

**HIZ KONTROL SİSTEMLERİ İLE BESLENEN ASENKRON
MOTORLARDA MEKANİK HATALARIN BELİRLENMESİ**

Murat BAŞARAN

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2009

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Murat Başaran'ın “**Hız kontrol sistemleri ile beslenen asenkron motorlarda mekanik hataların belirlenmesi**” başlıklı **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 15/01/2009 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Doç. Dr. DOĞAN GÖKHAN ECE
Üye	: Doç. Dr. ÖMER NEZİH GEREK
Üye	: Prof. Dr. MEHMET BİLGİNER GÜLMEZOĞLU

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HIZ KONTROL SİSTEMLERİ İLE BESLENEN ASENKRON MOTORLARDA MEKANİK HATALARIN BELİRLENMESİ

Murat BAŞARAN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Doğan Gökhan ECE

2008, 62 Sayfa

Bu çalışmada basit ve dayanıklı yapıları ve ucuz maliyetleri ile sanayide en çok kullanan motor türü olan asenkron motorlarda meydana gelen mekanik hatalar incelenmiştir. Sentetik olarak belirli hata tiplerinin oluşturulduğu, bir voltaj kontrollü frekans çeviricisi tarafından dört farklı hız referansı ile üç farklı yük altında sürülen motorların çektiği akım değerleri sürücü ile şebeke arasından ölçülerek laboratuvar ortamında sayısal olarak elde edilmiştir. Bu akım bilgilerinden dalgacık paket ayrışımı yöntemi ile ayrışım katsayıları bulunmuştur. Bu katsayıların istatistiksel parametrelerinden elde edilen öznitelik vektörleri kullanılarak farklı sınıflandırıcı türleri ile hata belirleme ve sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Farklı mekanik hatalara sahip motorların sağlam motordan, ve mekanik hataların birbirlerinden ne ölçüde bir başarı ile ayrıldığı incelenmiştir. Motorun çalıştırıldığı hız referansının, motorun şebekeden çektiği akım seviyesinin, dalgacık paket ayrışımında seçilen dalgacık tipinin ve hata tanımada seçilen sınıflandırıcının türünün hata sınıflandırmaya olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motorlar, Mekanik hatalar, Dalgacık paket ayrışımı, Hata sınıflandırma

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DETECTION OF MECHANICAL FAULTS IN INDUCTION MOTORS SUPPLIED WITH ADJUSTABLE SPEED DRIVES

Murat BAŞARAN

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Electrical and Electronics Engineering Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Doğan Gökhan ECE

2008, 62 Pages

In this thesis, the mechanical faults that occur in induction motors, which are widely used in industry due to their simple and rugged construction and cost effective pricing, are analyzed. The certain fault modes are generated synthetically in motors and motors are run by a voltage controlled frequency inverter with four different speed reference and three different load conditions to gather the digitalized current data that measured between the voltage controlled driver and the network in laboratory environment. By applying wavelet packet decomposition, wavelet coefficients are obtained from stator current data and these coefficients are used to obtain feature vectors by using statistical parameters of them. Fault detection is obtained by classifying these feature vectors with different types of classifiers. As a result, correct classification rates are compared not only with faulty and healthy motors, but also with different fault modes. The effects of the speed reference, current level, selected wavelet type in wavelet packet decomposition and type of the classifier in fault detection is also observed.

Keywords: Induction motors, Mechanical faults, Wavelet packet decomposition, Fault classification

TEŞEKKÜR

Bu alıőmada yardımlarından dolayı saygıdeğer danışman hocam Do. Dr. Doğan Gökhan ECE' ye ve katkılarından dolayı değerli hocalarım Doç. Dr. Ömer Nezih GEREK ve Prof. Dr. Mehmet Bilginer GÜLMEZOğLU'na en içten teőekkürlerimi sunarım.

Murat BAŞARAN

Ocak–2009

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii

1.GİRİŞ	1
----------------------	----------

2. ASENKRON MOTORLARIN YAPISI ve KARŞILAŞILAN

MEKANİK HATALAR	4
2.1. Asenkron Motorların Yapısı.....	5
2.1.1. Stator.....	5
2.1.2. Rotor.....	6
2.2. Asenkron Motorlarda Karşılaşılan Mekanik Hatalar.....	7
2.2.1. Rulman kaynaklı hatalar.....	7
2.2.2. Stator sargılarından kaynaklı hatalar.....	10
2.2.3. Kırık rotor çubuklarından kaynaklı hatalar.....	12

3. MEKANİK HATALARIN BELİRLENMESİNDE

KULLANILAN SİNYAL ANALİZ YÖNTEMLERİ	14
3.1. Fourier Dönüşümü.....	15
3.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü.....	16
3.3. Dalgacık Dönüşümü.....	17
3.3.1. Sürekli dalgacık dönüşümü.....	19
3.3.2. Ayrık dalgacık dönüşümü ve çoklu çözünürlüklü analiz.....	20
3.4. Dalgacık Paket Ayrışımı.....	22
3.4.1. Dalgacık paket ayrışımı katsayıları.....	24

4. MEKANİK HATALARIN BELİRLENMESİNDE	
KULLANILAN HATA SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ.....	26
4.1. Bayes Sınıflandırma.....	26
4.1.1 Düzgün maliyet fonksiyonu ve minimum hata oranı.....	29
4.2 Doğrusal ve Karesel Sınıflandırıcılar.....	31
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	34
5.1 Deney Düzenegi.....	34
5.1.1 Güç sistemi donanımı ve kullanılan asenkron motorlar.....	34
5.1.2. Ölçüm sistemi donanımı.....	37
5.2. Verilerin Toplanması.....	38
5.3. Öznitelik Vektörlerinin Oluşturulması.....	41
5.3.1. Dalgacık paket ayrışımı katsayılarının hesaplanması.....	42
5.3.2. Kullanılan istatistiksel parametreler.....	44
5.3.2.1. Beklenen değer.....	45
5.3.2.2. Varyans.....	45
5.3.2.3. Standart sapma.....	45
5.3.2.4. Çarpıklık ve Basıklık.....	46
5.4. Verilerin Sınıflandırılması.....	47
6. DENEY SONUÇLARI.....	49
6.1. Sınıflandırma Sonuçları.....	49
6.2. Sınıflandırma Sonuçlarının Değerlendirmesi.....	57
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Asenkron motorun statoru.....	5
2.2. Sincap kafesli asenkron motorun rotoru.....	6
2.3. Asenkron motorun rulmanı.....	8
2.4. Asenkron motorun stator sargılarında oluşturulmuş bir kısa devre hatası	11
2.5. Rotor gövdesi ve rotor çubukları.....	13
3.1. Fourier Dönüşümü.....	15
3.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü.....	17
3.3. Sinyal spektrumunun farklı dönüşüm yöntemleri ile incelenmesi.....	18
3.4. İdeal bir sinüs dalgası ve Daubechies-10 (db10) ana dalgacığı.....	19
3.5. Çoklu çözünürlüklü analiz ile $x(t)$ sinyalinin ayrıştırılması.....	21
3.6. Dalgacık Paket Ayrışımı.....	23
5.1. Sentetik olarak çeşitli hataların oluşturulduğu asenkron motorlar.....	34
5.2. Deney düzeneğinin genel görünüşü.....	35
5.3. Rotor çubukları üzerinde matkap ile delik açılması işlemi.....	36
5.4 Beş adet rotor çubuğu kırılmış bir rotor gövdesi.....	36
5.5. Asenkron motor ve kuple edildiği jeneratör.....	39
5.6. Asenkron motor, kuple edildiği jeneratör ve rezistif yük grupları.....	40
5.7. Kullanılan voltaj kontrollü frekans çeviricisi.....	41
5.8. Dalgacık Ayrışımı.....	42
5.9. Dalgacık paket ayrışım ağacı.....	43
6.1. Motorların 50 Hz ve 4.1 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizindeki öznelilikler.....	53
6.2. Motorların 45 Hz ve 4.1 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizindeki öznelilikler.....	54
6.3. Motorların 35 Hz ve 4.7 A çalışma durumunda db-8 dalgacıklı analizindeki öznelilikler.....	56
6.4. Motorların 35 Hz ve 5 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizindeki öznelilikler.....	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

6.1. Motorların 50 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	49
6.2. Motorların 50 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	50
6.3. Motorların 50 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	50
6.4. Motorların 45 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	50
6.5. Motorların 45 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	50
6.6. Motorların 45 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	51
6.7. Motorların 40 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	51
6.8. Motorların 40 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	51
6.9. Motorların 40 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	51
6.10. Motorların 35 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	52
6.11. Motorların 35 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	52
6.12. Motorların 35 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki sınıflandırma hata oranları.....	52
6.13. Motorların 45 Hz ve 4.1 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizinde En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı için oluşan Hata Matrisi.....	54
6.14. Motorların 35 Hz ve 4.7 A çalışma durumunda db-8 dalgacıklı analizinde En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı için oluşan Hata Matrisi.....	55

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar günümüzde sanayide en yaygın olarak kullanılan, basit ve dayanıklı yapılı, ucuz maliyetli, bakım gereksinimine diğer elektrik motorlarına kıyasla daha az ihtiyaç duyan motorlardır. Çeşitli güç değerlerinde üretilen ve çok çeşitli endüstriyel sürecin gerçekleşmesinde büyük pay sahibi olan asenkron motorlar sanayinin yükünü çeken motorlardır. Günümüzde toplumların gelişmişlik düzeyini belirleyen ölçütlerden biri de sanayi üretimidir. Üretimin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için enerjinin akılcı kullanımı gereklidir. Günümüzde elektrik enerjisi toplam enerji kullanımı içerisinde büyük bir paya sahiptir ve bu pay giderek artmaktadır. Gelişmiş toplumlarda ise elektrik enerjisinin büyük bir kısmı sanayi üretimi tarafından kullanılmaktadır ve bu enerjinin büyük çoğunluğu da asenkron motorlar tarafından mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Asenkron motorlarda meydana gelebilecek olan hatalar sanayi üretiminin aksamasına sebep olması muhtemel tehditlerdendir. Bu hataların başlangıç seviyesinde tespit edilmesi, motorun tamamen çalışmaz hale gelmeden veya hatanın ilerleyerek düzeltilmesi daha maliyetli bir hal almadan önlem alınması için gereklidir. Bu sebepten dolayı bu hataların zamanında belirlenmesi ve daha büyük arızalara yol açmadan giderilmeleri birçok araştırmacı tarafından ilgi duyulan çalışma alanları olmuştur. Bu tezin konusunu da asenkron motorlarda meydana gelen mekanik hatalar oluşturmuştur. Bu tez çalışmasında sentetik olarak belirli hata tiplerinin oluşturulduğu beş adet asenkron motor ve referans olması açısından sağlam bırakılan bir adet asenkron motor bir jeneratöre kuple edilmiştir. Jeneratöre bağlı rezistif yük gruplarının çeşitli kademelerde ayarlanması ile motorun şebekeden üç farklı akım değeri çekmesi sağlanmış, diğer bir ifade ile motor üç farklı yük durumunda yüklenecek çalıştırılmıştır. Ayrıca motorlar bu yük kademelerinde bir voltaj kontrollü frekans çevirisi yardımı ile çeşitli hız kademelerinde sürülmüştür. Her motorun değişik yük ve hız kademelerinde çalıştırıldığı durumlarda şebeke ile sürücü arasına yerleştirilmiş olan şönt dirençler üzerinden akan akımları bir veri toplama kartı yardımı ile toplanarak sayısal veriye dönüştürülmüştür. Daha sonra bilgisayar yazılımları yardımı ile hatalı motorlardan gelen verilerin sağlamdan ve ayrıca hata tiplerinin

de kendi aralarında ayrılıp ayrılmadığı incelenmiştir. Tezin akışı konuyu daha açıklayıcı hale getirmek için aşağıda içerikleri açıklandığı şekilde bölümlere ayrılmıştır.

Tezin bu bölümünde konuya kısa bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde ise asenkron motorların yapısı incelenecek ve meydana gelen mekanik hatalar detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Mekanik hataların yol açtığı değişimler, bu hataları tespit etmek için kullanılacak yöntemler geçmişte yapılmış olan çalışmaların da katkısıyla açıklanacaktır.

Tezin üçüncü bölümünde ise şebeke ile sürücü arasından toplanan akımlarının spektral analizi için kullanılagelmiş yöntemler ve bu tezde kullanılmış olan yöntem açıklanacaktır. Dalgacık dönüşümü akımın spektral analizi için en uygun yöntemlerden biri olup bu tez çalışmasında dalgacık dönüşümünün özel bir hali olan dalgacık paket ayrışımı yöntemi ile akım bilgisinden dalgacık paket ayrışımı katsayıları bulunmuştur. Bu katsayılar öznitelik çıkarımında oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Dalgacık paket ayrışımında kullanılan ve birbirinden yapısal olarak farklılıklar gösteren dalgacık çeşitleri de tezin bu bölümünde ele alınacaktır.

Tezin dördüncü bölümünde ise örüntü tanıma yöntemleri ele alınacaktır. Üçüncü bölümde bahsedilen dalgacık paket ayrışım katsayılarının bazı istatistiksel parametreleri kullanılarak öznitelikler ve bu özniteliklerin bir araya getirilmesi ile de öznitelik vektörleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu öznitelik vektörlerine sınıf etiketleri atanarak öznitelik matrisleri elde edilmiştir. Bu matrisler ise değişik sınıflandırıcılar ile örüntü tanıma yöntemleri kullanılarak bilgisayar algoritmaları ile test edilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde ise ölçümlerin alındığı deney düzeneği anlatılmış ve yapılan deneysel çalışma ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Deney düzeneği ile fiziksel sistemden toplanıp sayısal hale getirilmiş veriden öznitelik vektörlerinin elde edilişi ve sınıflandırmada kullanılışı detaylı olarak bu bölümde ele alınacaktır.

Tezin altıncı bölümünde ise deney sonuçları analiz edilecektir. Sınıf etiketleri atanmış öznitelik vektörleri çeşitli sınıflandırıcılar ile sınıflandırılmış ve çıkış etiketleri elde edilmiştir. Atanan sınıf etiketleri ile kullanılan algoritma

sonucu elde edilen çıkış etiketleri arasındaki farklar hatalı sınıflandırmayı göstermekte olup her sınıflandırıcı için sınıflandırma hata oranları çizelgeler halinde verilecektir. Deneysel çalışmanın sonuçlarının ele alındığı bu bölüm, sınıflandırıcıların başarımını ve hatalı sınıflandırmaların hangi sınıflar arasında gerçekleştiğini görmek açısından önemlidir. Bu bölümde ayrıca akım seviyesinin, motorların çalıştırıldığı hız referansının ve dalgacık paket ayrışımında kullanılan dalgacık tipinin sınıflandırma başarımı üzerindeki etkisi incelenecektir.

Tezin yedinci ve son bölümünde ise altıncı bölümde ele alınan deney sonuçlarının son bir değerlendirmesi yapılacaktır ve gelecekte çalışmalar için bazı öneriler getirilecektir.

2. ASENKRON MOTORLARIN YAPISI ve KARŞILAŞILAN MEKANİK HATALAR

Asenkron motorlar basit ve dayanıklı yapıları, ucuz maliyetleri, bakım gereksinimlerinin az oluşu ve çok çeşitli güçlerde üretilebilmeleri gibi avantajlarından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılan motor çeşitleridir. Temelleri Nicola Tesla'nın çalışmalarına dayanan asenkron motorlar, teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha küçük hacimli ve daha yüksek güçlü olarak imal edilmeye devam etmiştir. Örnek vermek gerekirse 1897 yılının teknolojisi ile üretilen bir motor 5.5 kW gücünde iken 1976 yılına gelindiğinde 73.6 kW gücünde bir motor aynı hacme sahip olarak üretilebilmiştir.

Endüstride kullanılan motorların %90'ından fazlasını asenkron motorlar oluşturmakta ve sanayileşmiş toplumların toplam kurulu enerji gücünün %40 ila %50'si asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Kısa devre rotorlu asenkron motorlar düşük fiyatları ve sağlam yapıları ile endüstrinin yükünü çeken motorlardır. Asenkron motorlar genelde doğrudan şebeke geriliminden, yani sabit gerilimli ve sabit frekanslı alternatif akım kaynağından beslenirler ve bu sebepten dolayı yaklaşık olarak sabit hızda çalışırlar, hızları değişen yük altında çok fazla değişmez. Buna karşılık güç elektroniği çeviricileri ile asenkron motorların hızlarını değiştirmek mümkündür. Asenkron motorlar; genellikle bir ya da üç fazlı alternatif akım şebekesinden beslenmekle birlikte, %10 kadarı güç elektroniği elemanlarıyla gerçekleştirilmiş frekans çeviriciler tarafından sürülmektedir. Enerjinin akıllı kullanımı, gerçekleştirilmeye çalışılan endüstriyel faaliyetin yüksek verim düşük kayıplarla, en ucuz maliyetle gerçekleştirilmesi demektir. Azalan kayıplar, motorun çevresel etkilerini azaltacağı gibi, enerji santrallerinin doğaya olan olumsuz etkilerini de minimum seviyeye indirecektir. Bu amacın gerçekleştirilmesine frekans çeviriciler önemli katkı sağlamakla birlikte elektromanyetik girişim (EMI) ve şebekenin ortaya çıkan akım harmonikleri ile kirlenmesi gibi olumsuz etkileri de beraberinde getirmektedir. Bu olumsuzluklara rağmen, asenkron motorların hız kontrolünde güç elektroniği çeviricileri kullanıldığında enerji verimi yükselir, enerji maliyetleri azaltılmış olur ve değişken hız gerektiren endüstriyel uygulamalar gerçekleştirilebilir [1,2].

2.1. Asenkron Motorların Yapısı

Asenkron motorlar, genel olarak stator ve rotor olarak adlandırılan başlıca iki kısımdan meydana gelir.

2.1.1. Stator

Asenkron motorun duran kısmı stator olarak adlandırılır. Stator, 0.4 – 0.8 mm kalınlığındaki silisyumlu sacların özel kalıplarla preslenmesi ile imal edilir. Stator sacları paketlenince üç fazlı sargıların yerleştirileceği stator nüvesi elde edilir ve bu nüve stator gövdesinin içine sıkıca yerleştirilir. Dışarıda sarılmış ve paketlenmiş olan üç fazlı sargılar statorda açılmış olan oluklara yerleştirilir ve sargı uçları klemens kutusundaki ilgili çıkış noktalarına bağlanır. Motor gövdesine motor ayakları monte edilir ve motor kapakları takılır. Motor kapaklarının ortasındaki rulmanlar statorun ortasında dönecek olan rotora yataklık ederler [3]. Şekil 2.1’de bu tez çalışmasında kullanılan asenkron motorlardan birinin stator gövdesi ve stator sargıları görülebilmektedir.



