziksel bir sistem, zamana bağlı olarak bir değişim göstermiyorsa dengededir. Ancak sistem bozucu bir etkiye maruz bırakılırsa, denge konumu etrafında bir titreşim hareketi oluşur. Öz titreşim frekansı, bir dürtü kuvveti ile uyarılan sistemin kendi yapısına bağlı olarak titreşimine denir. Sisteme periyodik bir uyarı yapılırsa iki durumdan söz edilebilir. Uyarı frekansı, öz titreşim frekansından farklı olursa sistem üzerinde farklı bir frekans bileşeni oluşur. Ancak uyarı frekansı ve öz titreşim frekansı birbirine eşit olursa bu durumda titreşim frekansının genliği maksimum olur. Bu duruma rezonans denir.

Rulman üzerinde (iç bilezik, dış bilezik, bilya vs.) hata oluştuğu zaman, dönen elemanların hatanın üzerinden geçmesi sonucu ani darbeler üretilir. Bu ani darbeler sistemde titreşime yol açar. Şekil 2.1’de dış bilezik hatasına sahip rulmanın ürettiği ani darbeler ve bu darbelerin sebep olduğu titreşim verilerine ait benzetim sonuçları görülmektedir. Bu benzetim için [8]’de elde edilen mekanik sistemin transfer fonksiyonu denklem 2.1’de verilmiştir.

$$H(s) = \frac{2.283s^4 + 642.6s^3 + 4.457 \times 10^8 s^2}{s^4 + 619.3s^3 + 4.42 \times 10^8 s^2 + 4.234 \times 10^{10} s + 5.697 \times 10^{15}} \quad (2.1)$$

Darbelerin frekansı rulmanın (2400 rpm için) dış bilezik hata frekansı olan 108 Hz’e eş düşmektedir. Titreşim sinyalleri, mekanik sistemin rezonans frekansını oluşturan, genlik modülasyonlu işareti ve taşıyıcı frekansı olarak düşünülebilir. Bu nedenle modülasyon işaretini taşıyıcı frekanstan ayırmak gerekir. Bu işlem zarf analizi (envelope analysis) olarak da bilinen yüksek frekans demodülasyonu ile gerçekleştirilmektedir.

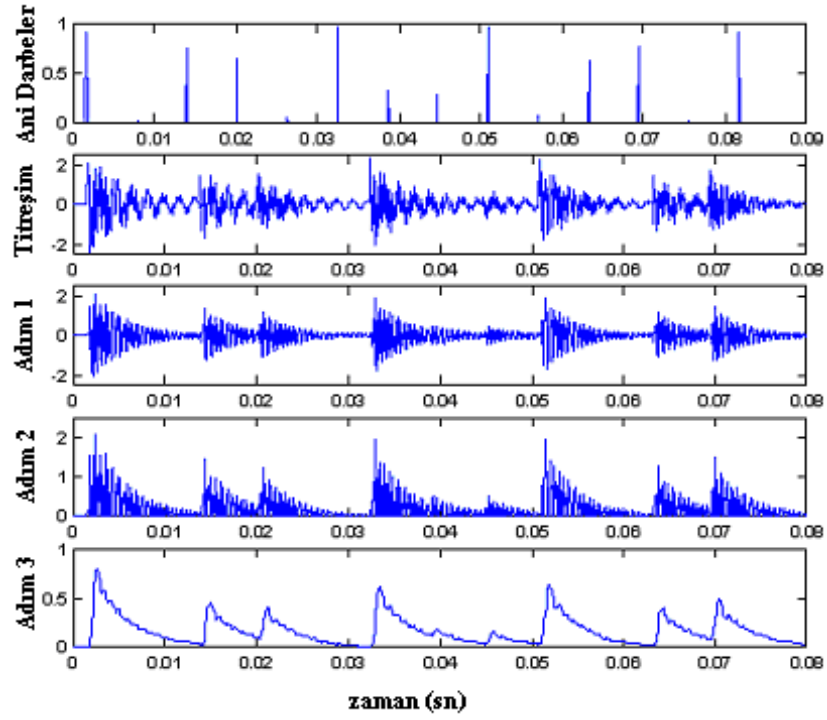


Şekil 2.1: Titreşimlerin oluşması

Demodülasyon 3 aşamadan oluşur:

1. Adım : Bant geçiren filtre
2. Adım : Yarım-dalga doğrultmaç
3. Adım : Alçak geçiren filtre

Bant geçiren filtrenin merkez frekansı sistemin rezonans frekansı olarak seçilmelidir. Alçak geçiren filtre, yüksek frekanslı bileşenleri eleme ve rulmanın arızası ile ilgili bilgileri taşıyan düşük frekanslı bileşenleri koruma amaçlı olarak icra edilir. Şekil 2.2'de benzetim yoluyla oluşturulmuş titreşim işaretlerinin her bir adımdaki demodülasyonu görülmektedir. Makinanın dönmesiyle meydana gelen ani darbelerin oluşturduğu titreşim verilerine 1. adımda bant geçiren filtre, 2. adımda yarım dalga doğrultmaç ve son olarak 3. adımda alçak geçiren filtre uygulanarak elde edilen işarete zarf analizi denir.

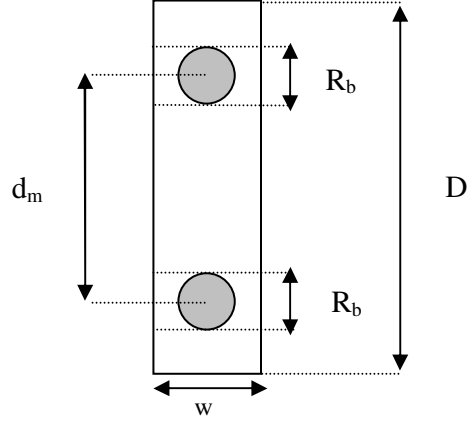


Şekil 2.2: Zarf Analizi

Rulman hata karakteristikleri

Rulman, üzerinde bir hata oluştuğunda veya sürtünmenin doğal bir etkisi olarak aşındığında, çeşitli frekanslarda titreşim üretir. İç bilezik, dış bilezik ve yuvarlanma elemanları (bilya) üzerinde rulmanın fiziksel ve geometrik yapısına bağlı olarak birbirinden bağımsız frekans bileşenleri oluşur. Bu bileşenler oluşan hatanın türü ve gelişimi hakkında çok önemli bilgileri ihtiva eder. Genlik spektrumunda titreşim frekansı hatanın türünü, genliği ise gelişimini belirtmektedir. Hata frekansları motorun devriyle doğrusal bir ilişki içerisindedir. Motor devri arttıkça (veya azaldıkça) yuvarlanma elemanlarının hatalı bölge üzerinden geçiş sıklıkları artar (veya azalır). Buna bağlı olarak da hata frekansları değişir.

Geometrik yapısı Şekil 2.3'te verilen rulman için genel hata frekansları denklem 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5'te verilmiştir [8]. Burada f_s motorun dönme frekansı olarak verilmektedir.



Şekil 2.3: Temas açısı 0°, bilya sayısı N=9 olan rulmana ait temel özellikler. (6205).

Tablo 2.1: Kullanılan rulmana ait temel ölçüler.

Parametre	Değer (mm)
D	52
R _b	7,895
d _m	38,95
w	15
N	9

$$\text{Temel Frekans (TF)} : \frac{f_s}{2} \left[1 - \frac{R_b}{d_m} \right] \quad (2.2)$$

$$\text{Bilya Dönme Frekansı (BDF)} : \frac{f_s}{2} \left[1 - \left(\frac{R_b}{d_m} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

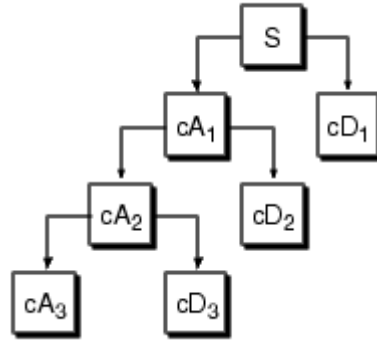
$$\text{Dış Bilezik Frekansı (DBF)} : N(TF) \quad (2.4)$$

$$\text{İç Bilezik Frekansı} : N(f_s - TF) \quad (2.5)$$

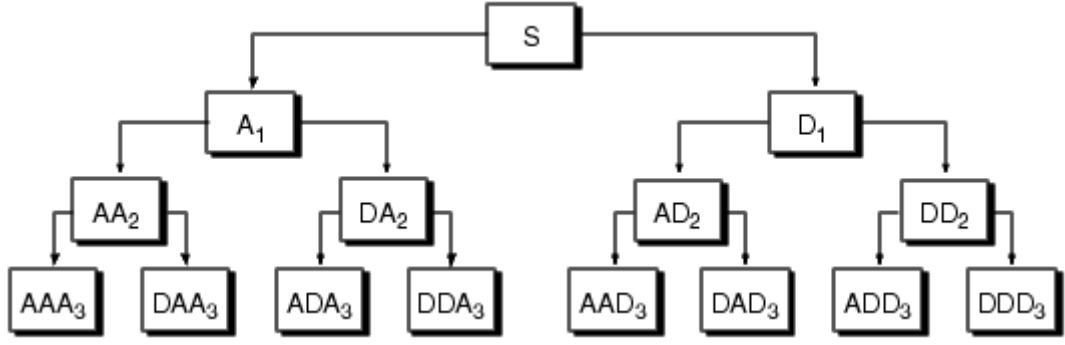
Dalgacık dönüşümü

Dalgacık dönüşümü son yıllarda oldukça sık olarak kullanılan ve etkinliği ispatlanmış zaman-frekans işaret analizi yöntemidir. Hem zaman uzayı hem de frekans uzayı bilgilerini içererek FFT tekniğinin, işaretin yalnızca genel karakteristiğini verip yerel karakteristiğini dışlaması dezavantajını engellemiş olur.

Dalgacık paket dönüşümü (Wavelet packet decomposition - WPD) ise dalgacık dönüşümünün daha detaylı ve esnek işaret işleme olanağı tanıyan genel bir formdur. Çünkü dalgacık paket dönüşümünde detaylar ve yaklaşımlar birbirinden ayrılmıştır. Ayrık dalgacık dönüşümünde (Discrete Wavelet Transform - DWT) her adım, bir önceki yaklaşım (approximation) katsayılarının yüksek ve alçak geçiren filtrelerden geçirilmesi ile hesaplanırken, dalgacık dönüşümünde hem detay hem de yaklaşım katsayıları kullanılmıştır. Alçak geçiren filtrenin çıkışı yaklaşım (A), yüksek geçiren filtrenin çıkışı ise detay (D) olarak adlandırılır. Yaklaşım ve ayrıntı işaretleri başlangıçtaki işaretin yarısı kadar örnek içermekte ve sırasıyla işaretin alçak ve yüksek frekans içeriğini oluşturmaktadır. Aynı şekilde birinci seviye yaklaşım ve detay işaretleri alçak ve yüksek geçiren filtrelerden geçirilirse, başlangıçtaki işaretin örnek sayısının dörtte biri kadar örnek içeren dört ayrı işaret elde edilmektedir. Dalgacık paket dönüşümünün ikinci seviyesini oluşturan bu işaretler yaklaşımın yaklaşımı (AA), yaklaşımın detayı (AD), detayın yaklaşımı (DA) ve detayın detayı (DD) olarak bilinir. Bu şekilde elde edilen işaretlerin enerjileri düğüm enerjilerini oluşturmaktadır. Şekil 2.4'te ayrık dalgacık dönüşümüne ait dönüşüm yapısı gösterilirken, Şekil 2.5'te de dalgacık paket dönüşümü verilmiştir.



Şekil 2.4: Ayrık dalgacık dönüşümü



Şekil 2.5: Dalgacık paket dönüşümü

Yaklaşık entropi

Yaklaşık entropi (Approximate Entropy - ApEn) bir işaretin düzgünlüğünü ve kestirilebilirliğini niteleyen istatistiksel bir ölçüm tekniğidir [23]. Zaman uzayında tanımlı bir işarete düzenli bir biçimde tekrarlanan örüntülerin varlığı, işaretin kestirilebilirliğini artırır. Bu durum ele alınan işaretin ApEn değerlerinde de kendisini gösterecektir. ApEN ilk kez Pincus [24] tarafından doğrusal olmayan dinamik sistemlerin rasgelelik derecesini belirlemede kullanılmıştır.

$n=1,2, \dots, N$ olmak üzere $x(n)$ zaman serisine ait ApEn değerini hesaplamak için m uzunluklu $v(n)=[x(n), x(n+1), \dots, x(n+m-1)]^T$ vektörü $x(n)$ örneklerinden türetilir. $i \leq N-m+1$ ve $j \leq N-m+1$ olmak üzere $v(i)$ ve $v(j)$ vektörleri arasındaki $D(i,j)$ uzaklığı bu vektörlerin skaler bileşenleri arasındaki en büyük fark olarak tanımlıdır.

$v(j)$ ve $v(i)$ vektörleri arasındaki uzaklık $D(i,j) \leq r$ olmak üzere $N_{m,r}(i)$ hesaplanır. r parametresi karşılaştırma toleransını belirleyen bir sabittir.

$v(i)$ vektöründen en fazla r kadar uzakta bulunan vektörleri bulma olasılığı $C_{m,r}(i)$ Denklem 2.6'da verilmektedir.

$$C^{m,r}(i) = \frac{N^{m,r}(i)}{N - m + 1} \quad (2.6)$$

$$F^{m,r} = \frac{\sum \ln(C^{m,r}(i))}{N - m + 1} \quad (2.7)$$

Bu durumda ApEn, 2.8 denklemiyle hesaplanır:

$$ApEn^{m,r} = F^{m,r} - F^{m+1,r} \quad (2.8)$$

Yapay Zeka Teknikleri

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde yapay zeka çalışmaları, özellikle 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren ivme kazanmış ve uygulama alanına kavuşmuştur. Mühendislikte çok çeşitli yapay zeka teknikleri kullanılmakta olup, bu tez çalışmasında yapay sinir ağları ve bulanık mantık kullanılarak rulman hatalarının tespit edilmesi çalışmaları yapılmıştır.

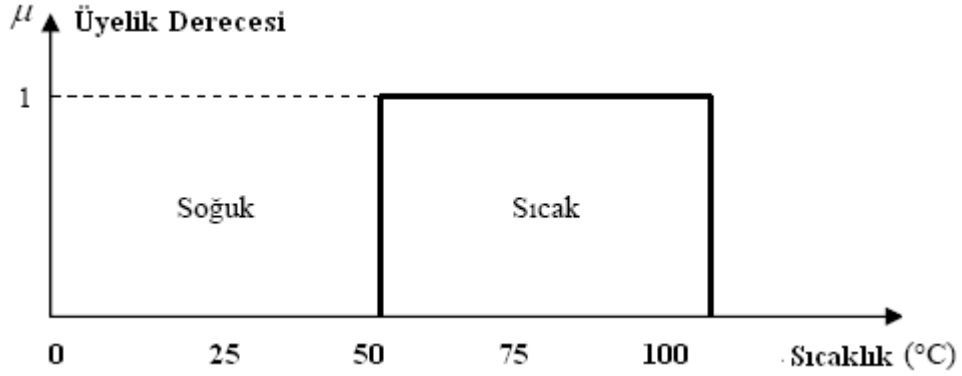
Bulanık mantık

Bulanık mantık Lütfi Askerzade [25] tarafından yayınlanan bir makale sonucu literatüre girmiş bir mantık yapısıdır. Bu çalışmada insan düşüncesinin genelde bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. Bu nedenle 0 ve 1 ile temsil edilen klasik mantık bu düşünce işlemini yeterince ifade edememektedir. Bulanık mantığın genel özellikleri Askerzade tarafından şu şekilde ifade edilmiştir:

- Bulanık mantıkta kesin değerler yerine yaklaşık değerler kullanılır.
- Bulanık mantıkta her şey 0-1 aralığında ifade edilir.
- Bulanık mantıkta tam matematiksel aralıklar yerine Az, Orta, Çok gibi sözel ifadeler kullanılır
- Bulanık çıkartım işlemi sözel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- Bulanık mantık kullanımı, matematiksel modeli elde edilmesi çok zor olan modeller için uygundur.

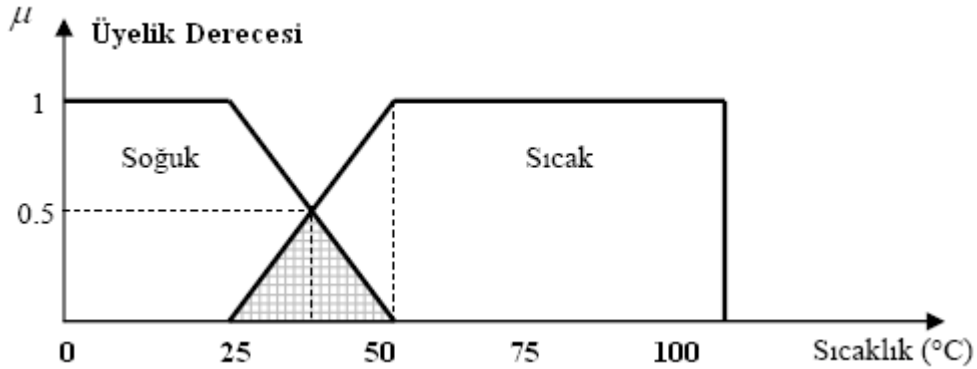
Klasik küme, elemanları kümeye kesinlikle ait olan (1) veya kesinlikle ait olmayan (0) kümelerdir. Ancak günlük hayatta insan tarafından ölçülen bazı değerler (uzun boy,

sıcak su gibi) klasik küme şeklinde ifade edilemez. Klasik kümelere örnek olarak verilebilecek sıcaklık kümesi Şekil 2.6’da gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Klasik küme örneği.

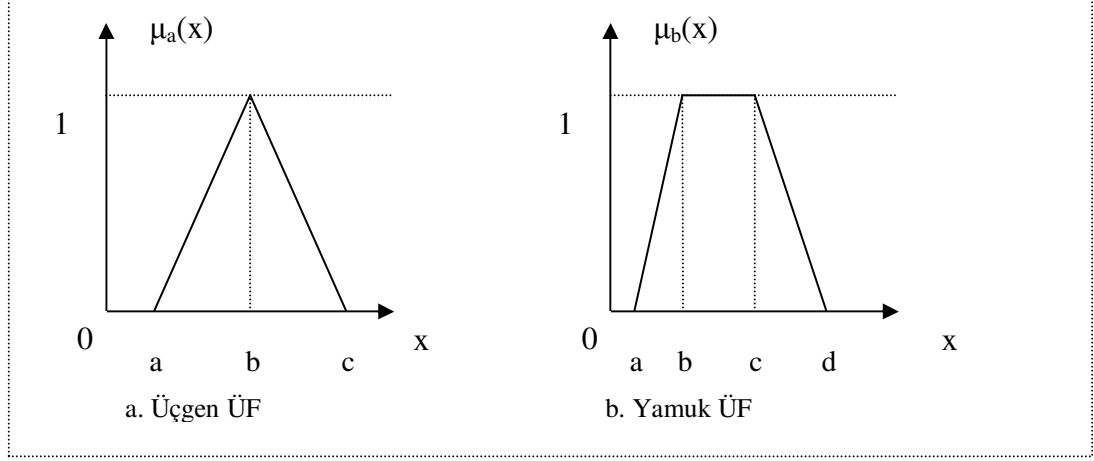
Bulanık küme, kesin sınırları bulunmayan bunun yerine kümeye belirli bir oranda dahil olan elemanlara sahip kümelerdir. Elemanlar küme içerisinde üyelik dereceleri tarafından gösterilen daha büyük ve daha küçük değerlere ait olabilirler. Bu üyelik dereceleri [0-1] aralığında gerçel değerlerle ifade edilir. Şekil 2.6’de verilen sıcaklık kümesi için bir bulanık küme tasarlamak için Şekil 2.7’dekine benzer bir yapı kullanılabilir.



Şekil 2.7: Bulanık küme örneği.

Şekil 2.6 ve 2.7’de verilen kümeler, bir bulaşık makinası için su sıcaklığını kontrol eden denetleyici olarak düşünülürse 2.6’daki kümeyi kullanan makinanın 50°C’de sert durum geçişleri yaşayacağı açıktır. Oysa 2.7’dekine benzer bir kümede bu geçişler biraz daha sönümlenmiş olacaktır. Bu durumu sağlayan etken üyelik fonksiyonlarıdır.

Üyelik fonksiyonları (ÜF), elemanın küme içerisindeki üyelik derecesini belirler. Şekil 2.8’de sıklıkla kullanılan üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları sunulmuştur.



Şekil 2.8: Üçgen ve yamuk ÜF

Bu üyelik fonksiyonlarına ait genel ifade sırasıyla Denklem 2.12 ve 2.13’de verilmiştir.

$$\mu_a(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (a-x)/(a-b), & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\mu_b(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (a-x)/(a-b), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ (c-x)/(c-b), & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.10)$$

Bulanık mantığın endüstrideki ilk uygulaması Mamdani tarafından 1974 yılında bir buhar makinesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten sonra elektronikte, kimyasal ve fiziksel süreç denetimlerinde vs. pek çok alanda çalışmalar yapılmıştır [26]. Çimento fırınlarının denetimi 1980 yılında Hollandalı bir şirket tarafından gerçekleştirilmiştir. 1983’te Fuji elektrik şirketi su arıtma alanları için kimyasal püskürtme aleti üzerine çalışmalar yapmıştır. 1993 yılında Sony firması, karakter tanıma işlemlerinde bulanık mantık çıkarımlarından yararlanmıştır.

Rulman hatalarını tespit etme amaçlı ilk somut çalışmalar 1990'lı yıllara denk düşer. Liu ve diğ. [27] titreşim verilerini inceleyerek bulanık mantık temelli hata gözlemleyen bir uzman sistem geliştirmişlerdir. Frank ve Köppen-Selinger [28] uygulama tekniklerini incelemiştir.

Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları (YSA), beyin hücrelerinin işlevlerini ve birbirleri ile haberleşme şekillerini temel alan ve ilk kez 1940'lı yıllarda bilim dünyasına kazandırılan bir yapay zeka tekniğidir. 1960'lı yıllarda, bilim dünyası yöntemin geçersizliğini kabul etme noktasına gelmişken, klasik ve doğrusal olmayan XOR probleminin çözülmesi ile bugün etkinliği ispatlanmış bir yöntem olarak literatürdeki yerini almıştır.

