T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİ GERÇEK ZAMANLI OLARAK BELİRLEYEN FPGA TABANLI AKILLI TANIMA SİSTEMİ

DOKTORA TEZİ

Belkıs ERİŞTİ

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı: Devreler ve Sistemler
Danışman: Prof. Dr. Yakup DEMİR

MAYIS-2015

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİ GERÇEK ZAMANLI OLARAK BELİRLEYEN FPGA TABANLI AKILLI TANIMA SİSTEMİ

DOKTORA TEZİ

Belkıs ERİŞTİ
(102113203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27.05.2015
Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2015

Danışman :	**Prof. Dr. Yakup DEMİR (FÜ)**
Diğer Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. M.Tunay GENÇOĞLU (FÜ)**
	Doç. Dr. Ayşegül UÇAR (FÜ)
	Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ (İÜ)
	Yrd. Doç. Dr. Kadir ABACI (MEÜ)

HAZİRAN–2015

ÖNSÖZ

Teknolojinin gelişmesiyle, günlük yaşantımızda kullandığımız elektronik cihazların yapıları da bu paralelde değişim göstermiştir. Bu durum beraberinde, teknolojilere erişimi daha ucuz bir hale getirmiştir. Böylece, teknolojik cihazların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bu cihazların yapılarında barındırdıkları güç elektroniği ekipmanları, güç kalitesi problemleriyle karşı karşıya kalınmasına neden olmuştur. Bunun sonucunda, güç kalitesi problemlerinin tespit edilmesi ve izlenmesi ile ilgili çalışmalar önem kazanmıştır. Bu tez çalışması ile gömülü sistem teknolojilerini kullanarak, akıllı bir güç kalitesi tanıma sisteminin kazandırılması hedeflenmiştir.

Tez çalışmalarım boyunca desteklerini eksik etmeyen ve bizlere alanımızda büyük katkıları bulunan, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yakup DEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması süresince hem bir akademisyen hem de bir eş olarak bana büyük desteği olan eşim Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ'ye, ayrıca kızlarım Esma ve Elif ile üzerimde çok büyük emekleri olan anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 0320.STZ.2013-2 nolu "Uzaktan Erişimli Çok Noktalı Yeni Bir Enerji Kalitesi İzleme Cihazının Tasarlanması ve Enerji İzleme Yazılımlarının Geliştirilmesi" başlıklı SANTEZ projesi kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na teşekkür ederim.

Belkıs ERİŞTİ

ELAZIĞ–2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **II**
İÇİNDEKİLER ..... **III**
ÖZET ..... **VI**
SUMMARY ..... **VII**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **VIII**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **X**
KISALTMALAR LİSTESİ ..... **XI**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Genel Bilgiler 1
1.2. Literatür Taraması 3
1.3. Tezin Amacı ve Organizasyonu 7
2. GÜÇ KALİTESİ VE PROBLEMLERİ **9**
2.1. Güç Kalitesi Tanımı 9
2.2. Güç Kalitesi Problemleri 9
2.2.1. Güç Kalitesi Olayları (GKO) 10
2.2.1.1. Arıza Türü Güç Kalitesi Olayları 10
2.2.1.2. Anahtarlama Türü Güç Kalitesi Olayları 11
2.2.2. Güç Kalitesi Bozulmaları 14
3. SAHADA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZİLERİ (FPGA) VE PROGRAMLAMA TEKNİKLERİ **19**
3.1. FPGA Yapısı 20
3.1.1. Mantık Hücresi 20
3.1.2. FPGA Giriş/Çıkış Pinleri 21
3.1.3. Hafıza Blokları 21
3.2. FPGA Programlama Teknikleri 21
3.2.1. Donanım Tabanlı Yöntem 22
3.2.2. Yazılım Tabanlı Yöntem 22
3.3. VHDL Tasarım Dili 23
3.3.1. VHDL Uygulama Alanı 23
3.3.2. VHDL ve Donanım Tasarımı Karşılaştırması 23
3.3.3. VHDL Veri Nesneleri 24
3.3.4. VHDL Yapısal Elemanları 24
3.3.4.1. Varlık Tanımlanması 25
3.3.4.2. Mimari Tanımlanması 25
3.3.4.3. Biçim Tanımlanması 25
3.3.4.4. Paket Yapısı 26
3.3.4.5. Kütüphane Yapısı 26
3.3.4.6. İşlem Tanımlanması 26
3.3.4.7. Alt Program Tanımlanması 27
3.3.5. VHDL Modülü Oluşturmak 27

Sayfa No

3.3.5.1. Hazırlanan Tasarımın RTL Şeması 29
3.4. Simülasyon İşlemleri 30
4. SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ 33
4.1. Fourier Dönüşümü (FD) 33
4.1.1. Hızlı Fourier Dönüşümü(HFD) 34
4.1.2. Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) 35
4.2. Dalgacık Dönüşümü (DD) 36
4.2.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) 37
4.2.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) 37
4.3. Hilbert Huang Dönüşümü (HHD) 39
4.3.1. İçsel Mod Fonksiyonları (İMF) 40
4.3.2. Ampirik Kip Ayrışımı Yöntemi (AKA) 40
4.3.3. Hilbert Dönüşümü 42
5. FPGA TABANLI GÜÇ KALİTESİ TANIMA SİSTEMLERİ 44
5.1. Tanıma Sistemlerinin Yapısı 44
5.1.1. Sinyal Giriş Kartı 45
5.1.2. FPGA Geliştirme Ortamı 46
5.1.3. Yazılım Ara Yüzü 47
5.2. Deney Düzeneği ve Güç Kalitesi Olaylarının Elde Edilmesi 49
5.2.1. Prototip Güç Sistemi Modeli 50
5.2.2. Güç Kalitesi Olaylarının Oluşturulması 50
5.3. FPGA Tabanlı Algoritmalar 52
5.3.1. Sinyal Giriş Modülü 52
5.3.2. Haberleşme Modülü 54
5.3.3. Sinyal İşleme Modülü 55
5.3.3.1. GKB Tespit Alt Modülü 56
5.3.3.2. Fourier Dönüşümü Alt Modülü 57
5.3.3.3. Dalgacık Dönüşümü Alt Modülü 59
5.3.3.4. Hilbert Huang Dönüşümü Alt Modülü 62
5.3.3.5. Özellik Vektörleri Bloğu 63
5.3.4. Çevrimiçi Tanıma Modülü 65
5.3.4.1. Karar Ağaçları 65
5.3.4.2. Karar Ağacı Tabanlı Çevrimiçi Tanıma Sistemi Yapısı 66
6. TANIMA SİSTEMLERİNİN UYGULAMALARI VE SONUÇLARI 68
6.1. Çevrimiçi Tanıma Sistemi Uygulaması 68
6.1.1. Çevrimiçi Tanıma Sisteminin Eğitim Aşaması 69
6.1.2. Çevrimiçi Tanıma Sisteminin Test Aşaması 70
6.2. Çevrimdışı Tanıma Sistemi Uygulamaları 74
6.2.1. En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri Tabanlı Tanıma Sistemi 75
6.2.1.1. En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri (LSSVM) 75
6.2.1.2. Uygulama Sonuçları 76

Sayfa No

6.2.2. Aşırı Öğrenme Makinesi Tabanlı Tanıma Sistemi 79
6.2.2.1. Aşırı Öğrenme Makinesi (ELM) 79
6.2.2.2. Uygulama Sonuçları 81
6.2.3. Yapay Sinir Ağları Tabanlı Tanıma Sistemi 83
6.2.3.1. Yapay Sinir Ağları (YSA) 83
6.2.3.2. Uygulama Sonuçları 85
6.3. Değerlendirmeler ve Karşılaştırmalar 87
7. SONUÇLAR 89
7.1. Sonuçların Değerlendirilmesi 91
8. ÖNERİLER 93
KAYNAKLAR 94
ÖZGEÇMİŞ 104

ÖZET

Bu tez çalışmasında, güç kalitesi problemlerinin belirlenmesine yönelik FPGA tabanlı akıllı güç kalitesi tanıma sistemleri gerçekleştirilmiştir. FPGA kullanılarak gerçekleştirilen akıllı tanıma sistemleri çevrimiçi bir yapıya sahip olup, güç kalitesi problemlerinin gerçek zamanlı olarak tespiti ve sınıflandırılmasına yöneliktir.

Tasarımlarda gerçekleştirilen, güç sistemleri üzerinde meydana gelen güç kalitesi olayları ve güç kalitesi bozulmaları eş zamanlı olarak belirlenmektedir. Gerçekleştirilen çevrimiçi tanıma sistemlerinde, bu yapıya uygun olan üç farklı akıllı tanıma yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar; Fourier dönüşümü, dalgacık dönüşümü ve Hilbert Huang dönüşümü yöntemlerini içeren sinyal işleme tekniklerinden oluşmaktadır. Bu yöntemlerde, sınıflandırma işlemleri için karar ağacı algoritması kullanılmıştır. Tanıma sistemlerinden elde edilen sonuçları ve güç sistemine ait gerilim bilgilerini görsel olarak izleyebilmek ve bu bilgileri kaydedebilmek için bilgisayar ortamında bir grafiksel ara yüz yazılımı oluşturulmuştur.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen diğer bir yaklaşım ise güç kalitesi olayları ve güç kalitesi bozulmaları için yapılan çevrimdışı tanıma sistemi uygulamalarıdır. Bu yaklaşımlarda, çevrimiçi tanıma sistemlerinden elde edilen özellik vektörleri kullanılarak akıllı tanıma uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Çevrimdışı uygulamalarda; en küçük kareler destek vektör makineleri, aşırı öğrenme makineleri ve yapay sinir ağları sınıflandırıcıları kullanılmıştır.

FPGA tabanlı çevrimiçi akıllı tanıma sistemlerini test etmek, doğruluk oranlarını belirlemek ve başarımlarını değerlendirmek için laboratuar ortamında prototip bir güç sistemi modeli oluşturulmuştur. Bu model üzerinden, geniş parametre aralıklarında farklı güç kalitesi olay türleri elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çevrimiçi ve çevrimdışı tanıma sistemlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde ve literatürle karşılaştırıldığında, donanımsal ve yazılımsal tasarımların oldukça etkili, hızlı ve yüksek bir başarım performansına sahip oldukları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güç Kalitesi Problemleri, FPGA, Sinyal İşleme, Akıllı Tanıma Sistemleri.

SUMMARY

FPGA-BASED INTELLIGIENT RECOGNITION SYSTEM THAT IDENTIFIES REAL TIME POWER QUALITY PROBLEMS

In this thesis, intelligient, embedded system-based power quality recognition systems have been developed to identify power quality problems. The intelligient recognition systems that are developed by using FPGA have an online structure and aim at identifying and classifying real-time power quality problems.

In the designs that are developed, the recognition systems, which simultaneously determine power quality events and power quality disturbances in power systems, have been created by using FPGA. Three different intelligient recognition approaches exist in the developed online recognition systems. These approaches are signal processing techniques that include Fourier transform, wavelet transform and Hilbert Huang transform. Decision tree algorithm has been used for classification in these three different that are suitable for online recognition. A graphical interface software is created in computer to monitor the results obtained from the recognition systems visually and save them.

The other approach realized in this thesis is the offline recognition applications that have been created for power quality events and power quality disturbances. In these approaches, intelligient recognition applications have been realized by using feature vectors obtained from online recognition systems. The least squares support vector machines, extreme learning machines and artificial neural networks classifiers have been used in offline applications.

A prototypical power system has been created in laboratory for the purpose of testing FPGA-based online intelligient recognition systems, determining accuracy rates and assessing their performances. Different power quality event types have been created within broad parameter intervals on this model.

When the results obtained from the online and offline recognition systems developed within the framework of this thesis are examined and compared with the literatüre, it can be seen that hardware and software designs have a very efficient, fast and high performance.

Key Words: Power Quality Problems, FPGA, Signal Processing, Smart Recognition Systems

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Hat enerjilenmesi GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri 11

Şekil 2.2. Transformatör enerjilenmesi GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri 12

Şekil 2.3. Kapasitör anahtarlanması GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri 13

Şekil 2.4. Motor kalkış GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri 13

Şekil 2.5. Yük anahtarlanması GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri.. 14

Şekil 2.6. GKB türlerinin temsili dalga şeklindeki değişimler 16

Şekil 3.1. İki boyutlu mantıksal hücre dizilerini barındıran temel FPGA yapısı 20

Şekil 3.2. Frekans bölücü çalışma şekli 27

Şekil 3.3. VHDL dosyası oluşturma ekranı 28

Şekil 3.4. VHDL modülü için port tanımlama ekranı..... 28

Şekil 3.5. Örnek bir VHDL tasarım projesi 29

Şekil 3.6. Hazırlanan tasarımın özeti 29

Şekil 3.7. RTL şematik gösterim ekranı 30

Şekil 3.8. RTL şematik ekranın kategorik gösterimi 30

Şekil 3.9. Xilinx ISE Simulator (ISim) aracının ekran görüntüsü..... 31

Şekil 3.10. Frekans bölme örneğinin simülasyon sonucu..... 32

Şekil 4.1. Yaygın olarak kullanılan bazı dalgacık fonksiyonları 36

Şekil 4.2. Ayrık dalgacık dönüşümünün tek seviyeli filtre algoritması..... 38

Şekil 4.3. Dört seviyeli dalgacık çözünürlük ağacı 39

Şekil 4.4. Tipik bir İMF değişimi..... 40

Şekil 5.1. Tanıma sistemi için tasarlanan sinyal giriş kartı..... 45

Şekil 5.2. Virtex5 FPGA kartının görünüşü..... 46

Şekil 5.3. Gerçek zamanlı güç kalitesi problemi tanıma sisteminin grafiksel ana form görüntüsü 47

Şekil 5.4. FD tabanlı tanıma sistemine ait alt form penceresi..... 48

Şekil 5.5. DD tabanlı tanıma sistemine ait alt form penceresi 48

Şekil 5.6. HHD tabanlı tanıma sistemine ait alt form penceresi 49

Şekil 5.7. Laboratuar ortamına kurulan deney düzeneği 50

Şekil 5.8. Prototip güç sistemi modelinin yapısı 51

Şekil 5.9. Sinyal giriş modülünün çalışma yapısına ait blok şeması 53

Şekil 5.10. FPGA ile bilgisayar haberleşme yapısını gösteren blok şema 54
Şekil 5.11. Sinyal işleme modülüne ait genel blok şeması 55
Şekil 5.12. GKB tespit alt modülünün genel blok şeması 56
Şekil 5.13. FD alt modülü genel blok şeması 57
Şekil 5.14. DD alt modülünün VHDL dilindeki kaba kod yapısı 60
Şekil 5.15. DD alt modülü genel blok şeması 61
Şekil 5.16. HHD alt modülü genel blok şeması 62
Şekil 5.17. DD alt modülünden elde edilen GKO özelliklerindeki değişimler 64
Şekil 5.18. Temel bir Karar Ağacının yapısı 65
Şekil 5.19. Çevrimiçi tanıma modülü genel blok şeması 66
Şekil 5.20. DD tabanlı Karar Ağacı GKO tanıma sisteminin VHDL dilindeki kaba kod yapısı. 67
Şekil 6.1. Üç fazlı arıza GKO için çevrimiçi tanıma sistemi grafiksel ana ara yüz görüntüsü 71
Şekil 6.2. Motor kalkış GKO için çevrimiçi tanıma sistemi grafiksel ana ara yüz görüntüsü 71
Şekil 6.3. Kapasitör anahtarlama GKO için FD tabanlı tanıma sisteminin grafiksel ara yüz görüntüsü 72
Şekil 6.4. Kapasitör anahtarlama GKO için DD tabanlı tanıma tanıma sisteminin grafiksel ara yüz görüntüsü 72
Şekil 6.5. Kapasitör anahtarlama GKO için HHD tabanlı tanıma tanıma sisteminin grafiksel ara yüz görüntüsü 73

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Güç sistemleri elektromanyetik olaylarının kategorileri ve özellikleri 15

Tablo 5.1. FD alt modülüne ait özellik çıkarımı bilgileri. 58

Tablo 5.2. Db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık katsayıları 59

Tablo 6.1. Çevrimiçi tanıma sisteminin eğitim aşamasına ait GKO verileri ve sayıları 69

Tablo 6.2. Çevrimiçi GKB verileri ve sayıları 69

Tablo 6.3. Çevrimiçi tanıma sistemini uygulamalarından GKO verileri için elde edilen tanıma sonuçları 73

Tablo 6.4. Çevrimiçi tanıma sistemini uygulamalarından GKB verileri için elde edilen tanıma sonuçları 74

Tablo 6.5. GKO verileri için FD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları 77

Tablo 6.6. GKO verileri için DD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları 77

Tablo 6.7. GKO verileri için HHD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları 78

Tablo 6.8. GKB verileri için FD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları 78

Tablo 6.9. GKB verileri için DD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları 78

Tablo 6.10. GKB verileri için HHD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları 79

Tablo 6.11. GKO verileri için FD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları 82

Tablo 6.12. GKO verileri için DD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları 82

Tablo 6.13. GKO verileri için HHD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları 82

Tablo 6.14. GKB verileri için FD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları 83

Tablo 6.15. GKB verileri için DD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları 83

Tablo 6.16. GKB verileri için HHD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları 83

Tablo 6.17. GKO verileri için FD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları 85

Tablo 6.18. GKO verileri için DD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları 85

Tablo 6.19. GKO verileri için HHD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları 86

Tablo 6.20. GKB verileri için FD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları 86

Tablo 6.21. GKB verileri için DD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları 86

Tablo 6.22. GKB verileri için HHD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları 86

Tablo 6.23. Doğru sınıflandırma sonuçlarına göre başarım karşılaştırması 88

KISALTMALAR LİSTESİ

GKB : Güç Kalitesi Bozulması
GKO : Güç Kalitesi Olayı
KZFD : Kısa-Zamanlı Fourier Dönüşümü
YSA : Yapay Sinir Ağları
ELM : Extra Learning Machines (Aşırı Öğrenme Makinası)
DSP : Digital Signal Processing (Dijital Sinyal İşleme)
FPGA : Field Programmable Gate Arrays (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)
LSSVM : Least Squares Support Vector Machines (En Küçük Kareler Destek Vektör Makinası)
LUT : Look Up Table (Taramalı Tablo)
G/Ç : Giriş/Çıkış
SoC : System on Chip (Chip Üzerinde Sistemi)
AFD : Ayrık Fourier Dönüşümü
HFD : Hızlı Fourier Dönüşümü
SDD : Sürekli Dalgacık Dönüşümü
ADD : Ayrık Dalgacık Dönüşümü
AKA : Ampirik Kip Ayrışımı
İMF : İçsel Mod Fonksiyonu
UDP/IP : User Datagram Protocol/Internet Protocol (Kullanıcı Datagram Protokolü/İnternet Protokolü)
VHDL : Very High Speed Hardware Description Languages (Çok Yüksek Hızlı Donanım Tanımlama Dili)
RBF : Radial Bases Function (Radial Tabanlı Fonksiyon)
ADC : Analog Dijital Dönüştürücü
HHD : Hilbert Huang Dönüşümü
DD : Dalgacık Dönüşümü
FD : Fourier Dönüşümü
SVM : Suppert Vector Machine (Destek Vektör Makinası)
SDD : Sürekli Dalgacık Dönüşümü
ADD : Ayrık Dalgacık Dönüşümü

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Güç sistemlerinin işletiminde, özellikle akım ve gerilim sinyallerinin standart değerlere sahip olması gerekmektedir. Son yıllarda teknoloji ve endüstri alanındaki hızlı gelişmeler, güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin kullanımını arttırmış, bunun sonucunda da akım ve gerilim sinyalleri istenilmeyen değişimlere sahip olmuştur. Günümüzde, hem hassas ve güvenli bir güç sistemi işletimine ihtiyaç duyulurken hem de bu yapıdan uzaklaşmaya neden olan doğrusal olmayan yüklerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Ayrıca güç sistemleri, işletim için gerekli anahtarlamalara ve arızalara maruz kalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde, güç kalitesi adı altında birçok araştırma ve uygulama çalışmaları yapılmaktadır.

Çok sayıda güç kaynakları, iletim hatları, transformatörler ve yükler içeren güç sistemlerinde arızalanmalara neden olan problemlerde sürekli artış olmaktadır. Bu nedenle, güç kalitesi, başlıca bir güç sistemi araştırma ve uygulama konusu olmuştur [1,2]. Güç sistemleri üzerindeki akım ve gerilim sinyallerinin istenilmeyen bir değişime sahip olması, sistem üzerinde bir güç kalitesi problemi olduğunu gösterir. Güç kalitesi problemleri nedeniyle, yüksek değerlerde mali kayıplar meydana gelebilir. Özellikle endüstrideki rafineri tesisleri, kâğıt fabrikaları ve çelik fabrikaları gibi birçok imalat tesisleri, zayıf güç kalitesinden oldukça fazla etkilenirler. Güç sistemlerinin davranışını en iyi biçimde anlamak ve güç kalitesini iyileştirmek için güç kalitesi problem verilerinin tespit edilmesi, saklanması ve analiz edilmesi oldukça önemli hale gelmiştir [2-4]. Ayrıca, güç kalitesi problemleri hızlı olarak tespit edilerek ortadan kaldırılmazsa, gerilim bozulmaları güç sistemine bağlı olan hassas yüklerin hatalı çalışmasına veya bozulmasına sebep olabilecektir.

Güç sistemlerinin işletilmesi ve sisteme bağlı tüketicilerin sahip olması gereken enerjinin kalitesi, güç kalitesi standartları altında belirlenen kriterlere uygun olması gerekir. Uluslararası alanda; IEEE, IEC, EPRI, CBEMA ve CENELEC gibi çalışma grupları tarafından güç kalitesi alanında ölçme yöntemleri, akım, gerilim ve frekans büyüklüklerinin karakteristikleri, bozulma türlerinin özellikleri ve sınıfları gibi kavramlar hakkında standartlar belirlenmiştir. Dünyada güç kalitesi çalışmalarında, özellikle IEEE, CENELEC ve IEC standartları daha çok kullanılmaktadır [5, 6]. Güç kalitesi konusunda geliştirilen en temel standartlar IEEE Std. 519-1992 [7] ve EN 50160 [8]'dir. Bu iki

standartta, güç kalitesine ait tanım ve ölçüm kriterleri hakkında önemli tanımlamalara yer verilmiştir. Ayrıca, IEC 61000-4-30 [9] standardı enerji kalitesi parametrelerinin toplanması ve karakterize edilmesi için IEC 61000-4-7 [10] standardı harmonik ile ara harmoniklerin ölçümündeki hassasiyeti belirlemek için IEEE Std. 1453-2004 [11] standardı ise kırpışma etkisi için geliştirilmiştir. Ülkemizde, CENELEC tarafından kabul edilen EN50160 standardı esas alınarak TSE tarafından hazırlanan ve 13 Aralık 2011 tarihinde yayınlanan TS EN50160 [12] standart uygulaması yürürlükte bulunmaktadır. Bu standart; alçak gerilim, orta gerilim ve yüksek gerilim besleme karakteristiklerini, gerilim olaylarını ve değişimlerini açıklamaktadır. Bu standardın amacı besleme gerilim karakteristiklerini; frekans, genlik, dalga biçimi ve hat gerilimlerinin simetrisi açısından tarif etmektir.

Güç kalitesi izleme sistemleri, güç sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Güç sisteminin belirli bölgelerine yerleştirilen güç kalitesi izleme sistemlerinin en önemli iki özelliği, güç kalitesi olaylarını belirlemesi ve analiz etmesidir [13]. Güç kalitesi izleme sistemleri kullanılarak, enerji tesislerinin işletilmesi ve korunması hakkında aşağıda belirtilen önemli bilgiler elde edilir:

- Sistemin güç kalitesi performansının belirlenmesi.
- Güç kalitesi bozulma türünün, kaynağının ve sebeplerinin belirlenmesi.
- Sistemin nominal yük ile çalışması için gerekli işletim şartlarının belirlenmesi.
- Güç sisteminin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için gerekli parametrelerin belirlenmesi.

Bu bilgiler kullanılarak yapılacak olan çözüm önerileri, sistemin sürekliliğini ve güvenilirliğini arttırmanın yanında sistemin kontrolünü de kolaylaştırır [14].

Günümüzde iletişim teknolojileri, veri depolama kapasitesi ve veri işleme gücündeki gelişmelere bağlı olarak geniş ölçekli izleme ve verileri sürekli bir şekilde kaydetme özelliğine sahip güç kalitesi izleme sistemleri tasarlanmaktadır. Güç kalitesi izleme sistemlerinin tasarımları ve ölçüm özellikleri, üç ayrı sınıf altında incelenebilir. Birinci sınıfta yer alan izleme sistemleri; gerilim, akım ve güç gibi elektriksel parametrelerin ölçümünün yanı sıra aşırı gerilim, düşük gerilim ve kesinti gibi parametrelerinde ölçümünü gerçekleştirmektedir. İkinci sınıftaki izleme sistemleri, güç kalitesi parametreleri ve olaylarının ölçümünün yanı sıra seri haberleşme ve görüntüleme özelliklerine sahiptirler. Son sınıftaki izleme sistemleri ise yüksek hızda iletişim, istatistiksel analiz, web tabanlı haberleşme ve görüntüleme özelliklerini içermektedir [15].

Güç Kalitesi Bozulması (GKB), güç sistemine ait akım ve gerilim değerlerinin standartlar ile belirlenmiş eşik değerleri dışına çıkması olarak tanımlanır. Güç Kalitesi Olayı (GKO) ise GKB'nin meydana gelmesine neden olan bir durum olarak ifade edilir. Güç sistemlerinde meydana gelen GKO'lar, normal ve anormal olaylar olarak iki kısımda incelenir. Normal GKO'lar, güç sisteminin işletimi için gerekli olan anahtarlamaya bağlı olaylardır. Transformatör enerjilenmesi, kapasitör anahtarlanması, yük anahtarlanması gibi olaylar bu sınıfa girmektedir. Anormal GKO'lar ise, güç sisteminde meydana gelen arıza gibi istenilmeyen durumlar sonucunda oluşan olaylar olarak tanımlanabilir [14]. Bu sınıfta, güç sisteminde meydana gelen bir GKO sonrasında güç sistemine ait fazların birinde, ikisinde veya tamamında bir GKB oluşabilir. Aynı anda sisteme ait iki veya üç fazda meydana gelen GKB'ler, aynı türden olabileceği gibi birbirinden farklı da olabilirler.

Güç kalitesi parametrelerinin ölçümünde kullanılan birçok güç kalitesi analizörü; akım ve gerilim RMS değerlerini, güç değerlerini, güç faktörünü, frekansı, 2 ile 51 arası harmonik değerlerini ve toplam harmonik bozulma değerlerini ölçer ve analizör hafızasına kaydeder [16-19]. Bu geleneksel analizörler üzerinde güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılmasına ilişkin karmaşık algoritmaların uygulanması, hem zaman alıcıdır hem de zordur. Bu nedenle, gömülü sistem kullanmanın yerine bilgisayar ortamında sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir [20-22]. Ancak günümüzde, ilgili güç kalitesi standartlarında güç kalitesi izleme sistemlerinin uzaktan erişimli ve çevrimiçi tanıma yapısına sahip olması istenmektedir. Bunun yanı sıra, yeni nesil güç kalitesi izleme sistemlerinden beklenen özellikler, sinyal işleme ve akıllı tanıma yapısına sahip olmalarıdır. Bu nedenlerden dolayı, gömülü sistem tabanlı güç kalitesi izleme sistemlerin önemi ve bu alanda uygulama çalışmalarına yönelimler artmıştır.

1.2. Literatür Taraması

1990'lı yılların başından itibaren, güç kalitesi alanında tanıma sistemleri için gerçekleştirilen yaklaşımlar, sinyal işleme yöntemleriyle mühendislik bilgilerinin birleşimi şeklindedir [16]. 2000'li yılların başından itibaren ise bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak, yeni sinyal işleme yöntemleri ile akıllı sistemlerin birlikte kullanıldığı akıllı tanıma sistemleri bu alanda ön plana çıkmıştır [23-24]. Bu akıllı tanıma sistemlerinin bir çoğu, bilgisayar ortamında çevrimdışı olarak gerçekleştirilmiştir. 2010'lu yılların başından itibaren ise özellikle güç kalitesi izleme sistemlerinin, gömülü sistem

yaklaşımlarıyla gerçekleştirilmesi ve uzaktan erişilebilir olması üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır [25]. Bu tez çalışmasının kapsamı, bu alandaki yönelimlere paralel olarak özellikle güç kalitesi problemlerinin gömülü sistem tabanlı çevrimiçi yaklaşımlarla tespiti ve sınıflandırmasını içermektedir. Bu çalışmada, hem GKO tanıma sistemi hem de GKB tanıma sistemlerine ait uygulamalar bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan literatür araştırmaları, iki genel başlık altında incelenebilir. Birincisi, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen güç kalitesi problemlerinin sinyal işleme ve akıllı sistem tabanlı tespiti ve sınıflandırma çalışmalarıdır. İkincisi ise güç kalitesi problemlerinin tespiti ve sınıflandırılmasında, gömülü sistem yaklaşımlarının kullanılmasıdır.

Her bir güç kalitesi problemine ait özellikler, kendine özgü ayırdedici bilgiler içermektedir. Tanıma sistemlerinde, önce sinyal işleme yöntemleri kullanılarak ayırdedici bilgiler elde edilir. Sonra, güç kalitesine ait problem türü akıllı tanıma yaklaşımlarıyla belirlenir [26]. Özellik çıkarımına ait yapılan çalışmalarda Fourier Dönüşümü (FD) yöntemleri, Dalgacık Dönüşümü (DD), Clarke dönüşümü, Hilbert Huang Dönüşümü (HHD), S-dönüşümü gibi yöntemler sıklıkla kullanılmıştır.

Kısa-Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD), özellikle durağan ve periyodik sinyallerin frekans bölgesindeki uygulamalarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda KZFD durağan olmayan sinyallere de uygulanabilmektedir. Ancak bu durumda, zamanın belirli bir periyoduna odaklanmasında sabit bir pencere aralığına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle KZFD kullanarak durağan olmayan sinyallerin analizi oldukça zordur [27, 28, 29]. [30]'da, sinyalden spektral bilgiyi çıkarmak için KZFD ve diğer yöntemler kullanılmıştır. [31]'de, güç kalitesi problemlerinin özelliklerinin çıkarılmasında FD ve DD yöntemleri kullanılmıştır. [32]'de, sinyalin harmonik analizi için hibrit Dalgacık-Fourier algoritması sunulmuştur. Bu yaklaşım, harmonikleri ve geçici durum analizlerini birlikte gerçekleştiren bir yapıya sahiptir. [27]'de, gerilim bozulmalarına ait zaman-frekans ve zaman-genlik analizlerinin içeren çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda bu çalışmada, DD'nin KZFD'den daha etkili bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir.

DD, birçok araştırmacı tarafından GKB ve GKO verilerini içeren güç kalitesi problemlerinin analizi ve sınıflandırılmasında etkili bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. [33]'te, yinelenebilir bir algoritma kullanılarak gerilim çökmesi ve geçici durumların tespiti ve analizinde DD'nin performansı incelenmiştir. [34]'de, sadece gerilim çökmelerinin tespiti için DD önerilmiştir. [35]'te, özellikle durağan ve periyodik olmayan sinyallerin analizinde oldukça etkili bir yaklaşım olan DD'nin zaman bölgesinde sinyal

değişimlerini tespit etmesi ve eş zamanlı olarak frekans bölgesinde sinyali farklı frekans bantlarına ayırması sunulmuştur. [36]'da, geçici durum sinyallerinin sınıflandırılması için sayısal işaret işleme mimarisi temelli bir dalgacık ağı önerilmiştir. [37] ve [38]'de, 2 boyutlu DD yaklaşımı kullanılarak geçici durum olaylarının tespiti ve analizi için bir yaklaşım sunulmuştur. [39]'da, DD kullanılarak elde edilen özelliklere, özellik seçimi yaklaşımları da uygulanarak güç kalitesi problemlerine ait ayırdedici bilgilerin veri boyutu indirgenmiştir.

DD ve KZFD'nin kombinasyonundan oluşan diğer bir zaman-frekans analiz yöntemi de S-Dönüşümü'dür [40]. S-Dönüşümün'de, spektrum fazı içerisinde bilgiler barındırıldığı gibi, aynı zamanda genlik içerisinde de çeşitli bilgiler yer almaktadır. DD fazındaki bilgileri kullanışlı hale getirmek için ana dalgacık fazının düzenlenmesi gerekir. Bu nedenle, S-Dönüşümü DD'nin faz düzeltmesi olarak tanımlanabilir [41]. [42]'de, GKO'ların sınıflandırılması için S-Dönüşümü tabanlı bir yaklaşım verilmiştir. [43]'te, ayrık ortagonal S-Dönüşümü kullanarak güç kalitesi analizi gerçekleştirilmiştir. [44]'de, GKB'lerin sınıflandırılmasında çok çözünürlüklü S-Dönüşümü yöntemi kullanılmıştır.

HHD, Ampirik Kip Ayrışımı (AKA) ve Hilbert Dönüşümünün birleşiminden oluşan yeni bir sinyal işleme algoritmasıdır. AKA işleminde, İçsel Mod Fonksiyonları (İMF) kullanılarak tek frekans içeriğine sahip sinyal bileşenleri elde edilir. Böylece, durağan ve periyodik olmayan sinyallere ait frekans bileşenleri, düşük frekans bandından yüksek frekans bandına doğru sıralanır [45, 46]. [47] ve [48]'de yapılan çalışmalarda GKB'lerin sınıflandırılması için HHD kullanılmıştır. [49]'da, HHD yöntemi kullanılarak çoklu GKB türü içeren güç kalitesi sinyalleri tespit edilmiştir.

Güç kalitesi problemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan DD yöntemine benzer olarak, literatürde çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler genel olarak; Zaman-Zaman Dönüşümü [50], Yüksek dereceli istatistik dönüşümü [51, 52], Hiperbolik S-Dönüşümü [53], Kalman Filtreleme [54-56], Temel bileşen analizi [57], Adaline yöntemi [58], Clark dönüşümü [59], Fraktal tabanlı yöntemler [60], Gabor-Wigner Dönüşümü [61], Hibrit yumuşak hesaplama tekniği [62], sayısal filtreler [63] ve kısa zamanlı korelasyon dönüşümü [64] şeklindedir. Bu dönüşüm yöntemleri ile elde edilen dönüşüm katsayılarına özellik çıkarım yaklaşımları uygulanarak, güç kalitesi verilerine ait ayırt edici özellikler elde edilmektedir.

Sinyal işleme yöntemleriyle güç kalitesi verilerinden elde edilen özelliklerin bir yapay zeka yöntemine uygulanmasıyla, akıllı bir güç kalitesi tanıma sistemi elde edilir. Akıllı güç

kalitesi tanıma sistemlerinden elde edilen tanıma başarımları, sınıflandırıcı girişini oluşturan özelliklerin ayırdedici bilgiler içermesinin yanı sıra sınıflandırıcının performansına da bağlıdır. Sınıflandırıcı performansını belirleyen başlıca etken, optimal sınıflandırma parametrelerinin seçimidir. Güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılmasında literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler genel olarak; Yapay Sinir Ağları (YSA) [65], Destek Vektör Makineleri (DVM) [66], Bulanık Mantık [67], Genetik Algoritma [68], Karar Ağaçları [69] ve Aşırı Öğrenme Makinesi (Extra Learning Machines, ELM) [42] gibi yaklaşımları içermektedir.

Son yıllarda, teknolojik gelişmeler doğrultusunda güç kalitesi problemlerinin tespiti ve sınıflandırılmasında gömülü sistem uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar oldukça önem kazanmıştır [25, 70-76]. Gömülü sistem yaklaşımlarının kullanılması, güç kalitesi izleme sistemlerinde maliyet ve performans açısından birçok avantaj sağlamıştır. Özellikle, güç kalitesi ölçümlerinden elde edilen yüksek veri boyutları ve veri karmaşıklığı problemlerinin çözümünde, gömülü sistemler etkili bir yaklaşım olmuştur. Donanım açısından, sinyal işleme yöntemlerine yönelik birçok gömülü sistem platformu bulunmaktadır. Bu platformlar, güç kalitesi verilerinin paralel bir şekilde işlenmesine ve gerçek zamanlı olarak sınıflandırılmasına imkan sağlamaktadır. Ancak, çevre birimler ile uyumlu çalışması ve programlama süreçlerindeki zorluklar, bu sistemlerin güç kalitesi alanında kullanımını sınırlandırmıştır. Bu zorluklar nedeniyle gömülü sistemleri kullanmak yerine, veri toplama kartı ve bilgisayar tabanlı güç kalitesi tanıma sistemi uygulamaları bulunmaktadır [70-72]. Sayısal Sinyal İşlemcisi (Digital Signal Processing, DSP) ve Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Arrays, FPGA) tabanlı gömülü sistem yaklaşımları güç kalitesi verilerinin işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. [73]'te, güç sistemlerinde geçici durumların tespitine yönelik DSP tabanlı bir yaklaşım verilmiştir. Bu yaklaşımda, analizi gerçekleştirilen sinyaller zaman bölgesinde değerlendirilmektedir. Böylece, aşırı hesaplama gerektiren işlemler minimize edilmiştir. [74]'te, endüstriyel uygulamalarda güç sistemlerindeki harmoniklerin tahmini için FPGA tabanlı bir uygulama yapılmıştır. [25]'de, FPGA ve DSP tabanlı DD kullanılarak gerilim çökme tespiti için bir sistem önerilmiştir. Bu sistemde, gerilim çökmelerinin tespitinde Dalgacık katsayılarının enerjileri kullanılmıştır. [75]'de, DSP-FPGA tabanlı donanım platformu, GKB verilerinin sınıflandırılması için bir Karar Ağacı yaklaşımında kullanılmıştır. [76]'da, GKB'lerin SVM kullanılarak çevrimiçi sınıflandırılmasında FPGA tabanlı bir güç kalitesi izleme sistemi önerilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve Organizasyonu

Bu tez çalışmasının hareket noktası, günümüzde birçok mühendislik uygulamalarının gömülü sistem yaklaşımlarına yönelmesinden gelmektedir. Ayrıca, son yıllarda güç sistemleri alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde güç kalitesi ve örüntü tanıma alanındaki çalışmalara odaklanıldığı görülmektedir. Bu durumlar, bu tez çalışmasının içeriğinin güncel araştırma konuları ile ilgili olduğunu göstermektedir.