Şekil 2.1. Asenkron motorun statoru

2.1.2. Rotor

Asenkron motorun dönen kısmı rotor olarak adlandırılır. Sincap kafesli rotor (kısa devreli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşit rotor yapısı vardır.

Sincap kafesli rotor, diğer bir ifade ile kısa devreli rotor silisyumlu sacların kalıp preste kesilerek paketlenmesinden sonra, kanalların içine eritilmiş alüminyum dökülmesi ile elde edilir. Rotorun her iki tarafında, rotor çubuklarını kısa devre eden halkalar bulunur. Bu halkaların uçlarında alüminyum döküm yapılırken küçük kanatçıklar meydana getirilir ve bu kanatçıklar pervane görevi görerek motorun soğumasını sağlar. Küçük güçlü motorlarda rotor çubukları alüminyumdan yapılır. Bazı büyük rotorlarda kanallara bakır çubuklar yerleştirilir. Rotorun iki tarafına konan bakır halkalar, bakır çubuklarla kaynak edilerek sincap kafes yapılıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sincap kafesli asenkron motorun rotoru

Sargılı rotorda, diğer bir ifade ile bilezikli rotorda ise üç fazlı alternatif akım sargıları, sacları paketlenerek silindir haline getirilen rotorun üzerindeki

oluklara yerleştirilir. Aralarında 120° faz farkı bulunan üç fazlı sargılar yıldız ya da üçgen bağlandıktan sonra elde edilen üç sargı ucunun, mile yalıtılarak yerleştirilen üç adet bileziğe bağlanması ile bilezikli rotor elde edilmiş olur [4].

2.2. Asenkron Motorlarda Karşılaşılan Mekanik Hatalar

Asenkron motorlarda meydana gelen bir mekanik hata, stator sargılarında bir asimetriye ve stator-rotor hava aralığında düzensizliğe sebep olur. Bu nedenle motorun uzay harmonik dağılımında değişimler oluşur. Asenkron motorlarda meydana gelen mekanik hataların tespiti için yapılan araştırmalar bazı belirtileri öne çıkmıştır. Düzensiz hava aralığı gerilimi ve stator akımı, ortalama momentte azalma ve moment dalgalılığındaki artışlar, makine kayıplarında artış sebebiyle verim azalması, aşırı ısınma, hat akımındaki belirli harmoniklerin artışı ve eksenel yönde kaçak endüktans artışı bu belirtilerden bazılarıdır [5]. Asenkron motorun sağlıklı çalışabilmesi için stator ile rotor arasındaki hava aralığı her noktada sabit olmalıdır. Eğer rotor eksenini tam olarak merkeze yerleştirilmemişse hava aralığı rotor çevresince değişken olacaktır. Bu tür hatalar sonucu rotoru, stator merkezinden dışarı doğru hareket ettirmek isteyen bir merkezkaç kuvveti oluşacaktır. Hava aralığındaki düzensizlikler sonucu oluşan harmonik bileşenlerin frekansları

$$f_{HA} = f_e \left\{ (NR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right\} \quad (2.1)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Burada f_e , motoru besleyen şebekenin frekansını, NR , rotor oluk sayısını, s , kaymayı, $n_d = \pm 1$, w_s ise $w_s = 1, 3, 7, \dots$ olmak üzere tek sayılar kümesini ve p , çift kutup sayısını göstermektedir [6].

2.2.1. Rulman kaynaklı hatalar

Rulmanlar elektrik makinelerinde oldukça sık karşımıza çıkan, yataklama ve sağlıklı dönüş hareketi görevini yerine getiren önemli makine elemanlarıdır. Rulmanların sağlıklı çalışması dönen makinelerin performansını doğrudan etkilemektedir. Yapılan araştırmalar asenkron motorlarda meydana gelen

arızalarda rulman kaynaklı arızaların yaklaşık %40'lık bir payı olduğunu göstermektedir [7]. Rulman arızaları sonucu asenkron motorların faaliyet dışı kalması ve bu durumun büyük ekonomik kayıplara sebep vermesi olasıdır. Bu yüzden başlangıç seviyesindeki arızaların rulman tamamen bozulmadan önce tespiti ve gerekli önlemlerin alınarak yaşanabilecek daha büyük arızaların önüne geçilebilmesi konusu birçok araştırmacının ilgi alanına girmiştir.

Şekil 2.3'te görülebileceği üzere rulmanı oluşturan parçaları iç bilezik, dış bilezik, kafes ve bilyalar olarak sıralayabiliriz



Şekil 2.3. Asenkron motorun rulmanı

İç bilezik ve dış bilezik çelikten yapılır, sertleştirilir ve taşlanır. İç bileziğin mil ile birlikte dönebilmesi için mile sıkıca geçirilir. Bilya olarak adlandırılan parçalar sürtünme direncini azaltmak amacı ile iç bilezik ile dış bilezik arasına yerleştirilen parçalardır. Yüksek kaliteli çelikten imal edilirler. Bilyalar, rotor mili dönerken kendi eksenlerinde dönerler ve iç bileziğin çevresinde yuvarlanma hareketi yaparlar. Bilyalı yataklarda kafes, rulmanlara kılavuzluk yaptığı için kılavuz bileziği olarak da adlandırılır. Eğer kafes kullanılmazsa bilyalar birbirine değerek ve mil dönme hareketi yapınca birbirlerine değerek kısa zamanda birbirlerini aşındırırlar. Kafes, bilyaları eşit mesafede

tutarak birbirlerini aşındırmalarını önler. Aynı zamanda kafes, bilyaların eşit değerde yüklenmelerini sağlar. Kafes, bilyalara sürekli olarak sürtüneceğinden, aşınmanın bilyalar yerine kafeste olması amacı ile yumuşak çelik, pirinç, bronz gibi göreceli olarak daha yumuşak malzemelerden imal edilir. Rulmanlı yatak ne kadar az ısınır, o derecede rahat ve sessiz çalışır.

Normal işletme koşullarında bilyalar genellikle gres yağı ile yağlanır. Gres yağının kullanılmasındaki amaç yapışma yeteneğinin fazla olması, nem ve toza karşı koruyucu özelliğinin olmasıdır. Rulmanların kullanılmasının sağladığı avantajlardan en önemlisi sürtünme direncini dolayısıyla sürtünme sonucu ortaya çıkan kayıpları azaltmasıdır. Bu sayede motorun verimi artar ve mil daha kısa zamanda hızlanır. Çalışma hızının yüksek olduğu uygulamalarda kullanılmaya elverişlidir. Yataklama boşluğu azaldığından daha hassas makine yapımı kolaylaşır ve az yer kapladığından daha küçük hacimlerde makine yapılabilmesini sağlar. Standartlar dahilinde üretilip her zaman piyasada her çeşidinin tedarik edilebilir oluşu yataklama bozulduğunda rulmanın kolayca sökülüp yenisi ile değiştirilmesi ve bu sayede daha büyük arızalar oluşmadan sorunun giderilmesi imkanını tanır [8].

Rulmalarda arızalar, iç ya da dış bileziklerin, bilezikler arasına yerleştirilmiş olan bilyaların, veya bilyaları bir arada tutan kafes adı verilen bağlantının aşınması ile meydana gelir. Değişik arızalar sonucu ortaya çıkan titreşimin frekansı farklı olmaktadır. Literatürde değişik mekanik rulman arızaları sonucu meydana çıkan bu harmoniklerin karakteristik frekansları rulman çapı, bilya çapı, bilya sayısı, radyan cinsinden temas açısı ve rotor hızının bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır [9–12].

Değişik hatalara sahip rulmanların oluşturduğu harmoniklere bağlı karakteristik akım frekansları aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$f_{CF} = |f_e \pm mf_v| \quad (2.2)$$

Bu durumda, güç sisteminin temel frekansı, f_e , taşıyıcı frekans olurken, titreşimin frekansı, f_v , modülasyon frekansı olur.

Sırası ile; dış bilezik, iç bilezik, bilya ve kafes arızalarının oluşturduğu titreşim frekanslarının denklemleri verildiğinde aşağıdaki dört denklem yazılabilir.

Dış bilezik arızası:

$$f_{DB} = \frac{NB}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) \quad (2.3)$$

İç bilezik arızası:

$$f_{IB} = \frac{NB}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) \quad (2.4)$$

Bilya arızası:

$$f_B = \frac{PD}{2BD} f_r \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \right)^2 \cos^2 \phi \right) \quad (2.5)$$

Kafes arızası:

$$f_K = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) \quad (2.6)$$

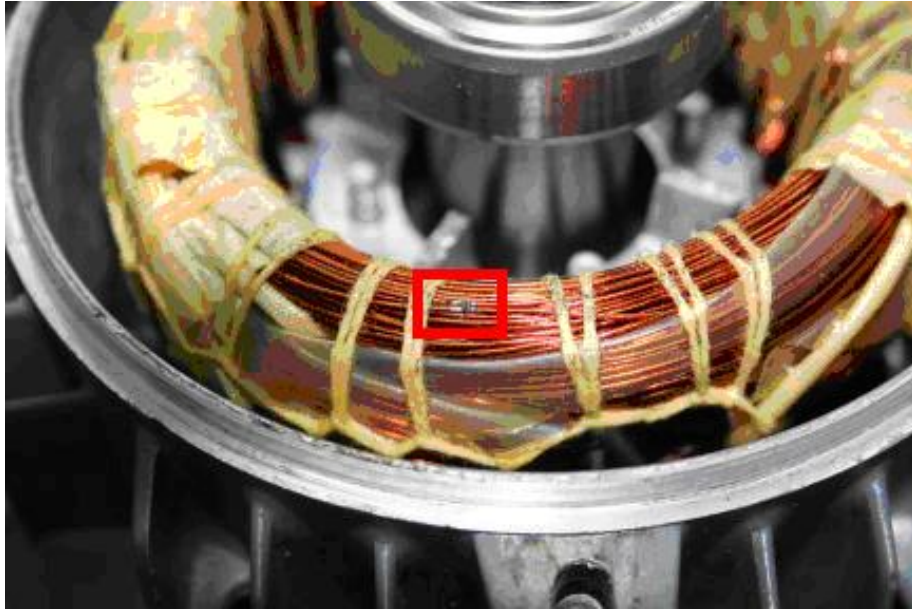
Denklemler (2.3)-(2.6)'da NB , rulmandaki bilya sayısını, f_r , bir dakikada yapılan devir sayısı olmak üzere rotorun hızını, PD , rulmanın dış çapını, BD , bilyanın çapını ve ϕ , bilyaların bilezikle temas açısını ifade etmektedir.

2.2.2. Stator sargılarından kaynaklı hatalar

Statorda meydana gelen başlıca arızalar sargıların kopması ya da sargı yalıtım arızaları sonucu kısa devrelerin meydana gelmesi şeklinde karşımıza çıkar. İstatistiklere göre tüm elektrik makinelerinde meydana gelen arızaların, sadece %5'i sargı yalıtımının bozulmasından kaynaklanmaktadır [13]. Arızaların büyük bir çoğunluğunun kaynağı nem, aşırı ısınma ya da yanlış topraklama gibi nedenlerdir. Özellikle küçük güçlü motorlarda ısınma problemi nedeniyle oluşan arızalar öne çıkmaktadır. Aşırı ısınma probleminin kaynağı soğutma ve fan eksikliği veya motorun plaka değerinin üzerinde yüklenmesi gibi nedenler olabileceği gibi; kırık rotor çubukları ve rotor kısa devre halkalarındaki kopukluklar da aşırı ısınma sorununu doğurabilir. Statorda oluşabilecek bir diğer önemli arıza çeşidi ise sargı kısa devre arızalarıdır. Sargı kısa devreleri bobin grupları arasında ve bobinlerin kendi içersindeki kısa devreler olmak üzere iki şekilde oluşabilir. Bobin grupları arasındaki kısa devre genellikle bağlantılar sırasında bobin gruplarının yanlışlıkla başka fazlara bağlanmasından

kaynaklanır. Ayrıca bobinlerin yerleştirilmeleri sırasında iletkenlerin çizilmeleri sonucu değişik fazlara ait bobinlere temas etmesiyle de oluşabilir. Ayrıca motorun aşırı yük altında çalışması sonucunda meydana gelen ısının yalıtkanlığı bozması sonucu da kısa devre meydana gelebilir. Motorda herhangi bir nedenle sargı kısa devresi meydana geldiyse, bu arıza sonucu motor fazla akım çekecek, ısı artacak ve herhangi bir koruma elemanı yoksa motor yanacaktır.

Bu tez çalışmasında stator sargılarında kısa devre oluşturulmuş bir motor kullanılmış olup sentetik olarak oluşturulan bu hata Şekil 2.4.'te görülmektedir.



Şekil 2.4. Asenkron motorun stator sargılarında oluşturulmuş bir kısa devre hatası

Yapılan araştırmalar kısa devre hataları sonucu hava aralığı akısında meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansının aşağıdaki denklemdeki gibi olduğunu göstermektedir [7].

$$f_{KD} = f_e \left(\frac{m}{p} (1-s) \pm k \right) \quad (2.7)$$

Burada, f_e , motoru besleyen şebekenin frekansını, p , çift kutup sayısını, s , kaymayı, m , $m=1,2,3,\dots$ şeklinde pozitif tam sayılar kümesini ve k ise $k=1,3,7,\dots$ olmak üzere tek sayılar kümesini göstermektedir.

2.2.3. Kırık rotor çubuklarından kaynaklı hatalar

Asenkron motorun rotorunda meydana gelen arızalar; kırık rotor çubukları ve kopuk ya da çatlak kısa devre halkaları, stator ile rotor arasında bulunan hava aralığındaki düzensizlikler, yataklama ve redüktör dişlilerinde meydana gelen arızalar ve rotor milindeki eğrilikler şeklinde özetlenebilir. Yapılan araştırmalar asenkron motor arızalarının yaklaşık %10'luk kısmının rotor kaynaklı arızalar olduğunu göstermektedir [7]. Rotor arızaları genelde alüminyum döküm boşluklarından ya da rotor ile stator arasındaki hava boşluğunun düzensizliğinden meydana gelir.

Kısa devre rotorlu asenkron motorlarda rotor arızaları rotor çubuklarının gevşemesi ya da kırılması şeklinde görülebilmektedir. Kısa devre çubuklarının kırılmasına veya çatlmasına kalkış anındaki aşırı zorlanmalar ve aşırı ısınma gibi problemler sebep olmaktadır. Rotor kısa devre çubuklarında gevşeme meydana gelebilir. Gevşemenin sebebi rotor kısa devre bileziği ile kısa devre çubukları arasındaki bağlantıda kopukluk meydana gelmesidir. Bu arıza durumunda diğer komşu kısa devre çubukları aşırı ısınacaktır. Motor momenti azalacak, verim düşecek, akım artacak ve gürültülü bir çalışma meydana gelecektir. Arıza, kopan kısa devre çubuklarının tekrar kısa devre bileziğine kaynak yapılmasıyla giderilebilir. Kısa devreli rotor çubuklarında herhangi bir sebeple kırılma veya çatlama oluşması durumunda o kısa devre çubuğundan akım geçemeyecektir. Benzer şekilde bu durum diğer komşu kısa devre çubuklarının aşırı ısınmasına, motorun momentinin düşmesine, verim kaybına, çekilen akımda artışa ve gürültülü bir çalışmaya meydan verecektir.

Yapılan çalışmalar kırık rotor çubuklarının başlangıçta motorun işlemesine mani olmayan fakat ikincil etkileri çok büyük olan arızalar olduğunu göstermektedir [7]. Kırık çubuklar yüksek voltaj ve yüksek devirle işletim sırasında diğer sargılara bir şekilde temas ederse ciddi yalıtım arızalarını meydana getirir ve tamir edilmesi çok daha zor ve maliyetli sargı yalıtım arızalarına ve hatta motorun iş göremez hale gelmesine yol açabilir. Ayrıca kırık rotor çubukları işletim sırasında ciddi bir potansiyel güvenlik riski oluşturmaktadır. Bu sebeplerden ötürü gereksiz riskler alıp daha maliyetli arızalarla karşılaşmamak

için rotor çubuklarında meydana gelen arızaların önceden tespit edilip onarılması yoluna gidilmesi gereklidir.

Bu tez çalışmasında kullanılan asenkron motorların rotor gövdesi ve gövde üzerinde yer alan kısa devre çubukları Şekil 2.5'te görülebilmektedir. Kullanılan motorlardan iki tanesinin rotor gövdesinde, toplam 18 rotor çubuğundan sırası ile 3 ve 5 tanesinin matkap ile delinmesi ile kırık rotor çubuğu hataları sentetik olarak meydana getirilmiştir.



Şekil 2.5. Rotor gövdesi ve rotor çubukları

Rotor çubuklarında kırılma meydana geldiğinde, belirli frekanslardaki harmoniklerin arttığı gözlenmiştir [7]. Bu harmoniklerin frekansı ise;

$$f_{KR} = (1 \pm 2ms)f_e \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, s ; kaymayı f_e ; motoru besleyen şebeke geriliminin frekansını ve m de pozitif tam sayılar kümesini ifade etmektedir.