Yapay sinir ağları ile çözülmesi istenen problem için önerilen yöntem, temelde var olan iki tip öğrenme stratejisinden birisine dahildir. Bu stratejiler öğreticili öğrenme ve öğreticisiz öğrenme olarak isimlendirilir [29]. Öğreticili öğrenmede, giriş kümesinin dahil edilmek istendiği bir çıkış kümesi mevcut olup öğreticisiz öğrenmede böyle bir çıkış mevcut değildir. Bu durumda sistem daha çok geçmiş deneyimlerinden yararlanmayı amaçlar.

Bir YSA sistemi insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, birbirine belirli katsayılarla bağlı nöron olarak bilinen işlem elemanlarından oluşur. Genel olarak bir YSA bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir de çıkış katmanından oluşur. Her katmanda belirli sayılarda nöronlar bulunur. Her nöron komşu katmandaki nöronlara güncellenebilir katsayılar ile bağlıdır. Bu güncelleme işlemi YSA'nın eğitimi olarak bilinir. Bir nöron bir önceki katmanda bulunan nöronun çıkış verisini giriş olarak alırken, kendi çıkışını bir sonraki katmanda bulunan nörona giriş olarak verir.

Bir YSA çalışırken, her bir nöron kendi girişine gelen işareti [34]'de verilen Denklem 2.14'e göre hesaplayarak kendi çıkışına gönderir.

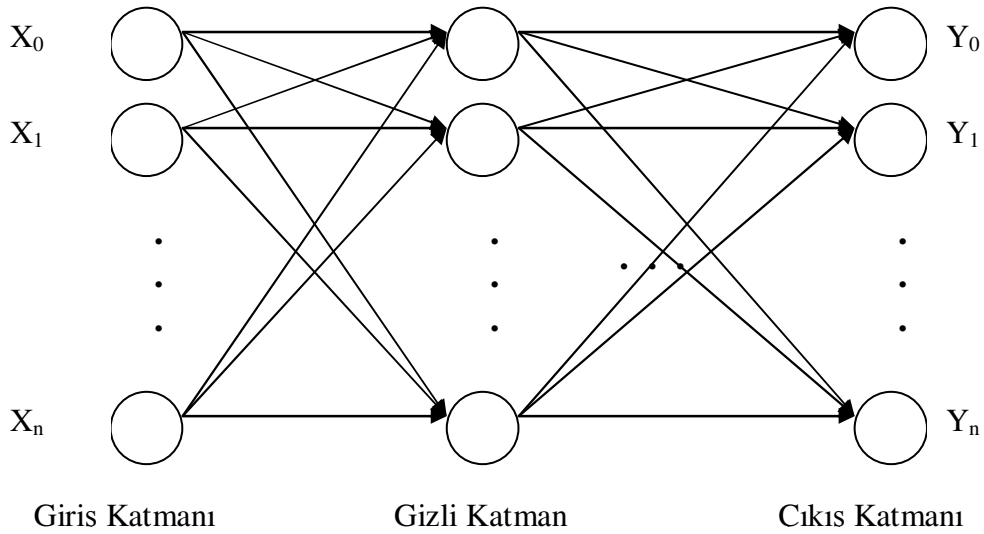
$$n = \sum_{i=1}^P w_i x_i + b \quad (2.11)$$

Burada P , x_i giriş vektörünün uzunluğu ve w_i , bu vektöre ait bağlantı ağırlıkları, b ise bias (ön) değeridir. YSA eğitimi olarak bilinen işlem, bağlantı ağırlıkları ve bias değerinin ağ konfigürasyonuna göre güncelleştirilmesi sürecidir. Hücrede son olarak yapılan işlem Denklem 2.15’de verilen nöronun çıkış değerini hesaplayan aktivasyon işlemidir.

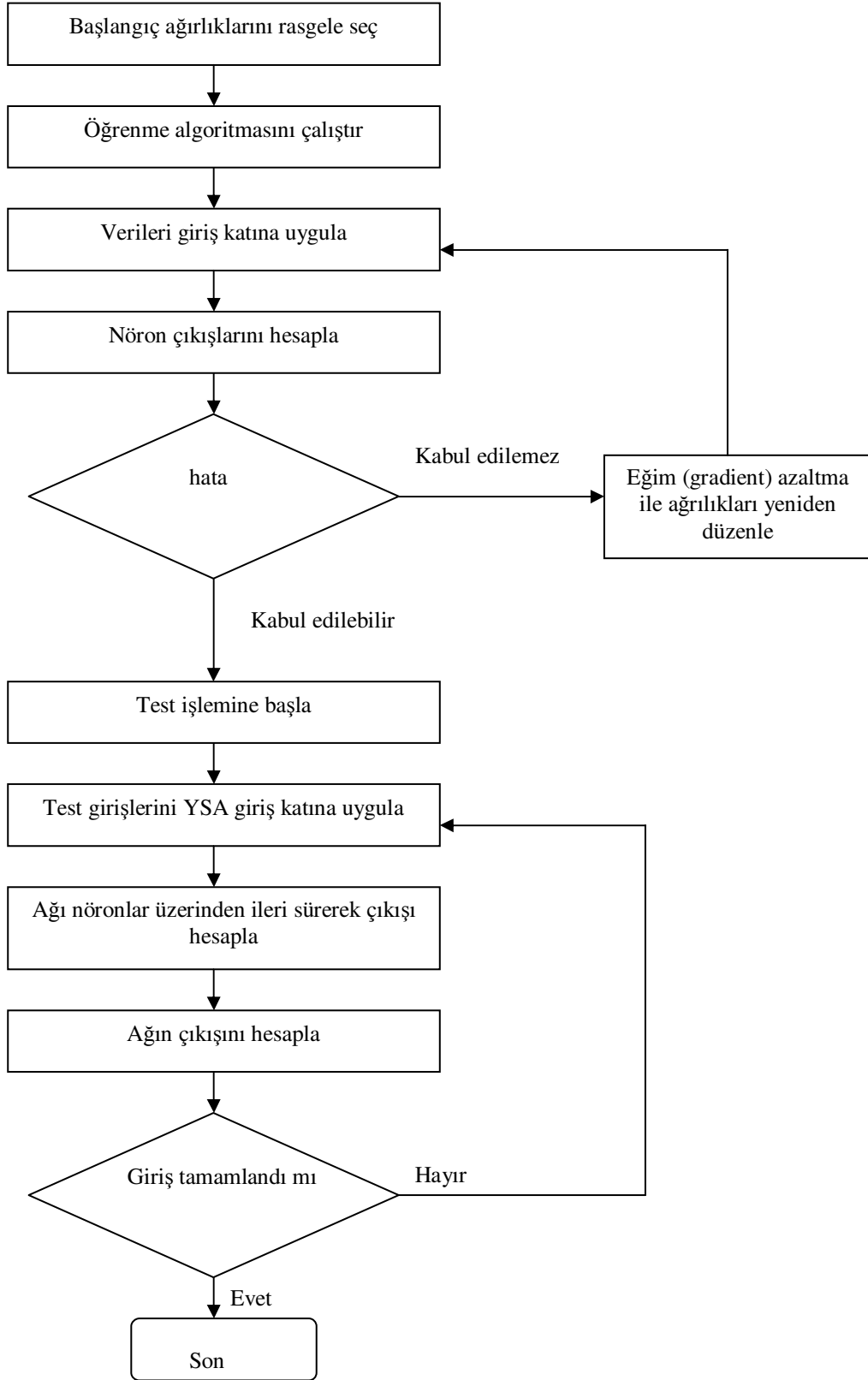
$$f(n) = f\left(\sum_{i=1}^P w_i x_i + b\right) \quad (2.12)$$

Biyolojik nöronlara benzer olarak yapay nöron da girişi uyarıldığı takdirde çıkış üretecek olan yordamlarını çalıştırır. Bu süreçte çeşitli algoritmalar kullanılır. En çok kabul gören ve bu tez çalışmasında da kullanılan yapı, geri yayılım algoritmasıdır (GYA). Bu algoritmanın akış şeması Şekil 2.10’da görülmektedir.

İlk olarak Werbos [35] tarafından öne sürülen GYA, temel olarak yayınma (propagate) ve uyum gösterme (adapt) olmak üzere iki aşamadan oluşan ve katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı (multilayer), ileri beslemeli (feed forward) ve denetimli (supervised) olarak eğitilen bir YSA modelidir. Bu algoritma, hatalar çıkıştan girişe doğru azaltıldığı için geri yayılım adını almıştır. Bir geri yayımlı ağ modelinde giriş, gizli ve çıkış olmak üzere 3 katman bulunmakla birlikte, problemin özelliklerine göre gizli katman sayısını artırabilmek mümkündür. Şekil 2.9’da genel bir YSA yapısı verilmektedir.



Şekil 2.9: YSA yapısı



Şekil 2.10: Geri yayılım algoritması

Giriş katmanı, giriş veri gruplarının ağa sunulduğu terminallerdir. Bu katmanda nöron sayısı, giriş veri sayısı kadardır ve her bir giriş nöronu bir veri alır. Burada veri işlenmeden bir sonraki katman olan gizli katmana geçer.

Gizli katman, ağın temel işlevini gören katmandır. Bazı uygulamalarda ağda birden fazla gizli katman bulunabilir. Gizli katman sayısı ve katmandaki nöron sayısı probleme göre değişir, tamamen ağ tasarımcısının kontrolindedir ve onun tecrübesine bağlıdır. Bu katman giriş katmanından aldığı ağırlıklandırılmış veriyi probleme uygun bir fonksiyonla işleyerek bir sonraki katmana iletir. Bu katmanda gereğinden az nöron kullanılması giriş verilerine göre daha az hassas çıkış elde edilmesine sebep olur. Aynı şekilde gerektiğinden daha çok sayıda nöron kullanılması durumunda da aynı ağda yeni tip veri gruplarının işlenmesinde zorluklar ortaya çıkar.

Çıkış katmanı; ağının en uç katmanıdır. Gizli katmandan aldığı veriyi ağın kullandığı fonksiyonla işleyerek çıktısını verir. Çıkış katmanındaki nöron sayısı, ağa sunulan her verinin çıkış sayısı kadardır. Bu katmandan elde edilen değerler yapay sinir ağının söz konusu problem için çıkış değerleridir. Bir GYA ağında bir katmandan bir başka katmana, aradaki katmanı atlayarak geçebilmek mümkün değildir.

Bir giriş verisinin ağın ilk katmanında yer alan düğümlere uygulandığında en üst katman olan çıkış katmanına erişinceye kadar, bu veri üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen çıktı, olması gereken çıktı ile karşılaştırılır. Elde edilen ve olması gereken değerler arasındaki fark, her çıktı düğümü için bir hata sinyali olarak hesaplanır. Hesaplanan hata sinyalleri, her çıktı düğümüne karşı gelen ara katmandaki düğümlere aktarılır.

Böylece ara katmandaki düğümlerin her biri toplam hatanın sadece hesaplanan bir kısmını içerir. Bu süreç her katmandaki düğümler toplam hatanın belirli bir kısmını içerecek şekilde giriş katmanına kadar tekrarlanır. Elde edilen hata sinyalleri temel alınarak, bağlantı ağırlıkları her düğümde yeniden düzenlenir. Bu düzenleme tüm verilerin kodlanabileceği bir duruma ağın yakınsamasını sağlar.

İleri besleme safhasında, giriş tabakasındaki nöronlar veri değerlerini doğrudan gizli katmana iletirler. Gizli katmandaki her bir nöron kendi giriş değerlerini ağırlandırarak toplam değer hesap ederler ve bunları bir taşıma fonksiyonu ile işleyerek bir ileriki tabakaya veya doğrudan çıkış katmanına iletirler. Katmanlar arasındaki ağırlıklar başlangıçta rasgele küçük rakamlardan seçilir.

Çıkış katmanındaki, her bir nöron ağırlıklandırılmış değeri hesaplandıktan sonra, bu değer yine taşıma fonksiyonu ile karşılaştırılarak mevcut hata minimize edilmeye çalışılır. Hata değeri belli bir seviyeye ininceye kadar özyineli işlemlere devam edilir ve böylece ağırlık eğitimi aşaması tamamlanmış olur. Katmanlar arasındaki bağlantılardaki ağırlık değerleri eğitimi tamamlanmış ağırlıklardan alınarak deneme safhasında kullanılmak üzere saklanır.

Günümüzde bir çok alanda YSA uygulamalarına rastlamak mümkündür. Özellikle örüntü tanıma, işaret işleme ve doğrusal olmayan kontrol algoritmalarında sıklıkla kullanılmaktadır [30,31].

YSA uygulamaları hata tespit sistemlerinde de sıklıkla kullanılır. Saxenna ve Saad [32] sinir ağırları sınıflandırması kullanarak dönel makina arızalarını gözlemleyen sistem geliştirmişlerdir. Samantha ve Al-Balushi [33] ise zaman bölgesi parametrelerini kullanarak tasarladıkları YSA sisteminde, düşük bir işlem yükü ile rulman hatalarını tespit etmişlerdir.

3. DENEY DÜZENEĞİ

Deneyle, Şekil 3.1'de görülen bir AC elektrik motoruna bağlı mil rulman düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen titreşim verileri ivme ölçer algılayıcı ile veri toplama sistemi üzerinden toplanarak bilgisayarda işlenmiştir. Deneyle kullanılan malzemeler, ORS firmasına ait 6205 tipi polyamid kafesli sabit bilyalı rulman, ve National Instruments firmasına ait 6211 model veri toplama kartı olarak seçilmiştir.

Deneyle, sağlam ve her biri 0.3 mm, 0.6 mm, 1 mm ve 2 mm büyüklüğünde iç bilezik ve dış bilezik hatalı rulmanlar için 1600 RPM hızında verilerin elde edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Hataları oluşturmak için öncelikle rulman kafesleri çıkartılarak iç bilezik, dış bilezik, kafes ve bilyalar olmak üzere parçalara ayrılmıştır. Sökülen bu elemanlardan ilgili olanlarda EDM yoluyla hata oluşturulduktan sonra rulmanlar yeniden monte edilerek eşit miktarlarda yağlanmıştır.

Mil-rulman düzeneği AC servo motora bağlı olarak çalıştırılmaktadır. Kullanılan servo motor sayesinde motor titreşimi minimize edilerek ölçülen titreşimin sadece rulman kaynaklı olması hedeflenmiştir.

Termal kamera yardımı ile rulmana ait sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Her deney, motorun soğumasını sağlayacak yeterli süre aralıkları ile yapılmıştır. Bu sayede sıcaklık farklarının, rulman hatalarının meydana getirdiği sürtünmeye bağlı olarak oluştuğundan emin olunur.



Şekil 3.1: Deney düzeneği

Veri Toplama Sistemi

Bilgisayar, mikro denetleyici, DSP (Digital Signal Processor) vs. gibi mikro işlemcili sistemlerde işlenecek olan verilerin, fiziksel değerlerin eşdeğeri olan bir yapıda olması gerekir. Bu durum fiziksel değerlerin analog ve sonrasında sayısal (dijital) değerlere dönüşümünü, dolayısıyla bu dönüşümü sağlayacak ara elemanlara ihtiyacı doğurur.

Deneylede kullanılan fiziksel veriler rulman yatağına bağlı titreşimler ve mil-rulman düzeneğine bağlı motora ait akım değerleri olarak belirlenmiştir. Akım değerleri rulman titreşimleriyle birlikte bazı deneylede kullanılırken, titreşim verileri rulman yatağının X ve Y eksenlerinde olmak üzere iki noktadan alınıp her deneylede kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği ve deney sonuçlarında da görülebileceği gibi, rulman hatalarını tespit etmede en etkili yöntem titreşim analizidir. Kullanılan PCB Model 352C65 ivmeölçer titreşim sensörüne ait teknik ayrıntılar Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1: PCB Model 352C65 titreşim sensörü.

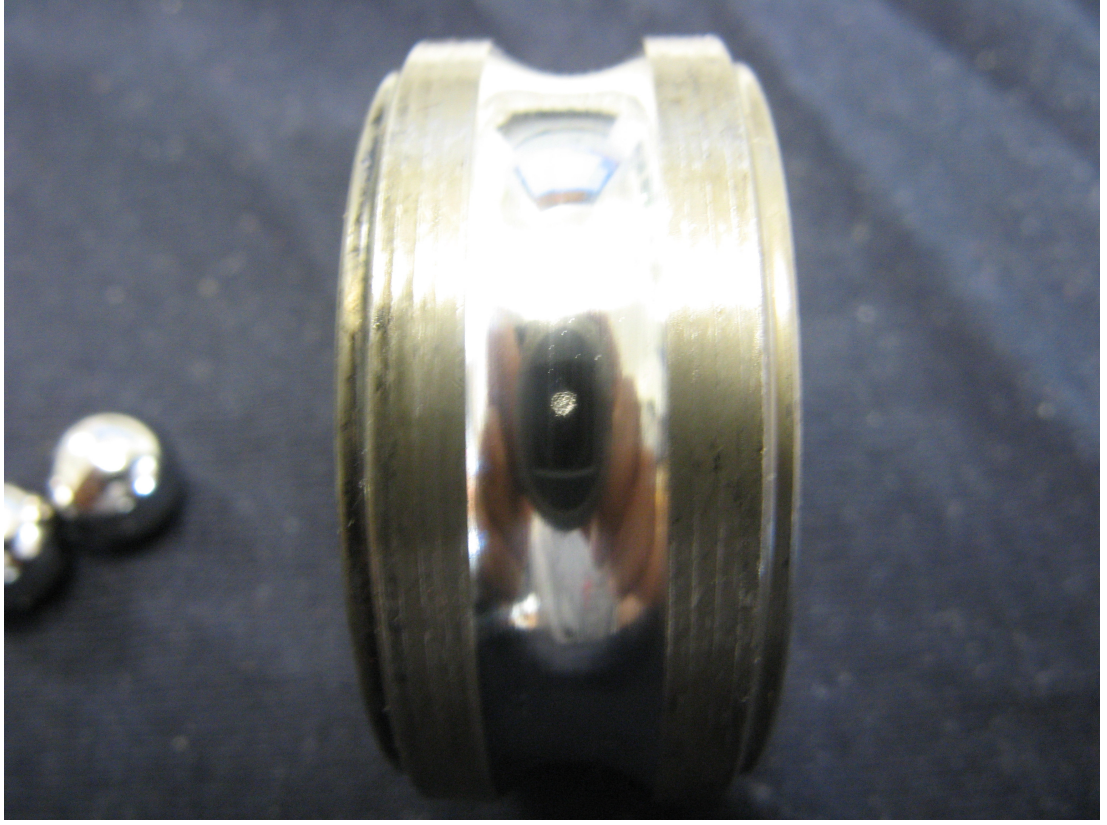
Parametre	Değer (SI)
Hassasiyet (\pm %10)	10.2mV/(m/s ²)
Ölçüm Aralığı	\pm 491 m/s ² pk
Rezonant Frekansı	\geq 35 kHz
Doğrusalsızlık	\leq %1

Şartlandırıcıdan geçirilip yükseltile titreşim işaretleri ve akım verileri veri toplama kartı ile 24kHz örnekleme frekansında bilgisayara alınarak MATLAB ortamında zaman, frekans ve zaman/frekans bölgesi analizlerinde kullanılmıştır.

Bölgesel Hataların Oluşturulması

Kullanımının her aşamasında mekanik sürtünmeye maruz kalan rulmanların sağlıkları kullanım şartlarına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu kaçınılması mümkün olmayan sürtünmenin dışında; yük, sıcaklık ve nem gibi faktörler rulmanlar üzerinde, normal kullanımda öngörülmecek hataların oluşmasına neden olabilir. Normalde haftalar sürece olan bu durum, laboratuvar ortamında hata tespit sistemi oluşturma amacıyla yapılacak olan çalışmaları olumsuz yönde etkiler. Bu hataların yapay olarak verilmesi durumunda hem çalışma zamanından bir kayıp yaşanmaz hem de hataların ideal olması sağlanarak sağlıklı bir gözlem sistemi oluşturulmuş olur. Bahsi geçen yöntem, EDM (Electrical Discharge Machining) olarak bilinen ve normalde klasik işleme metotları ile işlenemeyecek maddeler üzerinde kullanılan, elektrikle aşındırma yöntemidir.

Deneyler, hatalı rulmanların hatasızlardan ayrılması ve hatalı olanların kendi aralarında hata büyüklüğüne göre derecelendirilmesi amacıyla; iç bilezik, dış bilezik ve bilyalar üzerinde EDM yöntemiyle 0.3 mm, 0.6 mm, 1.0 mm ve 2.0 mm çapında yapay hatalar oluşturulan rulmanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hatalı rulman resimleri Şekil 3.2, 3.3 ve 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.2: İç bilezik hatası



Şekil 3.3 Dış bilezik hatası



Şekil 3.4: Bilya hatası

Çevrimdışı yöntemlerin kullanıldığı deneyler, motor çalıştırılma hızı dakikada 1200, 1600, 2000 ve 2400 devir olmak üzere her hata için 4 kez gerçekleştirilmiştir. 2. bölümde verilen rulman hata karakteristiklerine göre bu devirde çalıştırılan motor miline bağlı 6205 tip rulman için hata frekansları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Rulman hata frekansları.

Hata Tipi	Çalıştırılma Hızı (devir/dk)			
	1200 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2400 Hz
İç Bilezik	108 Hz	144 Hz	180 Hz	216 Hz
Dış Bilezik	72 Hz	96 Hz	120 Hz	144 Hz
Bilya	94,5 Hz	126 Hz	157,5 Hz	189 Hz

Termal Görüntüleme

Rulmana ait termal görüntüler, titreşim ve akım verilerinden bağımsız olarak kullanılmak üzere FLIR ThermaCAM E45 marka termal kamera kullanılarak elde edilmiştir. Motor yeterince soğutulup 10 dakika boyunca çalıştırdıktan sonra her rulmanın termal görüntüleme yöntemi ile sıcaklık haritası çıkarılmıştır. Sonuçta rulmana ait sıcaklık değerleri incelenerek rulman hata durumu tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

4. YÖNTEM VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında rulman hatalarının tespit edilmesini amaçlayan, çevrimiçi ve çevrimdışı yöntemler incelenmiş olup her bir yöntemin başarımlarını ölçütleri, avantaj ve dezavantajları sunulmuştur.

