

**GÜÇ SİSTEMİ HARMONİKLERİNİN GERÇEK  
ZAMANLI OLARAK BELİRLENMESİ**

**2017  
DOKTORA TEZİ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ**

**Mehmet GÖK**

**GÜÇ SİSTEMİ HARMONİKLERİNİN  
GERÇEK ZAMANLI OLARAK BELİRLENMESİ**

**Mehmet GÖK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Aralık 2017**

Mehmet GÖK tarafından hazırlanan “GÜÇ SİSTEMİ HARMONİKLERİNİN GERÇEK ZAMANLI OLARAK BELİRLENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet AKBABA

Tez Danışmanı, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. İbrahim SEFA

Tez Danışmanı, Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 18/12/2017

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Okan ERKAYMAZ (BEÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet AKBABA (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. İlhami Muharrem ORAK (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kemal AKYOL (KÜ)

Üye : Doç. Dr. Oğuz Fındık (KBÜ)

...../...../2017

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mehmet GÖK

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **GÜÇ SİSTEMİ HARMONİKLERİNİN GERÇEK ZAMANLI OLARAK BELİRLENMESİ**

**Mehmet GÖK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları:**

**Prof. Dr. Mehmet AKBABA**

**Prof. Dr. İbrahim SEFA**

**Aralık 2017, 92 sayfa**

Bu çalışmada, güç sistemlerinde karşılaşılan harmonikleri gerçek zamanlı olarak belirleyebilen bir cihaz geliştirilmiştir. Bu cihaz ile 100. dereceye kadar olan harmonikler detaylı olarak incelenebilmektedir. Geliştirilmiş olan cihaz USB bağlantılı bir sinyal yakalama cihazı ve sinyal işleme görevini yerine getiren bir bilgisayardan oluşmaktadır. Veri yakalama donanımı hem kişisel bilgisayarlarla hem de tek kart bilgisayarla uyumludur. Sinyal işleme yazılımı ise çoklu platform uyumludur. Bu yazılım sadece harmonikleri gerçek zamanlı belirlemekle kalmayıp aynı zamanda güç kalitesi izleme ve güç sisteminde meydana gelen hataları da kayıt edebilecek şekilde geliştirilmiştir. Güç kalitesi bozulmalarının tespit edilebilmesi için Stockwell dönüşümü ve ileri beslemeli yapay sinir ağları kullanılmıştır. Güç kalitesi sınıflandırma işlemi için 5 periyotluk güç sinyali kullanılmıştır. Sınıflandırma işlemi Raspberry Pi 3 tek kart bilgisayarı üzerinde üç fazlı gerilim sinyali için 41 ms'nin

altında sınıflandırma işlemini tamamlanmaktadır. Bu süre 100 ms'lik gerçek zaman eşiğinin altındadır. Bu performans, Stockwell dönüşümü işleminin sadece özellik çıkartma basamağında kullanılan özellikler için çalıştırılması ile yakalanmıştır. Buna ek olarak, gerçek şebeke sinyalinde gözlemlenen harmonikler eğitim için kullanılan sinyallere kısmi olarak eklenmiş ve sınıflandırma algoritmasının gerçek güç sinyali bozulmalarına karşı sınıflandırma hassasiyeti iyileştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin güç sistemi dağıtım hatlarında kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler :** Gerçek-Zamanlı işleme, harmonikler, güç sistemleri, tek kart bilgisayar.

**Bilim Kodu** : 924.1.50

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **POWER SYSTEM HARMONICS DETERMINATION IN REAL-TIME**

**Mehmet GÖK**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Computer Engineering**

**Thesis Advisors:**

**Prof. Dr. Mehmet AKBABA**

**Prof. Dr. İbrahim SEFA**

**December 2017, 92 pages**

In this work, a device that can detect the harmonics encountered in power systems in real time, has been developed. Harmonics up to the 100th order can be examined with the help of this device in detail. The device consists of a USB interfaced data acquisition hardware and a computer that performs signal processing tasks. The data acquisition device is compatible with both personal computer and single board computers. On the other hand signal processing software is multi-platform compatible. This software has been developed not only to detect harmonics in real time, but also to monitor power quality and record the detected faults in the power system. Stockwell transform and feed forward artificial neural networks are employed to detect power quality disturbances. Five periods of power signal is used for power quality classification. Classification task is completed under 41 ms for three phase voltage signals on Raspberry Pi 3 single board computer. This time is

under the real-time limit of 100 ms. This performance is achieved by implementing the Stockwell transform only for the frequency rows that are used in the feature extraction step. In addition to this, the harmonics observed in the real power signal are partially added to the signals used for training and the classification accuracy is improved against the real power quality disturbances in this way. The obtained results show that the developed system can be used in power system distribution lines.

**Key Word** : Real-Time processing, harmonics, power systems, single board computer.

**Science Code** : 924.1.50

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren kıymetli hocalarım Prof. Dr. Mehmet AKBABA ve Prof. Dr. İbrahim SEFA'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında geliştirilen uygulamaların iyileőtirilmesinde öneri ve yardımlarını esirgemeyen, Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Necmi ALTIN'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. GÜÇ KALİTESİNİ ETKİLEYEN OLAYLAR .....	3
1.1.1. Gerilim Frekansı Değişimleri .....	4
1.1.2. Gerilimdeki Etkin Değer Değişimleri.....	4
1.1.3. Harmonikler Ve Ara Harmonikler.....	6
1.1.4. Kırpışma (Flicker) .....	9
1.1.5. Gerilim Çentikleşmesi (Notching).....	10
1.1.6. Gerilim Dengesizliği.....	11
1.1.7. Geçici Olaylar (Transient Events) .....	11
1.2. GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİ STANDARDI .....	12
1.3. TEZİN AMACI.....	13
1.4. LİTERATÜR TARAMASI.....	16
BÖLÜM 2 .....	26
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	26
2.1. EFEKTİF DEĞER (RMS) YÖNTEMİ .....	26
2.2. HARMONİKLERİN TESPİT EDİLMESİ (FOURIER ANALİZİ) .....	27
2.2.1. Hızlı Fourier Dönüşümü .....	29

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.2.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü .....	29
2.3. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ .....	30
2.4. STOCKWELL DÖNÜŞÜMÜ (S-DÖNÜŞÜMÜ) .....	31
2.4.1. S-Dönüşümü Matematiksel İfadesi.....	32
2.5. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	35
2.5.1. Geri Yayımlı Yapay Sinir Ağları .....	38
BÖLÜM 3 .....	39
VERİ TOPLAMA CİHAZININ DONANIMSAL TASARIMI .....	39
3.1. MİKRODENETLEYİCİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN CİHAZ .....	39
3.2. FPGA İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN CİHAZ.....	42
BÖLÜM 4 .....	47
HARMONİK BELİRLEME YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ.....	47
4.1. KODLANAN ALGORİTMALARIN TEST EDİLMESİ.....	48
4.2. GERÇEK ZAMANLI HARMONİK BELİRLEME YAZILIMI.....	51
4.3. PARALEL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE HARMONİK BELİRLEME .....	55
BÖLÜM 5 .....	58
GÜÇ KALİTESİ SINIFLANDIRMA.....	58
5.1. GÜÇ KALİTESİ BOZULMA TÜRLERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	59
5.2. GÜÇ KALİTESİ BOZULMA TÜRLERİNİN S-DÖNÜŞÜMÜ İLE ANALİZ EDİLMESİ .....	65
5.2.1. Güç Kalitesi Bozulma Türlerine İlişkin Özelliklerin Belirlenmesi .....	67
5.2.2. Seçilen Özelliklerin Ayırt Edici Özelliklerinin İncelenmesi .....	69
5.3. YAPAY SİNİR AĞI İLE SINIFLANDIRMA İŞLEMLERİ .....	70
5.4. S-DÖNÜŞÜMÜNÜN HIZLANDIRILMASI .....	76
5.5. GÜÇ KALİTESİ SINIFLANDIRMA YAZILIMI.....	77
5.6. DENEYSEL ÇALIŞMA VE PERFORMANS ÖLÇÜMÜ .....	80
BÖLÜM 6 .....	83
SONUÇLAR .....	83

	<b><u>Sayfa</u></b>
KAYNAKLAR .....	85
ÖZGEÇMİŞ .....	92



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Güç kalitesini bozan problemlerin sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.2. Gerilim düşmesi (Sag, Dip). .....	5
Şekil 1.3. Gerilim yükselmesi (Swell). .....	5
Şekil 1.4. Temel dalga ve 3. harmonik bileşeni içeren toplam dalganın şekli.....	8
Şekil 1.5. Örnek bir kırışıma ait sinyal grafiği. ....	10
Şekil 1.6. Örnek bir gerilim çentikleşmesine ilişkin sinyal şekli. ....	10
Şekil 1.7. Örnek bir osilasyonlu geçiş grafiği. ....	12
Şekil 1.8. Geliştirilen sistemin tek faz çalışmasına ilişkin blok şema. ....	14
Şekil 1.9. Otomatik güç kalitesi sınıflandırma sistemine ait blok şema. ....	15
Şekil 1.10. Qiang tarafından geliştirilen cihaza ilişkin blok diyagram.....	21
Şekil 1.11. Wenyi tarafından tasarımı gerçekleştirilen cihaza ait blok şema.....	22
Şekil 2.1. Harmonik içeren sinyal ve bileşenleri. ....	28
Şekil 2.2. Pencerelemiş Fourier dönüşümü için zaman-frekans ızgarası.....	30
Şekil 2.3. Wavelet dönüşümü için zaman-frekans ızgarası.....	31
Şekil 2.4. Örnek bir güç sinyali bozulmasının grafiksel analizi. ....	34
Şekil 2.5. Bir nöron hücresinin matematiksel modeli.....	36
Şekil 2.6. Çok katmanlı ileri beslemeli YSA modeli. ....	37
Şekil 3.1. Mikronetleyici ile gerçekleştirilen güç sinyali verisi toplama cihazı ....	40
Şekil 3.2. AD7606 ve FT2232H tümdevreleri için okuma ve yazma sinyalleri.....	41
Şekil 3.3. DAQ cihazı konfigürasyonuna ait proje dosya ağacı. ....	43
Şekil 3.4. FPGA-DAQ çalışmasında ilişkin mantıksal tasarım. ....	45
Şekil 4.1. Güç sinyalindeki gürültünün sıfır geçiş noktasındaki bozucu etkisi. ....	49
Şekil 4.2. MATLAB ortamında elde edilen filtrelenmiş sinyal ve parametre değerleri.....	50
Şekil 4.3. Güç kalitesi parametrelerinin test edilmesi için geliştirilen yazılım.....	50
Şekil 4.4. Harmonik belirleme yazılımına ait veri okuma ve veri işleme akışı.....	52
Şekil 4.5. Harmonik belirleme yazılımının QCustomPlot bileşenli hali.....	53
Şekil 5.1. Gerilim düşümüne ait dalga şekli. ....	61

## Sayfa

Şekil 5.2. Gerilim yükselişine ait dalga şekli.....	61
Şekil 5.3. Gerilim kesintisine ait dalga şekli.....	62
Şekil 5.4. Osilasyonlu geçişe ait dalga şekli. ....	63
Şekil 5.5. Gerilim düşümünün S-dönüşüm eğrileri ile incelenmesi. ....	66
Şekil 5.6. Osilasyonlu geçiş ve harmonikli sinyalin S-dönüşümü eğrileri ile incelenmesi.....	66
Şekil 5.7. X2 ve X3 özelliklerinin sinyal üzerinde belirlenmesi.....	68
Şekil 5.8. X2 ve X3 özelliklerinin dört farklı olayı ayırt edilişi. ....	69
Şekil 5.9. X3 ve X7 ile 6 farklı bozulma türünün ayırt edilişi. ....	70
Şekil 5.10. X2 ve X4 özellikleri ile bozulma durumlarının ayırt edilişi. ....	70
Şekil 5.11. S-dönüşümü ve ileri beslemeli YSA ile güç kalitesi sınıflandırma. ....	71
Şekil 5.12. YSA eğitimi ve doğrulanmasına ilişkin akış diyagramları. ....	72
Şekil 5.13. Seçilmiş frekanslarla ayırık S-dönüşümü hesaplanmasına ait akış.....	76
Şekil 5.14. Güç kalitesi sınıflandırma uygulamasına ait pencere görüntüsü. ....	79
Şekil 5.15. Kırpışma içeren güç sinyali. ....	80
Şekil 5.16. Gerilim yükselmesi içeren sinyal.....	80
Şekil 5.17. Osilasyonlu geçiş içeren sinyal.....	80

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1.1. Harmoniklerin temel frekans ile ifade edilmesi.....	6
Çizelge 1.2. Harmonikleri tanımlayan örnek standartlar. ....	7
Çizelge 1.3. Standartlara göre düşük, orta ve yüksek gerilim özellikleri. ....	12
Çizelge 4.1. MATLAB ve test yazılımında hesaplanan parametre değerleri. ....	51
Çizelge 4.2. 4 kanal 100 ksps örnekleme hızı ile sinyal işleme süreleri.....	56
Çizelge 4.3. Tek ve 8 kanallı çoklu FFT işlemlerinin performans ölçüm değerleri. .	57
Çizelge 5.1. Güç kalitesi bozukluklarına ilişkin sinyal modelleri. ....	63
Çizelge 5.2. Bu çalışma kapsamında ele alınan güç kalitesi bozulma türleri. ....	64
Çizelge 5.3. S-Dönüşümü sonrasında elde edilen ayırt edici özellikler.....	68
Çizelge 5.4. YSA eğitimi için kullanılan sinyallere eklenen harmonik genlikleri.....	72
Çizelge 5.5. Test verileri için çapraz doğrulama matrisine ait çizelge. ....	73
Çizelge 5.6. Farklı sınıflandırma yöntemleri ile S-dönüşümü performansı.....	74
Çizelge 5.7. Gerçek zamanlı işleme sırasından elde edilen zamanlama değerleri.....	81

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

V	: gerilim
I	: akım
f	: güç sinyali frekansı
Hz	: Hertz
p.u.	: per unit (normalize edilmiş değer birimi)
P <sub>st</sub>	: kısa süreli kırışma şiddeti
P <sub>lt</sub>	: uzun süreli kırışma şiddeti
V <sub>rms</sub>	: RMS gerilim değeri
$\Delta f$	: frekans değişimi
P	: aktif güç
Q	: reaktif güç
S	: görünür güç
$\mu s$	: mikrosaniye
T	: periyot
ms	: milisaniye
s	: saniye

## KISALTMALAR

- AB : Avrupa Birliği
- IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
- IEC : International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
- CEN : European Committee for Standardization (Standartlaştırma için Avrupa Komitesi)
- EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
- TEİAŞ: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
- AG : Alçak Gerilim
- YG : Yüksek Gerilim
- THD : Total Harmonics Distortion (Toplam Harmonik Bozulma)
- SNR : Signal-to-Noise Ratio (Sinyal-Gürültü Oranı)
- STFT : Short Time Fourier Transform (Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü)
- CPU : Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
- GPU : Graphics Processing Unit (Grafik İşleme Birimi)
- CUDA: Compute Unified Architecture (Nvidia Tekil İşleme Mimarisi)
- FIFO : First in First out (Kuyruk Mekanizması)
- DFT : Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
- FFT : Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
- SQL : Structured Query Language (Yapısal Sorgu Dili)
- YSA : Yapay Sinir Ağı
- ITX : Information Technology Extended (Genişletilmiş Bilgi Teknolojisi Formu)
- DAQ : Data Acquisition (Veri Yakalama)
- PQ : Power Quality (Güç Kalitesi)
- DSP : Digital Signal Processor (Sayısal Sinyal İşlemcisi)
- ADC : Analog-to-Digital Converter (Analog-Sayısal Dönüştürücü)
- ARM : Acorn RISC Machine (Acorn RISC İşlemci Mimarisi)
- API : Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arabirimi)
- RAM : Random Access Memory (Rastgele Erişimli Bellek)
- FPGA : Field Programmable Gate Arrays (Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri)