Gömülü sistem tabanlı örüntü tanıma yaklaşımının, güç kalitesi alanına uygulanması konusunu içeren bu tez çalışmasında, literatürde aynı alandaki çalışmalara göre farklı ve yeni yaklaşımlar sunulmuştur. Bu tez çalışmasında, günümüzde güç sistemlerinde önemli problemler oluşturan GKO'ları ve bu GKO'ların sistemin her bir fazında meydana getirdiği GKB'leri anlık olarak tespit eden ve türünü belirleyen FPGA tabanlı çevrimiçi tanıma sistemlerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bilgisayardan bağımsız olarak FPGA ortamında, eş zamanlı çalışma yapısına sahip üç farklı çevrimiçi tanıma sistemi tasarlanmıştır. Bu tanıma sistemlerini birbirinden ayıran özellikleri ise sinyal işleme ve özellik çıkarım işlemlerinin her bir tanıma sisteminde farklı olmasıdır. FPGA ortamında gerçekleştirilen üç farklı tanıma sistemi; FD, DD ve HHD tabanlı sinyal işleme algoritmalarını içermektedir. Çevrimiçi tanıma sistemlerinin sınıflandırma aşamasında ise Karar Ağacı algoritması kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, bilgisayar ortamında GKO ve GKB türlerini belirlemeye yönelik çevrimdışı tanıma sistemleri de gerçekleştirilmiştir. Böylece, çevrimdışı tanıma sistemleri ile elde edilen sonuçlara göre FPGA ortamında gerçekleştirilen işlemlerin doğruluğu ve güvenirliği hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Çevrimdışı tanıma sistemi uygulamalarında ise FPGA ortamından elde edilen üç farklı sinyal işleme yöntemine ait özellik vektörleri ve En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri (Least Squares Support Vector Machines, LSSVM), ELM ve YSA sınıflandırma sistemleri kullanılarak tanıma sonuçları elde edilmiştir.

Tasarımları yapılan tanıma sistemlerinin uygulaması için giriş kartı, FPGA, bilgisayar ve deneysel düzenek alt sistemlerinden meydana gelen donanımsal bir yapı oluşturulmuştur. Tanıma sistemleri için gerçekleştirilen yazılımsal yapı ise FPGA ortamında Çok Hızlı Donanım Tanımlama Dili (Very High Speed Hardware Description Languages, VHDL) yazılımlarını ve bilgisayar ortamında grafiksel arayüz yazılımlarını içermektedir. Gerçekleştirilen prototip güç sistemi modeli üzerinden gerçek zamanlı olarak

tanıma sistemlerinin testleri yapılmış ve çevrimdışı akıllı tanıma sistemleri için veriler elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde; güç kalitesi ile ilgili temel bilgilerin yanı sıra, güç sistemlerinde meydana gelen GKO ve GKB türleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde; çevrimiçi akıllı tanıma sistemlerinin gömülü uygulamasında kullanılan FPGA cihazı ve bu cihazın programlanması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca, programlanabilir devre elemanlarının programlamasında kullanılan VHDL donanım tanımlama dili ile ilgili detaylı bilgiler de, bu bölüm içerisinde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; FPGA ortamında tasarımları gerçekleştirilen sinyal işleme yöntemlerine ait kapsamlı bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde; güç kalitesi problemlerinin tespiti ve sınıflandırılması için gerçekleştirilen çevrimiçi ve çevrimdışı yöntemlere yer verilmiştir. Bu yöntemlerin uygulamasında kullanılan donanımsal ve yazılımsal tasarımlar hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, gerçekleştirilen tanıma sistemlerinin laboratuvar ortamında kurulan prototip güç sistemi modeli hakkında bilgiler verilmiştir.

Altıncı bölümde; tez kapsamında gerçekleştirilen çevrimiçi ve çevrimdışı tanıma sistemlerinden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca, tanıma sistemlerinde kullanılan sınıflandırma yöntemlerinden bahsedilmiştir. Sınıflandırmadan elde edilen sonuçların birbirlerine göre ve benzer çalışmalara göre, performans değerlendirmesine de bu bölüm içerisinde yer verilmiştir

Yedinci bölümde, tezin sonuçları irdelenmiş ve orijinal katkıları vurgulanmıştır.

Sekizinci bölümde, ileriye dönük uygulama alanları ve öneriler verilmiştir.

2. GÜÇ KALİTESİ VE PROBLEMLERİ

Elektrik enerji sistemlerinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi de, güç kalitesizliğidir. Son yıllarda teknoloji alanında ilerlemeler ve özellikle yarı iletken tabanlı sistemlerin kullanımlarının artması ile birlikte, güç kalitesi problemleri oldukça sık karşılaşılan ve pek çok sektörde önemli işletme sorunlarına yol açabilen bir konu haline gelmiştir. Tüketilen elektrik enerjisinde, makine ve cihazlarda hatalı çalışma, aksaklık, bozulma gibi istenmeyen sonuçlara sebep olabilen güç kalitesizliği, güç sistem mühendislerinin araştırma ve çözüm süreçleri olarak karşılarına çıkmaktadır. Bu bölümde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen FPGA tabanlı tanıma sistemlerinin girişini oluşturan, güç kalitesi problemlerine ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

2.1. Güç Kalitesi Tanımı

Teknik olarak güç kalitesi tanımı 2006 yılında yayımlanan "Elektrik Piyasasında Dağıtım Sistemine Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik"te, dağıtım sistemi kullanıcılarının elektrik enerjisi talebini; gerilimin frekansı, genliği, dalga şekli ve üç faz simetrisi açısından kabul edilebilir değişim sınırları içerisinde kesintisiz ve kaliteli bir şekilde karşılayabilme kapasitesi olarak tanımlanmıştır [79]. Bu yönetmelik, dağıtım şebekesine bağlı tüketiciler ile dağıtım şirketi arasındaki her türlü teknik ve ticari kalitesizliği düzenlemek için çıkarılmıştır. Teknik anlamda EN 50160 ve IEC 61000-4-30 standartlarını esas alan ve tüm dünyada büyük oranda kabul edilen güç kalitesi kavramları, ülkemizde de bu şekilde uygulanmaktadır. Uluslararası standartlarda ise güç kalitesi genel bir kabul içerisinde, tüketiciye aktarılan elektrik enerjisinin gerilim karakteristikleri (genlik, frekans, simetri ve dalga şekli) standartlarda belirtilen sınırlar içinde kalması olarak algılanmıştır [80]. Ayrıca güç kalitesi kavramının, sadece gerilime değil akıma da ait bir konu olduğunu da söylemek mümkündür [81, 82].

2.2. Güç Kalitesi Problemleri

Elektrik enerji sistemlerinde, gerilim karakteristiğinin standart sınır değerlerinde meydana gelen sapması sistemde bir güç kalitesi problemi oluştuğunu göstermektedir. Bu güç kalitesi problemlerini oluşturan durum, GKO olarak tanımlanır. GKO'lar, elektrik

enerji sistemlerinde meydana gelen arızalar veya anahtarlama işlemleri sonucunda oluşur. Bir GKO sonrasında; enerji sisteminin bir fazında, aynı anda iki fazında veya üç fazında bir GKB türü meydana gelebilir.

2.2.1. Güç Kalitesi Olayları (GKO)

Arıza ve anahtarlama olayları olmak üzere iki temel sınıfta incelenen GKO'lar, güç sistemi üzerinde geçici veya sürekli durum GKB'leri meydana getirebilirler. Arıza sonucu oluşan GKO'lar sonrasında genellikle kesici elemanları devreye girer ve GKO'nun oluştuğu bölümü sistemden yalıtırlar. Böylece güç sistemi, meydana gelen GKB'ler ortadan kaldırılarak normal çalışma şartlarında işletilir. Bir arıza türü GKO sonrasında arızalı fazlarda, gerilim çökmesi veya kesinti tipi güç kalitesi bozulmaları meydana gelebilir. Arızasız fazlarda ise, gerilim sıçraması oluşabilir. Anahtarlama olayları, güç sistemlerinin işletim şartlarına bağlı olarak çok sık meydana gelen GKO türleridir. Anahtarlama türü GKO'lar sonucunda sistemde; gerilim çökmesi, geçici durum ve harmonik gibi bozulmalar meydana gelebilir.

2.2.1.1. Arıza Türü Güç Kalitesi Olayları

Elektrik güç sistemlerinde, fiziksel veya mekaniksel etkiler sonucunda oluşan kısa ve açık devreler arıza olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemlerinde en sık meydana gelen arıza türü, kısa devre arızalarıdır. Bu nedenle, güç sistemlerinde kullanılan arıza terimi, genel olarak kısa devre arızaları için kullanılır. Kısa devre arızaları, iç ve dış etkenlerle oluşabilir. Kısa devreye neden olan başlıca iç etkenler; aşırı yük akımları ile yalıtkan malzemelerin ısınarak bozulması, aşırı gerilimler ile yalıtkan malzemede meydana gelen delinme, atlama olayları ve yalıtkan malzemenin özelliğinin bozulmasıdır. Kısa devreye neden olan başlıca dış etken ise güç sistemine yıldırım düşmesidir.

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızaları, simetrik ve asimetrik arızalar olmak üzere iki grupta incelenir. Her üç fazın birbiriyle ya da toprakla temas etmesi nedeniyle oluşan arızalarda, fazlar arasında 120 derecelik faz farkı korunduğu için bu tip arızalar simetrik arızalar grubuna dahil edilir. Üç faz arıza ve üç faz-toprak arıza simetrik arıza türleridir. Tek fazın toprak ile temas etmesiyle oluşan tek faz-toprak arızası, iki fazın birbiriyle ya da toprak ile temas etmesi sonucu oluşan iki faz arızası ve iki faz-toprak arızası asimetrik arızalar grubuna girerler.

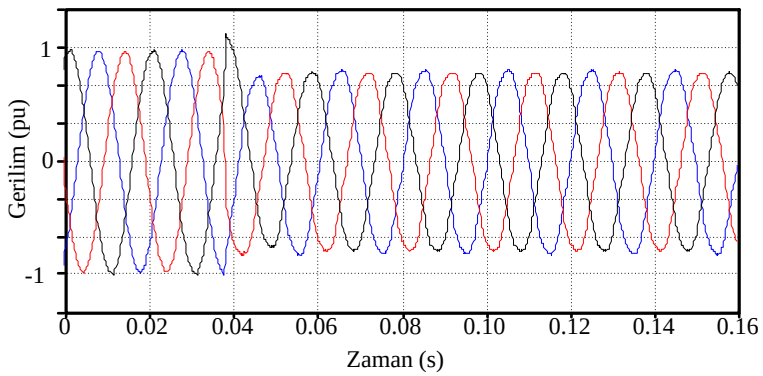
Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen GKO tanıma sistemlerinde, iki farklı arıza türü için uygulamalar gerçekleştirilmiş ve tanıma sonuçları elde edilmiştir. Bu GKO türleri, simetrik bir arıza olan üç faz arıza ve asimetrik bir arıza olan tek faz-toprak arızalardır.

2.2.1.2. Anahtarlama Türü Güç Kalitesi Olayları

Güç sistemleri normal işletim süreçleri içerisinde, sürekli olarak anahtarlama türü GKO'lara maruz kalırlar. Bu anahtarlama türleri, güç sistemi üzerinde oluşabileceği gibi hat sonundaki tüketicilerden de kaynaklanabilmektedir. Güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan anahtarlama türü GKO'lar şunlardır: Hat enerjilenmesi, transformatör enerjilenmesi, kapasitör anahtarlaması, motor kalkış olayları, yük anahtarlaması gibi.

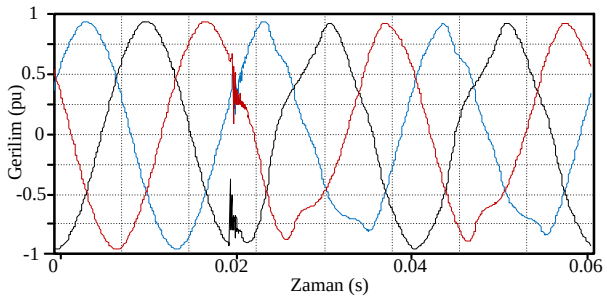
Bu tez çalışmasında tasarımları yapılan GKO tanıma sistemleri için kapasitör anahtarlama, motor kalkış ve hat enerjilenmesi GKO'lara ait uygulamalar gerçekleştirilmiş ve tanıma sonuçları elde edilmiştir.

Hat enerjilenmesi GKO, bir kesinti olayı sonrasında enerjisiz kalan hattın kesici kontaklarının kapanması ile nominal çalışma değerlerine gelmesi sürecinde meydana gelen bir GKO türüdür. Hat enerjilenmesi GKO'sunda meydana gelen GKB türleri, ölçüm sisteminin kesici öncesi ve kesici sonrasında bulunduğu durumuna göre ayrı ayrı incelenir. Eğer ölçüm sistemi kesici sonrasında bulunuyorsa, sistem gerilimi yaklaşık olarak 0 pu değerinden 0.8 pu değerine anlık olarak yükselir. Ölçüm sistemi kesici öncesinde bulunuyorsa, sistem gerilimi 1 pu değeri ile 0.8 pu değeri aralığında bir değere sahip olabilir. Bu GKO sonrasında, sistemde özellikle anahtarlama olayına bağlı olarak geçici durumlar ve harmonik bozulmalar meydana gelmektedir. Şekil 2.1'de, ölçüm sistemi kesici öncesinde bulunan hat enerjilenmesi GKO'suna ait değişimler verilmiştir.



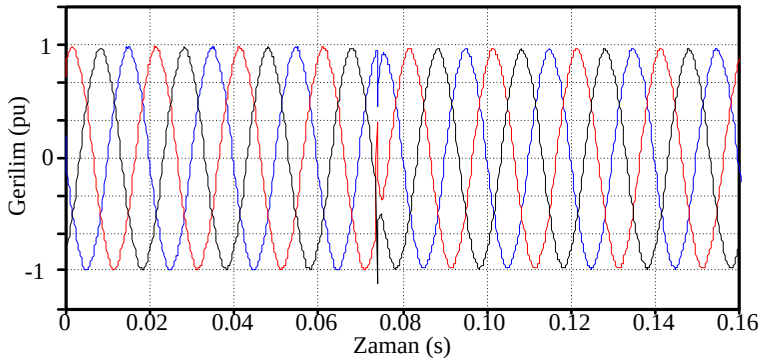
Şekil 2.1. Hat enerjilenmesi GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri.

Transformatör enerjilenmesi GKO, sistemde gerilim çökmesi meydana getiren bir GKO türüdür. Transformatörün akı-akım karakteristiğine bağlı olarak transformatörün enerjilenmesi esnasında, nüvedeki manyetik akı yeni bir sürekli duruma ulaşana kadar geçici durum meydana getirir. Bu durum, manyetik akının doyum değerinin üzerine çıkmasına neden olabilir. Bu geçici durum, bir periyotluk manyetik akıdaki değişim değerinin yaklaşık olarak sıfıra düşmesi anına kadar devam eder. Akının aşırı artması; yüksek değerlikli, asimetrik ve exponansiyel olarak azalan bir mıknatıslanma akımının oluşmasına sebep olacaktır. Transformatörün enerjilenmesi sonucunda meydana gelen gerilim çökmesinin genliği; anahtarlama açısına, kaynağın gücüne, nüvedeki artık akı değerine ve hattın sönümlenme değerine bağlıdır [83]. Şekil 2.2'de, bir transformatör enerjilenmesi GKO sonrasında, faz gerilimlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.



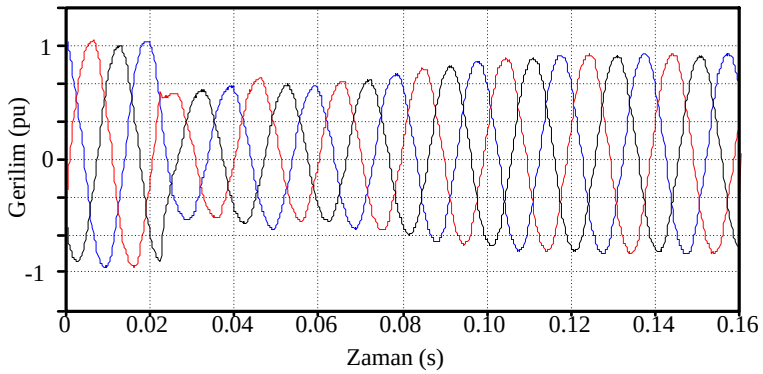
Şekil 2.2. Transformatör enerjilenmesi GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri.

Kapasitör anahtarlanması GKO, güç sistemlerinde geçici durum GKB meydana getiren, sistem gerilimini yaklaşık 2 katına kadar arttırabilen ve sistem frekansını etkileyen bir GKO türüdür. Bu nedenle, hem güç sistemi elemanlarında hem de güç sistemine bağlı yüklerde arızalar meydana gelebilmektedir. Yüksüz durumda olan bir kapasitör, anahtarlandığı anda anlık olarak geriliminin değişememesi nedeniyle sistem gerilimini sıfıra doğru düşürmeye çalışacaktır. Bu anlık gerilim düşümü sonrasında gerilim, sürekli duruma ulaşana kadar aşırı yükselme ve azalma şeklinde salınımlar yapacaktır. Bu salınımın süresi, hattın baskılanmasına bağlıdır [84]. Şekil 2.3'de, bir kapasitör anahtarlanması olayına ilişkin değişimler görülmektedir.



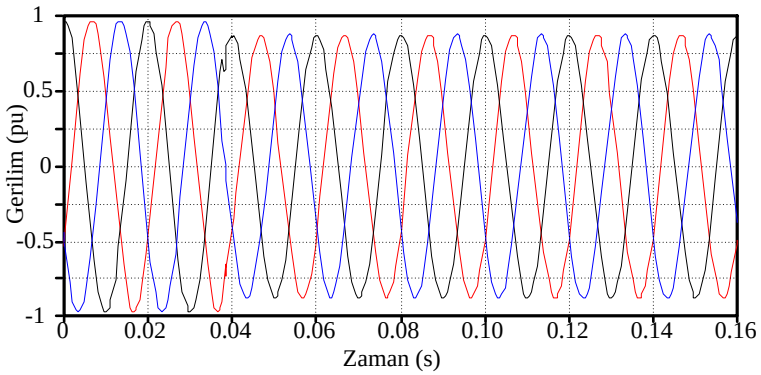
Şekil 2.3. Kapasitör anahtarlanması GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri.

Motor kalkış GKO, büyük güçlü indüksiyon motorların yol alması esnasında normal çalışmasına göre beş-altı kat daha fazla akım çekmesi nedeniyle sistem üzerinde gerilim çökmesi meydana getiren bir GKO türüdür. Meydana gelen gerilim çökmesi, indüksiyon motorun normal hız değerine ulaştığı ana kadar devam etmektedir. Çökmenin değişim karakteristiği ise yük durumu, motor parametreleri ve sistem parametrelerine bağlıdır [84]. Şekil 2.4'de, bir motor kalkış GKO sonrasında faz gerilimlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.



Şekil 2.4. Motor kalkış GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri.

Yük anahtarlanması GKO, güç sistemine bağlı olan büyük güçlü bir alıcı yükün anahtarlanması sonucunda sistem geriliminde çökme meydana getirebilen bir GKO türüdür. Anahtarlaması yapılan büyük güçlü yükler, sistem gerilimini düşürmenin yanı sıra geçici durum bozulmaları da meydana getirebilmektedir. Şekil 2.5'de, bir yük anahtarlaması GKO'suna ilişkin değişimler görülmektedir.



Şekil 2.5. Yük anahtarlanması GKO'sunda 3 fazlı gerilimin dalga şekli değişimleri.

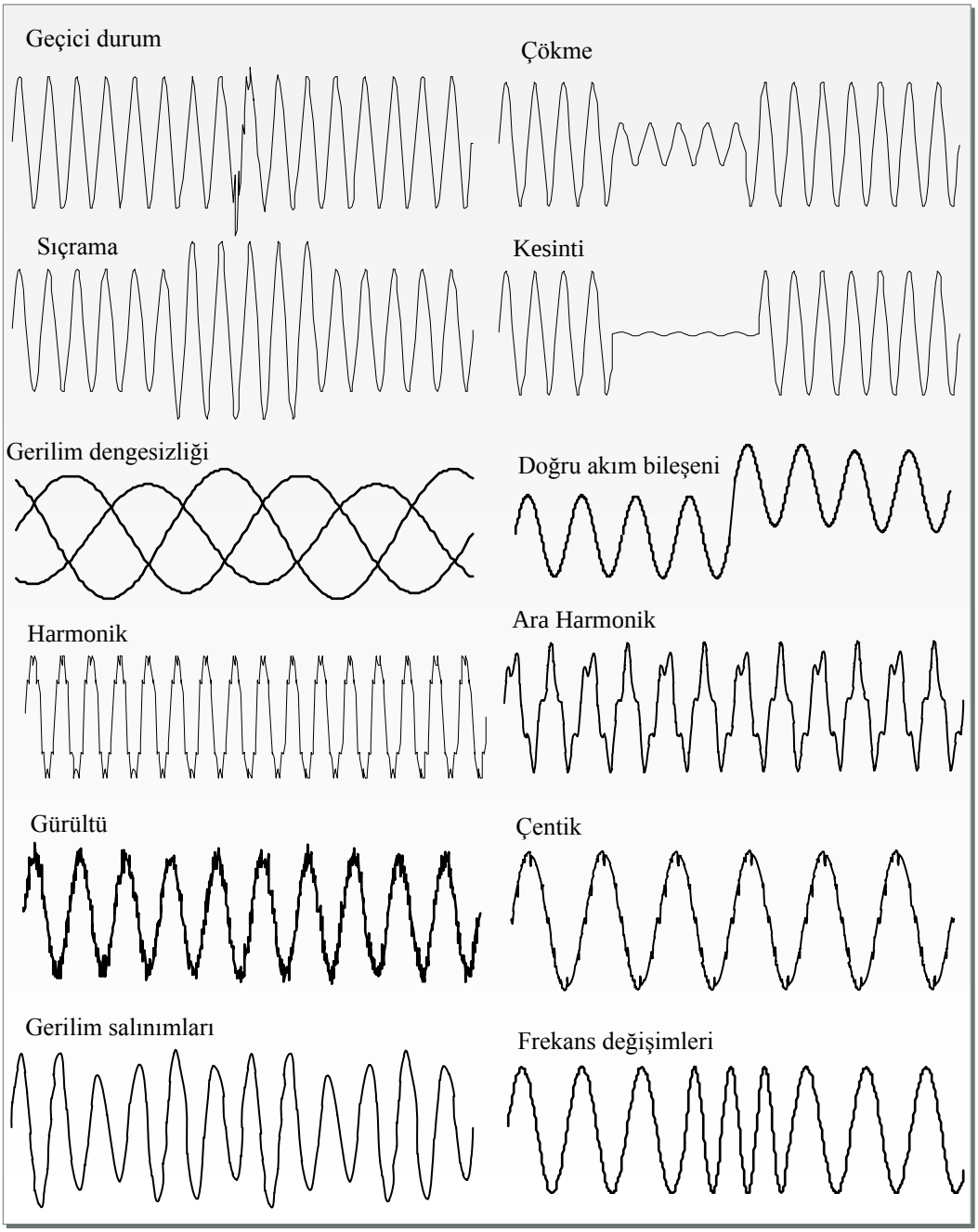
2.2.2. Güç Kalitesi Bozulmaları

Güç sistemlerinde meydana gelen GKO'lar, güç sisteminin her bir fazında GKB oluştururlar. IEEE, IEC, ANSI, CBEMA, EPRI gibi farklı çalışma grupları, sistem üzerinde meydana gelen her bir GKB'yi tanımlayan farklı standartlar oluşturmuşlardır. Fakat, dünyada güç kalitesi çalışmalarında genellikle IEEE ve IEC standartları tercih edilmektedir [5, 85]. Bu tez çalışmasında, güç kalitesi bozulmalarının temel özelliklerini anlamak ve tanımlamak için IEEE standartları referans alınmıştır [86]. IEEE 1159-1995 standartlarına göre güç kalitesi problemleri; geçici durumlar, kısa süreli gerilim değişimleri, uzun süreli gerilim değişimleri, gerilim dengesizlikleri, dalga şekli bozulmaları, gerilim salınımları ve frekans değişimleri olmak üzere yedi kategoriye ayrılır. Tablo 2.1'de, farklı kategorideki güç kalitesi problemleri için uygun tipik spektral içerik, devamlılık süresi ve genlik değerlerini içeren bilgiler görülmektedir. Bu tabloda verilen açıklamalar, ölçüm sonuçlarının sınıflandırılması ve güç kalitesi problemlerine neden olabilen GKO'nun tanımlanmasında oldukça önemlidir.

Tablo 2.1. Güç sistemleri elektromanyetik olaylarının kategorileri ve özellikleri.

Problem Sınıfı	Frekans Spektrumu	Süresi	Gerilimin Genliği
1. Geçici Durum			
1.1 Darbeli			
1.1.1 Nanosaniye	5-ns yükselme	<50 ns	
1.1.2 Mikrosaniye	1-µs yükselme	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milisaniye	0.1-ms yükselme	>1 ms	
1.2 Salınımlı			
1.2.1 Düşük frekans	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Orta frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
1.2.3 Yüksek frekans	0.5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
2. Kısa süreli değişimler			
2.1 Ani			
2.1.1 Kesinti		0.5-30 periyot	<0.1 pu
2.1.2 Çökme		0.5-30 periyot	0.1-0.9 pu
2.1.3 Sıçrama		0.5-30 periyot	1.1-1.8 pu
2.2 Kısa süreli			
2.2.1 Kesinti		30 periyot-3 s	<0.1 pu
2.2.2 Çökme		30 periyot-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Sıçrama		30 periyot-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Geçici			
2.3.1 Kesinti		3 s-1 dk	<0.1 pu
2.3.2 Çökme		3 s-1 dk	0.1-0.9 pu
2.3.3 Sıçrama		3 s-1 dk	1.1-1.2 pu
3. Uzun süreli değişimler			
3.1 Kalıcı kesinti		>1 dk	0.0 pu
3.2 Düşük Gerilim		>1 dk	0.8-0.9 pu
3.3 Yüksek Gerilim		>1 dk	1.1-1.2 pu
4. Gerilim dengesizliği		Sürekli durum	% 0.5-2
5. Dalga şekli bozulmaları			
5.1 Doğru akım bileşeni		Sürekli durum	% 0-0.1
5.2 Harmonikler	0-100. harmonik	Sürekli durum	% 0-20
5.3 Ara harmonikler	0-6 kHz	Sürekli durum	% 0-2
5.4 Çentik		Sürekli durum	
5.5 Gürültü	Geniş bant	Sürekli durum	% 0-1
6. Gerilim salınımları	<25 Hz	Kesintili	% 0.1-7
7. Frekans değişimleri		<10 s	

Tablo 2.1'den görülebileceği gibi IEEE 1159-1995 standartlarına göre tanımlanan GKB türleri şunlardır: geçici durum, kesinti, çökme, sıçrama, uzun süreli değişimler, kısa süreli değişimler, gerilim dengesizliği, doğru akım bileşeni, harmonikler, ara harmonikler, çentik, gürültü, gerilim salınımları ve frekans değişimleri. Şekil 2.6'da, bu GKB türlerinin temsili dalga gösterimleri verilmiştir.



Şekil 2.6. GKB türlerinin temsili dalga şeklindeki değişimler.

Geçici durumlar, güç sisteminde meydana gelen kısa süreli durumlardır. Geçici durumlar, kısa zaman periyodu içerisinde gerilim ve akımda çok büyük artışlar meydana getirdikleri için güç kalitesi açısından önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir. Dalga şekillerine göre geçici durumlar; salınımlı, darbesel ve çoklu olmak üzere üç sınıf altında incelenmektedir.

Çökme, temel şebeke frekansında 10 ms'den fazla ve 1 dakikadan az olmak kaydıyla, nominal gerilim etkin değerinin %10-%90 arasında azalma göstermesi olarak tanımlanır.

Gerilim çökmeleri, genellikle sistem arızalarına bağlıdır. Ayrıca, büyük yüklerin devreye girmesi veya büyük güçlü motorların çalışması esnasında da meydana gelebilmektedir.

Sıçrama, şebeke frekansında, 10 ms'den fazla ve 1 dakikadan az olmak kaydıyla nominal gerilim etkin değerinin %10-%80 arasında artış göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Gerilim çökmesinde olduğu gibi, gerilim sıçramaları da genellikle sistem arızalarına bağlıdır. Fakat gerilim sıçramaları gerilim çökmeleri kadar yaygın olarak görülmez. Tek faz-toprak kısa devre arızası, diğer fazlar üzerinde geçici olarak meydana gelen gerilim sıçramalarına örnek olarak verilebilir. Ayrıca büyük yükler devre dışı kalırken yapılan anahtarlama ve büyük kapasitör gruplarının devreye girmesi de gerilim sıçramasının başlıca sebepleri arasında gösterilebilir.

Kesinti, kaynak gerilimi veya akımının en fazla 1 dakika boyunca nominal değerinin % 10'unun altına düşmesidir. Güç sistemi arızaları, ekipman arızaları ve kontrol sistemlerinin yanlış çalışması sonucunda kesinti oluşur. Kesinti esnasında gerilimin genliği, genellikle nominal gerilimin %10'unun altına düştüğünden kesintiler sürelerine göre değerlendirilirler. Şebekedeki bir arızadan kaynaklanan kesintinin süresi, koruma cihazının çalışma zamanı ile belirlenir. Koruma cihazının ani olarak tekrar kapanması, genellikle 30 periyottan az süren ve kalıcı olmayan bir arızanın sebep olduğu kesintiyi ifade eder. Koruma cihazının gecikmeli olarak tekrar kapanması ise uzun süreli bir kesintiyi ifade eder.

Gerilim dengesizliği, faz veya hatta ait gerilim büyüklüklerinin farklı olması ve faz açılarının denge şartlarını karşılamaması ile meydana gelir. Üç fazlı bir sistemdeki gerilim büyüklüklerinin aynı olmaması ve aralarındaki faz farkının tam olarak 120^{o}'ye eşit olmaması, sistemde bir gerilim dengesizliğine neden olmaktadır.

Doğru akım bileşeni, bir alternatif akım güç sisteminde doğru akım veya gerilimin bulunması olarak ifade edilir. Bu bileşen, genellikle elektronik güç konverterlerinin asimetrisinin bir sonucu olarak meydana gelmektedir.

Harmonikler, frekansları temel frekansın tam katı olan sinüsoidal akım ve gerilim sinyalleridir. Periyodik bozulmuş sinyal, temel frekansın ve harmoniklerin toplamından oluşmaktadır. Güç sistemindeki harmonikler, sisteme bağlı lineer olmayan cihazlar ve yüklerden kaynaklanmaktadır.

Ara harmonikler, gerilim veya akımın sahip olduğu frekansın tam katı olmayan frekans bileşenleri olarak tanımlanır. Ara harmonikler, ayrık frekanslar veya bir bant spektrumu olarak görülürler. Ara harmonikleri oluşturan temel kaynaklar; statik frekans

dönüştürücüler, indüksiyon fırınları ve ark cihazlarıdır. Bu tip frekans bileşenleri, genellikle frekans değişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve sistemdeki yüke göre değişkenlik gösterebilirler.

Çentikler, üç fazlı doğrultuculardа akımın bir fazdan diğerine geçiş (komütasyon) yaptığı anlarda meydana gelmektedir. Çentiğin sürekli olarak oluşması, etkilediği gerilimin harmonik spektrumu aracılığı ile karakterize edilebilmesine rağmen genellikle özel bir durum olarak değerlendirilir. Çentiğin neden olduğu frekans bileşenleri çok yüksek olabilmektedir ve harmonik analizleri için kullanılan normal ölçüm cihazları ile tanımlanması mümkün olmayabilir.

Gürültü, güç sistemlerinde akım veya gerilim sinyalleri üzerinde 200 kHz den küçük geniş bant spektrumuna sahip istenmeyen elektriksel sinyaller olarak tanımlanmaktadır. Gürültü sinyali, hem faz iletkenleri hem de nötr iletkenleri aracılığı ile taşınabilmektedir. Güç sistemi üzerinde gürültüyü oluşturan temel etkenler; güç elektroniği cihazları, ark cihazları, kontrol devreleri, anahtarlamalı güç kaynakları ve doğrultuculu yüklerdir.

Gerilim salınımları, hat geriliminin etkin değerindeki küçük değişimler olarak tanımlanır. Gerilim dalgalanmasının yapısına bağlı olarak meydana gelen bozulmalar; zamandaki düzenli ya da düzensiz adım-gerilimi değişimi ve yük empedansının değişimine bağlı olarak üretilen periyodik veya rastgele gerilim değişimleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Frekans değişimleri, güç sisteminin temel frekansının nominal değerinden sapması olarak tanımlanır. Güç sistemlerinin frekansı, sistemi besleyen generatörün dönme hızıyla doğrudan bağlantılıdır. Yük ve üretim arasında dinamik bir denge olduğundan, frekansta küçük değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişimin boyutu ve süresi, yükün özelliklerine ve yük değişikliklerine yol açan generatör kontrol sisteminin cevabına bağlıdır.

3. SAHADA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZİLERİ (FPGA) VE PROGRAMLAMA TEKNİKLERİ

FPGA, üretiminden sonra istenen fonksiyona göre donanım yapısı kullanıcı tarafından değiştirilebilen tüm devreler olarak tanımlanabilir. FPGA'lar, mantıksal işlemleri yerine getirmek için binlerce ve hatta milyonlarca transistörün bağlantısından oluşurlar. Bir tür tüm devre olan FPGA'yı diğer tüm devrelerden ayıran özelliği, donanım yapısının yani iç konfigürasyonunun istenildiği gibi değiştirilebilmesidir. Donanımı programlanabilir olmayan standart tüm devrelerde, transistörler arasındaki bağlantılar sabittir ve değişmezler. FPGA, içindeki transistörleri birbirinden bağımsız ve serbest olarak üretilmiş ham bir tüm devre olarak düşünülebilir. Tasarımcı tarafından belirlenen fonksiyona göre, FPGA içindeki transistörler birbirlerine bağlanır ve bu sayede istenilen fonksiyon gerçekleştirilir. Yani teorik olarak transistör kapasitesi dahilinde akla gelen herhangi bir tüm devrenin yaptığı iş FPGA ile yapılabilir.

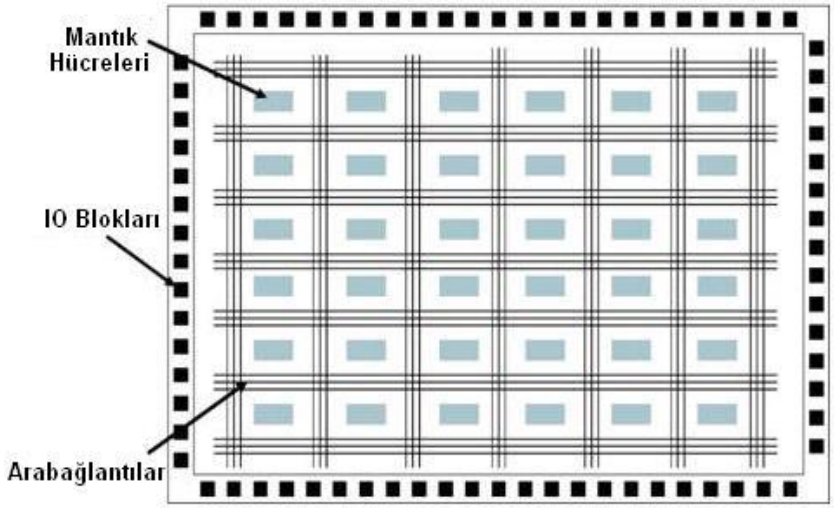
FPGA'ların en önemli özelliklerinden biri de, paralel işlem yapabilme yani aynı anda birden fazla işlemi yapabilme yeteneğidir**.** Sıradan tüm devreler ya hiç paralel işlem yapamazlar ya da çok sınırlı yapabilirler. FPGA'da ise uygulamaya ve kapasiteye göre, birbirine paralel belki de binlerce işlem aynı anda yapılabilir. Bu özellik, paralel işlem gerektiren uygulamalarda FPGA'ları eşsiz kılmaktadır. Örneğin, gerçek zamanlı yüksek çözünürlüklü bir video görüntüsü üzerinde filtreleme işlemi yaparken peş peşe sıralanan resimlerin ilk karesi giriş portlarından alınır, filtrelenir ve çıkış portlarından gönderilir. Sonra ikinci resim için de aynı işlemler gerçek zamanlı olarak tekrarlanır. Standart tüm devreler (örneğin bir mikroişlemci) kullanılırsa, bu üç işlemi sırayla yapıp bitirdikten sonra ikinci resim alınmaya başlanır. Eğer bu işlemler yeterince hızlı yapılamazsa sıradaki resim kaçırılabilir. FPGA'da ise bu işlemler paralel olarak devam eder. Örneğin, ilk resim alınıp filtreleme işlemi yapılırken ikinci resim alınmaya başlanır. İlk resim gönderilirken ikinci resim filtrelenir ve üçüncü resim alınmaya başlanır. Bunun yanında, filtreleme işlemi genel olarak yoğun çarpım gerektirmektedir. Standart bir işlemci ile bu çarpma işlemleri, sırayla yapılmak zorundadır. Oysaki FPGA ile bu işlemler paralel olarak, yani çok hızlı bir şekilde yapılmaktadır [77].