3. MEKANİK HATALARIN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN SİNYAL ANALİZ YÖNTEMLERİ

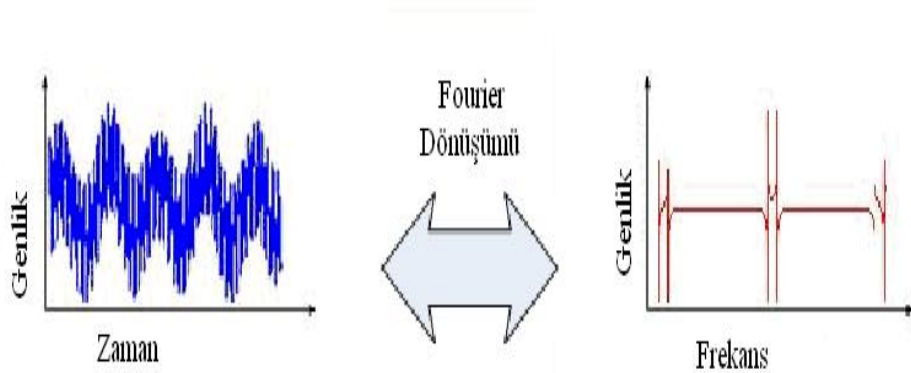
Sinyal analiz yöntemlerinin temel amacı, uygun bir dönüşüm metodu uygulandıktan sonra analiz edilen sinyalden istenen bilgiyi elde etmektir. Günümüzde mühendisler ve matematikçiler, herhangi bir fiziksel sistemden elde edilen sinyallerin analizinde birçok dönüşüm teknikleri kullanmaktadır. Bu yöntemlerinin başlıcaları Fourier Dönüşümü, Shannon Dönüşümü, Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü, Dalgacık Dönüşümü ve Çoklu Çözünürlüklü Analiz'dir. Bu teknikler karşılaştırıldığında birbirlerine göre bazı üstünlüklerinin ya da dezavantajlarının oldukları görülür. Fourier Dönüşümü ile işarette var olan bütün frekanslar belirlenebilir, yüksek frekans çözünürlüğüne sahiptir ancak bu frekansların ne zaman var olduklarına ilişkin bir zaman bilgisi elde edilemez. Diğer yandan Shannon Dönüşümü yüksek zaman çözünürlüğüne sahipken, frekans çözünürlüğü yoktur. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü tekniğinde ise bir işaret, seçilmiş bir pencere fonksiyonu ile pencerelenir ve daha sonra işaretin bu pencere fonksiyonu ile iç çarpımının Fourier Dönüşümü hesaplanır. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümünde tek bir pencere kullanıldığından zaman - frekans tanım bölgesinde gösterilen bir işaretin zamandaki ve frekanstaki çözünürlükleri aynıdır. Eğer seçilen pencere fonksiyonu dar bir pencere ise, iyi zaman fakat kötü frekans çözünürlüğü, geniş bir pencere ise kötü zaman fakat iyi frekans çözünürlüğü elde edilmektedir [14,15]. Dalgacık dönüşümünden önce kullanılan bu dönüşümdeki pencere fonksiyonunun, tarama sırasında sabit genişlikte olması, işaretin hızlı değişen yüksek frekanslı değişimlerinin zaman ortamında tam olarak bölgelendirilememesine neden olmuştur. Bu soruna çözüm olarak, sabit genişlikteki pencereler yerine, işarettaki yavaş değişimleri yakalamak üzere geniş pencere fonksiyonları ve hızlı değişimlerin olduğu yerlerde ise dar pencere fonksiyonlarının kullanımı düşünülmüş ve sonuçta, dalgacık dönüşümü analizi konusu ortaya çıkmıştır [16,17]. Tanım olarak bir dalgacık ise, ortalama değeri sıfır olan ve zamanla sınırlı bir dalga şeklidir. Zaman ekseninde kaydırma ve ölçekleme parametrelerinin değişimi dalgacık dönüşümünün temelini oluşturmaktadır. Sürekli dalgacık dönüşümünde tümüyle ölçeklenebilir, modüle

edilmiş bir pencere işaret boyunca kaydırılır ve her konum için spektrum hesaplanır. Bu işlem her yeni tur için biraz daha kısa veya uzun pencereyle birçok kez tekrarlanır. Sonunda, işaretin zaman-frekans gösterimi, hepsi de farklı çözünürlüklü olan işaretler olacaktır [14–17].

Bu tez çalışmasının konusu olan asenkron motorlarda meydana gelmesi mümkün olan mekanik arızaların tespitinde sinyal işleme uygulamaları önemli yer tutmaktadır. Fiziksel sistemden, yani asenkron motorun çektiği akım bilgisinden elde edilen veri, arıza türlerinin ayrılabilmesi için gereken öznelik vektörlerinin çıkarılması amacıyla dalgacık paket dönüşümü algoritmasından geçirilmiştir. Tezin bu kısmında bu yöntemden bu yöntemin gelişmesinin temel taşları olan diğer sinyal analiz yöntemlerinin hem kronolojik hem de işlevsel olarak gelişiminden bahsedilecektir.

3.1. Fourier Dönüşümü

Sinyal işleme alanında kullanılan araçların en tanınmış olan Fourier analizi, basitçe özetlersek verilen sinyali zaman tanım bölgesinden frekans tanım bölgesine dönüştürür. Fourier dönüşümü, özellikleri zamanla değişmeyen, durağan bir $x(t)$ sinyaline uygulanabilecek en uygun dönüşüm olup Şekil 3.1’de gösterildiği gibi zaman bölgesi ile frekans bölgesi arasında bir ilişki sağlayan dönüşümdür [18,19].



Şekil 3.1. Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşüm çifti;

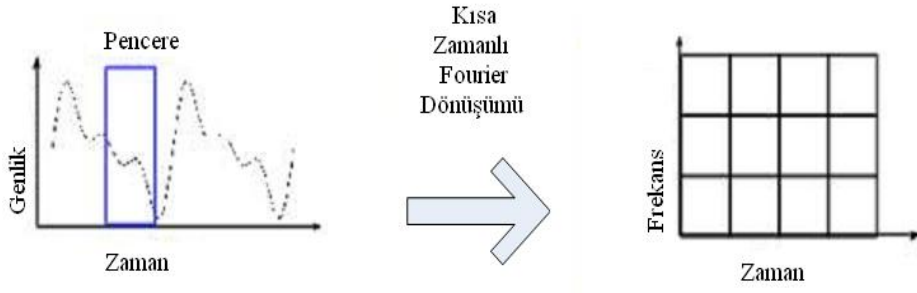
$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(w)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, durağan bir $x(t)$ sinyali sonsuz zaman aralığında tanımlı sinüzoidal taban işlevleri ile frekans tanım bölgesinde gösterilmektedir. Daha basitçe ele alınırsa, bu yöntem sadece durağan sinyalin frekans bileşenleri hakkında bilgi verir ancak zaman bilgisi içermez. Diğer yandan, özellikleri zamanla değişen, durağan olmayan ve ani değişiklikler gösteren sinyaller söz konusu olduğunda, Fourier dönüşümü sinyaldeki herhangi bir anlık değişimi bütün frekans eksenine yansıtır ve bu durum sinyalin dinamiklerini tespit etmek açısından istenmeyen bir durumdur. Bu tez çalışmasında sentetik olarak bazı hata tiplerinin oluşturulduğu voltaj kontrollü sürücü ile çalıştırılan asenkron motorların çektiği, sürücü ile şebeke arasından ölçülen akımlar incelenmiştir. Oluşturulan bu mekanik arızalar sonucu sinyalin karakteristiğine hata kaynaklı harmonikler eklenmekte ve bu sebeple Fourier dönüşümü ile bu hataların tespiti mümkün olmamakta, daha gelişmiş sinyal işleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

Frekans tanım bölgesine dönüşüm yaparken zaman bilgisinin kayboluyor olması Fourier dönüşümünün ciddi bir dezavantajıdır ve bu sebeple bir sinyalin Fourier dönüşümüne bakarak belirli bir olayın ne zaman gerçekleştiğini söylemek imkânsızdır. Bu dezavantajı gidermek amacıyla 1946 yılında Dennis Gabor, Fourier dönüşümünü zamanın belli bir bölümünde sinyalin bir kısmını incelemek için kullandı ve tekniğe sinyalin pencerelemesi adını verdi. Bu yöntem Kısa-Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) (Short Time Fourier Transform) olarak adlandırılır ve bu dönüşüm işareti zaman ve frekansın iki boyutlu bir fonksiyonu olarak Şekil 3.2'deki gibi haritalar.



Şekil 3.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

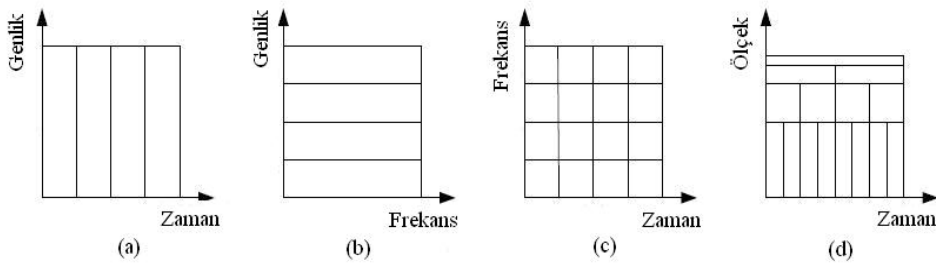
KZFD, sinyalin zaman ve frekans tabanlı görünüşleri arasında bağlantı kurarak sinyalde oluşan farklı durumların zamanı ve frekansı hakkında bilgi sağlamaktadır [20,21]. Fakat bu bilgilerin elde edilmesi bir koşula dayanmaktadır ve bu koşul da pencerenin büyüklüğü ile ilgilidir. KZFD'nin dezavantajı, zaman tanım bölgesinde uygulanan pencerenin uzunluğunun hep sabit olmasıdır ve bu durum pencerenin bütün frekanslar için aynı kalması anlamına gelir. Sonuç olarak, hangi zamanda hangi frekans bileşenlerinin ortaya çıkacağı tam olarak kestirilemez. Bu noktada dalgacık dönüşümü, değişen uzunluktaki bölgeleri kapsayan pencereleri içeren yeni bir teknik olarak ortaya çıkmıştır.

3.3. Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık analizi, kronolojik olarak bakıldığında yeni bir metot olsa da matematiksel altyapısı Fourier'in 19. yüzyıldaki çalışmalarına dayanmaktadır. Fourier'in, çok etkin ve de çok önemli olduğu kanıtlanan frekans analizi alanındaki düşünceleri bu alandaki temelleri oluşturmuş ve diğer araştırmacılar üzerinde de son derece etkili olmuştur. Farklı ölçeklerde (scale) yaklaşık ölçek ortalama değişimlerinin gürültüye daha az duyarlı olduğu açık bir şekilde görülmeye başladığından bu yana araştırmacıların dikkati, frekans tabanlı analizden ölçek tabanlı analize kademeli olarak kaymaya başlamıştır. Günümüzde dalgacık dönüşümü olarak isimlendirdiğimiz husus ilk kez Alfred Haar tarafından 1909 yılında bir tezde ortaya atılmıştır. Dalgacıklar, teorik olarak ilk kez Jean

Morlet ve Alex Grossmann'ın öncülüğündeki bir grup bilim adamı tarafından ele alınmışlar, daha sonraları ise Meyer ve çalışma arkadaşları dalgacık analiz metotlarını geliştirmişlerdir. Fakat ana algoritma Mallat'ın yapmış olduğu çalışmalarda ortaya çıkmış, daha sonraları ise Daubechies, Coifman, ve Wickerhauser'in öncülüğündeki çalışmalar dalgacık teorisinde yeni ufuklar açmıştır. Dönüşümün işaret işleme alanındaki uygulamaları, Daubechies ile başlamıştır. Araştırmacı, dalgacık ayrıştırması konusunda birçok teori geliştirerek ayrık dalgacık dönüşümünün temelini atmıştır. Dalgacık teorisi ile ilgili çalışmalar birçok bilim adamını etkilemiş olup bu konuda birçok çalışmalar yapılmaya ve makaleler yayınlanmaya devam edilmektedir.

Basitçe açıklamak gerekirse; belirli bir zaman penceresinde değeri sıfırdan farklı olan özel salınımsal fonksiyona “dalgacık” adı verilir. Fonksiyonun değeri pencerenin dışında sıfırdır. İncelenen sinyal dalgacık fonksiyonu ile çarpılır ve her bir kısım için dönüşüm yapılır. Dalgacıkların birçok çeşidi vardır. Seçilecek olan dalgacığın, işlenen sinyalin karakteristiğine ve şekline uygun olması daha iyi sonuçlar alınmasını sağlar. Dalgacık dönüşümü ile durağan olmayan sinyallerdeki anlık değişimlerin yeri yüksek bir verimle tespit edilebilmektedir. Bu dönüşümün en önemli özelliği, alçak frekans bilgilerinin istendiği yerde uzun zaman aralığı, yüksek frekans bilgilerinin istendiği yerde ise kısa zaman aralığı sağlamasıdır. Sinyalin zaman tabanlı, frekans tabanlı, kısa zamanlı Fourier ve dalgacık dönüşümünün alındığı durumlardaki farklılıklar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

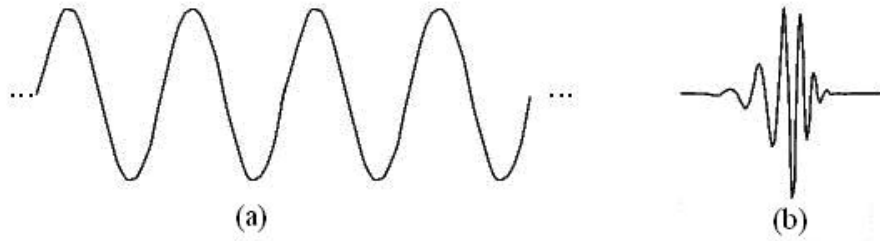


Şekil 3.3. Sinyal spektrumunun farklı dönüşüm yöntemleri ile incelenmesi

(a) Shannon Dönüşümü (b) Fourier Dönüşümü

(c) Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (d) Dalgacık Dönüşümü

Fourier analizi, sinyalin çeşitli frekanslardaki sinüs dalgalarına bölünmesi prensibine dayanırken, benzer şekilde dalgacık dönüşümü de sinyali ana dalgacığın kaydırılmış ve ölçeklendirilmiş dalgacık kümelerine ayırma prensibine dayanır. Sonuçta sinyal, dalgacık dönüşümü ile beraber dalgacıklardan oluşan temel bir fonksiyon kümesine dönüşür. Bu fonksiyonlar ana dalgacığın genişletilip daraltılması ve kaydırılmasından elde edilmektedir. Şekil 3.4'te örnek olarak bir sinüs dalgası ve bir ana dalgacık (db10) prototipi verilmiştir [22].



Şekil 3.4. (a) İdeal bir sinüs dalgası (b) Daubechies-10 (db10) ana dalgacığı

$x(t)$ giriş sinyali olarak dikkate alınırsa ayrıştırma işlemi, Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) olarak adlandırılan iki tür dalgacık dönüşüm yöntemi ile yapılabilmektedir.

3.3.1. Sürekli dalgacık dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümü, $x(t)$ giriş sinyalinin, ψ ile gösterilen dalgacık fonksiyonunun ölçeklendirilmiş ve kaydırılmış haliyle çarpılıp tüm zaman boyunca toplanması ile elde edilir.

$x(t)$, $L^2(R)$ uzayında tanımlı bir sinyal olsun. R reel sayı olursa bu sinyalin sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki gibi olur;

$$SDD(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt \quad (3.3)$$

Burada, $j \in R^+$ ölçeklendirme (genişletme-daraltma (scaling)) parametresi, $k \in R^+$ kaydırma (shifting) parametresi, $\Psi(t)$ ana dalgacık, $\Psi_{j,k}(t)$ ana dalgacıktan j ve k parametrelerine göre elde edilen dalgacık olarak

tanımlanmaktadır. (* karmaşık eşleniği ifade etmektedir.) Denklem (3.3)'teki ifade her j ve k değeri için enerjinin aynı kalmasını sağlayan $1/\sqrt{j}$ normalizasyon faktörünü de hesaba katarak tekrar oluşturulursa integrali alınabilir bir $x(t)$ sinyalinin sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$SDD(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|j|}} \Psi^* \left(\frac{t-k}{j} \right) dt \quad (3.4)$$

Bu dönüşüm basit olarak tanımlanırsa; yapılan işlem, seçilen ana dalgacığın ölçeklendirme ve kaydırma katsayıları ile genişletilip daraltılması ve işlenen sinyal üzerinde kaydırılması prensibine dayanmaktadır. Ölçek küçük olursa dalgacık, asıl işaretin daraltılmış biçimi olur ve böylece yüksek sıklık, yani işaretteki ani değişimler (yüksek frekans bileşenleri) bulunur. Ölçek büyük olursa dalgacık, asıl işaretin genişletilmiş biçimi olur ve böylece düşük sıklık, yani işaretteki yavaş değişimler (alçak frekans bileşenleri) bulunur [23,24].