CPLD : Complex Programmable Logic Device (Programlanabilir Karmaşık Mantıksal Aygıt)

PCI : Peripheral Component Interconnect (Çevresel Bileşenler Arası Bağlantı Yolu)

EMIF : External Memory Interface (Harici Bellek Arabirimi)

SIMD : Single Instruction Multiple Data (Tek Komut Çoklu Veri)

PSD : Power Spectral Density (Spektral Güç Yoğunluğu)

SVM : Support Vector Machines (Destek Vektör Makineleri)

PLC : Power Line Communication Modem (Güç Hattı İletişim Modemi)

RMS : Root Means Square (Kareler Ortalamasının Karekökü)

WTF : Windowed Fourier Transform (Pencerelenmiş Fourier Dönüşümü)

ZFG : Zaman frekans gösterimi

MSE : Mean Square Error (Hata Karelerinin Ortalaması)

UART : Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Asenkron Seri İletişim Arabirimi)

SPI : Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Aygıt Arabirimi)

PWM : Pulse Width Modulation (Darbe Genlik Modülasyonu)

MBaud: Mega Baud (Bit Aktarım Hızı)

I2C : Inter-Integrated Circuit (Tümleşik Devre Etkileşim Arabirimi)

IP : Intellectual Property (Entellektüel Mal Varlığı)

UCF : User Constraint File (Kullanıcı Kısıt Dosyası)

AVX : Advanced Vector Extensions (Gelişmiş Vektör Uzantıları)

SoC : System on Chip (Tek Kırımcı Üzerindeki Bilgisayar Yapısı)

GUI : Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Arabirimi)

GPS : Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)

STA : S-Transform Amplitude Matrix (S-dönüşüm Genlik Matrisi)

FL : Fuzzy Logic (Bulanık Mantık)

DT : Decision Tree (Karar Ağacı)

OSA : Olasılıksal Yapay Sinir Ağı

GKS : Güç Kalitesi Sınıflandırma

PSO : Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Elektrik enerjisi günümüzde her alanda kullanılan ve standartların belirlediği sınırlar tüketiciye ulaştırılması gereken bir enerji kaynağıdır. Elektrik enerjisinin üretimi ve dağıtımını sürecinde rol alan kuruluşlar, abonelerine kesintisiz ve kaliteli bir elektrik enerjisi sağlamakla yükümlüdür [1-3].

Elektrik enerjisinde karşılaşılan problemlerin analiz edilerek çözülmesi, maddi kayıpların önüne geçilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde, bu problemlerin endüstride ve ticari alanlarda yol açtığı zararın yaklaşık 10 milyar avro olduğu tahmin edilmekte olup bu problemlerin çözümü için yapılan harcamalar ise bu rakamın %5'ine karşılık gelmektedir [1]. "IEEE Transactions on Industrial Applications" dergisinde yayınlanan bir anket sonucuna göre elektrik enerjisi sorunları yüzünden Amerikada yıllık 10 milyar doları bulan zarar ortaya çıkmaktadır [4]. Ülkemizin Doğu Anadolu bölgesinde elektrik enerjisi problemlerinin yoğun olarak yaşandığı bir bölgede 2004 yılında toplam 22 adet kesici arızalanmış, bu kesicilerin yenilenmesi için 100 804 lira harcanmıştır. Bu süreçte satılmayan enerji kaybı da 1 160 280 lira olarak gerçekleşmiştir [5]. Elektrik enerjisindeki problemler nedeniyle bu büyüklükte kayıpların yaşanmaması için uygun ölçüm ve analiz yöntemleri ile sorunlar belirlenmeli ve bu sorunlara göre gerekli önlemler alınmalıdır. Bu alanda yapılan çalışmalar "Güç Kalitesi" başlığı altında ifade edilmektedir.

Güç kalitesi açısından şebeke gürültüsüz, gerilim genliği ve frekans değerleri toleranslar dâhilinde, harmonik içermeyen bir sinüs eğrisi şeklinde olmalıdır [1,2]. Bu durum yük altında frekansı ve genliği değişmeyen düzgün bir sinüs eğri karakteristiğine sahip şebeke gerilimi ile tanımlanır.

Ancak pratikte şebeke üzerindeki farklı özelliklerdeki yüklerin varlığı ve güç sistemi elemanları nedeniyle sinüs eğrisinden sapmalar gerçekleşmektedir. Burada önemli olan nokta şebeke gerilimi kararlılığını belirleyen güç kalitesi parametrelerinin ulusal ve uluslararası standartlarda belirtilen sınır değerlerin dışında olmasıdır [1,2,6].

Bu standartları belirleyen belli başlı kuruluşlar, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC) ve Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), Avrupa Birliği Standardizasyon Komitesi (European Committee for Standardization, CEN) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) olarak sıralanabilir. Dünyada, güç kalitesi çalışmalarında genel olarak IEC ve IEEE tarafından yapılan tanımlamalar, sınırlar ve öneriler referans alınmaktadır.

Kaliteli elektrik enerjisinde, şebekenin tanımlanan bir noktasında gerilimin frekansa göre anlık değerini alması ve gerilimin dalga şeklinin sinüs biçimini koruması esastır. Güç kalitesinin çoğunlukla yük tarafında bozulduğu gözlemlenmiştir. Gerilimdeki bozulmalara örnek olarak gerilim genliğinin değişmesi, kesintiler, gerilim darbeleri, kırpışma, dalga şeklinin sinüsten uzaklaşması (distorsiyon) ve frekans değişimleri ele alınabilir. Gerilim düşümleri ve akım harmonikleri bunlar içinde en fazla karşılaşılan bozulmalardır. V-I karakteristiği doğrusal (linear) olmayan yükler şebekeden sinüoidal olmayan akımların çekilmesine neden olur. Bu akımlar da şebekede sinüs formundan uzak gerilim düşümleri oluşturarak gerilimin dalga şeklini bozarlar. Sinüs biçimini bozan ve harmonik olarak adlandırılan alt frekans bileşenleri harmonik olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde birçok yük mikroişlemci ya da mikrodenetleyici tarafından denetlenen güç elektroniği elemanları içermektedir. Bu yapıdaki yükler besleme noktasındaki (PCC, point of common coupling) güç kalitesi parametrelerinin bozulmasından çok fazla etkilenir. Bununla beraber güç elektroniği dönüştürücülerinin kendisi de güç kalitesini bozabilmektedir [1-3].

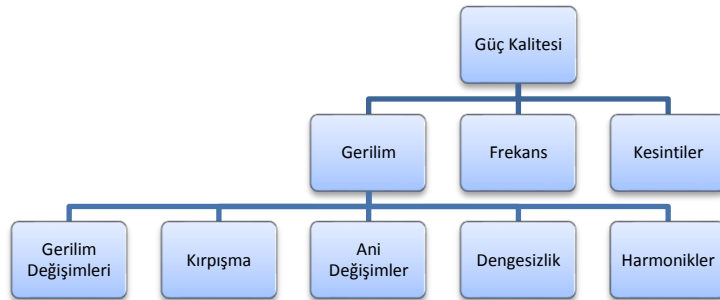
Güç kalitesinde ortaya çıkan problemlerin tespit edilmesinde genel olarak Fourier dönüşümü harmoniklerin belirlenmesinde ve etkin değer yöntemi de gerilim yükselmesi, düşmesi ve kesinti gibi durumların belirlenmesinde kullanılır. Bu

yöntemler geleneksel yöntemler olup karmaşık güç kalitesi bozulmalarının analizinde yeterli değildir. Modern güç kalitesi analizinde bu yöntemlere ek olarak zaman-frekans bilgisi içeren yöntemler de kullanılmaktadır. Dalgacık dönüşümü ya da kısa zamanlı Fourier dönüşümü söz konusu yöntemlere örnek olarak gösterilebilir.

## 1.1. GÜÇ KALİTESİNİ ETKİLEYEN OLAYLAR

Güç kalitesinin ölçümü ile gerilim ve akım değişimleri gibi olaylar kayıt altına alınarak, bu ölçüm sonuçlarına göre ihtiyaç duyulan önlemler alınabilir ve sistemin sürekliliği sağlanabilir. Böylelikle ticari açıdan büyük kayıplar yaşanması engellenebilir. Şebekenin sürekli izlenmesi, güç sistemlerinde meydana gelen problemlerin analizi için gerekli verilerin elde edilmesini sağlar ve bu şekilde gelecekte ne tür önlemler alınabileceği belirlenebilir [2,6].

Bir gerilim sinyalinin kaliteli olarak değerlendirilebilmesi için taşıdığı güç kalitesi parametrelerinin ulusal veya uluslararası standartlara uygun olup olmadığına bakılır. Bu standartlar da gerilim bozulmaları, gerilim etkin değer değişimi, kırpışma, ani değişimler, harmonik bozulmalar ve gerilim dengesizliği olmak üzere beş ana grupta ele alınabilir [1]. Şekil 1.1’de güç kalitesini bozan problemlerin sınıflandırılması gösterilmiştir. Üç fazlı sistemlerde fazlar arası dengesizlik de güç kalitesini bozan etmenler arasında ele alınabilir [1,5].



Şekil 1.1. Güç kalitesini bozan problemlerin sınıflandırılması [1].

Ülkemizde elektrik enerjisi verimliliğini artırmak ve iletim sisteminde enerji kalitesine etki eden bileşenleri ölçüme dayalı izlemek amacıyla Güç Kalitesi Milli

Projesi oluşturulmuştur. Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ), TÜBİTAK-Bilten, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Hacettepe Üniversitesi (HÜ), Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) ve Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) kurumlarının ortak olarak yer aldığı proje kapsamında IEEE Std. 1159-2009'da tanımlanan güç kalitesi parametrelerinin ölçümü yapılmaktadır [7].

### **1.1.1. Gerilim Frekansı Değişimleri**

Gerilimin frekans değeri değişimleri, sistemin temel frekansının nominalden (50 Hz) sapması olarak tanımlanır. Frekans değişimlerinin miktarı ve süresi, yük karakterine ve jeneratör kontrol sistemlerinin yük değişimine verdiği cevaba göre değişir. İzin verilen sınırların dışına taşan frekans değişimlerine; şebeke grubundaki hatalar, büyük yük bloklarının devre dışı kalmaları veya önemli miktarda güç üreten jeneratörlerin devre dışı kalmalarına neden olabilir. IEC 61000-4-30 standardında belirtilen değerlere göre şebeke geriliminin frekansının maksimum her 10 saniyede bir ölçülmesi gerekir ve şebeke frekansında olabilecek maksimum sapma miktarı  $f = \pm 0,05$  Hz ile sınırlandırılmıştır. IEEE 1159:2009 standardında ise frekans değişimi sınırı  $\pm 0,10$  Hz olarak sınırlandırılmıştır [2,3,6].

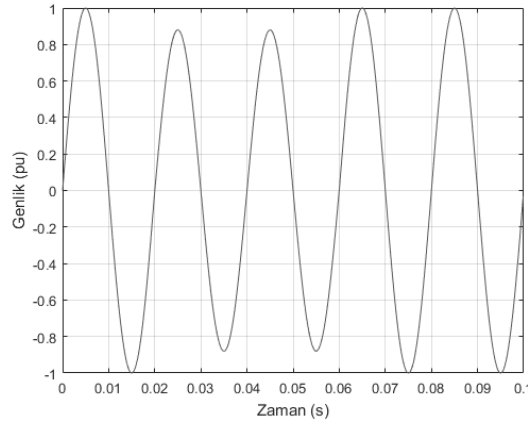
### **1.1.2. Gerilimdeki Etkin Değer Değişimleri**

Gerilimin genlik değerinin değişimleri iki kısma ayrılarak incelenebilir. Bunlar kısa süreli gerilim değişimleri ve uzun süreli gerilim değişimleridir. Kısa süreli gerilim değişimleri güç sistemlerindeki hatalar, yol verme akımları yüksek olan yüklerin devreye alınması ve dağıtım sistemindeki bağlantı kopuklukları gibi sebeplerden dolayı olabilir. Sistem durumuna ve hatanın konumuna göre bu tür durumlar sadece gerilim düşmesine değil gerilim yükselmesi ve gerilim kesilmesine de neden olabilir [1,6].

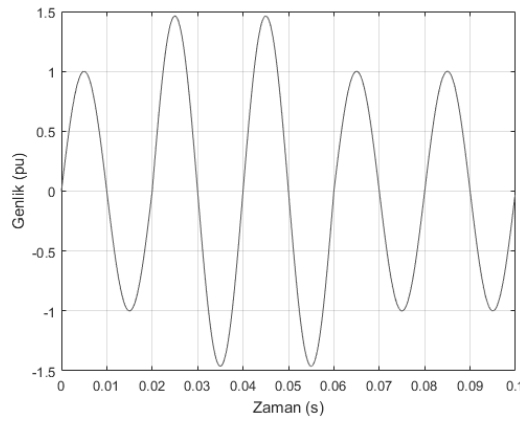
Alçak Gerilim (AG) ve Yüksek Gerilim (YG) seviyelerinde gerilimin normal yük durumundaki etkin değerinin 0,1 per unit (p.u.) ve 0,9 p.u. aralığına inmesi olayıdır [1,6]. Bu sınırlar hem IEC 61000-4-30:2008 standardında hem de IEEE 1159:2009 standardında belirtilmiştir. Gerilim düşümünün başlangıcı için yarım periyotluk süre

esas alınır. Gerilim düşümü süresi ise farklı standartlarda ve farklı süre sınıfları ile incelenmektedir. Gerilim düşmesi (sag, dip), gerilim çökmesi ya da çukurlaşması olarak da adlandırılmaktadır.

Gerilim Yükselmesi (swell), gerilimin birkaç periyot içerisindeki bir sürede referans alınan etkin değerinin %10'dan daha büyük bir artış olması durumudur. Gerilim yükselmesi gerilim düşmesinde olduğu gibi sistem hatası ile bağlantılıdır. Gerilim yükselmesine faz - toprak kısa devresi sırasında hatasız olan fazda rastlanır. Gerilim yükselmesi, yüksek güçteki yüklerin anahtarlanmasında veya büyük kapasitörlerin devreye alınmasında oluşabilir. Gerilim yükselmesi gerilim sıçraması ya da şişmesi olarak da ifade edilmektedir. Gerilim düşmesi ve gerilim yükselmelerine ait sinyaller Şekil 1.2'de ve Şekil 1.3'te örnek grafikler ile gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Gerilim düşmesi (Sag, Dip).



Şekil 1.3. Gerilim yükselmesi (Swell).

Gerilim Kesintisi (Interruption, Outage), kaynak geriliminin etkin değerinin nominal değerinin %10'unun altına indiği durumdur. Kesintinin 30 periyoda kadar sürdüğü durum ani; 3 saniyeye kadar sürdüğü durum ise geçici gerilim kesintisi olarak tanımlanmaktadır. Kesintiler, güç sistemi arızaları ve hatalı anahtarlama ve yıldırım düşmesi gibi sorunlardan kaynaklanabilmektedir.

### 1.1.3. Harmonikler Ve Ara Harmonikler

Harmonikler genel olarak lineer olmayan elemanlar ile sinüs biçimli olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından dolayı oluşur. Enerji sistemlerinde temel frekansın tam katları frekanslarında olan sinüzoidal akım veya gerilim olarak karşımıza çıkar. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüs biçimli dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar saf sinüs içermeyen dalgalar olarak adlandırılır. Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile harmonik içeren dalgalar, frekansları farklı sinüs biçimli dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu şekilde harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir [1,2]. Çizelge 1.1'de harmoniklerin frekans cinsinden ifadesi verilmiştir.