Özet olarak FPGA'lar; paralel işlem kabiliyeti sunan, içyapısı istenilen uygulamaya göre değiştirilebilen ve donanımı programlanabilir olan tüm devrelerdir. FPGA'lar genel

olarak karmaşık sayısal filtreler, hata tespiti ve iyileştirmesi gibi işlemler için basit toplama ve çıkarma fonksiyonlarını yerine getirirler. Hava araçları, otomobiller, radar sistemleri, savunma sanayi ve bilgisayarlar FPGA'ların kullanıldığı alanlardan sadece birkaçıdır.

3.1. FPGA Yapısı

FPGA temel olarak mantık hücreleri, giriş/çıkış (G/Ç) blokları ve ara bağlantılardan oluşur. Şekil 3.1'de iki boyutlu mantıksal hücre dizilerini barından temel bir FPGA yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İki boyutlu mantıksal hücre dizilerini barındıran temel FPGA yapısı.

3.1.1. Mantık Hücresi

FPGA'nın ana yapısını mantık hücreleri oluşturur. Bir mantık hücresi; bir adet doğruluk tablosu (Look Up Table, LUT), bir adet D Flip-Flop ve bir adet 2x1 çoklayıcıdan oluşur. LUT'lar aslında bir mantık işlemi yerine getiren küçük belleklerdir. *N* girişli bir LUT, 2*N*'li bir belleği temsil eder. Binlerce mantık hücresinin birleşimi sonucunda karmaşık ve büyük programlar oluşturulur.

Mantık hücrelerinin ara bağlantıları, matris şeklindeki veri yolları ve programlanabilir anahtarlarla sağlanır. FPGA tasarımı, her bir mantık hücresinin uygulayacağı fonksiyonu ve programlanabilir anahtarların durumunu belirleyerek bu mantık hücreleri arasındaki bağlantıları tanımlar.

3.1.2. FPGA Giriş/Çıkış Pinleri

FPGA'ların çevre birimlerle iletişimini sağlayan G/Ç pinleri, ayrılmış pinler ve kullanıcı pinler olarak iki kategoriye ayrılır. Bir FPGA'da tüm pinlerin %20 ile %30'u arası, ayrılmış pinlerden oluşmaktadır. Bu pinler, FPGA'da gerçekleştirdikleri özel fonksiyonlara göre üçe ayrılır. Bunlar; FPGA için gerekli olan güç ve topraklama sağlayan pinler, oluşturulan programın FPGA yüklenmesi için kullanılan pinler ve saat sinyalleri için ayrılmış özel pinlerdir.

Kullanıcı pinleri ise kullanıcı tarafından ayarlanabilen standart G/Ç pinleridir. Giriş, çıkış ve hem giriş hem de çıkış olarak üç kategoriye ayrılır. Her bir G/Ç pini, FPGA'da bir G/Ç hücresine bağlıdır. G/Ç hücrelerinin güçleri, VCCIO olarak adlandırılan güç pinleri tarafından sağlanır. Eski FPGA'lar birden fazla VCCIO pinine sahip olmalarına rağmen, bütün pinler aynı gerilimle beslenirdi. Yeni nesil FPGA'larda ise G/Ç'lar gruplara ayrılabilir ve bu gruplar farklı gerilimlerden beslenebilirler. Böylelikle bir grup G/Ç pinleri 3.3 V ile çalışırken, diğer grup G/Ç pinleri ise 2.5 volt ile çalışabilmektedir.

3.1.3. Hafıza Blokları

Günümüzde FPGA'ların genelinde ayrılmış RAM yani bellek üniteleri bulunmaktadır. Bunlar, mantık devrelerinin işleyişi sırasında ihtiyaç duyulan geçici depolama alanları için kullanılırlar. Bu RAM'ler, tek veya çoklu erişimi destekleyebilirler. Çoklu erişimde, birden fazla uygulama RAM üzerinde okuma/yazma işlemi yapabilmektedir. Çoklu erişim, farklı saat darbesinde çalışan işlem blokları arasında veri aktarımı için iyi bir çözümdür. FPGA içerisinde büyük RAM ihtiyaçları için blok RAM'ler bulunurken, küçük veriler için mantık hücreleri arasına dağıtık halde küçük RAM'lar bulunmaktadır. Dağıtık RAM için Xilinx firması ihtiyaca göre mantık hücrelerinin bazılarını RAM olarak kullanırken, Altera firması blok RAM'ları FPGA içerisinde değişik boyutlarda paylaştırmaktadır.

3.2. FPGA Programlama Teknikleri

Sayısal sinyal işleme sistemleri, sayısal verileri işlemek için tasarlanmış hızlı donanımlar ve bu donanımlara işlevsellik kazandıracak yazılımlarla gerçekleştirilir. Sayısal sinyal işleme sistemi oluşturmada, donanım ve yazılım tabanlı iki yöntem içermektedir.

3.2.1. Donanım Tabanlı Yöntem

Bu yöntemde, sayısal verileri işlemek için kullanılan özel tüm devreler bulunmaktadır. Bu tip devreler özel bir fonksiyonu gerçekleştirmek amacıyla üretildiğinden dolayı, bu fonksiyonları etkin ve hızlı bir şekilde gerçekleştirirler. Ancak, bu devrelerin kapasiteleri sınırlıdır ve ilgili oldukları uygulamaya yönelik üretildikleri için esnek değildirler. Bu durum, fazladan maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Yazılım tabanlı yöntemler, hızlı ve esnek yapısı sebebiyle sıklıkla tercih edilirler. Ayrıca donanım tabanlı yöntemlerdeki paralellik, yazılımla sağlanamamaktadır.

3.2.2. Yazılım Tabanlı Yöntem

Bu yöntemde, tasarım oldukça esnek bir yapıya sahiptir. Donanım üzerinde yürütülen komutlar değiştirilerek, donanımda herhangi bir değişiklik yapılmadan yeni fonksiyonlar eklenebilir. Donanımlar üzerinde çalışan uygulamalar; tek bir işlemcinin kaynaklarını kullanırken yavaş fakat esnek yazılımlarla çalışırlar. Bu şekildeki kullanım, uygulamaya özgü devre elemanlarına göre daha işlevseldir. Fakat, basit bir uygulama için komutların bellekten okunduğu sistemler esnek ve genel amaçlı yapıları sayesinde yeni bir üretim aşamasına ihtiyaç duymadan değişik protokollere, sistem özelliklerine ve kullanıcı ihtiyaçlarına kısa sürede cevap verebilirler. Tekrar düzenlenebilen işlem sistemleri olarak da adlandırılan bu özellikleri sayesinde donanım tabanlı sayısal işlem sistemlerine göre daha hızlı sayısal tasarım ortamı oluşturarak, bu iki sistem arasındaki boşluğu doldururlar [78]. Tekrar düzenlenebilir sayısal işlem sistemlerinin ihtiyaç duyduğu esnek donanımlar, FPGA ile mümkündür. Özellikle, SRAM tabanlı FPGA'ler tekrar düzenlenebilirlik yetenekleri ve yüksek performansları sayesinde, genel amaçlı sayısal donanımların tasarlanmasında önemli bir yer tutmaktadır.

2000'li yılların başından buyana FPGA'lar kadar etkili olan başka bir kavram ise HDL'dir. Donanım tanımlama dillerinin kullanılması, System-on-Chip (SoC) teknolojisini ortaya çıkarmıştır. SoC teknolojisinde çoğunlukla, donanım tanımlama dili kullanılmaktadır. Sistemin tanımlama aşamasından sonra, derleme ve davranışsal benzetim adımları gerçekleştirilir. Sistemden beklenen cevap elde edildiğinde zamana göre benzetim aşamasına gelinir. Bütün birimler sentezleme ve yerleştirme işlemi sonunda tekrar programlanabilir olan devreye aktarılır.

3.3. VHDL Tasarım Dili

VHDL, Yüksek Hızlı Entegre Devreleri Donanım Tanımlama Dili anlamına gelen bir programlama dilidir. Günümüzde, donanım tanımlama dillerinden en yaygın kullanılanıdır. ABD savunma bakanlığı ve IEEE tarafından 1980'lerde geliştirilmiştir. Xilinx firması tarafından geliştirilen ISEWebPack programı, kullanıcılara üç farklı programlama seçeneği sunmaktadır. Bunlar; şematik programlama, kod ile programlama ve akış diyagram şeklinde programlamadır. Ayrıca, şematik olarak yapılan tasarımlara ait VHDL kodları üretilebilir ve daha sonra bu kodlar kullanılarak yazılıma devam edilebilir. Böylece, istenildiği zaman kod istenildiği zaman şematik olarak programlama yapabilme kolaylığı bulunmaktadır. Bu özellikler, donanım tanımlama dilleri arasında VHDL dilini ayrıcalıklı kılmaktadır.

3.3.1. VHDL Uygulama Alanı

VHDL, uygulamaya özgü devrelerin geliştirilmesi için kullanılır. VHDL kodu mantıksal kapılara dönüştürülerek devreye uygulanır. Karmaşık tasarımı ile en iyi biçimde sentezleme yapıldığında genellikle en uygun donanımsal sonuç elde edilir. VHDL, karmaşık olmayan programlanabilir lojik aygıtların tasarımı için hemen hemen hiç kullanılmaz.

3.3.2. VHDL ve Donanım Tasarımı Karşılaştırması

VHDL dilinin tasarım aşamasında, standart donanım tasarımlarına göre bazı üstünlükleri vardır. Bu üstünlükler; tasarım süresi, tasarım esnekliği, tasarım kolaylığı ve yenileme kolaylığı şeklindedir. VHDL dili, doğrudan tasarıma göre daha kısa sürede sonuçlanır. Gün geçtikçe, devre elemanlarının yapıları da teknolojiye bağlı olarak değişmektedir. Yapılan değişikliklerin daha önceki tasarımlarda da çalışabilmesi için kullanılan tasarım ortamının buna elverişli olabilmesi gerekir. VHDL dili, fonksiyonlara bağımlı olarak çalışır. Dönüştürücü programlar yardımıyla, yazılım donanım yapısı oluşturulur. Teknoloji geliştikçe, sadece bu dönüştürücü programların yeni teknolojiye uygun hale getirilmiş olması yeterli olacaktır. Genel olarak, VHDL dili kullanılarak

yapılan tasarımlarda, klasik donanım tasarımına göre daha az donanım bilgisine ihtiyaç vardır. Bir devrede yapılan güncelleme işlemi kısa sürede gerçekleşebilmektedir.

3.3.3. VHDL Veri Nesneleri

Her bir veri nesnesi, belirli bir veri tipine ait olan değerleri tutmaktadır. Kullanılan nesneler donanımda çeşitli değerler alırlar ve donanımın şeklini belirlerler. VHDL'nin sahip olduğu veri nesneleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Sinyal: Fiziksel olarak devre içinde yer alan donanım içindeki ara değişkenlerdir. Güncel değeri ve belirlenmiş bir sonraki değerleri tutarlar.

2. Değişken: Yapılan işlemlerin sonuçlarını saklamak için kullanılırlar. Fiziksel bir yapı ile donanım içinde yer almazlar. Fonksiyon, prosedür ve proses içinde değişken tanımlaması kullanılmalıdır.

3. Sabit: Program içinde kullanılacak olan ve değeri program boyunca değişmeyen temel bir veri yapısıdır.

4. Tip tanımı: Temel veri yapıları dışında her hangi bir veri tipi tanımlamak için kullanılan VHDL yapısıdır. Genelde, çok boyutlu diziler veya karar yapıları oluşturmak için kullanılırlar. Alt tipler ise bir veri tipinin kısıtlanmış halini yeni bir veri tipi olarak tanımlamak için kullanılır.

3.3.4. VHDL Yapısal Elemanları

VHDL programlama dili temel olarak aşağıdaki yapısal elemanlardan oluşmaktadır.

- Varlık (Entity)
- Mimari (Architecture)
- Biçim (Configuration)
- Paket (Package)
- Kütüphane (Library)
- İşlem (Process)
- Alt Programlar (Function, Procedure)

VHDL dili ile oluşturulan temel bir devre; varlık, mimari ve kütüphane yapısal elemanlarını içermek zorundadır.

3.3.4.1. Varlık Tanımlanması

Varlık, bir devrenin giriş ve çıkışlarının tanımlandığı kısımdır. Devreye ait tüm işlemler, giriş ve çıkış bilgilerine uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Varlık alanında ilk yapılan işlem G/Ç port tanımlamasıdır. Port içindeki verilerin dört değişik durumu olabilir. Bu durumlar;

- Giriş: Devreye giriş sağlayan, okunabilen port bileşen biçimidir.
- Çıkış: Devreden çıkış sağlayan, yazılabilen port şeklidir.
- Giriş/Çıkış: Hem giriş hem de çıkış olabilen, port bileşen biçimidir.
- Tampon: Hem giriş hem de çıkış olarak kullanılabilen, port bileşen biçimidir.

Genel port ise devreye tasarım sırasında kullanılacak değişkenleri girmek için kullanılan özel bilgi tanımlama alanıdır. Bu port yapısı devrenin esnekliğini sağlamaktadır. Varlık ismi ile VHDL dosya ismi aynı olmak zorundadır.

3.3.4.2. Mimari Tanımlanması

Mimari, devrenin nasıl davranması gerektiğinin belirlendiği kısımdır. Bir devreye istenirse birden fazla mimari yazılıp, bunlardan bir tanesinin seçilmesi durumu söz konusu olabilmektedir. Genellikle, her bir devrenin bir adet davranış biçimi olur.

Tanımlanan devre içerikleri, istenirse başka devrelerde de kullanılabilir. "*Generic*" ve port alanlarına değer atanarak, devre başka bir devrenin içinde yer alabilir. Devre içeriklerini başka bir devrede kullanmak için "*component*" veya "*configuration*" olarak program içinde çağırmak gerekir**.**

3.3.4.3. Biçim Tanımlanması

Biçim tanımı, bir varlık içerisine birden fazla mimari yerleştirildiğinde ve bu mimarilerin çağrılması gerektiğinde kullanılır. Bu şekilde farklı mimari ve etiket alanlarında bir varlığın farklı mimarileri kullanılabilir.

3.3.4.4. Paket Yapısı

VHDL dilinin temel bileşenlerinden birisi de pakettir. Paketler farklı değişken isimleri ve tipleri tanımlamak için kullanıldığı gibi, işlem ve fonksiyon tanımlamak için de kullanılırlar. Paket, iki önemli kısımdan oluşur. Birincisi paketin kendisi olup sabit, değişken, prosedür ve fonksiyon tanımlamak için kullanılır. İkincisi ise eğer prosedür ve fonksiyon tanımlanmış ise programların kodlarının bulunduğu paket vücududur. Eğer sadece sabit ve değişken tanımlanmışsa, paket vücuduna gerek yoktur. Paket adı, paket vücudu adı ve VHDL dosya adı aynı olmalıdır. Her varlık başlangıcında devre içinde kullanılacak olan programlar ve tip tanımlamaları paket programlar ile varlık içinden çağırılmalıdır.

3.3.4.5. Kütüphane Yapısı

Paketler genel olarak üç kütüphane içinde tanımlanırlar. Bunlar IEEE, STD ve WORK kütüphaneleridir. IEEE ve STD kütüphaneleri, VHDL diline ait kütüphanelerdir ve bir kısmı VHDL yüklenmesi ile beraber gelirken bir kısmı ise internetten indirilebilmektedir. IEEE kütüphanesinde; matematiksel işlemler, nümerik işlemler, metin işlemleri gibi işlemler yer alır. STD kütüphanesinde; dosya okuma fonksiyonları ve standart değişkenlerin bulunduğu paketler yer alır. WORK kütüphanesi ise kullanıcı tarafından yazılmış olan paketleri içerir. Diğer kütüphaneler ise kullanılan devre tipini veya özel işlemleri içeren paketlerdir.

3.3.4.6. İşlem Tanımlanması

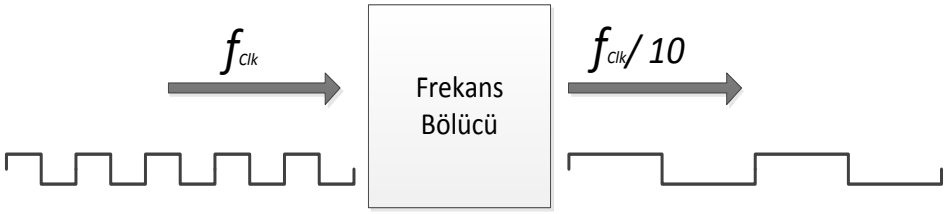
Tanımlanmış bir varlık alanı içindeki mimari alanında, "*if- for"* gibi kontrol deyimlerini kullanabilmek için işlem bloğuna ihtiyaç vardır. İşlem bloğu olmadan, mimari alanında sadece etiket ve "*case-when*" komutları çalışabilmektedir. İşlem tanımı iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Birincisi, değişken girişleri veya etiket alanı ile tanımlanmış işlemlerdir. İkincisi ise tek başına tanımlanmış işlem bloklarıdır. Değişken ile tanımlanmış işlemler, normal bir program bloğudur ve içindeki komutları çalıştırır. Tek başına tanımlanmış işlemler ise "*wait-until*" yapısı sayesinde belirli bir sinyal ile tetiklenen program bloklarıdır.

3.3.4.7. Alt Program Tanımlanması

Fonksiyon ve prosedür, VHDL diline esneklik sağlayan program bloklarıdır. Fonksiyonlar diğer programlama dillerinde olduğu gibi, girilen değişkenleri işleyen ve sonuçta bir değere dönüştüren bloklardır. Prosedür ise girişleri işleyen fakat fonksiyondan farklı olarak birden fazla değere dönüştürebilen program bloklarıdır. Prosedür ve fonksiyon tanımları, paket içinde veya mimari başlangıcında tanımlanmalıdır.

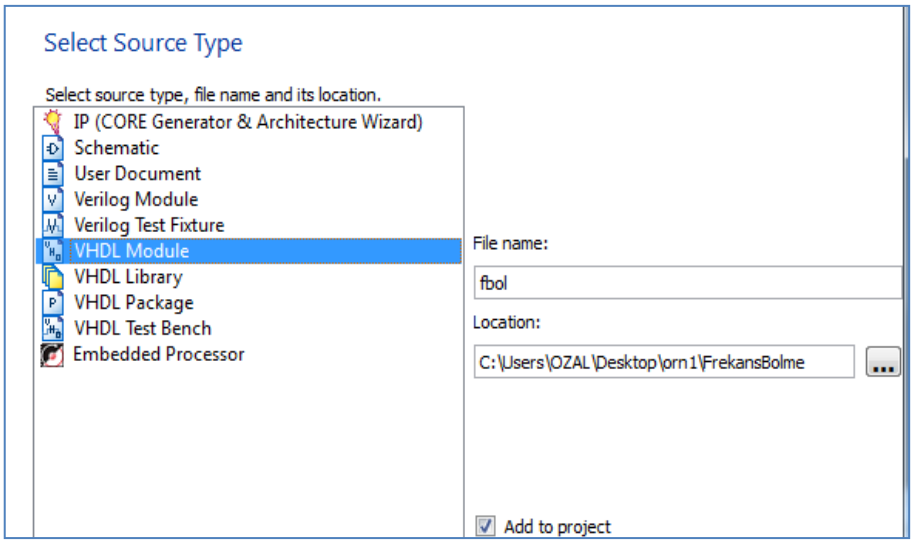
3.3.5. VHDL Modülü Oluşturmak

Bir önceki kısımda anlatılan adımlardan sonra tasarımlar, belirlenen HDL dillerinden herhangi biri ile oluşturulabilir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen uygulamalarda, VHDL dili kullanıldığından dolayı genel anlatımlar bu dil üzerinden sunulmuştur. Tasarım içerisine VHDL dosyası oluşturmak için, bu kısımda basit olarak Şekil 2.2'de verilen bir frekans bölücü örneği kullanılmıştır.



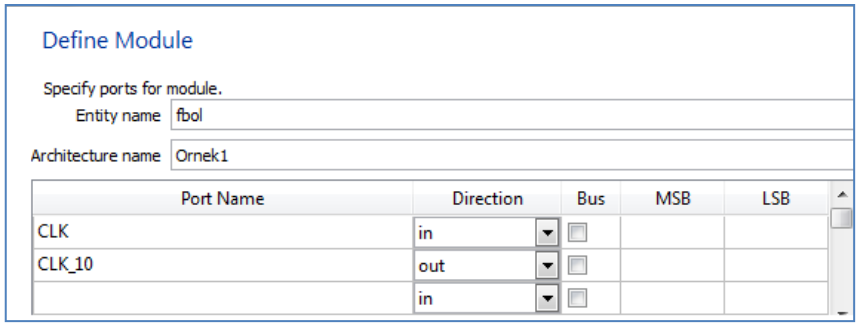
Şekil 3.2. Frekans bölücü çalışma şekli.

Frekans bölücü, girişine uygulanan sinyali belirlenen bir sayıya bölerek bu sinyali çıkışa aktarır. Gerçekleştirilecek olan bu örnekte, "*clk*" sinyali 10'a bölünerek çıkışa aktarılacaktır. VHDL dosyasını oluşturmak için yönleyici ekranında daha önceden oluşturulan tasarım dizini üzerine sağ tıklanarak "Add→New Source" komutu verilmelidir. Bu komuttan sonra Şekil 3.3'deki gibi bir pencere ekranı ile karşılaşılır.



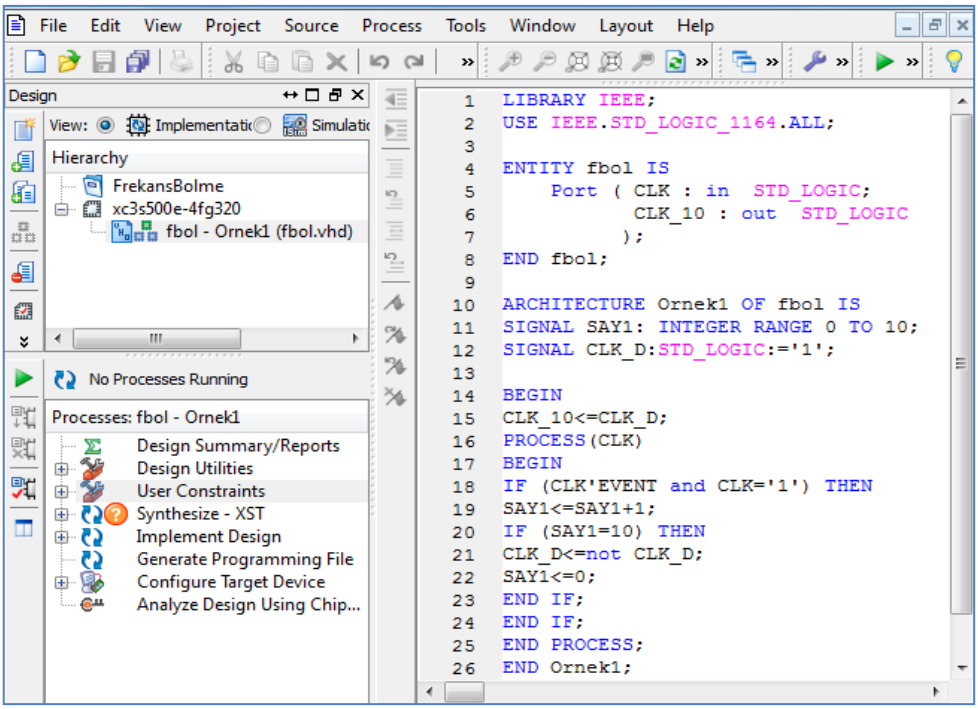
Şekil 3.3. VHDL dosyası oluşturma ekranı.

Tasarım içerisine, birçok farklı kaynak tipi eklenebilmektedir. Bu ekrandan, VHDL modül seçeneği işaretlenerek dosyanın adı girilmelidir. Bir sonraki ekran, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, bu modüle ait giriş çıkış pinlerinin ayarlandığı kısımdır.



Şekil 3.4. VHDL modülü için port tanımlama ekranı.

Tüm bu adımlardan sonra, basit olarak bir VHDL tasarım projesi oluşturulabilir. Sentezleme ve diğer işlemlerden sonra tasarlanan devre, cihaz üzerinde uygulanmaya hazır hale getirilerek gerekli program dosyaları oluşturulur. Şekil 3.5'de, basit olarak oluşturulmuş bir tasarım proje örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Örnek bir VHDL tasarım projesi.

Hazırlanan tasarımların ne kadar kaynak kullandığını bilmek, tasarım açısından çok büyük önem taşımaktadır. Çünkü programın ihtiyaç duyduğu kaynaklar paralelinde cihaz seçimi yapılmalıdır. Hazırlanan bir tasarımın, sentezleme ve uygulama işlemlerinden sonra harcadığı kaynak oranlarına Şekil 3.6'da gösterildiği gibi "Design Summary" sekmesinden erişilebilmektedir.

Device Utilization Summary (estimated values)			[-]
Logic Utilization	**Used**	**Available**	**Utilization**
Number of Slices	3	4656	0%
Number of Slice Flip Flops	5	9312	0%
Number of 4 input LUTs	6	9312	0%
Number of bonded IOBs	2	232	0%
Number of GCLKs	1	24	4%

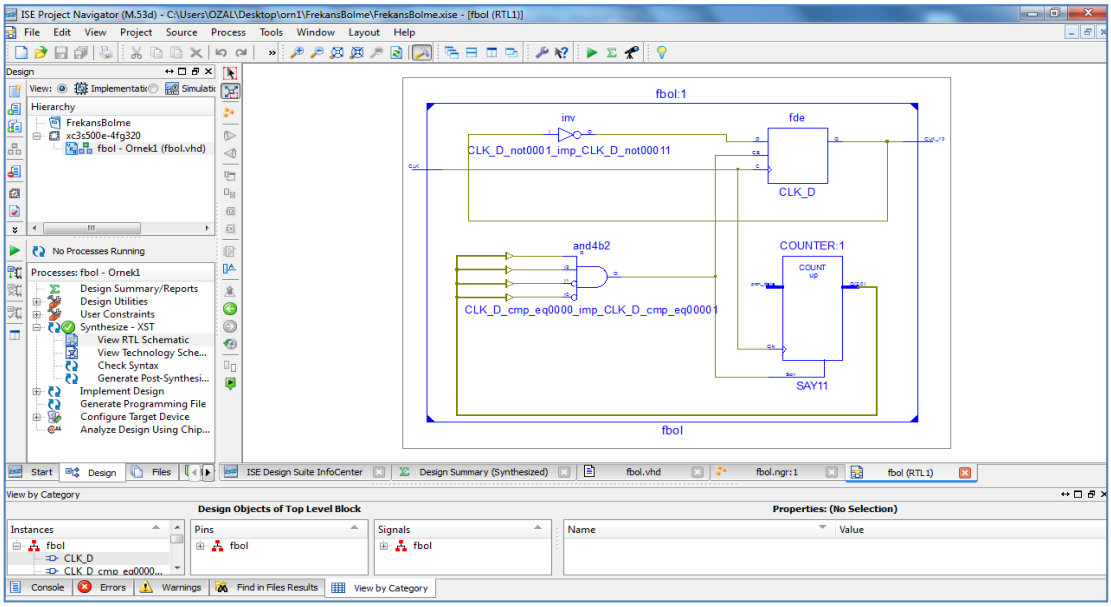
Şekil 3.6. Hazırlanan tasarımın özeti.

3.3.5.1. Hazırlanan Tasarımın RTL Şeması

VHDL kodları ile oluşturulan yazılımların her bir parçası, aslında arka planda mantıksal devrelere karşılık gelmektedir. FPGA cihazı ele alınacak olursa tasarımcılar, bu cihaz içerisindeki milyonlarca programlanabilir hücreyi farklı kombinasyonlarla bir araya getirerek isteğe yönelik davranış sergileyen bir sistem oluşturmaktadır. ISE yazılım aracı

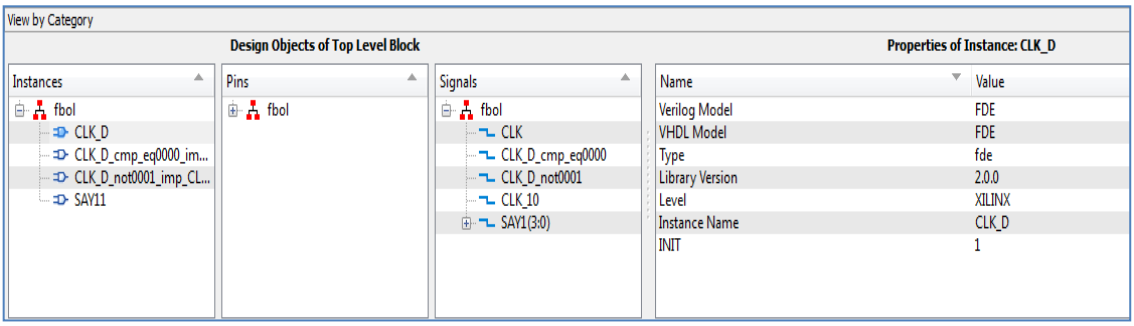
içerisinde yer alan RTL şematik gösterim özelliği VHDL kodlarına karşılık gelen mantıksal devreleri şekilsel olarak tasarımcılara sunmaktadır.

Hazırlanan tasarım sentezlendikten sonra ISE yazılımı içerisinde Synthesize→ View "RTL Schematic" yolu ile devrenin şeması Şekil 3.7'de gösterildiği gibi görüntülenebilmektedir.



Şekil 3.7. RTL şematik gösterim ekranı.

RTL şematik gösterim ekranı üzerinde devrede yer alan bağlantıların ve elemanların özellikleri Şekil 3.8'de gösterildiği gibi izlenebilmektedir.



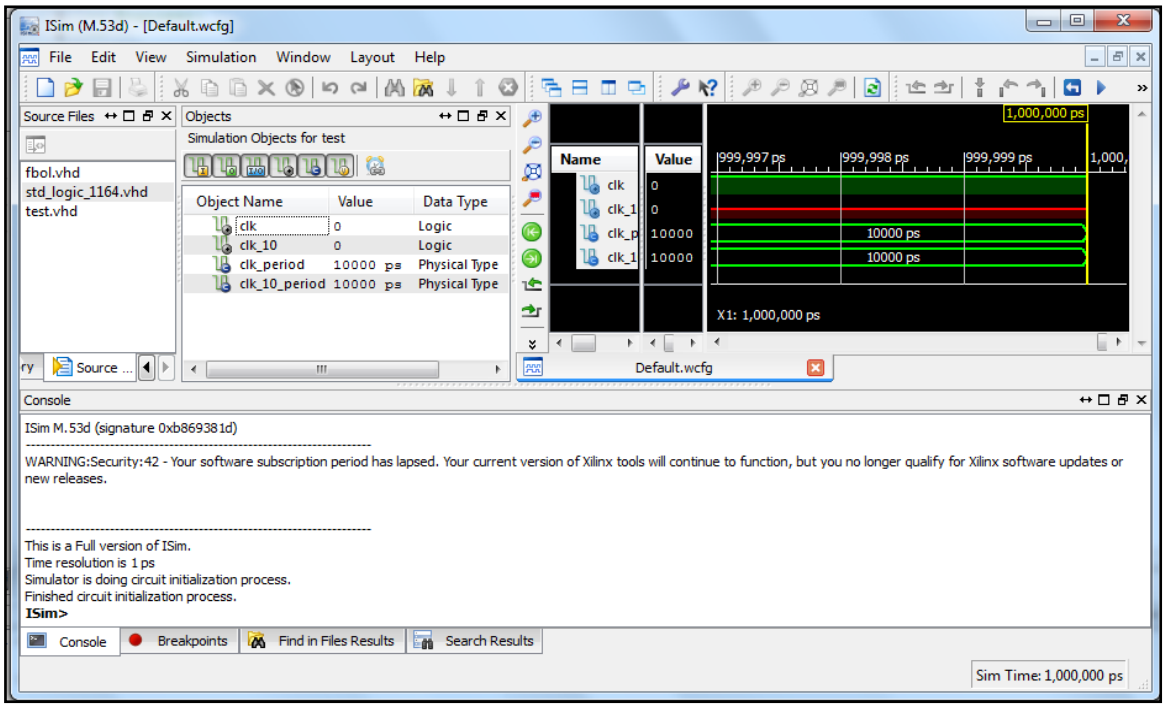
Şekil 3.8. RTL şematik ekranın kategorik gösterimi.

3.4. Simülasyon İşlemleri

Simülasyon işlemi tasarımcıya, devreyi donanımsal olarak gerçekleştirmeden önce, tüm girişler için oluşabilecek kombinasyonlara göre devre çıkışlarının gözlemlenmesini sağlar.

Geniş çaplı uygulamalarda simülasyon işlemi, hata tespitinde donanımsal prototip oluşturma ve test etme işleminden çok daha ekonomiktir. Simülatör çıkışlarında herhangi bir hata tespit edildiğinde, devre kolayca düzeltilerek tekrar simule edilebilir. Simulatör, devreyi tanımlayan kaynak kod ve simülasyon süresince mantıksal hücrelerin girişini oluşturan tetikleyici girişler olmak üzere iki çeşit girişe gereksinim duyar. Simülatör içerisindeki fonksiyonlar, 10 *ps*'ler mertebesinde çok küçük parçalara ayrılmaktadır. Her bir zaman diliminde simülatör, değişen sinyalleri tespit ederek bu sinyalleri devrenin HDL kaynak kodu üzerinden işletir. Simülasyon aşaması, tasarım ve genel kurallar kadar önemli bir aşamadır. Simülasyona ayrılan zamanın, tasarıma ayrılan zamandan fazla olması gerekir. Simülasyon aşamasında kullanılan araçlar genel olarak, metin düzenleyiciler ve bir simülatörden oluşmaktadır [78].

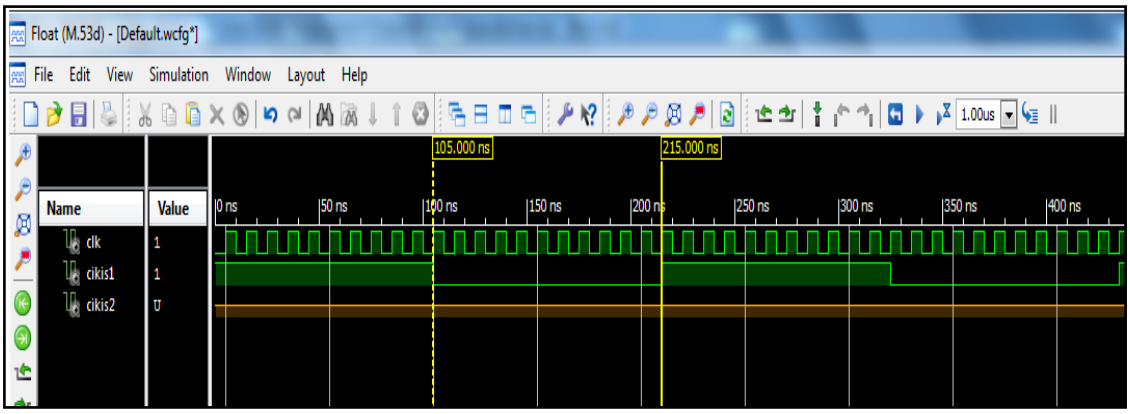
Xilinx firmasına ait ISIM aracı VHDL,Verilog gibi donanım tanımlama dilleri üzerinde davranışsal ve zamana bağlı simülasyonlar gerçekleştirmektedir. Şekil 3.9'da ISIM aracının ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Xilinx ISE Simulator (ISim) aracının ekran görüntüsü

ISIM grafiksel ara yüzü içerisinde panelleri içeren; ana pencere, çalışma penceresi ve araçlar bulunmaktadır. Ana pencere içerisinde; simüle edilebilir tasarım kısımları, dalga ekranına sinyal ekleme ve görüntüleme, simülasyon için komut penceresini kullanma gibi

işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Frekans bölücü örneği için oluşturulan simülasyon ekranı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Frekans bölme örneğinin simülasyon sonucu.

Simülasyon ekranı üzerinde, tasarıma ait hem zaman olarak hem de davranış olarak çeşitli bilgiler sunulmaktadır. Frekans bölme işleminde "*clk*" sinyalinin 10 darbesinden sonra durum değiştiren başka bir "*clk*" sinyalinin üretildiği, simülasyon ekranı üzerinde açıkça görülmektedir.

4. SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ

Örüntü tanıma, ortak özelliğe sahip olan ya da aralarında bir ilişki kurulabilen karmaşık olayları ve nesneleri, çeşitli yöntemler vasıtasıyla tanımlayıp bir kategoriye ya da sınıfa koyma işlemidir. Bir örüntü tanıma işleminde, işaret işleme yöntemi sonucunda elde edilen katsayılar doğrudan kullanılabileceği gibi, bu katsayılara özellik çıkarım tekniği de uygulanabilmektedir. Özellik çıkarma işlemi; işaretin veri boyutunun indirgendiği, tanımlayıcı anahtar özelliklerinin tespit edildiği ve aynı zamanda normalizasyona tabii tutulduğu aşamadır. Bu aşama, sistemin başarımında en etkili rolü oynar. Bu nedenle, örüntü tanımanın son aşamasını oluşturan sınıflandırma sistemine uygulanacak olan veri sayısının az olması, tasarlanan tanıma sistemin daha hızlı ve yüksek doğruluk derecesine sahip olmasına olanak sağlayacaktır [87].