Uygulanan yöntemler genel olarak kategorize edilmek istenirse;

1. Frekans analizi
2. Gerçek zamanda hata tespiti
3. Yaklaşık entropi analizi
4. Yapay zeka teknikleri

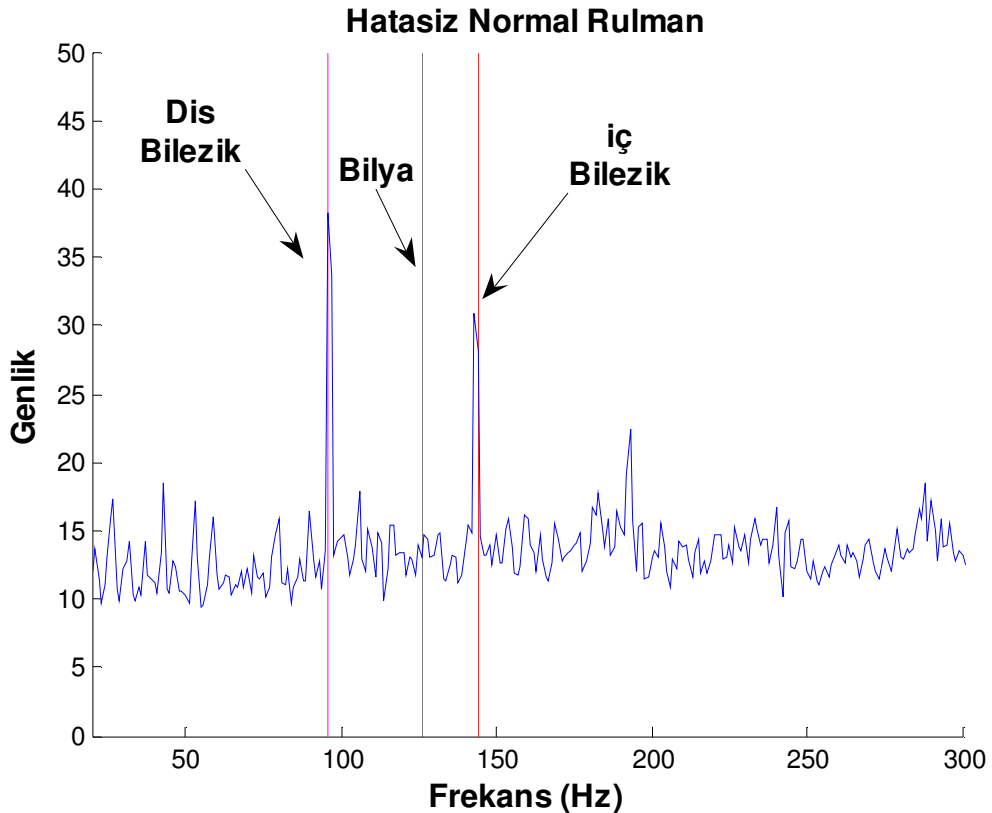
ana başlıkları altında toplanabilir. Burada her bir tekniğin yapı olarak birbirinden kesin çizgilerle ayrılması mümkün değildir. Örneğin yapay zeka tekniklerinde uygulanan yöntemler frekans ve zaman bilgilerini kullanmaktadır. Buna rağmen frekans analizi başlığı ayrı bir başlık altında incelenmektedir. Çünkü frekans analizinde yalnızca frekans verileri, sade bir matematiksel çıkarımla incelenirken, aynı veriler yapay zeka tekniklerinde literatürde yer alan standart ileri teknikler kullanılmaktadır.

Frekans Analizi

Genel formu 2. bölümde verilen, dış bilezik kusuru bulunan rulmanlarda, bilyaların her birinin hatanın üzerinden geçmesi 1600 devir/dk hızında çalışan makinanın titreşiminde 96 Hz'lik bir bileşen oluşturur. Aynı şekilde iç bilezik hatası 144 Hz'lik, bilya hatası ise 126 Hz'lik bir bileşen oluşturur. Hata frekansları dışında, rulmanın bağlı olduğu milin dönme frekansı rulman hata frekansları ile birleşerek yan bantlar oluşturur. Titreşimler düzenli olarak izlenirse, rulman bilezikleri ve yuvarlanma elemanlarındaki aşınmanın gelişimine bağlı olarak, hata frekansları ve yan

bantlarındaki bileşenlerin genliğinde bir artış görülür. Bu artış gözlemlenerek, hata tehlikeli boyutlara ulaşmadan rulmanın değiştirilmesi sağlanabilir.

Üretimden yeni çıkmış bir rulmanda bile çok az da olsa bölgesel hata karakteristiklerine rastlanabilir. Bu durum rulman yüzeyinin kusursuz bir pürüzsüzlükte olmamasından kaynaklanır. Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi sağlam bir rulmandan elde edilen titreşim verilerinde de rulman hata frekanslarına rastlanmıştır. Rulman iç ve dış bileziğinde bulunan pürüzler düşük genlikli frekans bileşenleri oluşturmuştur. Hasar gelişimi belirlenirken bu genlikler baz alınmalıdır. Şekil 4.1’de görülen ve frekans eksenini dik kesen çizgiler, bölgesel hata frekanslarının görülmesi beklenen bileşeni belirleme amacıyla kullanılmıştır. Bu çizgilerin hata frekanslarıyla örtüşmesi bahsi geçen pürüzlerin varlığını ispatlamaktadır. Bu nedenle titreşimsiz bir mekanik sistem düşünülemez denilebilir.

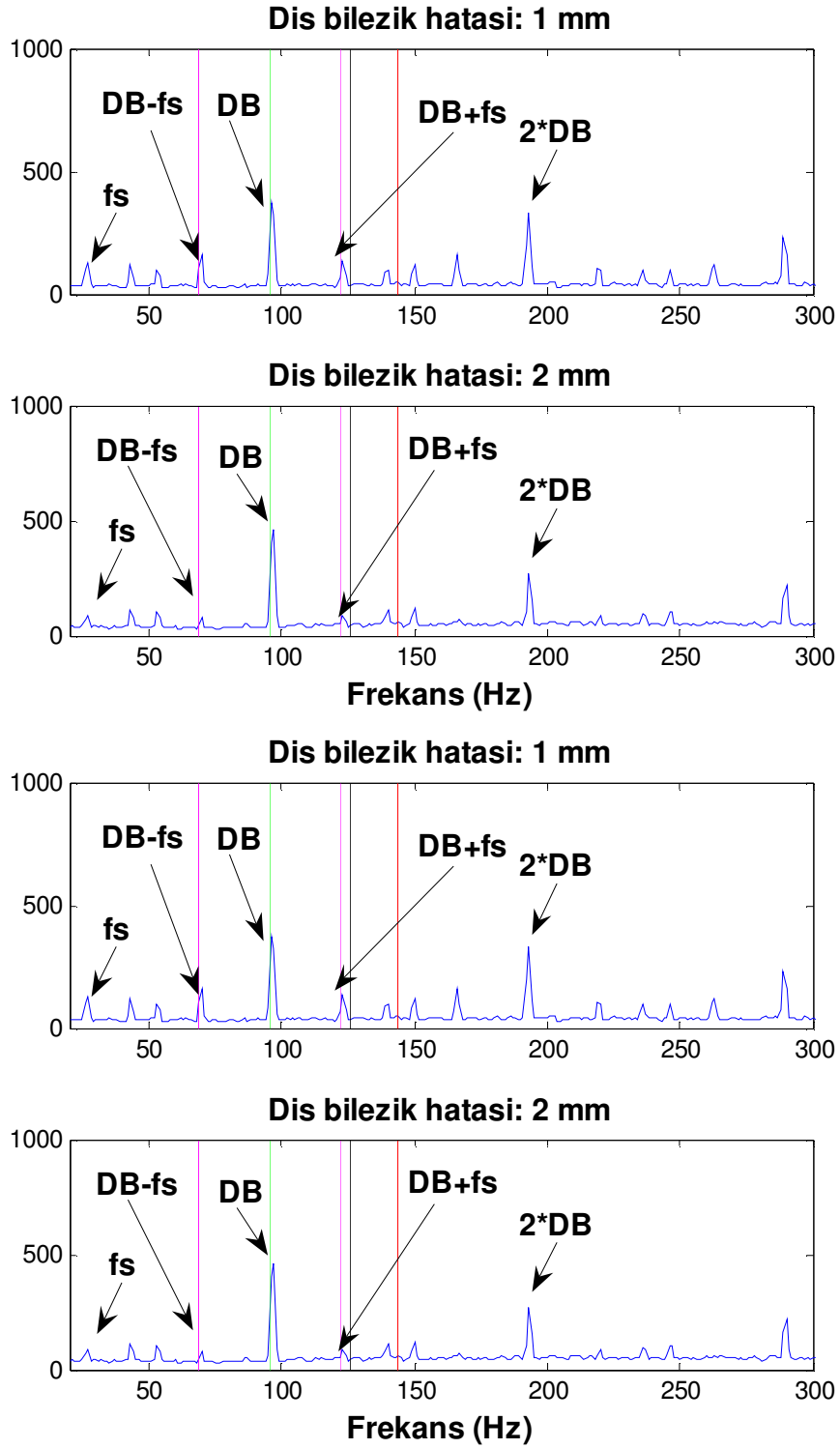


Şekil 4.1: Yüksek frekans demodülasyonuna tabi tutulmuş normal rulman titreşim verilerinin frekans spektrumu (1600 devir/dk hızında).

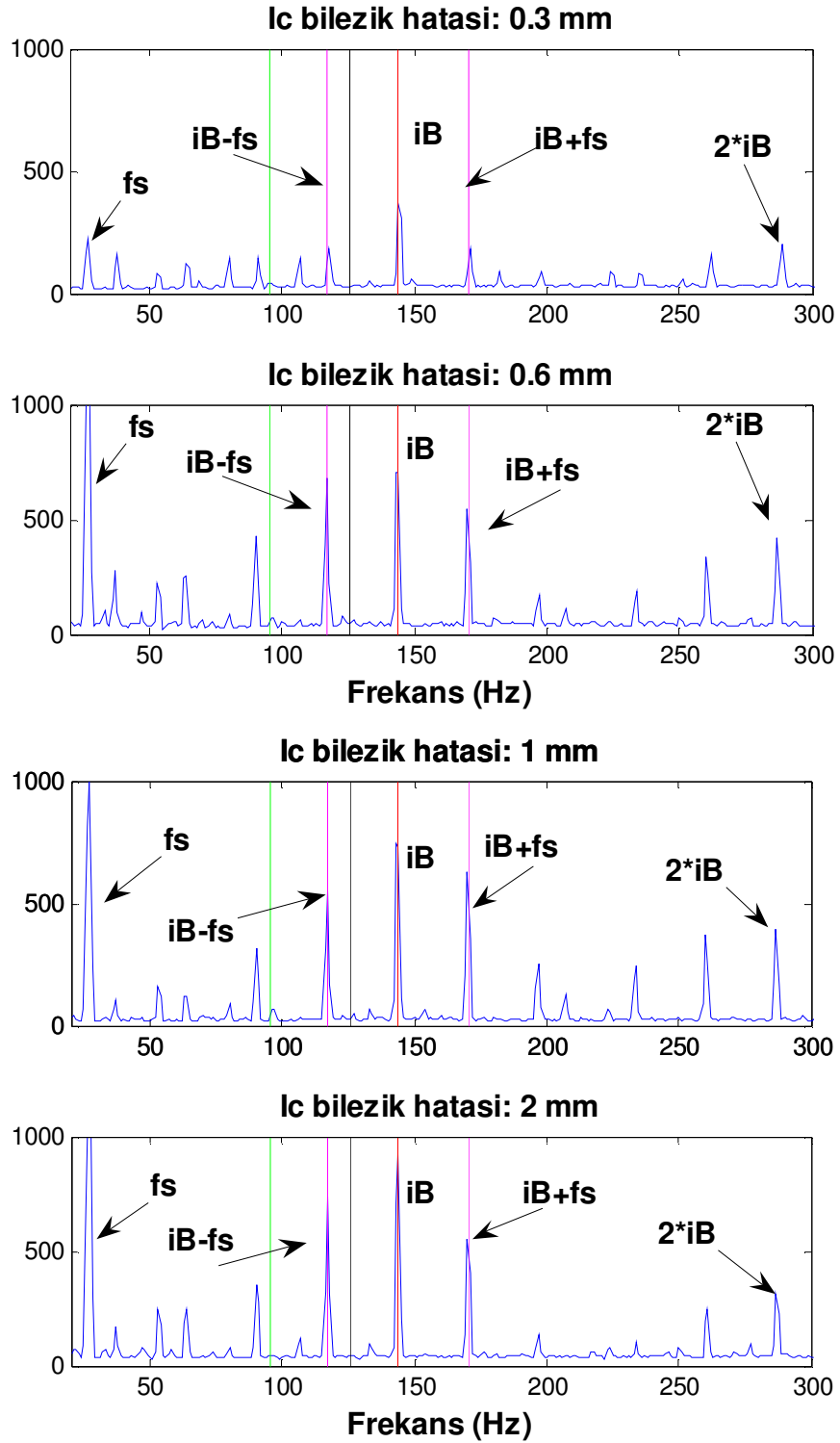
Hatasız rulmanlar, yapay bölgesel kusurlar oluşturulduktan sonra dakikada 1200, 1600, 2000 ve 2400 devir hız ile çalıştırılmış ve titreşimler kaydedilmiştir. Şekil 4.2 ve 4.3'te 1600 devir/dk dönme hızı için hesaplanan yüksek frekans demodülasyonu sonuçları verilmektedir. Bu hızdaki dış ve iç bilezik hata frekansları sırasıyla 96 Hz. ve 144 Hz. olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.2'de 0.3 mm, 0.6 mm, 1 mm ve 2 mm çapındaki dış bilezik hataları için elde edilen yüksek frekans demodülasyon işaretlerinin frekans spektrumları gösterilmektedir. Dış bilezik hata frekansı (DB) olan 96 Hz bileşeni çok net bir şekilde gözlenmektedir. Bu bileşenin genliği şekilden de görüldüğü gibi hata büyüklüğü arttıkça artmaktadır. Gözlemlenen 96 Hz frekans dışında bu bileşenin harmonikleri ve 26.6 Hz olan mil dönme hızı da belirgin olarak görülmektedir. Bununla beraber hata frekansı kadar belirgin olmamakla beraber hata frekansı etrafında dönme hızı yan bantları da ($DB \pm fs$, $DB \pm 2.fs$, ..., $2.DB \pm fs$, $2.DB \pm 2.fs$,) görülmektedir. Hata frekansının ikinci harmoniğinden itibaren genliğin azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 4.3'te ise yine aynı büyüklüklere sahip iç bilezik hataları için yüksek frekans demodülasyon işaretlerinin frekans spektrumları verilmiştir. İç bilezik hata frekansı (İB) 144 Hz'lik ve bu bileşenin dönme hızı yan bantları ($İB \pm fs$, $İB \pm 2.fs$, ..., $2.İB \pm fs$, $2.İB \pm 2.fs$,) da yine gözlemlenmektedir. Ancak dış bilezik hatasından farklı olarak iç bilezik hatasında mil dönme hızı ve yan bantlar çok daha belirgindir. Bunun nedeni ise iç bilezik hatasının dış bilezik hatasının aksine mil dönme hızında dönüyor olmasıdır.

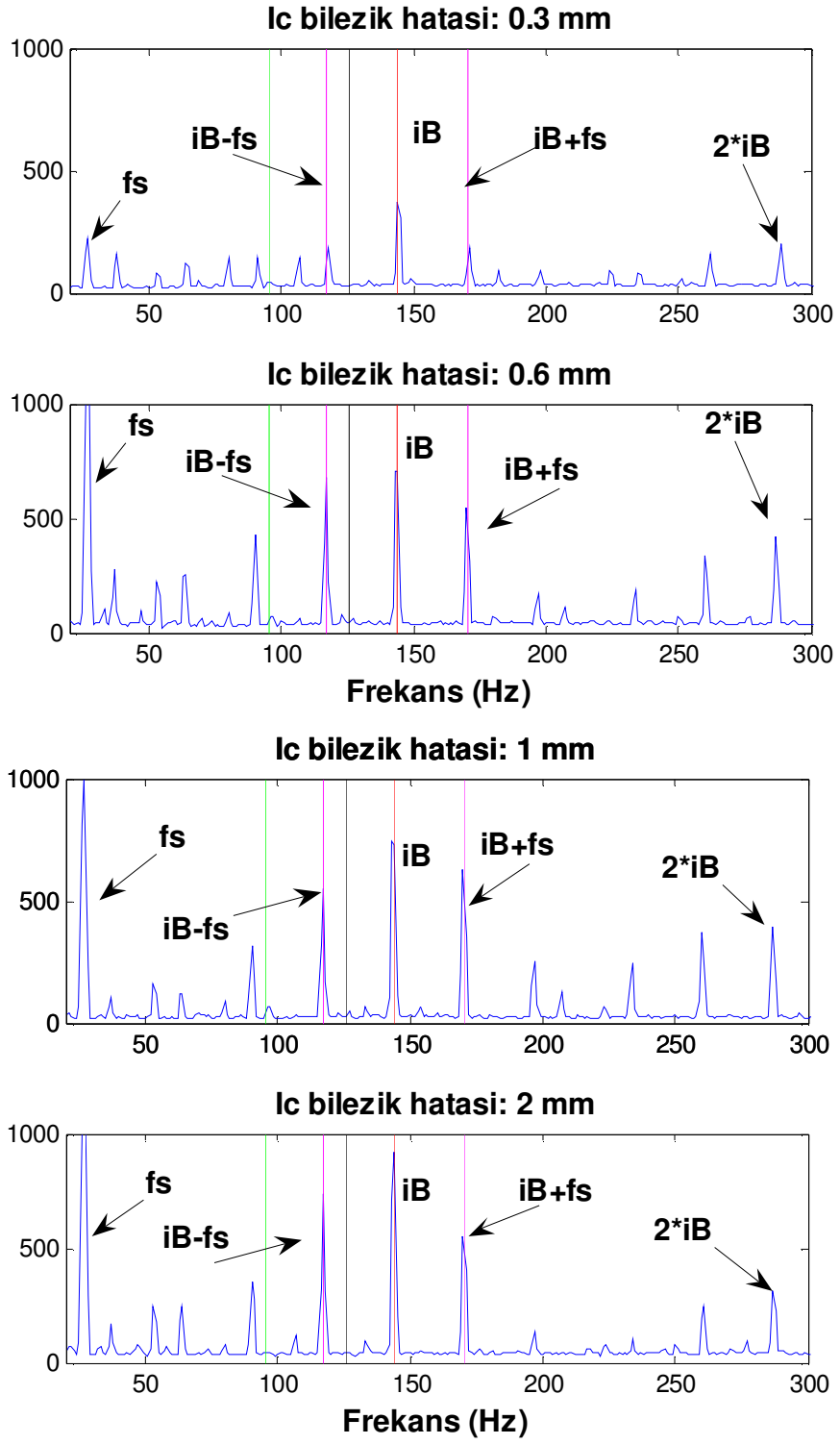


Şekil 4.2: Dış bilezik hata frekansları (1600 devir/dk).

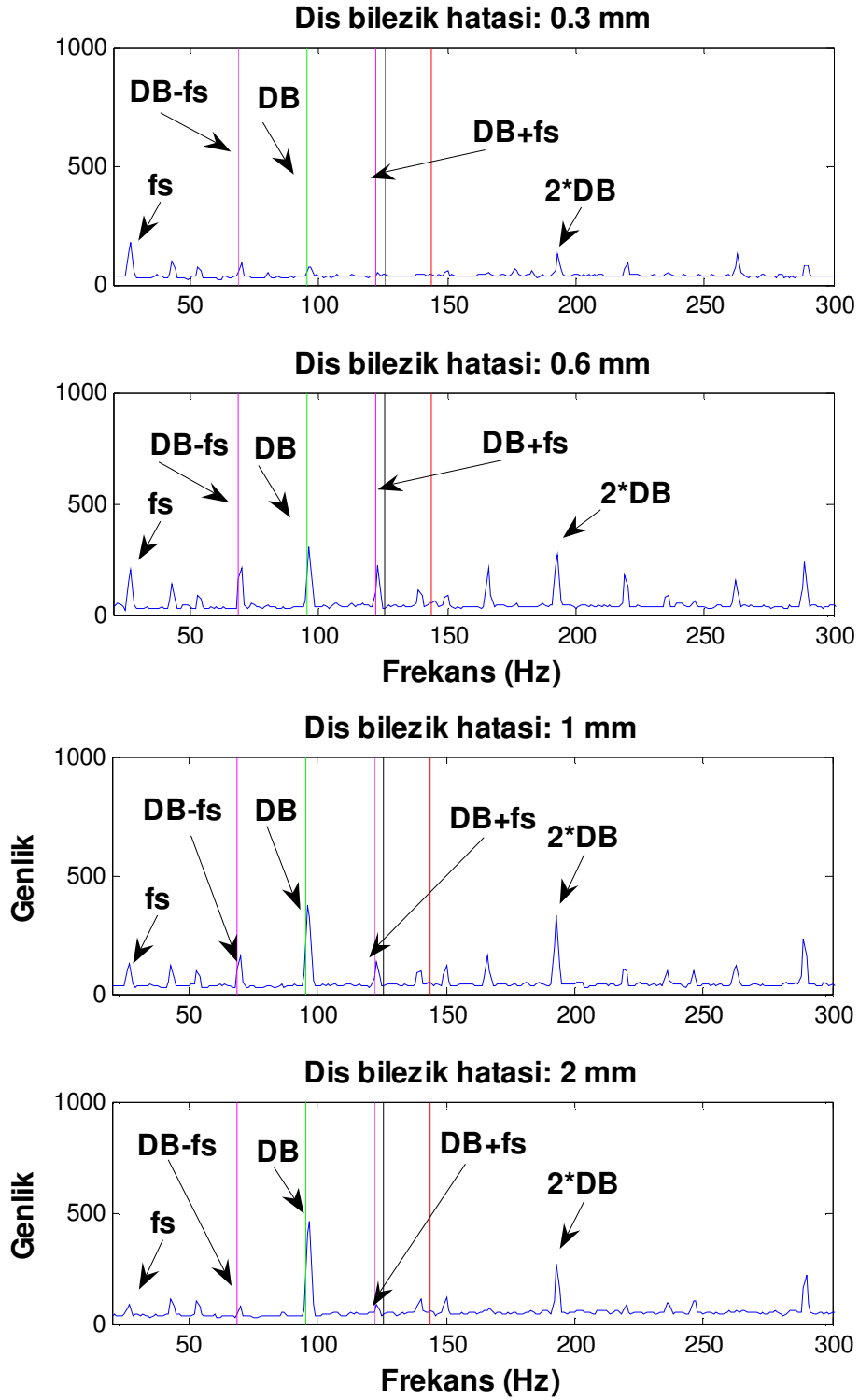


Şekil 4.3: İç bilezik hata frekansları (1600 devir/dk).