Çizelge 1.1. Harmoniklerin temel frekans ile ifade edilmesi.

f <sub>1</sub> temel gerilim frekansı (Bu çalışmada 50 Hz kabul edilmiştir.)	
<b>Harmonik</b>	f=nf <sub>1</sub> , n pozitif bir tamsayıdır.
<b>DC Bileşeni</b>	f=nf <sub>1</sub> , n=0 için
<b>Ara harmonik</b>	f=nf <sub>1</sub> , n sıfırdan büyük tam olmayan sayı
<b>Harmonik-Altı</b>	f>0 Hz ve f<f <sub>1</sub>

Harmonikler, güç sistemlerinde birçok zarara sebep olabilir. Harmonikler, elektromekanik cihazlarda ve kablolarda aşırı ısınmaya yol açabilir. Etrafta kuvvetli elektromanyetik alan oluşturarak makinelerde mekanik titreşimlere, ateşleme devrelerinin anormal çalışmasına ve elektronik kart arızalarına yol açabilirler. Ayrıca koruma sistemlerinde hatalı çalışmalar, kesici ve şalterlerde atmalar, röle

sinyallerinin bozulması ve enerji kayıpları gibi zararlara da yol açabilir. Mikroişlem elemanı ile çalışan sistemlerde arızalanmalara neden olabilir. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında gürültü ve parazit olarak karşımıza çıkar [1,2].

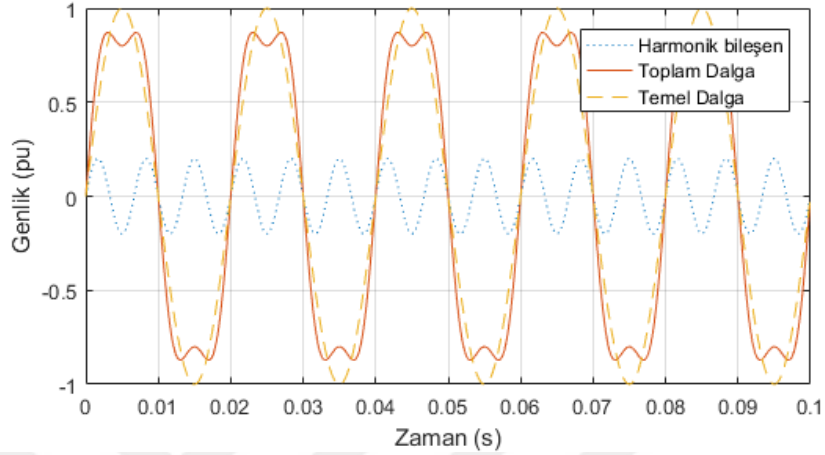
Bu problemler açısından bir şebekede gerilim ve akım sinyallerine ait harmoniklerin iyi izlenmesi gerekmektedir. Sürekli takip altına alınan elektrik sinyalinin harmoniklerinde oluşabilecek herhangi bir sapmada sistem önceden kapatılarak yukarıda bahsedilen zararlar önlenabilir.

IEEE ve IEC'nin harmonik standartlarında ihtiyaç duyulan tanımlar ve sınırlamalar yapılmış, harmonik bozulmasının olduğu durumlarda güç sistemi elemanlarının ömrünün azalmaması ya da zarar görmemesi için alınması gereken tedbirler belirtilmiştir. IEEE tarafından tanımlanan standartlarda hem akım hem de gerilim harmoniklerine sınırlamalar getirilmekte ve yöntem olarak bu sınırlamalar birden fazla doğrusal olmayan yükün bağlandığı merkezi baralara uygulanmaktadır. Harmoniklere ait IEEE, IEC ve EN standartlarından örnekler Çizelge 1.2 ile özet olarak verilmiştir.

Çizelge 1.2. Harmonikleri tanımlayan örnek standartlar.

<b>Standart</b>	<b>Başlık</b>	<b>İçerik</b>
IEEE Std 1459-2000	Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions	Sinüzoidal, sinüzoidal olmayan, dengeli ve dengesiz durumlarda güç tanımlamalarını anlatan ve örnek analizlerle bu tanımlamaları açıklayan standarttır.
EN 50160	Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems	Alçak gerilim ve orta gerilim seviyeleri için geçerli olan gerilim kalitesini etkilen gerilimdeki harmonik sınırlamalarına ilişkin standarttır.
IEC 61000-2-2	Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems	Düşük frekanslı güç bozulmalarının iletimi ve düşük gerilimli güç şebekelerinde güç sinyali için tanımlı elektromagnetik uyumluluk seviyelerini belirleyen standarttır.

Harmonik frekanslar, şebeke frekansının tam sayı katları seklindedir. Örneğin, 50 Hz temel harmonik ile üçüncü harmonik (150 Hz) bileşenin üst üste binmesiyle oluşan bir sinyalin grafiği Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Temel dalga ve 3. harmonik bileşeni içeren toplam dalganın seki.

Gerçek uygulamalarda karşılaşılan bozulmuş akım dalga şekilleri bu gösterilenden çok daha karmaşıktır ve daha çok sayıda harmonikler ile daha karmaşık faz ilişkileri içerir. Şekil 1.4'te toplam dalga şeklinde görüldüğü gibi bu dalga seki bir sinüs eğrisi değildir ve dolayısıyla etkin değer-kalibreli multimetreler gibi normal ölçü aletleri ile yapılan ve ortalama değeri gösteren ölçümler yanlış olmaktadır. Dalga şekli, şebeke frekansından farklı frekanslarda bileşenler de içermektedir ve değerlendirmelerin buna göre yapılması gerekir.

Ara harmonikler ise şebeke frekansının tam katları şeklinde olmayan frekans bileşenleri içeren sinyalleri içerir. Ara harmonik sıralaması (derecesi), harmonik sıralamasına benzer şekilde, ara harmonik frekansın şebeke frekansına oranı olarak belirlenmektedir. IEC 61000-4-7 genel olarak 50 Hz ve 60 Hz'deki güç besleme sistemlerinin temel bileşenlerinin üzerine bindirilen, 9 kHz'e kadar olan frekans aralığındaki spektral bileşenlerin ölçülmesi ve test edilmesi için tasarlanmış bir standarttır [2]. Gerilim veya akım sinyallerinin Fourier analizi sonucu her bir spektral bileşenin etkin değeri Eşitlik 1.1'de belirtilen formülle hesaplanabilir.

$$G_n = \frac{C_n}{\sqrt{2}} \quad (1.1)$$

Bu eşitlikte  $C_n$ ,  $n$ . bileşene ait genlik katsayısı;  $G_n$  ise bu bileşenin etkin değeridir. Toplam harmonik bozulma (Total Harmonics Distortion, THD), incelenen sinyalde yer alan harmonik bileşenlerden kaynaklanan bozulmanın bir ölçüsüdür. Matematiksel olarak Eşitlik 1.2'deki gibi ifade edilebilir.

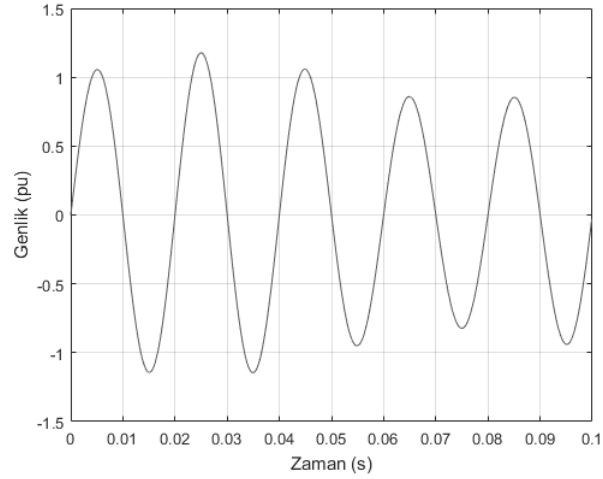
$$THB = \frac{\sqrt{\sum_2^H G_n^2}}{G_1} \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte  $G_1$  temel frekansın genliği ve  $G_n$ ,  $n$ . harmonik bileşene ait genlik değeridir.  $H$  değeri, hesaplamada kullanılacak olan en son harmoniğin indis değeridir. Örneğin MATLAB'ta THD hesabı için kullanılan "thd(x)" fonksiyonu varsayılan olarak 2. ve 3. harmonik ile hesaplama gerçekleştirmektedir. IEC 61000-3-6'ya göre orta gerilim seviyesi için için THD sınırı maksimum %6,5 olacak şekilde sınırlandırılmıştır. IEEE Std. 519-2014'e göre THD sınırı %8 olarak belirtilmiştir.

#### 1.1.4. Kırpışma (Flicker)

Elektrik enerjisi şebekesi ile yük arasındaki etkileşim sırasında, gerilimde sistematik dalgalanmalar meydana gelebilmektedir. Bu dalgalanmalar sırasında güç sinyali genliği 0,9-1,1 p.u. arasında sistematik olarak değişmektedir. Bu dalgalanmalara kırpışma denir. Örneğin yüksek güçlü motor sürücülerinde aşırı yükleme durumunda şebekeden dalgalı bir akım çekilir. Bu da gerilimde düşük frekanslı genlik değişimlerine sebep olur. Kırpışma, aydınlatma elemanlarında gerçekleşen yanıp sönme olayı ile insanlar tarafından fark edilebilmektedir. Kırpışmanın sürekli olması insanı hem bedensel hem de ruhsal olarak etkileyebilmektedir [1,3].

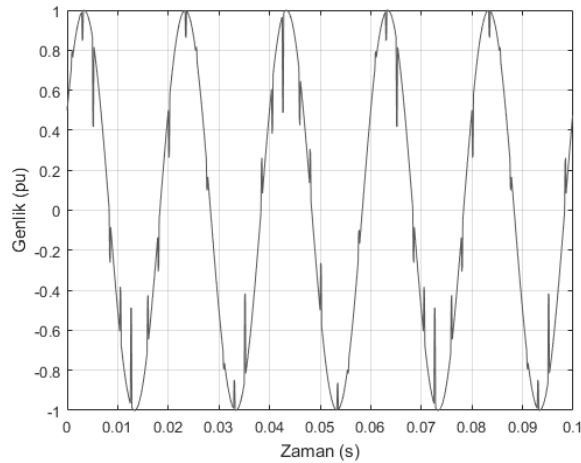
Kırpışmanın şiddeti, kısa zamanlı (short time) ( $P_{st}$ : 10 dakikalık periyotlarla ölçülen flicker şiddeti) ve uzun zamanlı (long time) ( $P_{lt}$ : Ardışık 12  $P_{st}$  değerinin küpleri ortalamasının küpkökü) olarak ölçülür [6].



Şekil 1.5. Örnek bir kırışmaya ait sinyal grafiği.

### 1.1.5. Gerilim Çentikleşmesi (Notching)

Notching, gerilim sinyalinin anlık olarak ters polariteli değişimi olarak tanımlanmaktadır [8]. Normal çalışma durumunda güç elektroniği elemanlarında, bir fazdan diğer faza akımın yönlendirilmesi nedeniyle oluşan periyodik gerilim bozulmalarına denir. Şebeke geriliminin bir tam periyodunda (20 ms süresince) doğrultucu akımının oluşturduğu darbe sayısı kadar tekrarlanan çökmeler olarak da isimlendirilebilir [9]. IEEE STD 519-2014 tanımlarında bu durum gerilimdeki yarım periyottan daha kısa süren gerilim düşümleri olarak tarif etmektedir. Şekil 1.6'de örnek bir çentikli tipli gerilim sinyali bozulması verilmiştir.



Şekil 1.6. Örnek bir gerilim çentikleşmesine ilişkin sinyal şekli.

### 1.1.6. Gerilim Dengesizliği

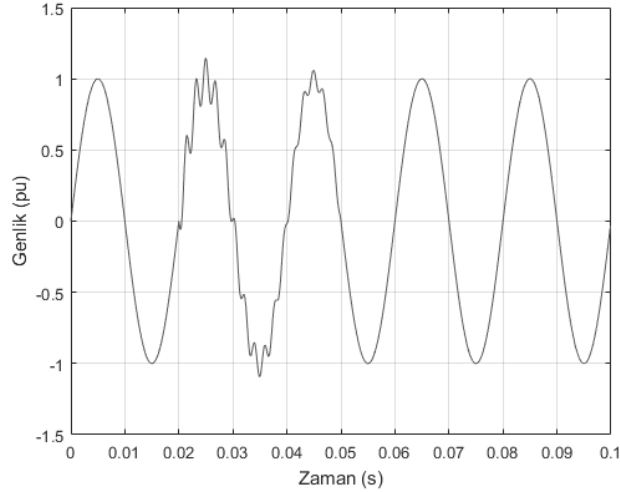
Faz gerilimlerinin etkin değeri veya ardışık fazlar arasındaki faz açılarının farklı olması durumunda 3 fazlı bir sistem dengesiz demektir. Gerilim ve akım genlikleri aynı, fazlar arası 120° olan üç-fazlı bir sistem, dengeli veya simetrik bir sistem olarak adlandırılır. Bu özelliklerden biri veya her ikisi de söz konusu olmadığı takdirde sistem, dengesiz veya asimetrik olarak tanımlanır. Sistemi işletenler, elektrik enerjisi sağlayan kuruluşlar ile müşteri tesisatının ortak bağlantı noktasında (PCC, Point of Common Coupling) dengeli bir sistem gerilimi sağlamaya çalışırlar.

Büyük merkezi enerji santrallerinde kullanılan senkron jeneratörlerin yapısı ve çalışma özellikleri nedeniyle üretilen gerilimlerin simetrisi genel olarak yüksek kararlılık arz eder. Bu nedenle, merkezi üretimin dengesizliğe katkısı genellikle söz konusu olmaz. Ancak, sayıları artarak gittikçe önem kazanan küçük ölçekli dağıtım veya ada tip üretimde durum farklıdır. Göreceli olarak küçük olan bu ünitelerin çoğu “Alçak Gerilim” hattına tek fazlı elektronik güç eviricileri vasıtasıyla bağlıdır. Bu eviriciler, gerilimin yüksek olduğu bağlantılara kıyasla gerilim dengesizliğinin artmasına yol açabilir. Fakat uygulamaların çoğunda karşılaşılan dengesizliklerin ana nedeni yüklerdeki asimetridir. Alçak gerilim yükleri, bilgisayar ve aydınlatma sistemlerinde olduğu gibi genellikle tek fazlıdır ve bu nedenle fazlar arası dengenin garanti edilmesi zordur. Bu gibi yüklerin beslendiği bir tesisatta yük devreleri, bir apartmanın her katını veya ofislerin her birini veya sıra halindeki meskenlerin her birini bir fazdan besleyecek şekilde üç faz arasında dağıtılmıştır [1,2].

### 1.1.7. Geçici Olaylar (Transient Events)

IEEE 1159:2009 standardında, gerilim frekansında 3 MHz'e kadar ulaşan çok kısa süreli olaylar olarak tanımlanmaktadır. Darbe (pulse) şeklinde ve salınımlı (oscillatory transient) olarak iki şekilde incelenir. Darbeler, akımda ve/veya gerilimde meydana gelen ve tek yönlü (pozitif veya negatif) beklenmedik ani değişimlerdir [2,6]. Bu bozulma, genellikle yıldırım düşmesi sebebiyle meydana gelmektedir. Salınımlı geçici olaylar ise akımda ve/veya gerilimde meydana gelen çift kutuplu değerler alabilen bozulmalardır (Şekil 1.7). Bu tür bozulmalarda polarite

değişimi çok farklı frekanslarda gerçekleşebilmektedir. Anahtarlama olayları sırasında ya da güç sistemlerinin iletim ve dağıtım aşamasında kondansatör gruplarının enerjilendirilmesi sırasında görülmektedir [2].