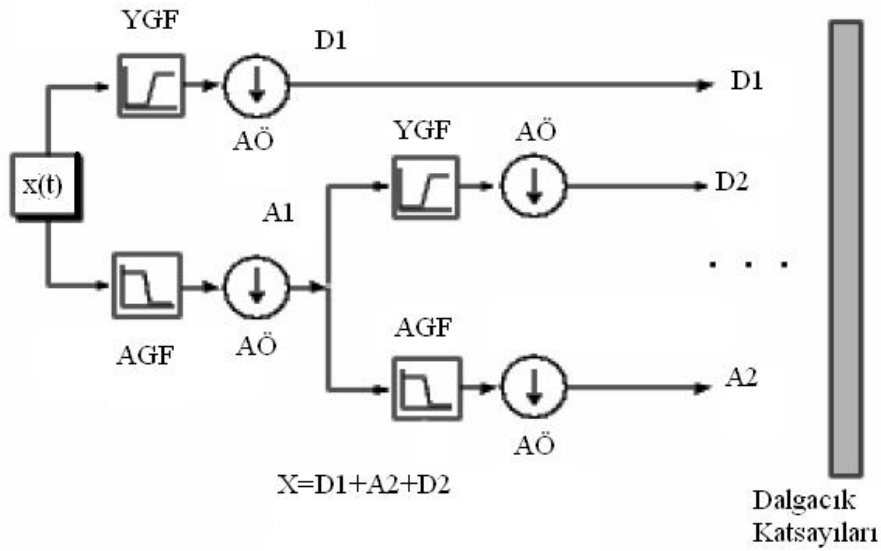
3.3.2. Ayrık dalgacık dönüşümü ve çoklu çözünürlüklü analiz

Dalgacık katsayılarının bütün ölçek değerlerinde hesaplanması çok miktarda katsayının oluşmasına ve işlem yüküne neden olduğundan dolayı, katsayıların yalnızca seçilen ölçekler ve zaman dilimleri için hesaplanması birçok avantajlar sağlar. Sürekli dalgacık dönüşümünde elde edilen dalgacık dönüşümü katsayıları gereksiz terimler ve gereksiz bilgi içermektedir ve hesaplama zamanını arttırmaktadır. Ayrık dalgacık dönüşümü, yeterli bilgiyi sağlamakla birlikte hesaplama zamanında da önemli bir azalma getirmektedir. Ölçek ve pozisyon belli bir basamağa göre seçilerek, örneğin ölçek ve pozisyonların 2'nin katları olarak seçilerek analizin daha verimli bir şekilde doğru sonuçlar vermesi sağlanmaktadır. Bu işlemi yapmanın diğer bir yolu ise filtreleme tekniklerinin kullanmasıdır. İşaret bu tip analizde birbirine seri bağlı yüksek geçiren ve alçak geçiren filtrelerden geçirilmektedir. Böylece işaretle var olan yüksek ve alçak frekans bileşenleri ayrı ayrı analiz edilmektedir. İşaretin çözünürlüğü filtreler yardımıyla değiştirilirken, alt ve üst örnekleme (downsampling and upsampling) yardımıyla da işaretin ölçeği değiştirilmektedir [25]. m ve n tamsayı ve $j_0 > 1$, $k_0 > 0$

olmak üzere ölçeklendirme parametresi $j = j_0^m$ ve kaydırma parametresi $k = nk_0j_0^m$ alınarak j ve k parametreleri ayrıklaştırılır. Genellikle $j_0 = 2$ ve $k_0 = 1$ olarak seçilir ve bu seçimle sırasıyla frekans ve zaman eksenlerinin örneklenmesine olanak verilir. Ayrıklaştırılmış ana dalgacık aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{j_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nk_0j_0^m}{j_0^m}\right) \quad (3.5)$$

j_0 ve k_0 'ın bu şekilde seçilmesiyle, işareti farklı zaman ve frekans çözünürlüklü ölçeklere ayrıştırmayı sağlayan çoklu çözünürlüklü analiz olarak isimlendirilen algoritmalar kullanılabilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çoklu çözünürlüklü analiz ile $x(t)$ işaretinin ayrıştırılması
YGF: Yüksek Geçirgen Filtre AGF: Alçak Geçirgen Filtre AÖ: Alt Örnekleme

Yapılan çalışmalarda bir algoritma yardımıyla orijinal işaret $x(t)$ yaklaşım ve detay olarak adlandırılabilen iki ayrı seriye ayrılır. İşaret öncelikle yaklaşıklık ve onunla aynı seviyeden bir detay serisine bölünür. Ardından işlem yaklaşım serisinin diğer filtreden geçirilmesi ile devam eder. Sonuçta işaret birçok alt çözünürlük seviyesinde bileşenlerine ayrılmış olur. Bu olaya çoklu

çözünürlüklü analiz denilir [26]. Burada yaklaşım serisi işaretin yüksek ölçekli veya düşük frekanslı bileşenini, detay serisi ise düşük ölçek ve yüksek frekanslı bileşenini temsil eder. Düşük ölçekler, sıkıştırılmış bir dalgacık yardımıyla elde edilir ve işarettaki hızlı değişimlere sahip yüksek frekanslı bileşenleri gösterir. Yüksek ölçekler ise genişletilmiş bir dalgacık fonksiyonu yardımıyla elde edilir ve işarettaki yavaş değişimleri veya düşük frekanslı değişimleri belirtir.

3.4. Dalgacık Paket Ayırışımı

Verilen herhangi bir $x(t) \in L^2(R)$ işareti için, ayrık dalgacık dönüşümü dalgacık fonksiyonunun ve işaretin iç çarpımı olarak tanımlanır.

$$C(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x(n) \psi_{j,k}(n) \quad (3.6)$$

Yukarıda verilen denklemde $x(n)$ analiz edilecek olan işaret, $\psi_{j,k}(n)$ ise ayrık dalgacık fonksiyonudur. Orijinal işaret, dalgacık fonksiyonları ve dalgacık katsayıları ile yaklaşıklanabilmektedir.

$$x(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C(j, k) \psi_{j,k}(t) \quad (3.7)$$

Burada j , ölçeklendirme, k ise kaydırma çarpanını simgeler. Dalgacıklar seçilen ana dalgacıktan ölçeklendirme ve kaydırma çarpanları kullanılarak türetilirler. Ana dalgacık sıfır ortalama ile normalize edilmiştir ve aşağıdaki onanırılık koşulunu yerine getirmektedir.

$$C_w = \int_0^{\infty} \frac{|\psi(w)|}{w} dw < +\infty \quad (3.8)$$

Orijinal işarete dalgacık dönüşümü uygulandığında işaret yüksek frekanslı kısım ve alçak frekanslı kısım olmak üzere iki parçaya bölünür. Alçak frekanslı kısım orijinal işaretin bir yaklaşımı (approximation) olarak adlandırılır. Ayırışım iteratif olarak tekrar edildiğinde bir dizi yaklaşım elde edilir. İki ardışık ayırışım arasında oluşan yaklaşımların farkına da detay denir [27]. Çoklu çözünürlü analiz ise sadece alçak frekanslı kısımların iteratif olarak ayırışımını baz alan bir algoritmadır. Çoklu çözünürlü analizdeki yöntem yaklaşım uzayı V_j 'nin onu takip eden yaklaşım alt uzayı V_{j+1} ve ona ilişkin detay alt uzayı W_{j+1} 'ye ayırışımı olarak

da ifade edilebilir. Yaklaşım uzayı V_j ile ilişkili detay uzayı W_j 'dir fakat ayrışmamış olarak kalır.

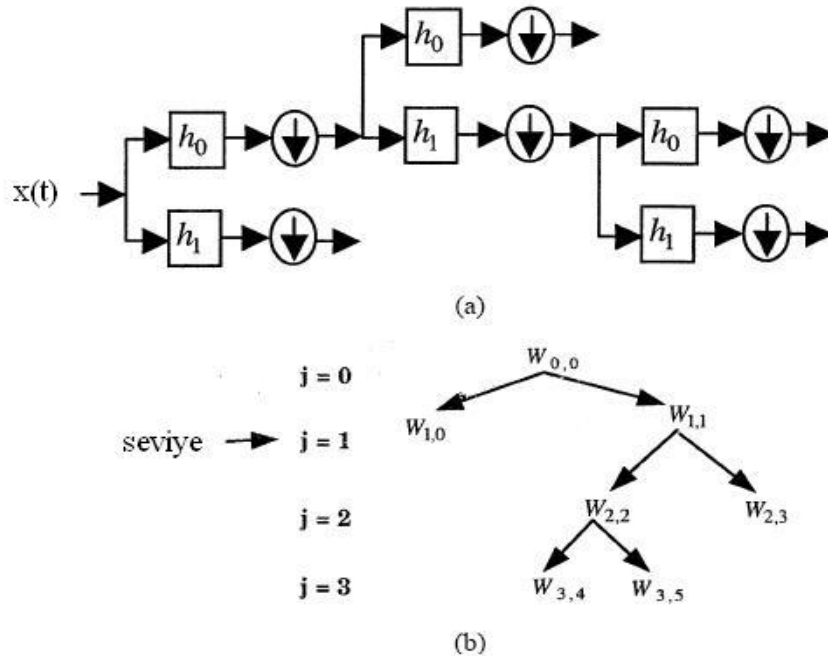
Dalgacık paket dönüşümü ise dalgacık dönüşümünün çoklu çözünürlüklü yaklaşılma ve dalgacıklar arasındaki bağlantının genelleştirilmesi yoluyla kazanılmış bir uzantısıdır. Dalgacık paket ayrışımında hem yaklaşım uzayı V_j , hem de detay uzayı W_j ayrıştırılmaya devam edilir (Şekil 3.6). Girdi dizisinin j seviyesindeki dönüşümü:

$$x_{0,0}(n) = x(n)$$

$$x_{j+1,2^j}(n) = \sum_{i=0}^{L_2-1} h_1(i)x_{j,i}(2^j i - n) \quad (3.9)$$

$$x_{j+1,2^{j+1}}(n) = \sum_{i=0}^{L_2-1} h_0(i)x_{j+1,i}(2^j i - n)$$

Burada h_0 ve h_1 , K büyüklüğünde sonlu dürtü yanıtı alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreleri belirtir [28].



Şekil 3.6. Dalgacık Paket Ayrışımı

(a) Alçak Geçiren ve Yüksek Geçiren süzgeçler ile Dalgacık Paket Ayrışımı'nın yapılışı

(b) Bu ayrışımaya karşılı gelen ikili ağaç

Şekil 3.6'da orijinal uzay detay ve yaklaşım uzaylarına sırasıyla alçak geçirgen filtre h_0 ve yüksek geçirgen filtre h_1 ile ikiye bölünmüştür. Meydana gelen detay uzayı tekrar bölünmüştür. Vektör uzaylarının iteratif olarak bölümü Şekil 3.6'daki ikili ağaçta şematize edilmiştir. Bu ikili ağaçtaki düğüm noktaları derinlikleri ile etiketlenmiş j , (bir ölçeklendirme (genleştirme) çarpanı) ve düğüm numarası k (frekans çarpanı), ve buna karşılık gelen uzay W_j^k olarak sembolize edilmiştir. j derinliğindeki (seviyesindeki) tam bir dalgacık paket ikili ağacında $2^{2^{j-1}}$ 'den daha fazla farklı dalgacık paket birimlik tabanı bulunduğu kanıtlanmaktadır. Bu paketlerden her biri kısıtlanmış zaman ve kısıtlanmış frekans desteği sağlamaktadır [28].

3.4.1. Dalgacık paket ayrışımı katsayıları

Dalgacık paket dönüşümü, her paketi tekrarlı olarak genişleterek dönüşüme artıklık (redundancy) eklemektedir. Elde edilen zaman-frekans gösterimi bütün derinliklerdeki ve bütün düğüm noktalarındaki dalgacık paket katsayılarını içermektedir. Örneğin M uzunluğundaki bir işaret için toplam derinlik sayısı $(1 + \log_2 M)$ olmaktadır. Katsayıların maksimum sayısı bir derinlik için M 'dir. 0 derinliğinde, katsayılar tam olarak işaretin kendisidir. Katsayıların büyük bir bölümü tespit edilmeye çalışılan mekanik hata ile tamamen alakasızdır. Verinin hatanın tespitinde daha etkili bir şekilde kullanılabilmesi için bazı işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Frekans bölgesindeki yerleşimlerine borçlu olarak, değişik harmonik bileşenlerin dalgacık paket katsayıları dalgacık paket dönüşümü spektrumunun değişik düğüm noktalarına dağılmış vaziyettedir. k düğüm noktası ve j derinliğindeki öznitelik katsayısı $W(j, k)$ 'yi dalgacık paket dönüşümü katsayıları cinsinden tanımlandığında;

$$W(j, k) = \sqrt{\sum_{n=1, \dots, N} x_{j, k}^2 \frac{(n)}{N}} \quad (3.10)$$

burada N , j derinliğindeki ve k düğüm noktasındaki özniteliklerin hesaplanmasında kullanılan dalgacık paket dönüşümü katsayılarının sayısıdır [28].

Verilen bir frekans bileşeni için, bileşenin enerjisi verilen bir derinlikte belirli bir sayıdaki düğüm noktasında yerleşmiştir ve enerjinin dayanıklılığı frekans bileşeninin genliğine bağlıdır. Daha açık bir ifade ile izah edilmeye çalışılırsa, bu frekans bileşeni belirli düğüm noktaları ile temsil edilebilir. Örneğin bir asenkron motorda arızaların meydana getirdiği frekans bileşenlerini en iyi şekilde temsil edebilecek öznelik katsayılarını hesaplamak için değişik derinliklerden bir grup düğüm noktası seçilebilir. Böylece hatalı motorun çektiği akımının spektral analizinde hatanın karakteristiğini en iyi yansıtacak şekilde düğüm noktaları alındığı için doğru sınıflandırma başarımlarının diğer sinyal analiz yöntemlerine kıyasla daha yüksek olması beklenmektedir. Bu düğüm noktalarında elde edilen dalgacık paket ayrışımı katsayılarının belirli istatistiksel parametrelerini hesaplamak yoluyla öznelikler ve bu öznelikler kullanılarak öznelik vektörleri oluşturulabilir. Daha sonra oluşturulan bu öznelik vektörleri değişik örüntü tanıma yöntemleri kullanılarak değişik sınıflandırma algoritmaları ile hata sınıflandırma işleminde kullanılabilir.

4. MEKANİK HATALARIN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN HATA SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ

Örüntü tanıma ve sınıflandırma, genel anlamıyla bir veriye, bir fiziksel işleme ya da bir olaya bir sınıf etiketi atanması işidir. Bu atama işlemi ise her zaman bir veriden, bir fiziksel sistemden ya da bir olaydan elde edilen öznitelikler sayesinde gerçekleştirilir. Bir veri toplama sistemi ile veriye ait bazı özellikler elde edilir ve bu özellikler kullanılarak öznitelik çıkarımı işlemi yapılmaya çalışılır. Benzer durumların benzer özniteliklere sahip olması gerekmektedir. Özniteliklerin oluşturduğu öznitelik vektörünün boyutunu ise kullanılan öznitelik sayısı belirler. Olası bütün öznitelik vektörlerinin oluşturduğu sisteme de öznitelik uzayı adı verilir. Veri işleme sisteminin öznitelik vektörlerinin bütün verileri doğru bir şekilde sınıflandırmak için gerekli bilgiyi içerecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Eğer veri işleme sistemi bu şekilde tasarlanabilirse farklı verilerden gelen öznitelik vektörleri öznitelik uzayında birbirleri ile çakışmayacak şekilde gruplar (cluster) oluşturular. Bu tez çalışmasında, farklı hatalara sahip asenkron motorlardan, bir veri toplama sistemi ile toplanan akım bilgileri işlenerek öznitelik vektörleri çıkarılmaya çalışılmıştır. Daha sonra bu vektörler kullanılarak hatalı motorlardan gelen verilerin sağlam motordan gelenlerle ve hatalı motordan gelen verilerin hata türüne göre kendi içlerinde öznitelik uzayında bir grup (cluster) oluşturup oluşturmadığı incelenmeye çalışılmıştır [29,30].

4.1. Bayes Sınıflandırma

Örüntü tanıma işlemleri için olasılık teorisi temel taşıdır. Ω , K adet sınıfı içeren $\Omega = \{w_1, \dots, w_K\}$ bir küme olsun. Bu sınıfların karşılıklı dışlayan olduğu varsayımıyla; verinin w_k sınıfına dahil olma olasılığı, $P(w_k)$, önsel olasılık (prior probability) olarak adlandırılır. Bu olasılık, henüz öznitelik vektörleri bulunmamış olan bir verinin sınıfı hakkında önceden sahip olduğumuz bilgiyi temsil eder. Olası sınıfların sayısı K olduğu için, aşağıdaki denklemi yazmak mümkündür.

$$\sum_{k=1}^K P(w_k) = 1 \quad (4.1)$$

Kullanılan sinyal işleme süreci içerisinde N boyutlu bir öznitelik vektörü olan \mathbf{z} oluşturulur. Farklı sınıflardan verilerin farklı öznitelik vektörlerine sahip olması gerekmektedir. Fakat aynı sınıfa ait verilerin öznitelik vektörleri de farklılıklar göstermektedir. Bunun yanında, bütün öznitelikler veri toplama ve işleme proseslerinden kaynaklanan her çeşit tahmin edilemeyen belirli bir seviyede bir takım rassallığa maruz kalmaktadır. Öznitelik vektörlerindeki bu farklılıklar ve rassallıklar, \mathbf{z} 'nin olasılık fonksiyonuyla hesaba katılırlar.

Öznitelik vektörü \mathbf{z} 'nin koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu $p(\mathbf{z}|w_k)$ ile gösterilir. Bu, w_k sınıfından geldiği bilinen bir verinin öznitelik vektörünün yoğunluğudur. Eğer \mathbf{z} hangi sınıftan olduğu bilinmeyen bir veriden geliyor olsaydı onun yoğunluğu $p(\mathbf{z})$ ile ifade edilecekti. Bu yoğunluk \mathbf{z} 'nin koşulsuz yoğunluğudur. Sınıfların karşılıklı dışlayan oldukları varsayıldığı için, koşulsuz yoğunluğu koşullu yoğunlukların önsel olasılıkları ile ağırlıklandırılması ile koşullu yoğunluklardan türetilir.

$$p(\mathbf{z}) = \sum_{k=1}^K p(\mathbf{z}|w_k)P(w_k) \quad (4.2)$$

Örüntü sınıflandırıcı sınıftaki öznitelik vektörlerini kullanarak verileri sınıflara atar. Bu işlem karar verme fonksiyonu denilen $\hat{w}(\cdot)$ ile gerçekleştirilir. $\hat{w}(\cdot)$, öznitelik uzayını olası sınıfların kümesi üzerine haritalar. \mathbf{z} , N boyutlu bir vektör olduğu için, karar verme fonksiyonu \mathbb{R}^N 'i Ω üzerine ($\hat{w}(\cdot): \mathbb{R}^N \rightarrow \Omega$) haritalar.

Bazı durumlarda, değişik sınıflardan gelen verilerin öznitelik vektörlerinin öznitelik uzayında örtüşükleri görülmektedir. Bu sebeple, sınıflandırmanın hatasız olduğu her zaman garanti edilemez. Veriye hatalı sınıf atanması istenmeyen bir durum olup bu durum bir maliyet olarak nicelenebilir. Maliyetin beklenen değeri eniyileme ölçütlerinde makul bir seviyede olmalıdır [31].

Hatalı sınıflandırma (yada kayıp, hasar) bir maliyet fonksiyonu, $C(\hat{w}|w_k)$ (yada kayıp fonksiyonu) olarak nicelenebilir. $C(\cdot, \cdot): \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu, verinin doğru sınıfı w_k olduğu halde verinin atandığı sınıfın \hat{w} olduğu durumdaki maliyeti ifade eder. K adet sınıf bulunduğundan dolayı, $C(\hat{w}|w_k)$ fonksiyonu

tam olarak $K \times K$ boyutlu bir matris ile belirtilir. Bu sebeple, maliyet fonksiyonuna bazen maliyet matrisi de denir.