Şekil 4.4 ve 4.5'te ise Şekil 4.2 ve 4.3'tekine benzer olarak 2000 devir/dk için elde edilen grafikler görülmektedir. Bu hız için dış bilezik hata frekansı 119.5 Hz, iç bilezik hata frekansı ise 180 Hz olarak hesaplanmıştır.



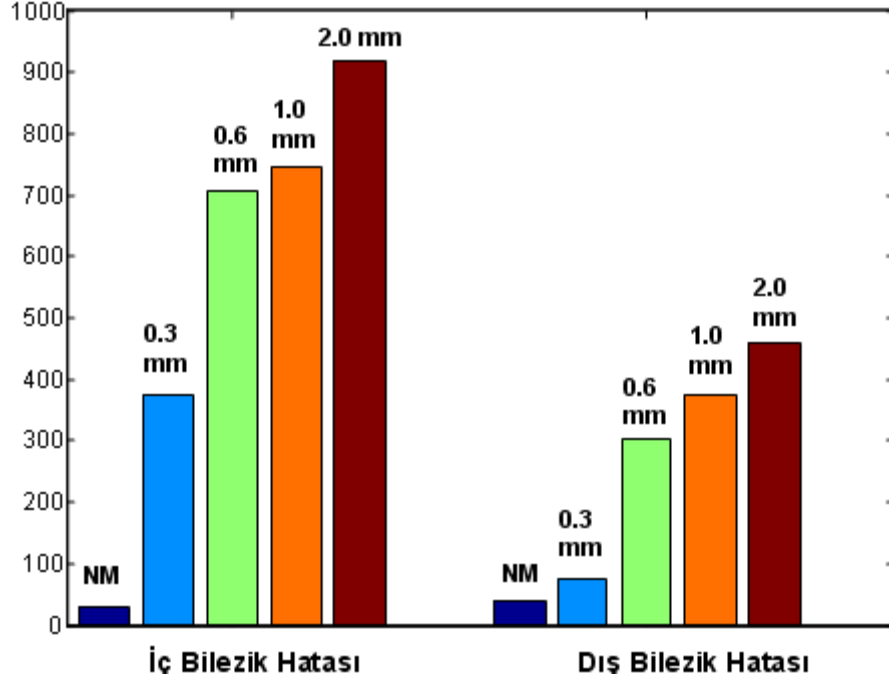
Şekil 4.4: Dış bilezik hata frekansları (2000 devir/dk).



Şekil 4.5: Dış bilezik hata frekansları (2000 devir/dk).

Grafikler incelendiğinde, yapay olarak oluşturulan hataların derinliği arttıkça frekans analizinden elde edilen temel harmoniğin genliğinin düzenli olarak arttığı; bununla birlikte yan bant harmoniklerinin de göreceli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Şekil

4.6'da bu harmoniklere ait genlik değişimleri sunulmuştur. Burada NM, normal rulmanı simgelemektedir. Bu şekil, hatasız bir rulmanda düşük genlikli hata frekanslarının hatanın gelişimiyle orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.6: Frekans spektrumunda temel hata harmoniklerine ait genliklerin hatanın genişliği ile değişimi (1600 devir/dk).

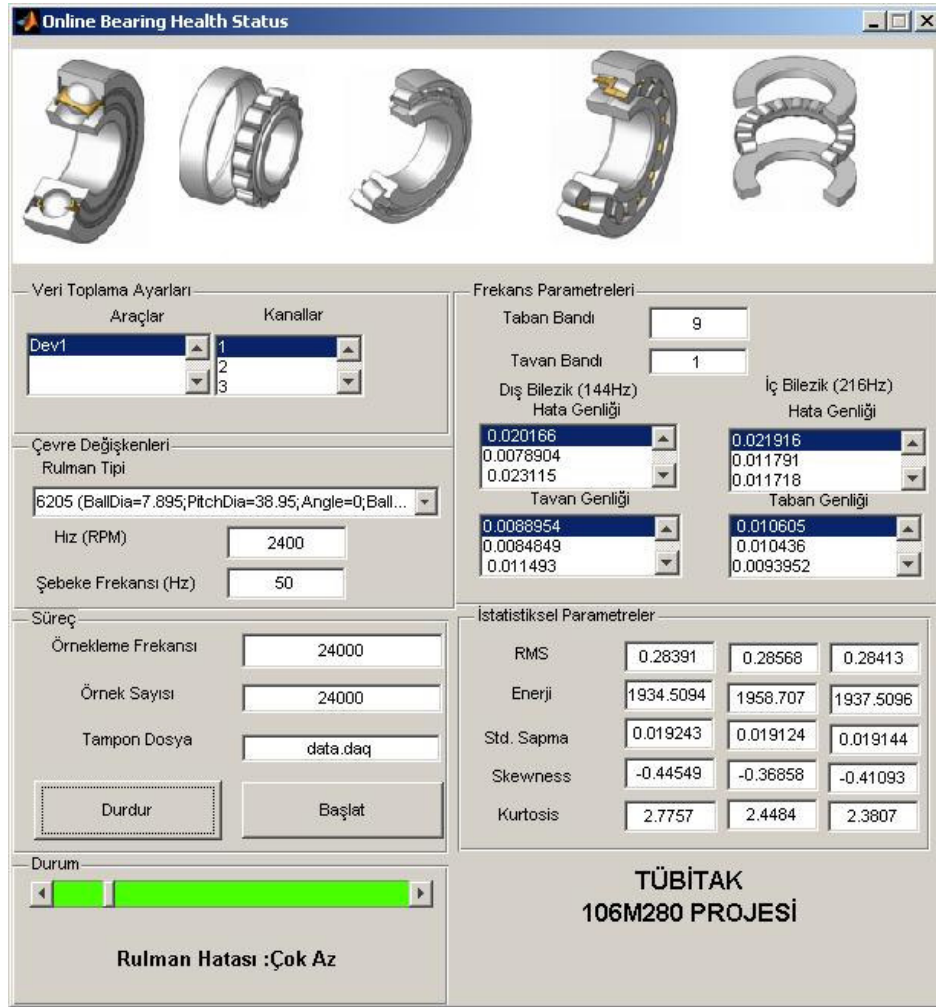
Bu bölümde bilyalı rulmanlarda, titreşim analizi ile bölgesel hata kaynaklarının yeri ve gelişim durumunun gözlemlendiği bir deney yapılmıştır. Bu amaçla sağlam rulmanlara yeri ve gelişme durumu önceden tanımlanmış çeşitli yapay hatalar verilmiştir. Önceden bilinen bu hataların, titreşim işaretlerinin analizi sonucu kestirilen hatalarla örtüşme durumları incelenmiştir.

Dış ve iç bilezik hataları ile bu hataların yan bantları makinanın çalışma devrine göre hesaplanarak frekans spektrumundaki yerleri önceden işaretlenmiştir. Titreşim işaretinin frekans cevabının, aynı grafikte, önceden hesaplanarak işaretlenen frekans bileşenleriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, titreşim işaretlerine ait frekans spektrumu incelendiğinde, hata frekans bileşenlerinin hatanın varlığını; bu bileşenlere ait genliklerin ise hatanın gelişme durumunu gösterdiği ispatlanmıştır.

Gerçek Zamanda Hata Tespiti

Bu deneyde rulman hatalarını gerçek zamanda, çevrimiçi izlemek için frekans ve zaman bilgilerini kullanan bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, MATLAB™ üzerinde kullanıcı ara yüzü oluşturularak hatalı ve hatasız rulman parametre oranlarının ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin gerçek zamanda işlem yapabilmesi için işlem yükünün optimum seviyede tutulması gerekir. Bu amaçla parametre oranları, belirli bir süre içerisinde oluşturulan istatistiksel veri tabanına göre ayarlanmıştır. Geliştirilen yazılıma ait ekran görüntüsü şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7: Kullanıcı ara yüzü.

Rulman çalışma durumları 6 kümeye ayrılarak hesaplanmıştır:

1. Hatasız (None)
2. Çok Az Hatalı (Slight)
3. Az Hatalı (Small)
4. Orta Hatalı (Medium)
5. Çok Hatalı (Big)
6. Tehlikeli Derecede Hatalı (Catastrophic)

Sistemin işleyebilmesi için operatör tarafından girilmesi gereken birkaç parametre mevcuttur.

1. Milin bağlı bulunduğu motorun hızı devir/dk cinsinden biliniyor olmalıdır.
2. Şehir şebeke frekansı seçime bağlı olarak girilebilir. Özellikle akım işaretinden elde edilen frekans spektrumunda, alternatif akım frekansına ait tepe noktaları (Türkiye için 50 Hz, Amerika için 60 Hz) ve bunların yan bantları oldukça yüksektir. Hata kaynaklı tepe noktalarını görece düşük seviyede bırakmaması için elimine edilmesi gerekir.
3. Hata frekanslarını elde etmek için rulman tip bilinmelidir. Bir XML (Extended Markup Language) dosyasında bazı rulmanlara ait bilgileri ön tanımlı olarak gelmektedir. Kullanıcı bu bilgiler üzerinde oynama yapabilir. Tablo 4.1’de 6205 tipli rulmanın bulunduğu dal gösterilmektedir.