Şekil 1.7. Örnek bir osilasyonlu geçiş grafiği.

## 1.2. GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİ STANDARDI

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan her bir güç kalitesi bozulması için olması gereken sınır değerleri ve ölçüm teknikleri açısından uluslararası ve ulusal standartlar belirlenmiştir. Dünyada kabul edilen uluslararası güç kalitesi standartlarından birisi Uluslararası Elektroteknik Komisyonu tarafından hazırlanan IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 ve IEC 61000-4-30 standartlarıdır. Çizelge 1.3'te IEC standardına göre belirlenen Alçak Gerilim (AG), Orta Gerilim (OG) ve Yüksek Gerilim (YG) sinyallerinin güç kalitesi açısından olması gereken sınır değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Standartlara göre düşük, orta ve yüksek gerilim özellikleri [1].

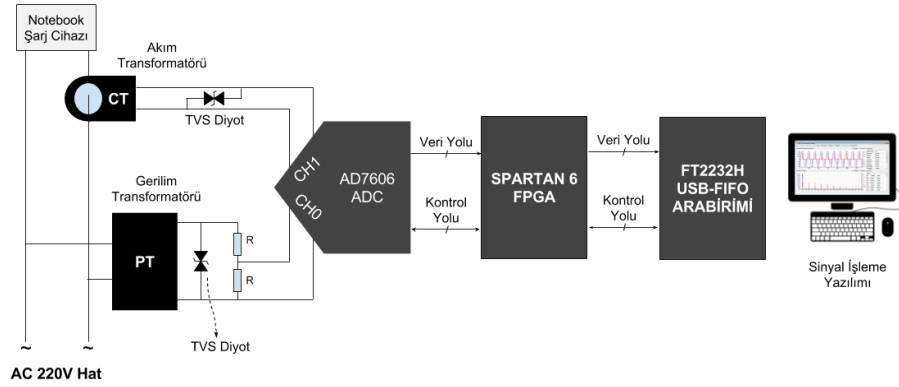
No	Parametre	IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7 ve IEC 61000-4-15 standartlarına göre Düşük, Orta ve Yüksek gerilim özellikleri
1	Güç frekansı	AG, OG, YG: 10sn boyunca yapılan şebeke ölçümlerinin ortalama değeri ±%1 (49.5 – 50.5 Hz) haftanın %99.95'i için -%6 / +%4 (47-52 Hz) haftanın %100'ü için
2	Gerilim şiddeti değişiklikleri	AG, OG: ±%10 haftanın %95'i için (10 dakika rms değerleri ortalaması) YG: ±%5

Çizelge 1.4. (Devam ediyor).

3	Hızlı gerilim değişimleri (Kırpışma)	AG: %3 normal, %8 seyrek P <sub>st</sub> < 1.0 (1 dakika boyunca) P <sub>lt</sub> < 0.8 (haftanın % 95'i için) OG, YG: %4 normal , %6 seyrek P <sub>st</sub> < 1.0 P <sub>lt</sub> < 0.8 (haftanın %95'i için)
4	Besleme gerilimi düşümleri	Çoğunluk: süre < 1 s ve derinlik < %60 (Yük anahtarlama sonucu lokal sınırlı azalmalar) AG: %10-50, OG, YG: %10-15
5	Besleme gerilimi kısa kesintiler	AG, OG, YG (3 dk'ya kadar) Senede %70'inin süresi < 1s
6	Besleme gerilimi uzun kesintiler	AG, OG, YG (3 dk'dan uzun) Senede %70'inin süresi < 1s
7	Geçici, güç frekansı aşırı gerilimleri	AG: <1.5 kV V <sub>rms</sub> OG, YG: 1.7 U <sub>c</sub> (katı ve toprak empadansı) 2.0 U <sub>c</sub> (topraklamasız ve rezonant toprak)
8	Gerilim Dengesizliği	< % 2
9	Harmonik Gerilim	AG, OG : 3. harmonik %5, 5. harmonik %6, 7. harmonik %5, 9. harmonik %1.5, 11. harmonik %3.5, 13. harmonik %3, 15. harmonik %0.3, 17. harmonik % 2 THD < %8 YG: Her bir harmonik için gerilim bozulması < % 1 ve THD < %1.5
10	Harmonikler arası gerilim	AG, OG, YG :% 0.2

### 1.3. TEZİN AMACI

Bu tez çalışması kapsamında, dağıtım hatlarında çalışmaya uygun düşük maliyetli gerçek zamanlı bir harmonik belirleme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistem, belirlenen harmonikleri gerçek zamanlı olarak çizdirebilmekte ve yakalanan güç sinyali verisini de hem sürekli hem de olay güdümlü olarak kaydedilmektedir. Buna ek olarak geliştirilen cihaz güç kalitesi bozulmalarını da tespit edip bozulmaların gerçekleştiği zaman dilimlerinde ham sinyal ve olay kaydı da yapabilmektedir. Geliştirilen sistem, USB arabirimli bir veri toplama kartı ve yakalanan güç sinyallerini işleyen bir bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 1.8). Tasarımı yapılan veri toplama kartı 40 kpsps örnekleme oranına kadar 8 kanallı eş zamanlı örnekleme yapabilmektedir. Böylece çok fazlı bir sistemde hem akım hem de gerilim sinyalleri aynı anda izlenebilmektedir. Veri işleme bilgisayarına aktarılan veri yine bu çalışma kapsamında geliştirilen gerçek zamanlı bir sinyal işleme yazılımı ile işlenmekte ve belirlenen hesaplamalar gerçekleştirilmektedir.



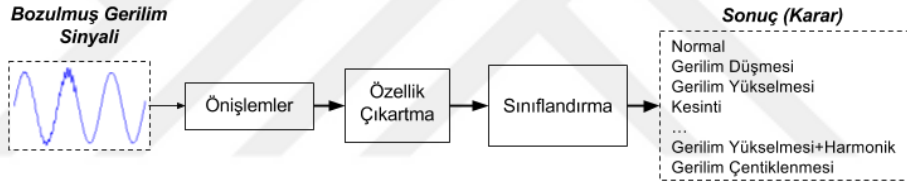
Şekil 1.8. Geliştirilen sistemin tek faz çalışmasına ilişkin blok şema.

Geliştirilen yazılımda, harmonik belirleme işlemi için kısa zamanlı Fourier dönüşümü (Short Time Fourier Transform, STFT) yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem üç fazın hem akım hem de gerilim sinyalleri için gerçekleştirilmiştir. IEC 61000-4-7'de [10] önerildiği gibi 10 periyotluk bir sinyal penceresi ile işlem yapılmaktadır. Veri kuyruğundan gelen her periyot verisi pencerenin sonuna eklenip ve ilk periyot verisi atılarak Fourier dönüşümü uygulanmaktadır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen yazılımın kullanıcı arabirimi ile görüntülenmekte ve yakalanan sinyal penceresi ve hesaplanan frekans spektrumu da grafik işlemci desteği ile çizdirilmektedir (Şekil 1.8).

Harmonik belirleme işlemi için hem merkezi işlem birimi (CPU, Central Processing Unit) üzerinde hem de grafik işlemcide (GPU, graphics processing unit) çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. CPU üzerindeki çalışma için FFTW kütüphanesi kullanılmıştır [11]. FFTW, açık kaynak kodlu bir ayrık Fourier dönüşümü kütüphanesi olup birçok platform ile uyumludur. GPU üzerindeki çalışma için ise CuFFT kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane nVidia firması tarafından üretilen grafik işlemcilerle uyumlu olarak CUDA (Compute Unified Device Architecture) çerçevesinin bir bileşeni olarak dağıtılmaktadır [12]. Güç sinyali işleme görevinin temel aşaması harmonik belirleme işlemidir. Harmonikler belirlendikten sonra birçok temel güç parametresi hesaplanabilmektedir. Bu tezde geliştirilen uygulamada hem harmoniklerin gerçek zamanlı olarak belirlenmesi hem de belirlenen bu harmoniklerin görüntülenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Harmonik hesaplamaları ile beraber gerilim sinyali frekansının hesaplanması, aktif güç (P), reaktif güç (Q) ve

görünür güç (S) hesaplamaları ile toplam harmonik bozulma (Total Harmonics Distortion, THD) ve sinyal-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) hesaplamaları da gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde gerçek zamanlı olarak belirlenen harmonikler güç kalitesi sınıflandırma işlemi için de kullanılmıştır. Güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması işlemi genel olarak üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler önileme, özellik çıkartma ve sınıflandırma işlemleridir (Şekil 1.9). Önileme basamağında Stockwell dönüşümü (S-dönüşümü) ile sinyaldeki değişimler açığa çıkarılmaktadır. Bu değişimler kullanılarak özellikler belirlenmekte ve bu özellikler veri madenciliği yöntemleri kullanılarak sınıflandırma işlemi için kullanılmaktadır. Yapılan uygulamada söz konusu işlemler üç fazlı güç sinyali ile çalışarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.9. Otomatik güç kalitesi sınıflandırma sistemine ait blok şema.

Bu çalışmada gömülü sistem çalışması da dikkate alınarak, veri toplama cihazının örnekleme oranı 10 ksps olarak belirlenmiştir. Bu örnekleme oranı ile 100. harmoniğe kadar olan harmonikler belirlenebilmektedir. IEEE 1159-2009 standardına göre en az 50 harmoniğin belirlenmesi gerekmektedir [10]. Aynı zamanda USB bağlantılı arabirimi sayesinde hem kişisel bilgisayarlarda hem de tek kart bilgisayarlarda kullanılabilir. USB-FIFO arabirim tümdevresinin çapraz platform desteği sayesinde farklı mimariler ve farklı işletim sistemleri ile kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında Linux işletim sistemi ile Beaglebone Black ve Raspberry Pi 3 tek kart bilgisayarları ile çalışılmıştır. Günümüz bilgisayarlarında fiyat/performans oranının artması, pahalı ve esnek olmayan geleneksel ölçüm ve analiz cihazları yerine gömülü sistem çözümleri ile daha ekonomik ve esnek çözümler üretilmesine imkân vermektedir.

#### 1.4. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, harmonik analizi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların geneli daha önceden kaydedilmiş ya da simülasyon sonucu elde edilmiş olan güç sinyalleri üzerinde odaklanmıştır. Bu tez çalışmasının amacı gerçek zamanlı güç sinyali analizi gerçekleştirebilmek için düşük maliyetli ve esnek bir cihaz tasarımı ortaya koymak olduğundan literatür taraması da bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalar sonunda yapılan çalışmaların birçoğunda harmonik belirleme işlemi yanında diğer güç kalitesi bozulma türlerinin de ele aldığı gözlemlenmiştir.

Harmoniklerin belirlenmesi konusunda literatürde farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Jain vd. yayınlamış oldukları makalede harmonik analizi yöntemlerini parametrik ve parametrik olmayan yöntemler olarak sınıflandırmışlardır [13]. Parametrik olmayan yöntemler, doğrudan sinyal üzerinden genlik vb. katsayı ayrıştırması yaparak sinyali çözümlenmektedir. Bu yöntemlere örnek olarak ayrık Fourier dönüşümü (Discrete Fourier Transform, DFT) ve Wavelet dönüşümü yöntemleri verilebilir. Parametrik yöntemler ise sinyalin ifade edilmesinde uygun bir model kullanarak model-veri örneği örtüşmesi ile sinyalin analiz edilmesini sağlar. Bu yöntemlere örnek olarak Kalman Filtreleme ve Prony yöntemleri gösterilebilir. Bu makalede ayrıca kullanılan yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri de ele alınmıştır.

Spanik vd., yapmış oldukları çalışmada elektrikli tren raylarından dönüş yapan akım (recuperative current) harmoniklerini gerçek zamanlı belirlemek için TMS320F28335 DSP işlemcisi kullanmışlardır [14]. Chen, yapmış olduğu çalışmada hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) ve dalgacık dönüşümü (Wavelet Transform, WT) kullanarak harmonik belirleme, gerilim dalgalanması ve kırışma olaylarının tespit edilmesi üzerinde çalışmıştır [15]. Bu çalışmanın uygulama safhasında LabVIEW kullanılmış ve LabSQL arayüzü ile tespit edilen olayların veritabanına kaydedilmesi sağlanmıştır. LabVIEW ile yapılan başka bir çalışmada Penghui vd. gerçek zamanlı olarak güç spektral yoğunluğu görüntüleme uygulaması geliştirmişlerdir [16].

Tse yapmış olduğu çalışmada, güç sinyali frekansındaki kaymaların tespiti ile harmonik ve ara harmonik belirleme işlemi için özelleştirilmiş bir dalgacık dönüşümü yöntemi ile bu yöntem için kullanılacak bir sayısal hesaplama algoritması önermiştir [17]. Barros yapmış olduğu çalışmada farklı dalgacık dönüşüm yöntemlerinin nasıl kullanıldığını taramış ve harmonik belirleme işlemi ve gerilim çentikleşmesi gibi bozulmalarda da nasıl başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir [18].

Faisal vd. yapmış oldukları çalışmada bozulma türü ile harmonik seviyesi arasındaki ilişkiyi açıklamışlar ve anlık geçici olayların gerilim çentikleşmesi gibi periyodik gelişen bozulmalara göre daha yüksek frekans bantlarında gözlemlenebildiğini ifade etmiştir [19]. Bu bilgiler ışığında gerilim düşmesi gibi daha yavaş gerçekleşen olayların ise düşük frekans bantlarında gözlemlenebildiği sonucuna ulaşılabilir.

Buna karşın, Gu ve Bollen yapmış oldukları çalışmada uygun pencere boyutu seçildiğinde kısa zamanlı Fourier dönüşümünün (Short Time Fourier Transform, STFT) harmonikle ilişkili güç kalitesi bozulmalarının tespitinde Dalgacık dönüşüme göre daha iyi sonuç verdiğini bildirmiştir [20]. STFT, yeterince küçük bir pencere boyutu seçildiğinde geçici olayların yer tespiti de yapılabilmektedir.

Güç kalitesi denetim sistemleri endüstriyel uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Günümüzde yüksek kapasitans ve lineer olmayan elektronik ekipmanların kullanımı güç kirliliği oluşturmaktadır. Endüstriyel bir sistemde güç kalitesinin bozulması kayıplara neden olmaktadır [2]. Böyle bir ortamda güç kalitesini analiz eden cihazlar kullanılmaktadır. Güç hattındaki problemler bu cihazlar sayesinde tespit edilmektedir. Geriye kalan bu problemlere göre gerekli önlemleri almaktır.

Bollen yapmış olduğu çalışmada güç kalitesini, gerilim kalitesi ve akım kalitesinin karma hali olarak tanımlamıştır [21]. Araştırmacı, bu çalışmada, güç kalitesindeki bozulmaların nominal değerden uzaklaşma miktarını büyük değişimli ve küçük değişimli olarak sınıflandırmıştır. Bu bağlamda harmonikleri küçük değişimli (güç sinyalinin herhangi bir anında tespit edilebilen); kesintileri ise büyük değişimli (belli bir eşik değeri ile başlayıp belli bir eşik değeri ile sonlanan) olarak sınıflandırmıştır.