GKO ve GKB verilerinin büyük boyuta sahip olmaları nedeniyle gerçekleştirilen tanıma sistemlerinde, doğrudan gerilim verilerinin kullanılması etkin bir yöntem değildir. Her bir GKO ve GKB işaretinde; zaman, genlik ve frekans gibi ayırt edici bilgiler bulunmaktadır. İşaretin temel yapısını oluşturan bu bilgileri ortaya çıkarmak için, incelenen işaretin bir analiz yöntemiyle ayrıştırılması gereklidir. Böylece, GKO ve GKB verilerini temsil eden, veri boyutu indirgenmiş ayırt edici özellikler elde edilir.

Bu bölümde, çevrim içi ve çevrim dışı tanıma sistemleri için GKO verilerine FPGA ortamında uygulanan özellik çıkarım işleminde kullanılan sinyal işleme yöntemlerine yer verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında FD, DD ve HHD sinyal işleme yöntemleri kullanılarak GKO ve GKB verileri için dönüşüm katsayıları elde edilmiştir. Ayrıca, bu dönüşüm katsayılarına özellik çıkarım işlemleri gerçekleştirilerek düşük veri boyutlu ve ayırt edici özellik vektörleri elde edilmiştir.

4.1. Fourier Dönüşümü (FD)

Geleneksel veri analiz yöntemleri kullanıldığında, zaman serileri verilerinin doğrusal ya da durağan oldukları varsayımı yapılmaktadır. FD, hem doğrusal hem de durağan olduğu varsayılan işaretlere uygulanırken, temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamının bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak ifade edilebileceğini gösterir. Bu seriler, zaman ve frekans bölgesinde fonksiyonlar arasında ilişki kurmayı sağlar. Bir $f(t)$ fonksiyonuna ait FD,

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{-jwt} dt \tag{4.1}$$

biçiminde tanımlanır ve F(w) 'nin ters FD'si,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{-jwt}\, dt \tag{4.2}$$

olarak tanımlanır. (4.1) ve (4.2), genellikle FD çifti olarak adlandırılır. FD'nin avantajı, hem zaman hem de frekans bölgesinde fonksiyonun veya dalga şeklinin incelenebilmesidir.

Herhangi bir periyodik sinüsoidal olmayan dalganın frekans spektrumunun saptanmasında, frekans bölgesi analiz algoritması, en çok Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) veya Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) yöntemlerine dayandırılmaktadır [88].

4.1.1. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD)

HFD, özellikle bilgisayar desteği ile yapılan Fourier analizidir. HFD'de işlem yükünü çeşitli yöntemlerle azaltan algoritmalar göz önüne alındığında, genelde iki yöntem kullanıldığı görülür. Bunlardan biri $\left(e^{\frac{j2\pi}{N}}\right)k$ gibi tek boyutlu indekslenmiş katsayıların yerini veya ifadesini değiştirerek AFD tanımında verilen toplama işlemini bir dairesel konvolüsyona dönüştürmektir. Bu yöntem işlem yükünü biraz azaltabildiği gibi, HFD işlemi FIR filtre yapısıyla gerçeklenebilir hale getirilmiş olacağından, gerçeklenebilirliği de arttırmaktadır. Rader, Bluestein Chirp-z ve Winograd-I algoritmaları bu tip algoritmalardır [89].

Bir diğer yol ise işlem yükünü oldukça azaltan ve AFD hesaplamaları için sıklıkla kullanılan çok boyutlu indeksleme yöntemidir. Cooley-Tukey, Winograd II ve Good-Thomas algoritmaları da bunlara örnek teşkil eder. Bu tip algoritmalar, çarpma sayısını azaltanlar ve toplama sayısını azaltanlar olarak gruplanabilmektedir. Çarpma sayısını azaltan algoritmalar, ortak bölenlerin bir araya toplanmasına dayanan Cooley-Tukey gibi algoritmalardır. Toplama sayısının azaltılması için de, Winograd algoritmasında olduğu

gibi, katsayıların indeksleri asal çarpanlarına ayrılarak tekrar düzenlenir [90]. Günümüzde, işaret işleme için kullanılan DSP ve FPGA gibi araç ve devreler için çarpma işleminin yükü, toplama işleminin yükünden daha fazladır [91]. Çarpma işlemlerinin sayısını azaltan Cooley-Tukey algoritması, bu nedenle sıkça kullanılmaktadır [89].

4.1.2 Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD)

AFD, sayısal değerlendirmeye uygun olup, sonlu uzunluktaki dizilerin FD'si için kullanılır. Frekans bölgesi spektrumu ve zaman bölgesi fonksiyonunun her ikisi de, her periyotta *N* adet örneklemeyle periyodik olarak örneklenmiş fonksiyonlar olduğunda (4.1) ve (4.2), AFD çifti olarak adlandırılıp, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{-j2\pi kn/N} \tag{4.3}$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega)e^{-j2\pi kn/N} \tag{4.4}$$

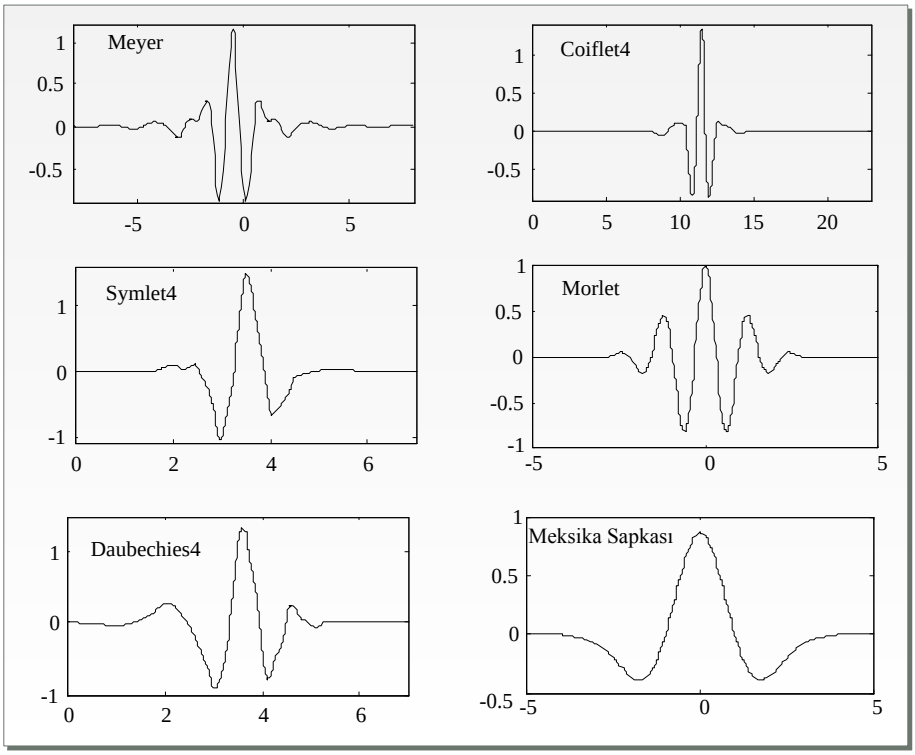
Burada, k: n= 0, 1, …..N-1, $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\Delta T}$ ve $\Delta T = \frac{T}{N}$ ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu formunda daima elde edilebildiği için AFD, harmonik ölçümlerinde çok kullanılır. Örnekleme zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin, sabit zaman aralıklarına ayrılan büyüklüklerin zaman bölgesi serisi olarak gösterilir. Bir giriş işaretinin AFD'si hesaplanmak istendiğinde, sinüs ve kosinüs ifadelerinin karmaşık düzlemde karşılıkları kullanılarak

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1}(x(n)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}}) \tag{4.5}$$

yazılabilir. Fourier analizi, AFD'ler kullanılarak gerçekleştirilebilir. AFD'ler, HFD algoritmalarının kullanımıyla hesaplanabilir. HFD teknikleri, çok sayıda fonksiyonlar içeren (4.1) ve (4.2), AFD hesaplamalarını yapmak için kullanılan çok hızlı yöntemlerdir. Harmonik analizlerinde kullanılan pek çok sayıda HFD algoritmaları vardır [88].

4.2. Dalgacık Dönüşümü (DD)

DD; ana dalgacık adı verilen sınırlı süreli, düzensiz ve asimetrik işaret parçalarının ölçeklenmiş ve kaydırılmış hallerini kullanarak durağan olmayan doğrusal işaretlere uygulanmaktadır. Şekil 4.1'de, yaygın olarak kullanılan dalgacık fonksiyonlarından bazıları verilmiştir.



Şekil 4.1. Yaygın olarak kullanılan bazı dalgacık fonksiyonları.

DD, işaretin ölçeklenebilir bir zaman-frekans gösterimi ile analizini sağlayarak geleneksel işaret işleme teknikleri tarafından görülmeyen detayları ortaya çıkarır. Ölçeklenebilir bir pencerenin olması, işaret içindeki düşük frekans eğilimlerini açmak için geniş bir pencere, yüksek frekans detaylarını analiz etmek için sıkıştırılmış bir pencere kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bunun için, ölçeklenebilir temel bir dalgacık fonksiyonu kullanıp sabit çözünürlük problemine çözüm getirerek, işaretin farklı çözünürlüklerde daha esnek bir zaman bölgesi analizinin yapılması gerçekleştirilmiştir. DD zaman-ölçek yöntemine dayalı olduğu için, odağa tam olarak ayarlanarak işaretin farklı kısımlarını gözetleyebilen bir matematik mikroskobu gibi davranır. Frekans spektrumundaki farklı bölgeler için, daha kolay farklı frekans çözünürlükleri seçebilmesi, analiz sırasında tüm

spektrumları hesaplamak yerine sadece kullanılacak frekans bantlarının hesaplanması, düşük frekanslarda oldukça hızlı analiz yapması bu yöntemin avantajlarındandır [87].

4.2.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)

SDD; sıkıştırmalar, genişletmeler ve dönüşümler ile tüm zaman ve ölçeklerde elde edilen işaretlerle ana dalgacık arasında uygunluk sağlar.

$$SDD(a,b) = -\int_{-\infty}^{\infty} X(t)\frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a})dt \quad (4.6)$$

Burada; *X(t)*: işaret, ψ(t): dalgacık, *b*: öteleme (zaman) parametresi olup farklı frekans seviyelerinde ayrışım filtrelerini tanımlar ve *a*: ölçekleme (frekans) parametresi olup her seviye için ayrışım filtrelerini ölçeklendirir. İşaret ve dalgacık iyi eşleşmişse, aralarındaki ilişki (korelasyon) yüksek olur. Dalgacık türü, uygulamalara bağlı olarak seçilir. Dalgacık yüksek oranda sıkışık olduğunda, işaretin yüksek frekans detaylarını elde eder. Dalgacık tamamen genişse, dalgacığın uzunluğu işaretin uzunluğu ile daha uygun benzerlik sağlar ve böylece işaretin düşük frekans eğilimleri ortaya çıkar.

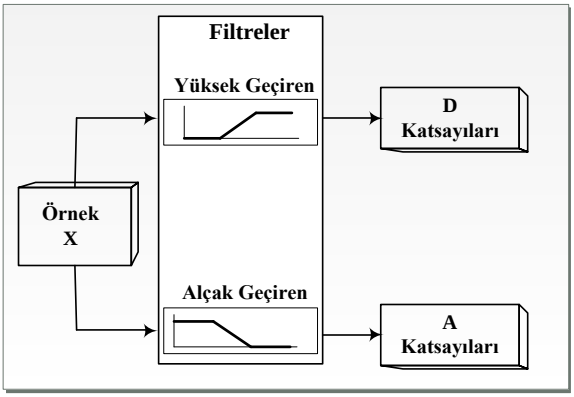
4.2.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD)

SDD'nin hesaplama yükü ve dönüşümü sağlamak için kullandığı bilgi miktarı, oldukça büyüktür. Daha etkili bir yol ADD olup, ana dalgacığın sadece belirli genişlemelerinde işarete bakar. ADD'de, 2'nin katları halinde ölçekler ve ötelemeler seçilerek daha etkin ve doğru analizler elde edilir. ADD'de, ölçek parametresi ve dönüşüm parametresinin ayrık değerleri ele alınır. SDD, sonsuz sayıda girişe ihtiyaç duyduğundan bilgisayar analizi için uygun değildir. Bilgisayar analizleri için (4.7)'deki ADD kullanılır.

$$ADD(m,n) = 2^{-m/2}\int X(t)\psi(2^{-m}t - n)dt \quad (4.7)$$

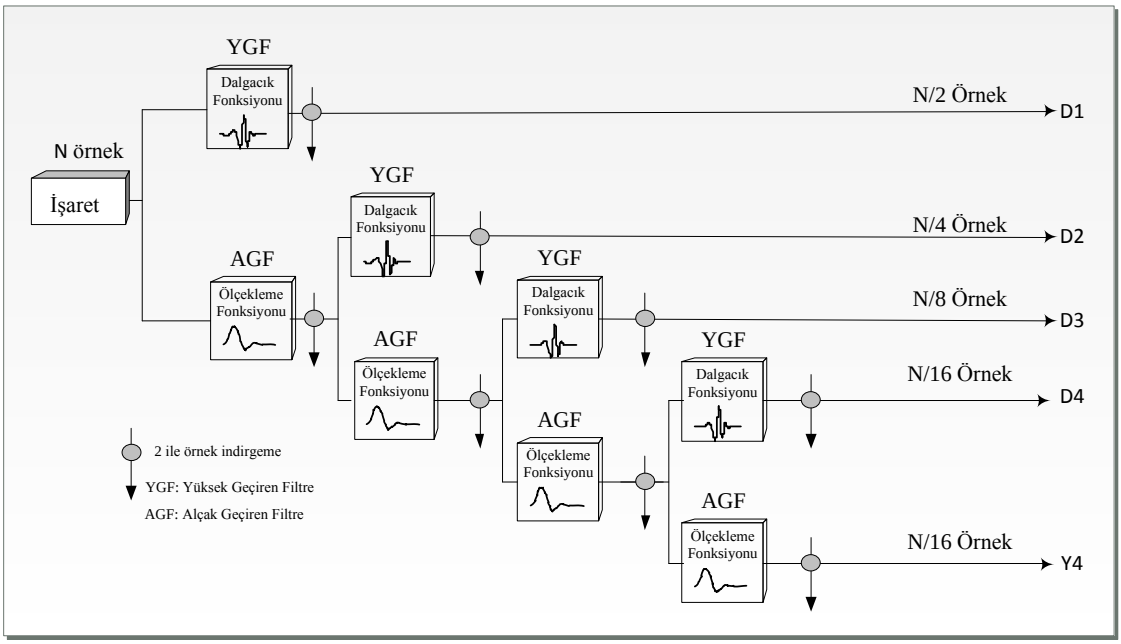
Burada; *m*: ölçeklemeyi (frekansı) ve *n*: ötelemeyi (zamanı) gösterir. Bu işlemi gerçekleştirmek için uygulanan etkin bir yol, 1989'da Mallat tarafından filtreler kullanılarak geliştirilmiştir [92]. Mallat algoritması, işaret işleme yöntemleri arasında, iki kanal alt bant kodlayıcı olarak bilinen klasik bir yoldur. Bu işlem, hızlı DD yapan çok pratik bir filtre algoritmasıdır. DD'nin bu filtre algoritmasında yaklaşıklar; yüksek ölçekli ve düşük frekanslı bileşenleri göstermektedir. Detaylar ise; düşük ölçekli ve yüksek

frekanslı bileşenleri temsil etmektedirler. Böylece, incelenecek bir *X* işareti, Şekil 4.2'de verildiği gibi birbirini tümleyen alçak ve yüksek geçiren filtrelerden geçirilerek, alçak *Y* ve yüksek *D* frekanslı bileşenlerine ayrıştırılır. Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi, sayısal bir işaret üzerinde DD analizi yapıldığında, başlangıçtaki işaretin örnek sayısından, yaklaşık iki kat fazla veri ortaya çıkar. Bu veri sayısı artışını önlemek için, her bir filtre çıkışında örnekleme frekansı genellikle yarıya düşürülür.



Şekil 4.2. ADD'nin tek seviyeli filtre algoritması

ADD'de, çok çözünürlüklü ayrıştırma işlemi ile analizi yapılan işarete ikiden fazla alt frekans bantlarına ayrıştırma işlemi de gerçekleştirilebilir. Böylece, incelenecek işaret daha az çözünürlüklü birçok alt bileşenine ayrılacaktır. Bu ayrıştırma işlemi, işaretin yaklaşık bileşeninin aynı işlem ile tekrar alt bantlarına ayrıştırılması ile gerçekleştirilir. Bu ayrıştırma işleminde, ayrıştırmanın tekrarlamalı olmasından dolayı, teoride bu işlem sınırsız olarak devam ettirilebilir. Fakat gerçekte ayrıştırma ancak, yaklaşıklar bir tek örneğe veya bir tek piksele denk düşene kadar devam ettirilebilir. Uygun bir seviye seçiminin belirlenmesinde, işaretin yapısı ve her bir bileşenin frekans bant seviyeleri dikkate alınmalıdır. Şekil 4.3'de, dört seviyeli çok çözünürlüklü analiz işlemi ile *N* örnekli bir *X* işaretin, alçak ve yüksek geçiren filtreler yardımıyla alt bant frekans bileşenlerine (yaklaşık ve detaylarına) ayrılması işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Dört seviyeli dalgacık çözünürlük ağacı.

İncelenen işaret X, örneğin dördüncü seviyede yaklaşık ve detay bileşenleri cinsinden ifade edilmek istenirse, (4.8)'deki gibi formülize edilebilir.

$$X = Y4 + D4 + D3 + D2 + D1 \tag{4.8}$$

Burada; *D1*, *D2*, *D3* ve *D4* her seviyenin yüksek frekans bantlarının detay katsayılarını, *Y4* ise düşük frekans bandının yaklaşık katsayısını temsil etmektedir. Her frekans bandı, ayrı bir şekilde analiz edilebilir. Ayrıca, yeni bir işaret sentez etmek için tekrar birleştirilebilir.

4.3. Hilbert Huang Dönüşümü (HHD)

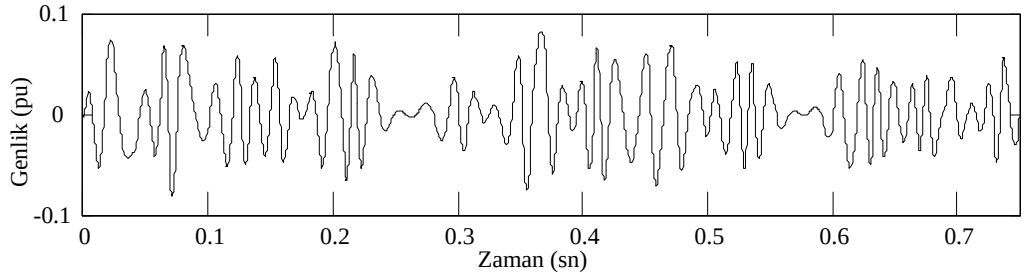
HHD, özellikle doğrusal olmayan ve durağan olmayan işlem ve işaretleri analiz etmek için geliştirilmiştir. Bu dönüşüm, AKA ve Hilbert Spektral Analizi metotların birleşimi ile elde edilen tekniğe verilen isimdir. İşaretin analiz edilebilmesi için anlık frekans değerlerinin zamana göre değişimi elde edilmelidir. Herhangi bir işaretin anlık frekans değerleri Hilbert dönüşümü ile işaretin bir anda sadece bir frekans içeriğine sahip olduğu varsayımı kullanılarak bulunabilir. Bu problemi çözebilmek için genellikle İMF yöntemi kullanılır. İMF yöntemi kullanılarak işaret, her biri anlık olarak tek frekans içeriğine sahip fonksiyonların toplamı şeklinde elde edilir. AKA metodu yardımıyla işaret, iteratif bir işlem kullanılarak İMF'lere ayrılır [93].

4.3.1. İçsel Mod Fonksiyonları (İMF)

İMF, anlık olarak tek frekans içeriğine sahip bir fonksiyondur ve basit bir salınım modunu simgeler. Bu açıdan FD'de kullanılan basit harmonik fonksiyonlar ile benzeşmektedir. Bir İMF, aşağıdaki iki koşulu sağlayan bir fonksiyondur:

- Veri setinin tümünde, uç değerlerin sayısı ile sıfır geçişlerinin sayısı ya eşit olmalı ya da en fazla bir farklı olmalıdır.
- Herhangi bir noktada, yerel maksimumlarca tanımlanan ve yerel minimumlarca tanımlanan zarfların ortalama değeri sıfırdır.

Yerel simetriyi sağlamak için gerçek yerel ortalama yerine, yerel maksimum ve yerel minimumlar tarafından tanımlanan zarfların yerel ortalaması kullanılır. Bu fonksiyonlara İMF adı verilmesinin nedeni, her bir fonksiyonun veri içerisine gömülü olan bir salınım modunu temsil etmesidir. Yukarıda verilen 2 koşulla tanımlanan İMF'ler, sadece bir salınım modunu içerir ve birbiri üzerine binmiş karmaşık dalgalara izin verilmez. Tipik bir İMF Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Tipik bir İMF değişimi.

Karmaşık bir işaret için, herhangi bir zaman anında muhtemelen birden fazla anlık frekans bilgisi söz konusu olacaktır. Başka bir ifadeyle incelenecek olan işaret çok bileşenli olacaktır ve bu işareti her biri tek bileşenli olan İMF'lere ayırmak gerekecektir. Bu işlemi gerçekleştirmek için gereken AKA yöntemi aşağıda sunulmuştur.

4.3.2. Ampirik Kip Ayrışımı Yöntemi (AKA)

AKA, herhangi bir karmaşık veri seti içerisinde sonlu sayıda İMF elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Veri setinin İMF'lerine ayrıştırılma işlemi uyarlanabilir bir yöntem olduğu için çok verimlidir ve verilerin zaman düzlemindeki yerel

karakteristiklerine dayandığı için doğrusal olmayan ve durağan olmayan işlemlere uygulanabilir. İşaret İMF'lerine ayrıştırıldıktan sonra her bir İMF'ye Hilbert Dönüşümü uygulanarak, Hilbert Spektrumu adı verilen enerji frekans-zaman dağılımını oluşturmak mümkündür.

İMF'ler, karmaşık işareti oluşturan salınımlar olmaları sebebiyle, FD'de kullanılan basit harmonik fonksiyonlar ile benzerlik gösterir. Ancak İMF'ler çok daha genel bir yapıya sahiptir. FD'deki basit harmonik bileşenlerde kullanılan sabit genlik ve frekans yerine bir HHD'deki İMF'ler, zamana göre değişim gösteren genlik ve frekans değerlerine sahip olabilir. Bu tanımlar ışığında, herhangi bir işaret aşağıdaki adımlar izlenerek İMF'lerine ayrıştırılabilir:

- *1. aşama:* Asıl işaret başka bir değişkene atılır, $g_i(t) = x(t)$,
- *2. aşama:* İşaretin $g_i(t)$, tüm yerel uç değerleri belirlenir. Yerel maksimumlar yukarı zarfı $E_g^+(t)$, oluşturacak şekilde kübik oluk doğrusu (cubic spline) ile birleştirilir. Benzer şekilde birleştirilen yerel minimumlarda, aşağı zarfı $E_g^-(t)$, oluşturur,
- *3. aşama:* Oluşturulan yukarı ve aşağı zarfların aritmetik ortalaması alınarak $g_i(t)$'den çıkarılır,

$$m(t) = \frac{\left(E_g^+(t) + E_g^-(t)\right)}{2} \tag{4.9}$$

$$g_i(t) = g_i(t) - m(t) \tag{4.10}$$

- *4. aşama:* Elde edilen işaretin, İMF olma şartlarını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Şartların sağlanması durumunda $g_i(t)$, *i*'inci İMF olarak kaydedilir ve 5. aşamaya geçilir, değilse 2. aşamaya dönülür.
- *5. aşama: i*'inci İMF elde edildikten sonra kalan işaret, $r_i(t)=x(t)- g_i(t)$, incelenir. Eğer kalan işaretten başka bir İMF elde edilemeyecekse, işlem bitirilir. İMF elde etme işlemi bitmediyse, yeni İMF bulunabilmesi için kalan işaret kullanılır $g_i+1(t)=r_i(t)$, ve 2. adıma geri dönülür.

Sonuç olarak *N* adet İMF elde edildiği varsayılırsa, *N*- İMF ve bir kalan şeklinde ayrıştırılmış olan işaret aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N} g_i\,(t) + r_N \tag{4.11}$$

4.3.3.Hilbert Dönüşümü

HHD'nin ikinci aşamasında, AKA yöntemi yoluyla elde edilen İMF'lere Hilbert dönüşümü uygulanır ve sonuç olarak gerçek işaretten analitik işaret elde edilir. Hilbert dönüşümü $v_i(t)$, $g(t)$ işaretinin $1/\pi t$ ile konvolüsyonu olarak tanımlanabilir ve (4.12)'deki biçimde elde edilir. Bu sanal kısmın kullanılması ile elde edilen analitik işaret ise (4.13)'te verilmiştir.

$$v_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \tag{4.12}$$

$$z_i(t) = g_i(t) + j v_i(t) \tag{4.13}$$

Hilbert dönüşümü sonucunda elde edilen analitik işaretin; genliği $G_i(t)$ (4.14)'de, fazı $\theta_i(t)$ (4.15)'de ve anlık frekansı $w(t)$ ise (4.16)'da verilen bağıntılarla hesaplanır.

$$G_i(t) = \sqrt{g_i(t)^2 + v_i(t)^2} \tag{4.14}$$

$$\theta_i(t) = tan^{-1}\left(\frac{v_i(t)}{g_i(t)}\right) \tag{4.15}$$

$$w_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{2\pi d(t)} \tag{4.16}$$

Bu durumda orijinal işaretten, $r_N(t)$ gürültüsü çıkarıldıktan sonra aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N} G_i\,(t) e^{j \int w_i(t) dt} \tag{4.17}$$

(4.17)'de verilen eşitlik, aynı zamanda genlik ve anlık frekansı üç boyutlu uzayda zamanın fonksiyonu olarak gösterilir. Bu durumda İMF'ler için zamana bağlı genlik $G(t)$, ve anlık frekans $w(t)$, değerleri bulunabilmekte ve zaman-frekans düzleminde genlik

değeri 3. boyut olarak eklenebilmektedir. Bu şekilde ifade edilebilen genliğin zaman-frekans dağılımı, Hilbert Genlik Spektrumu olarak adlandırılır.

5. FPGA TABANLI GÜÇ KALİTESİ TANIMA SİSTEMLERİ

Güç kalitesi problem türlerinin belirlenmesi, güç kalitesi problemlerinin çevrimiçi olarak sınıflandırılması, sınıflandırılan verilerin bir veritabanında kayıt altına alınması; güç kalitesi alanında durum izleme, iyileştirme, çözüm üretme ve gelecekteki planlama alanlarının süregelen bir konusudur. Akıllı hesaplamaya dayalı yöntemler kullanılarak, güç kalitesi problem türlerinin belirlenmesi oldukça yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır [40,42,44,46]. Bu tez çalışmasında kullanılan akıllı hesaplamaya dayalı yöntemlerin hem gömülü sistemler ile gerçekleştirilmesi hem de çevrimiçi olarak sınıflandırma işlemlerinin yapılması, literatürde kullanılan benzer yöntemlere göre oldukça farklı ve yeni bir yaklaşımdır.

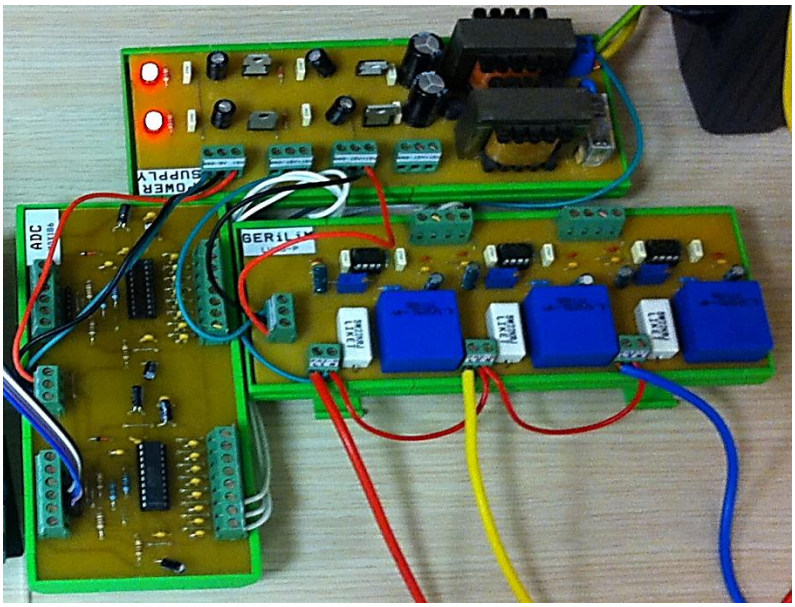
Tezin bu bölümünde, güç kalitesi problemlerinin teşhisi için çevrimiçi ve çevrimdışı yapıya sahip farklı yöntemler sunulmaktadır. Çevrimiçi tanıma sistemlerinde, üç farklı tanıma yöntemi FPGA ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler; FD, DD ve HHD tabanlı sinyal işleme algoritmalarını içermektedir. Sinyal işleme sonrasında elde edilen özellik vektörleri, FPGA içerisine gömülen sınıflandırıcıya uygulanarak GKO ile GKB türleri sınıflandırılmış ve elde edilen sonuçlar bilgisayar ortamına anlık olarak aktarılmıştır. Çevrimdışı tanıma sistemlerinde ise FPGA ortamından elde edilen sinyallere ait özellik vektörleri, bilgisayar ortamına aktarılarak farklı sınıflandırıcılar ile değerlendirilmiştir.

5.1. Tanıma Sistemlerinin Yapısı

Gerçekleştirilen FPGA tabanlı tanıma sistemlerinin genel yapısı, donanım ve yazılım olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Donanımsal yapı; sinyal giriş kartı, FPGA ve bilgisayar elemanlarından oluşur. Yazılım aşaması ise FPGA ve grafiksel ara yüz yazılımlarını içermektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde donanımsal yapılardan olan sinyal giriş kartı ve FPGA, yazılımsal yapı olarak da grafiksel ara yüz programı hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

5.1.1. Sinyal Giriş Kartı

Bu kart, şebeke üzerinden gerekli gerilim bilgilerini elde etmek ve bu bilgileri FPGA cihazına aktarmak için tasarlanmıştır. Giriş kartında, FPGA cihazına uygun gerilim verileri elde etmek için gerekli gerilim dönüştürücüleri ve ADC entegresi kullanılmıştır. Tasarlanan sinyal giriş kartının görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir.



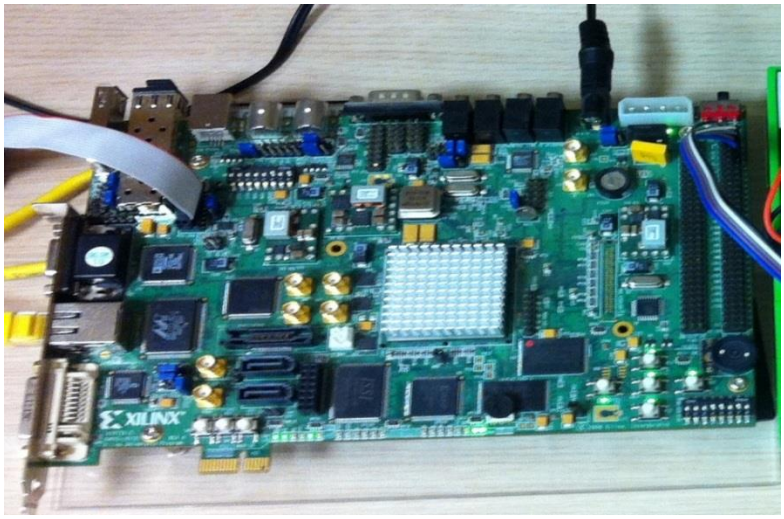
Şekil 5.1. Tanıma sistemi için tasarlanan sinyal giriş kartı.

Giriş kartı; besleme modülü, gerilim dönüştürücü modülü ve ADC modülü olmak üzere üç alt modülden oluşmaktadır. Besleme modülü, ADC ile gerilim dönüştürücü devresi için gerekli olan ±5 V ve ±15 V'luk gerilim çıkışı sağlamaktadır. Gerilim dönüştürücü modülü ise şebeke gerilimini ADC'nin işleyebileceği seviyeye dönüştürmek için kullanılmaktadır. Bu modülde %99.2 gibi yüksek doğruluk oranına, çok yüksek doğrusallığa, yüksek band genişliğine ve düşük cevap zamanına sahip LV-25P gerilim sensöründen üç faz için üç adet kullanılmıştır. Gerilim dönüştürücü devre üzerinde bulunan ayarlı dirençler, dönüştürülen üç faz gerilimlerin tepe değerlerini ayarlamada kullanılmıştır. Giriş kartının son modülü ise MAX186 ADC Entegresi ile oluşturulan ADC alt modülüdür. ADC alt modülü, analog gerilim sinyallerini belirlenen ölçekleme oranı veya karşılaştırma şemasına göre bilgisayarın anlayabileceği sayısal ifadelere dönüştürür. Dönüştürme esnasında, analog giriş sinyali örneklenir ve sabit tutulur. ADC'nin çözünürlüğü bit sayısı ile ifade edilir ve sistemin duyarlılığını etkiler. 12 bitlik bir analog dijital dönüştürücü, 1/4096

çözünürlüğe sahip olup, dönüştürme işlemi 0.01µs'den az sürer. MAX186 entegresi; 12 bit çözünürlüğe, 8 kanallı yüksek bant genişliğine ve yüksek dönüştürme hızında seri ara yüze sahip bir analog dijital dönüştürücü entegresidir. Bu aygıt, bipolar +5 V veya unipolar ± 5 V besleme ile dönüştürme işlemi yapmaktadır. ADC alt modülü, gerilim dönüştürücü modülünden gelen analog sinyal değerlerini doğrudan FPGA cihazına seri bir ara haberleşme ara yüzü ile aktarmaktadır. Max186 ADC entegresinin çalışma aralığına göre indirgenen şebeke sinyalleri, entegrenin analog girişlerine ayrı ayrı uygulanmaktadır.

5.1.2. FPGA Geliştirme Ortamı

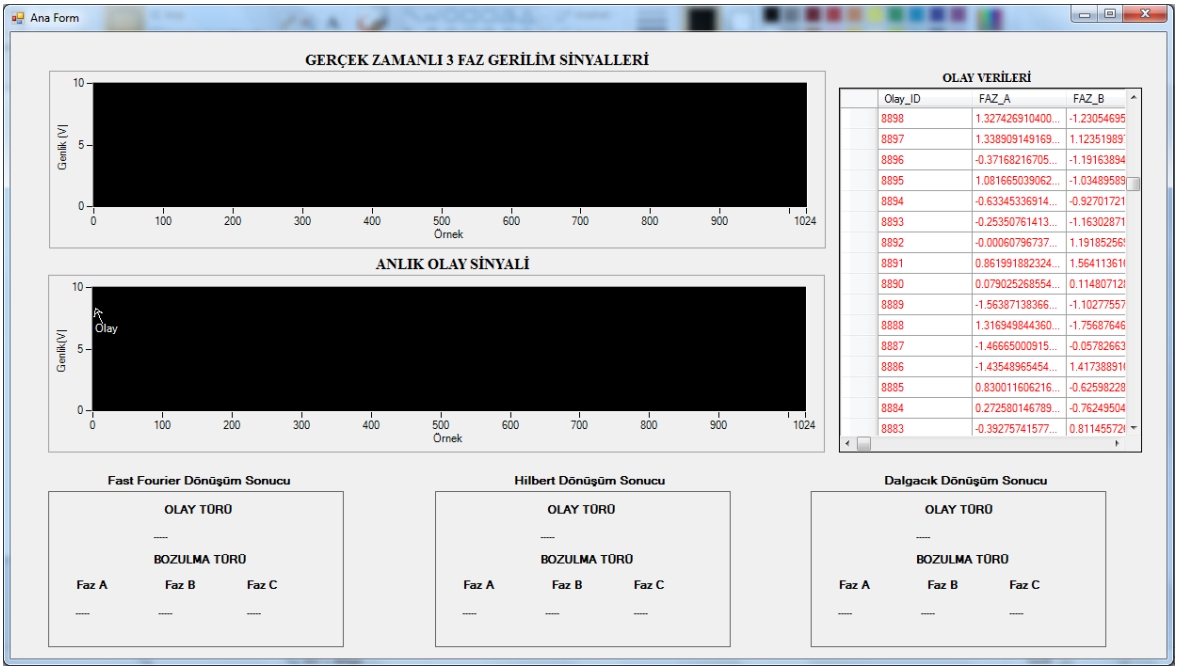
Bu çalışmada, Xilinx firması tarafından üretilen Virtex ailesinin Virtex5 LX110T modeli olan FPGA geliştirme kiti kullanılmıştır. Şekil 5.2'de, Virtex5 FPGA kartının üstten görünüşü verilmiştir. Giriş kartından elde edilen sayısal gerilim bilgileri, FPGA kartına giriş olarak uygulanmıştır. FPGA ortamında giriş sinyalleri için sinyal işleme, özellik çıkarımı ve sınıflandırma algoritmalarını içeren üç farklı güç kalitesi tanıma sistemi VHDL dili kullanılarak oluşturulmuştur. Birinci güç kalitesi tanıma sisteminde, FD yöntemi kullanılmıştır. İkinci tanıma sisteminde, gerilim sinyallerine DD yöntemi uygulanmıştır. Üçüncü tanıma sisteminde ise HHD yöntemi kullanılmıştır. Her üç sinyal işleme yönteminden elde edilen dönüşüm sonuçlarına, özellik çıkarımı işlemi uygulanmış ve üç ayrı özellik vektörü elde edilmiştir. Elde edilen üç ayrı özellik vektörü, her bir tanıma sistemi için ayrı ayrı oluşturulan Karar Ağacı girişine uygulanarak GKO ve GKB'ler sınıflandırılmıştır.