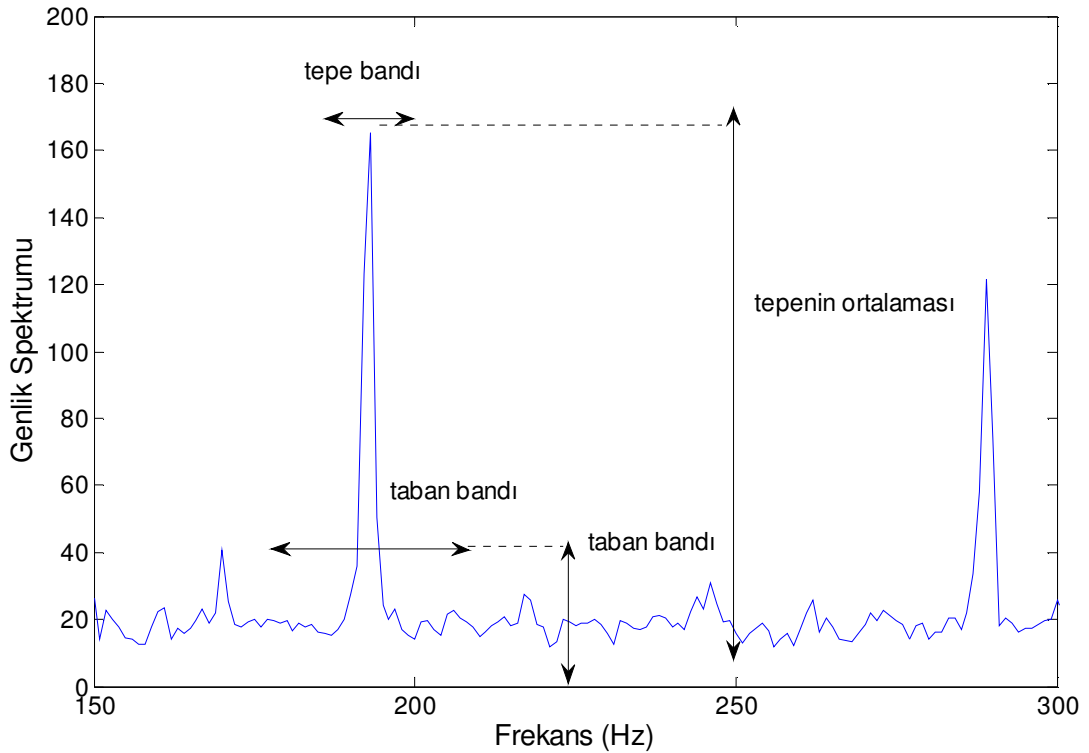
Tablo 4.1: XML dosya biçimi.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
  <BearingFeatures>
    <Bearing
      BallDiameter=7.895
      PitchDiameter=38.95
      ContactAngle=0>
      6205
    </Bearing>
  </BearingFeatures>
```


4. İşlenecek verinin depolanacağı tampon alanı, örnekleme frekansı ve örnek sayısı belirlenmelidir. Çalışmada 24 kHz'lik bir örnekleme frekansı ile 5 sn'lik tampon alan ön tanımlı değerler olarak gelmektedir.

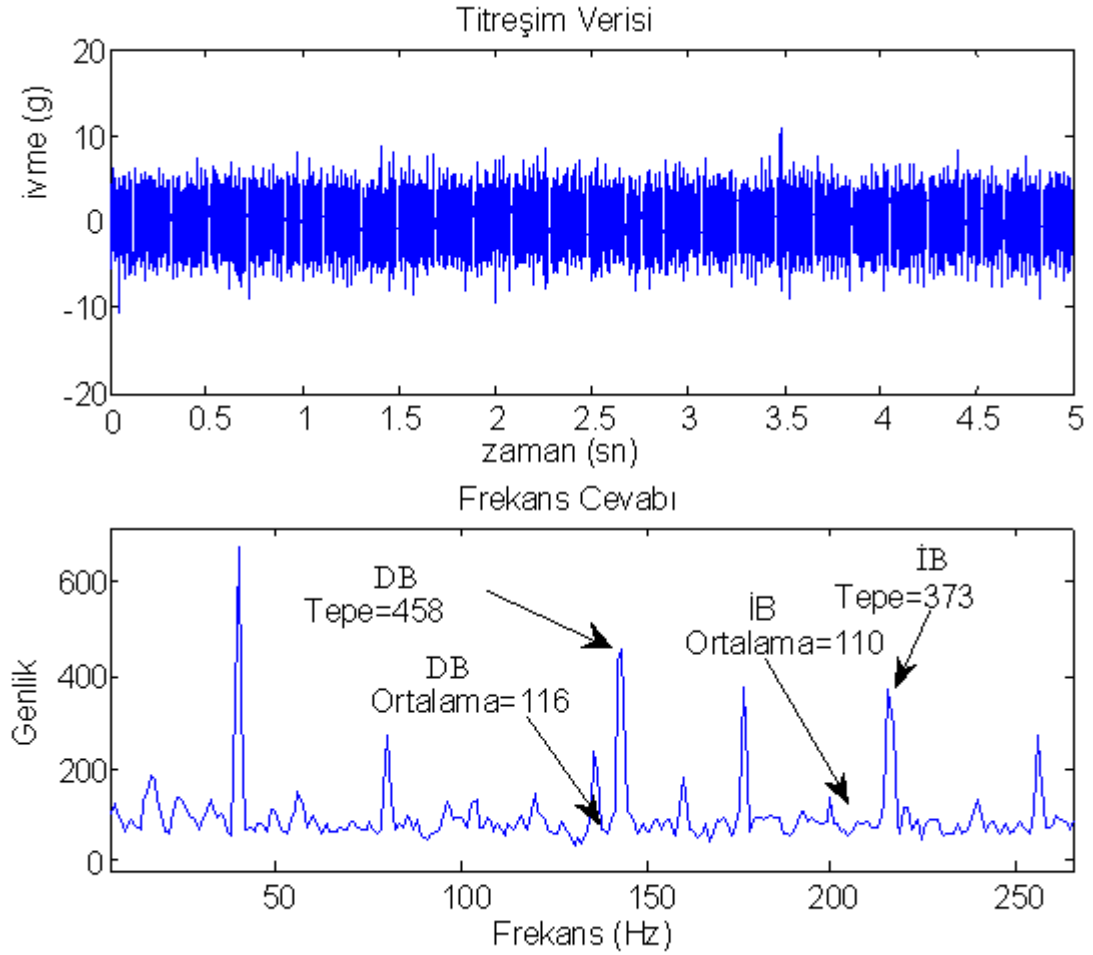
5. Katsayıların tespit edilmesi amacıyla tepe bandı ve taban bandı belirlenmelidir. 2. bölümde belirtildiği üzere yuvarlanma elemanları hasarlı bölge üzerinden geçerken şok darbeler üretir. Bu darbeler frekans spektrumunda tepe noktaları olarak yer alır. Tepe bandı bu noktayı kapsayan ± 1 Hz'lik bölgeyi, taban bandı ise tepe noktası ve bu noktanın çevresindeki düşük genlikli bileşenleri kapsayan ± 9 Hz'lik bölgeyi kapsar. Katsayıların hesaplanması bu bölgelerin oranları şeklinde gerçekleşir. Şekil 4.8'de bu bölgeler görülmektedir.

Bu deneyde öne sürülen şudur ki; tepe genliği ile taban genliğinin ortalamalarının oranları bir parametre olarak alınır, rulman hataları motor hızından bağımsız olarak tespit edilebilir. Burada önemli olan nokta her mekanik sitem için kendine uygun katsayıların bulunması işlemidir. Katsayılar sistem ilk kurulduğu anda belirlenmelidir.

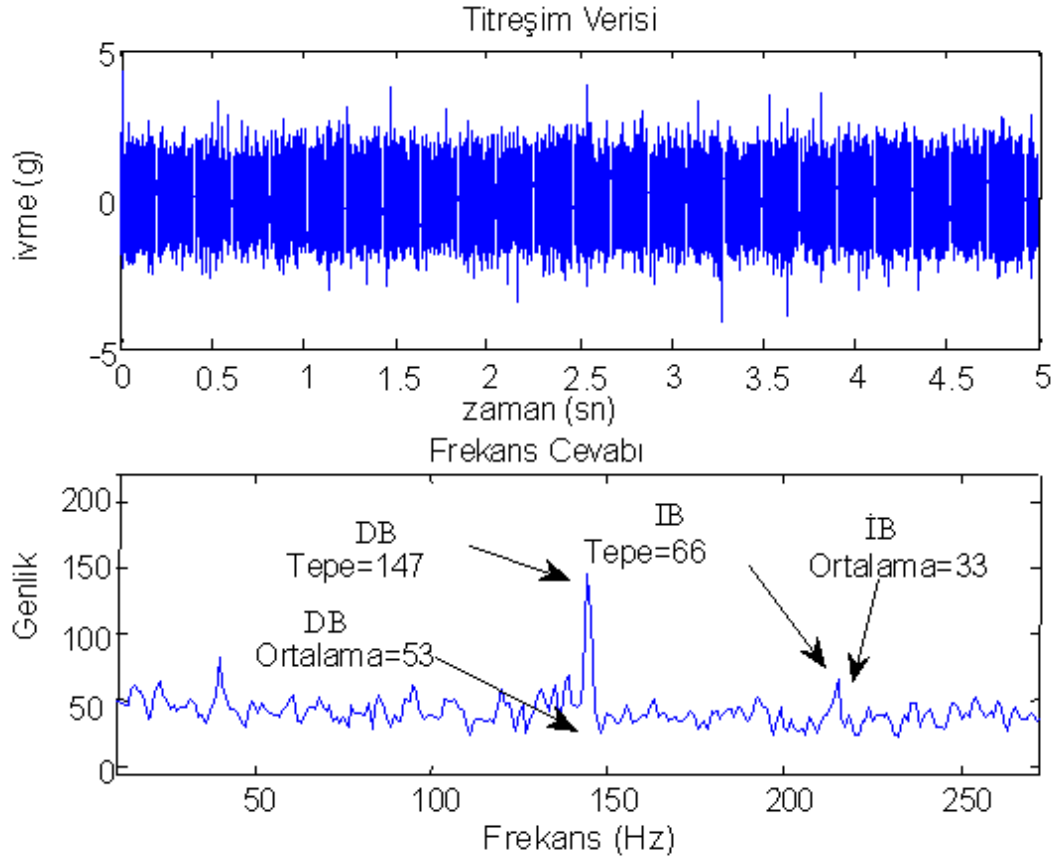


Şekil 4.8: Katsayıların hesaplanması.

Rulman tipine göre iç ve dış bilezik hata frekansları belirlendikten sonra tepe ve taban genlikleri hesaplanır. Kutusundan yeni çıkarılmış normal bir rulmana ait zaman ve frekans verileri şekil 4.9’da sunulurken aynı tip rulmanın 0.3mm iç bilezik ve 0.3mm dış bilezik hatasına sahip olanı şekil 4.10’da verilmiştir.



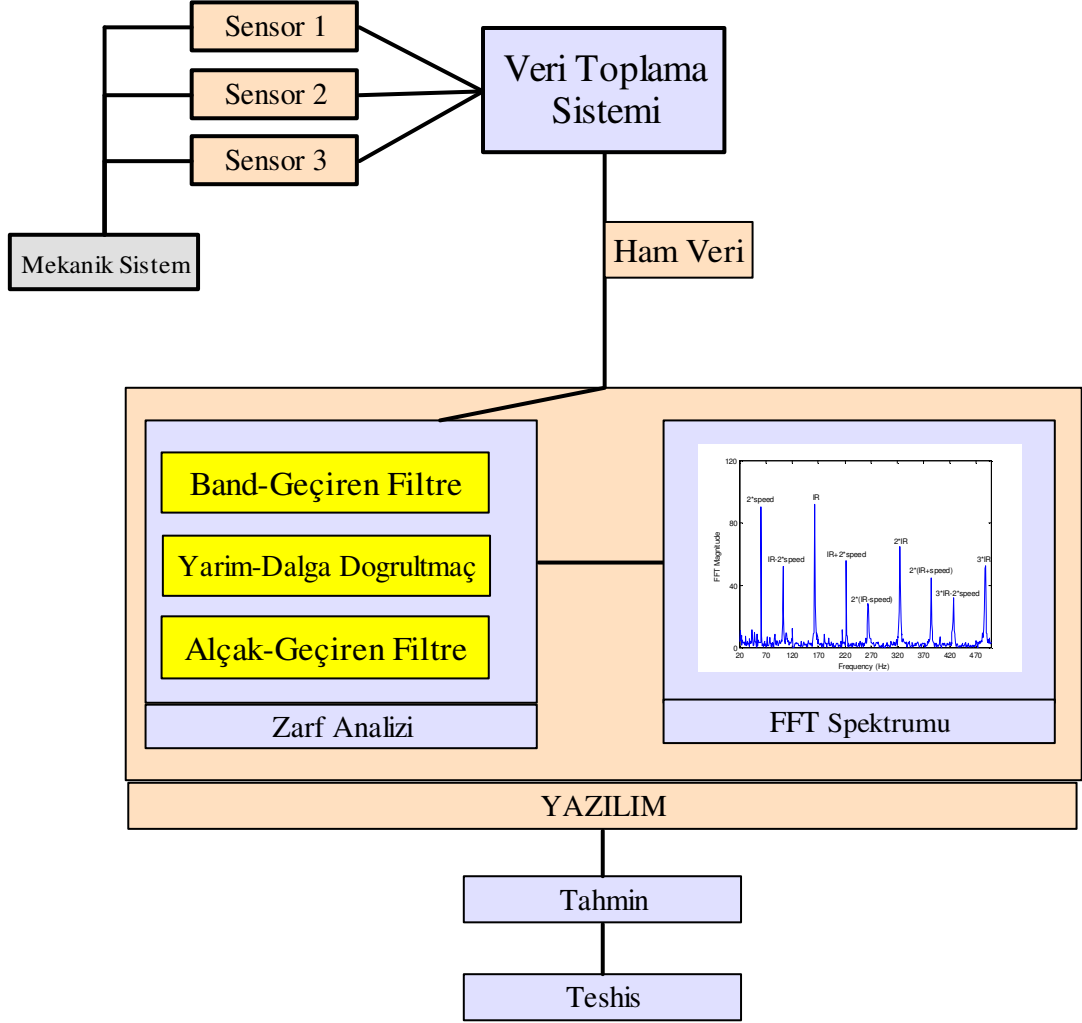
Şekil 4.9: 0.3mm iç ve dış bilezik hatasına sahip rulmana ait titreşim verisi ve bu veriye ait frekans cevabı.



Şekil 4.10: Normal rulmana ait titreşim verisi ve bu veriye ait frekans cevabı.

Hata tespitinde bulunan fonksiyon, rulmana ait frekans verilerinin oranlarını hesaplar ve sistemin ilk kurulduğu an hesaplanan oranlarla karşılaştırarak çıkış cevabını üretir. Bu fonksiyona ait adımlar Şekil 4.11’de gösterilmektedir.

Hata Tespiti



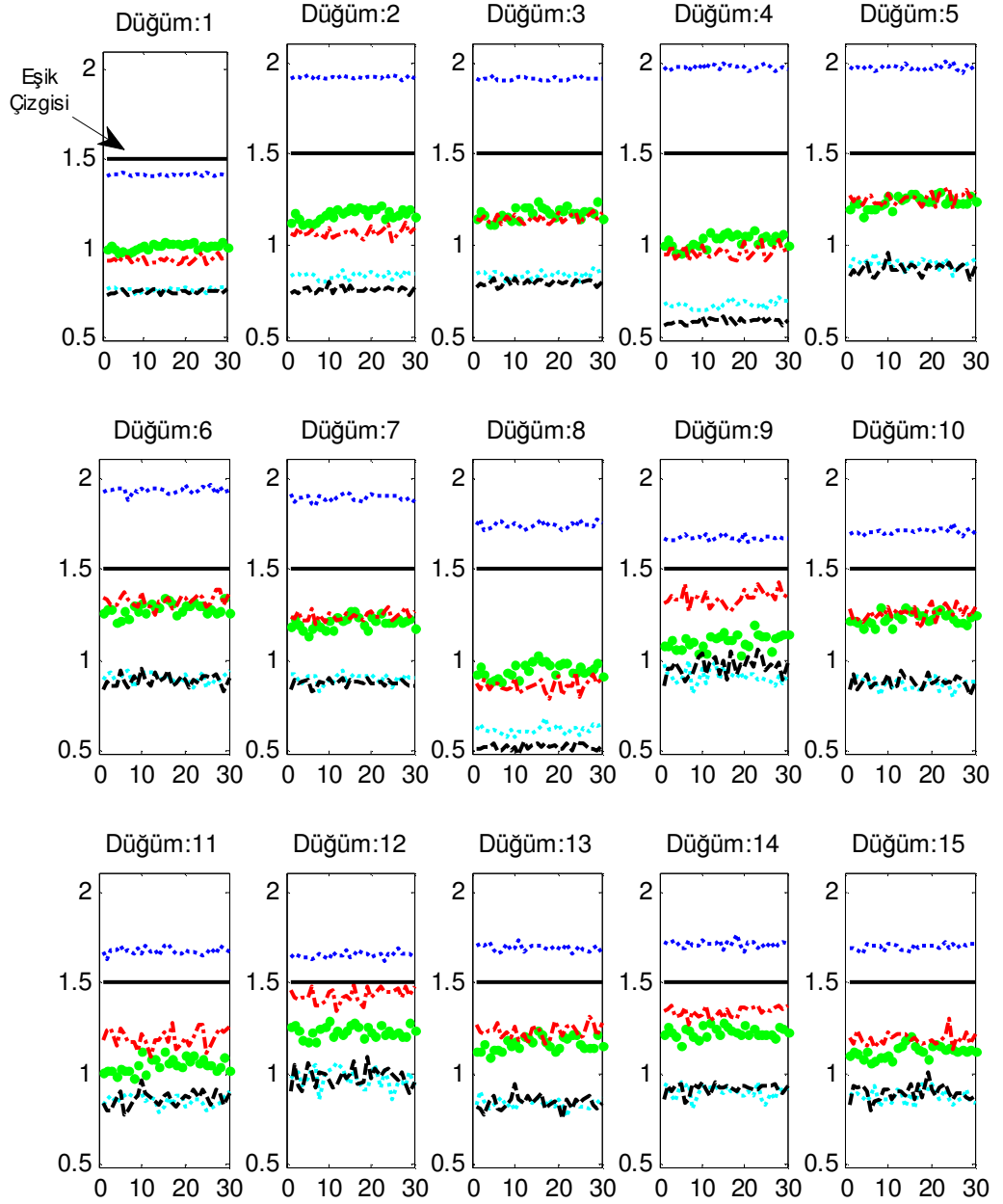
Şekil 4.11: Gerçek zamanda hata tespiti.

Yaklaşık Entropi Analizi

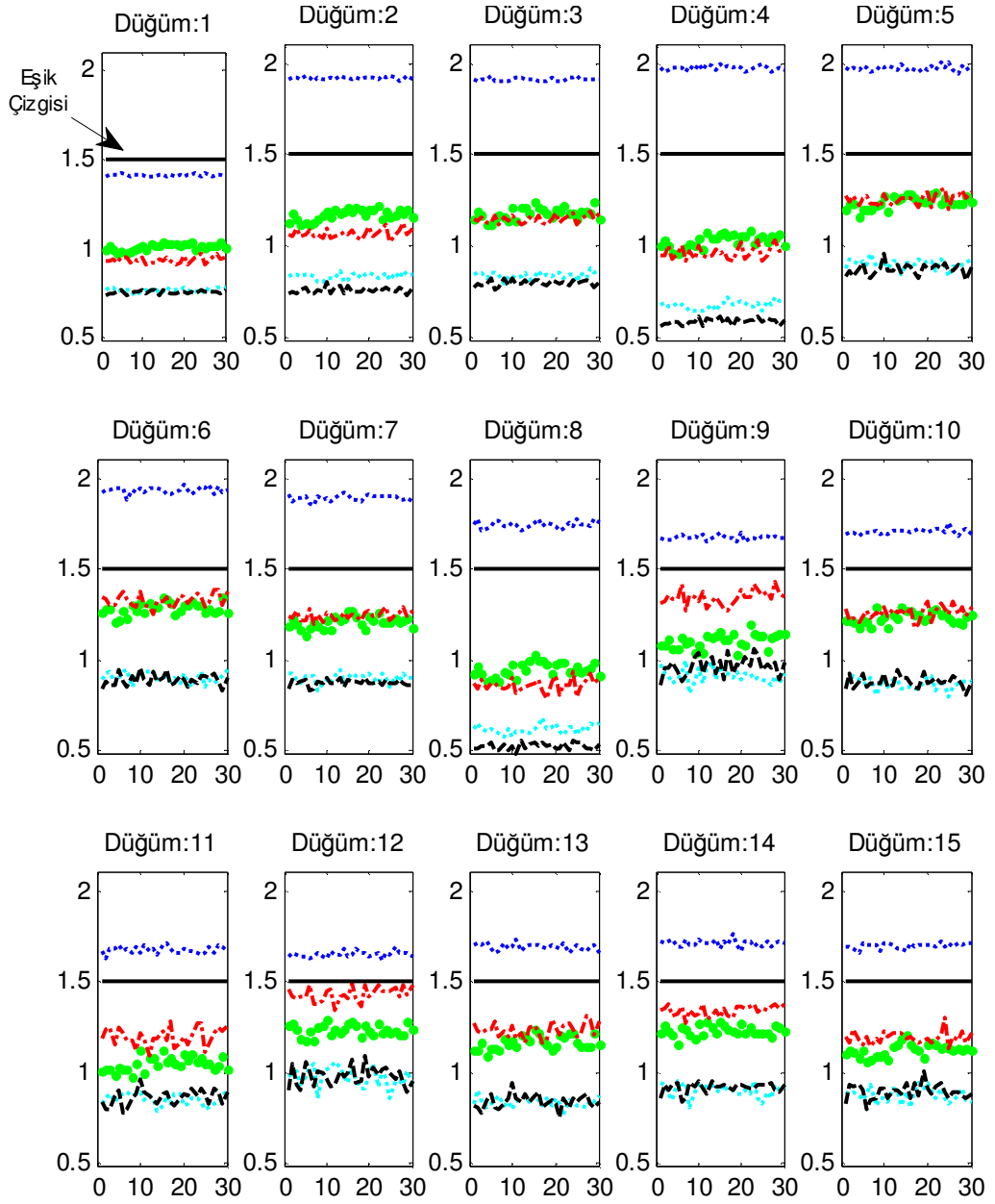
Titreşim işaretlerine dalgacık paket dönüşümü uygulandıktan sonra elde edilen düğüm katsayılarının yaklaşık entropi değerleri hesaplandığında, normal ve hatalı rulmanların hata boyutlarına göre genel bir eşik çizgisi ile birbirinden ayrıldıkları tespit edilmiştir.

Şekil 4.12-4.14'te 0.5 sn uzunluğuna denk gelen ve her biri 12000 örnekten oluşan 30 pencerede ApEn (Approximate Entropy – Yaklaşık Entropi) değerleri hesaplanan hatalı ve hatasız rulman verileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Normal rulmana ait

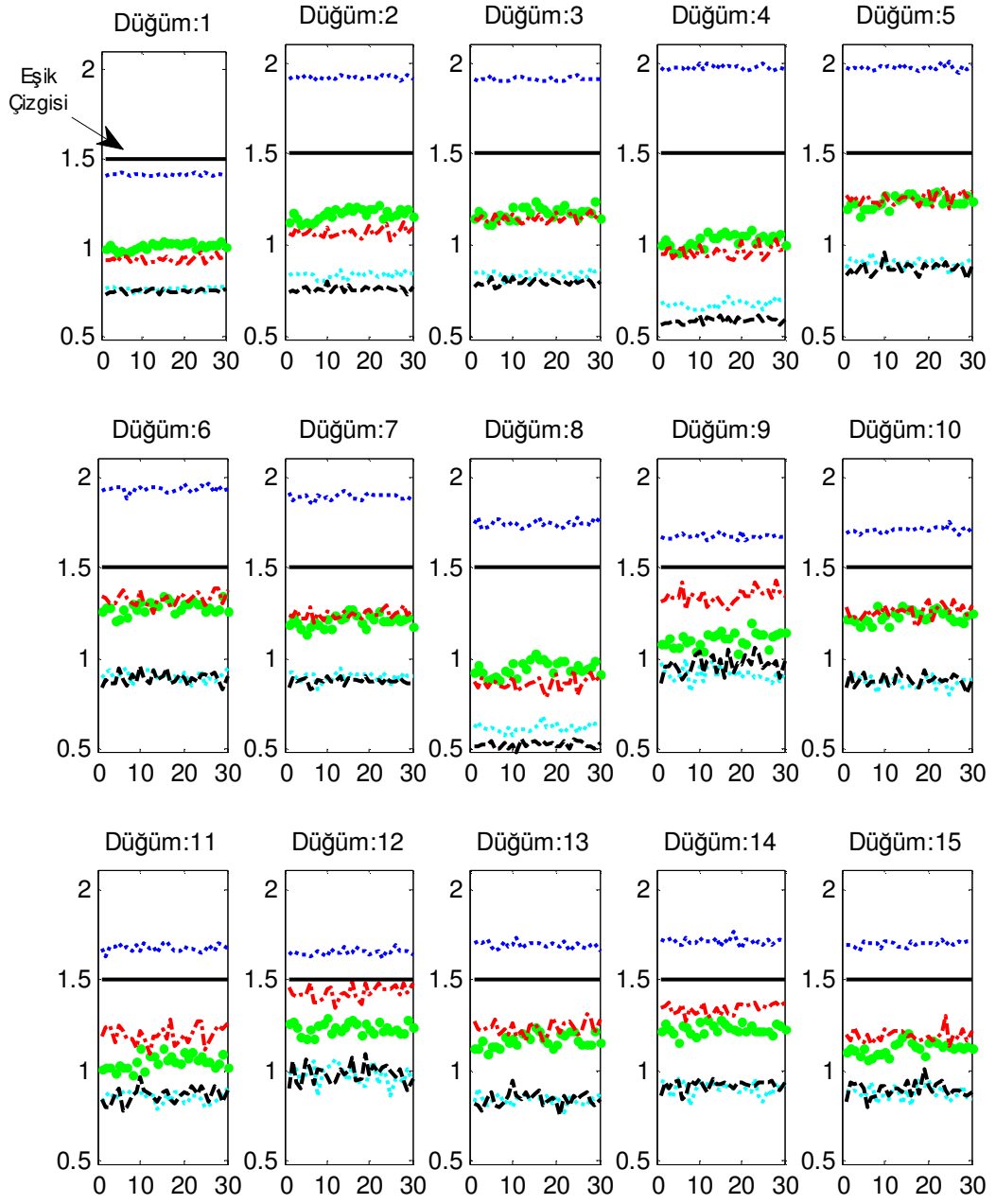
değerlerin hatalı olanlara göre net bir şekilde ayrıldığı ve hatalı olanların ise kendi aralarında görece olarak ayrılabilirdiği tespit edilmiştir. Yani hata miktarı arttıkça ApEn değerleri azalmaktadır.



Şekil 4.12: 1200 devir/dk için ApEn değerleri



Şekil 4.13: 1600 devir/dk için ApEn değerleri



Şekil 4.14: 2000 devir/dk için ApEn değerleri

Bölgesel hataya sahip bir rulmanın makina devrine bağlı olarak belli frekanslarda yüksek genlikli frekanslar oluşturacağı öngörülür. Hatasız bir rulmana ait işaretler ise düşük genlikli rasgele dağılımlı karakteristiğe sahiptir. Bu durumda genel karakteristiği daha belli olan hatalı rulmanın entropisi, rasgele işaretlerden oluşan hatasız rulmanın entropisine göre daha düşük olacaktır. Bu durum deney sonuçlarında da kendisini göstermektedir.

Şekil 4.12-4.14'te her düğüm için entropisi en yüksek işaret hatasız rulmana ait işaret olmuştur. Burada makina devrinin ApEn değerlerini etkilemediği, değerlerin yalnızca hata boyutuyla ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Dikey ekseninde 1.5 ApEn değeri eşik değeri kabul edilirse, hatalı rulman verilerinin bu eşik altında dağıldığı açıkça görülmektedir.

Hatasız rulman işaretine ait ApEn değerlerinin eşik olarak belirlenen değer altında kaldığı tek düğümün 1. düğüm olduğu görülmektedir. Bölüm 2'de de belirtildiği gibi dalgacık paket dönüşümünün 1. düğümü işaretin kendisidir. 2 ve 8. düğümlerde ise hatalı rulmana ait işaretlerin hata boyutlarına göre birbirinden ayrılabilirdiği gözlemlenmektedir. Bu durum açıkça gösteriyor ki, ham işaretten elde edemediğimiz çok önemli bilgiler dalgacık paket dönüşümü uygulandığında elde edilebilmektedir.

Bu deneyde, rulman titreşim işaretlerine ait entropi ölçütünün (ApEn) rulman hatalarını tespit etmede başarılı olduğu görülmüştür. Dalgacık paket dönüşümü yardımıyla hatalı ve hatasız rulmanlara ait entropi değerleri bir eşik çizgisi ile birbirlerinden tamamen ayrılabilir. Ayrıca hatalı rulmanlar arasında hatanın büyüklüğüne bağlı olarak bir sıralandırmanın varlığı da kısmen belirlenmiştir.

Yapay Zeka Teknikleri

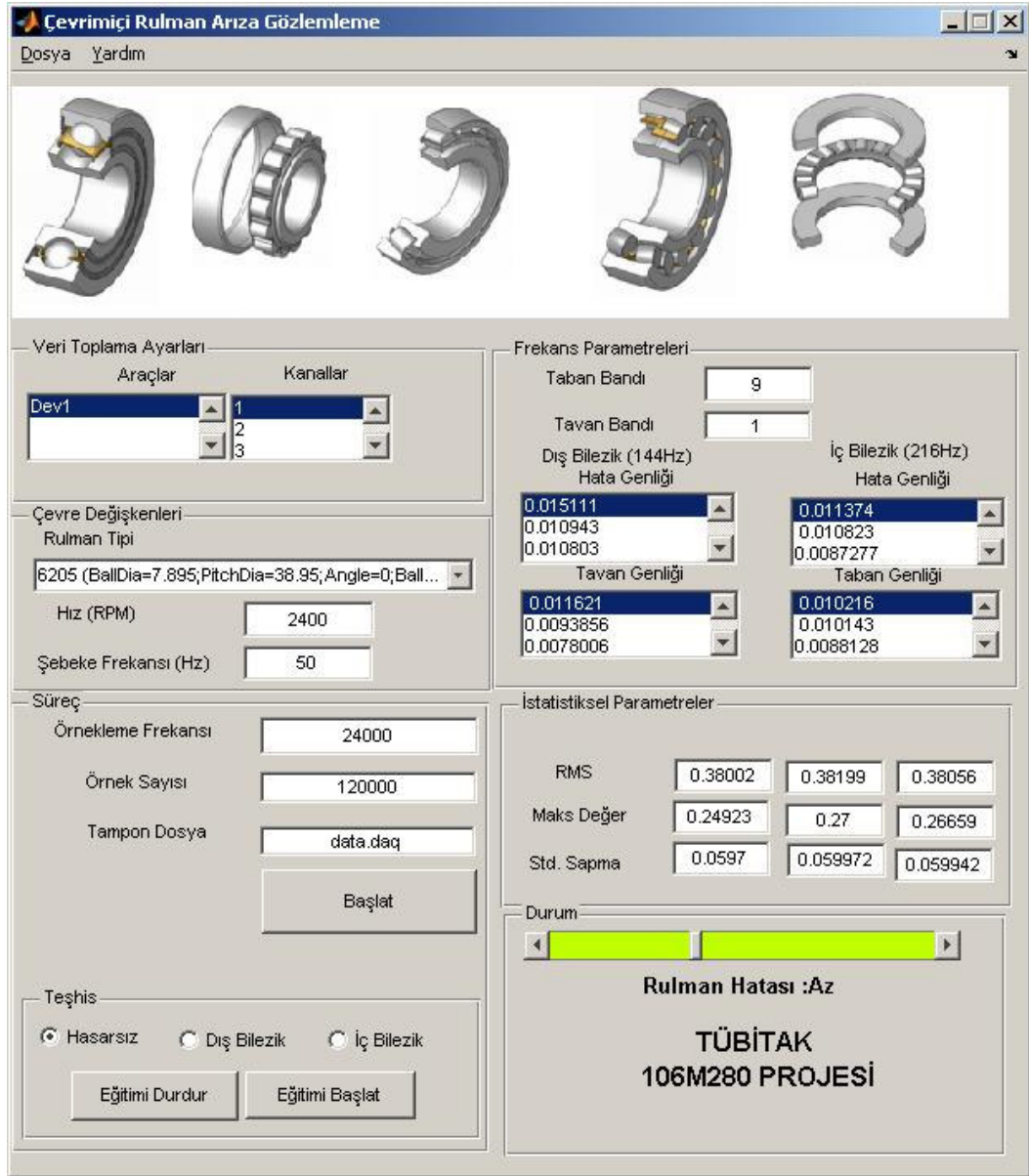
Rulman yatağı üzerinden alınan titreşim ve akım işaretleri üzerinde bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı iki ayrı sistem oluşturulmuştur. Bulanık mantık uygulaması çevrimiçi bir uygulama olarak görev yaparken, yapay sinir ağları uygulamasında çevrimdışı teknikler kullanılmıştır.

Bulanık mantık

Bu uygulamada bulanık mantık yaklaşımı kullanan ve çevrimiçi hata tespitinde bulunan bir yazılım sistemi geliştirilmiştir. Bölgesel hata karakterleri tespit edildikten sonra ilgili frekans bileşenleri hesaplanarak bulanık sisteme giriş olarak verilir. Bütün giriş parametreleri 0 ile 1 arasında normalize edilir. Herhangi bir verinin belirli bir aralıkta normalize edilebilmesi için, o verinin en büyük ve en küçük değerlerinin

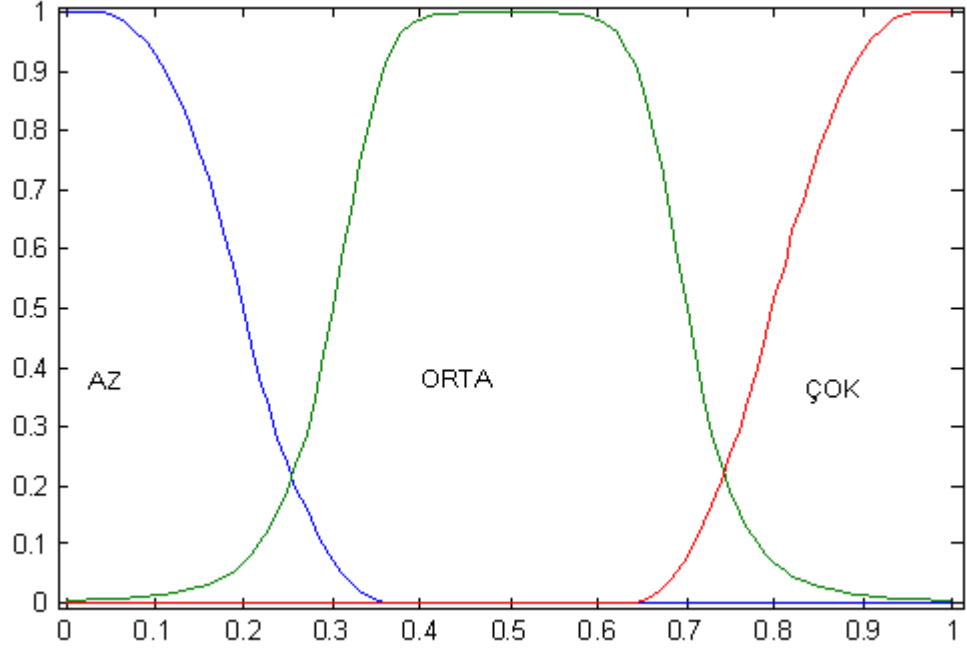
bilinmesi gerekir. Ancak çevrimiçi sistemlerde verinin tamamının elde edilmesi şansı yoktur, fakat kestirilmesi mümkündür. Bu nedenle sistem, bir kez hatasız normal bir rulman için ve bir kez de %100 hatalı olduğu kabul edilen bir rulman için ayrı ayrı çalıştırılmalıdır. Sistem bu eğitim modelinde çalışırken normalizasyon işlemi için gereken parametreler de hesaplanır.

Sistem, bölüm 4.1'dekine yakın bir esneklikte tasarlanmış olup bu sistemden farklı olarak bulanık mantık yaklaşımı tercih edilmiştir. Sisteme ait ekran görüntüsü şekil 4.15'te verilmektedir.

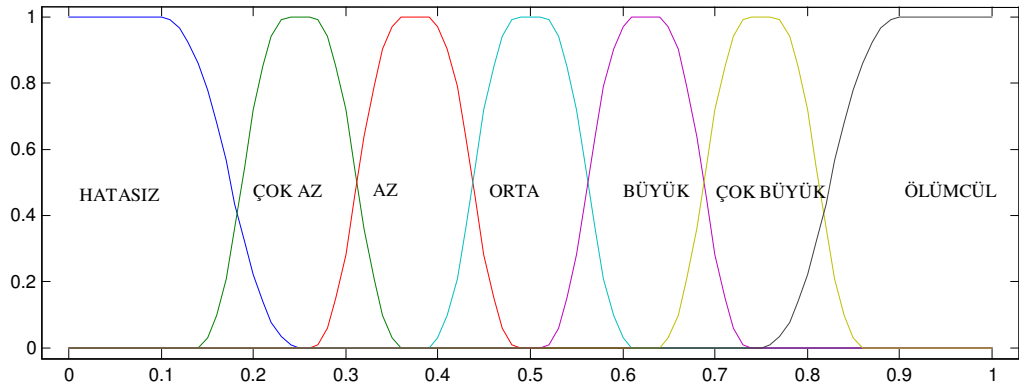


Şekil 4.15: Bulanık mantık kullanıcı ara yüzü.

Sisteme ait giriş parametreleri motor akımı, Y-ekseni titreşimleri ve X-ekseni titreşimlerine ait frekans cevabı olarak seçilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.16: Bulanık sisteme ait giriş üyelik fonksiyonları



Şekil 4.17: Bulanık sisteme ait çıkış üyelik fonksiyonları

Bu üyelik fonksiyonları arasındaki bulanık çıkartım ilişkisi, başka bir deyişle bulanık kural tablosu Tablo 4.2’de verilmektedir.

Tablo 4.2: Bulanık kurallar.

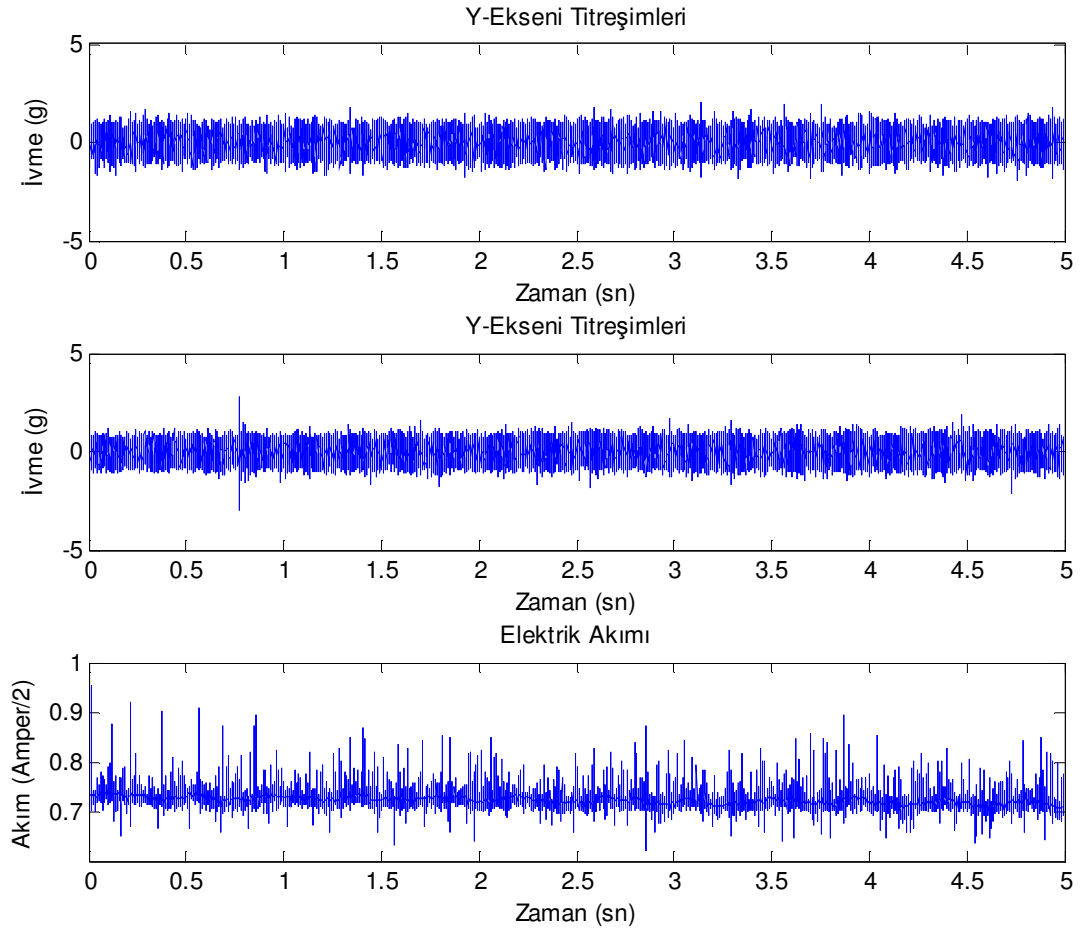
Y-EKSENİ	X-EKSENİ	AKIM	ÇIKIŞ
Az	Az	Az	Hatasız
Az	Az	Orta	Hatasız
Az	Az	Büyük	Çok Az
Az	Orta	Az	Hatasız
Az	Orta	Orta	Çok Az
Az	Orta	Büyük	Çok Az
Az	Büyük	Az	Çok Az
Az	Büyük	Orta	Çok Az
Az	Büyük	Büyük	Az
Orta	Az	Az	Çok Az
Orta	Az	Orta	Çok Az
Orta	Az	Büyük	Çok Az
Orta	Orta	Az	Çok Az
Orta	Orta	Orta	Az
Orta	Orta	Büyük	Az
Orta	Büyük	Az	Orta
Orta	Büyük	Orta	Orta
Orta	Büyük	Büyük	Büyük
Büyük	Az	Az	Orta
Büyük	Az	Orta	Orta
Büyük	Az	Büyük	Büyük
Büyük	Orta	Az	Orta
Büyük	Orta	Orta	Büyük
Büyük	Orta	Büyük	Büyük
Büyük	Büyük	Az	Çok Büyük
Büyük	Büyük	Orta	Ölümcül
Büyük	Büyük	Büyük	Ölümcül

Sisteme paketinden yeni çıkarılmış sağlam bir rulman ve 2mm kalınlığında iç ve dış bilezik hatasına sahip - %100 hatalı olduğu kabul edilen – rulman verilerinden alınan uzun süreli sonuçların ortalaması girilerek normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Sistemin doğruluğunun sınanması açısından, dışı bileziğinde 1mm kalınlığında yapay hata verilmiş bir rulman ve yapay hataya sahip olmayan ancak bir süre kullanılmış bir rulman kullanılarak deney yapılmıştır. Bu deneye ait giriş verileri ve üretilen sonuç Tablo 4.3'te verilmektedir.

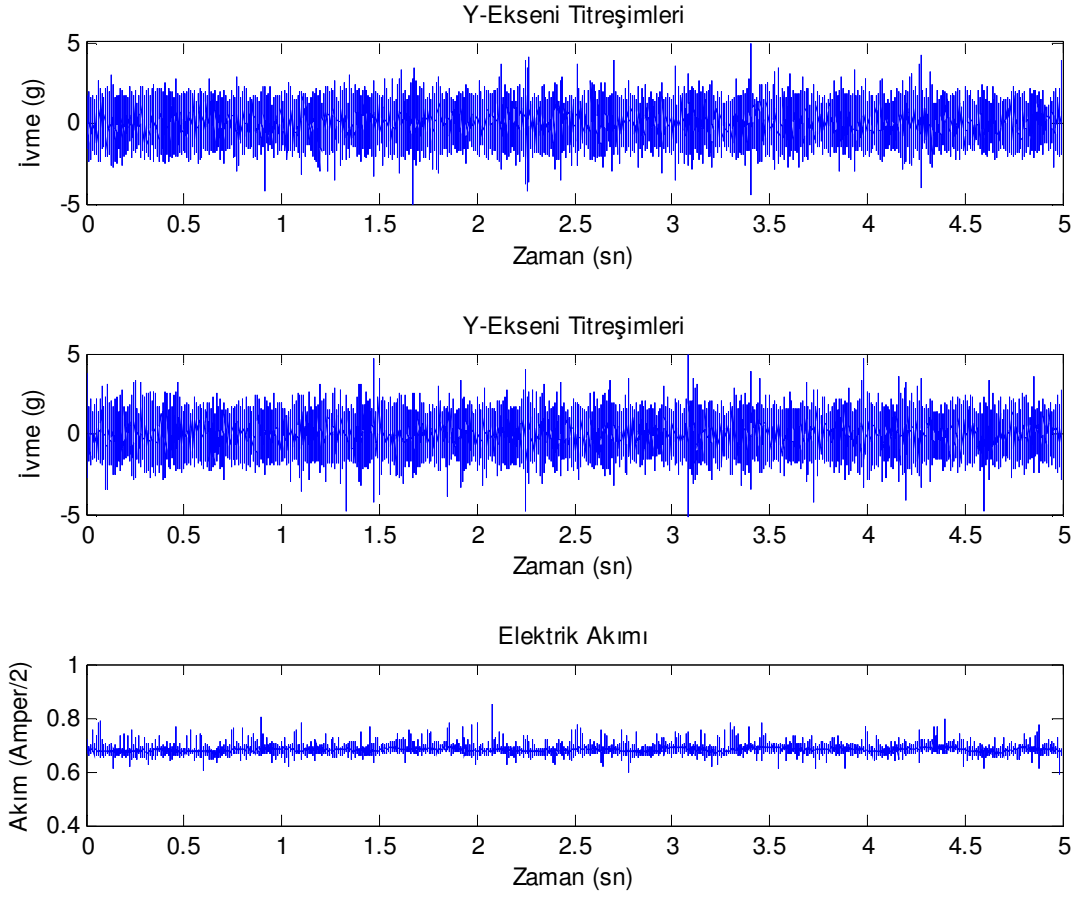
Tablo 4.3: Sistem test sonuçları

Sensörler	Kullanılmış Rulman		1mm'lik Yapay Dış Bilezik Hatasına Sahip Rulman	
	DB Genliği	İB Genliği	DB Genliği	İB Genliği
Y-Eksenli Titreşimleri	41	161	337	83
X-Eksenli Titreşimleri	100	43	175	55
Akım	0.406	0.357	0.253	0.31
TEŞHİS	AZ		ÇOK	

Bu testte kullanılan rulmanlara ait ham veriler sırasıyla Şekil 4.18 ve 4.19'da verilmektedir.



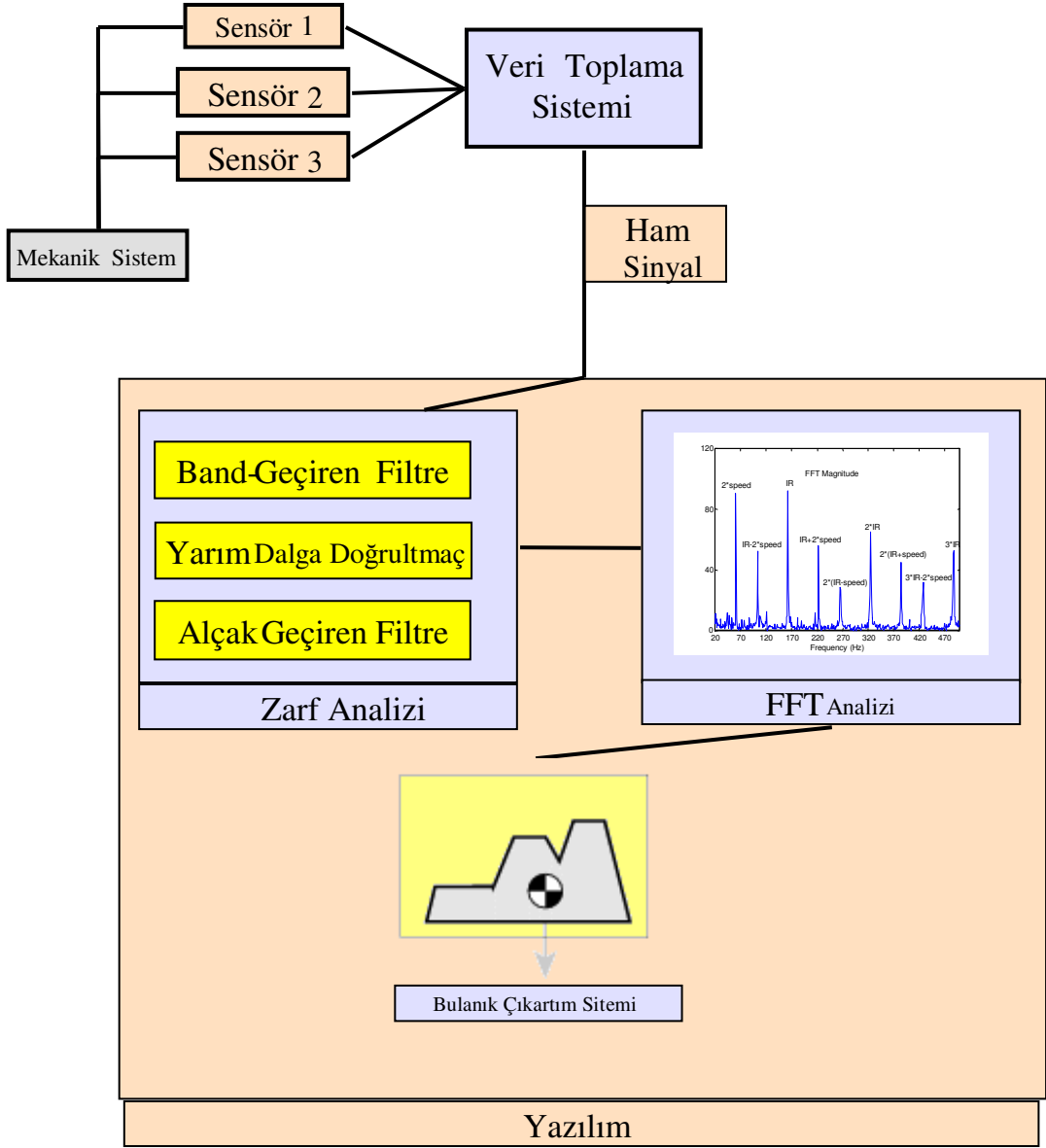
Şekil 4.18: Az kullanılmış rulmana ait ham veriler



Şekil 4.19: 0.1mm yapay dış bilezik hatasına sahip rulmana ait ham veriler