Flores yapmış çalışmada geçmişten günümüze güç kalitesi analizi için kullanılan teknolojileri ve yöntemleri açıklamıştır [22]. Flores, bu çalışmada 2000’li yıllardan itibaren desen tanıma ve veri madenciliği gibi yöntemlerin kullanılmaya başladığına dikkat çekmiştir. Bu çalışmanın daha detaylı ve güncel hali Saxena vd. diğerleri tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar bu çalışma kapsamında “otomatik güç kalitesi sınıflandırma” sistemini açıklamışlardır [23]. Bu çalışmada, güç kalitesi sınıflandırma işlemi kullanılan desen tanıma yöntemlerini deterministik ve istatistiksel olarak sınıflandırmışlardır. Kural tabanlı yöntemler deterministik; yapay sinir ağları (Yapay Sinir Ağı, YSA) ve destek vektör makineleri (DVM) gibi yöntemler ise istatistiksel sınıflandırıcı olarak ele alınmıştır.

Öztürk, yaptığı çalışmada Adaline (Adaptive Linear Network) yöntemini kullanmış ve gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi, kesinti ve geçici bozulmalar (transient) gibi güç kalitesi bozulması olaylarını tespit etmiştir. Bu yöntem ile şebeke sinyalindeki herhangi bir bozulma ağın hata çıkışı ile tespit edilebilmektedir [2]. Bu algoritmanın genel avantajı izlenen sinyal üzerinden kendi kendini eğitebilmesidir. Bu çalışmada bozulma tipi değil de bozulmanın olduğu zamanın tespit edilmesi sağlanmıştır. Böylece işlem sürekliliği azaltacak ve donanıma binen yük hafifletilebilecektir. Öztürk bu çalışmada IOtech WaveBook512 ADC kartı ve LabVIEW yazılımı ile çalışmıştır. Çalışılan örnekleme frekansı 1 KHz iken 50. harmoniğe kadar belirleme işlemi yapılmıştır.

Yörür yapmış olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında güç kalitesi parametrelerinin hesaplanabilmesi için C# programlama dilini kullanarak bir yazılım geliştirmiştir [1]. Bu yazılım ile gerilim frekansı, sinyalin etkin değeri (gerilim düşmesi ve yükselmesi), gerilim harmonikleri, gerilim kırpışma şiddeti ve gerilim dengesizliği olmak üzere beş temel parametre hesabını gerçekleştirmiştir. Yazılımın test edilmesi için MATLAB ortamında değişik parametrelerde üç fazlı sinyal verisi üretilmiş ve bunlar yazılıma girdi olarak verilmiştir. Bu verilere ait parametreler bilindiği için yazılımla hesaplanan değerler karşılaştırmalar yapılmış ve hata oranları hesaplanmıştır. Aynı veri kümesi ile Fluke 435 güç kalitesi ölçer cihazı ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. Yazılım sonuçları, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 ve IEC 61000-4-30 standartlarında istenen hata oranı sınırları içindedir. Yörür,

çalışmasının sonuç bölümünde bu yazılım ile bir DAQ (Data Acquisition) kartı kullanılarak bilgisayar ile güç kalitesi parametrelerinin düşük maliyet ile hesaplanabileceğini göstermiştir.

Atalık, yapmış olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında güç kalitesi ölçer cihazının donanımsal tasarımı üstünde durmuştur [5]. Atalık bu çalışmayı “Güç Kalitesi Milli Projesi” kapsamında TEİAŞ iletim sistemine yerleştirilmek üzere gerçekleştirmiştir. Bu tasarım, ölçme yapılan noktalarda izleme (monitoring) ve gerçekleşen olayların güç kalitesi merkezindeki sunucuya aktarılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Bilgisayar ve DAQ kartının beraber kullanıldığı yapı esas alınmıştır. Mini ITX formunda bir Linux işletim sistemli bir bilgisayar kartı, veri toplama (DAQ) kartı, sinyal şartlandırma birimi (signal conditioning unit), bu birimi besleyen güç kaynağı ve gerçekleşen güç kalitesi olaylarının zaman tespiti için eş zamanlama biriminden oluşmaktadır. Bu tasarımda zamanın sistemde doğru olarak ele alınabilmesi için GPS ünitesi eş zamanlı saat-tarih bilgisi kullanılmıştır. Bu çalışmada donanım tasarımı üzerinde yoğunlaşmıştır. Sinyal işleme ve güç kalitesi bozulmalarını sınıflandırılan algoritmalar ele alınmamıştır. Bu çalışmanın devamında geliştirilmiş olan cihaz PQ<sup>+</sup> adıyla ülke çapında iletim hattı güç kalitesinin izlenmesi amacı ile kullanılmıştır [24].

Atalık, çalışmasında DSP ve Mikrodenetleyici ile yapılan tasarımların zorluğundan ve maliyetinin yüksek olduğunu savunmuştur. Ayrıca analog-dijital dönüştürücü (Analog-to-Digital Converter, ADC), sayısal sinyal işlemcisi (Digital Signal Processor, DSP) ve işlemci gibi elemanları donanımsal olarak arabirimlemenin zor olduğundan bahsetmiştir. Fakat Wang vd. yapmış olduğu çalışmada Texas Instruments tarafından üretilen ve DSP ve ARM9 çekirdeğini tek bir pakette birleştiren OMAP-L138 işlemcisini kullanmıştır [25]. Bu işlemci sayesinde arabirimleme işlemi daha kolay hale gelmiştir. Bu cihazda iki adet ADS8556 ADC tümdevresi ve ara bellek olarak FIFO tampon tümdevresi kullanılmıştır. Wang, bu sistem üzerinde sinyalin yakalanmasını gerçekleştirdikten sonra harmonik tespiti için “Pencerelemiş Hızlı Fourier Dönüşümü (Windowed FFT)” kullanmıştır. Gerilim sinyalindeki bozulmanın hızlı bir şekilde tespit edilebilmesi için S-dönüşümü, bozulmanın sınıflandırılabilmesi için ise dalgacık dönüşü ile beraber İkili Ağaç-

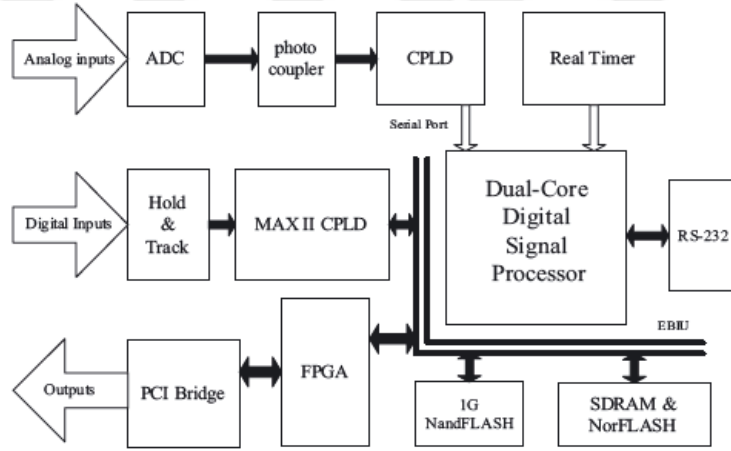
Destek Vektör Makinesi yapısını kullanmıştır. Fakat bu çalışmada işlem zamanlamaları rapor edilmemiştir.

Guo vd. sürekli ve gerçek zamanlı olarak titreşim sinyalleri yakalayan ve analiz eden bir sistem geliştirmişlerdir [26]. Bu sistem, 8 adet ivme sensöründen aldığı veriyi AD7606 ADC tümdevresi ile eşzamanlı olarak örnekleme ve Linux çalıştıran bir gömülü sistem aracılığı ile ağ üzerinden kişisel bilgisayara göndermektedir. Veri işleme rutinleri kişisel bilgisayar üzerinde çalıştırılmaktadır. Guo, yapmış olduğu tasarımda AD7606 tümdevresini IDT72V265 FIFO tamponu ile gömülü sistemin işlemcisine arabirimlemiştir. Gömülü sistemin işlemcisi olarak Samsung tarafından üretilen ARM11 çekirdeğine sahip S3C6410 mobil işlemci kullanılmıştır. Bu işlemci, ADC den gelen verileri bellek yolu üzerinden bir yine aynı çalışma kapsamında geliştirilmiş olan bir Linux aygıt sürücüsü ile ana belleğe aktarmaktadır. Bu çalışmada sistem zamanlamaları verilmemiş olup verinin ağdan transfer edilmesi ara gecikmelere neden olabilmektedir.

Zhian ve Yufeng, yapmış oldukları çalışmada elektrik dağıtım şebekelerindeki hataları tespit edebilmek için bir cihaz geliştirmişlerdir [27]. Bu tasarımda biri ARM7 çekirdekli LPC2132 mikrodenetleyicisi ve diğeri de TMS320F2812 DSP olmak üzere iki adet işlemci kullanılmıştır. Bu tasarımda dikkati çeken nokta DSP ile ARM işlemci arasında dual port RAM bileşeni kullanılmış olmasıdır. Zhian DSP ile sistemi kontrol eden işlemci arasında tampon ekleyerek işlemcinin meşgul olduğu anlarda DSP tarafından yapılan işlemlerin sonuçlarının Dual port RAM yapısı içinde birikmesini sağlamıştır. Zhian ve Yufeng, cihaz tarafından tespit edilen güç şebekesi hatalarının kullanıcıya bildirilmesi diğer işlemler için ARM işlemci üzerinde çalışan bir kullanıcı arabirimi yazılımı da geliştirmişlerdir. Fakat bu çalışmada DSP üzerinde hangi işlemlerin yaptırıldığı konusunda bilgi verilmemiştir. Buna ek olarak örnekleme hızları ve işleme süresi hakkında bilgi vermemiştir. Bu tasarımın olumsuz yanı, DSP ve ADC doğrudan arabirimlendiğinden yüksek örnekleme hızlarında sinyal işlemcisinin hem örneklenmiş veriyi okuması hem de bu veriyi işlemesi sırasında veri taşmasının gerçekleşme ihtimalinin yüksek olmasıdır.

She ve Xiang yapmış oldukları tasarımda AD7606 tümdevresi ile bir Altera firması tarafından üretilen Cyclone FPGA (Field Programmable Gate Arrays) ile AD7606 tümdevresini doğrudan arabirimleyerek üç fazlı bir güç şebekesine ait gerilim, akım, aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve güç faktörünü sayısal olarak görüntüleyen bir cihaz geliştirmişlerdir. Bu işlemler, Altera tarafından sağlanan özelleştirilebilir bir gömülü işlemci olan NIOS II ile yapılmaktadır [28]. Bu çalışmada hesaplamaların ne kadar sürede gerçekleştirildiğine ve örnekleme oranına dair bilgi verilmemiştir.

Qiang ve Yangong, yapmış oldukları tasarımda DSP, FPGA ve CPLD (Complex Programmable Logic Device) gibi elemanları kullanarak karmaşık bir güç kalitesi izleme cihazı geliştirmişlerdir [29]. Geliştirilmiş olan bu cihaz kendi DSP işlemcisi ile beraber işlem yapabilmekle beraber PCI veriyolu üzerinden kişisel bilgisayar ya da PC104 gibi cihazlara da veri aktarımı yapabilmektedir. Geliştirilmiş olan bu sistemin blok diyagramı Şekil 1.10'da görülmektedir.

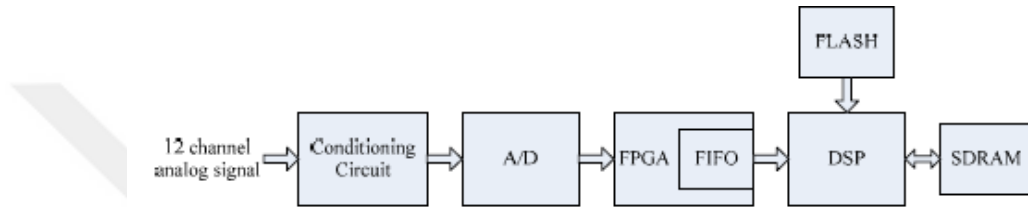


Şekil 1.10. Quiang tarafından geliştirilen cihaza ilişkin blok diyagram [29].

Quiang'ın tasarımını farklı kılan özellik 120 veya 200 kanallı sinyal yakalama özelliğine sahip olmasıdır. Ayrıca eş zamanlı çevrim özelliğine sahip olmayan bir ADC tümdevresi olan AD7328 tümdevresi kullanılmıştır. Bu tasarımda DSP işlemci olarak çift çekirdekli DSP işlemci olan Analog Devices firması tarafından üretilen ADSP-BF561 kullanılmıştır. Sistemde iki adet CPLD kullanılmış olup CPLD'lerden biri Altera tarafından üretilen MAX II ailesindedir. Sistemde kullanılan FPGA hakkında bilgi verilmemiştir. PCI veri yolu ile bağlantısı için PCI I/O accelerator

PCI9054 tümdevresi kullanılmıştır. Bu tasarımda yine sinyal işleme için gereken sürelerle ve kullanılan yöntemlere değinilmemiştir. Buna ek olarak sistemin karmaşık olması da geliştirme süreci açısından olumsuzluk arz etmektedir.

Wenyi ve Hongcheng yapmış oldukları tasarımda her biri eş zaman örnekleme yapabilen 6 kanallı ADS8365, Xilinx XC3S200 Spartan 3 serisi FPGA ve TMS320C6747 DSP işlemcisini kullanmışlardır. Bu tasarımın blok diyagramı Şekil 1.11’de görülmektedir [30].



Şekil 1.11. Wenyi tarafından tasarımı gerçekleştirilen cihaza ait blok şema [30].

Bu tasarımda aynı ADC tümdevresinden iki adet kullanılmış ve farklı veri yolları ile FPGA tümdevresine bağlanmıştır. Böylece 6 adet okuma sinyali ile ADC tümdevrelerindeki dönüşüm verisi FPGA dâhili belleğine alınabilmektedir. Bu tasarımda örnekleme sinyalinin ADC tümdevrelerine nasıl uygulandığından bahsedilmemiştir. Bu çalışmada ADC tümdevrelerinden okunan veri FPGA içinde 8192 baytlık derinliğine sahip FIFO tampon belleğine kaydedilmektedir. FIFO belleğin çıkış portu ise DSP işlemcisine EMIF (External Memory Interface) ile bağlıdır. Bu tasarımda da [26]’daki tasarımındaki gibi FIFO belleğin yarısı dolunca DSP kesme yoluyla uyarılmakta ve veriyi okuması sağlanmaktadır. Wenyi bu çalışmada DSP üzerine hangi işlemleri gerçekleştirdiğinden bahsetmemiştir.

Literatür taramasında görüldüğü gibi DSP temel alınan tasarımlar, veri tabanı ve ağ bağlantısı gibi gereksinimleri karşılayabilmek için ikinci bir işlemciye (General Purpose Processor, GPP) ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaç da tasarımların daha karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında veri yakalama kartı USB arabirimli geliştirildiğinden birçok kişisel ve tek kart bilgisayar ile uyumludur. Geliştirilen sinyal işleme yazılımı, tek kart bilgisayar olan Raspberry Pi 3 üzerinde herhangi bir performans sorunu yaşanmaksızın çalıştırılmıştır.

Günümüzde işlemcilerin içine eklenen ekstra veri işleme birimleri ile sinyal işleme gibi performans gerektiren işlemler ekstra donanım birimlerine olan ihtiyacı azaltmakta veya ortadan kaldırmaktadır. Örneğin bu çalışmada kullanılan FFT işlemleri NEON SIMD birimi ile hızlandırılmıştır.