Şekil 5.2. Virtex5 FPGA kartının görünüşü.

5.1.3. Yazılım Arayüzü

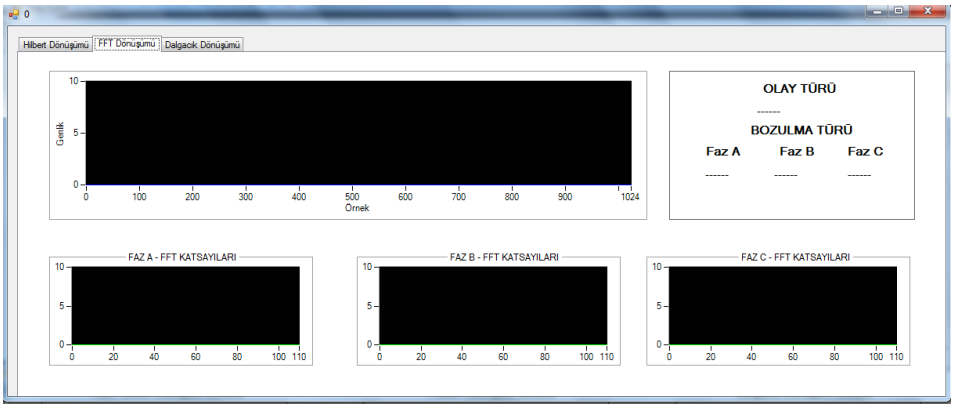
Gerçek zamanlı güç kalitesi tanıma sisteminin önemli bir parçası olan grafiksel arayüz programı, sisteme ait gerilim bilgileri ile çevrimiçi tanıma sonuçlarını görsel olarak izleyebilmek ve bu bilgileri kaydedebilmek için bir platform sunmaktadır. Microsoft Visual Studio 2010 C# programlama dili ile oluşturulan ve grafiksel çizimler için 3. parti bileşenlerin kullanıldığı program, sinyallerin görsel olarak izlenmesinde kullanıcılara farklı seçenekler sunmaktadır. Yazılım arayüz programı, FPGA ortamında gerçekleştirilen üç farklı akıllı tanıma sisteminin parametrelerini ve sonuçlarını anlık olarak göstermektedir. Arayüz programı, bir ana form ile üç farklı tanıma sisteminin parametrelerini ve sonuçlarını gösteren alt formlardan oluşmaktadır. Gerçekleştirilen güç kalitesi tanıma sistemi için hazırlanan grafiksel ana form penceresinin görüntüsü, Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Gerçek zamanlı güç kalitesi problemi tanıma sisteminin grafiksel ana form görüntüsü.

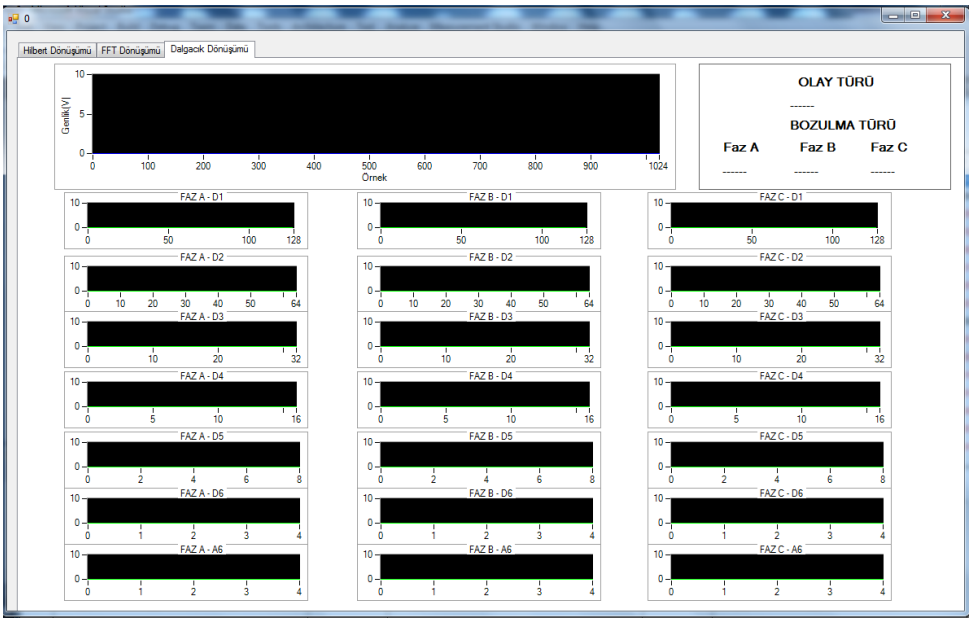
Bu pencere, gerçek zamanlı üç faz gerilim sinyallerinin anlık dalga şekillerini gösteren grafik ekranına ve FPGA ortamında DD yöntemiyle tespit edilen anlık GKO sinyaline ait grafik ekranına sahiptir. Ana form penceresinde FPGA ortamında tasarlanan üç farklı tanıma sistemine ait GKO ve GKB sonuç değerleri de görülebilmektedir. Ayrıca, ana form ekranında veritabanına kayıt edilen her bir güç kalitesi problemine ait veri ekranı bulunmaktadır. Veritabanına kayıt edilen her bir güç kalitesi problemi için olay ID'si, ham

üç faz gerilim verileri, üç farklı tanıma algoritmasından elde edilen üç farklı özellik verileri ve tanıma sonuçlarına ait bilgiler içermektedirr. Ana form penceresinde, olay verileri ekranında yer alan her bir olay verisine ait sekmeye tıklandığında, üç farklı tanıma sisteminin parametrelerini ve sonuçlarını gösteren üç alt form penceresi açılmaktadır. Şekil 5.4'de verilen birinci alt form penceresi, FD tabanlı tanıma sistemine ait sonuçları ve GKO verilerinin FD katsayılarını göstermektedir.



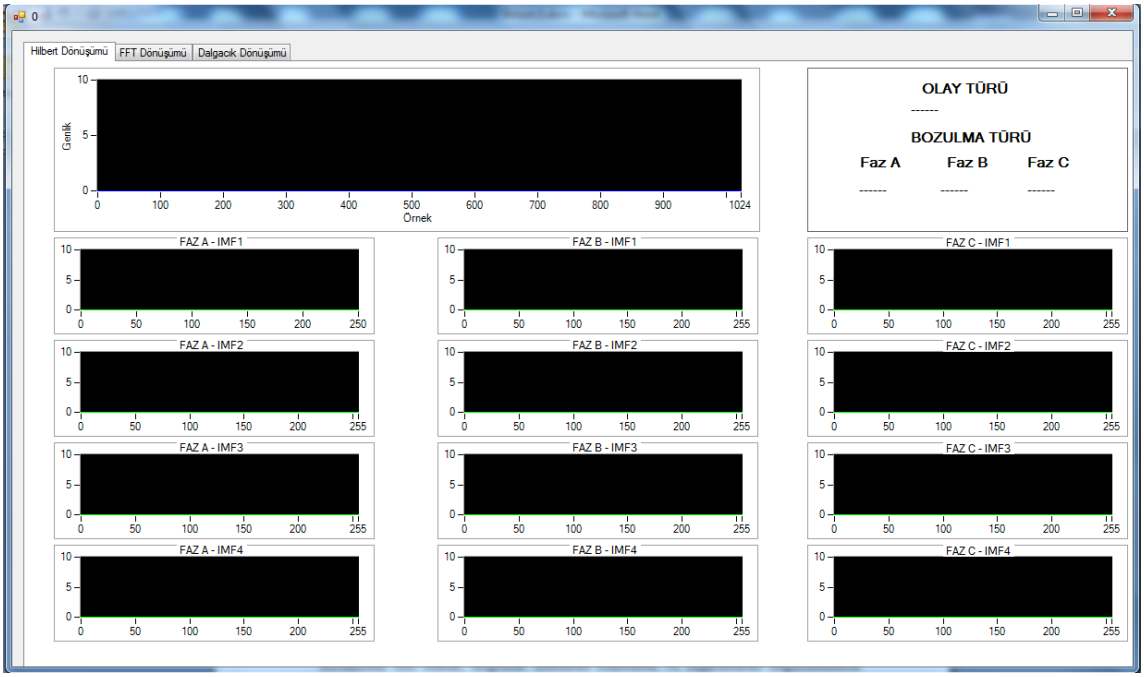
Şekil 5.4. FD tabanlı tanıma sistemine ait alt form penceresi.

Şekil 5.5'de verilen ikinci alt form penceresi, DD tabanlı tanıma sisteminin sonuçlarını ve GKO verilerine ait DD seviye katsayılarının dalga şekillerini göstermektedir.



Şekil 5.5. DD tabanlı tanıma sistemine ait alt form penceresi.

Üçüncü alt form penceresi ise HHD tabanlı tanıma sisteminin sonuçlarını ve GKO verilerine ait HHD'nin IMF katsayılarını göstermektedir.

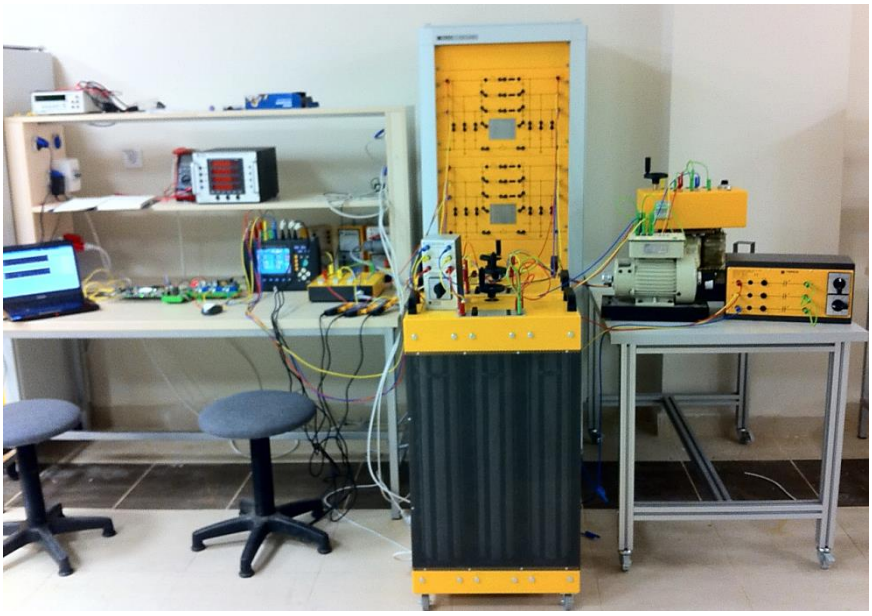


Şekil 5.6. HHD tabanlı tanıma sistemine ait alt form penceresi.

5.2. Deney Düzeneği ve Güç Kalitesi Olaylarının Elde Edilmesi

Bu alt bölümde, tez çalışmasında gerçekleştirilen FPGA tabanlı akıllı tanıma sistemlerini test etmek, doğruluk oranlarını belirlemek ve başarımlarını değerlendirmek için laboratuvar ortamında oluşturulan deneysel düzenek ve oluşturulan güç kalitesi olayları hakkında bilgiler verilmiştir. Deneysel düzenek, Tunceli Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünün Elektrik Tesisleri laboratuarında oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen prototip güç sistemi modeli üzerinden, gerçek zamanlı olarak akıllı tanıma sistemlerinin testleri yapılmış ve çevrimdışı akıllı tanıma sistemleri için veriler elde edilmiştir.

Şekil 5.7'de, oluşturulan prototip güç sistemi modeli ve akıllı tanıma sistemi elemanlarını içeren deney düzeneğinin laboratuar ortamındaki görüntüsü verilmiş olup, deney düzeneği ve GKO'ların elde edilmesine ilişkin bilgiler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5.7. Laboratuar ortamına kurulan deney düzeneği.

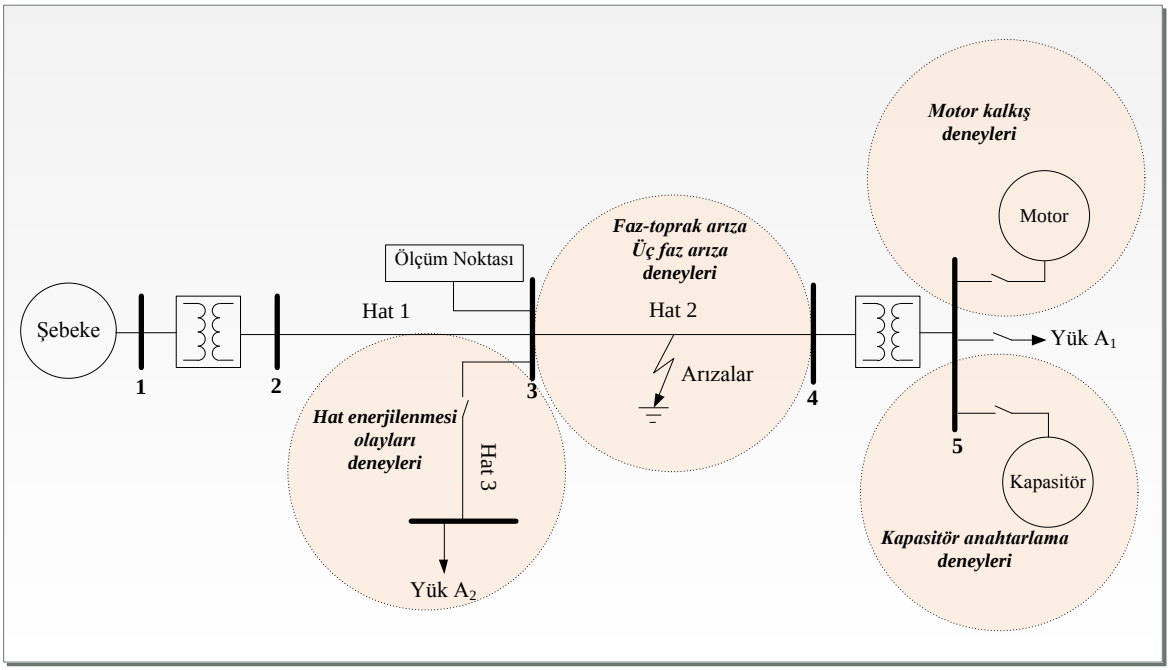
5.2.1. Prototip Güç Sistemi Modeli

Yapılan deneysel çalışmada; iletim hattı modelleri, ayarlı R-L-C yükleri, transformatörler, anahtarlar ve ölçüm cihazları kullanılarak prototip güç sistemi modeli oluşturulmuştur. Bu model ile güç sistemlerinde meydana gelen anahtarlama ve arıza türündeki GKO türleri oluşturulmuştur. Anahtarlama olayları için güç sistemlerinde oldukça yaygın olarak karşılaşılan, kapasitör anahtarlaması ile hat enerjilenmesi olayları seçilmiştir. Ayrıca, güç sisteminde sıklıkla karşılaşılmayan ancak tasarlanan akıllı tanıma sistemlerinin belirlenen özel bir olayı ayırt edebilme özelliğini test etmek için motor başlangıç olayı diğer bir anahtarlama olayı olarak seçilmiştir. Arıza olayları olarak, güç sistemlerinde meydana gelen arızaların yaklaşık %80'ini oluşturan ve asimetrik bir arıza türü olan tek faz-toprak arızası [95] ile simetrik bir arıza türü olan üç faz arıza türü, iki ayrı sınıf olarak seçilmiştir.

5.2.2. Güç Kalitesi Olaylarının Oluşturulması

Güç sistemlerinde meydana gelen GKO'ların oluşturduğu GKB türlerinin genliklerindeki değişimler; olayın türüne, sistem parametrelerine, yük parametrelerine ve oluşum parametrelerine (oluşum anı, oluşum direnci, vb.) bağlıdır. Bu tez çalışmasında oluşturulan prototip güç sistemi modeli üzerinden geniş parametre aralıklarında GKO

türleri oluşturulmuştur. Şekil 5.8'de, oluşturulan prototip güç sistemi modelinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Prototip güç sistemi modelinin yapısı

Oluşturulan prototipte, iki ayrı ayarlı transformatör kullanılmıştır. Bunlardan birincisi şebeke tarafında, diğeri ise yük tarafında kullanılmıştır. Bu transformatörler, 220 voltluk şebeke gerilimini 0-250 V aralığında istenilen değerlere ayarlayabilen oto transformatörlerdir. Bu transformatörler özellikle deneysel sistemi, şebeke gerilimlerinden izole edebilmek ve yük gerilimlerini ayarlayabilmek için kullanılmıştır.

Prototip güç sistemi modeli üzerinde, üç ayrı iletim hattı modeli oluşturulmuştur. Hat-1 ve Hat-3 modellerinde, 50 km'lik hat modelleri kullanılmıştır. Hat-2 modelinde ise 50 km'lik hat modelinin yanı sıra ayarlı R-L elemanları kullanılarak 0-50 km aralığına sahip ayarlanabilir uzunlukta hat modeli oluşturulmuştur. Böylece, Hat-2 üzerinde oluşturulan iki model arasında arızalar oluşturulmuş ve hat uzunlukları değiştirilerek farklı arıza mesafelerinde arıza türü GKO'lar elde edilmiştir. Ayrıca, arıza oluşumlarında ayarlı R elemanı kullanılarak farklı arıza direnç parametrelerine sahip GKO'lar elde edilmiştir.

Sistemde ayrıca, ayarlı R-L elemanları kullanılarak yük modelleri oluşturulmuştur. R-L değerleri ayarlanarak, değişken yük parametreleri ile GKO'lar elde edilmiştir.

Prototip model üzerinde ayarlı C elemanları kullanılarak, kapasitör anahtarlaması türü GKO'lar oluşturulmuştur. Kapasitör anahtarlaması GKO'ları; değişik C değerleri, farklı oluşum açıları ve değişken yük değerlerine ait geniş parametre aralıklarında elde edilmiştir.

Hat enerjilenmesi ve motor kalkış GKO türleri, güç sistemi modeli üzerinde farklı oluşum açıları ve değişken yük değerlerine sahip geniş parametre aralıklarında oluşturulmuştur.

Güç kalitesi olay oluşturma süreci, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama, gerçek zamanlı akıllı tanıma sistemlerinin eğitiminde kullanılmak üzere olayların oluşturulmasıdır. Bu aşamada elde edilen olay verileri ile akıllı tanıma sisteminin eğitim aşamasına ait tasarımlar gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise prototip sistem üzerinden güç kalitesi olayları oluşturularak, akıllı tanıma sistemlerinin gerçek zamanlı testleri yapılmıştır. Her iki aşamada oluşturulan olaylar, FPGA tabanlı tanıma sistemi tarafından tespit edilerek FPGA ortamına ve buradan da bilgisayar veri tabanına kaydedilmektedir.

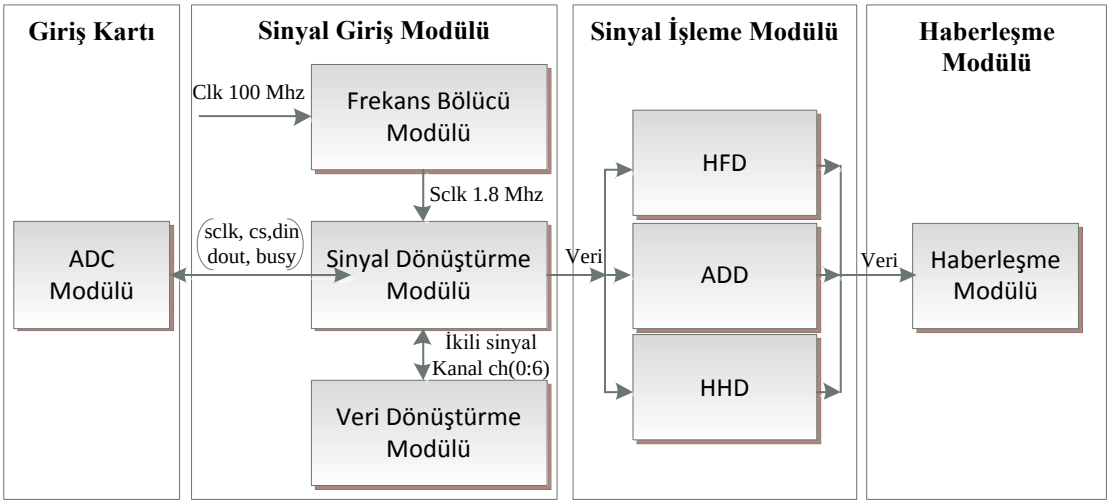
5.3. FPGA Tabanlı Algoritmalar

FPGA ortamında gerçekleştirilen tanıma sistemlerinin hatasız ve sürekli çalışması, sistemin tanıma performansı açısından oldukça önemlidir. Böylece, tanıma sistemleri için FPGA ortamında gerçekleştirilen gömülü yazılımların etkili, hızlı ve güvenilir bir yapıya sahip olması gerekir. Bu tez çalışmasında tasarlanan tanıma sistemlerinin FPGA ortamında gerçekleştirilmesinde, VHDL donanım programlama dili kullanılmıştır.

FPGA ortamında gerçekleştirilen gömülü yazılım algoritmaları genel olarak sinyal giriş, bilgisayar haberleşme ve sinyal işleme olmak üzere. üç alt modüle ayrılır.

5.3.1. Sinyal Giriş Modülü

Bu modülün temel işlevi, gerilim sinyal algılayıcı devresinden belirli bir örnekleme frekansına sahip gerilim bilgilerini elde etmektir. Elde edilen gerilim bilgileri, sinyal işleme modüllerinin girişine uygulanmaktadır. Ayrıca, ADC entegresine ait giriş/çıkış kontrolleri de bu modül içerisinde yapılmaktadır. Şekil 5.9'da, FPGA işlemcisi içerisine gömülen sinyal giriş modülünün çalışma yapısını gösteren blok şeması verilmiştir.

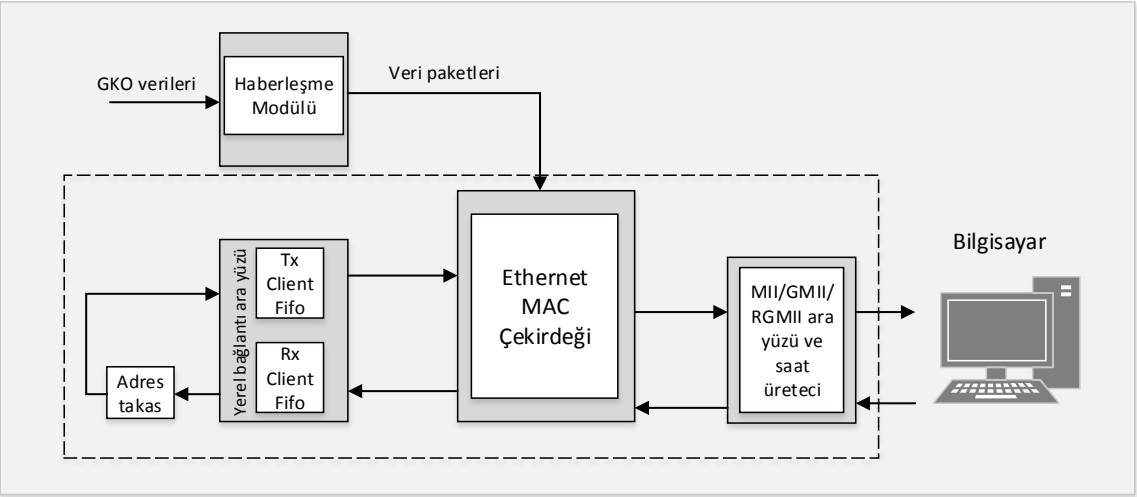


Şekil 5.9. Sinyal giriş modülünün çalışma yapısına ait blok şeması.

FPGA ortamında tasarlanan algoritmaların işletilebilmesi için FPGA için uygun bir sayı formatı olan, 32 bit IEEE-754 kayan noktalı sayı sistemi kullanılmıştır. Böylece, ADC entegresinden elde edilen ikili kodlanmış sayısal bilgiler, 32 bit IEEE-754 kayan noktalı sayı sistemine dönüştürülmüştür. Veri dönüştürme alt modülü, kanallar arasında dolaşım yapılarak elde edilen sinyal verilerine dönüşüm işlemlerinin uygulandığı ve daha sonra verilerin ana modüle aktarımının yapıldığı bir alt modüldür. ADC bloğundan elde edilen sayısal bilgilerin, FPGA ortamındaki sinyal işleme algoritmalarının girişine uygulanmadan önce belirlenmesi gereken diğer bir parametresi de örnekleme frekansıdır. Örnekleme frekansını ayarlama işlemi, frekans bölücü alt modülü içerisinde gerçekleştirilmektedir. Zaman ve frekans düzlemindeki analizlerde sinyalin örnekleme aralığı önemlidir. Nyquist Teoremi olarak da bilinen örnekleme teoremine göre, işlenebilecek en yüksek frekans örnekleme frekansının yarısı kadardır. Hesaplanan en yüksek frekans, Nyquist frekansı olarak bilinir. Frekans spektrumunda bir çakışmayı engellemek için N, ikinin katları olmalı ve veri örnekleme oranı Nyquist örnekleme teoremine göre seçilmelidir [96]. GKO gerilim sinyallerinin frekans bileşenlerinin dağılımı, Fourier tabanlı sinyal işleme algoritmasının kullanılması ve FPGA yazılımlarının verimli olarak işletilebilmesi açısından 6.4 Khz'lik bir örnekleme frekansı seçilmiştir.

5.3.2. Haberleşme Modülü

Haberleşme modülü, FPGA ortamında oluşturulan algoritmalardan elde edilen verilerin bilgisayar ara yüz programına gönderilmesini sağlayan yazılımları içerir. Bu tezde, haberleşme için Ethernet protokolü kullanılmıştır. Xilinx firmasının kendi FPGA cihazları için ürettiği, Tri-Mode Ethernet MAC IP çekirdeği ile 10/100/1000 Mb/s hızlarında Ethernet haberleşmesi sağlamak mümkündür. RS232 seri haberleşmeye göre hız bakımından oldukça büyük avantaj sağlaması nedeniyle, bu çalışmada Ethernet haberleşme ara yüzü tercih edilmiştir. Tanıma sistemi içerisinde tespit edilen GKO verileri ve diğer parametreler, paketler halinde haberleşme modülüne gönderilmektedir. Haberleşme modülü, bu paketleri Ethernet ara yüzüne uygun şekilde aktarımını yapmaktadır. Daha sonra bu paketler, Ethernet ara yüzü ile bilgisayar ortamına gönderilmektedir. Bilgisayar ve FPGA haberleşme yapısını gösteren blok şeması Şekil 5.10'da verilmiştir.

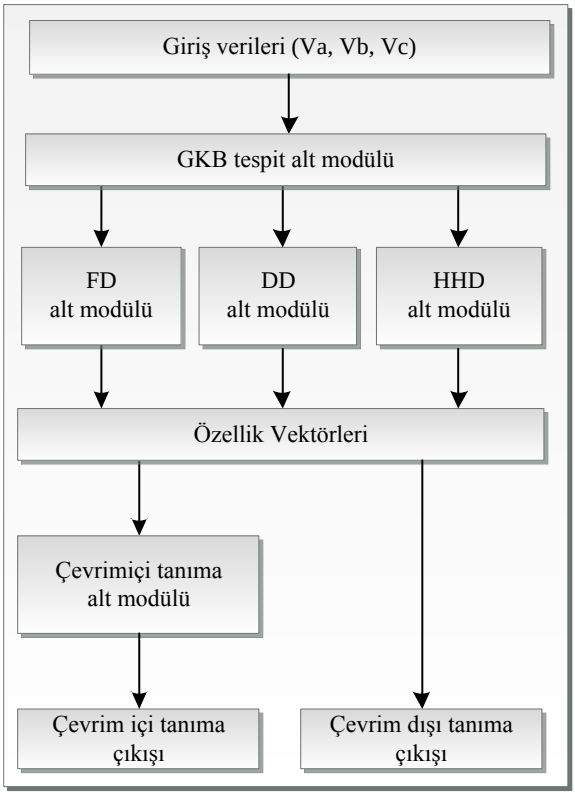


Şekil 5.10. FPGA ile bilgisayar haberleşme yapısını gösteren blok şema.

Bilgisayar ve FPGA arasındaki bağlantı, bir ağ kablosu yardımı ile doğrudan gerçekleşmektedir. Bilgisayar tarafında oluşturulan soket iletişimini içeren yazılım aracılığı ile FPGA tarafından gelen paketlerin ayrıştırılması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu ayrıştırma işleminden sonra elde edilen veriler, veritabanı içerisinde belirlenen formatta kayıt altına alınmaktadır. Ethernet iletişiminin getirdiği hız avantajı sayesinde, bu işlemler gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir.

5.3.3. Sinyal İşleme Modülü

Bu tez çalışmasında tasarlanan çevrim içi ve çevrim dışı güç kalitesi problemi tanıma sistemlerinin gömülü yazılım işlemleri, sinyal işleme modülü içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sinyal işleme modülünün genel blok yapısı Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

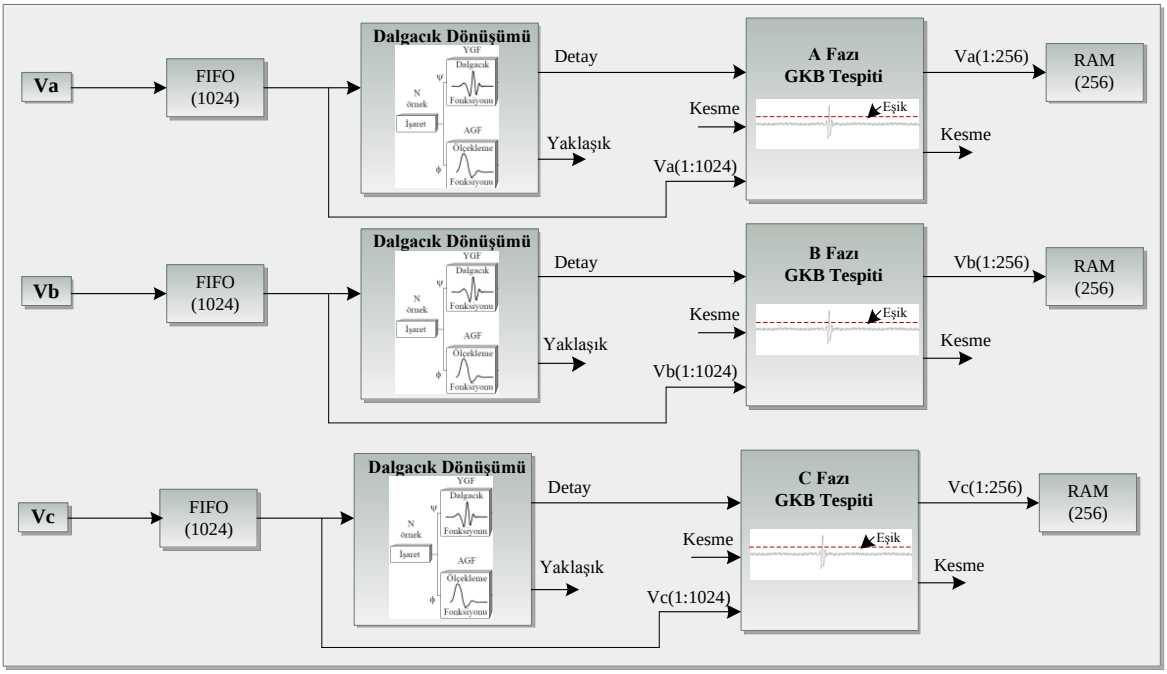


Şekil 5.11. Sinyal işleme modülüne ait genel blok şeması.

Sinyal işleme modülünün girişine, sinyal giriş modülünden elde edilen anlık sayısal gerilim bilgileri uygulanmaktadır. DD tabanlı GKB tespit alt modülü ile anlık üç faz gerilim bilgileri kontrol edilerek, sistemde meydana gelen GKB'ler tespit edilmektedir. GKB bilgileri, üç farklı zaman frekans dönüşümü alt modülüne uygulanarak meydana gelen GKO ve GKB verilerine ait özellik vektörleri elde edilir. Elde edilen özellik vektörleri, çevrimiçi tanıma sisteminin girişine uygulanarak anlık GKO ve GKB türleri belirlenir. Ayrıca, özellik vektörleri bilgisayar ortamına aktarılarak çevrimdışı tanıma sonuçları da elde edilmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde, sinyal işleme modülünde bulunan alt modüllerin yapısı detaylı olarak açıklanmıştır.

5.3.3.1. GKB Tespit Alt Modülü

Bu alt modülde, üç fazlı sistemde meydana gelen bir GKO sonrasında herhangi bir fazda oluşacak olan GKB tespit edilmektedir. Böylece, hem GKO hem de GKB verileri elde edilmektedir. Şekil 5.12'de, GKB tespit alt modülünün blok yapısı verilmiştir.



Şekil 5.12. GKB tespit alt modülünün genel blok şeması.

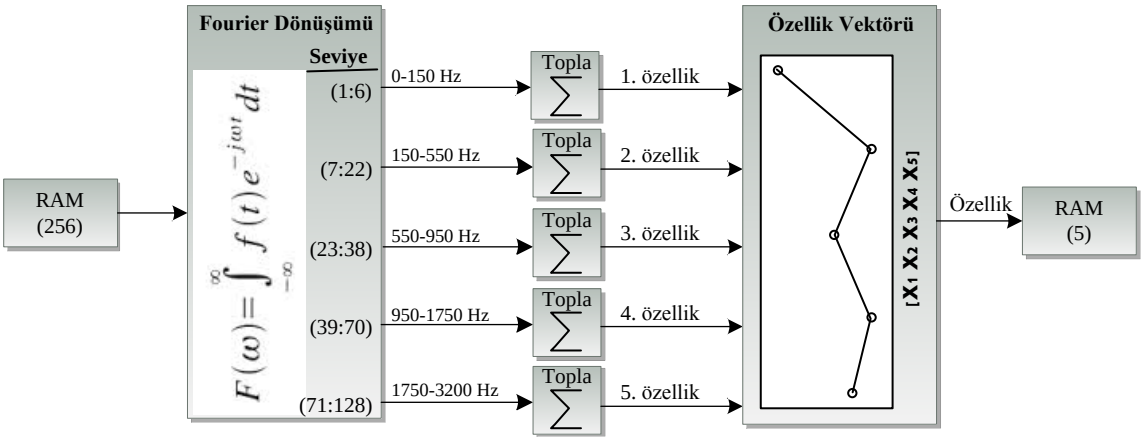
Bu alt modülün girişine, FIFO bellek üzerinde sürekli bir şekilde kayıt altına alınan her bir faza ait anlık gerilim bilgileri kesintisiz olarak uygulanılır. Bellekte her bir faza ait veriler, 8 periyotluk diziler halinde tutulur ve modül girişine aktarılır. GKB tespit alt modülünde anlık 8 periyotluk üç faz gerilim verilerine, tek seviyeli ADD uygulanmaktadır. Dönüşüm sonucu elde edilen detay katsayıları, anlık gerilim verilerinin yüksek frekans bileşenlerini temsil etmektedir. Eğer sistem üzerinde bir olay meydana gelirse, olay gerilim sinyali içerisinde yüksek frekanslı bileşenler bulunacak ve detay katsayılarının değeri artacaktır. Böylece, GKB tespit alt modülünde detay katsayılarının belirli bir eşik değerinin üzerine çıkması, sistemde bir GKB olduğunu göstermektedir. GKB tespit algoritması, her bir faz için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Herhangi bir fazda meydana gelen GKB, o faza ait GKB tespit algoritması tarafından tespit edilmekte ve algoritma, GKB oluşum anında diğer fazlara da kesme bilgisi iletmektedir. Kesme bilgisi etiketi, herbir faz için; GKB tespit

bilgisi ve oluşum anı zaman bilgisini içermekle birlikte sistemde meydana gelen GKB'nin sebebi olan GKO verilerini elde etmek için kullanılır.

Her bir faza ait GKB tespit algoritması, tespit anından sonra veriler üzerinde segmantasyon ve normalizasyon işlemi gerçekleştirmektedir. Segmantasyon işleminde, oluşum anından önce bir periyot ve oluşum anından sonra bir periyot olmak üzere toplam iki periyotluk GKB verisi elde edilir. Normalizasyon işleminde ise iki periyotluk bütün GKB verileri, oluşum anı öncesinin bir periyotluk verilerin maksimum değerine bölünür. Böylece, segmantasyon ve normalizasyon işlemleri ile oluşum öncesi maksimum genlik değeri bir olan iki periyotluk ölçeklendirilmiş veriler elde edilir. Tespit edilen her bir faza ait GKB verileri, üç farklı dönüşüm yönteminde kullanılmak üzere belleğe aktarılır.

5.3.3.2. Fourier Dönüşümü Alt Modülü

Bu modülde, GKB tespit alt modülünden elde edilen üç faz verilerine HFD uygulanmıştır. Dönüşüm sonucunda, harmonik seviye değerleri elde edilmiştir. Ayrıca bu seviye değerleri kullanılarak, FD tabanlı özellik vektörü oluşturulmuştur. Bu alt modül altında, üç fazlı GKO verilerinin her bir fazını oluşturan GKB verilerine HFD uygulanmıştır. FPGA ortamında, HFD uygulaması için Xilinx firması tarafında kullanıma sunulan HFD çekirdeği algoritmaları kullanılmıştır. HFD çekirdeği içerisinde, veri ayrıştırma yöntemi olan Radix-4 algoritması kullanılmıştır. Radix-4, kaynak tüketimi açısından oldukça etkili bir algoritmadır. Bu algoritmada, giriş ve çıkış verileri dönüşüm hesaplama işlemleri ayrı ayrı yapılmaktadır. Bu alt modülün bir fazına ait blok şeması, Şekil 5.13'te verilmiştir. Bu algoritma, üç faz için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. FD alt modülü genel blok şeması.