Bu noktadan önce açıklanan kavramlar olan önsel olasılıklar, koşullu yoğunluklar ve maliyet fonksiyonları ile optimal sınıflandırıcıları tasarlamak için yeterlidir. Fakat, $P(w_k | \mathbf{z})$, sonsal olasılık (posterior probability) denilen başka bir olasılığın da türetilmesi gerekmektedir. Bu olasılık, bir veriyle ilişkilendirilmiş öznitelik vektörü \mathbf{z} verildiğinde o verinin w_k sınıfına ait olması olasılığıdır. Koşullu olasılıklar için Bayes teoremine göre aşağıdaki denklem elde edilebilir [29-31].

$$P(w_k | \mathbf{z}) = \frac{p(\mathbf{z} | w_k) P(w_k)}{p(\mathbf{z})} \quad (4.3)$$

Eğer rasgele bir sınıflandırıcı \hat{w}_i sınıfını doğru sınıfı w_k olan bir veriden gelen öznitelik vektörü \mathbf{z} 'ye atıyorsa bir $C(\hat{w}_i | w_k)$ maliyeti vardır. Böyle bir veriye sahip olmanın sonsal olasılığı $P(\mathbf{z} | w_k)$ dir. O yüzden, maliyetin beklenen değeri aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$R(w_i | \mathbf{z}) = E[C(\hat{w}_i | w_k) | \mathbf{z}] = \sum_{k=1}^K C(\hat{w}_i | w_k) P(w_k | \mathbf{z}) \quad (4.4)$$

Bu büyüklük koşullu risk olarak adlandırılır. Bu büyüklük öznitelik vektörü \mathbf{z} olan bir veriye \hat{w}_i 'nin atanmasının maliyetinin beklenen değeridir.

Denklem (4.4)'ten, bir karar verme fonksiyonunun, $\hat{w}(\mathbf{z})$, koşullu riski $R(\hat{w}(\mathbf{z}) | \mathbf{z})$ dir. Toplam risk ise koşullu riskin bütün olası öznitelik vektörleri üzerinde ortalamasının alınması yoluyla bulunur.

$$R = E[R(\hat{w}(\mathbf{z}) | \mathbf{z})] = \int_{\mathbf{z}} R(\hat{w}(\mathbf{z}) | \mathbf{z}) p(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \quad (4.5)$$

İntegral bütün öznitelik uzayı üzerine uzanır. R büyüklüğü karar verme fonksiyonu $\hat{w}(\mathbf{z})$ ile ilişkili toplam riski (ortalama risk, yada sadece risk) ifade eder.

Risk değeri R 'nin minimize edilmiş olması, optimal bir sınıflandırıcının özelliğidir. Toplam riski minimize eden karar verme fonksiyonu aynı zamanda

koşullu riski de minimize edendir. Bu sebeple, Bayes sınıflandırıcı aşağıdaki denklemdeki şekli alır:

$$\hat{w}_{BAYES}(\mathbf{z}) = \hat{w}_i, \quad R(\hat{w}_i|\mathbf{z}) \leq R(\hat{w}_j|\mathbf{z}), \quad i, j = 1, \dots, K \quad (4.6)$$

Bu ifade biraz daha sadeleştirilirse:

$$\hat{w}_{BAYES}(\mathbf{z}) = \arg \min_{w \in \Omega} \{R(w|\mathbf{z})\} \quad (4.7)$$

argmin{} ifadesi Ω kümesinden $R(w|\mathbf{z})$ büyüklüğünü minimize eden elemanı verir. Denklem (4.3) ve (4.4) yerine konulduğunda:

$$\begin{aligned} \hat{w}_{BAYES}(\mathbf{z}) &= \arg \min_{w \in \Omega} \left\{ \sum_{k=1}^K C(w|w_k) P(w_k|\mathbf{z}) \right\} \\ &= \arg \min_{w \in \Omega} \left\{ \sum_{k=1}^K C(w|w_k) \frac{p(\mathbf{z}|w_k) P(w_k)}{p(\mathbf{z})} \right\} \\ &= \arg \min_{w \in \Omega} \left\{ \sum_{k=1}^K C(w|w_k) p(\mathbf{z}|w_k) P(w_k) \right\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'e göre yapılan örüntü tanıma Bayes Sınıflandırma veya minimum hata sınıflandırma olarak adlandırılır [29–34].

4.1.1 Düzgün maliyet fonksiyonu ve minimum hata oranı

Bir düzgün maliyet fonksiyonu, bir veri doğru sınıflandırılmasının sıfır maliyeti, hatalı sınıflandırılmasının ise bir birim maliyeti olduğu varsayılarak elde edilir. Bu durum aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilir.

$$C(\hat{w}|w_k) = 1 - \delta(i, k), \quad \delta(i, k) = \begin{cases} 1 & , i = k \\ 0 & , d.d. \end{cases} \quad (4.9)$$

Bu maliyet fonksiyonu ile (4.4)'te verilen koşullu risk aşağıdaki denklemdeki gibi sadeleşir.

$$R(\hat{w}_i|\mathbf{z}) = \sum_{k=1, k \neq i}^K P(w_k|\mathbf{z}) = 1 - P(\hat{w}_i|\mathbf{z}) \quad (4.10)$$

Bu riskin minimize edilmesi, sonsal olasılık olan $P(\hat{w}_i|\mathbf{z})$ 'nin maksimize edilmesi demektir. Bu sebeple, düzgün maliyet fonksiyonuna sahip Bayes karar verme fonksiyonu maksimum sonsal olasılık sınıflandırıcı (MAP sınıflandırıcı) (maximum a posteriori probability classifier (MAP classifier)) olur.

$$\hat{w}_{MAP}(\mathbf{z}) = \arg \min_{w \in \Omega} \{P(w|\mathbf{z})\} \quad (4.11)$$

Bayes teoreminin şartlı olasılıklar için uygulanması ve ilgisiz terimlerin sadeleştirilmesi ile MAP sınıflandırıcıya denk bir sınıflandırıcı elde edilir, fakat bu durumda bütün terimler önsel olasılıklar ve şartlı olasılıklar cinsindedir.

$$\hat{w}_{MAP}(\mathbf{z}) = \arg \min_{w \in \Omega} \{p(\mathbf{z}|w)P(w)\} \quad (4.12)$$

Bir \hat{w}_i sınıfının öznitelik vektörü \mathbf{z} olan bir veriye atandığı varsayalım. Sınıflandırmanın doğru yapılmış olma olasılığı $P(\hat{w}_i|\mathbf{z})$ 'dir. Dolayısıyla sınıflandırma hatası yapılmasının olasılığı da $1 - P(\hat{w}_i|\mathbf{z})$ 'dir. Gelişigüzel bir karar verme fonksiyonu $\hat{w}(\mathbf{z})$ için, koşullu hata olasılığı aşağıdaki gibi olur [31].

$$e(\mathbf{z}) = 1 - P(\hat{w}(\mathbf{z})|\mathbf{z}) \quad (4.13)$$

Bu olasılık, öznitelik vektörü \mathbf{z} olan bir verinin hatalı sınıflandırılmasının olasılığıdır. Hata olasılığının diğer veriler üzerindeki ortalaması, $e(\mathbf{z})$ 'nin olasılığın tüm öznitelik vektörleri üzerinde ortalamasının alınması ile bulunur.

$$E = \mathbf{E}[e(\mathbf{z})] = \int_{\mathbf{z}} e(\mathbf{z}) p(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \quad (4.14)$$

İntegral bütün öznitelik uzayı üzerinde genişletilmiştir. E , hata oranı olarak adlandırılır ve çoğunlukla bir sınıflandırıcının performansını değerlendirmek için kullanılan büyüklüktür.

Bir MAP sınıflandırıcının şartlı hata olasılığı, (4.11)'in (4.13)'te yerine konulması sonucu elde edilir.

$$e_{\min}(\mathbf{z}) = 1 - \max_{w \in \Omega} \{P(w|\mathbf{z})\} \quad (4.15)$$

Minimum hata oranı E_{\min} ise aşağıdaki şekli alır.

$$E_{\min} = \int_{\mathbf{z}} e_{\min}(\mathbf{z}) p(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \quad (4.16)$$

4.2 Doğrusal ve Karesel Sınıflandırıcılar

w_k sınıfına ait bir veriden gelen öznitelik vektörlerinin normal dağılımlı beklenen değer (expectation) vektörünün $\boldsymbol{\mu}_k$ ve ortak değişinti (covariance) matrisinin \mathbf{C}_k olduğu varsayıldığında aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$p(\mathbf{z}|w_k) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N |\mathbf{C}_k|}} \exp\left(\frac{-(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu}_k)}{2}\right) \quad (4.17)$$

Yukarıdaki denklemde N , öznitelik vektörünün boyutudur.

Denklem (4.17)'nin (4.12)'de yerine konulması aşağıdaki minimum hata oranı sınıflandırmayı verir.

$$\hat{w}(\mathbf{z}) = w_i, \quad i = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N |\mathbf{C}_k|}} \exp\left(\frac{-(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu}_k)}{2}\right) P(w_k) \right\} \quad (4.18)$$

Küme parantezinin içindeki fonksiyonun logaritmasını almak $\arg \max \{ \}$ fonksiyonun değerini değiştirmeyecektir. Dahası, k içermeyen bütün terimler ilgisizdir. Bu sebepten dolayı, (4.18) aşağıdaki denkleme denktir.

$$\hat{w}(\mathbf{z}) = w_i, \quad i = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ -\frac{1}{2} \ln |\mathbf{C}_k| + \ln P(w_k) - \frac{1}{2} (\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu}_k) \right\} \quad (4.19)$$

$$i = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ -\ln |\mathbf{C}_k| + 2 \ln P(w_k) - \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{C}_k^{-1} \boldsymbol{\mu}_k + 2 \mathbf{z}^T \mathbf{C}_k^{-1} \boldsymbol{\mu}_k - \mathbf{z}^T \mathbf{C}_k^{-1} \mathbf{z} \right\}$$

Bu nedenle, normal dağılımlı öznitelik vektörlerine sahip bir minimum hata oranı sınıflandırıcının ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$\hat{w}(\mathbf{z}) = w_i, \quad i = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ w_k + \mathbf{z}^T \mathbf{w}_k + \mathbf{z}^T \mathbf{W}_k \mathbf{z} \right\} \quad (4.20)$$

ve

$$w_k = -\ln |\mathbf{C}_k| + 2 \ln P(w_k) - \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{C}_k^{-1} \boldsymbol{\mu}_k$$

$$\mathbf{w}_k = 2 \mathbf{C}_k^{-1} \boldsymbol{\mu}_k$$

$$\mathbf{W}_k = -\mathbf{C}_k^{-1} \quad (4.21)$$

Denklem (4.20)'deki gibi bir sınıflandırıcıya karesel (quadratic) sınıflandırıcı denir ve karar verme fonksiyonu karesel bir karar verme fonksiyonudur. Bu çeşit karar verme fonksiyonlarında bölüntüler arasındaki sınırlar N boyutlu uzayda karesel üstün yüzeylerdir (quadratic hypersurfaces). Daha açıklayıcı olması açısından, w_i ve w_j gibi iki farklı sınıfa ait bölüntülerinin arasındaki sınırı ele alalım. Denklem (4.20)'ye göre, bu iki sınıfın bölüntüleri arasındaki sınır aşağıdaki denklemdeki şartı yerine getirmelidir.

$$w_i + \mathbf{z}^T \mathbf{w}_i + \mathbf{z}^T \mathbf{W}_i \mathbf{z} = w_j + \mathbf{z}^T \mathbf{w}_j + \mathbf{z}^T \mathbf{W}_j \mathbf{z} \quad (4.22)$$

veya:

$$w_i - w_j + \mathbf{z}^T (\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_j) + \mathbf{z}^T (\mathbf{W}_i - \mathbf{W}_j) \mathbf{z} = 0 \quad (4.23)$$

Denklem (4.23), \mathbf{z} 'de kareseldir. Örnek olarak, öznitelik sayısının, $N = 2$ olduğu durumda (4.23)'ün çözümü öznitelik uzayında bir karesel eğridir (quadratic curve). Bu eğri bir elips, parabol, hiperbol düz bir çizgi ya da bir çift çizgi olabilir. Diğer bir örnek olarak öznitelik sayısının, $N = 3$ olduğu durumda ise aynı denklemin çözüm bir karesel yüzeydir. Bu yüzey bir elipsoid, paraboloid, hiperboloid ve benzeri olabilir. Öznitelik sayısının üçten fazla olduğu ($N > 3$) durumlarda ise çözümler hiperelipsoid benzeri hiperkaresellerdir (hyperquadrics).

Ortak değişinti matrislerinin sınıflardan bağımsız olduğu durumu ele alındığında ise (4.19) aşağıdaki hali alır.

$$\begin{aligned} \hat{w}(\mathbf{x}) &= w_i, \\ i &= \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ 2 \ln P(w_k) - (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k) \right\} \\ &= \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ -2 \ln P(w_k) - (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k) \right\} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Ortak değişinti (kovaryans) matrisi \mathbf{C} kendine eşlek (self-adjoint) ve pozitif tanımlı matris olduğu için $(\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k)$ büyüklüğü \mathbf{z} vektörü ile beklenen değer vektörü $\boldsymbol{\mu}_k$ arasındaki mesafe ölçütü olarak değerlendirilebilir. Bu ölçüte karesi alınmış Mahalanobis mesafesi (squared Mahalanobis distance) denir. Denklem(4.24)'ün fonksiyonu, beklenen değer vektörü incelenen öznitelik vektörüne en yakın sınıf için karar vermektedir. Bu sebeten dolayı, en yakın ortalama sınıflandırıcı (nearest mean classifier) adını alır [30,31].

Öznitelik vektör uzayındaki bölüntüler arasındaki karar sınırları doğrusal düzlemler ya da doğrusal hiperdüzlemlerdir. Denklem (4.20) ve (4.21) tekrar ele alındığında;

$$\hat{w}(\mathbf{z}) = w_i, \quad i = \arg \max_{k=1, \dots, K} \{w_k + \mathbf{z}^T \mathbf{w}_k\} \quad (4.25)$$

öyle ki;

$$w_k = 2 \ln P(w_k) - \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\mu}_k, \quad (4.26)$$

$$\mathbf{w}_k = 2 \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\mu}_k$$

elde edilir. Denklem (4.25)'teki forma sahip bir karar verme fonksiyonu doğrusaldır. Buna karşılık gelen sınıflandırıcı da doğrusal sınıflandırıcıdır. Karar verme sınırlarının denklemleri ise aşağıdaki gibidir.

$$w_i - w_j + \mathbf{z}^T (\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_j) = 0 \quad (4.27)$$

Öznitelik vektörünün ortak değışinti matrisi $\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I}$ olan sınıftan bağımsız $\boldsymbol{\mu}_k$ vektörüne eşit olduğunda biraz daha sadeleştirmeye gitmek mümkün olur.

$$\hat{w}(\mathbf{z}) = w_i, \quad i = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ -2 \ln P(w_k) + \frac{\|\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k\|^2}{\sigma^2} \right\} \quad (4.28)$$

$\|\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_k\|$ büyüklüğü öznitelik vektörü \mathbf{z} ve beklenen değer matrisi $\boldsymbol{\mu}_k$ arasındaki normal dik (Euclidean) mesafesidir. Denklem (4.28)'e karşılık gelen sınıflandırıcı, beklenen değer vektörü incelenen öznitelik vektörüne en yakın sınıf için karar verir. Bu sebeple minimum mesafe sınıflandırıcı olarak adlandırılır. En yakın ortalama sınıflandırıcıda olduğu gibi, bölüntüler arasındaki karar verme sınırları doğrusal düzlemler ya da doğrusal hiperdüzlemlerdir. İki farklı w_i ve w_j sınıflarına ait bölüntülerini ayıran düzlem aşağıdaki denklemle verilebilir.

$$\sigma^2 \log \frac{P(w_i)}{P(w_j)} + \frac{1}{2} (\|\boldsymbol{\mu}_i\|^2 - \|\boldsymbol{\mu}_j\|^2) + \mathbf{z}^T (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu}_j) = 0 \quad (4.29)$$

Bu denklemin çözümü $\boldsymbol{\mu}_i$ ile $\boldsymbol{\mu}_j$ 'yi birleştiren doğru parçasına dik olan bir düzlemdir. Hiperdüzlemin yeri, $\sigma^2 \log P(w_i) / P(w_j)$ çarpanına bağlıdır. Eğer $P(w_i) = P(w_j)$ olursa, hiperdüzlem doğru parçasının dik açıortayıdır [29-31].

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Deney Düzeneği

5.1.1 Güç sistemi donanımı ve kullanılan asenkron motorlar

Bu tez çalışmasının deneysel çalışma bölümü, Anadolu Üniversitesi'nin Elektrik-Elektronik Mühendisli Bölümü'ndeki Güç Sistemleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şebeke ile deney düzeneği arasındaki izolasyonu sağlamak amacıyla şebeke ile sistem arasında 25 kVA'lık bir $\Delta-Y$ bağlı transformatör mevcuttur. Deney düzeneğinin beslemesine istenildiğinde müdahale etmek amacıyla veya aşırı yüklenme durumlarında devreye girmeleri için transformatörün girişine ve çıkışına iki adet pano içinde kesici ve sigortalar yerleştirilmiştir.

Deney süresince kullanılan 6 ayrı asenkron motor Şekil 5.1'de görülebilmektedir. Bu motorlar Gamak tarafından üretilmiş, 3 fazlı, 2 kutuplu, sincap kafesli genel amaçlı endüstri tipi asenkron motorlardır. Motorların plaka değerlerine göre anma hızı dakikada 2840 devirdir. 2.2 kW gücünde olan bu motorların güç faktörleri de 0.82 dir. Motorlar yıldız bağlanmış olup bu konfigürasyonda şebekeden çektikleri anma akımı 4.94 Amperdir. Motorlar deney düzeneğinde bir jeneratöre kuple edilmiştir ve şebekeden istenen değerlerde akım çekebilmek için rezistif yük bankası kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Sentetik olarak çeşitli hataların oluşturulduğu asenkron motorlar



Şekil 5.2. Deney düzeneğinin genel görünüşü

Öncelikle, birbirinin aynısı olan bu motorlar üzerinde tespit edilmeye çalışılacak olan mekanik arızaların meydana getirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple motorlar 1'den 6'ya numaralandırılmış ve ilk 5 motor üzerinde tespit edilmesi amaçlanan mekanik hatalar sentetik olarak oluşturulmuş, 6 numaralı motor ise referans olması açısından sağlam bırakılmıştır.

Motor numaralarına göre arıza çeşitlerini listelemek gerekirse:

1. motor: Rulmanı arızalı motor. Bilyaları ve kafesi arızalandırılmış olan bu motor, sesli çalışmaktadır.

2. motor: Rulmanı arızalı motor. Rulmanın yataklamasında arıza mevcut. Rotor mili ile rulman arasında bir miktar eksensel kayıklık mevcut.