Gökozan, yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında bir asenkron motor ve bir indüksiyon fırını yük olarak kullanarak harmonik belirleme işlemi gerçekleştirmiştir [6]. Bu çalışmada, harmonikler yüksüz durum, geçiş bölgesi, geçiş ile tam yük arası ve tam yüklü bölgelerde STFT ile belirlenmiş güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) grafiği ile gösterilmiştir. PSD üzerinden genliği belli bir eşik değerini geçen harmonikler seçilerek öz-ilişkili (auto associative) bir YSA, yük durumlarına göre eğitilmiş ve hangi durumlarda hangi harmoniklerin ortaya çıktığı incelenmiştir. Bu tez çalışmasında ayrıca belirlenen harmoniklere göre filtre önerileri de yapılmıştır. Gökozan bu tez çalışmasındaki uygulamalar için LabVIEW yazılımı kullanmıştır. Veri toplama kartı olarak NI PCI-6221, akım sensörü olarak LEM HTR 500-SB ve gerilim sensörü olarak LEM CV 3-500 kullanılmıştır.

Uyar, hazırlamış olduğu doktora tezi çalışmasında 8 farklı güç kalitesi bozulması türünü sınıflandırabilmek için hem dalgacık dönüşümü hem de S-dönüşümü ile destek vektör makinelerini kullanmıştır [3]. Bu çalışmada özellik çıkarma basamağında dalgacık dönüşümü ile entropi hesaplama; S-dönüşümü ile de istatistiksel yöntemler kullanarak özellikler belirlenmiştir. Belirlenen bu özellikler DVM ile sınıflandırılmış ve dalgacık dönüşümü çalışmasında %97,21 ve S-dönüşümü çalışmasında %99,72'lik bir doğruluk oranı elde etmiştir. Gürültü içeren durumlarda ise S-dönüşümü esas alınan çalışmada daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Uyar vd. yapmış oldukları bir çalışmada Wavelet dönüşümü ve çok çözünürlüklü analiz ile YSA kullanarak güç kalitesi bozulmalarını sınıflandırmıştır [31]. Farklı seviyelerde sinyale eklenen gürültünün de incelendiği bu çalışmada 50 dB SNR oranı ile %95,14'lü bir doğrulama oranı elde etmişlerdir. Araştırmacıları bu çalışmada 13 özellik ile 7 farklı bozulma türünü sınıflandırmışlardır. Aynı araştırmacı, yayınlamış

olduğu farklı bir makalelerinde ise WT ise Destek Vektör makinelerini kullanmışlardır [32]. Bu çalışmada 50 dB SNR oranı ile %96,28'lik bir doğrulama oranı elde etmişlerdir. Bu çalışmada 8 farklı özellik (entropi değeri) ile 7 farklı güç kalitesi bozulması türü sınıflandırılmıştır.

Yazlık, hazırlamış olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında TMS320C6747 DSP ve AD7656 ADC kullanarak gerçek zamanlı çalışan bir güç kalitesi ölçüm cihazı geliştirmiştir [33]. Mini-PQ adını vermiş olduğu bu cihaz IEC 61000-4-30 standartları tarafından belirtilen güç kalitesi bozulmalarını dağıtım hatlarında kullanılabilen şekilde kısmen sınıflandırmaktadır. Yazlık, bu çalışmada olay tespiti, güç ve harmonik hesaplamalarını DSP işlemci üzerinde yaptırmıştır. Sonuçlar ise seri port üzerinden kişisel bilgisayara ya da güç hattı iletişim tekniğini (Power Line Communication, PLC) modem ile uzak bilgisayara (PQ<sup>+</sup>) gönderilebilmektedir. Bu çalışmada 1500 ksps örnekleme oranı kullanılmış ve veriler 9 s'lik bloklar halinde işlenmiştir.

Wenda vd. yapmış oldukları çalışmada S-dönüşümü ve kural tabanlı yaklaşımı kullanarak 5 adet özellik ile 6 farklı güç kalitesi bozulma durumunu sınıflandırmışlardır [34]. Bu çalışmanın uygulama kısmını MATLAB ile gerçekleştiren araştırmacılar, gerçekleşen bozulmaların uzaktan izlenebilmesi için MATLAB web sunucusunu kullanmışlardır.

Literatür taramasında görüldüğü gibi birçok çalışmada LabVIEW ve MATLAB gibi yazılım paketleri kullanılmıştır. Bu yazılım paketleri, güç sinyali işleme ve algoritma testi için geniş kütüphanelere sahip olsalar da özelleşmiş donanımlara ihtiyaç duymaktadır [33,35]. Böylelikle bu yazılım paketleri ile son kullanıcıya dönük cihazların geliştirilmesi çok pahalıya mal olabilmektedir. Bunlara ek olarak güç sağlayıcıları ve kullanıcıların beğenisine sunulmuş olan ticari güç kalitesi analizörleri de bulunmaktadır. Bunlardan biri olan Fluke 435 olay kaydı için harici bir bellek kartına ihtiyaç duymaktadır. Hioki 3196 ise Ethernet üzerinden gerçek zamanlı olay bildirimini yapsa da geniş çaplı bir kullanım için pahalıya mal olabilmektedir. Ayrıca bu cihazlar genişlemeye çok fazla imkan vermemektedir [2,33]. Bu çalışmada hem

düşük maliyetli hem de USB bağlantılı tüm bilgisayar donanımları ile çalışabilen bir güç sinyali işleme sistemi geliştirilmiştir.

Tezin bundan sonraki bölümleri şu şekilde sıralanmıştır:

1. Bu tez çalışmada kullanılan yöntemler,
2. Gerçek zamanlı güç kalitesi sınıflandırma ve harmonik belirleme işlemi için kullanılan veri yakalama cihazının donanımsal tasarımı,
3. Sinyal işleme yazılımının tasarımı,
4. Güç kalitesi sınıflandırma işlemi,
5. Sonuç ve öneriler.

## BÖLÜM 2

### TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Tez çalışmasının bu bölümünde, tez içinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Söz konusu yöntemler, harmoniklerin belirlenmesi ve güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılmasında ihtiyaç duyulan yöntemlerdir. Gerilime bağlı olayları algılamak amacıyla literatürde bazı yöntemler geliştirilmiştir. Gerilim düşmesi, yükselmesi gibi olay tanımları etkin değer (Root Means Square, RMS) olarak yapıldığından, RMS ile olay yakalama yöntemi en yaygın ve en bilinen yöntemdir. Bununla birlikte Fourier ve dalgacık dönüşümleri spektral analizlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 2.1. EFEKTİF DEĞER (RMS) YÖNTEMİ

Güç sistemlerinde gerilim ölçümü amacıyla kullanılan en genel hesaplama yöntemi, Root Means Square (RMS) sinyalin karesinin ortalamasının karekökünü almaktır. Basit bir yöntem olmakla birlikte elde edilecek sonucun, kullanılan pencereye ve pencere kaydırma yöntemine göre gecikme süresine bağlı olması bir dezavantajdır. Dolayısıyla bu parametrelere bağlı olarak ölçümler farklı sonuçlar verebilir [2,9].

Temel RMS gerilim ölçümü için  $U_{rms(1/2)}$  genliği IEC 61000-4-30 tarafından tanımlanmıştır. Bu tanıma göre RMS ölçümü 1 periyot veya daha fazla sürmeli, sıfır geçiş anında başlamalı ve her yarım periyotta bir yinelenmelidir. Eşitlik 2.1'de sürekli ve Eşitlik 2.2'de ise ayrık zamanlı formülleri verilmiştir [2].

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 dt} \quad (2.1)$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.2)$$

RMS yöntemi özellikle kısa süreli olaylarda ve genliğin fazla değişmediği durumlarda gerçekçi değerler verememektedir. Yöntemin kısıtlı kaldığı bir diğer durum ise faz açısı bilgisine sahip olmamasıdır. Dolayısıyla açısal bozulmalar doğru bir biçimde algılanamamaktadır. Ayrıca RMS işleminin yapılabilmesi ve doğru sonuç verebilmesi için en az bir periyot veri işlenmek zorundadır [2].

## 2.2. HARMONİKLERİN TESPİT EDİLMESİ (FOURIER ANALİZİ)

Temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamı, belirli bir zaman aralığı için Fourier serileri ile periyodik bir fonksiyon olarak ifade edilebilmektedir. Bu seriler ile zaman ve frekans düzlemleri arasında dönüşüm gerçekleştirilmektedir [6]. Harmonik belirleme işleme için farklı yöntemler bulunmasına karşın en çok kullanılan yöntemin Fouier dönüşümü olduğunu söylenilebilir.

Sinyal işleme alanında ilk sunulan teorem olan Fourier dönüşümü; 1807 yılında Fransız matematikçi Joseph Fourier tarafından geliştirilmiştir. Bu teorem sinyallerin spektrumlarının incelenmesinde ve frekans bölgesinde sunulmasında oldukça başarılıdır [1,6]. Fourier dönüşümünün matematiksel formülü Eşitlik 2.3'de gösterilmiştir.

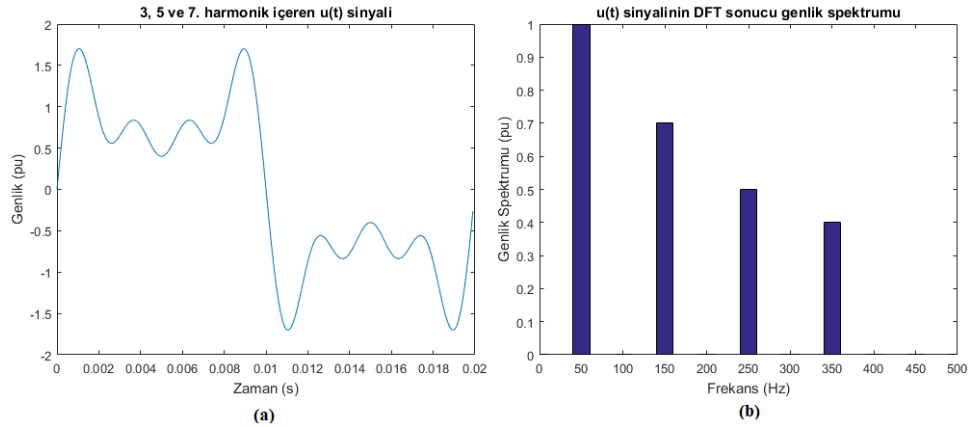
$$C(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte,  $s(t)$  sinyali,  $\omega$  açısal hızı,  $C(\omega)$  ise sinyalin Fourier dönüşümünü gösterir. Sinyal, ayrık bir sinyal ise Fourier dönüşümü Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform, DFT) olarak tanımlanır. Ayrık Fourier dönüşümünün matematiksel olarak Eşitlik 2.4'te gibi ifade edilebilir.

$$C[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n]e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte  $N$  ayrık sinyalin boyutunu,  $s[n]$  ayrık sinyali,  $C[k]$  ise sinyalin ayrık Fourier dönüşümünü göstermektedir. Matematiksel olarak tanımlanan ve frekans analizinde kullanılan Fourier dönüşümü incelendiğinde sinüs biçimli olmayan periyodik dalgaların; genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalganın toplamından oluştuğunu, başka bir ifadeyle; sinüs biçimli olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüs biçimli dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir [1].

Bu yöntem kullanılarak yapılan bir DFT analizi ve sonucu Şekil 2.1'de görülmektedir. Şekil 2.1 (a) grafiğinde görülen toplam dalga, DFT algoritması yardımıyla işleme tabi tutulmuş ve bunun sonucunda toplam dalgayı meydana getiren temel dalga ve harmonikli dalgaların frekansları ve büyüklükleri Şekil 2.1 (b) grafiğinde elde edilmiştir. Şekil 2.1 (b) grafiğinden görüleceği üzere toplam dalga temel dalganın yanı sıra 3. harmonik, 5. harmonik ve 7. harmoniğin toplamlarından meydana gelmiştir.



Şekil 2.1. Harmonik içeren sinyal ve bileşenleri. a) sinyal, b) bileşenler.

Bu analizler kullanılarak elektrik sistemlerinde bulunan harmonik dereceleri tespit edilir ve bu bilgiler yardımıyla harmonikleri oluşturan problemler ortadan kaldırılmaya çalışılır. DFT yöntemi de RMS gibi kullanılan pencere boyutuna

bağlıdır. Bununla birlikte daha karmaşık hesaplama yapmakta ve daha fazla işlem gücüne gereksinim duymaktadır. Ancak RMS hesaplamasının aksine harmonik bileşenlerinin genliğini ve açısını vermesi bir avantaj sayılabilir.

### 2.2.1. Hızlı Fourier Dönüşümü

Hızlı Fourier dönüşümü, ayrık Fourier dönüşümünün pratik olarak hesaplanması için geliştirilmiş bir yöntemdir. DFT hesabı için yapılması gereken işlem sayısı azaltılmış ve dönüşüm etkin hale getirilmiştir. FFT, DFT için en çok kullanılan yöntemdir [10]. Bu çalışmada, harmonik belirleme işleminin temelinde kullanılan yöntemdir.

### 2.2.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

Ayrık Fourier dönüşümü, durağan karakteristiğe sahip sinyallerin analizi için ideal bir yöntemdir. Ancak, gerçek şebeke şartlarında ve farklı koşullarda güç sinyali zamana göre genlik ve frekans açısından değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle, zamana göre değişim gösteren sinyal üzerinde bir çerçeve kaydırılarak her adımda çerçeve içinde kalan sinyal bölümüne DFT işlemi uygulanır. Sonuçta her adım için zaman, frekans ve genlik değerleri ayrı ayrı elde edilir. Bu yöntem pencereleme olarak adlandırılmaktadır [36]. İzlenen sinyalin pencereleme yöntemiyle Fourier dönüşümünün hesaplanması işlemi ise kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) olarak adlandırılmaktadır. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik 2.5'teki gibi gösterilebilir.

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.5)$$

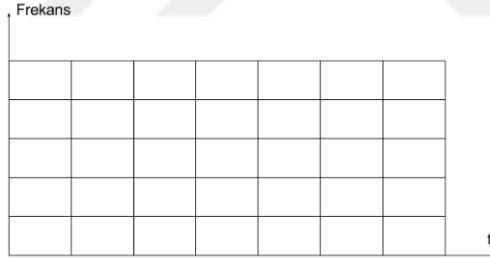
Bu eşitlikte  $x(t)$  zamanla değişen sinyali,  $w(t)$  pencere fonksiyonunu,  $f$  frekansı ve  $\tau$  ise zaman eksenindeki kayma miktarını (çerçeve genişliği) göstermektedir. Seçilen çerçeve dar ise iyi bir zaman yerelleştirmesi; geniş ise iyi bir frekans yerelleştirilmesi elde edilmektedir. Literatürde, Barlet, Blackman, dikdörtgen, Chebyshev, Hanning, Hamming, ve Kaiser pencere fonksiyonlarının yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Değişim miktarı fazla olan sinyallerin analizi için pencere miktarı

daha küçük olarak seçilebilir [6,36,37]. Bu dönüşümün pencerelemiş Fourier dönüşümü (Windowed Fourier Transform, WTF) olarak da adlandırılmaktadır.

### 2.3. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

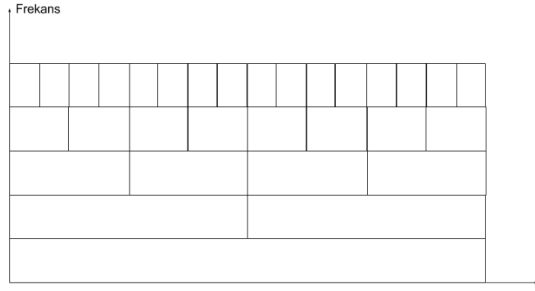
Güç kalitesi olaylarının algılanmasında ve analizinde kullanılan bir diğer yöntem ise dalgacık dönüşümüdür. Güç sistemlerinde oluşacak bozulmanın izlenebilmesi için zaman-frekans dönüşüm yöntemi olarak önerilmiş ve başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Dalgacık dönüşümü, durağan olmayan sinyallerin analizinde Fourier dönüşümüne göre daha detaylı sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadır.