FD alt modülünde, GKB tespit alt modülü çıkışına ait RAM bloklarından elde edilen her bir faz için 2 periyotluk 256 örnek sayısına sahip GKB verilerine HFD uygulanmaktadır. HFD çekirdeğindeki dönüşüm işlemi tamamlandığında, gerçek ve sanal boyutlara sahip dönüşüm katsayıları elde edilir. Bu katsayılar, harmonik bileşenlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Harmonik bileşenlerin hesaplamasında

$$Har_i = \frac{\sqrt{Xre_i^2 + Xim_i^2}}{Har_1} \tag{5.1}$$

bağıntısı kullanılır. Bu hesaplama işlemi, GKB verilerinin Nyquist frekansı 3.2 kHz'e karşılık gelen 128. harmonik bileşenine kadar yapılmıştır. Elde edilen 128 harmonik bileşeni katsayıları, her bir GKB verisini ayırt edici özelliklerini temsil eden frekans bilgileri içermektedir. Ancak, sahip olduğu veri boyutu sınıflandırıcı sistemler için oldukça büyüktür. Bu nedenle, HFD işleminden elde edilen harmonik katsayılarına özellik çıkarımı işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, belirli frekans bandı arasında bulunan katsayılar toplanmıştır. Gerçekleştirilen özellik çıkarımı işlemi bilgileri, Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. FD alt modülüne ait özellik çıkarımı bilgileri.

Özellik No.	**Frekans Bandı**	**Denklemi**
1	0-150 Hz	$X_1 = \sum_{i=1}^{6} Har_i$
2	150-550 Hz	$X_2 = \sum_{i=7}^{22} Har_i$
3	550-950 Hz	$X_3 = \sum_{i=23}^{38} Har_i$
4	950-1750 Hz	$X_4 = \sum_{i=39}^{70} Har_i$
5	1750-3200 Hz	$X_5 = \sum_{i=71}^{128} Har_i$
GKB çıkış özellik vektörü		$X_H = [X_1\ X_2\ X_3\ X_4\ X_5]$

FD alt modülü çıkışında, üç fazlı sistemin her bir fazını temsil eden GKB verilerine ait 1x5'lik çıkış özellik vektörü elde edilir. GKB verilerinin boyutu 1x256 olduğuna göre, dönüşüm alt modülü çıkışında veri boyutu yaklaşık olarak 1/50 oranında indirgenmiş ve frekans bileşenlerine ait ayırt edici özellikler elde edilmiştir. Üç faza ait GKB verilerinin birleşimini temsil eden GKO verilerinin boyutu ise 1x15'dir. Böylece FD alt modülü çıkışında elde edilen özellik vektörleri, FPGA ortamında organize edilen RAM bloğuna aktarılmıştır.

5.3.3.3. Dalgacık Dönüşümü Alt Modülü

Bu alt modülde, her bir faza ait GKB verilerine ADD uygulanmıştır. FPGA ortamında gerçekleştirilen ADD'de güç kalitesi problemleri tanıma sistemlerinde, diğer dalgacıklara göre oldukça iyi performans gösteren Db4 dalgacığı ana dalgacık olarak seçilmiştir. Db4 dalgacığına ait ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları, dört katsayı içermektedir. Bu katsayılar, Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık katsayıları.

Ölçekleme Katsayıları	Dalgacık Katsayıları
$h_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$g_0 = h_3$
$h_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$g_1 = -h_2$
$h_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$g_2 = h_1$
$h_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$g_3 = -h_0$

ADD'nin her bir adımında, GKB verilerine ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları uygulanır. Böylece, ADD'ye ait detay ve yaklaşık katsayıları elde edilir. Db4 dalgacık fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilen ADD'deki iterasyonlara ait denklemler (5.2) ve (5.3)'de verilmiştir.

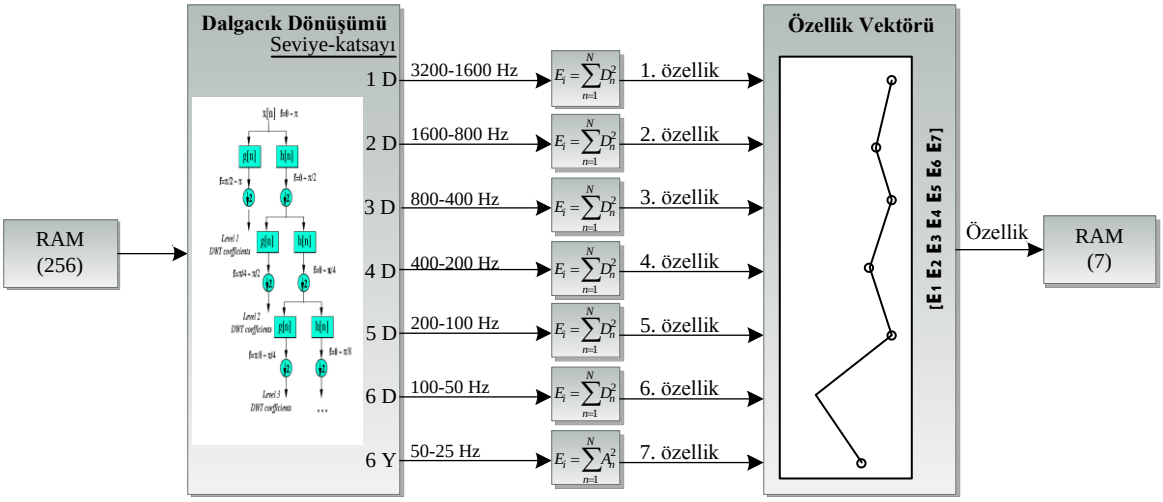
$$a_i = h_0 x_{2i} + h_1 x_{2i+1} + h_2 x_{2i+2} + h_3 x_{2i+3} \tag{5.2}$$

$$c_i = g_0 x_{2i} + g_1 x_{2i+1} + g_2 x_{2i+2} + g_3 x_{2i+3} \tag{5.3}$$

Bu denklemlerde; *a*: detay katsayılarını, *c*: yaklaşık katsayılarını, *x*: GKB giriş verilerini ve *i*: GKB giriş verilerinin örneğini gösterir. Elde edilen detay katsayıları, yüksek frekans bileşenlerini yaklaşık katsayıları da alçak frekans bileşenlerini gösterir. Böylece yapılan dönüşüm işlemi, tek seviyeli bir dönüşüm işlemini temsil eder. Yapılan ADD işlemlerinde, çok çözünürlük analizi yapılmıştır. Temel frekans bileşenlerini temsil eden frekans bandının altıncı seviyede elde edilmesi nedeniyle, altı seviyeli çok çözünürlük analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizde, her bir seviye çıkışına ait yaklaşık katsayılarına ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları tekrardan uygulanmıştır. Şekil 5.14'de, FPGA ortamında VHDL diliyle yapılan ADD işlemine ait kaba kod yapısı verilmiştir. Şekil 5.15'de ise DD alt modülün bir fazına ait blok şeması gösterilmiştir. Bu alt modülde gösterilen blok yapısı, üç faz için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

```
ARCHITECTURE Behavioral OF DWT IS
component X ; sinyal bilgisi
component RAMHI; Yuksek bant
component RAMLO  ; alcak bant
------------------- FILTRE KATSAYILARI-----------------
g0<="00111110111101110100101111000111";
...
-----------------------------------------------------------
TYPE tip is (OKU,HESAPLA,SEVIYE,TAKAS,ENERJI,KATSAYI,DUR)
signal durum:tip;
signal level:integer=0;
Begin
PROCESS(CLK)
Begin
IF rising_edge(CLK) Then
  CASE durum IS
       WHEN OKU=>
              X[i]=tespit[i]; -- 256 örnek al
              DURUM<=HESAPLA;
                Level<=0;
       WHEN HESAPLA=>
     RAMHI[n]=x[j]*h0 + x[j+1]*h1 + x[j+2]*h2 + x[j+3]*h3;
     RAMLO[n]=x[j]*g0 + x[j+1]*g1 + x[j+2]*g2 + x[j+3]*g3;
       DURUM<= SEVIYE;Level<=Level+1;
       WHEN SEVIYE=>
              SEVIYE[k]=RAMHI[n];
               DURUM <=TAKAS;
       WHEN TAKAS=>
              X[i]<=RAMHI[n]; -- Kareleri topla
               IF level=7 THEN DURUM<=ENERJI;
                   ELSE DURUM<=HESAPLA;
       WHEN ENERJI=>
              SEVIYE üzerinde enerji hesapla;
                DURUM<=KATSAYI;
       WHEN KATSAYI=>
              Dalgacık katsayılarını çıkışa yaz;
       WHEN DUR=>
              DRUM<=OKU;
   END CASE
END IF
END PROCESS; END
```

Şekil 5.14. DD alt modülünün VHDL dilindeki kaba kod yapısı.



Şekil 5.15. DD alt modülü genel blok şeması.

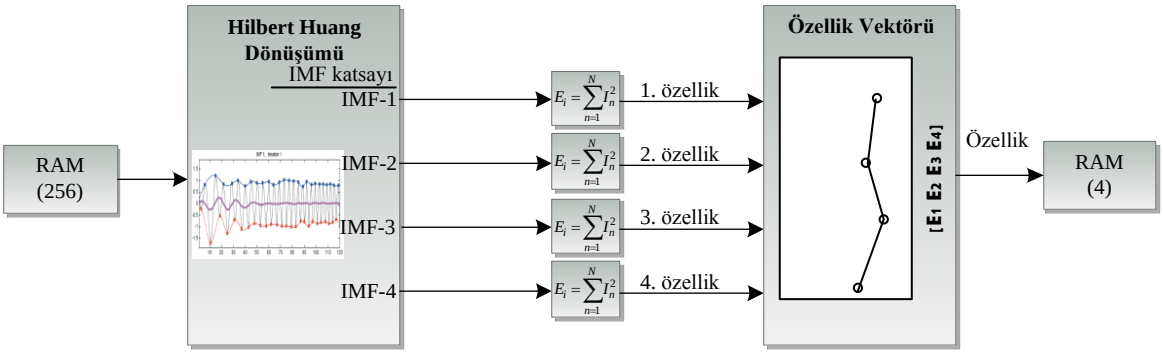
DD alt modülünde, GKB tespit alt modülü çıkışına ait RAM bloklarından elde edilen GKB verilerine altı seviyeli çok çözünürlüklü ADD uygulanmaktadır. ADD dönüşüm sonucunda elde edilen altı seviyenin detay katsayıları ve son seviyenin yaklaşık katsayıları, her bir GKB verisine ait frekans-genlik bilgileri içermektedir. Ancak, elde edilen katsayıların veri boyutunun yüksek olması sınıflandırıcı girişi için uygun değildir. Böylece, elde edilen dönüşüm katsayılarına özellik çıkarımı işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, katsayılarda (5.4)'de verilen enerji bağıntısı uygulanmıştır.

$$E_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i^2 \tag{5.4}$$

Burada; X_i: dönüşüm katsayılarını, N: dönüşüm katsayılarının örnek sayısını ve E_j: özellik değerini göstermektedir. DD alt modülü çıkışında, üç fazlı sistemin her bir fazını temsil eden GKB verilerine ait 1x7'lik çıkış özellik vektörü elde edilir. GKB verilerinin boyutu 1x256 olduğuna göre, dönüşüm alt modülü çıkışında yaklaşık olarak 1/35 oranında veri boyutu indirgenmiş ve frekans-genlik bileşenlerine ait ayırt edici özellikler elde edilmiştir. Üç faza ait GKB verilerinin birleşimini temsil eden GKO verilerinin boyutu ise 1x21'dir. Böylece, DD alt modülü çıkışında elde edilen özellik vektörleri, FPGA ortamında organize edilen RAM bloğuna aktarılmıştır.

5.3.3.4. Hilbert Huang Dönüşümü Alt Modülü

Bu alt modülde, GKB tespit alt modülünden elde edilen üç faz verilerine HHD uygulanmıştır. Bu dönüşüm alt modülüne ait blok yapısı, Şekil 5.16'da verilmiştir. Dönüşüm işlemi, üç faz için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.16. HHD alt modülü genel blok şeması.

HHD alt modülünde, ilk olarak 2 periyotluk GKB verilerine ait IMF katsayıları elde edilmiştir. Gerçekleştirilen AKA işlemi ile IMF-1, IMF-2, IMF-3 ve IMF-4 katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen IMF katsayılarına, HHD'nin ikinci aşaması olan Hilbert dönüşümü işlemi uygulanmıştır. Böylece, GKB verilerine ait frekans-genlik bilgileri elde edilmiştir. Son olarak elde edilen dönüşüm katsayılarına, veri boyutunu indirgemek ve ayırdedici özellikleri elde etmek için özellik çıkarımı işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, DD alt modülünde de uygulanılan enerji bağıntısı kullanılmıştır. Enerji bağıntısı çıkışında, üç fazlı sistemin her bir fazını temsil eden GKB verilerine ait 1x4'lük çıkış özellik vektörü elde edilmiştir. Böylece HHD alt modülü çıkışında yaklaşık olarak 1/60 oranında veri boyutu indirgenmiş ve frekans-genlik bileşenlerine ait ayırt edici özellikler elde edilmiştir. Üç faza ait GKB verilerinin birleşimini temsil eden GKO verilerinin boyutu ise 1x12'dir. Elde edilen özellik vektörleri, FPGA ortamında organize edilen RAM bloğuna aktarılmıştır.

5.3.3.5. Özellik Vektörleri Bloğu

Üç sinyal işleme yönteminden elde edilen veriler, FPGA ortamında belirlenen RAM bloğunda tutulmaktadır. Bu RAM bloğu, özellik vektörlerini saklayacak bir boyutta tasarlanmıştır. Bir GKO için FD alt modülünden elde edilen özellik vektörleri aşağıda verilmiştir.

$$FB_j = [F_1\ F_2\ F_3\ F_4\ F_5\ ] \tag{5.5}$$

$$FO = [FB_1\ \ FB_2\ \ FB_3] \tag{5.6}$$

Burada; *F*: harmonik katsayılardan elde edilen özellik, FB_j: j fazına ait GKB özellik vektörü (boyutu:1x5) ve *FO*: GKO özellik vektörüdür (boyutu:1x15). DD alt modülünden elde edilen özellik vektörleri

$$DB_j = [D_1\ D_2\ D_3\ D_4\ D_5\ D_6\ D_7] \tag{5.7}$$

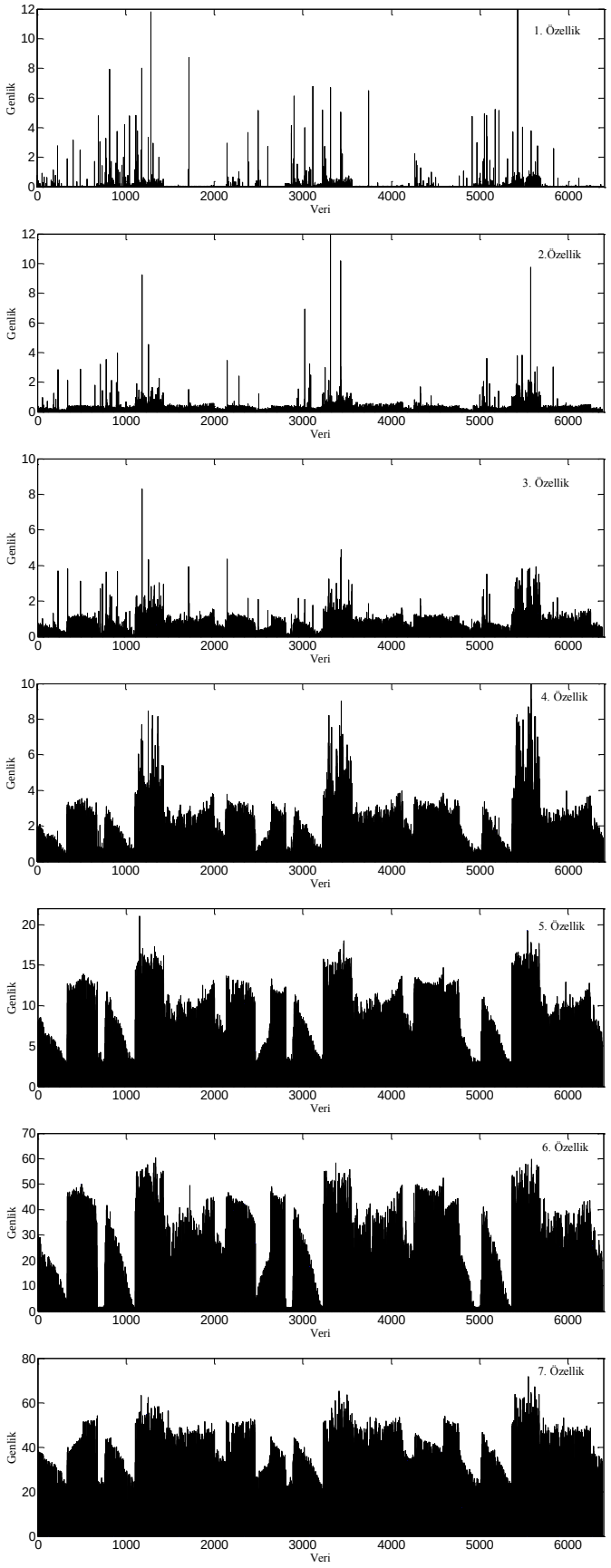
$$DO = [DB_1\ \ DB_2\ \ DB_3] \tag{5.8}$$

gibidir. Burada; *E*: DD katsayılardan elde edilen özellik, DB_j: j fazına ait GKB özellik vektörü (boyutu:1x7) ve *DO*: GKO özellik vektörüdür (boyutu:1x21). HHD alt modülünden elde edilen özellik vektörleri

$$HB_j = [H_1\ H_2\ H_3\ H_4] \tag{5.9}$$

$$HO = [HB_1\ \ HB_2\ \ HB_3] \tag{5.10}$$

gibidir. Burada; *H*: HHD katsayılardan elde edilen özellik, HB_j: j fazına ait GKB özellik vektörü (boyutu:1x4) ve *HO*: GKO özellik vektörüdür (boyutu:1x12). Şekil 5.17'de DD alt modülünden elde edilen GKO özelliklerindeki değişimler gösterilmiştir. Burada, bütün GKO verilerine 7 ayrı özellik değerlerinin kendi özellik sınıflarındaki değişimleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu değişimlere göre, farklı deneysel parametreler ile oluşturulan GKO verileri için elde edilen özellik vektörlerinin de farklı genlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



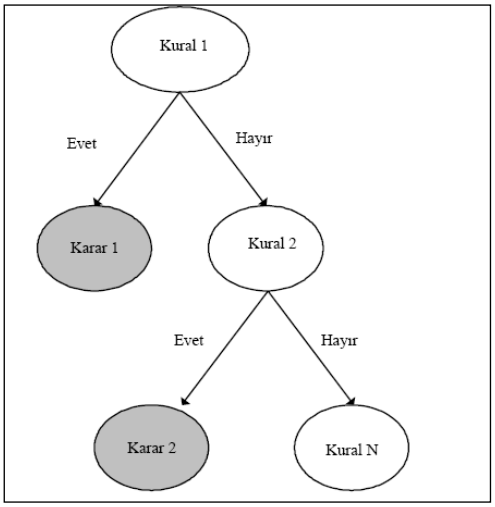
Şekil 5.17. DD alt modülünden elde edilen GKO özelliklerindeki değişimler.

5.3.4. Çevrimiçi Tanıma Modülü

FPGA ortamında yapılan anlık GKO ve GKB sınıflandırma işlemleri, çevrim içi tanıma alt modülünde gerçekleştirilmektedir. Bu alt modülde anlık olarak tespit edilen GKB verilerinden elde edilen özellik vektörleri, FPGA ortamında tasarlanan Karar Ağacı sınıflandırıcının girişine uygulanır. Böylece, Karar Ağacı çıkışında anlık GKO ve GKB sınıf bilgileri elde edilir.

5.3.4.1. Karar Ağaçları

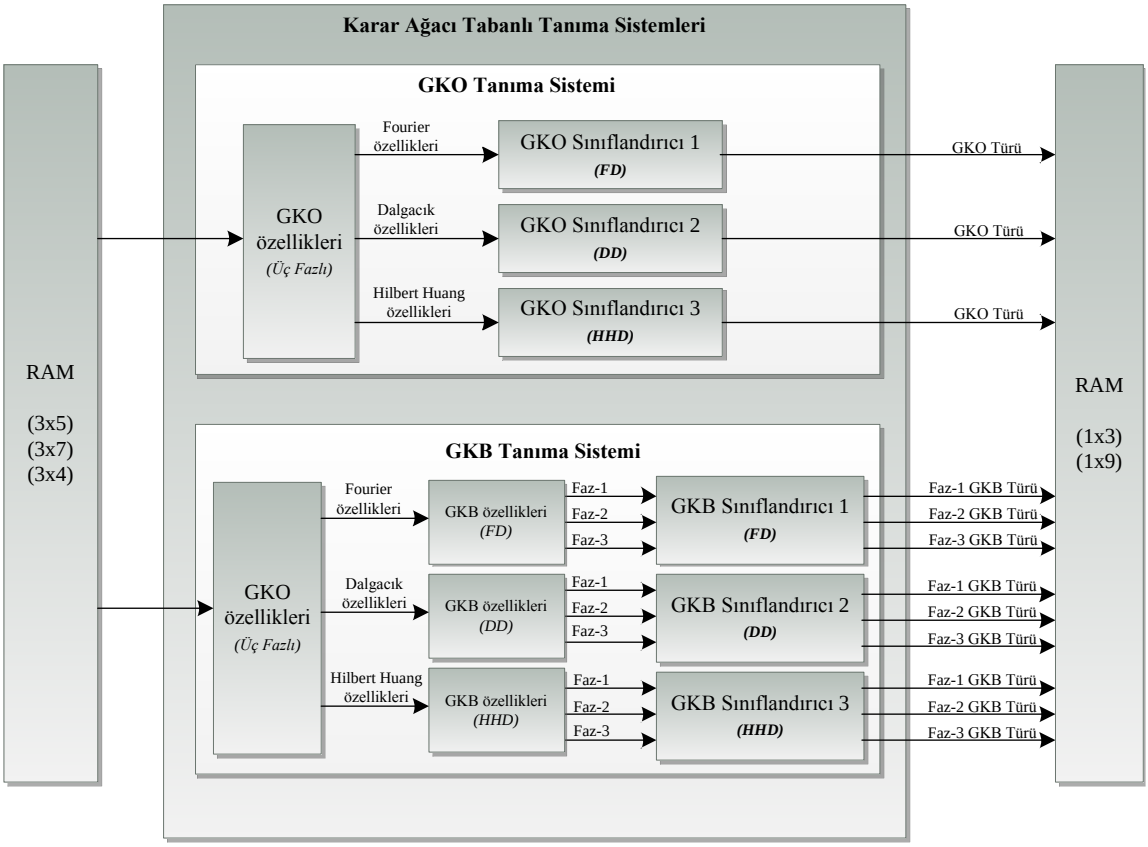
Günümüzde Karar Ağacı, örüntü tanıma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir akıllı tanıma yöntemidir. Bu yöntemdeki kuralların anlaşılır ve sade bir yapıda olmasından dolayı kullanımı tercih edilmektedir. Karar Ağacı sınıflandırma işlemi, çok aşamalı veya ardışık bir yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Böylece çok karmaşık sınıflandırma problemlerini aşamalı bir hale getirerek, basit bir karar verme işlemi yapılır [97, 98]. Karar Ağacı kullanarak veriyi sınıflama işlemi, öğrenme ve sınıflama olarak iki aşamadan oluşur. Öğrenme aşamasında, önceden tanımlanan bir eğitim verisi, karar için model oluşturmak amacı ile sınıflama algoritması tarafından analiz edilir. Öğrenilen bu model, sınıflama için kurallar veya Karar Ağacı şeklinde gösterilir. Sınıflama aşamasında test verisi, sınıflama kurallarının veya Karar Ağacının doğruluğunu belirtmek amacıyla kullanılır. Eğer, doğruluk kabul edilebilir oranda ise kurallar yeni verilerin sınıflaması amacıyla kullanılır [99, 100]. Şekil 5.18'de Karar Ağacının yapısı görülmektedir.



Şekil 5.18. Temel bir Karar Ağacının yapısı.

5.3.4.2. Karar Ağacı Tabanlı Çevrimiçi Tanıma Sistemi Yapısı

Çevrim içi tanıma sistemi içerisinde, GKO ve GKB türü tanıma işlemleri için eş zamanlı çalışma yapısına sahip altı farklı Karar Ağacı algoritması oluşturulmuştur. Anlık GKO verilerini tanıma işlemi için FD, DD ve HHD tabanlı üç ayrı Karar Ağacı algoritması tasarlanmıştır. Benzer şekilde GKB türü tanıma işlemlerinde de üç ayrı Karar Ağacı algoritması oluşturulmuştur. Şekil 5.19'da çevrim içi tanıma sistemi modülünün genel blok yapısı verilmiştir.



Şekil 5.19. Çevrimiçi tanıma modülü genel blok şeması.

Karar Ağacı algoritmalarının tasarımlarında ilk olarak, eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, deneysel düzenekte GKO verileri oluşturularak GKO ve GKB özellik vektörleri FPGA ortamında elde edilmiştir. Elde edilen özellik vektörleri kullanılarak, bilgisayar ortamında Karar Ağacı algoritmalarının eğitim süreci gerçekleştirilmiştir. Elde edilen eğitim verileri ile FPGA ortamında Karar Ağacı algoritmaları oluşturulmuştur. Şekil 5.20'de, FPGA ortamında VHDL diliyle yapılan DD

tabanlı Karar Ağacı, GKO tanıma işlemine ait kaba kod yapısı verilmiştir. Bu kod yapısından da görüleceği gibi, karar değişkenleri bilgisayar ortamındaki eğitimden elde edilen sabit değerlerden oluşmaktadır. FPGA içerisinde dönüşüm işleminden gelen özellik vektörleri, bu sabit değişkenler kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu işlemler sonucunda, verinin hangi sınıfa ait olduğu KA'da belirlenmektedir. Belirlenen sınıf bilgisi, Karar Ağacının çıkışını oluşturmaktadır. Sınıf bilgisi diğer parametrelere eklenerek, Ethernet arayüzü yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

```
library IEEE,ieee_proposed;
use ieee_proposed.float_pkg.all;
use ieee_proposed.fixed_pkg.all;
entity Kararagaci is
Port ( Clk: in STD_LOGIC;
       SINIF_START: in STD_LOGIC;
              SINIF_DONE: out STD_LOGIC;
              CIK1: out STD_LOGIC_VECTOR(31 downto 0);
              CIK2: out STD_LOGIC_VECTOR(31 downto 0);
              AS1: in STD_LOGIC_VECTOR(31 downto 0);
              AS2: in STD_LOGIC_VECTOR(31 downto 0);
end Kararagaci;
architecture Behavioral of Kararagaci is
type drum_tip is (BOS,BASLA,KURAL,DUR);--
Begin
---- SINIF TANIMLAMALARI----
C1<="01000100100010101110000000000000"; --1111 KAPASITOR
C2<="01000101000010101110000000000000"; --2222 MOTOR
…
---- Fazlara ait dalgacık katsayıları----
AAS1<=to_float(AS1,AAS1); --- A fazı seviye 1
BBS1<=to_float(AS2,AAS2); --- B fazı seviye 1
CCS1<=to_float(AS3,AAS3); --- C fazı seviye 1
---- Ağaç içerisindeki sabit değerler---
F1<="01000000011000111111011111001111";
F2<="00111011000000110001001011101111";
F3<="01000001000111000101011000000100";
F4<="01000000011011011011001000101101";
WHEN KURAL=>

IF AAS5 <= F1 THEN
  IF CCS1 <= F2 THEN CIK1<=C2;
    ELSE
    IF BBS5 <= F3 THEN
IF CCS5 <= F4 THEN CIK1<=C4;
                  ELSE
       IF CCS1 <= F5 THEN CIK1<=C4;
ELSE CIK1<=C2;
 END IF;
….
```

Şekil 5.20. DD tabanlı Karar Ağacı GKO tanıma sisteminin VHDL dilindeki kaba kod yapısı.

6. TANIMA SİSTEMLERİNİN UYGULAMALARI VE SONUÇLARI

Tezin bu bölümünde, FPGA ortamında tasarımları yapılan çevrimiçi ve çevrimdışı tanıma sistemleri için gerçekleştirilen uygulamalara yer verilmiştir. Çevrimiçi tanıma sistemine ait çalışmalarda ilk olarak, laboratuar ortamında oluşturulan deneysel düzenek üzerinden tanıma sisteminin eğitim aşamasına ait uygulamalar yapılmıştır. Daha sonra, elde edilen veriler kullanılarak çevrimiçi tanıma sisteminin sınıflandırma yapısı tasarlanmıştır. Çevrimiçi tanıma sistemin son aşamasında ise sistemin başarımı test edilmiştir. Yapılan test işleminde tanıma sisteminin, oluşturulan bir GKO'yu anlık olarak tespit edip, türünü belirleme başarısı gözlenirken aynı zamanda GKO'nun her bir fazında meydana gelen GKB türünün sınıflandırma başarımı da gözlenmiştir. Sonuç olarak oluşturulan olaylara ilişkin, hem GKO hem de GKB türlerinin yüksek bir tanıma başarımıyla gerçekleştirildiği bu bölümde verilmiştir.

Yapılan diğer uygulama ise GKO ve GKB verilerine ait yapılan çevrimdışı tanıma sistemi uygulamasıdır. Burada, çevrimiçi tanıma sisteminin eğitim aşamasında elde edilen veriler kullanılarak, bilgisayar ortamında farklı sınıflandırıcı sistemler üzerinden başarım sonuçları elde edilmiştir. Böylece, FPGA ortamında oluşturulan sinyal işleme algoritmalarının performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca, çevrimdışı uygulamalarda elde edilen sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

6.1. Çevrimiçi Tanıma Sistemi Uygulaması

Çevrimiçi tanıma sistemi, anlık olarak güç sisteminde meydana gelen bir GKO'yu tespit eden, her bir fazda oluşan GKB türünü belirleyen, tespit verilerini bilgisayar ortamına gönderen ve verileri kayıt altına alan akıllı bir tanıma sistemidir. Bu tanıma sisteminin uygulamaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, Karar Ağacı sınıflandırıcısının eğitimi için uygulamalar yapılmıştır. İkinci aşamada ise eğitimi yapılan tanıma sisteminin test işlemleri gerçekleştirilmiştir.

6.1.1 Çevrimiçi Tanıma Sisteminin Eğitim Aşaması

Bu aşamada, deneysel düzenek üzerinden belirlenen parametre aralıklarıyla GKO verileri oluşturulmuştur. GKO verileri anlık olarak oluşturulup, GKB tespit alt modülü tarafından da anlık olarak tespit edilmektedir. Daha sonra, tesspit edilen GKB verilerine segmantasyon ve normalizasyon işlemi uygulanır. Son olarak segmantasyon ve normalizasyon sonucu elde edilen GKB verilerine üç ayrı sinyal işleme yöntemi ile özellik çıkarım yöntemi uygulanarak, her bir sinyal işleme yöntemi için üç ayrı GKB özellik vektörü ve bunların birleşimi olan GKO özellik vektörü elde edilir. Elde edilen özellik vektörleri, haberleşme alt modülü aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılarak kayıt altına alınır.

Bu tez çalışmasında, belirlenen beş farklı GKO türü için toplam 2128 adet veri elde edilmiştir. Elde edilen GKO verileri ve sayıları, Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Çevrimiçi tanıma sisteminin eğitim aşamasına ait GKO verileri ve sayıları.

GKO Türü	Sınıfı	Sayısı
Faz-toprak arıza	S1	673
Üç faz arıza	S2	432
Kapasitör anahtarlama	S3	322
Hat Enerjilenmesi	S4	573
Motor Kalkış	S5	128
TOPLAM		**2128**

Her bir GKO verisi içerisinde, üç adet GKB verisi bulunmaktadır. Böylece, 6384 adet GKB verisi elde edilmiştir. Dört farklı türde bulunan GKB verilerinin, meydana geldiği fazlardaki dağılımları ve toplam sayıları Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Çevrimiçi GKB verileri ve sayıları.

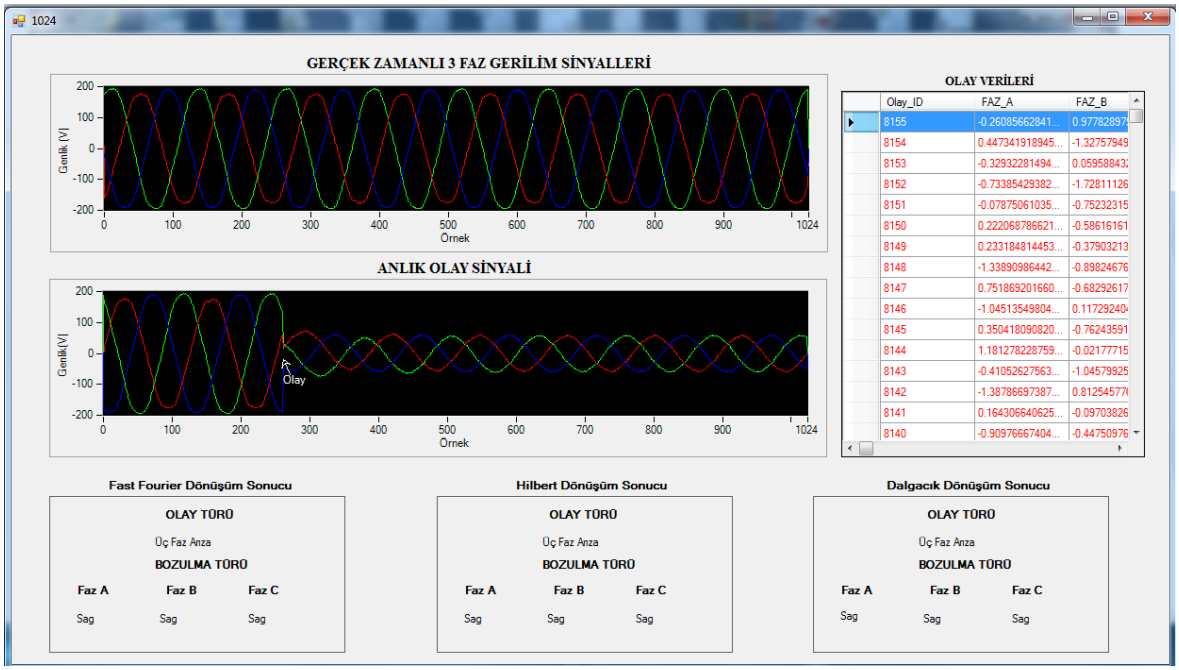
GKB Türü	Faz-1	Faz-2	Faz-3	Toplam
Normal	374	533	544	1451
Çökme	1331	1170	1158	3659
Kesinti	101	103	104	308
Geçici durum	322	322	322	966
TOPLAM	2128	2128	2128	6384

6.1.2. Çevrimiçi Tanıma Sisteminin Test Aşaması

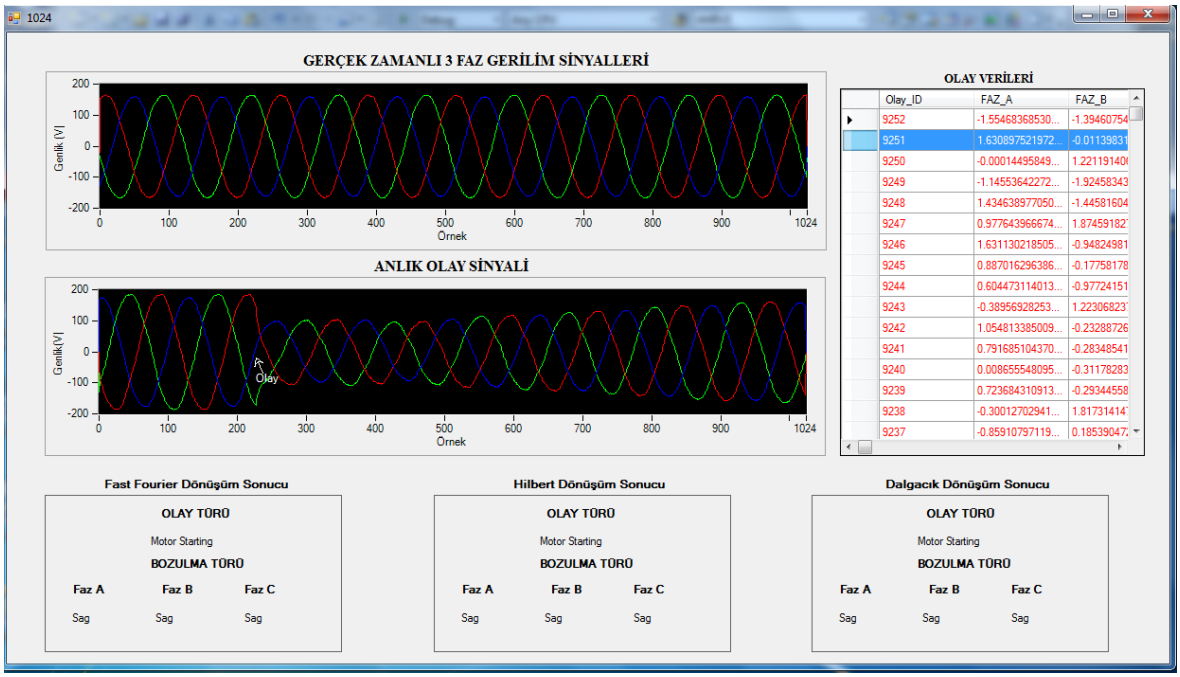
Test aşamasında, tasarımı yapılan FPGA tabanlı çevrimiçi tanıma sistemlerinin başarımlarını ve tanıma performanslarını belirlemek için uygulamalar yapılmıştır. Yapılan uygulamalarda ilk olarak, deneysel düzenekte GKO oluşturulmuştur. Daha sonra, FPGA tabanlı tanıma sistemin bu GKO'yu tespit etmesi işlemi gözlemlenmiştir. Son olarak, tespit edilen GKO için üç farklı tanıma sistemi tarafından elde edilen tanıma sonuçları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre GKO ve GKB başarımları belirlenmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen her bir uygulamaya ait veriler bilgisayar ortamına aktarılarak kayıt altına alınmıştır.