3. motor: 3 adet rotor çubuğu kırık rotor. Toplam 18 rotor çubuğundan 3'ü üzerinde matkap ile delikler açılarak kısa devre bozulmuştur (Şekil 5.3).

4. motor: 5 adet rotor çubuğu kırık rotor. Toplam 18 rotor çubuğundan 5'i üzerinde ortaya yakın kısımlarında matkap ile delikler açılarak kısa devre bozulmuştur (Şekil 5.4).

5. motor: Stator sargısı kısa devre edilmiş motor. Stator sargılarının bir bölümü lehimle kısa devre edilmiş durumda.

6. motor: Sağlam motordur.



Şekil 5.3. Rotor çubukları üzerinde matkap ile delik açılması (rotor çubuklarının kırılması) işlemi



Şekil 5.4. Beş adet rotor çubuğu kırılmış bir rotor gövdesi

Motorların farklı hız kademeleri ile çalıştırılmalarını sağlamak için şebeke ile motor arasına voltaj kontrollü bir frekans çeviricisi yerleştirilmiştir. Bu cihazın özelliklerinden bahsetmek gerekirse;

Enko CN 2211 Üç Fazlı Frekans Çeviricisi:

Motorlarla üç fazlı şebeke arasına motorların istenen frekans referansına göre farklı hızlarda dönmesi amacıyla Enko tarafından üretilen CN 2211 modeli voltaj kontrollü üç fazlı bir frekans çeviricisi konulmuştur. Yüksek performanslı mikrodenetleyici kullanımı ile tasarlanmış bu frekans çeviricisi, üç fazlı asenkron motorların hızlarını ve momentlerini ilgili parametrelerin girilmesi ile kolay ve hassas olarak ayarlayabildiği için tercih edilmiştir. Cihaz üzerinde bulunan tuş takımı ve dijital gösterge ile sistem parametreleri programlanabilmekte, motoru sisteme müdahale etmeden açıp kapatabilmek mümkün olmaktadır. CN 2211, sinüs çıkış akımı sağlayan, harmonik kayıpları minimize edilmiş, yüksek güç transfer oranı olan üstün bir çeviricidir. Kontrol devresi üzerinde bulunan 32 bit RISC işlemci ile motor devir kontrolü için gerekli sinyalleri üretirken aynı zamanda LCD gösterge ile RS485 kapısı ile haberleşmekte ve ayrıca ikinci bir RS485 kapısı ile dış dünya ile bağlantı kurabilmektedir. Deneysel çalışmada, hız referansı olarak dört ayrı kademe 50, 45, 40 ve 35 Hz kullanılmıştır. 50 Hz kullanıldığı durumda motor anma devir sayısı ile dönmektedir. Motorlar hız referansı azaltıldıkça orantılı olarak daha yavaş devirlerde sürülebilmektedir.

5.1.2. Ölçüm sistemi donanımı

Verilerin sağlıklı bir şekilde toplanması için deney düzeneğinde yer alan donanım, aşağıda özellikleri açıklanan cihazlardan oluşmaktadır.

Tektronix A6909 İzolatör:

Deney düzeneğinde Tektronix'in ürettiği A6909 modeli iki kanallı bir izolatör kullanılmıştır. İzolatör kullanılmasının sebebi ölçümlerin alındığı transformatörün çıkışıyla ölçüm sisteminin topraklarının aynı olmasını ve faz-toprak arasında meydana gelebilecek herhangi bir kısa devreyi önlemek için toprakların birbirinden izole edilmesi gerekliliğidir. İzolatörle ayırım sağlanır ve

şönt dirençler üzerinden rahat ölçüm alınabilmesi için kazançlar 200V/birimle 100mv/birim arasında kullanıcı tarafından manüel olarak ayarlanabilir.

National Instruments (NI) SCB-68 veri toplama (DAQ) kartı arabirimi:

Bu arabirim sistemden toplanan analog verilerin kolay bir biçimde bilgisayarın içinde bulunan veri toplama kartına iletilmesine yardımcı olur. İzolatör ile veri toplama kartı arasındaki bağlantıyı sağlar.

National Instruments (NI) PCI-6251 veri toplama (DAQ) kartı

Verilerin toplanıp programlar yardımıyla analiz edilmesinde esas görevi üstlenen veri toplama kartı, PCI veri yolunu kullanmaktadır. 1.25 MHz maksimum örnekleme hızına sahip bu kartta, veriler 16 bit çözünürlükte elde edilmektedir. Üzerindeki analog ve sayısal girişler, analog ve sayısal çıkışlar, sayıcılar ve zamanlayıcılar sayesinde pek çok uygulama bu kartla kolayca yapılabilmektedir. Kartın diğer bir üstünlüğü ise tak çalıştır (plug&play) olarak kullanıma hazır olmasıdır. Kart konfigürasyonunun yazılımla yapılıyor olması kullanıcıya zaman kaybettiren ve çoğu zaman sorunlara yol açan kart üzerindeki jumper ayarlarının yapılması zorunluluğunu da ortadan kaldırmıştır. Bilgisayarın PCI yuvasına takılı olması sayesinde yine National Instruments tarafından geliştirilmiş olan Labview programı yardımıyla bu karttan alınan veriler analogdan sayısala çevrilip bilgisayarın sabit diskine kaydedilebilmektedir.

5.2. Verilerin Toplanması

Bu tez çalışmasında üç fazlı asenkron motorların tek fazından akım bilgileri toplanmıştır. Transformator, diğer bir deyişle deney düzeneğimizin beslemesi ile motor sürücüsü arasında ve motor sürücüsü ile motor arasında akım değerlerini kaydetmek amacıyla üç fazlı şönt direnç grupları yerleştirilmiştir. İzolatörün iki kanalı da tek fazdan akım toplamak için kullanılmıştır. Motorlardaki arızalar başlangıç seviyesindeki arızalar olduğu için ve ölçümler motor çalışmaya başladıktan belirli bir süre sonra yataşkın durumda (steady state) toplanmaya başlandığı için üç fazdan birden akım verisi toplanması gerekli

görülmemiş, hem sürücü ile şebeke arası hem de sürücü ile motor arası birer fazın akım verisi toplanmıştır. Akım bilgileri, izolatörlerin çıkışı, veri toplama kartı arabirimi ve şönt dirençler vasıtası ile National Instruments (NI) PCI-6251 veri toplama (DAQ) kartına aktarılmıştır. Bu veri toplama kartı ve Labview programı ile yazılmış olan veri toplama programı ile 20 kHz örnekleme frekansı ile 40 saniye boyunca akım bilgisi toplanmıştır. Eldeki veri setini zenginleştirmek ve yedek veriye sahip olmak amacıyla bu işlemler ikişer defa tekrarlanmıştır. Sonuç olarak 40 saniye boyunca 20 kHz ile örnekleme yapıp analog sinyal bilgisi sayısala çevrilip mat uzantılı 800000 uzunluğundaki MATLAB dosyaları olarak kaydedilmiştir. Veri toplama işlemi her motor için üç farklı akım çektiği durumlarda ve dört farklı hız referansı ile ayrı ayrı ikişer kez gerçekleştirilmiştir.

Motorların farklı farklı akım değerleri çekmesi motorlara kuple ettiğimiz jeneratöre bağlı rezistif yük grubunun kademelerinin değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu rezistif yük grubu kullanılarak motorun değişik yüklerle yüklendiği durumlar temsil edilmektedir. Şekil 5.5'te kullanılan asenkron motorlardan biri ve ona kuple edilmiş jeneratör ve ilaveten Şekil 5.6'da ise rezistif yük grupları görülebilmektedir.



Şekil 5.5. Asenkron motor ve kuple edildiği jeneratör

Motorlar şebekeden;

1. yük durumunda 4.1 A
2. yük durumunda 4.7 A
3. yük durumunda ise 5 A 'lık akımlar çekmektedir.

Bu akım değerlerinin seçilme nedeni ise anma akımının biraz altında bir akım, anma akımı seviyelerine daha yakın bir akım ve ayrıca anma akımının çok az üstünde bir akım ile motorun arıza karakteristiklerinin tespit edilmesinin nasıl etkileneceğinin incelenmek istenmesidir.



Şekil 5.6. Asenkron motor, kuple edildiği jeneratör ve rezistif yük grupları

Şekil 5.7'de görülmekte olan deney düzeneğinde kullanılan üç fazlı frekans çeviricisinin hız referansı ise 50, 45, 40 ve 35 Hz olarak 4 ayrı kademeye

ayarlanmış ve bu 4 ayrı kademe için bütün yük durumlarında bütün motorlar için ikişer defa veri toplanmıştır. Bu da 6 motor için toplam 144 adet veri dosyası elde edilmesi anlamına gelmektedir. Karışıklığı önlemek adına mat uzantılı bu dosyaların adlandırılması sistematik bir biçimde yapılmıştır.

Örnek verecek olursak, m62452.mat dosyası 6. yani sağlam motorun, 2. yük kademesi altında, yani şebekeden 4.7 A akım çekerken, 45 Hz hız referansı ile, yani anma değerinin %90'ı kadar bir hızla çalıştırılırken yapılan iki ölçümden ikincisinin sayısal verilerini içermektedir.



Şekil 5.7. Kullanılan voltaj kontrollü frekans çeviricisi

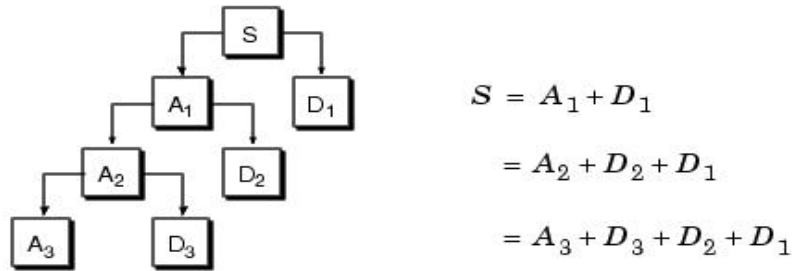
5.3. Öznitelik Vektörlerinin Oluşturulması

Kaydedilen motor akım verileri, sayısal veriler olup bu aşamadan sonra bilgisayar ortamında analiz edilmiştir. Öncelikle bu tez çalışmasında hata sınıflandırma için gerekli öznitelik vektörleri hesaplanmıştır. Verilerin analizinde

MATLAB programı ve ona ek olarak yine MATLAB tabanlı bir araç (toolbox) olan PRTools (Pattern Recognition Tools) kullanılmıştır. PRTools, 1993 senesinde Hollanda'nın Delft Teknoloji Üniversitesi'nin Uygulamalı Bilimler Fakültesi'nde (Delft University of Technology Faculty of Applied Sciences) bir grup araştırmacı tarafından tasarlanmaya başlamıştır. Örüntü tanıma üzerine yoğunlaşmış, Robert P.W. Duin ve Dick de Ridder önderliğindeki bir alt grup ise PRTools'un eğitim amaçlı yazılım paketini geliştirmişlerdir. PRTools, kullanıcılarına geleneksel istatistiksel örüntü tanıma işlemleri için 200'ün üzerinde yordam sağlamaktadır. Bu yordamların arasında veri üretimi, sınıflandırıcı seçimi, sınıflandırıcı birleştirimi, öznitelik seçimi, doğrusal ya da doğrusal olmayan öznitelik çıkarma, yoğunluk hesaplama ve grup (cluster) analizi sayılabilir [35]. Ayrıca PRTools, öğrencilerin ve diğer kullanıcıların yeni algoritmalar dizayn etmesini amaçlar. Akademik araştırmalar için ücretsiz, ticari kullanım için ise lisanslı olarak kullanılmaktadır. Halihazırda PRTools'un 4.1 versiyonu kullanımdadır ve bu tez çalışmasında bu versiyon kullanılmıştır.

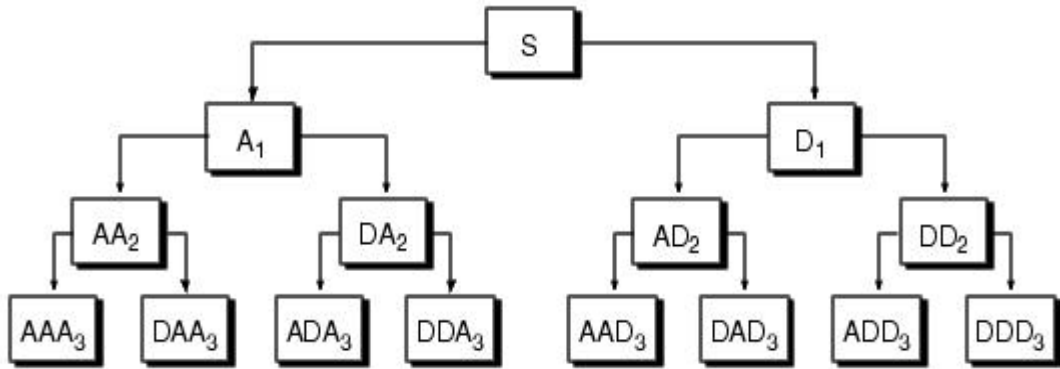
5.3.1. Dalgacık paket ayrışımı katsayılarının hesaplanması

Öncelikle kaydedilen dosyalar MATLAB'da açılarak yüklenmiştir. 800000 uzunluğundaki diziler (array) 20000'lik 40 eşit parçaya ayrılmıştır. Böylelikle her motordan 40 olmak üzere toplamda da 240 parça veri seti meydana gelmiştir. Bu parçalardan öznitelik vektörlerini çıkarmak amacıyla öncelikle Şekil 5.8'de şematize edilen dalgacık ayrışımının özel bir hali olan dalgacık paket ayrışımı (wavelet packet decomposition) kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Dalgacık Ayrışımı

Dalgacık paket ayrışımı, dalgacık ayrışımının genelleştirilmiş bir hali olup, sinyal analizi için daha zengin olasılıklar sağlamaktadır. Dalgacık analizinde, sinyal aynı anda alçak geçirgen ve yüksek geçirgen iki süzgeçten geçirilir. Böylelikle sinyal yaklaşım ve detay olarak adlandırılan iki parçaya ayrılır. Daha sonra yaklaşım kısmı ikinci seviye bir ayrışımına tabi tutularak yine kendisinin yaklaşım ve detayına ayrılır. Yaklaşım kısımlarına uygulanan bu ayrışım, daha sonraki seviyelerde de devam ettirilebilir. Böylelikle, n . seviyedeki bir ayrışımında, sinyali ayrıştırmak için $n+1$ tane olası yol olmaktadır. Dalgacık paket ayrışımında ise, yaklaşımların bölünebildiği gibi detaylar da kendi yaklaşım ve detaylarına ayrılabilir. Bu şekilde, normal ayrışımında $n+1$ tane olan olası ayrıştırma sayısı 2^{n-1} 'e çıkmaktadır. Şekil 5.9'da dalgacık paket ayrışım ağacı görülmektedir.



Şekil 5.9. Dalgacık paket ayrışım ağacı

Verilen bir S sinyalini, dalgacık paket dönüşümü ağacının yardımıyla değişik şekillerde ifade etmek mümkün olmaktadır. Örneğin, Şekil 5.9'da görüldüğü gibi, dalgacık paket ayrışımı sonucunda S sinyalini $A_1 + AAD_3 + DAD_3 + DD_2$ şeklinde ifade edebiliriz. Bu gösterim normal dalgacık analizinde mümkün olmayan, dalgacık paket analizi sayesinde ulaşabildiğimiz bir ayrışımır.

Bu tez çalışmasında, 11. seviyeye kadar dalgacık paket ayrışımı yapılmıştır. Bu seviyenin seçilmesindeki temel amaç, sistemi besleyen şebekenin frekansı olan 50 Hz ve çevresini daha iyi gözlemlemek hedefidir. Bu seviyedeki

ayrışımın 5 ve 6. düğüm noktalarından elde ettiğimiz dalgacık katsayıları öznitelik vektörünü oluşturmada temel alınmıştır. 5. düğüm noktasının detayı ile 6. düğüm noktasının yaklaşım ve detayı olmak üzere toplam 3 set dalgacık katsayısı kullanılmıştır. Bu seviye için konuşursak, bir yaklaşım ya da detay grubu, sinyalin yaklaşık 4.88 Hz'lik bir kısmından elde edilmiş katsayıları oluşturmaktadır.

Kullandığımız bu 3 set ise aşağıda belirttiğim frekans aralıklarına karşılık gelmektedir:

43.92 Hz – 48.8 Hz

48.8 Hz – 53.68 Hz

43.92 Hz – 58.56 Hz

Sonuç olarak, 43.92 Hz ile 58.56 Hz arasındaki katsayıları kullanarak oluşturulan katsayılar matrisi öznitelik çıkarımında büyük önem taşımaktadır.

Dalgacık paket ayrışımındaki diğer önemli husus ise ayrışımında kullanılacak olan dalgacığın türüdür. Bu tez çalışmasında karşılaştırma yapılabilmesi amacı ile 4 ayrı dalgacık türü kullanılmıştır. Bunlar ise

1. Haar dalgacığı
2. Daubechies 2 dalgacığı (db2)
3. Daubechies 8 dalgacığı (db8)
4. Daubechies 32 dalgacığı (db32)

Birbirinden yapısal olarak farklı olan bu dalgacıklar ile ayrışım sonucunda ortaya çıkan katsayılar da farklı olmaktadır.

5.3.2. Kullanılan istatistiksel parametreler

Dalgacık paket ayrışımı ile elde edilen ayrışım katsayılarının bazı istatistiksel parametreleri kullanılarak öznitelik vektörleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu öznitelik vektörleri kullanarak öznitelik matrisi elde edilmiştir. Bu matrisi oluştururken 5 farklı istatistiksel parametre kullanılmıştır. Bu istatistiksel parametreler ise beklenen değer (mean), varyans (variance), standart sapma (standard deviation), çarpıklık (skewness) ve basıklıktır (kurtosis) olarak sıralanabilir.