Bulanık mantık hata tespit sistemlerinde çevrimiçi gözlemlenebilir yöntem olarak etkin bir biçimde kullanılabilir. Ancak çevrimiçi bir yöntem olduğu için normalizasyon sınırlarının kestirilebilir olması şarttır. Bu çalışmaya ilişkin işlem adımları Şekil 4.20’de gösterildiği gibidir.

Hata Tespiti



Şekil 4.20: Çevrimiçi bulanık hata gözlemlene sistemi.

Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları kullanılarak yapılan deney çalışmasında ise öncelikle hatalı rulmanların hatasız rulmanlardan ayrılması ve sonrasında hatalı rulmanların hata bölgelerine göre sınıflandırılması problemi çevrimdışı tekniklerle incelenmiştir.

Yapay sinir ağırları tabanlı sistemi tasarlarırken öncelikle giriş parametrelerinin titizlikle seçilmesi gerekmektedir. Gereğinden fazla parametre kullanmak işlem yükünü artırır, az parametre ile de sağlıklı ölçümler yapılamaz.

Giriş parametreleri hem zaman hem de frekans uzayından seçilmiştir. Bu nedenle makinanın çalışma hızı da giriş parametrelerinde yer almalıdır. Bununla beraber giriş parametrelerini sıralamak gerekirse:

1. Motor çalışma hızı (devir/dk)
2. Karelerin ortalamasının karekökü – KOK (Root mean square - RMS)
3. Standart sapma
4. Kurtosis (Yatıklık)
5. Skewness (Çarpıklık)
6. Dış bilezik hata frekans bileşeni
7. İç bilezik hata frekans bileşeni
8. Bilya dönme frekans bileşeni

şeklinde yer alır.

Karelerin ortalamasının karekökü (KOK) ortalaması sıfır olan bir salınımın standart sapması anlamına gelir. Bir sinüs fonksiyonunun ortalaması 0 iken, KOK değeri en büyük genliğin $\sqrt{2}/2 \cong 0.707$ katı kadardır. Ancak, rasgele işaretlerde bu durumun gözlemlenmesi mümkün değildir. Bu deneyde kullanılan titreşim işaretleri 0 etrafında salınım yaptığı için genliklerinin büyüklükleri ne olursa olsun ortalamalarının 0'a yakın bir değer olması beklenir. Bu nedenle KOK ve standart sapma sisteme giriş olarak verilirse olumlu sonuçlar getirir.

Kurtosis, dağılımın yatıklığının bir ölçüsüdür. Normal dağılımın kurtosis değeri 3'tür. Bazı durumlarda kurtosis değerinden 3 çıkarılarak normal dağılımın 0'a getirilmesi sağlanabilir. Bu çalışmada bu durum kullanılmamaktadır. Bir dizinin kurtosis değeri Denklem 4.1'de verilmektedir.

$$Kurtosis = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (4.1)$$

Skewness, ortalama değer noktasındaki asimetrinin bir ölçüsüdür. Skewness değerinin negatif olması, dağılımın genelde ortalamanın sol kısmına doğru olduğu sonucunu çıkarırken bu değerin pozitif olması da tersi bir durumu belirtir. Normal dağılımın skewness değeri sıfırdır. Bir dizinin skewness değeri Denklem 4.2’de verilmiştir.

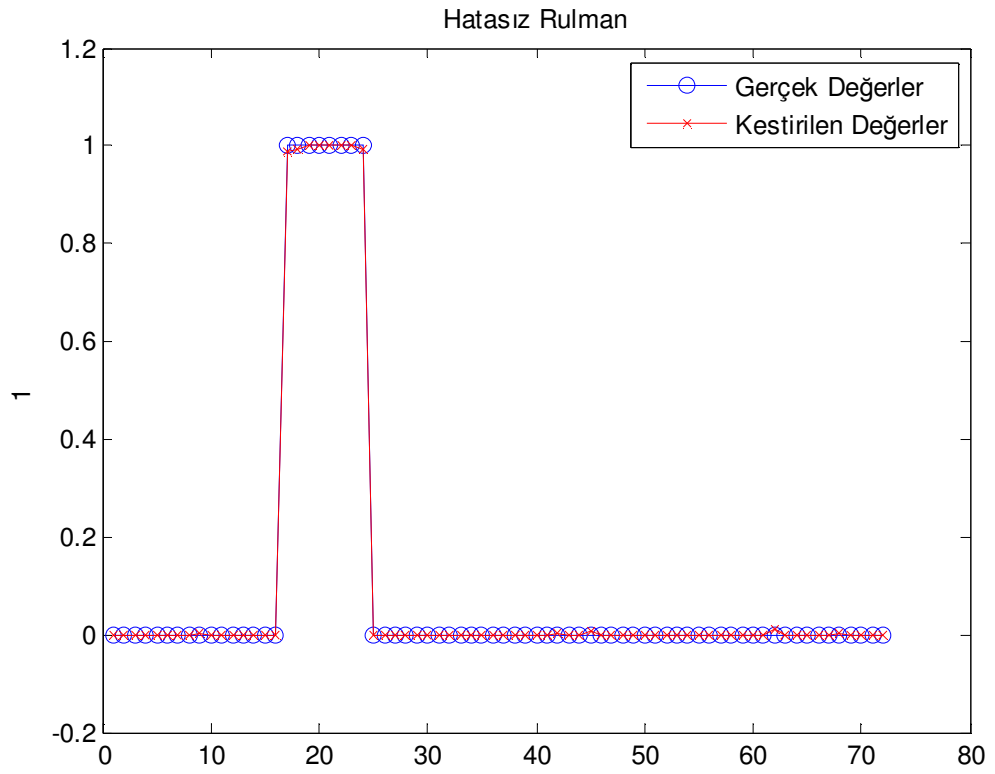
$$Skewness = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (4.2)$$

Burada μ ve σ sırasıyla x dağılımının ortalaması ve standart sapmasıdır. E(t) ifadesi ise t miktarının beklenen değerini ifade eder. Skewness ve kurtosis değerleri hem zaman uzayındaki verinin hem de frekans uzayındaki verinin üzerinden elde edilerek kullanılmıştır.

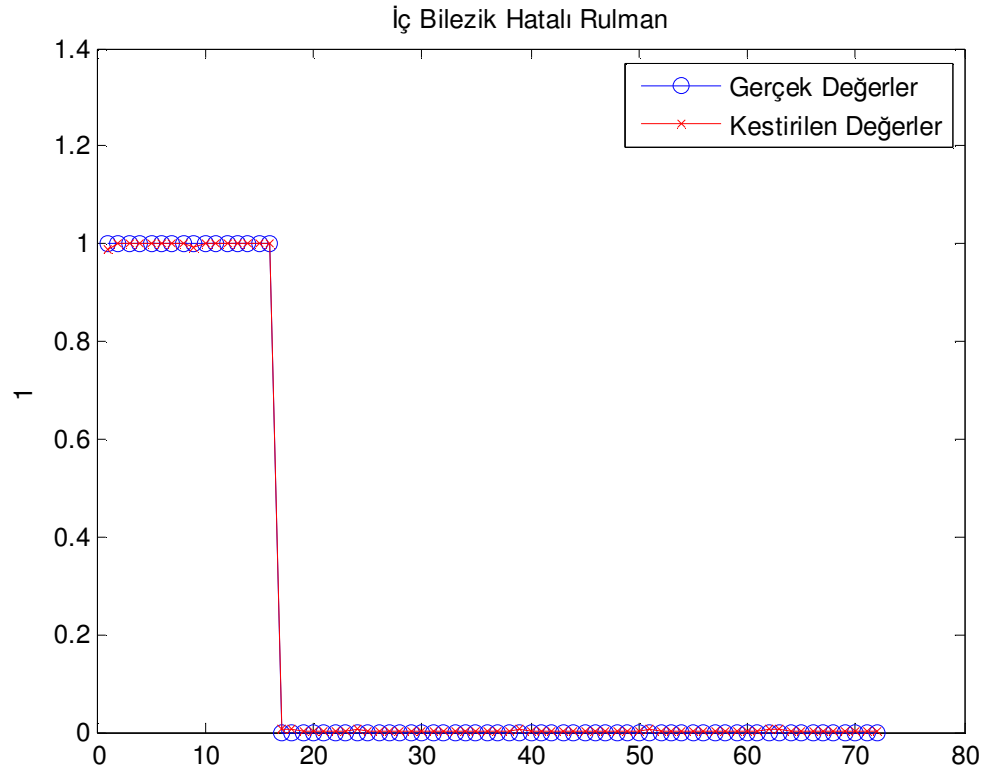
Dış bilezik, iç bilezik ve bilya dönme frekanslarının elde edilmesi 2. bölümde yer almaktadır. Sonuç olarak zaman ve frekans uzayındaki bu bilgiler yapay sinir ağlarının (YSA) girişine verilerek çıkışta (eğer varsa) hatanın sınıflandırılması işlemi yapılır.

Bu deneyde kullanılan veriler Ek-A’da verilmektedir.

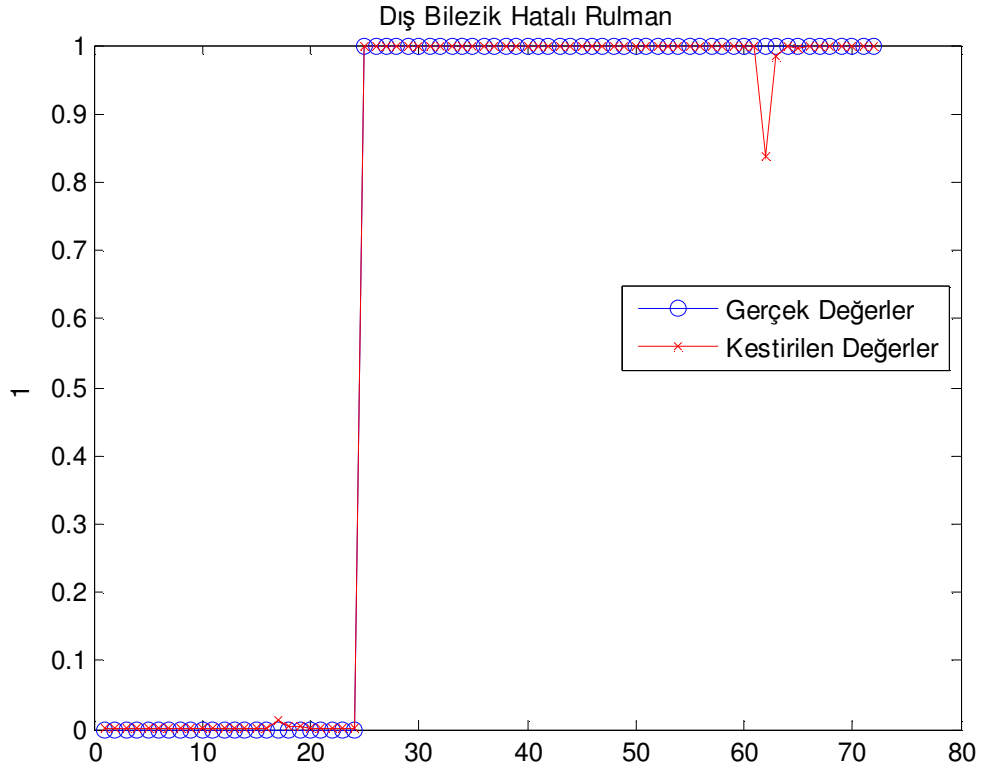
Bu deneyde muhtelif büyüklüklerde hataya sahip rulmanlardan hatasız olanlar 0, iç bilezik hatalı olanlar 1, dış bilezik hatalı olanlar ise 2 ile YSA çıkışında temsil edilmektedir. Her hata tipi için ayrı bir model oluşturulmuş ve rulmanların tamamı bu üç modelden geçirilerek en uygun hata tipi seçilmiştir. Bu modellere ait grafikler Şekil 4.21-4.23’de sunulmuştur.



Şekil 4.21: Hatasız rulmanın YSA ile tespiti



Şekil 4.22: İç bilezik hatalı rulmanın YSA ile tespiti

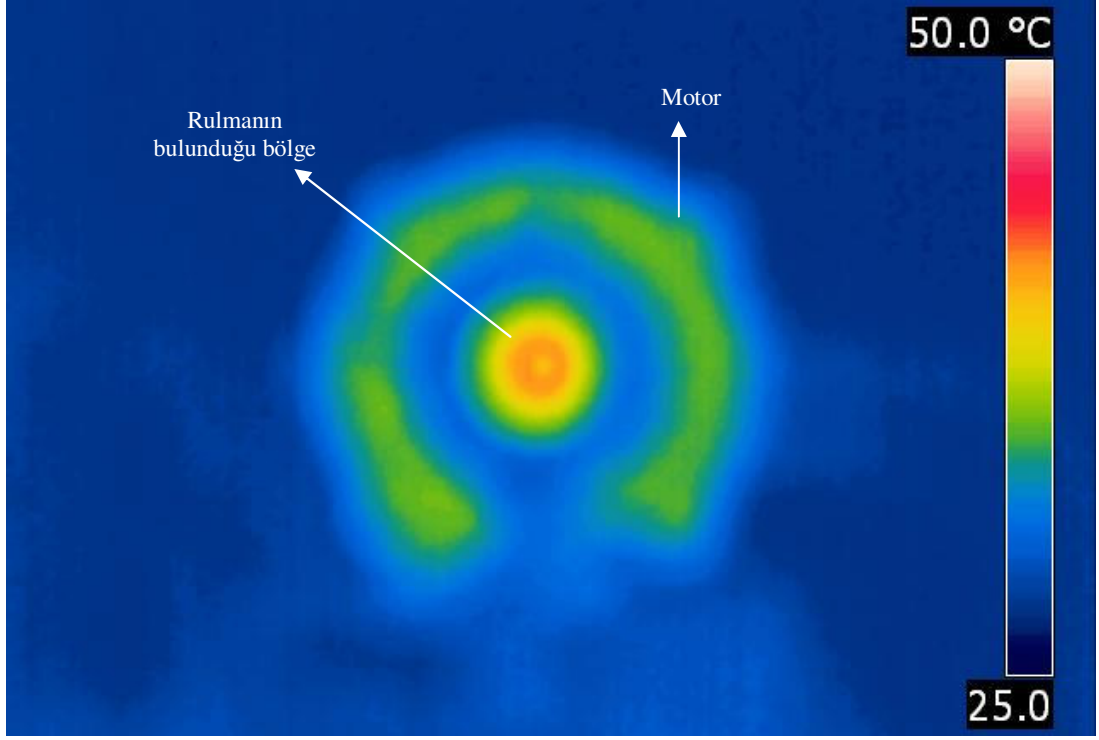


Şekil 4.23: Dış bilezik hatalı rulmanın YSA ile tespiti

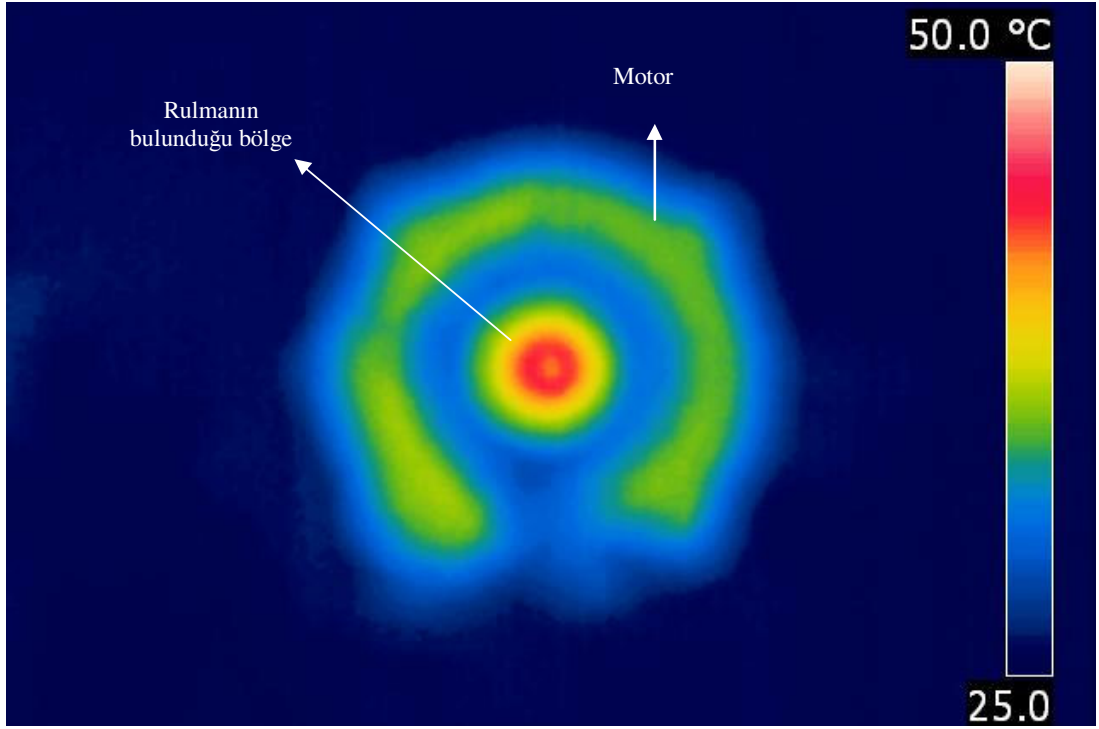
Termal Görüntüleme Yöntemi

Termal görüntüleme yöntemi ile yapılan deneyler titreşim veya akım verileri ile yapılan deneylerden bağımsız olarak, termal görüntüye ait renklerin istatistiksel analizi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

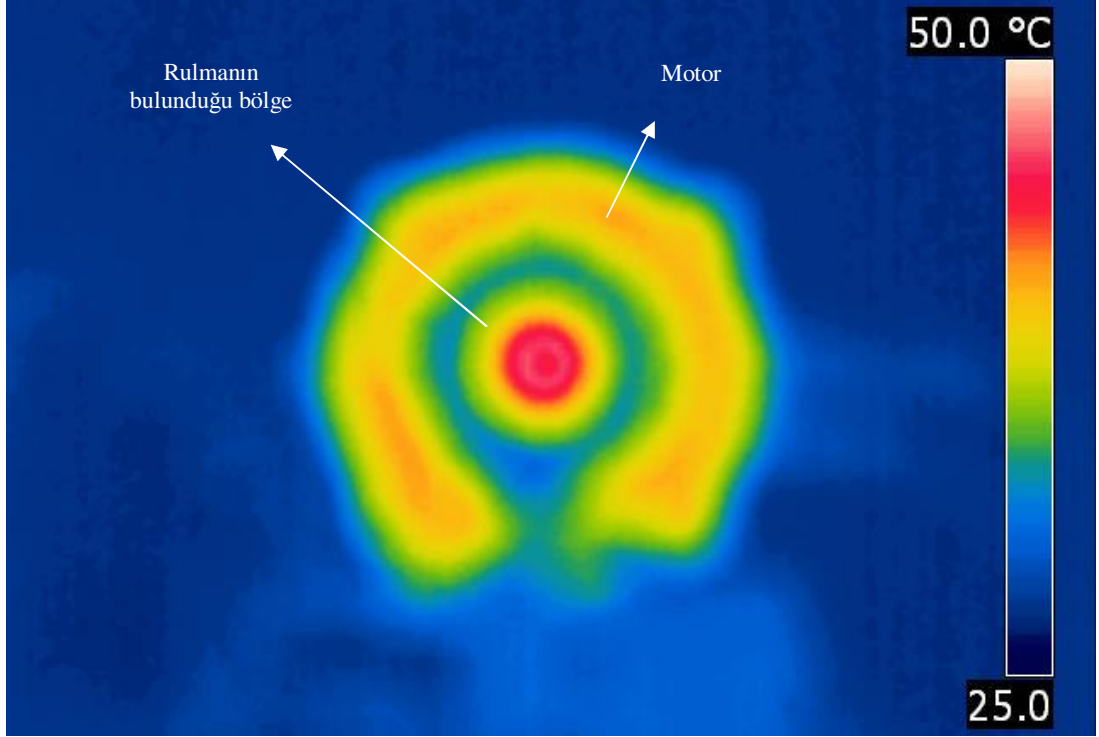
Hatasız rulman ve 0.3 mm iç bilezik, 1 mm dış bilezik ile 2 mm dış bilezik hatalı rulmanlara ait termal görüntüler sırasıyla Şekil 4.24-4.27 arasında verilmektedir.



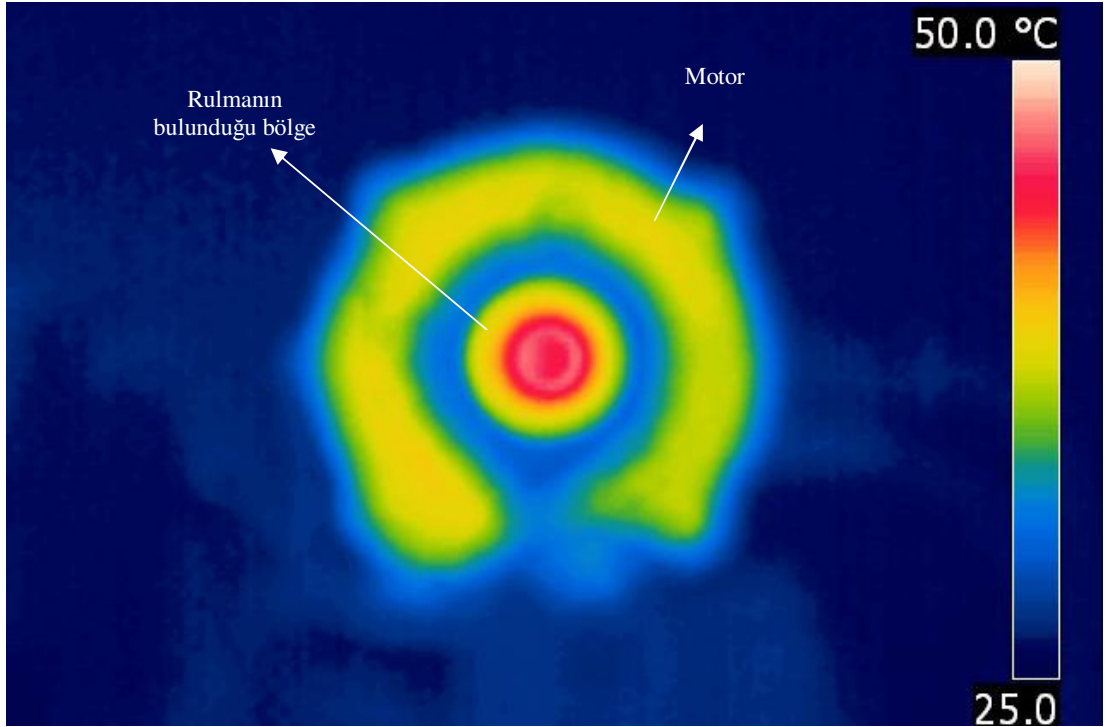
Şekil 4.24: Hatasız rulmana ait termal görüntü.



Şekil 4.25: 0.3 mm genişliğinde iç bilezik hatasına sahip rulman.



Şekil 4.26: 1 mm genişliğinde dış bilezik hatasına sahip rulman.



Şekil 4.27: 2 mm genişliğinde iç bilezik hatasına sahip rulman.

Şekillerde rulmanın bulunduğu gölgeler incelendiğinde hata boyutu arttıkça sürtünme sebebi ile açığa çıkan ısı enerjisinin yarattığı sıcaklık da artmaktadır. Hatasız rulmanda

maksimum sıcaklık 41.9 °C olarak kaydedilirken 0.3 mm, 1 mm ve 2mm hatalı rulmanlarda bu değer sırasıyla 44 °C, 46.5 °C ve 47.1 °C olmaktadır. Hata değeri ile maksimum sıcaklık değeri arasındaki bu ilişki Şekil 4.28’de verilmektedir.



Şekil 4.28: Hata büyüklüğü – sıcaklık ilişkisi..

5. GENEL SONUÇLAR

Rulman arıza tespit ve teşhis teknikleri, genellikle iki tür bilgi kullanmaktadır: Titreşim ve akustik ölçümleri ile elektrik motorundaki elektromanyetik akı ölçümleri. Bunlar içerisinde en yaygın olarak kullanılan titreşim ölçüm esasına dayalı olanlardır. Bu tez çalışmasında da en önemli veri kaynağı olarak titreşim sinyalleri seçilmiştir. Gerektiği durumlarda akım ölçümleri de titreşime yardımcı olarak kullanılmıştır.

Hata tespitinde kullanılan en basit teknik zaman düzleminde doğrudan istatistiksel parametrelerin izlenmesi ile uygulanır. Kullanılan parametreler arasında en yaygın olanları tepe değeri, standart sapma, etkin değer (rms) ve kurtosistir. Kurtosis değeri bir işarette mevcut olan darbelerin ölçüsüdür. Rulmanda hasar oluştuğunda, titreşim işaretindeki darbeler artacağından kurtosis de artacaktır. Ancak, hasar büyüdükçe titreşim işaretleri rasgele bir davranış sergileyeceğinden, bu değer normal seviyesine dönecektir. Bu nedenle, kurtosis değeri rulman arızalarını yalnızca başlangıç aşamasında tespit edebilmektedirler. Bu da zaman uzayı tekniklerinin en önemli eksikliği olarak kendini göstermektedir. Ancak işlem maliyetinin düşüklüğü ve kolay uygulanabilir olması da sık kullanılan yöntemlerden birisi olmasını sağlamaktadır.

Frekans uzayı tabanlı arıza analiz metotlarında genellikle titreşim spektrumundaki baskın frekans değerleri incelenmektedir. Rulmanda hasar oluştuğunda, hasarlı elemanların karakteristik frekanslarında tepe değerler ve bununla beraber yan-bantlar gözlenmektedir. Frekans uzayı tabanlı metotların en önemli zayıflığı, özellikle rulman karakteristik frekanslarını da içeren alçak frekans bölgesinin düşük işaret-gürültü oranlarında gürültü tarafından maskelenebilmesidir. Aynı zamanda, hasar büyüdükçe rulman karakteristik frekanslarında gözlenen tepe değerleri normal seviyelerine dönmektedirler.

Bulanık mantık tabanlı sistemler gerek zaman gerekse de frekans düzlemi bilgilerini kullanarak hata durumunu tespit eden gerek çevrimiçi gerekse de çevrimdışı

uygulamaya imkan sağlayan yapıdadır. En büyük dezavantajı mekanik sistemin davranışı hakkında uzman bir insanın görüşlerine göre modellenmesidir. Bu nedenle kurulan model sisteme büyük oranda bağımlı olacak, farklı mekanik sistemlerde yanlış sonuçlar doğurabilecektir.

Yapay sinir ağları tabanlı metotlarda arıza izleme genellikle örüntü tanıma problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Titreşim ve akım işaretlerinin zaman ve frekans bölgesinden öznitelikler çıkartılmakta ve çıkarılan bu öznitelikler ile yapay sinir ağları eğitilmektedir. Hata türlerine göre eğitilen ağ çıkışında alınan değer mekanik sistemin çalışma durumunu gösterir.

Bu tez çalışmasında uygulanan deneylerin işlem maliyetleri, etkinlikler ve çevrimiçi çalışmaya uygunlukları Tablo 5.1’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 5.1: Karşılaştırmalı sonuçlar

	İşlem Maliyeti	Etkinlik	Çevrimiçi Çalışma
Frekans Analizi	Düşük	Orta	Uygun
Zaman Analizi	Çok Düşük	Kötü	Uygun
Entropi Analizi	Çok Yüksek	İyi	Uygun Değil
Bulanık Mantık	Yüksek	İyi	Uygun
Yapay Sinir Ağları	Çok Yüksek	İyi	Uygun Değil

6. KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Aliustaoğlu C, Ertunç H.M., “Tool Wear Condition Monitoring Using a Sensor Fusion Model Based On Fuzzy Inference System”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008.
- [2] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., “Kesici Takım Aşınma Durumunun Sensör Birleştirme Tekniği Kullanılarak Belirlenmesi”, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu, ASYU-INISTA 2006*, 31 Mayıs-02 Haziran 2006, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s.214-218.