Şekil 6.1'de, oluşturulan üç faz arıza GKO'ya ait çevrimiçi tanıma sonucunun bilgisayar ekran görüntüsü verilmiştir. Bu ekranın üst kısmında verilen grafikte, anlık üç fazlı gerilimlerdeki değişimler gösterilmektedir. Bu grafiğin altında bulunan üç fazlı gerilim grafiği, GKB tespit alt modülü tarafından tespit edilen GKO'nun oluşum anını gösteren 8 periyotluk anlık olay sinyallerini göstermektedir. Bu grafiklerin altında, üç ayrı tanıma sistemine ait GKO ve GKB sınıflandırma sonuçları gösterilmiştir. Üç faz arıza GKO türünün oluşturulduğu bir uygulamaya ilişkin, Şekil 6.1'de verilen grafiksel arayüz görüntüsünden tanıma sistemine ait sonuç pencerelerine bakıldığında, GKO'nun üç farklı tanıma sisteminde de doğru olarak sınıflandırıldığı görülmüştür. Benzer şekilde GKB sonuçları incelendiğinde, yine üç farklı tanıma sisteminde üç faz için ayrı ayrı çökme meydana geldiği belirtilmiştir. Ara yüz görüntüsünün sağ üst bölümünde ise kayıt altına alınan GKO'lara ait veritabanı bilgileri verilmiştir.

Şekil 6.2'de ise bir motor kalkış GKO'na ait grafiksel ara yüz görüntüsü verilmiştir. Motor kalkış GKO'nun her bir fazında da çökme türü GKB meydana gelmiştir. Bu ara yüz görüntüsünden görülebileceği gibi üç ayrı çevrimiçi tanıma sistemi GKO türünü ve GKB türlerini doğru olarak sınıflandırmıştır.

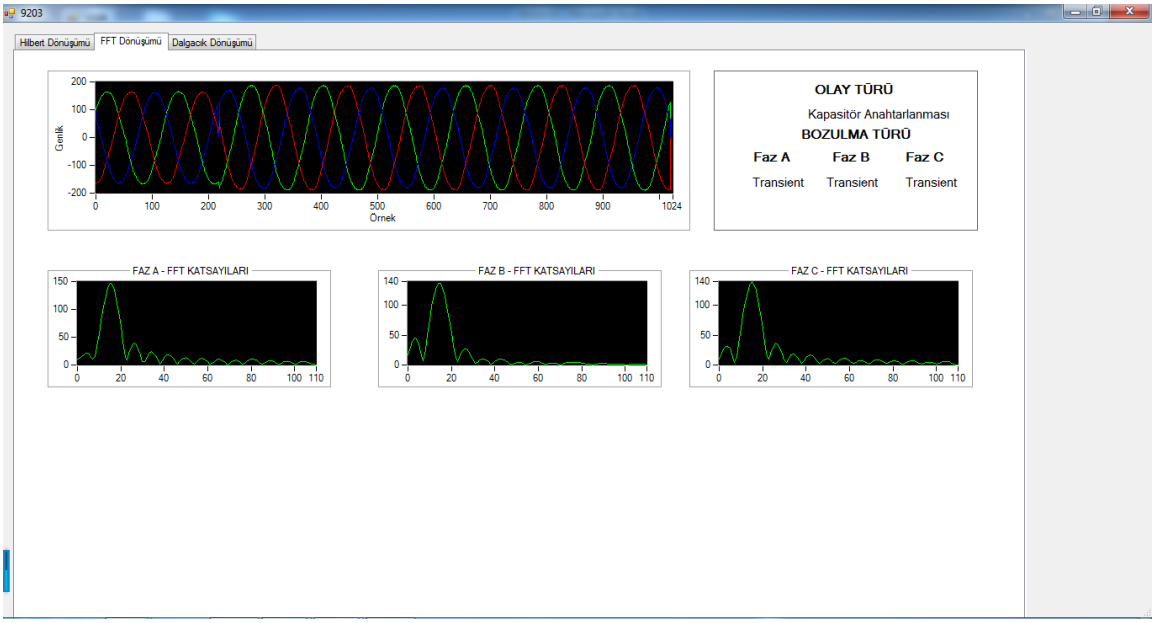


Şekil 6.1. Üç fazlı arıza GKO için çevrimiçi tanıma sistemi grafiksel ana arayüz görüntüsü.

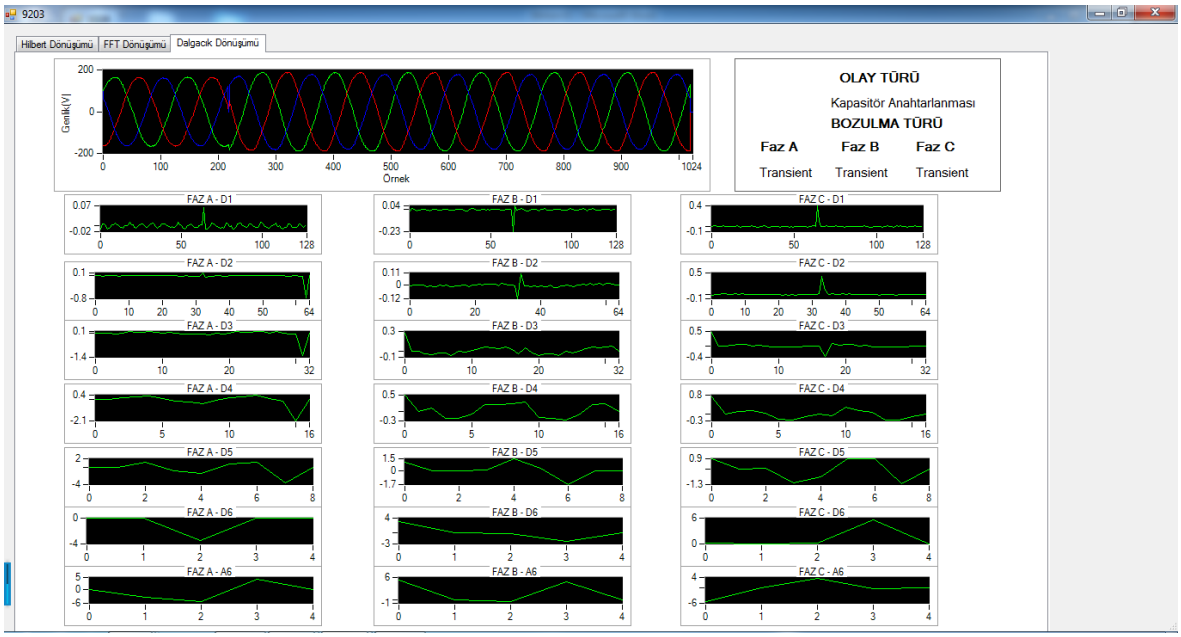


Şekil 6.2. Motor kalkış GKO için çevrimiçi tanıma sistemi grafiksel ana arayüz görüntüsü.

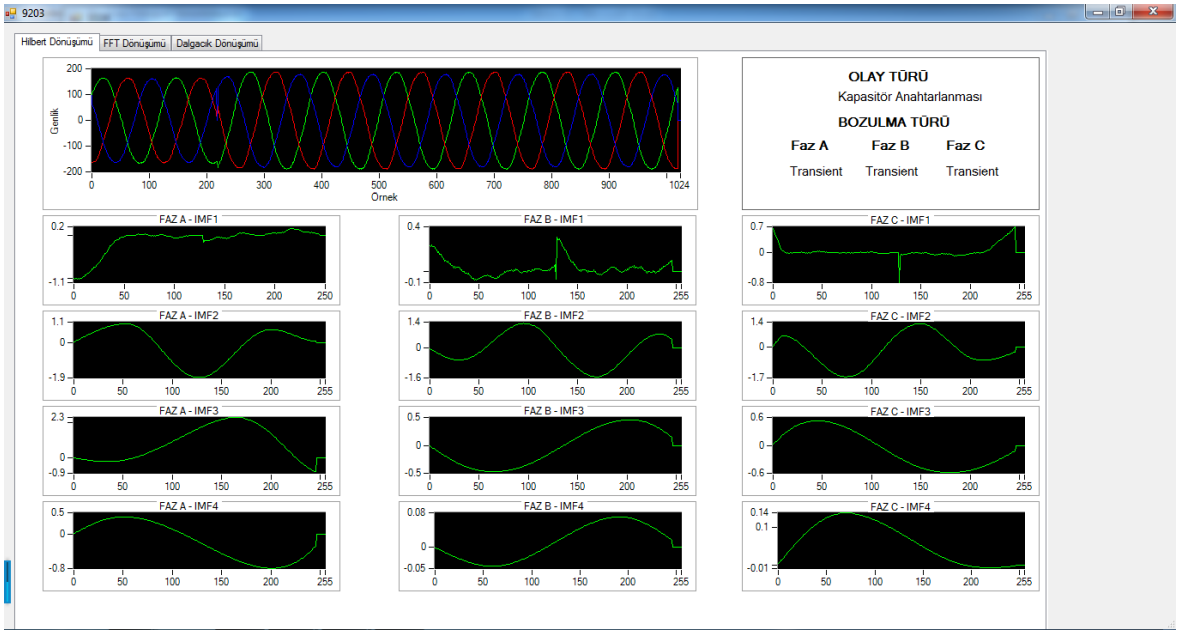
Çevrimiçi tanıma sisteminde kayıt altına alınan GKO'ların, Olay_ID bölümleri üzerlerine tıklama yapıldığında GKO'ya ait detaylı görsel bilgiler elde edilir. Burada bulunan görsel bilgiler; FD, DD ve HHD'ye ait verilerdir. Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'de bir kapasitör anahtarlanmasında oluşan GKO'ya ait sırasıyla FD, DD, HHD arayüz görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.3. Kapasitör anahtarlama GKO için FD tabanlı tanıma sisteminin grafiksel arayüz görüntüsü.



Şekil 6.4. Kapasitör anahtarlama GKO için DD tabanlı tanıma sisteminin grafiksel arayüz görüntüsü.



Şekil 6.5. Kapasitör anahtarlama GKO için HHD tabanlı tanıma sisteminin grafiksel arayüz görüntüsü.

Çevrimiçi tanıma sisteminin test aşamasında oluşturulan uygulamalar, herbir olay türü için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Herbir GKO sınıfı için yapılan uygulamalarda, elde edilen anlık tanıma sonuçları için doğruluk tespiti yapılmıştır. Deneysel düzenek üzerinde, herbir GKO sınıfı için 100 uygulama ve toplamda 500 GKO uygulaması gerçekleştirilmiştir. Böylece, gerçekleştirilen bütün GKO uygulamaları için çevrimiçi tanıma başarı sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen her bir GKO içerisinde bulunan GKB verileri için tanıma sonuçlarının doğruluğu da grafiksel ara yüz pencerelerinden görülmüştür. Elde edilen GKO verilerine ait doğruluk tespiti sonuçları, Tablo 6.3'de verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği gibi, gerçekleştirilen FPGA tabanlı üç çevrimiçi tanıma sistemi oldukça yüksek bir tanıma performansına sahiptir.

Tablo 6.3. Çevrimiçi tanıma sistemini uygulamalarından GKO verileri için elde edilen tanıma sonuçları.

GKO Sınıfı	FD tabanlı tanıma sistemi doğruluğu (%)	DD tabanlı tanıma sistemi doğruluğu (%)	HHD tabanlı tanıma sistemi doğruluğu (%)
S_1	99	97	98
S_2	98	96	97
S_3	100	100	100
S_4	100	100	99
S_5	98	98	98
Toplam başarım (%)	**99.0**	**98.2**	**98.4**

Çevrimiçi tanıma sistemi için yapılan bir diğer doğruluk testinde ise GKB tanıma başarım sonuçları elde edilmiştir. GKB başarımı tespit uygulaması, çevrimiçi GKO tanıma uygulaması ile eş zamanlı gerçekleştirilmiştir. Yapılan herbir GKO tespit uygulama işleminde, ayrıca her fazda oluşan GKB'ler incelenerek türleri belirlenmiştir. Buna göre, belirlenen herbir fazdaki GKB türü ile üç ayrı çevrimiçi tanıma sisteminden elde edilen GKB türü sonuçları karşılaştırılarak doğruluk tespiti yapılmıştır. Böylece, 500 GKO uygulamasından toplamda 1500 GKB türü elde edilmiştir. Bu verilerin içerisinde 320 normal, 794 çökme, 86 kesinti ve 300 geçici durum GKB verisi bulunmaktadır. Tablo 6.4'de, çevrimiçi GKB türü tanıma uygulamalarından elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi, yaklaşık %90'lık bir çevrimiçi GKB tanıma performansı elde edilmiştir.

Tablo 6.4. Çevrimiçi tanıma sistemini uygulamalarından GKB verileri için elde edilen tanıma sonuçları.

GKB Sınıfı	FD tabanlı tanıma sistemi		DD tabanlı tanıma sistemi		HHD tabanlı tanıma sistemi	
	Hatalı sınıf veri sayısı	Doğruluğu (%)	Hatalı sınıf veri sayısı	Doğruluğu (%)	Hatalı sınıf veri sayısı	Doğruluğu (%)
S_1	37	88.04	45	85.93	54	83.12
S_2	62	92.19	58	92.69	75	90.55
S_3	10	88.37	7	91.86	11	87.20
S_4	19	93.66	22	92.66	18	94.00
Toplam başarım (%)	**91.46**		**91.20**		**89.46**	

6.2. Çevrimdışı Tanıma Sistemi Uygulamaları

Tasarlanan FPGA tabanlı GKO ve GKB tanıma sistemleri için yapılan diğer bir uygulama ise bilgisayar ortamında çevrimdışı olarak gerçekleştirilmiştir. Burada, FPGA ortamından bilgisayar ortamına aktarılan üç ayrı sinyal işleme yönteminden elde edilen özellik vektörleri kullanılmıştır. Bu özellik vektörleri, çevrimiçi tanıma sisteminin eğitim aşamasından elde edilen verilerdir. Bilgisayar ortamında yapılan uygulama işlemlerinde GKO ve GKB verileri; LSSVM, ELM ve YSA sınıflandırma algoritmalarına giriş olarak uygulanmıştır. Böylece, elde edilen sonuçlara göre FPGA ortamında gerçekleştirilen işlemlerin doğruluğu ve güvenirliği hakkında bilgiler elde edilmiştir. Aşağıdaki alt bölümlerde LSSVM, ELM ve YSA sınıflandırma yöntemlerine ait kısa bilgiler ve elde edilen uygulama sonuçlarına yer verilmiştir.

6.2.1. En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri Tabanlı Tanıma Sistemi

Çevrimdışı tanıma sistemleri için gerçekleştirilen ilk uygulamada, FPGA tabanlı tanıma sisteminden elde edilen özellik vektörleri LSSVM sınıflandırma sistemine giriş olarak uygulanmıştır. Böylece, GKO ve GKB verilerine ait sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir.

6.2.1.1. En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri (LSSVM)

LSSVM, Suykens vd. tarafından önerilmiştir [101]. Bu SVM türü, iki sınıf etiketli sınıflandırma işlemi düşünülerek oluşturulmuştur. SVM, ikinci dereceden denklemlerin programlanması problemini ifade ederken, LSSVM sınıflandırıcıları doğrusal bir takım denklemlerin çözülmesiyle elde edilir. Standart SVM sınıflandırıcılardaki optimizasyon işleminin çözümü amacıyla kullanılan ikinci dereceden programlama metotları, bu teknikte kullanılmaz. Onun yerine, doğrusal eşitlik kümesi (6.1) kullanılır. Bu kümede; $\|w\|$: Euclid formunu, *n*: eğitim veri seti sayısını, *C*: düzenleştirme parametresini ve e_i: hata miktarını ifade eder.

$$1/2\|w\|^2 + \frac{C}{2}\sum_{i=1}^{n} {e_i}^2 \tag{6.1}$$

Bu doğrusal eşitlik kümesi daha sonra (6.2) koşuluna bağlı olarak minimize edilir. (6.2)'de yer alan y_i: çıkış değerini, x_i: giriş değerini, *w*: ağırlık vektörünü, $\varphi(.)$: daha büyük boyuttaki özellik uzayına taşıma fonksiyonunu ve b: bias değerini ifade eder.

$$y_i = w^T\varphi(x_i) + b + e_i \quad , \qquad i = 1, 2, \dots, n \tag{6.2}$$

Optimizasyon probleminin çözümünden sonra standart SVM sınıflandırıcılarda olduğu gibi optimizasyon eşitlikleri, (6.3) gibi ikili problem yapısına dönüştürülür. Bu eşitlikte α Lagrange çarpanlarını ifade eder.

$$L(w, b, e, a) = {}^1\!/_2\,\|w\|^2 + \frac{C}{2}\sum_{i=1}^{n} {e_i}^2 - \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \{w^T\varphi(x_i) + b + e_i - y_i\} \tag{6.3}$$

Burada yer alan α çarpanları standart SVM sınıflandırıcılarında pozitif olması gerekirken, LSSVM sınıflandırıcılarında pozitif ya da negatif olabilmektedir. LSSVM deki bu farklılık ve daha az eğitim zamanı gerektirmesi, LSSVM'yi standart SVM sınıflandırıcılarından ayırır. Sınıflandırma performansı ise, bazı uygulamalarda standart SVM öğrenme metoduna yakın da olsa düşük çıkabilmektedir. Bunun sebebi, eğitim aşamasında daha kuvvetli ama zaman alan ikinci dereceden programlama yerine, daha basit ama kısa sürede uygulanabilen doğrusal programlama kullanılmasıdır.

(6.3)'ün optimizasyonundan sonra ve *w, e* parametrelerinin elenmesiyle; LSSVM modeli için fonksiyon tahmini (6.4) ile ifade edilir.

$$y(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i K(x_i, x_j) + b \tag{6.4}$$

Burada, *K(.)* fonksiyonu, çekirdeği ifade eder ve *x* giriş uzayının lineer olmayan bir şekilde çok boyutlu özellik uzayına haritalanmasını sağlar. Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) yaygın olarak kullanılan fonksiyonlardan biridir. RBF çekirdek, (6.5)'de gösterilmiştir.

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma |x - x_i|^2) \tag{6.5}$$

Burada, γ: RBF parametresidir. RBF çekirdek varlığında, (6.1)'deki *C* parametresi ve (6.5)'deki γ parametresi olmak üzere iki tane ayarlamalı parametreye ihtiyaç vardır. Bu parametreler, LSSVM sınıflandırıcısının genelleme performansını etkilediğinden dolayı genelleme hatasını en aza indirecek şekilde ayarlanmalıdır.

6.2.1.2. Uygulama Sonuçları

Bu alt bölümde, çevrimdışı tanıma sistemlerinde LSSVM ile elde edilen tanıma uygulamalarına yer verilmiştir. LSSVM ile yapılan tanıma işleminde, GKO ve GKB verileri için ayrı ayrı sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. GKO verileri için yapılan sınıflandırma işleminde, toplam 2128 GKO verisi içerisinden rastgele seçilmiş 1064 adeti tanıma sisteminin eğitim aşamasında ve kalan 1064 adeti ise test aşamasında kullanılmıştır. LSSVM sınıflandırma parametreleri, k-kat çapraz geçerlilik testi uygulanarak elde

edilmiştir. Bu amaç için, eğitim verileri kullanılarak geniş parametre aralıklarında iki aşamalı k-kat çapraz geçerlilik testi uygulanmıştır. İlk aşamada, çekirdek ve düzenleme parametrelerinin alabileceği en üst ve en alt sınırlar belirlenerek seyrek adımlar ile tarama işlemi gerçekleştirilir. İkinci aşamada, ilk aşama sonucunda belirlenen en yüksek başarımlı aralıklara sık tarama işlemi uygulanır. Böylece, en uygun çekirdek ve düzenleme parametreleri elde edilir. Her iki aşamada, 10-kat çapraz geçerlilik testi uygulanmıştır. Tanıma sistemlerinin eğitim aşamasında, en uygun çekirdek ve düzenleme parametreleri olarak FD tabanlı sistem için [γ, C]=[10, 2], DD tabanlı sistem için [γ, C]=[4, 9] ve HHD tabanlı sistem için [γ, C]=[15, 3] değerleri belirlenmiştir. Tablo 6.5'de FD tabanlı sistem, Tablo 6.6'da DD tabanlı sistem ve Tablo 6.7'de HHD tabanlı sistem için LSSVM kullanılarak elde edilen GKO sınıflama başarımları verilmiştir. Bu tablolarda, 5x5'lik bir karar matrisi ile verilen sonuçlar için köşegen elemanları doğru sınıflama sonuçlarını ve diğerleri ise hatalı sınıflamaları göstermektedir. Elde edilen sınıflandırma sonucunda toplam 1064 GKO verisinden, FD tabanlı sistem için 1, DD tabanlı sistem için 10 ve HHD tabanlı sistem için 4 GKO verisi hatalı sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, FPGA ortamında gerçek zamanlı elde edilen GKO verilerine uygulanan sinyal işleme yaklaşımlarının oldukça yüksek bir özellik çıkarım performansına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında yeni bir yaklaşım olarak gerçekleştirilen HFD tabanlı özellik çıkarım yönteminin, oldukça etkili bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

Tablo 6.5. GKO verileri için FD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**S_4**	**S_5**	**Başarım (%)**
S_1	336	0	1	0	0	99. 7
S_2	0	216	0	0	0	100
S_3	0	0	161	0	0	100
S_4	0	0	0	286	0	100
S_5	0	0	0	0	64	100
Toplam başarım oranı (%) : 99.90						

Tablo 6.6. GKO verileri için DD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**S_4**	**S_5**	**Başarım (%)**
S_1	329	4	0	4	0	97. 63
S_2	0	216	0	0	0	100
S_3	0	2	157	2	0	97.51
S_4	0	0	0	286	0	100
S_5	0	0	0	0	64	100
Toplam başarım oranı (%) : 98.87						

Tablo 6.7. GKO verileri için HHD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	334	3	0	0	0	99. 10
S_2	0	216	0	0	0	100
S_3	0	0	160	1	0	99.37
S_4	0	0	0	286	0	100
S_5	0	0	0	0	64	100
Toplam başarım oranı (%) : 99.62						

GKB verileri için LSSVM ile yapılan tanıma işleminde ise toplam 6384 GKB türlerine ait özellik vektörleri içerisinden rastgele seçilmiş 3192 veri, tanıma sisteminin eğitim aşamasında ve kalan 3192 veri ise test aşamasında kullanılmıştır. LSSVM'nin eğitim aşamasında en uygun çekirdek ve düzenleme parametreleri olarak FD tanıma sistemi için [γ, C]=[20, 2], DD tanıma sistemi için [γ, C]=[12, 3.5] ve HHD tanıma sistemi için [γ, C]=[10, 5] değerleri belirlenmiştir. Tablo 6.8'de FD, Tablo 6.9'da DD ve Tablo 6.10'da HHD tabanlı tanıma sistemler için LSSVM kullanılarak elde edilen GKB sınıflama başarımları verilmiştir. Elde edilen tanıma sistemi sonuçlarına göre FD ve HHD tabanlı tanıma sistemlerinde, tam doğrulukta tanıma başarımının elde edildiği görülmüştür. DD tabanlı tanıma sisteminde ise 3192 GKB verisinin sadece 9'unu hatalı sınıflandırdığı ve oldukça yüksek bir tanıma başarımına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.8. GKB verileri için FD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	725	0	0	0	100
S_2	0	1830	0	0	100
S_3	0	0	154	0	100
S_4	0	0	0	483	100
Toplam başarım oranı (%) : 100					

Tablo 6.9. GKB verileri için DD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	723	2	0	0	99. 72
S_2	2	1827	1	0	99.83
S_3	0	0	151	3	98.69
S_4	0	0	1	482	99.79
Toplam başarım oranı (%) : 99.71					

Tablo 6.10. GKB verileri için HHD tabanlı LSSVM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	725	0	0	0	100
S_2	0	1830	0	0	100
S_3	0	0	154	0	100
S_4	0	0	0	483	100
Toplam başarım oranı (%) : 100					

6.2.2. Aşırı Öğrenme Makinesi Tabanlı Tanıma Sistemi

Çevrimdışı tanıma sistemleri için gerçekleştirilen ikinci uygulama çalışmasında, ELM tabanlı sınıflandırma sistemine yer verilmiştir. Bu uygulamada, FPGA tabanlı tanıma sisteminden elde edilen özellik vektörleri ELM sınıflandırma sistemine giriş olarak uygulanmıştır. Böylece, GKO ve GKB verilerine ait sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir.

6.2.2.1. Aşırı Öğrenme Makinesi (ELM)

ELM, geleneksel öğrenme algoritmalarının öğrenme hızının üstünde bir öğrenme hızına sahip olacak şekilde tek ara katmanlı ileri beslemeli YSA için yeni bir öğrenme algoritması olarak Huang [102] tarafından önerilmiştir. ELM'de, tüm gizli düğüm parametreleri için bir ayarlama işlemi yerine, rastgele bir seçim ve düzeltme işlemi vardır. Bu seçim işleminden sonra, tek ara katmanlı ileri beslemeli YSA'nın çıkış ağırlıkları analitik olarak belirlenmektedir. Öğrenme algoritmasının hızlı olması ve iyi genelleştirme yeteneğine sahip olması nedeniyle, "aşırı öğrenme makinesi" olarak adlandırılmıştır [103].

Rastgele seçilen N farklı örnek için x_i: $n\times1$ boyutlu bir giriş vektörü ve t_i: $m\times1$ boyutlu hedef vektörü, $(x_i, t_i) \in R^n \times R^m$ olmak üzere, $\tilde{N}$ gizli düğüme sahip ve $g(x)$ şeklinde bir aktivasyon fonksiyonu olan standart bir tek ara katmanlı ileri beslemeli YSA'nın matematiksel modeli şu şekildedir:

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(w_i.x_j + b_i) = o_j,\ j = 1,...,N \tag{6.6}$$

Burada $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, ..., w_{in}]^T$, i'nci gizli düğüm ve giriş düğümlerini bağlayan ağırlık vektörüdür. $\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, ..., \beta_{in}]^T$, i'nci gizli düğüm ve çıkış düğümlerini bağlayan ağırlık vektörüdür. b_i: i'nci gizli düğümün eşik değeridir. $\tilde{N}$ gizli düğümlü bir ağda amaç, hatanın sıfır olmasıdır,

$$\sum_{j=1}^{\tilde{N}} \left\| o_j - t_j \right\| = 0, \tag{6.7}$$

burada β_i, w_i ve b_i parametreleri,

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(w_i.x_j + b_i) = t_j,\ j = 1,...,N \tag{6.8}$$

şeklinde yazılabilir. (6.8)'in düzenli gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$H\beta = T, \tag{6.9}$$

Burada,

$$H(w_1,...,w_{\tilde{N}}, b_1,...,b_{\tilde{N}}, x_1,...,x_N) = \begin{bmatrix} g(w_1.x_1 + b_1) & \cdots & g(w_{\tilde{N}}.x_1 + b_{\tilde{N}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(w_1.x_N + b_1) & \cdots & g(w_{\tilde{N}}.x_N + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}_{N \times \tilde{N}} \tag{6.10}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_{\tilde{N}}^T \end{bmatrix}_{\tilde{N} \times m} \quad \text{ve} \quad T = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_N^T \end{bmatrix}_{N \times m} \tag{6.11}$$

şeklindedir. Burada H**,** Huang vd. tarafından ağın gizli katman çıkış matrisi olarak adlandırılmıştır. H'nin i'nci kolonu, $x_1, x_2, \ldots, x_N$ girişlerine göre i'nci gizli düğüm çıkışıdır. Geleneksel tek ara katmanlı ileri beslemeli YSA'larda ağın eğitilmesi, ELM'de $H\beta = T$ doğrusal denkleminde en küçük kareler çözümünün aranmasıdır. ELM algoritması üç adımda aşağıdaki gibi özetlenebilir [14].

1. Aşama: $W_i = (W_{i1}, W_{i2}, \ldots W_{in})$ giriş ağırlıkları ve gizli katman b_i eşik değerleri rastgele üretilir.
2. Aşama: H gizli katman çıkış hesaplanır.
3. Aşama: β çıkış ağırlıkları $\beta = H^{+}$T göre hesaplanır.

ELM algoritması, popüler olan geleneksel gradient tabanlı öğrenme algoritmalarına sahip ileri beslemeli YSA'lara göre aşağıda sıralanan bazı önemli özelliklere sahiptir.

ELM'nin öğrenme hızı daha iyidir. Yapılan farklı uygulamalarda, ELM'nin öğrenme aşaması çok kısa sürmüştür. ELM birçok durumda, geri yayılım gibi gradient tabanlı öğrenme algoritmalarından çok daha iyi bir genelleştirme performansına sahiptir. Sadece türevlenebilir aktivasyon fonksiyonları ile çalışan geleneksel klasik gradient tabanlı öğrenme algoritmalarından benzersiz olarak ELM, tek ara katmanlı ileri beslemeli YSA'ları eğitmek için birçok türevlenemeyen aktivasyon fonksiyonları kullanabilir [102].

6.2.2.2. Uygulama Sonuçları

ELM ile yapılan tanıma işleminde, GKO ve GKB verileri için ayrı ayrı sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. GKO verileri için yapılan sınıflandırma işleminde toplam 2128 GKO verisi içerisinden rastgele seçilmiş 1064 veri, tanıma sisteminin eğitim aşamasında ve kalan 1064 adedi ise test aşamasında kullanılmıştır. Öncelikle GKO verilerine ait ayırt edici özellikler ile ELM sınıflandırıcısının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, test GKO verileri üzerinde sınıflandırıcının performansı test edilmiştir. MATLAB ortamında yürütümü gerçekleştirilen ELM sınıflandırıcısına ait parametre seçimleri şu şekilde gerçekleştirilmiştir. ELM'nin gizli neuron sayısı için *Neuron={10,20,...,500}* ve aktivasyon fonksiyonu için *Act_func={'Sigmoidal','Sine','Hardlim', 'Triangular basis',' Radial basis'}* şeklinde iki dizi kullanılarak çaprazlama işlemi gerçekleştirilmiş ve en uygun parametre seçimi yapılmıştır. GKO için ELM sınıflandırıcısına ait parametreler; gizli nöron sayısı FD verileri için 300, DD verileri için 200 ve HHD verileri için 250 dir. Bu üç dönüşüm verileri için belirlenen aktivasyon fonksiyonu ise *'Sigmoidal'* dır. Tablo 6.11'de FD tabanlı sistem, Tablo 6.12'de DD tabanlı sistem ve Tablo 6.13'de HHD tabanlı sistem için ELM kullanılarak elde edilen GKO sınıflama başarımları verilmiştir. Tanıma sistemlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, FD ve DD tanıma sistemlerinin tanıma hata oranının %1'in altında olduğu, HHD tabanlı sistem için yaklaşık % 4.5'lik bir hata oranına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.11. GKO verileri için FD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	337	0	0	0	0	100
S_2	0	215	0	0	1	99.53
S_3	0	0	159	2	0	98.75
S_4	0	0	0	286	0	100
S_5	0	1	0	0	63	98.43
Toplam başarım oranı (%) : 99.62						

Tablo 6.12. GKO verileri için DD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	336	0	0	1	0	99.70
S_2	0	215	0	0	1	99.53
S_3	1	0	158	1	1	98.13
S_4	0	4	0	282	0	98.60
S_5	0	0	0	0	64	100
Toplam başarım oranı (%) : 99.15						

Tablo 6.13. GKO verileri içinHHD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	336	0	0	1	0	99. 70
S_2	0	192	0	16	8	88.88
S_3	1	0	159	1	0	98.75
S_4	0	9	1	275	1	96.15
S_5	0	9	0	2	53	82.81
Toplam başarım oranı (%) : 95.39						

GKB verileri için ELM ile yapılan tanıma işleminde, toplam 6384 GKB türüne ait özellik vektörleri kullanılmıştır. Bu verilerin rastgele seçilmiş olan yarısı eğitim aşamasında, diğer yarısı ise test aşamasında kullanılmıştır. GKB verilerinin eğitim aşamasında üç farklı tanıma sistemi için belirlenen ELM parametreleri; gizli nöron sayısı 200 ve aktivasyon fonksiyonu ise *'Sigmoidal'* dır. Tablo 6.14'de FD, Tablo 6.15'de DD ve Tablo 6.16'da HHD tabanlı tanıma sistemleri için ELM kullanılarak elde edilen GKB sınıflama başarımları verilmiştir. Elde edilen tanıma sistemi sonuçlarına göre üç farklı tanıma sisteminde tanıma başarımlarındaki doğruluk oranlarının % 90'ın üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak ELM tabanlı GKB sınıflandırma sistemlerinin, LSSVM tabanlı tanıma sistemlerine göre daha düşük tanıma başarım oranlarına sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 6.14. GKB verileri için FD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	618	96	0	11	85.24
S_2	94	1726	10	0	94.31
S_3	0	27	127	0	82.46
S_4	14	8	0	461	95.44
Toplam başarım oranı (%) : 91.85					

Tablo 6.15. GKB verileri için DD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	641	64	0	20	88.41
S_2	74	1726	27	3	94.31
S_3	0	16	138	0	89.61
S_4	60	16	0	407	84.26
Toplam başarım oranı (%) : 91.22					

Tablo 6.16. GKB verileri için HHD tabanlı ELM sınıflandırma sonuçları

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	623	98	0	4	85.93
S_2	122	1689	13	6	92.29
S_3	0	4	150	0	97.40
S_4	54	15	0	414	85.71
Toplam başarım oranı (%) : 90.10					

6.2.3. Yapay Sinir Ağları Tabanlı Tanıma Sistemi

FPGA ortamında elde edilen özellik vektörlerine uygulanan son çevrimdışı sınıflandırma işleminde ise literatürde genellikle karşılaştırma sınıflandırıcısı olarak tercih edilen YSA kullanılmıştır. Bu çevrimdışı tanıma sisteminde, ileri beslemeli YSA yöntemi kullanılarak tanıma sonuçları elde edilmiştir.

6.2.3.1. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Deneme yolu ile öğrenme ve genelleştirme yapabilen YSA'nın kullanıldığı önemli alanlardan biri, geleceği tahmindir. YSA, veriler arasındaki bilinmeyen ve fark edilmesi güç ilişkileri ortaya çıkartabilir. YSA'nın eğitilebilmesi ve hedef çıktılara ulaşılması için çok sayıda girdi ve girdilere ilişkin çıktı dizisine gereksinim duyulur. YSA, insan beyninin fonksiyonel özelliklerine benzer şekilde öğrenme, optimizasyon, analiz, sınıflandırma, genelleme, ilişkilendirme gibi konularda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [104].

Biyolojik bir nörondan esinlenerek ortaya konmuş işlem elamanının basit bir matematiksel modelinde *i.* işlem elemanının çıkışı (3.24)'de verilmiştir.

$$y(t+1) = a\left(\sum_{j=1}^{m} w_{ij}\, x_j(t) - \theta_i\right) \tag{6.12}$$

Burada, θ_i: *i.* işlem elemanının eşik değerini ve *a(.)*: etkinleştirme fonksiyonunu temsil eder. İşlem elemanlarının bilgi işleme şekli, giriş ve çıkış olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bir işlem elemanı, dışarıdan almış olduğu x_j giriş bilgilerini bağlı bulundukları w_{ij} ağırlıkları üzerinden birleştirerek bir *net* değeri üretir. *i.* işlem elemanının *net* değeri (6.13) ile hesaplanır.

$$f_i \triangleq net_i = \sum_{j=1}^{m} w_{ij}\, x_j - \theta_i \tag{6.13}$$

Her bir işlem elemanının, çıkış değeri üretebilmesi için *net* değerinin bir *a(.)* etkinleştirme fonksiyonundan geçirilmesi gerekir. Etkinleştirme fonksiyonları, işlem elemanlarının çok geniş aralıktaki çıkışını belirli aralıklara çekmek için kullanılmaktadır. Böylece, her bir işlem elemanının tepkisi yumuşak olmaktadır ve bağlantı ağırlıklarının değişimlerinin de daha küçük değerlerde olması sağlanır. Dolayısıyla, hata değişiminin ıraksaması engellenerek eğitim sürecini kolaylaştıracak kararlılığa ulaşılabilir. Birim basamak, signum, rampa, tek ve çift yönlü sigmoid gibi fonksiyonlar yaygın olarak kullanılan bazı etkinleştirme fonksiyonlarıdır. Çok katmanlı YSA modeli, bir giriş katmanı, bir veya daha fazla ara katman ve bir de çıkış katmanından oluşur. Bir katmandaki bütün işlem elemanları, bir üst katmandaki bütün işlem elemanlarına bağlıdır. Bilgi akışı, ileri doğru olup geri besleme yoktur. Bunun için ileri beslemeli sinir ağı modeli olarak adlandırılır. Giriş katmanında, herhangi bir bilgi işleme yapılmaz. Buradaki işlem elemanı sayısı, tamamen uygulanan problemlerin giriş sayısına bağlıdır. Ara katman sayısı ve ara katmanlardaki işlem elemanı sayısı ise, deneme-yanılma yolu ile bulunur. Çıkış katmanındaki eleman sayısı ise, yine uygulanan probleme dayanılarak belirlenir. Birçok uygulamalarda kullanılmış en yaygın öğrenme algoritması olan geriye yayılım algoritması, kolay anlaşılabilir ve matematiksel olarak ispatlanabilir olmasından dolayı en çok tercih edilen öğrenme algoritmasıdır.