5.3.2.1. Beklenen değer

Beklenen değer bir rassal değişkenin alabileceği bütün değerlerin, olasılıklarıyla çarpılması ve bu işlemin bütün değerler üzerinden toplanmasıyla elde edilen değerdir. Ağırlıklı ortalama olarak da düşünölebilir ki ağırlık katsayıları verilen olasılık kütle fonksiyonu veya olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Beklenen değer, beklenen değer işle mcisi E veya μ ile gösterilir. Rassal değişkenin ayrık veya sürekli olması durumuna göre beklenen değer sırası ile şu ifadelerle hesaplanır.

$$\mu = \sum_j x_j f(x_j) \quad (5.1)$$

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \quad (5.2)$$

5.3.2.2. Varyans

Bir olasılık dağılımını için varyans dağılımının kendi ortalamasından sapmasının karesinin beklenen değeridir. Varyans kavramı dağılıma ait her bir değerin dağılımının ortalamasından ne kadar uzak olduğuyla ilgilidir. Varyans söz konusu sapmaların ortalama değerini ölçmektedir. X değişkeninin beklenen değeri $\mu = E(X)$ olmak üzere, varyans aşığıdaki denklemlle tanımlanır.

$$\text{var}(X) = E((X - \mu)^2) \quad (5.3)$$

Matematiksel notasyon kullanılarak bir rassal değişken X için varyans, ya $\text{var}(X)$ ya da σ_x^2 , veya daha basitce σ^2 olarak gösterilir.

5.3.2.3. Standart sapma

Bir rassal değişken X için standart sapma aşığıdaki şu gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{E((X - E(x))^2)} \\ &= \sqrt{E(X^2) - (E(X))^2} \\ &= \sqrt{\text{var}(X)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Eğer bir rassal değişken X , x_1, x_2, \dots, x_N değerlerini eşit olasılıklarla alırsa, o değişken için standart sapmayı hesaplamak için önce X için ortalama \bar{x} şu toplam olarak tanımlanır.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{x_1, x_2, \dots, x_N}{N} \quad (5.5)$$

Burada N alınan örneklem sayısıdır. Sonra standart sapma ifadesi aşağıdaki gibi basitleşir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.6)$$

Diğer bir ifade ile, standart sapma değeri varyansın kare köküdür.

5.3.2.4. Çarpıklık ve Basıklık

Olasılık kuramı ve istatistik biliminde bir olasılık dağılımı için k . standardize edilmiş moment μ_k / σ^k olarak tanımlanır. Burada μ_k , k . ortalama etrafındaki moment ve σ standart sapmadır. Bu k . momentin standart sapmaya göre normalize edilmesidir. $\mu_k(\lambda x) = \lambda^k \mu_k(x)$ olduğu için x 'in üssü k 'dir, yani x^k olur. Böylece normalize edilmiş momentler k dereceli homojen polinomdurlar. Bu demektir ki standardize edilmiş momentler ölçeğe göre değişmez. Bir olasılık dağılımı için diğer bir ölçeğe göre değişmez özellik varyasyon katsayısı; yani σ / μ olur. Ancak bu özellik bir standardize edilmiş moment değildir. Standardize edilmiş momentlerin diğer başka bir dikkat çeken özelliği de, boyutsuz sayı olmalarıdır. Momentler için boyut vardır; ama bunlar standardize edilirlerken aynı boyutta olan standart sapmaya bölündükleri için orantının boyutu için birim yoktur; orantı, yani standardize edilmiş moment, boyutsuz bir sayı olur. Birinci standardize edilmiş moment 0'a eşittir. Çünkü ortalama etrafındaki birinci moment sıfırdır. İkinci standardize edilmiş moment 1'e eşittir. Çünkü ortalama etrafındaki ikinci moment, varyans yani standart sapmanın karesi olur. Üçüncü standardize edilmiş moment çarpıklıktır. Dördüncü standardize edilmiş moment ise basıklıktır.

5.4. Verilerin Sınıflandırılması

Verilerin sınıflandırılması işleminde öncelikle 800000 uzunluğundaki veriler 40 eşit 20000'lik parçalara ayrılmış ve bu parçalardan bir önceki bölümlerde anlatılan dalgacık paket ayrışımı yöntemi ile ayrışım katsayıları elde edilmiş ve bu katsayıların istatistiksel parametreleri kullanılarak tek bir sayısal değer elde edilmiştir. Bu sayısal değerler öznitelik olarak adlandırılır. Toplam 5 istatistiksel parametre 3 bantta da hesaplatıldığı için öznitelik sayımız 15 olmuştur. Motorlardan toplanan verilerin uzunluğu 800000 olduğu ve bunlardan 20000'lik 40 parça oluşturduğumuz için her motordan 40 tane 15 öznitelik barındıran öznitelik vektörleri elde edilmiştir. Deney düzeneğinde 6 adet motor olduğu göz önüne alınırsa, 240'a 15'lik öznitelik matrisleri elde edilmektedir. Matris oluşturulurken, kullanılan öznitelik vektörlerinin sırasının motorlara verilen numaralarla aynı olması sağlanmıştır. Daha açık söylemek gerekirse, öznitelik matrisindeki ilk 40 satır 1. motordan, sonraki 40, 2. motordan ve devam eden sıra ile en son 40 satır da 6. motordan gelen öznitelikler olmaktadır.

Bir sonraki aşamada ise, PRTools aracını kullanılarak bu öznitelik matrisi ile sınıfların numaraları eşleştirilmiştir. PRTools'un sağladığı kolaylıklardan biri olan etiketleme özelliğini kullanarak matrisin ilk 40 satırındaki öznitelikler "1", sonraki 40 satırı "2" benzer şekilde devam edilerek son 40 satırı "6" olarak etiketlenmiştir. Bu etiketler şimdilik "giriş etiketleri" olarak adlandırılabilir. Öznitelik vektörleri ve etiketlerle oluşturulan bu yapının, daha sonra uygun bir sınıflandırıcı seçilerek sınanması gerekmektedir. Bu noktada yine, PRTools araç kutusunda mevcut üç çeşit sınıflandırıcı ile oluşturulan yapı sınanmıştır. Bu sınıflandırıcılar ise;

Doğrusal Bayes (ldc) sınıflandırıcı

Karesel (quadratic) Bayes (qdc) sınıflandırıcı ve

En yakın ortalama (nmse) sınıflandırıcıdır.

Yukarıda listelenen bu sınıflandırıcılar ile oluşturulan yapı sınanmıştır. Sınamanın güvenilirliğini arttırmak adına birini dışarıda bırak (leave one out) metodu ile çapraz doğrulama yapılmıştır. Sonuçta öznitelik vektörlerine "çıkış etiketleri" atanmıştır. Giriş etiketleri ile çıkış etiketleri arasında uyumsuzluk olan öznitelik

vektörleri ise hatalı sınıflandırılmış olmaktadır. Hatalı sınıflandırılmış bu öznelik vektörlerinin toplam veri setine olan oranı ise hata oranıdır. Kuşkusuz seçilebilecek sınıflandırıcılar bu tez çalışmasında kullanılanlarla sınırlı değildir. Sınıflandırma işlemi için Parzen sınıflandırıcı, Fisher sınıflandırıcı, k en yakın komşu sınıflandırıcı, destekçi vektör sınıflandırıcı gibi pek çok değişik sınıflandırıcılar da hata sınıflandırma işleminde kullanılabilir.

6. DENEY SONUÇLARI

Öznitelik vektörlerinin oluşturulması bölümünde de anlatıldığı gibi, deneysel çalışmada değişik durumların tanıma oranlarına olan etkisini incelemek adına birçok parametre değiştirilerek tanıma gerçekleştirilmiştir. Motorların değişik hız referansları ile çalıştırıldığı durumlardaki tanıma oranları çizelgeler halinde verilmiştir. Aşağıdaki çizelgelerde, hata oranları yüzde (%) cinsinden verilmiştir. Hangi hata tiplerinin hangileriyle karıştığına söylemek bu çizelgelere bakarak mümkün değildir. Bu çizelgelerden sadece sınıflandırmanın başarısızlık (veya hata) oranlarını görmek mümkündür (Çizelge 6.1-6.12). Bu çizelgelerden yararlanarak, motorların farklı akımlar çektikleri durumlardaki tanımada hem sınıflandırıcının hem de dalgacık paket ayrışımında kullanılan dalgacık tipinin tanımaya olan etkisi görülebilir. Fakat hangi hata tiplerinin hangileri ile karıştığını görmek için ise sınıflandırma sonuçlarının hata (karışma) matrislerini (confusion matrix) incelemek gerekmektedir (Çizelge 6.13 ve 6.14). Hata matrisleri ve bu matrislerden elde edilebilecek bilgi örnek olarak seçilen bazı durumlar üzerinden detaylı olarak anlatılacaktır.

6.1. Sınıflandırma Sonuçları

Bu bölümde verilen sonuçlar 5 istatistiksel parametre kullanılarak elde edilen 15 öznitelikli öznitelik vektörleri ile elde edilen sonuçlardır. Sonuçların daha rahat incelenmesine imkan tanımak amacı ile sonuçlar öncelikle motorların çalıştırıldıkları hız referanslarına göre çizelgeler sıralanmıştır.

Çizelge 6.1. Motorların 50 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki (1. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	0.00	0.42	0.00
ldc	0.42	2.50	5.00	0.00
nmsc	0.00	15.00	14.58	13.75

Çizelge 6.2. Motorların 50 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki (2. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	0.83	0.00	2.50
ldc	0.42	3.33	4.17	3.33
nmsc	0.00	13.75	15.83	10.00

Çizelge 6.3. Motorların 50 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki (3. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	1.67	2.08	3.75
ldc	2.92	3.75	5.00	8.75
nmsc	5.00	9.58	20.83	9.58

Çizelge 6.4. Motorların 45 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki (1. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	3.75	12.92	9.17
ldc	0.42	7.08	17.50	14.17
nmsc	7.92	21.67	24.58	23.75

Çizelge 6.5. Motorların 45 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki (2. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	13.75	14.17	11.67	14.58
ldc	17.92	15.42	16.67	19.17
nmsc	15.83	16.25	17.08	19.17

Çizelge 6.6. Motorların 45 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki (3. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	2.92	5.42	7.92	8.33
ldc	4.58	16.25	18.33	17.08
nmisc	13.3	22.08	24.17	23.75

Çizelge 6.7. Motorların 40 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki (1. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	0.83	0.42	8.33
ldc	0.00	4.58	2.50	8.33
nmisc	4.58	12.50	12.50	8.75

Çizelge 6.8. Motorların 40 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki (2. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.83	3.33	11.25	11.25
ldc	2.92	9.58	14.17	14.17
nmisc	12.08	23.75	19.17	22.92

Çizelge 6.9. Motorların 40 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki (3. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	0.42	3.33	2.50
ldc	0.00	3.75	4.58	4.17
nmisc	2.08	4.17	4.58	5.42

Çizelge 6.10. Motorların 35 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.1 A akım çektikleri durumdaki (1. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	3.75	3.75	5.00	3.75
ldc	4.58	6.67	5.42	3.75
nmsc	5.42	9.58	7.92	5.42

Çizelge 6.11. Motorların 35 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 4.7 A akım çektikleri durumdaki (2. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	0.42	1.25	7.50
ldc	0.00	2.92	6.25	9.58
nmsc	2.08	10.42	7.50	17.92

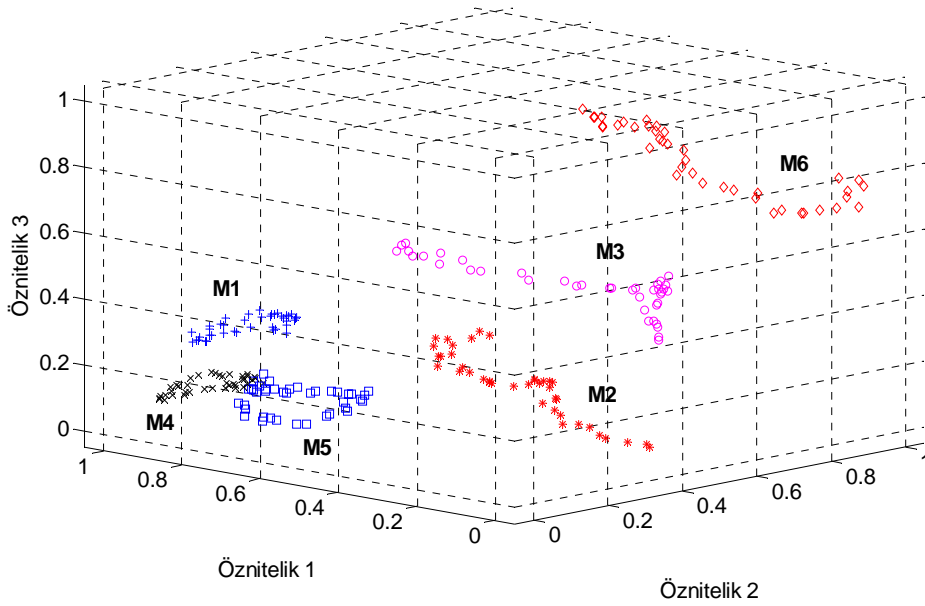
Çizelge 6.12. Motorların 35 Hz hız referansı ile çalıştırılıp şebekeden 5 A akım çektikleri durumdaki (3. yük kademesi) % cinsinden sınıflandırma hata oranları

Seçilen Sınıflandırıcı	Seçilen Dalgacık Tipi			
	Haar	Daubechies 2	Daubechies 8	Daubechies 32
qdc	0.00	0.00	0.00	1.25
ldc	0.00	1.67	3.75	4.17
nmsc	0.00	10.42	6.25	7.50

Yukarıda çizelgeler halinde verilen bu hata oranları, 15 öznitelik kullanılarak gerçekleştirilen tanıma oranlarıdır. Kuşkusuz boyut sayısı 3'ün üzerinde olduğu durumlarda bu öznitelikleri grafiksel olarak görmek mümkün değildir. Buna rağmen, örnek olarak 15 öznitelik arasından seçilen 3 öznitelik ile bazı durumlar için sonuçları görsel olarak incelemek faydalı olacaktır.

İlk örnek olarak dalgacık paket ayrışımında Haar dalgacığının kullanıldığı, motorların 50 Hz hız referansı ile voltaj kontrollü frekans çeviricisi ile sürüldüğü ve 1. yük seviyesinde şebekeden 4.1 A akım çektiği durumu detaylı olarak inceleyelim. Bu durumda sınıflandırma çok büyük bir başarı ile gerçekleşmiştir.

Karesel (quadratic) Bayes sınıflandırıcı (qdc) ve En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı (nmssc) ile sınıflandırma yapıldığında tanıma başarımı %100, Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı (ldc) ile ise %99.58 olmuştur. Tek hatalı sınıflandırılan veri normalde 5. sınıfa ait iken 4. sınıfta olduğu hesaplanan bir öznelik vektörü olmuştur. 15 öznelikten 3'ünün kullanılması ile çizilen grafik Şekil 6.1'de görülebilmektedir.



Şekil 6.1. Motorların 50 Hz ve 4.1 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizindeki öznelikler

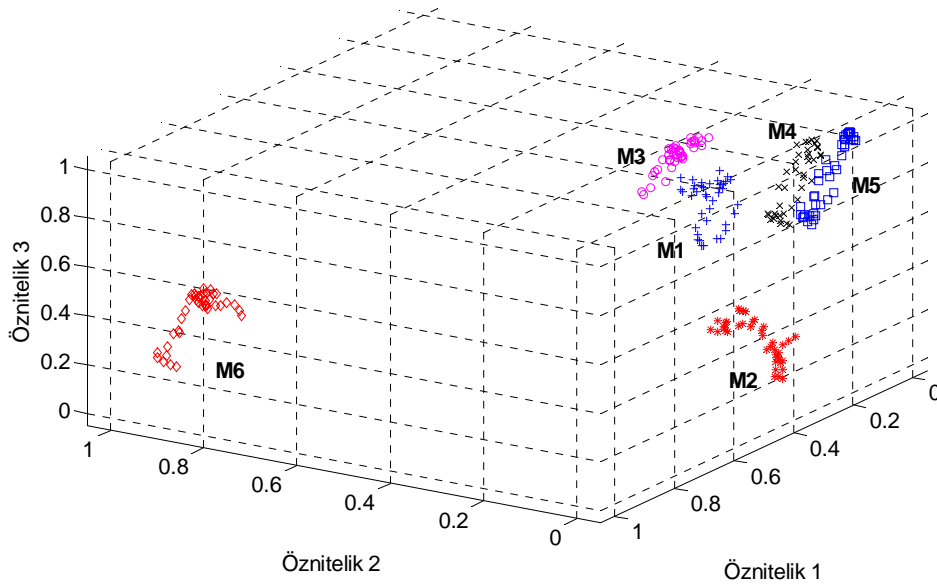
Şekil 6.1'den de anlaşılacağı gibi, 4. motordan ve 5. motordan gelen öznelikler birbirine çok yakın çıkmaktadır. Zaten sınıflandırma hatası da bu iki sınıf arasında gerçekleşmektedir. Diğer öznelikler ise öznelik uzayında birbirlerinden ayrı ve kendi aralarında grup (cluster) oluşturacak şekilde yerleşmişlerdir.

İkinci örnek olarak dalgacık paket ayrışımında Haar dalgacığının kullanıldığı, motorların 45 Hz hız referansı ile voltaj kontrollü frekans çeviricisi ile sürüldüğü ve 1. yük seviyesinde şebekeden 4.1 A akım çektiği durum ele alındığında, tanıma başarımı Karesel (quadratic) Bayes Sınıflandırıcı (qdc) ile sınıflandırma yapıldığında %100, Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı (ldc) ile %99.58, ve En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı (nmssc) ile %92.08 olmuştur. Doğrusal Bayes

Sınıflandırıcı (ldc) ile tek hatalı sınıflandırılan veri normalde 3. sınıfa ait iken 1. sınıfta olduğu hesaplanan bir öznelik vektörü olmuştur. En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı (nmse) ile ise toplam 240 veriden 19'u hatalı sınıflandırılmıştır. Hatalı sınıflandırmanın hangi sınıflar arasında meydana geldiği Çizelge 6.13'te yer alan hata (karışım) matrisi yardımı ile incelenebilir.