- [3] Kızıllhan A., Toz M., Aliustaoğlu C., Bingül Z., "Gezgin Robot Tasarımı ve Hareket Planlaması", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'07*, 5 - 7 Eylül 2007, Sabancı Üniversitesi, İstanbul.
- [4] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., "Rulman Titreşim Analizi ile Bölgesel Hataların Tespit Edilmesi", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'07*, 5 - 7 Eylül 2007, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, sf: 651-656.
- [5] Aliustaoğlu C., Ocak H., Ertunç H.M., “Dalgacık ve Yaklaşık Entropi Analizi ile Rulman Hatalarının Belirlenmesi”, *SIU 2008*, 20-22 Nisan 2008, Didim
- [6] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., Ocak H. “Applied Real Time Bearing Fault Diagnosis Based On Vibration and Current Analysis”, *The 2008 World Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing*, Nevada, USA, July 14-17, 2008.
- [7] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., Ocak H, “Diagnosis of Bearing Faults Using Vibration Analysis”, *9th International Workshop on Research and Education in Mechatronics 2008*, 18-19 September 2008, University of Bergamo, Italy.
- [8] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., Ocak H, “Online Fault Detection of Roller Element Bearings Applied On a Fuzzy Inference System”, *6th International Symposium On Intelligent And Manufacturing Systems “Features, Strategies And Innovation*, October 14-17, Sakarya.
- [9] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., Ocak H. "Arıza Gözlemlemeye Yönelik Rulman Hata Tespit Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'08*, 13 - 15 Kasım 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

KAYNAKLAR

- [1] Albrecht P.F., McCoy R.M., Owen E.L., “Assessment of the reliability of motors in utility application”, *IEEE Transactions on Energy Conversation*, vol. EC-1, No. 1, (1986).
- [2] Purushotham V., Narayanan S., Suryanarayana A.N., “Multi-fault Diagnosis of Rolling Bearing Elements Using Wavelet Analysis and Hidden Markov Model Based Fault Recognition”, *NDT&E International* 38, s:654-664, (2005).
- [3] Tandon N., Choudhury A., “A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings”, *J Tribol Int* 32, s:469–480, (1999).
- [4] Zarei J., Poshtan J., "Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current", *Tribology International Volume* 40, Issue 5, s:763-769, (2007).
- [5] Arslan H., Orhan S. ve Aktürk N., “Bilyalı Rulman Hasarlarının Neden Olduğu Titreşimlerin Modellenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt: 18, No: 4, s:123-146, (2003).
- [6] McInerny S.A., Dai Y., “Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection”, *IEEE Transactions on Education*, Vol: 46, No: 1, (2003).
- [7] Orhan S., Arslan H., Aktürk N., “Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt: 18, No: 2, s: 39-48, (2003).
- [8] Ocak H. ve Loparo K.A., “Estimation of the running speed and bearing defect frequencies of an induction motor from vibration data”, *Mechanical Systems and Signal Processing* 18, s: 515-533, (2004).
- [9] H. Ocak and K.A. Loparo, “A new bearing fault detection and diagnosis scheme based on hidden Markov modeling of vibration signals”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)* 5, s: 3141–3144, (2001).
- [10] Mori K., Kasshima, N., Yoshioka, T., Ueno, Y., “Prediction of Spalling on Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signals”, *Wear*, 195: 162-168 (1996).
- [11] Li C.J., Ma, J., “Wavelet Decomposition of Vibrations for Detection of Bearing-Localized Defects”, *NDT&E Int.*, 30(3), s:143-149 (1997).

- [12] Rubini, R., Meneghetti, U., “Application of the Envelope and Wavelet Transform Analysis for the Diagnosis of Incipient Faults in Ball Bearings”, *MSSP*, 15(2), s:287-302 (2001).
- [13] Sun, Q., Tang, Y., “Singularity Analysis Using Continuous Wavelet Transform for Bearing Fault Diagnosis”, *MSSP*, 16(6), s:1025-1041, (2002).
- [14] Şeker, S. And Ayaz, E., “Feature Extraction Related to Bearing Damage in Electric Motors by Wavelet Analysis”, *J. Of the Franklin Institute* **340**, s:125-134 (2003).
- [15] H. Hong ve M. Liang, "Separation of fault features from a single-channel mechanical signal mixture using wavelet decomposition", *Mechanical Systems and Signal Processing Volume 21*, Issue 5, July 2007, p 2025-2040
- [16] N. G. Nikolaou, Antoniadis I.A., "Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets", *NDT & E International Volume 35*, Issue 3, s:197-205, (2002).
- [17] McFadden P.D., Cook J.G., Forster L.M., “Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform”, *Mechanical Systems and Signal Processing Volume 13*, Issue 5, s:691–707, (1999).
- [18] Lin J., Qu L., “Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis”, *Journal of Sound & Vibration*, 234 1, s:135–148, (2000).
- [19] Zarei. J. ve Poshtan J., “Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current”, *Tribology International* **40**, s: 763-769, (2007).
- [20] Ayaz E. ve Şeker S., “İleri İşaret İşleme Yöntemleri ile Elektrik Motorlarında Rulman Arıza Tanısı”, *İTÜ Dergisi/D Mühendislik*, Cilt: 1, No: 1, (2002).
- [21] Chow M., Tipsuwan Y., Hung J. C., “Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis”, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, Vol 47, No. 5, (2000).
- [22] Lou X. ve Loparo K.A., “Bearing Fault Diagnosis Based On Wavelet Transform and Fuzzy Inference”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18 s: 1077-1095, 2003, (2004).
- [23] Yan R., Gao R.X, "Approximate entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21**, s:824–839, (2007).
- [24] Pincus S.M., “Approximate entropy as a measure of system complexity”, *Proc. Natl. Acad Sci USA*, 88, s:2297-2301, (1991).
- [25] L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control* **8**, s:338-353, (1965).
- [26] Elmas Ç, “Bulanık Mantık Denetleyiciler”, *Seçkin Yayıncılık*, (2003).

- [27] Liu, T.I., Singonahalli, J.H., Iyer, N.R., “Detection of Roller Bearing Defects Using Expert System and Fuzzy Logic”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 10(5), s:595-614, (1996).
- [28] Frank, P.M., Köppen-Seliger, B., “New Developments Using AI in Fault Diagnosis”, *Eng. App.. Artif. Intell.*, 10(1), s:3-14, (1997).
- [29] Efe M. Ö., Kaynak O., “Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları”, *Boğaziçi Üniversitesi*, (2000).
- [30] Narendra K. S., K. Parthasarathy, “Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, cilt 1, no 1, s:4-27, (1990).
- [31] Efe M. Ö., Kaynak O., “A Comparative Study of Neural Network Structures in Identification of Nonlinear Systems”, *Mechatronics Cilt 9*, No 3, s:287-300, (1999).
- [32] Saxena A., Saad A., "Evolving an artificial neural network classifier for condition monitoring of rotating mechanical systems", *Applied Soft Computing*, (2006).
- [33] Samanta, B., Al-Balushi K.R., “Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element Bearings Using Time-Domain Features”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(2) s:317-328, (2003).
- [34] Haykin S. “Neural Networks – A Comprehensive Foundation”, *Mc Millan: New Jersey, U.S.A.*, (1994).
- [35] P. J. Werbos, “Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences”, Ph. D. Thesis, *Harvard University*, Cambridge, MA, 1974.

EKLER

Ek-A: YSA deneyinde kullanılan veriler

Hız	Rms	Std Sp.	Krt Zmn	Krt Frk	Skw Zmn	Skw. Frk	İ.B.F	D.B.F	B.D.F	Çıkış
1200	16,67	0,12	18,59	3081,73	3,2	43,21	18,69	16,68	34,98	1
1200	15,41	0,11	20,95	2740,82	3,45	39,99	12,13	19,11	19,13	1
1200	16,13	0,12	20,66	2881	3,4	41,31	14,91	25,29	30,24	1
1600	31,72	0,21	10,03	3429,51	2,3	46,79	33,57	30,65	29,21	1
1600	32,41	0,21	9,53	3617,4	2,24	48,48	31,83	24,14	35,68	1
1600	32,91	0,21	10,16	3630,45	2,3	48,58	32,33	34,96	21,24	1
2000	45,89	0,3	9,61	3415,46	2,25	46,74	57,31	37,79	47,61	1
2000	45,19	0,29	10,04	3399,05	2,29	46,56	51,12	41,69	50,87	1
2000	44,76	0,29	10,36	3129,99	2,35	44,04	44,48	39,93	39,83	1
2400	62,13	0,41	10,88	3214,69	2,39	44,93	54,74	67,36	46,79	1
2400	62,03	0,41	10,54	3235,82	2,37	45,05	63,81	60,82	63,5	1
2400	60,96	0,4	10,75	3192,7	2,38	44,7	51,24	68,88	49,87	1
1200	14,27	0,12	29,7	2109,71	4,15	34,39	20,23	25,09	55,43	1
1200	14,54	0,12	26,94	2122,59	4,09	34,37	19,52	15,76	61,51	1
1200	14,5	0,12	25,28	2190,95	3,98	35,09	14,38	23,9	55,79	1
1600	27,32	0,22	22,44	2050,65	3,75	33,98	17,51	53,23	57,02	1
1600	26,96	0,22	24,93	2019,54	3,92	33,58	30,31	57,61	46,96	1
1600	26,95	0,22	26,03	2118,43	3,9	34,52	25,54	60,16	40,17	1
2000	43,35	0,35	17,45	1953,79	3,33	33,8	46,12	70,52	83,21	1
2000	42,64	0,34	16,07	1819,7	3,24	32,8	49,4	86,09	94,01	1
2000	43	0,35	16,65	1805,98	3,29	32,32	43,88	76,38	89,23	1