6.2.3.2. Uygulama Sonuçları

YSA kullanılarak yapılan çevrimdışı tanıma uygulamalarında, GKO ve GKB verileri için ayrı ayrı sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. GKO verileri için yapılan sınıflandırma işleminde toplam 2128 GKB verileri içerisinden rastgele seçilmiş 1064 adeti tanıma sisteminin eğitim aşamasında ve kalan 1064 adeti ise test aşamasında kullanılmıştır. Öncelikle, YSA sınıflandırıcısının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, YSA tabanlı tanıma sisteminin sınıflandırma performansı test edilmiştir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen YSA sınıflandırma işlemi için yaygın olarak kullanılan, çok katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı ve eğim düşme metoduna dayalı geri yayılım algoritması kullanılmıştır. İleri beslemeli YSA yapısında, tek ara katman kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak, ara katmanda hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu (tansig) ve çıkış katmanında ise lineer transfer fonksiyonu (purelin) kullanılmıştır. Tablo 6.17'de FD tabanlı sistem, Tablo 6.18'de DD tabanlı sistem ve Tablo 6.19'da ise HHD tabanlı sistem için YSA kullanılarak elde edilen GKO tanıma başarımları verilmiştir. Elde edilen tanıma sistemi sonuçlarına göre FD tabanlı tanıma sisteminin tanıma başarımındaki doğruluk oranının diğer tanıma sistemlerine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.17. GKO verileri için FD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	337	0	0	0	0	100
S_2	0	215	0	0	1	99.53
S_3	1	0	160	0	0	99.37
S_4	1	1	1	283	0	98.95
S_5	0	0	0	0	64	100
Toplam başarım oranı (%) : 99.53						

Tablo 6.18. GKO verileri için DD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	329	4	0	4	0	97. 63
S_2	1	209	0	2	4	96.75
S_3	1	4	154	2	0	95.65
S_4	0	4	1	281	0	98.25
S_5	0	6	0	0	58	90.62
Toplam başarım oranı (%) : 96.89						

Tablo 6.19. GKO verileri için HHD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Başarım (%)
S_1	331	0	3	3	0	99. 10
S_2	1	160	3	20	32	74.07
S_3	1	1	157	2	0	97.51
S_4	3	6	2	273	2	95.45
S_5	0	9	0	3	52	81.25
Toplam başarım oranı (%) : 91.44						

GKB verileri için YSA ile yapılan tanıma işlemi uygulamasında ise toplam 6384 GKB verileri arasından rastgele seçilmiş yarısı tanıma sisteminin eğitim aşamasında ve diğer yarısı ise test aşamasında kullanılmıştır. GKO ve GKB verileri için kullanılan YSA tabanlı tanıma sistemleri, aynı yapıya sahiptir. Tablo 6.20'de FD tabanlı sistem, Tablo 6.21'de DD tabanlı sistem ve Tablo 6.22'de ise HHD tabanlı sistem için YSA kullanılarak elde edilen GKB tanıma başarımları verilmiştir. Bu sonuçlara göre, YSA tabanlı GKB tanıma sistemleri ile elde edilen üç farklı tanıma sistemi sonuçlarının diğer LSSVM ve ELM tabanlı tanıma sistemlerinden daha düşük bir başarım oranına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.20. GKB verileri için FD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	621	92	0	12	85.65
S_2	82	1737	8	3	94.91
S_3	0	27	127	0	82.46
S_4	12	7	0	464	96.06
Toplam başarım oranı (%) : 92.38					

Tablo 6.21. GKB verileri için DD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	543	170	0	12	74.89
S_2	72	1676	81	1	91.58
S_3	0	7	147	0	95.45
S_4	68	13	1	401	83.02
Toplam başarım oranı (%) : 86.68					

Tablo 6.22. GKB verileri için HHD tabanlı YSA sınıflandırma sonuçları.

Sınıf	S_1	S_2	S_3	S_4	Başarım (%)
S_1	439	278	0	8	60.55
S_2	37	1780	10	3	97.26
S_3	0	1	153	0	99.35
S_4	45	19	0	419	86.74
Toplam başarım oranı (%) : 87.43					

6.3. Değerlendirmeler ve Karşılaştırmalar

Bu alt bölümde; FPGA ve bilgisayar ortamında elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca, elde edilen tanıma sonuçları ile literatürde bulunan benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deneysel düzenekte oluşturulan bir GKO, çevrimiçi tanıma sistemi tarafından anlık olarak tespit edilmektedir. Sonuçlardan, FPGA ortamında oluşturulan dalgacık dönüşümü tabanlı tespit algoritmasının oldukça etkili yaklaşım olduğu görülmüştür.

FPGA ortamında FD, DD ve HHD tabanlı üç ayrı sinyal işleme yöntemi oluşturularak, her bir GKO verisine ait ayırt edici özellik verileri elde edilmiştir. Özellik verileri kullanılarak, çevrimiçi ve çevrimdışı tanıma uygulamaları yapılmıştır. Çevrimiçi tanıma uygulamalarında elde edilen özellikler ile eğitim aşamasında kullanılan KA algoritmasının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Çevrimiçi uygulamaların son aşamasında ise oluşturulan tanıma sistemi test edilmiştir. Böylece anlık olarak oluşturulan bir GKO'ya ait tanıma sonuçları, yine anlık olarak bilgisayar ekranında gösterilmiştir. Böylece, çevrimiçi tanıma sisteminin donanımsal ve yazılımsal olarak oldukça yüksek bir tespit ve tanıma performansına sahip olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen bir diğer uygulama ise FPGA ortamında çevrimiçi tanıma sisteminin eğitim aşaması ile elde edilen GKO ve GKB verilerine ait yapılan çevrimdışı tanıma sistemi uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda, GKO ve GKB verileri için FPGA ortamında elde edilen özellik vektörleri kullanılarak bilgisayar ortamında sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimdışı uygulamalarında LSSVM, ELM ve YSA sınıflandırıcılar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, oldukça yüksek tanıma başarımlarına ulaşılmıştır. Özellikle LSSVM sınıflandırıcı ile GKO ve GKB verileri için yüksek başarım oranları elde edilmiştir. Ayrıca, bu tez çalışmasında önerilen FD tabanlı özellik çıkarımının oldukça etkili bir yaklaşım olduğu görülmüştür. Böylece, çevrimdışı tanıma sonuçlarından elde edilen başarım değerlerine göre FPGA ortamında tasarlanan sinyal işleme algoritmalarının etkili işlem performansına ve yüksek başarım oranına sahip olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında elde edilen çevrimdışı tanıma sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, Tablo 6.23'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, bu tezde önerilen gömülü sistem yaklaşımına dayalı tanıma sistemin, literatürde bulunan tanıma sistemlerine göre daha iyi performansa

sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, karşılaştırma tablosundan görüleceği gibi literatürdeki çalışmalar ya sadece GKO verileri ya da sadece GKB verileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında, her iki veri türü için eş zamanlı tanıma sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 6.23. Doğru sınıflandırma sonuçlarına göre başarım karşılaştırması.

Literatür çalışmaları	**GKO tanıma başarımı**	**GKB tanıma başarımı**
Kaynak [14]	98.51	-
Kaynak [105]	97.00	-
Kaynak [106]	92.80	-
Kaynak [107]	92.00	-
Kaynak [108]	94.62	-
Kaynak [3]	-	90.43
Kaynak [53]	-	92.30
Kaynak [66]	-	99.87
Kaynak [109]	-	95.71
Kaynak [110]	-	98.91
Bu tez çalışması tanıma sistemleri		
FD & LSSVM	99.90	100.00
DD & LSSVM	98.87	99.71
HHD & LSSVM	99.62	100
FD & ELM	99.62	91.85
DD & ELM	99.15	91.22
HHD & ELM	95.39	90.10
FD & YSA	99.53	92.38
DD & YSA	96.89	86.68
HHD & YSA	91.44	87.43

7. SONUÇLAR

Bu tezde, güç sistemlerinde meydana gelen güç kalitesi problem türlerini çevrimiçi belirlemeye yönelik gömülü sistem tabanlı tanıma sistemleri geliştirilmiştir. FPGA ortamında tasarımları yapılan tanıma sistemleri, hem GKO hem de GKB türlerini eş zamanlı olarak çevrimiçi belirlemeye yönelik sinyal işleme yöntemlerini ve yapay zeka yaklaşımlarını içermektedir. FPGA ortamında FD, DD ve HHD türü sinyal işleme yöntemlerini içeren üç ayrı tanıma sistemine ait tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu tanıma sistemlerinin akıllı karar yapısında, Karar Ağacı algoritması kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen diğer bir yaklaşım ise GKO ve GKB verilerine ait yapılan çevrimdışı tanıma sistemi uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda, FPGA ortamında elde edilen GKO ve GKB verilerine ait özellik vektörleri kullanılarak, bilgisayar ortamında sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimdışı uygulamalarda LSSVM, ELM ve YSA sınıflandırıcılar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, FPGA ortamında tasarlanan sinyal işleme algoritmalarının performansı ve çevrimiçi tanıma yaklaşımlarının değerlendirilmesi hakkında önemli bilgiler sunmuştur. Bu tezde gerçekleştirilen çalışmalar genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. Bu dört aşamada yazılımsal, donanımsal veya her ikisi ile ilgili önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu aşamalar şunlardır:

- Elektriksel ölçüm sistemi tasarımları,
- FPGA algoritmaları,
- Kullanıcı ara yüz programı ve
- Prototip güç sistemi uygulamalarıdır.

İlk aşamada, GKO verilerinin ölçülmesi için bir sinyal giriş kartının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Donanımsal olarak gerçekleştirilen bu tasarımda, şebeke üzerinden gerekli gerilim bilgilerini elde etmek ve bu bilgileri FPGA cihazına aktarmak için bir giriş kartı oluşturulmuştur. Giriş kartında, FPGA cihazına uygun sayısal gerilim bilgilerini elde etmek için gerilim dönüştürücüleri ve ADC entegresi kullanılmıştır.

İkinci aşama, FPGA ortamında VHDL tabanlı oluşturulan yazılımları içermektedir. Bu aşamada, üç ayrı tanıma sistemine ait sinyal işleme ve Karar Ağacı algoritmalarının yazılımlarını içeren alt modüller FPGA ortamında oluşturulmuştur. FPGA ortamında, üç fazlı sistemde meydana gelen bir GKO sonrasında herhangi bir fazda oluşacak olan GKB'yi tespit eden bir alt modül bulunmaktadır. Bu alt modülde, DD tabanlı olarak gerçekleştirilen tespit işlemiyle belirli bir genliğe ve periyoda sahip GKB ve GKO verileri

elde edilmektedir. FPGA ortamında oluşturulan diğer bir modül, haberleşme alt modülüdür. Bu alt modül, tanıma sistemlerine ait algoritmalardan elde edilen verilerin bilgisayar ara yüz programına gönderilmesini sağlayan yazılımları içerir. Ayrıca bu aşamada; hafıza organizasyonları, sinyal giriş kartı iletişimleri ve veri kayıt işlemlerini içeren yazılımlar oluşturulmuştur.

Üçüncü aşamada ise bilgisayar ortamında güç sistemine ait gerilim bilgileri ile çevrimiçi tanıma sonuçlarını görsel olarak izleyebilecek ve bu bilgileri kaydedebilecek bir grafiksel ara yüz yazılımı oluşturulmuştur. Microsoft Visual Studio 2010 C# programlama dili ile oluşturulan yazılım ara yüz programı, FPGA ortamında gerçekleştirilen üç farklı akıllı tanıma sisteminin parametrelerini ve sonuçlarını anlık olarak göstermektedir. Ara yüz programı, bir ana form ile üç farklı tanıma sisteminin parametrelerini ve sonuçlarını gösteren alt formlardan oluşmaktadır.

Gerçekleştirilen son aşamada ise tez çalışmasında gerçekleştirilen FPGA tabanlı akıllı tanıma sistemlerini test etmek, doğruluk oranlarını belirlemek ve başarımlarını değerlendirmek için laboratuvar ortamında prototip güç sistemi modülü oluşturulmuştur. Prototip güç sistemi modeli üzerinden, gerçek zamanlı olarak akıllı tanıma sistemlerinin testleri yapılmış ve çevrimdışı akıllı tanıma sistemleri için veriler elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gerçekleştirilen donanımsal ve yazılımsal yapının oldukça etkili ve hızlı bir performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel düzenekte oluşturulan bir GKB, çevrimiçi tanıma sistemi tarafından anlık olarak tespit edilebilmektedir. Böylece, FPGA ortamında oluşturulan DD tabanlı tespit algoritmasının oldukça etkili bir yaklaşım olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen çevrimdışı uygulamalarda, yüksek başarım oranlarına sahip tanıma başarımları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, gerçekleştirilen gömülü sistem yaklaşımlarının tanıma performansının yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca, elde edilen çevrimdışı sonuçlar ile literatürdeki benzer çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasında oldukça etkili yaklaşımların gerçekleştirildiği açıkça görülebilmektedir.

7.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

1. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çevrimiçi tanıma sistemi algoritmalarının oldukça yüksek bir tanıma performansına sahip olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen çevrimiçi tanıma sistemi kullanılarak güç sistemi tedarikçileri ve kullanıcıları, tespit edilen GKO ve GKB türlerine oluşum esnasında anlık olarak erişilebilecek ve güç sisteminin güç kalitesi hakkında ait önemli bilgilere rahatlıkla ulaşabileceklerdir.
2. Tezin kapsamını oluşturan güç kalitesi tanıma sistemlerinin literatürdeki uygulamaları incelendiğinde, özellikle çevrimdışı ve bilgisayar ortamındaki uygulamalara yoğunlaşıldığı görülmektedir. Ayrıca, güç kalitesi verisi olarak çoğunlukla yapay verilere yer verildiği gözlemlenmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, literatürdeki benzer çalışmalara referans olabilecek oldukça etkili araştırmalara yer verilmiştir.
3. Gerçekleştirilen tez çalışmasında yapılan yenilikçi bir yaklaşım ise GKO ve GKB türlerinin aynı anda tespit eden tasarımlar içermesidir. Böylece, güç sisteminde meydana gelen bir güç kalitesi probleminin sebebi ve her bir fazda meydana getirdiği etki aynı anda tespit edilebilmektedir.
4. Karar destek sistemleri ile ilgili çalışmalar, genellikle çevrimdışı bir yapıda kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise karar destek sisteminin gömülü bir donanım üzerinde gerçek zamanlı çalışması gerçekleştirilmiştir. Böylece yapılan bu çalışma ile karar destek sistemlerinin, FPGA gibi hızlı çalışan donanımlar üzerinde uygulanabilirliği gösterilmiştir.
5. Bu tez çalışmasında, FPGA ortamında paralel olarak çalışan üç farklı sinyal işleme yöntemine ait akıllı tanıma sistemleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, meydana gelen bir güç kalitesi problemi için üç ayrı tanıma sistemi ile sonuçlar elde edebilen tek bir FPGA donanımsal yapısı ortaya çıkarılmıştır.
6. Güç kalitesi problemleri için yaygın olarak kullanılan özellik çıkarım algoritmalarında, DD ve HHD için literatürde yaygın olarak kullanılan enerji yöntemi kullanılmıştır. FD yönteminde ise yenilikçi bir yaklaşım ile özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, bu yaklaşımın oldukça etkili olduğu gösterilmiştir.
7. Gerçekleştirilen tez çalışmasında, çevrimiçi tanıma sistemleri için GKO ve GKB verileri için üçer adet tanıma başarımları elde edilmiştir. Çevrimdışı tanıma

sistemleri için GKO ve GKB verileri için dokuzar adet tanıma başarımları elde edilmiştir. Böylece, bu tez çalışması kapsamında toplam 24 farklı tanıma başarımları elde edilmiştir. Bu başarım sonuçları incelendiğinde GKO verileri için LSSVM sınıflandırma sistemi ile %99'un üzerinde bir başarım oranı elde edilmiştir. GKB verileri için ise özellikle FD tabanlı LSSVM sınıflandırıcı için hatasız bir başarım performansı elde edilmiştir.

8. ÖNERİLER

Bu çalışmada, güç kalitesi problemlerinin sürekli ve kesintisiz bir biçimde belirlenmesine yönelik gömülü sistem tabanlı akıllı tanıma sistemleri geliştirilmiştir. Bu akıllı tanıma sistemleri, çevrimiçi ve çevrimdışı olmak üzere iki farklı yaklaşımla uygulanmıştır. Akıllı tanıma sistemlerinin oluşturulmasında, donanımsal ve yazılımsal tasarımlar hazırlanmıştır. Oluşturulan bu akıllı tanıma sistemleri ile güç kalitesi çalışmalarının sahada uygulanmasına yönelik oldukça önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, elde edilen sonuçlar, yüksek güç kalitesi için güç sistemlerinin işletilmesi ve özellikle korunması alanında yapılacak olan çalışmalara önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, sıkça kullanılan çevrimdışı ve bilgisayar tabanlı akıllı güç kalitesi tanıma sistemleri uygulamalarından farklı olarak anlık ve bilgisayardan bağımsız akıllı bir güç kalitesi tanıma sisteminin gerçekleştirilmesi, yenilikçi yaklaşımlar kullanılarak güç kalitesi problemlerinin sahada çözümüne yönelik çalışmalar yapılmasına imkan sağlayabilir.

Bu tez çalışmasında, tasarlanan donanımsal ve yazılımsal sistemlerin güncellenebilir olması, Tanıma sistemine esnek bir yapı kazandırarak, yenilikçi sistem eklemelerinin rahatlıkla uygulanabilmesine imkan sağlar. Gerçekleştirilen sistemin bir tesise kurulması planlandığında, güç kalitesi problemlerine yönelik ihtiyaç ve talepler doğrultusunda sadece yazılımsal düzenlemeler yapılarak sistem rahatlıkla güncellenebilir.

Yazılımsal güncellemelerin rahatlıkla yapılabilmesi, farklı sinyal işleme ve sınıflandırma yaklaşımlarının uygulanmasına olanak sağlayacağından, bu alanda çalışan araştırmacılar, farklı sinyal işleme ve sınıflandırma algoritmaları içeren FPGA tabanlı tanıma sistemleri tasarlayabilirler.

Tez kapsamında oluşturulan tanıma sistemi ile gerçek zamanlı GKO ve GKB verileri elde edildiğinden, buradan elde edilen GKO ve GKB verileri kullanılarak gerçek güç kalitesi verileri üzerinde araştırmalar yapılabilir.

Bu tez çalışmasında, FPGA tabanlı akıllı güç kalitesi tanıma sistemleri üzerine tasarımlar yapılmıştır. Yapılan bu çalışma geliştirilerek, aynı zamanda FPGA ortamında güç kalitesinin düzeltilmesine yönelik güç elektroniği tabanlı önleyici ya da düzenleyici sistemler eklenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Saxena, D., Verma, K.S., Singh, S.N.,** 2010, Power quality event classification: an overview and key issues, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, **2**(3), 186-189.

[2] **Saini, M. K., Kapoor, R.**, 2012, Classification of power quality events–a review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **43**(1), 11-19.

[3] **Gaing, Z. L.**, 2004, Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**(4), 1560-1568.

[4] **Axelberg, P.G.V., Irene, Y.H.G., Bollen, M.H.J.**, 2007, Support vector machine for classification of voltage disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22** (3), 1297–1303.

[5] **Dugan, R. C., Mcgranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W.**, 2002, Electrical power systems quality, McGraw-Hill, New York.

[6] **Kennedy, B.**, 2000, Power quality primer, McGraw-Hill, New York.

[7] **IEEE Standard 519-1992**, 1993, IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems.

[8] **CENELEC EN 50160**, 1999, Voltage characteristics of the electricity supplied by public distribution Systems.

[9] **IEC 61000-4-30**, 2003, Testing and measurement techniques—section 30: power quality measurement methods.

[10] **IEC 61000-4-7**, 2002, Testing and measurement techniques—section 7: general guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto.

[11] **IEEE Std. 1453-2004**, 2005, IEEE recommended practice for measurement and limits of voltage fluctuations and associated light flicker on ac power system, New York, USA.

[12] **TSE TS EN 50160 Standardı** – Ankara, 2011

[13] **Rodriguez, A., Aguado, J.A., Martín, F., Lopez, J.J., Munoz, F., Ruiz J.E.,** 2012, Rule-based classification of power quality disturbances using S-transform, *Electric Power Systems Research*, **86**, 113–121.

[14] **Erişti, H.**, 2010, Güç kalitesi için dalgacık dönüşümü ve destek vektör makine tabanlı bir olay tanıma tekniğinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[15] **Won, D.J, Chung, I1.Y., Kim, J.M, Moon, S.I1., Se, J.C., Cho, J.W.**, 2002, Development of power quality monitoring system with central processing scheme, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, **18**, 915-919.

[16] **Lakshmikanth, A., Morcos, M.M., White, W.N.**, 1998, A real-time system for power quality testing, *IEEE Trans. Instrum. Meas*., **47**, 1464–1468..

[17] **Gallo, D.,Landi, C., Rignano, N.**, 2008, Real-time digital multifunction instrument for power quality integrated indexes measurement, *IEEE Trans. Instrum. Meas*., **57**, 2769–2776.

[18] **Martens, O., Trampark, H., Liimets, A., Nobel, P., Veskimester, A., Jarvalt, A. ,** 2007**,** DSP-based power-quality monitoring device. *IEEE International Symposium on In Intelligent Signal Processing*, WISP 2007, 1-5.

[19] **Gallo, D., Landi, C., Rignano, N.,** 2007, DSP based instrument for real-time PQ analysis, *IEEE International Symposium on In Industrial Electronics*, 2481-2486.

[20] **Karimi, M., Mokhtari, H., Iravani, M. R.,** 2000, Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications, IEEE Transactions on Power Delivery, **15**(4), 1212-1220.

[21] **Pérez, E., Barros, J.**, 2008, A proposal for on-Line detection and classification of voltage events in power systems, *IEEE Trans. Power Deliv*., **23**, 2132–2138.

[22] **Radil, T., Ramos, P. M., Janeiro, F. M., Cruz Serra, A.,** 2008**,** PQ monitoring system for real-time detection and classification of disturbances in a single-phase power system, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **57**(8), 1725-1733.

[23] **Uyar, M.**, 2008. Güç kalitesindeki bozulma türlerinin akıllı örüntü tanıma yaklaşımları ile belirlenmesi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[24] **Flores, R.A.**, 2002, State of the art in the classification of power quality events, an overview, *Proc. 10th Int. Conf. Harmonics Quality of Power*, **1**, 17-20.

[25] **Arrais, E., Roda, V.O., Neto, C.M.S., Ribeiro, R.L.A., Costa, F.B.**, 2014, FPGA versus DSP for wavelet transform based voltage sags detection, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 12-15 May, Montevideo.

[26] **Saini, M.K., Kapoor, R.**, 2012, Classification of power quality events- a review, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **43**, 11-19.

[27] **Gu, I.Y.H., Bollen, M.H.J.**, 2000, Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**(4), 1279–1284.

[28] **Addison, P.S.**, 2002, The illustrated wavelet transform handbook, *Institute of Physics*.

[29] **Jurado, F., Acero, N., Ogayar, B.**, 2002, Application of signal processing tools for power quality analysis, *IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering*, **1**, 82–87.

[30] **Azam, M.S., Fang, T., Pattipati, K.R., Karanam, R. A.**, 2004, Dependency model-based approach for identifying and evaluating power quality problems, *IEEE Transactions on Power Delivery*,**19**(3),1154–1166.

[31] **Santoso, S., Grady, W.M., Powers, E.J., Lamoree, J., Bhatt, S.C.**, 2000, Characterization of distribution power quality events with fourier and wavelet transforms, *IEEE Transactions on Power Delivery*,**15**(1), 247–54.

[32] **Tarasiuk, T.**, 2004, Hybrid wavelet-fourier spectrum analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**(3), 957–964.

[33] **Poisson, O., Rioual, P., Meunier, M.,** 2000, Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**(3),1039–1044.

.

[34] **Gencer, O., Ozturk, S., Erfidan, T.**, 2010, A new approach to voltage sag detection based on wavelet transform, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **32**(2), 133–140.

[35] **Parameswariah, C., Cox, M.**, 2002, Frequency characteristics of wavelets, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **17**(3),800–804..

[36] **Angrisani, L., Daponte, P., D'Apuzzo, M.**, 2001, Wavelet network-based detection and classification of transients, *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, **50**(5), 1425–1435.

[37] **Ece, D.G., Gerek, O.N.**, 2004, Power quality events using joint 2-d wavelet subspaces, *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, **53**(4), 1040–1046.

[38] **Gerek, O.N., Ece, D.G.**, 2008, Compression of power quality event data using 2d representation, *Electric Power Systems Research*, **78**(6), 1047–1052.

[39] **Erişti, H., Yıldırım, Ö., Erişti, B., Demir, Y.,** 2013, Optimal feature selection for classification of the power quality events using wavelet transform and least squares support vector machines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **49**, 95-103.

[40] **Rodriguez, A., Ruiz, I. E., Aguado, J., Lopez, J. J., Martin, F. I., & Muñoz, F.,** 2011, Classification of power quality disturbances using S-transform and artificial neural networks, *International Conference on In Power Engineering Energy and Electrical Drives*, 1-6.

[41] **Stockwell, R.G., Mansinha, L., Lowe, R.P.**, 1996, Localization of the complex spectrum: the S-transform, *IEEE Trans. Signal Process*, **44**, 998–1001.

[42] **Erişti, H., Yıldırım, Ö., Erişti, B., Demir, Y.,** 2014, Automatic recognition system of underlying causes of power quality disturbances based on s-transform and extreme learning machine, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **61**, 553-562.

[43] **Jaya Bharata Reddy, M., Raghupathy, R. K., Venkatesh, K. P., Mohanta, D. K.** 2013, Power quality analysis using discrete orthogonal s-transform (DOST), *Digital Signal Processing*, **23**(2), 616-626.

[44] **Chilukuri, M.V, Dash, P.K.**, 2004, Multi-resolution S-transform based fuzzy recognition system for power quality events. *IEEE Trans Power Deliv.*, **19**, 323-330.

[45] **Biswal, M., Dash, P.K.**, 2013, Detection and characterization of multiple power quality disturbances with a fast S-transform and decision tree based classifier, *Digit Signal Process.*, **23**, 1071-1083.

[46] **Yang, L., Yu, J., Lai, Y.**, 2010, Disturbance source identification of voltage sags based on Hilbert-Huang transform, *In Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 1-4.

[47] **Shukla, S., Mishra, S., Singh, B.**, 2009, Empirical mode decomposition with Hilbert transform for power-quality assessment, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**(4), 2159-2165.

[48] **Hafiz, F., Chowdhury, A. H., Shahnaz, C.**, 2012, An approach for classification of power quality disturbances based on Hilbert Huang Transform and relevance vector machine, *International Conference on In Electrical & Computer Engineering (ICECE)*, 201-204.

[49] **Zhan, W., Xiangjun, Z., Xiaoxi, H., Jingying, H.**, 2012, The multi-disturbance complex power quality signal HHT detection technique, *In Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 1-5.

[50] **Suja, S., Jerome, J.**, 2010, Pattern recognition of power signal disturbances using s-transform and tt-transform, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **32**(1), 37–53.

[51] **Ferreira, D. D, Cerqueira, A. S., Duque, C.A., Ribeiro, M.V.**, 2009, Hos-based method for classification of power quality disturbances, *IET Electronics Letters*, **45**(3), 183–5.

[52] **Ribeiro, M. V., Marques, C. A., Duque, C. A., Cerqueira, A. S., Pereira, J. L. R.**, 2006, Power quality disturbances detection using HOS, *In Power Engineering Society General Meeting*, 6.

[53] **Xiao, X., Xu, F., Yang, H.**, 2009, Short duration disturbance classifying based on S-transform maximum similarity, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **31**(7), 374-378.

[54] **Macias, J.A.R., Exposito, A.G.**, 2006, Self-tunning of kalman filters for harmonic computation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**(1), 501-503.

[55] **Perez, E., Barros, J.**, 2008, An extended kalman filtering approach for detection and analysis of voltage dips in power systems, *Electric Power Systems Research*, **78**(4):618-625.

[56] **Perez, E., Barros, J.**, 2006, Voltage event detection and characterization methods: a comparative study, *IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*, 1–6.

[57] **Khosravi, A., Melendez, J., Colomer, J.**, 2009, Classification of sags gathered in distribution substations based on multiway principal component analysis, *Electric Power Systems Research*, **79**(1), 144–51.

[58] **Abdel-Galil, T. K., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A.**, 2003, Power quality event detection using Adaline, *Electric Power Systems Research*, **64**(2), 137-144.

[59] **Gargoom, A.M., Ertugrul, N., Soong, W.L.**, 2007, Investigation of effective automatic recognition systems of power quality events, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22**(4), 2319–2326.

[60] **Huang, S. J., Hsieh, C. T.**, 2001, Feasibility of fractal-based methods for visualization of power system disturbances, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **23**(1), 31-36.

[61] **Soo-Hwan, C., Jang, G., Kwon, S. H.**, 2010, Time-frequency analysis of power-quality disturbances via the Gabor–Wigner transform, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **25**(1), 494-499.

[62] **Manimala, K., Selvi, K., Ahila, R.**, 2011**,** Hybrid soft computing techniques for feature selection and parameter optimization in power quality data mining, *Applied Soft Computing*, **11**(8), 5485-5497.

[63] **Chen, Z., Urwin, P.,** 2001, Power quality detection and classification using digital filters, *IEEE In Power Tech Proceedings*, Porto, **1**, 6.

[64] **Zhang, H., Liu, P., & Malik, O. P.**, 2003, Detection and classification of power quality disturbances in noisy conditions. *In Generation, Transmission and Distribution*, **150**(5), 567-572.

[65] **Ghosh, A. K., Lubkeman, D. L.**, 1995, The classification of power system disturbance waveforms using a neural network approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **10**(1), 109-115.

[66] **Erişti, H., Uçar, A., Demir, Y.**, 2010, Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines, *Electric power systems research*, **80**(7), 743-752.

[67] **Meher, S. K., Pradhan, A. K.**, 2010, Fuzzy classifiers for power quality events analysis, *Electric power systems Research*, **80**(1), 71-76.

[68] **El-Naggar, K. M., Al-Hasawi, W. M.**, 2006, A genetic based algorithm for measurement of power system disturbances, *Electric power systems research*, **76**(9), 808-814.

[69] **Youssef, A. M., Abdel-Galil, T. K., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A.**, 2004, Disturbance classification utilizing dynamic time warping classifier, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**(1), 272-278.

[70] **Barros, J., de Apraiz, M., Diego, R. I.**, 2009, A virtual measurement instrument for electrical power quality analysis using wavelets, *Measurement*, **42**(2), 298-307.

[71] **Santos, M., Tostes, M., Silva, R., Fadul, R. S.**, 2009, Software based on labview for monitoring and analysis some power quality parameters, *15th International Conference on In Intelligent System Applications to Power Systems*, 1-6.

[72] **Bilik, P., Koval, L., Hajduk , J.**, 2008, CompactRIO embedded system in power quality analysis, *Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, Wisla, Poland, 577-580.

[73] **Artioli, M., Pasini, G., Peretto, L., Sasdelli, R., Filippetti, F.**, 2004, Low-cost dsp-based equipment for the real-time detection of transients in power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **53**(4), 933-939..

[74] **Valtierra-Rodriguez, M., Osornio-Rios, R. A., Garcia-Perez, A., Romero-Troncoso, R. D. J.**, 2013, FPGA-based neural network harmonic estimation for continuous monitoring of the power line in industrial applications, *Electric Power Systems Research*, **98**, 51-57.

[75] **He, S., Li, K., Zhang, M.**, 2013, A Real-Time power quality disturbances classification using hybrid method based on S-Transform and Dynamics, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **62**(9), 2465-2475.

[76] **Ruiz-Llata, M., Guarnizo, G., Boya, C.**, 2011, Embedded power quality monitoring system based on independent component analysis and SVMs, *The 2011 International Joint Conference on Neural Networks*, 31 July- 5 Agust, San Jose, CA.

[77] http://www.fpga4fun.com, Looking to learn more about FPGAs, Ekim 2014.

[78] **Maeyer, U.,** 2001, Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays, Springer, Germany.

[79] Resmi Gazete, Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik, **26287**, 12/09/2006.

[80] **Martzloff, F.**, 1997, Power quality work at the International Electrotechnical Commission. In: Proceedings, *PQA' 97 Europe*, Sweden.

[81] **Bollen, M.H.J.**, 2000. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, 1st ed., IEEE Pres., New York.

[82] **Bollen, M.H.J.**, 2003, What is power quality?, *Electr Power System Res.*, **66**, 5-14.

[83] **Greenwood, A.**, 1991**,** Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, New York.

[84] **Styvaktakis, E., 2002,** Automating power quality analysis, *PhD Thesis*, Chalmers University of Technology.

[85] **Bollen, M. H., Gu, I.,** 2006, Signal processing of power quality disturbances, **30,** John Wiley & Sons.

[86] **IEEE Standart 1159-1995:** IEEE recommended practice for monitoring electric power quality.

[87] **Türkoğlu, İ.,** 2002, Durağan olmayan işaretler için zaman-frekans entropilerine dayalı akıllı örüntü tanıma, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[88] **Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O.,** 2003, Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[89] **Edelman, A., McCorquodale P., Toledo, S.,** 1999, The future fast fourier transform, *SIAM J.Sci.Computing*, **20**, 1094-1114.

[90] **Smith, S.,** 2003, Digital Signal Processing, Newnes, USA.

[91] **Kesler., M, Özdemir., E,** 2009, Bilgisayar ve dsp destekli harmonik analiz sistemi geliştirilmesi ve birleşik güç kalite düzenleyicisine uygulanması , *3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, İzmit, 21-22 Mayıs 2009, 313-317.

[92] **Mallat, S.,** 1989, A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 11**(7), 674–693.

[93] **Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Liu, H. H.,** (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London*. *Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **454**(1971), 903-995.

[94] **Dogan, N., Duran, F.**, 2005, Tms320f2812 dsp işlemcisi kullanılarak parelel aktif güç filtresinin bulanık mantıkla denetimi, *4th International Advanced Technologies Symposium*, September 28-30, Konya/Türkiye.

[95] **Short, T. A.,** 2004, Electric Power Distribution Hand Book, *CRC Press LCC*.

[96] **Blais, J.A.R.,** 1988, Estimation and Spectral Analysis, *The University of Calgary Press*, Calgary, Alberta, Canada, ISBN 0-919813-41-0.

[97] **Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ.,** 2010, Karar ağaçları ile uydu görüntülerinin sınıflandırılması: Kocaeli örneği, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **2**(1), 36-45.

[98] **Safavian, S.R., Landgrebe, D.**, 1991, A survey of decision tree classifier methodology, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, **21**, 660-674.

[99] **Yıldırım, Ö.,** 2010, Veri madenciliği yöntemleriyle depremlerin analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[100] **Dolgun., M. Ö.,** 2006, Büyük alışveriş merkezleri için veri madenciliği uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara..

[101] **Suykens, J.A.K., Vandewalle, J.**, 1999, Least squares support vector machine classifiers, *Neural Process Letter*, **9** (3), 293–300.

[102] **Huang, G. B., Zhu, Q. Y., Siew, C. K.,** 2006, Extreme learning machine: theory and applications, *Neurocomputing*, **70**(1), 489-501.

[103] **Suresh, S., Saraswathi, S., Sundararajan, N.**, 2010, Performance enhancement of extreme learning machine for multi-category sparse data classification problems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **23**(7), 1149-1157.

[104] **Hassoun, M.H.**, 1995, Fundamentals of Artificial Neural Networks, MIT Press.

[105] **Stayvaktakis, E., Bollen, M.H.J and Gu, I.Y.**, 2002. Expert System for Classification and Analysis of Power System Events, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **17**(2), 423–428.

[106] **Axelberg, P.G.V, Gu, I.Y. and Bollen, M.H.J.**, 2007. Support vector machine for classification of voltage disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22-3, 1297–1303.

[107] **Stayvaktakis, E., Bollen, M.H.J and Gu, I.Y.**, 2002, Automatic classification of power system events using rms voltage measurements, *Power Engineering Society Summer Meeting*, **2**, 824–829.

[108] **Santoso, S., Grady, W.M., Powers, E. J., Lamoree, J. and Bhatt, S.C.**, 2000. A Scalable PQ Event Identification System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15-2**, 738–743.

[109] **Abdel-Galil, T. K., EI-Saadany, E.F., Youssef, A.M.A., Salama, M.M**., 2005, Disturbance classification using hidden markov models and vector quantization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **20**(3), 2129–2135.

[110] **Reaz, M.B.I., Choong, F., Sulaiman, M.S., Mohd-Yasin, F., Kamada, M.**, 2007, Expert system for power quality disturbance classifier. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22**(3), 1979–1988.

ÖZGEÇMİŞ

Belkıs ERİŞTİ

Tunceli Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

E-Posta: beleristi@gmail.com

1978	Tunceli/Pertek'te doğdu
1992–1995	Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesini tamamladı
1996–2000	Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünden mezun oldu.
2000-2003	Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı.
2010-	Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Devreler ve Sistemler A.B.D.'da Doktora Eğitimine başladı ve halen devam etmektedir.
2009-2012	Tunceli Üniversitesi Tunceli Meslek Yüksekokulu Elektrik Programında öğretim görevlisi kadrosunda çalıştı.
2012-	Tunceli Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk annesidir.