Belirli bir zaman penceresinde değeri sıfırdan farklı olan özel salınım fonksiyonlarına “dalgacık” adı verilir. Belirlenen pencere dışında fonksiyonun değeri sıfır olarak belirlenir. İncelenen sinyal dalgacık fonksiyonu ile çarpılır ve her bir kısım için dönüşüm yapılır. Kısa zamanlı Fourier dönüşümünde zaman-frekans dönüşümleri için sabit kareler kullanılmaktaydı (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Pencerelemiş Fourier dönüşümü için zaman-frekans ızgarası.

Wavelet dönüşümünde ise düşük frekanslar için geniş zaman aralığında; yüksek frekanslar için ise küçük zaman aralığında işlem yapılmaktadır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi zaman-frekans düzleminde boyutları farklı pencereler ile işlem yapılmaktadır.



Şekil 2.3. Wavelet dönüşümü için zaman-frekans ızgarası.

Sürekli bir  $f$  sinyalinin Dalgacık dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik 2.6'daki gibi ifade edilebilir.

$$W(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte  $s$  ölçek parametresi,  $\tau$  kaydırma parametresi ve  $\psi_{s,\tau}(t)$  ise ana dalgacık fonksiyonudur. Dalgacık dönüşümü sonrasında, işlenen sinyalin bileşen katsayıları ile örtüşen dalgacık bileşenleri elde edilir [38]. Dalgacık yüksek oranda sıkışık halde ölçeklendiğinde sinyalin yüksek frekans bileşenlerini ortaya çıkarır. Dalgacık geniş olarak ölçeklendiğinde ise sinyalin düşük frekans bileşenleri ortaya çıkarır [3]. Dalgacık dönüşümü bu tez kapsamında kullanılmasa da kısa zamanlı Fourier ve Stockwell dönüşümleri ile bağlantılı olduğundan ele alınmıştır.

#### 2.4. STOCKWELL DÖNÜŞÜMÜ (S-DÖNÜŞÜMÜ)

S-dönüşümü, dalgacık dönüşümünü esas alan bir uzantı veya değişken pencere uzunluğuna sahip bir kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve her ikisinin karma ve gelişmiş hali gibi düşünülebilir [39-41]. Son yıllarda S-dönüşümü ile yapay sinir ağları, bulanık mantık ve destek vektör makineleri gibi desen sınıflandırıcılar güç kalitesi olaylarını sınıflandırmak için beraber kullanılmıştır. Eğitim gerektiren bu sistemlerin tamamında eğitim örnekleri uygun değilse sınıflama doğruluğu düşmektedir. Bu yöntemlere alternatif olarak kural tabanlı karar ağaçları da kullanılmıştır [42].

### 2.4.1. S-Dönüşümü Matematiksel İfadesi

S-dönüşümü Sürekli Dalgacık Dönüşümün faz doğrulanmış hali olarak düşünülebilir. Bir  $h(t)$  fonksiyonunun sürekli dalgacık dönüşümü Eşitlik 2.7'deki gibi ifade edilmektedir:

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t - \tau, d)dt \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte  $d$  parametresi ile  $w(d, t)$  dalgacığının genişliğini belirlemekte olup çözünürlük kontrol etmektedir.  $h(t)$  fonksiyonunun S-dönüşümü ise özel bir ana dalgacık (mother wavelet) ile faz faktörünün çarpımını içeren bir sürekli dalgacık dönüşümü olarak ele alınabilir (Eşitlik 2.8).

$$S(\tau, f) = e^{j2\pi f\tau}W(\tau, d) \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8'deki dalgacık dönüşümü ifadesindeki ana dalgacık Eşitlik 2.9 ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte ölçek parametresi olan  $d$ , frekansın ( $f$ ) tersine eşittir.

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9'daki ana dalgacık değer ortalaması sıfırdan farklı olduğundan Eşitlik 2.8'deki ifade tam olarak sürekli dalgacık dönüşümü değildir. S-dönüşümü Eşitlik 2.10'daki gibi ifade edilebilir.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.10)$$

S-dönüşümü aynı zamanda  $h(t)$  sinyalinin Fourier spektrumu olan  $H(f)$  ile ifade edilebilir (Eşitlik 2.11).

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{j2\pi \alpha \tau} d\alpha, f \neq 0. \quad (2.11)$$

Güç sisteminde meydana gelen bozulma sinyali  $h(t)$  ayrık zamanlı olarak  $k=0,1,2..N-1$  olmak üzere  $h(kT)$  şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadelerde  $T$  örnekleme zaman aralığı;  $N$  ise toplam örnek sayısını ifade etmektedir.  $h(kT)$  sinyalinin ayrık zamanlı Fourier dönüşümü  $n = 0,1,..,N-1$  olmak üzere Eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilir.

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} h(kT) \cdot e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.12'den yola çıkılarak  $h(kT)$  serisinin S-dönüşümü  $\tau$  yerine  $kT$  ve  $f$  yerine  $n/NT$  yazıldığında Eşitlik 2.13'teki ifade edilmektedir.

$$S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mk}{N}}, n \neq 0 \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte  $k, m = 0,1,..,N-1$ , ve  $n = 1,..,N-1$  olarak ifade edilir.  $n = 0$  (0 konumundaki frekans için) S-dönüşümü sonucu frekans spektrumundaki genliklerin ortalaması hesaplanır (Şekil 2.14).

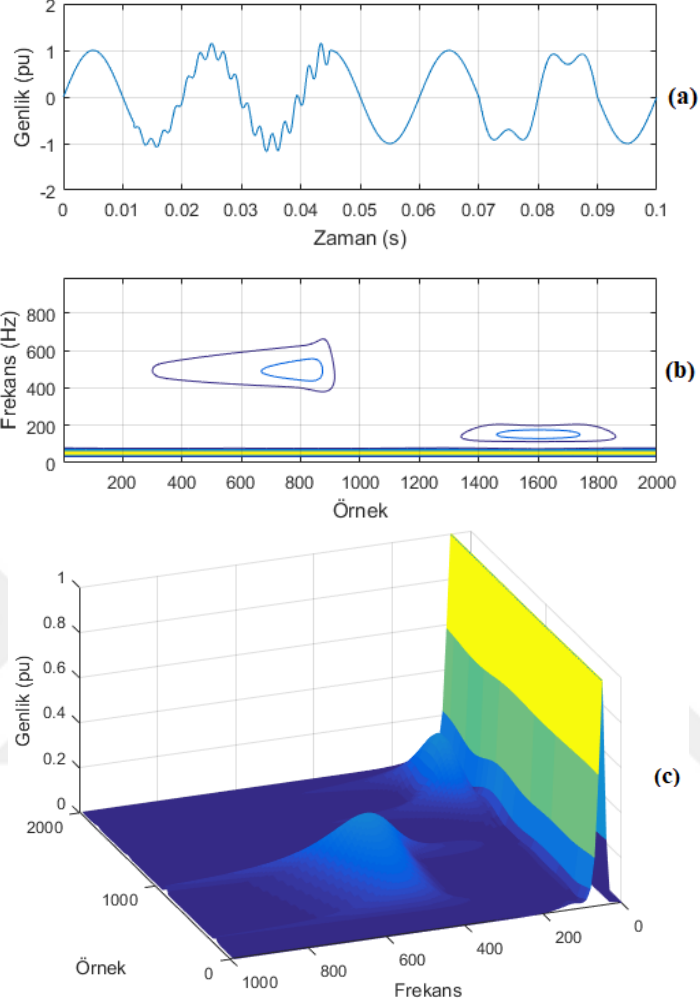
$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad (2.14)$$

FFT ve konvolüsyon yöntemlerinin avantajları kullanılarak ayrık zamanlı S-dönüşümü hızlı bir şekilde hesaplanabilir. S-dönüşümü faz spektrumunu genlik spektrumunda olduğu gibi yerleştirir (Dalgacık dönüşümünün faz doğrulanmış hali). Güç sinyalindeki bozulmanın analiz edilebilmesi için S-dönüşümü genlik matrisi (Eşitlik 2.15) kullanılmaktadır. Bu matriste satırlar frekans değerlerini gösterirken sütunlar zaman değerlerini göstermektedir. Matrisin her bir elemanı ise bulunduğu noktadaki genlik değerini ifade etmektedir [43].

$$A(kT, f) = \left| S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] \right| \quad (2.15)$$

Bir sinyalin S-dönüşümü ile elde edilen çıktısı grafiksel olarak frekans-zaman, genlik-zaman ve frekans-genlik çizimlerinin içerir. Şekil 2.4'te osilasyonlu geçiş ve 3. Harmonik içeren bir gerilim sinyaline ilişkin çok çözünürlüklü S-dönüşümü örneği

verilmiştir. Bu şekilde, gerilim sinyali grafiği (a), S-dönüşümü grafiği (b) ve 3-boyut mesh grafiği (c) verilmiştir.



Şekil 2.4. Örnek bir güç sinyali bozulmasının grafiksel analizi. a) osilasyonlu geçiş ve 3. harmonik içeren sinyal, b) zaman-frekans gösterimi (contours), c) üç boyutlu zaman-frekans-genlik grafiği.

Şekil 2.4 (b)'deki verilmiş olan contour grafiğinde, osilasyonlu geçiş sırasındaki enerji konsantrasyonu ile açığa çıkarılmaktadır. Benzer şekilde, osilasyonlu geçişten sonra gelen 3. harmonik varlığı da 150 Hz bandındaki enerji ile kendini belli etmektedir [44]. Şekil 2.4 (c)'de görüldüğü gibi, S-dönüşümü, düzlemde ifade edilen sinyalden bir zaman-frekans-genlik (ZFG) uzayı elde edilmesini sağlamaktadır. Dalgacık dönüşümünde sinyal ayrıştırıldığından faz bilgisi kaybolmaktadır. Fakat ZFG uzayında sinyal değişimleri faz bilgisi kaybolmaksızın gözlemlenebilmektedir. Buna ek olarak S-dönüşümü, bileşen frekansları arasındaki değişimleri de ön plana

çıkartabilmektedir. Böylelikle, S-dönüşümü, spektral sızıntı olayını STFT yöntemine göre daha fazla azaltabilmektedir [45].

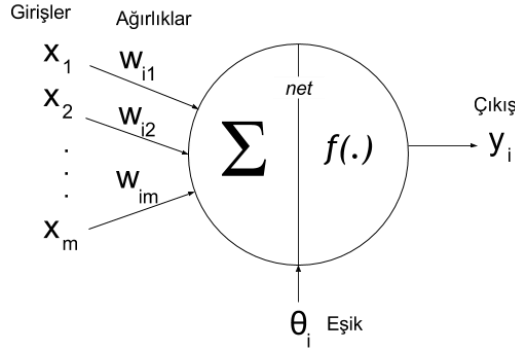
Bu çalışmada yapılan uygulamalarda yapılan sinyal üretimi ve S-dönüşüm işlemleri MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. S-dönüşümü gerçekleştiren fonksiyonlar C programlama dili ile kodlanmış ve MEX dosyaları arabirimi ile MATLAB ortamında kullanılmıştır. S-Dönüşümü işleminde kullanılan FFT ve ters FFT işlemleri için FFTW kütüphanesinden faydalanılmıştır.

## 2.5. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağı, paralel çalışan temel işlem elemanlarının oluşturduğu bir yapı olarak düşünülebilir. Bu yapı biyolojik sinir sisteminden esinlenilerek oluşturulmaktadır. Yapay sinir ağının işlevi, büyük oranda söz konusu temel işlem elemanları arasındaki bağlantılar ile belirlenmektedir. Bir yapay sinir ağı belli bir işlevi yerine getirmek üzere, temel işlem elemanlarının ağırlıkları ayarlanarak eğitilebilir. Yapay sinir ağları herhangi bir işleve gelişigüzel bir doğruluk oranı ile yaklaşabilir. Doğrusal olmayan (non-linear) bir model olduğundan pratik olarak karmaşık olan ilişkileri ortaya çıkarmak için kullanılabilir esnekliktedir. Veri güdümlü ve kendini adapte eden yapıya sahip olduğundan hedeflenen modele ilişkin ek bir işlev ya da dağıtık tanımlara gerek kalmadan çalışmaktadır [46].

Yapay sinir ağları sınıflandırma problemleri için yardımcı bir araç olup endüstriyel, bilimsel ve iş hayatında sınıf problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Güç kalitesi sınıflandırma çalışmaları da bu uygulamalar içinde yer almaktadır [44]. Bu çalışmada yapay sinir ağı olarak “Geri Yayılımlı Ağ” kullanılmıştır.

Şekil 2.5’te, biyolojik nöronun esinlenerek ortaya konmuş olan tek bir işlem elemanının temel matematiksel modeli verilmiştir. Bu modelde,  $i$ . işlem elemanının çıkışı Eşitlik 2.16’daki gibidir.



Şekil 2.5. Bir nöron hücrenin matematiksel modeli.

$$y_i = f \left( \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j - \theta_i \right) \quad (2.16)$$

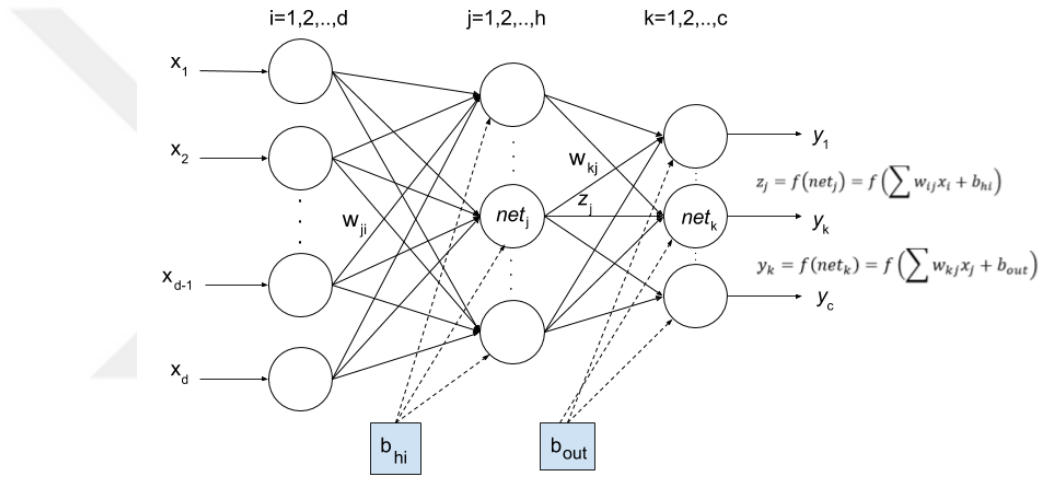
Burada  $\theta_i$ ,  $i$ . işlem elemanının eşik değerini ve  $f(.)$  etkinleştirme fonksiyonunu ifade etmektedir. İşlem elemanlarının bilgi işleme şekli, giriş ve çıkış olmak üzere iki bölümden oluşur. Bir işlem elemanı dışarıdan almış olduğu  $x_j$  giriş bilgilerini bağlı buldukları  $w_{ij}$  ağırlıklarını kullanarak bir  $net$  değeri üretir.

Her bir işlem elemanının çıkış değeri üretebilmesi için,  $net$  değerinin bir  $f(.)$  etkinleştirme fonksiyonundan geçirilmesi gereklidir. Etkinleştirme fonksiyonları işlem elemanlarının çok geniş aralıktaki çıkışını belirli aralıklara çekmek için kullanılmaktadır. Böylece her bir işlem elemanının tepkisi yumuşatılmakta ve bağlantı ağırlıklarının değişimlerinin de daha düşük değerlerde olması sağlanmaktadır. Böylelikle hata değişiminin iraksaması engellenerek eğitim sürecini kolaylaştıracak kararlılığa ulaşılabilir. Yaygın olarak kullanılan etkinleştirme fonksiyonlarına örnek olarak birim basamak, signum, rampa, tek ve çift yönlü sigmoid verilebilir.