2400	56,23	0,42	16,69	2226,02	3,14	35,93	44,78	65,62	49,55	1
2400	55,98	0,42	16,57	2293,51	3,13	36,53	38,28	58,5	57,3	1
2400	56,21	0,42	15,89	2295,37	3,11	36,5	57,99	55,81	71,27	1
1200	17,6	0,14	32,21	2659,01	4,15	39,44	32,64	31,17	78,8	1
1200	17,39	0,14	30,9	2726,09	4,13	40,1	25,18	48,79	104,58	1
1200	16,99	0,13	32,81	2695,58	4,08	39,87	29,94	37,47	92,29	1
1600	27,98	0,2	17,4	3047,13	3,08	43,35	31,89	35,81	44,77	1
1600	29,09	0,21	19,84	2930,07	3,25	42,2	30,48	38,2	47,06	1
1600	29,23	0,22	18,49	2880,22	3,22	41,72	39,98	27,04	50,1	1
2000	44,19	0,34	15,53	2303,84	3,09	36,52	42,7	49,61	71,03	1
2000	44,42	0,34	16,22	2333,71	3,16	36,78	57,5	72,42	60,35	1
2000	43,85	0,34	17,15	2156,77	3,25	35,06	62,25	36,98	58,17	1
2400	67,29	0,48	12,06	2703,86	2,66	40,41	58,11	119,96	62,02	1
2400	67,49	0,48	12,35	2547,62	2,7	38,75	75,59	95,46	72,57	1
2400	66,69	0,48	12,18	2448,11	2,7	37,98	98,25	75,68	47,99	1
1200	8,99	0,05	5,83	3668,87	1,72	49,26	6,76	18,85	12,96	0
1200	8,75	0,05	6,46	3732,98	1,76	49,76	8,86	14,7	9,79	0
1200	8,66	0,05	6,18	3745,16	1,75	49,85	9,56	15,68	11,19	0
1600	14,69	0,09	5,74	3534,64	1,7	47,98	20,73	24,36	21,51	0
1600	14,44	0,09	5,88	3510,22	1,71	47,85	13,48	19,13	25,03	0

Ek-A (devamı): YSA deneyinde kullanılan veriler

Hız	Rms	Std Sp.	Krt Zmn	Krt Frk	Skw Zmn	Skw. Frk	İ.B.F	D.B.F	B.D.F	Çıkış
1600	14,14	0,09	5,72	3406,07	1,7	46,94	15,89	20,12	15,34	0
2000	20,2	0,12	5,87	3041,98	1,7	44,17	22,79	67,34	22,27	0
2000	20,69	0,12	5,74	2890,05	1,7	42,82	21,3	58,89	26,59	0
2000	20,77	0,13	5,86	2872,05	1,71	42,75	24,3	53,94	25,78	0
2400	33,37	0,2	5,64	3135,92	1,68	45,19	37,01	33,17	33,15	0
2400	32,41	0,19	5,39	2934,72	1,64	43,5	44,14	40,93	48,84	0
2400	30,75	0,18	5,87	2858,72	1,7	42,81	46,35	42,59	46,2	0
1200	34,53	0,34	29,91	1627,84	4,52	29,38	105,2	99,53	62,56	2
1200	36,36	0,35	29,06	1722,26	4,43	30,39	116,69	105,18	69,94	2
1200	36,32	0,35	27,94	1765,24	4,36	30,92	126,32	73,05	64,15	2
1200	16,87	0,12	39,62	3290	4,32	45	44,6	51	32,51	2
1200	17,36	0,13	61,24	3086,35	5,37	42,93	45,21	32,72	36,54	2
1200	17,04	0,13	44,16	3237,97	4,67	44,5	48,94	24,12	40,15	2
1200	21,05	0,17	32,27	2304	4,35	36,39	100,65	30,85	27,12	2
1200	21,35	0,17	29,41	2201,28	4,19	35,51	90,14	25,33	26,07	2
1200	21,69	0,17	30,21	2288,53	4,19	36,27	90,27	31,58	25,35	2
1600	47,62	0,44	23,42	1831,15	4,01	32,31	89,2	73,49	92,7	2
1600	51,31	0,46	22,51	1846,06	3,9	32,34	79,34	109,55	73,88	2
1600	54,47	0,48	21,04	1975,61	3,75	33,68	111,82	113,01	87,22	2
1600	27,33	0,19	21,93	3583,82	3,11	48,2	27,86	45,41	38,79	2
1600	27,36	0,18	17,13	3566,92	2,91	48,08	50,06	36,85	29,16	2
1600	27,06	0,18	21,16	3627,28	3,16	48,49	38,72	22	22,69	2
1600	35,51	0,27	27,19	2382,4	3,92	37,17	45,41	47,41	48,31	2
1600	36,63	0,28	25,49	2508,41	3,79	38,46	48,43	41,46	47,46	2
1600	37,68	0,29	27,52	2446,07	3,96	37,87	50,89	55,83	35,95	2
2000	71,58	0,6	18,48	2260,36	3,5	36,48	91,14	136,42	106,03	2
2000	74,92	0,62	18,18	2350,44	3,43	37,29	165,84	104,26	122,05	2
2000	77,02	0,63	18,69	2343,94	3,46	37,24	96,13	117,52	98,23	2
2000	37,41	0,25	17,97	3658,27	2,93	48,81	38,46	54,59	44,12	2
2000	38,15	0,25	17,05	3793,48	2,83	50,12	47,18	41,53	27,02	2
2000	37,64	0,25	15,62	3828,46	2,72	50,41	43,66	44,94	52,71	2
2000	52,02	0,37	21,58	3152,16	3,39	44,49	50,47	63,77	66,9	2
2000	51,4	0,36	19,95	3131,1	3,2	44,24	51,86	72,95	58,61	2
2000	52,2	0,38	24,13	2879,23	3,59	41,93	105,66	105,78	86,89	2
2400	104,14	0,83	14,43	2524,75	3,1	39,42	161,07	116,95	118,49	2
2400	106,16	0,84	14,75	2575,19	3,11	39,81	134,15	110,25	156,3	2
2400	106,09	0,84	15,26	2495,53	3,16	38,93	142,75	92,93	187,7	2
2400	48,21	0,31	12,1	3814,13	2,38	50,64	46,88	42,92	32,84	2
2400	50,28	0,32	9,9	3825,92	2,21	50,77	56,04	57,49	57,01	2
2400	50,56	0,32	11,13	3887,91	2,28	51,33	44,38	54,24	61,49	2
2400	64,27	0,44	15,15	2763,74	2,85	41,01	84,84	64,99	57,93	2
2400	65,82	0,46	16,93	2835,63	2,99	41,66	59,41	106,89	73,83	2
2400	66,76	0,48	18,24	2694,14	3,15	40,41	80,48	72,27	78,63	2
1200	22,39	0,24	36,05	1355,41	5,11	26,52	81,46	40,05	41,97	2
1200	22,15	0,24	39,11	1363,02	5,29	26,48	57,3	46,09	34,12	2
1200	21,59	0,22	36,36	1421,44	5,1	27,28	85,25	35,2	43,14	2
1200	13,01	0,11	103,2	2207,77	7,15	34,26	31,76	35,04	21,93	2
1200	12,89	0,11	98,62	2188,47	7,08	34,14	37,97	30,35	16,81	2

Ek-A (devamı): YSA deneyinde kullanılan veriler

Hız	Rms	Std Sp.	Krt Zmn	Krt Frk	Skw Zmn	Skw. Frk	İ.B.F	D.B.F	B.D.F	Çıkış
1200	13,02	0,11	92,19	2265,2	6,98	34,87	26,45	24,74	26,82	2
1200	13,66	0,09	14,34	3001,65	2,72	42,98	17,32	11,97	15,42	2
1200	13,81	0,09	12,54	3055,28	2,59	43,39	17,92	23,73	12,12	2
1200	13,74	0,09	13,1	2999,42	2,64	42,92	13,18	13,83	9,89	2
1600	31,99	0,32	35,8	1449,83	5,02	27,84	66,64	53,7	66,37	2
1600	34	0,34	30,74	1471,86	4,73	28,14	63,88	52,91	63,32	2
1600	34,83	0,34	29,66	1497,28	4,64	28,4	38,33	52,19	55,02	2
1600	21,38	0,16	59,95	2634,04	5,26	39,06	21	45,2	26,37	2
1600	21,66	0,17	71,34	2411,01	5,82	36,74	31,68	42,6	31,93	2
1600	22,51	0,19	71,11	2165,03	6,25	34,17	37,46	55,33	45,87	2
1600	31,74	0,22	10,85	2271,8	2,52	36,54	20	24,97	18,6	2
1600	31,5	0,22	10,85	2288,48	2,53	36,52	16,76	21,6	24,01	2
1600	31,37	0,22	11,05	2177,08	2,55	35,67	19,73	24,87	21,34	2
2000	48,9	0,46	26,07	1541,4	4,31	29,26	80,45	84,34	54,03	2
2000	47,88	0,46	27	1512,78	4,35	28,93	93,98	62,61	65,46	2
2000	48,53	0,45	26,94	1630,61	4,36	30,05	52,1	65,24	74,57	2
2000	33,51	0,33	77,49	1592,73	7,07	28,07	50,73	69,85	68,49	2
2000	35,11	0,34	76,04	1511,9	6,96	27,3	57,05	63,6	78,43	2
2000	35,02	0,32	67,42	1730,75	6,51	29,67	36,4	75,55	86,47	2
2000	53,76	0,37	10,57	1977,03	2,52	34,19	32,2	35,01	23,28	2
2000	53,65	0,37	10,38	2013,28	2,5	34,6	23,82	37,15	12,31	2
2000	54,88	0,38	10,26	2106,01	2,47	35,56	26,48	21,24	23,55	2
2400	74,84	0,64	22,77	1942,97	3,92	33,13	115,12	114,48	133,24	2
2400	74,57	0,64	23,16	1909,37	3,95	32,93	117,1	78,57	110,48	2
2400	75,64	0,66	22,56	1876,58	3,94	32,48	106,71	74,94	96,46	2
2400	52,97	0,48	65,89	1795,8	6,33	30,5	73,82	68,29	95,86	2
2400	52,02	0,46	60,8	1875,14	6,05	31,37	84,66	78,71	109,41	2
2400	51,02	0,46	58,08	1863,74	6,1	31,21	110,23	70,51	98,17	2
2400	79,55	0,52	8,44	2247,43	2,21	36,96	51,39	35,83	41,75	2
2400	79,71	0,52	8,37	2047,77	2,2	35,57	57,91	45,33	28,54	2
2400	79,48	0,52	8,74	2109,16	2,25	36,02	71,66	57,79	38,03	2
1200	24,41	0,26	31,45	1509,88	4,85	28,73	59,11	39,14	46,33	2
1200	24,2	0,25	33,22	1491,15	4,95	28,3	58,37	77,2	60,56	2
1200	24,29	0,25	32,09	1529,99	4,87	28,75	48,3	41,46	41,88	2
1200	12,43	0,08	11,83	3787,98	2,21	50,06	14,52	19,98	14,81	2
1200	12,41	0,08	9,15	3769,45	2,13	49,95	12,57	13,64	14,34	2
1200	12,49	0,08	9,46	3715,72	2,16	49,43	11,24	15,35	20,6	2
1200	14,2	0,09	7,91	3323,53	2,06	45,99	19,7	12,52	15,6	2
1200	14,29	0,09	8,09	3340,38	2,09	46,16	11,68	12,63	11,01	2
1200	14,19	0,09	7,86	3332,78	2,07	46,15	14,35	18,16	12,28	2
1600	38,46	0,36	22,99	1842,3	4,12	32,55	66,62	76,62	52,08	2
1600	38,45	0,36	22,69	1826,45	4,12	32,5	74,49	48,02	57,34	2
1600	39,53	0,38	23,06	1758,96	4,15	31,68	103,85	85,67	65,97	2
1600	24,45	0,16	20,27	3353,77	3,02	46,08	26,37	33,3	21,22	2
1600	24,47	0,16	18,27	3391,33	2,91	46,49	29,31	27,93	30,69	2
1600	24,39	0,16	14,21	3448,51	2,65	47,03	29,66	34,77	26,09	2
1600	32,15	0,21	8,26	2666,68	2,17	40,18	31,65	26,04	25,68	2
1600	32,1	0,21	8,06	2572,36	2,15	39,47	27,35	27,45	17,23	2

Ek-A (devamı): YSA deneyinde kullanılan veriler

Hız	Rms	Std Sp.	Krt Zmn	Krt Frk	Skw Zmn	Skw. Frk	İ.B.F	D.B.F	B.D.F	Çıkış
1600	31,91	0,21	8,34	2566,87	2,19	39,38	17,59	29,82	31,87	2
2000	63,06	0,57	21,23	1967,48	3,86	33,83	113,69	110,6	111,37	2
2000	62,97	0,56	20,02	2011,67	3,74	34,39	97,57	102,41	123,48	2
2000	68,56	0,58	18,33	2262,75	3,51	36,67	115,36	115,31	94,72	2
2000	38,41	0,25	13,74	3388,09	2,6	46,61	39,66	50,48	49,19	2
2000	37,47	0,26	22,23	3284,96	3,23	45,44	46,94	61,19	46,84	2
2000	36,89	0,24	13,71	3409,05	2,59	46,72	17,03	46,64	35,29	2
2000	54,54	0,35	6,61	2579,77	1,92	40,18	34,3	33,92	24,96	2
2000	53,71	0,34	6,62	2412,61	1,93	39,58	35,86	41,93	47,64	2
2000	53,44	0,34	6,58	2378,43	1,92	38,84	36,59	36,35	40,97	2
2400	77,52	0,64	20,68	2356,9	3,68	37,54	94,74	110,84	87,31	2
2400	81,84	0,67	18,74	2377,04	3,53	37,78	145,03	79,72	140,18	2
2400	83,69	0,68	17,31	2416,82	3,39	38,22	126,36	133,09	173,38	2
2400	49,45	0,32	10,87	3190,33	2,3	45,14	54,12	64,46	68,65	2
2400	52,22	0,34	15,15	3312,02	2,58	46,09	69,47	54,88	71,82	2
2400	50,86	0,33	11,88	3247,39	2,4	45,44	54,6	47,88	50,16	2
2400	67,31	0,42	6,82	2705,37	1,91	40,71	64,39	80,6	47,04	2
2400	65,47	0,41	6,76	2775,73	1,9	41,43	43,56	95,66	48,69	2
2400	65,86	0,41	6,73	2667,33	1,9	40,45	64,87	93,41	48,91	2

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk ve orta okulları sırasıyla Tokat'ın Pazar ve Zile ilçeleri ile Bitlis ve İzmit'te okudu. Lise eğitimini Kocaeli Anadolu Lisesinde tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünden 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.