Çizelge 6.13 Motorların 45 Hz ve 4.1 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizinde En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı için oluşan Hata Matrisi

Gerçek Etiket	Hesaplanan Etiket						Toplam
	1	2	3	4	5	6	
1	36	0	4	0	0	0	40
2	0	40	0	0	0	0	40
3	0	0	40	0	0	0	40
4	0	0	0	35	5	0	40
5	0	0	0	10	30	0	40
6	0	0	0	0	0	40	40
Toplam	36	40	44	45	35	40	240



Şekil 6.2. Motorların 45 Hz ve 4.1 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizindeki öznelikler

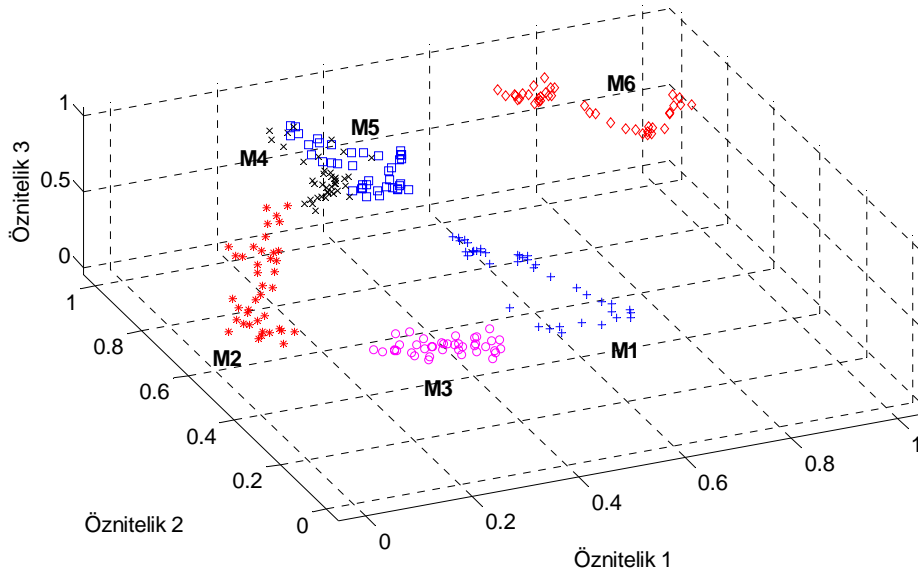
Hatalı sınıflandırılan 19 veriden 15'i 4 ile 5. sınıf arasındadır. Diğer 4'ü ise normalde 1. sınıfa ait olması gerekirken 3. sınıfa ait olduğu hesaplanan verilerdir. Sonuç olarak 1. ile 3. sınıflar ve 4. ile 5. sınıflar arasında hatalı sınıflandırmaların meydana geldiği görülmektedir. Yine 15 öznitelikten 3'ünün kullanılması ile çizilen Şekil 6.2 incelendiğinde 1. ile 3. ve 4. ile 5. sınıfa ait verilerin özniteliklerinin birbirine yakın, 2. sınıfa ve 6. sınıfa ait verilerin ise onlardan ve birbirinden oldukça uzak olduğu görülmektedir.

Üçüncü örnek olarak dalgacık paket ayrışımında Daubechies-8 dalgacığının kullanıldığı, motorların 35 Hz hız referansı ile voltaj kontrollü frekans çeviricisi ile sürüldüğü ve 2. yük seviyesinde şebekeden 4.7 A akım çektiği durum ele alındığında, bu durumda tanıma başarımları Karesel (quadratic) Bayes Sınıflandırıcı (qdc) ile sınıflandırma yapıldığında %98.75, Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı (ldc) ile %93.75 ve En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı (nmse) ile %92.5 olmuştur. Karesel (quadratic) Bayes Sınıflandırıcı (qdc) ile sınıflandırma yapıldığında hatalı sınıflandırma 4. ile 5. sınıflar arasında yapılan 3 adet hatadır. Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı (ldc) ile hatalı sınıflandırılan veriler normalde 2. sınıfa ait iken 4. sınıfta olduğu hesaplanan 1, normalde 4. sınıfa ait iken 5. sınıfta olduğu hesaplanan 5 ve normalde 5. sınıfta iken 4. sınıfta olduğu hesaplanan 9 tane olmak üzere toplam 15 öznitelik vektörü olmuştur.

Çizelge 6.14 Motorların 35 Hz ve 4.7 A çalışma durumunda db-8 dalgacıklı analizinde En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı için oluşan Hata Matrisi

Gerçek Etiket	Hesaplanan Etiket						Toplam
	1	2	3	4	5	6	
1	40	0	0	0	0	0	40
2	0	37	0	3	0	0	40
3	0	0	40	0	0	0	40
4	0	0	0	34	6	0	40
5	0	0	0	9	31	0	40
6	0	0	0	0	0	40	40
Toplam	40	37	40	46	37	40	240

En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı (nmssc) ile ise toplam 240 veriden 18'i hatalı sınıflandırılmıştır. Bu duruma ait hata matrisi Çizelge 6.14 incelendiğinde; Doğrusal Bayes Sınıflandırıcıda olduğu gibi hatalı sınıflandırmaların 2, 4 ve 5. sınıflar arasında olduğu görülmektedir. En Yakın Ortalama Sınıflandırıcıda hatalı sınıflandırılan verilerin sayısı artmış ve bazı sınıflar arasında oldukça büyük hatalar gerçekleşmiştir. Örneğin 4. sınıfta olması gereken 40 öznitelik vektöründen sadece 34'ü doğru sınıflandırılmıştır, fakat 4. sınıfta olmadığı halde 12 öznitelik vektörünün de 4. sınıfta olduğu hesaplanmıştır. 15 öznitelikten 3'ünün kullanılması ile çizilen grafik aşağıdadır (Şekil 6.3).

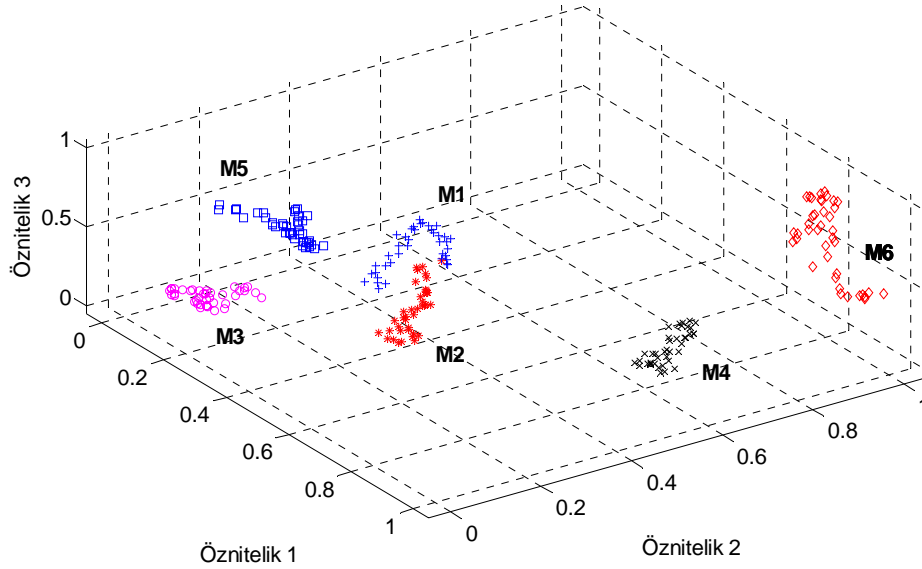


Şekil 6.3. Motorların 35 Hz ve 4.7 A çalışma durumunda db-8 dalgacıklı analizindeki öznitelikler

Şekilden de anlaşılacağı gibi 2, 4, ve 5. sınıfa ait verilerin birbirine çok yakın, diğerlerinin ise onlardan ve birbirlerinden ayrı olduğu görülmüştür.

Dördüncü örnek olarak dalgacık paket ayrışımında Haar dalgacığının kullanıldığı, motorların 35 Hz hız referansı ile voltaj kontrollü frekans çeviricisi ile sürüldüğü ve 3. yük seviyesinde şebekeden 5 A akım çektiği durumda, sınıflandırma çok büyük bir başarı ile gerçekleştirilmiştir. Tanıma başarımı Karesel (quadratic) Bayes Sınıflandırıcı (qdc) ile sınıflandırma yapıldığında

%100, Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı (ldc) ile ise %97.08 olmuştur. Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı ile hatalı sınıflandırılan veriler normalde 1. sınıfa ait iken 2. sınıfta olduğu hesaplanan 4 ve 2. sınıfa ait iken 1. sınıfta olduğu hesaplanan 3 olmak üzere toplam 7 öznitelik vektörü olmuştur. En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı (nmsc) ile ise başarımları %95 olmuştur. Bu durumda hatalı sınıflandırılan veriler normalde 1. sınıfa ait iken 2. sınıfta olduğu hesaplanan 3 ve 2. sınıfa ait iken 1. sınıfta olduğu hesaplanan 9 olmak üzere toplam 12 öznitelik vektörü olmuştur. 15 öznitelikten 3'ünün kullanılması ile çizilen grafik Şekil 6.4'te görülebilir.



Şekil 6.4. Motorların 35 Hz ve 5 A çalışma durumunda Haar dalgacıklı analizindeki öznitelikler

6.2. Sınıflandırma Sonuçlarının Değerlendirmesi

Yapılan çalışmada en yüksek sınıflandırma başarısı Karesel (quadratic) Bayes Sınıflandırıcı kullanılan durumlarda gerçekleşmiştir. Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı ve En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı kullanılan durumlarda göreceli olarak tanıma oranının azaldığı görülmüştür. Öznitelik uzayında oluşan grupların birbirinden ayrılmasında hiperelipsoid benzeri hiperkareseller ile ayrışım yapan

Karesel (quadratic) Bayes Sınıflandırıcı, doğrusal düzlemler ya da doğrusal hiperdüzlemler ile sınıflandırma yapan Doğrusal Bayes Sınıflandırıcı ve En Yakın Ortalama Sınıflandırıcı'ya göre büyük avantaj sağlamaktadır. Diğer bir dikkat çeken husus ise dalgacık paket ayrışımında kullanılan dalgacık tipinin hata sınıflandırmaya olan etkisidir. Literatürde Daubechies-1 olarak da geçen Haar dalgacığı kullanıldığı durumlarda en iyi tanıma oranı gerçekleşmiştir. Kullanılan diğer dalgacık tipleri; Daubechies-2, Daubechies-8 ve Daubechies-32 ile yapılan sınıflandırmalarda başarı oranları göreceli olarak azalmıştır. Voltaj kontrollü bir frekans çeviricisinin kullanılması, şebekeye bir takım harmonikler yüklemiştir. Bu çalışmada frekans çeviricisi ile sürülen motorlarda tanıma yapılmaya çalışılmış ve farklı hız referanslarında yapılan deneyler karşılaştırılmıştır. En düşük tanıma başarımları 45 Hz hız referansı ile yapılan tanımalarda gerçekleşmiştir. Motorların şebekeden çektiği akımın seviyesi sınıflandırma başarısı üzerinde kullanılan dalgacık tipi ya da motorların çalıştırıldığı hız referansı kadar etkili olmamıştır. Yine de en iyi başarımın motorların şebekeden 5 A (anma değerlerinin çok az üstündeki bir akım değeri) çektikleri durumda gerçekleştiği görülmüştür.

Sınıflandırmada kullanılan öznitelik sayısı 15 olduğundan dolayı bu özniteliklerin aynı anda görsel olarak incelenmesi mümkün olmamaktadır. Bu öznitelikler arasından 3 tanesinin seçilerek çizdirilen grafikler bazen aldatıcı olabilmektedir. Yine de bu grafiklerde 6. yani sağlam motorun akım verisinden elde edilen öznitelikler öznitelik uzayında diğer özniteliklerden oldukça ayrı bir yerde gruplaşmıştır. Hata matrisleri incelendiğinde de sağlam motorun verilerinin diğerlerinden oldukça üstün bir başarı ile ayrıldığı görülebilir. Bu durum öncelikli olarak sağlam motorların arızalılarından ayrılmasının gerçekleşmesi için oldukça olumludur. Ayrıca grafiklerde birbirine yakın öznitelik grupları gerçekte de birbiri arasında bir miktar hata ile sınıflandırılabilen motorlardan gelen verilere işaret etmektedir. Toplam 15 öznitelikten sadece 3 tanesi kullanılarak çizdiriliyor olsa bile grafikler kullanılarak hata sınıflandırma sonuçları yorumlanabilmektedir.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında basit ve dayanıklı yapıları ve ucuz maliyetleri ile sanayide en çok kullanan motor türü olan asenkron motorlarda meydana gelen mekanik hatalar, bu hataların meydana getirdiği değişimler ve hataların tespiti için uygulanabilecek yöntemler detaylı olarak incelenmiştir. Sentetik olarak belirli hata tiplerin oluşturulduğu motorlardan laboratuvar ortamında alınan akım bilgileri sayısal olarak elde edilmiş, bu bilgiler dalgacık paket ayrışımı yöntemi ile işlenmiş ve buradan elde edilen katsayıların belirli istatistiksel parametrelerine göre oluşturulmuş öznitelik vektörleri ile hata sınıflandırma yapılmıştır. Bu tez çalışması dalgacık paket ayrışımının mekanik hataların belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Mekanik hata kaynaklı frekans bileşenlerinin oluşması beklenen bölgelere yüksek frekans çözünürlüğü ve istenilen bant genişliği ile ulaşabilmesi bu yöntemi üstün kılmıştır.

Bu tezde öznitelikler doğrudan dalgacık paket ayrışım katsayılarının bazı istatistiksel parametreleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu öznitelikler arasından sınıflandırma için en verimli olabilecekleri seçen bir algoritma tasarlanması gelecekte yapılması muhtemel bir çalışma olarak önerilebilir. Bu sayede tanımda kullanılan öznitelik sayısı azaltılarak işlem yükü azaltılmış olacaktır. Ayrıca farklı durumlar için hangi özniteliklerin daha belirleyici olduğu da daha net bir şekilde incelenebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Mohan, N., Undeland, T.M. ve Robbins, W.P., “Power Electronics Converters, Application, and Design”, John Wiley & Sons Inc, New Jersey, A.B.D., 2002.
- [2] Valentine R., “Motor Control Electronics Handbook”, McGraw Hill, New York, A.B.D., 1998.
- [3] Beaty, H.W. ve Kirtley, H.W., “Electric Motor Handbook”, McGraw Hill, New York, A.B.D., 1998.
- [4] Merz H., “Electric Machines and Drives”, VDE VERLAG GMBH, Berlin, Almanya, 2002.
- [5] Ye, Z., Wu, B. ve Zargari, N., “Online mechanical fault diagnosis of induction motor by wavelet artificial neural network using stator current”, IECON 2000 26th Annual Conference of the IEEE, **2**, 1183 - 1188, 2000.
- [6] Fenger, M., Lloyd, B.A. ve Thomson, W.T., “Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis”, Cement Industry Technical Conference 2003 Conference Record IEEE–IAS/PCA, 37 – 46, 2003.
- [7] Thomson, W.T. ve Fenger, M., “Current signature analysis to detect induction motor faults”, Industry Applications Magazine IEEE, **7(4)** , 26 – 34, 2001.
- [8] Kiameh P., “Electrical Equipment Handbook”, McGraw Hill, New York, A.B.D., 2003.
- [9] Schoen, R.R., Habetler, G., Karman, F. ve Bartheld, R.G., “Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring”, IEEE Trans. On Ind. Appl., **31(6)**, 1274–1279, 1995.
- [10] Schoen, R.R. ve Habetler, T.G., “Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines”, IEEE Trans. On Ind. Appl., **31(4)**, 900–906, 1995.
- [11] Eren, L. ve Devaney, M.J., “Bearing Damage Detection via Wavelet Packet Decomposition of the Stator Current”, IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, **53(2)**, 431–436, 2004.
- [12] Devaney, M.J. ve Eren, L., “Detecting Motor Bearing Faults”, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, **7(4)**, 30–35, 2004.

- [13] Ye, Z. ve Wu, B., “A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis”, Power Electronics and Motion Control Conference 2000 Proceedings IPEMC The Third International, **3**, 1353 – 1358, 2000.
- [14] Mallat, S., “A Wavelet Tour of Signal Processing”, Academic Press, San Diego, California, A.B.D., 1999.
- [15] Chan, A.K. ve Goswami J.C., “Fundamentals of Wavelets”, John Wiley & Sons Inc, New York, A.B.D., 1999.
- [16] Addison, N., “The Illustrated Wavelet Transform Handbook”, IOP Publishing, Londra, İngiltere, 2002.
- [17] Walker, J.S., “A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications” CRC Press, Florida, A.B.D., 1999
- [18] Oppenheim, A.V., Willsky, A.S. ve Hamid, S., “Signals and Systems”, Prentice Hall, New Jersey, A.B.D., 1989
- [19] Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. ve Buck, J.R., “Discrete-Time Signal Processing”, Prentice Hall, New Jersey, A.B.D., 1999
- [20] Körner, T. W., “Fourier Analysis” , Cambridge University Press, Cambridge, İngiltere, 1988.
- [21] Morrison, N., “Introduction to Fourier Analysis” John Wiley, New York, A.B.D., 1994.
- [22] MATLAB Wavelet Toolbox User Manual
- [23] Ayaz, E., Ozturk, A. ve Seker, S., “A Study on Continuous Wavelet Transform for Fault Detection in Electric Motors”, IEEE 14th Signal Processing and Communications Applications, 1–4, 2006.
- [24] Ayaz, E., Ozturk, A. ve Seker, S., “Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors”, IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 1130 – 1133, 2006
- [25] Selesnick, I.W., “A Higher Density Discrete Wavelet Transform”, IEEE Transactions on Signal Processing, **54**(8), 3039 – 3048, 2006
- [26] Akansu, A.N. ve Haddad R.A., “Multiresolution Signal Decomposition”, Academic Press, San Diego, A.B.D., 2001

- [27] Eren, L. ve Devaney, M.J., “Motor current analysis via wavelet transform with spectral post-processing for bearing fault detection” 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, **1**, 411–414, 2003.
- [28] Ye, Z., Wu, B. ve Sadeghian, A., “Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **50(6)**, 1217 – 1228, 2003.
- [29] Duda, R.O., Hart, P.E. ve Stork, D.G., “Pattern Classification”, John Wiley & Sons Inc, A.B.D., 2001.
- [30] Therrien, C., “Decision Estimation and Classification”, John Wiley & Sons Inc, A.B.D., 1989.
- [31] Heijden, F., Duin, R.P.W, Ridder, D., ve Taz, D.M.J., “Classification Parameter Estimation and State Estimation”, John Wiley & Sons Inc, West Sussex, İngiltere., 2004.
- [32] Theodoridis, S. ve Koutroumbas, K., “Pattern recognition”, San Diego, CA, A.B.D., 2006.
- [33] Webb, A. R., “Statistical Pattern Recognition”, John Wiley & Sons Inc, West Sussex , İngiltere, 2002.
- [34] Gibson, W., “Pattern recognition”, Berkley Books, New York, A.B.D. , 2005
- [35] Delft Pattern Recognition Group, PRTools: The Matlab Toolbox for Pattern Recognition Website, 2008. <http://prtools.org/about.html>