Genel olarak bir YSA dışarıdan gelen bilgilerin ağa uygulandığı giriş katmanı, gelen bilgileri işleme kabiliyetine sahip ara katmanlar ve sinir ağının kararlarını dışa aktaran bir çıkış katmanı olmak üzere 3 tür katmandan oluşur (Şekil 2.6). Giriş katmanında çoğunlukla bilgi işleme aşaması gerçekleştirilmez. Bu katmandaki işlem elemanları, aldıkları bilgiyi herhangi bir değişikliğe uğratmadan ara katmandaki

işlem elemanlarına aktarırlar. Burada sözü edilen bilgi, sinir ağının işlem elemanları arasındaki bağlantı hatları üzerinde bulunan ağırlıklarla ifade edilir. Bu bilgiler, YSA'nın eğitimi sırasında elde edilir ve eğitim sonrasındaki durumları yorumlamak için kullanılır.

Tüm YSA modellerini bir örüntü sınıflandırıcısı olarak kullanmak mümkündür. Fakat en yaygın kullanılan YSA çok katmanlı ileri beslemeli geri yayımlı ağ yapısıdır [47]. Şekil 2.6 çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA modelini göstermektedir.



Şekil 2.6. Çok katmanlı ileri beslemeli YSA modeli.

Yaygın olarak kullanılan çok katmanlı ileri beslemeli YSA'nın eğitiminde çeşitli eğitim algoritmaları kullanılmakla birlikte, en başarılı sonuçlar eğitim düşme metoduna dayalı geri yayılım (backpropagation) algoritması ile elde edilmiştir. Çok katmanlı YSA yapısı ve geri yayılım algoritması tüm YSA çalışmalarında geniş bir yer tutar. Çok katmanlı YSA yapısının kaç katmanlı olacağı ve katmanlarda kaç nöron bulunacağı, etkinleştirme fonksiyon türü seçimi genellikle uygulamalara bağlıdır [3].

### 2.5.1. Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağları

İleri beslemeli geri yayılımlı yapay sinir ağları, performans fonksiyonunun negatif gradyanı ile ağ ağırlıkların değiştirildiği ağlardır. İleri beslemeli ağlarda kullanılan performans fonksiyonu hata kareleri ortalamasıdır (Mean Square Error - MSE). Geri yayılımlı yapay sinir ağlarının eğitim aşamasında uygun giriş ve çıkış değerlerini içeren örneklere ihtiyaç duyulur. Eğitim sırasında performans fonksiyonunu en küçük hale getirecek şekilde ağ ağırlıkları ve eşik değerleri tekrarlı olarak güncellenir. MSE, matematiksel olarak Eşitlik 2.17'deki gibi ifade edilebilir:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^p (d_q - y_q)^2 \quad (2.17)$$

Bu eşitlikte  $d_q$ ,  $q$  ile gösterilen eğitim verisi için istenen çıkışı;  $y_q$  ise mevcut çıkış verisini ifade etmektedir. Geri yayılım ifadesi, ağırlıkların güncelleme yönünün çıkıştan girişe doğru yapıldığını göstermektedir. Hatanın gradyan ifadesi Eşitlik 2.18'deki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$\Delta w_{ij} = -k \frac{dE}{dw_{ij}} \quad (2.18)$$

Bu eşitlikte  $k$  öğrenme katsayısını,  $E$  hata fonksiyonunu ve  $w_{ij}$  ise  $i$ . ve  $j$ . nöron arasındaki bağlantı ağırlığını ifade etmektedir [48]. Ağ ağırlıkları ve eşik değerleri etkinleştirildiği anda yapay sinir öğrenme aktivitesi için hazır hale gelmiş olur. Bu tez çalışmasında da geri yayılım algoritması ile eğitilen çok katmanlı YSA yapısı kullanılmıştır.

## BÖLÜM 3

### VERİ TOPLAMA CİHAZININ DONANIMSAL TASARIMI

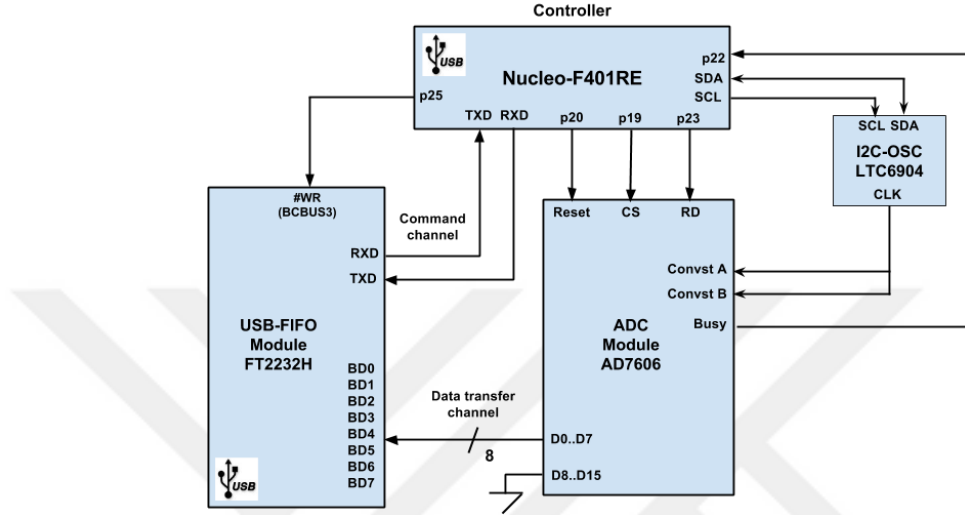
Bu çalışma kapsamında iki farklı veri yakalama cihazı tasarımı yapılmıştır. Cihazın ilk versiyonu mikrodenetleyici ile ikinci versiyonu ise FPGA kullanılarak tasarlanmıştır. Veri yakalama cihazının örnekleme oranı, gömülü sistem çalışması da düşünülerek saniyede 10 000 örnek yakalayacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu cihaz ile toplanan sinyal verileri gerçek zamanlı olarak sinyal işleme görevini yerine getiren bilgisayara aktarılmaktadır. Her iki cihazda da aynı veri aktarım tümdevresi kullanıldığından iki cihaz da geliştirilen sinyal işleme yazılımı ile doğrudan uyumludur. FPGA ile gerçekleştirilen cihaz ilerleyen çalışmalarda yapılacak olan iyileştirmeler için daha uygun olup daha az güç tüketmektedir.

#### 3.1. MİKRODENETLEYİCİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN CİHAZ

Mikrodenetleyici ile gerçekleştirilen veri yakalama cihazı 4 modülden oluşmaktadır (Şekil 3.1). İlk modül cihazın işlemcisini barındıran denetleyici modüldür (Nucleo-F401RE). İkinci modül AD7606 ADC tümdevresini barındıran veri yakalama modülüdür. Üçüncü modül FT2232H tümdevresini barındıran USB-FIFO modülüdür. Dördüncü modül ise örnekleme sinyalini üretmek için kullanılan osilatör modülüdür. Denetleyici modül, USB portu üzerinden örnekleme başlat ya da durdur gibi komutlarla kontrol edilmektedir.

Nucleo-F401RE denetleyici modülünde ST firması tarafından üretilen Cortex-M4 ARM çekirdeğine sahip STM32F401RE mikrodenetleyici kullanılmıştır [49]. Bu işlemci 84 MHz saat hızında çalışmaktadır. Nucleo-F401RE, bilgisayara takıldığında bir yığın veri depolama aygıtı (Mass Storage Device) olarak çalışmakta olup “mbed bulut derleyicisi” ile programlanabilmektedir.

Tarayıcı içinde C programlama dili ile yazılan işletim yazılımı (firmware), sunucu tarafında Keil tabanlı derleyici ile derlenmekte ve derlenmiş olan ikili program dosyası Nucleo sürücüsüne indirilmektedir. Yükleme işlemi tamamlandığında cihaz yeni firmware ile yeniden başlamaktadır [50].



Şekil 3.1. Mikronetleyici ile gerçekleştirilen güç sinyali verisi toplama cihazı.

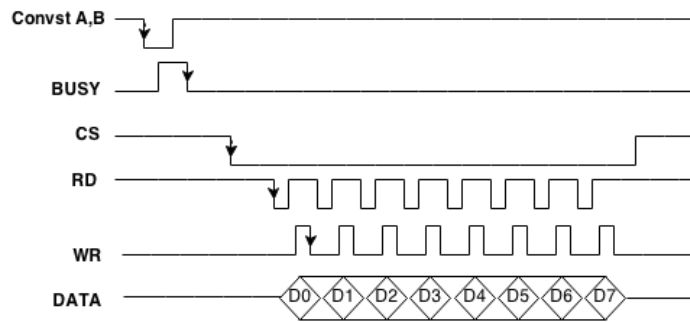
ADC modülü Analog Devices firması tarafında üretilen AD7606 ADC tümdevresini barındırmaktadır. AD7606, 8 kanal eş-zamanlı örnekleme yapabilen bir ADC olup örnekleme oranı 200 ksps'e kadar çıkabilmektedir. Girişleri diferensiyel olarak da kullanılabilen AD7606 tümdevresi 5 V DC gerilim sağlayan tek kaynaktan çalışabilmektedir. Giriş gerilim aralığı  $\pm 5$  V ile  $\pm 10$  V arasında seçilebilmekte olup  $\pm 15$  V değerine kadar gerilim koruması sağlamaktadır. Bu özelliklere ek olarak 1 M $\Omega$  giriş empedansı ve girişlerinde kullanılan 2. dereceden alçak geçiren tümleşik analog filtre gibi özellikleri de bu tümdevreyi güç sinyali toplama uygulamaları için ideal hale getirmektedir. AD7606, hem paralel (byte ve word genişliğinde) hem de SPI arabirimi ile seri modda kullanılabilir [51].

USB-FIFO modülünde ise FTDI tarafından üretilen FT2232H USB arabirim tümdevresi yer almaktadır. Bu tümdevre, tümleşik tampon (First In First Out, FIFO) yapısı ile USB Hi-Speed sınıfında veri aktarımı gerçekleştirebilen bir tümdevredir. Üzerinde UART, SPI ve FIFO olarak programlanabilen iki adet USB iletişim kanalı

bulundurmaktadır. Üretici tarafından sağlanan çoklu platform sürücü desteği ile bu cihazı birçok farklı işlemci mimarisi ve işletim sistemi ile kullanılabilir [52].

Daha önceki çalışmalarda geliştirilen veri yakalama cihazında örnekleme işlemi, işlemcinin PWM (Pulse Width Modulation) çıkışı ile gerçekleştiriliyordu. İşlemcinin PWM frekansındaki kaymadan [53,54] dolayı, yakalanan sinyalde de jitter (kayma) miktarının fazla olmasına yol açıyordu. Bu nedenle örnekleme sinyali için Linear Technology tarafından üretilen LTC6904 [55] seri programlanabilir osilatör tümdevresi kullanıldı (Şekil 3.1). LTC6904 tümdevresi, %1,1'ten daha az frekans hatası ve %0,4'ten daha düşük jitter değeri ile 1 KHz'den 68 MHz'e kadar saat frekansı üretebilen bir tümdevredir.

AD7606 tümdevresi, örnekleme her tamamladığında BUSY sinyalini (meşgul bayrağı) düşük seviyeye çekerek denetleyiciyi uyarılmaktadır. AD7606 tümdevresi için örnekleme süresi tipik olarak 4  $\mu$ s'dir. Denetleyici modül örnekleme tamam kesmesi geldiğinde veri yakalama modülüne okuma; USB-FIFO modülüne ise yazma sinyali gönderir. Bu işlem her bir kanal için yapılır. 8 kanal için 8 adet okuma ve 8 adet yazma işlemi gerçekleştirilir. Sonuçta bir periyot için sekiz adet örnek yakalanıp USB-FIFO ünitesine yazılır (Şekil 3.2). AD7606 tümdevresinden veri okunurken ve FT2232H tampon belleğine veri yazılırken düşen kenar sinyalleri kullanılır.



Şekil 3.2. AD7606 ve FT2232H tümdevreleri için okuma ve yazma sinyalleri.

Bu çalışma şekli ile FIFO ünitesi veri asenkron olarak yazılmaktadır. FT2232H tümdevresi katalog verilerine göre FT2232H tümdevresi 8 Mbytes/s oranına kadar asenkron olarak PC'ye veri aktarabilmektedir. USB-FIFO tümdevresi FT2232H iki

adet programlanabilir USB kanalına sahiptir. Bu kanallar UART, SPI, I2C ve 8-bit paralel senkron/asenkron veri yolu olarak kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan AD7606 tümdevresi 16-bit örnek çözünürlüğüne sahip olduğundan BYTE modunda veri aktarılmış ve FT2232H tümdevresinin kanallarından biri kontrol diğeri de veri aktarımı için kullanılmıştır.

Osilatör devresi, STM32F401RE mikrodenetleyicisinin I2C portu ile kontrol edilmektedir. Veri yakalama cihazında iki farklı örnekleme frekansı kullanılmaktadır. Bu frekans değerleri 10 ksps gömülü sistem çalışması ve 40 ksps PC çalışmasında kullanılmaktadır. Her iki örnekleme sinyali de artık I2C-OSC birimi ile üretilmektedir. I2C-OSC kullanımı ile örnekleme frekansındaki jitter azaltılmıştır. Veri yakalama cihazında gerçekleşen kayma sorunu, yazılım içinde sıfır geçiş noktasının her döngüde yeniden hesaplanması ile düzeltilenmektedir.

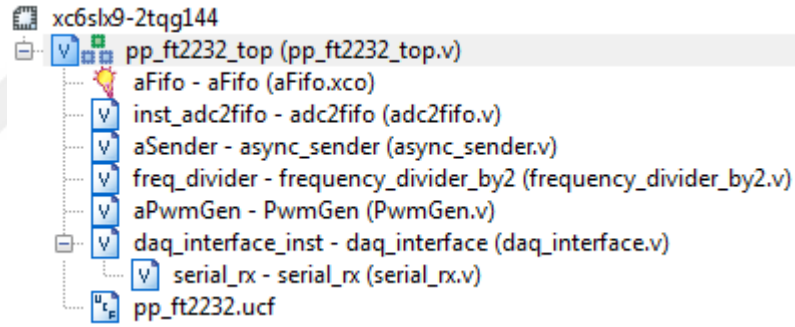
### **3.2. FPGA İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN CİHAZ**

Veri yakalama donanımının yeni hali için yapılan çalışmalar kapsamında, AD7606 (8 kanal, 16-bit, 200 ksps) ve ADS8556 (6 Kanal, 16-bit, 500 ksps) ADC (Analog-to-Digital Converter) tümdevrelerinden FPGA ile okunan verilerin USB-FIFO arabirimi ile bilgisayara aktarılması üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla Spartan 6 LX9 ve Spartan 3E serisi FPGA'ler kullanılmıştır. FPGA, ADC için gerekli örnekleme ve kontrol sinyallerini üretmek, ADC'den gelen veriyi tamponda tutmak ve USB üzerinden kişisel ya da gömülü bilgisayara göndermek için kullanılmaktadır. Bu tasarımın önceki tasarımdan farklı mikrodenetleyici ile yapılan işlemlerin tamamının özelleşmiş FPGA modülleri ile yapılmış olmasıdır. Hem Kişisel bilgisayar üzerinde yapılan deneyler sonucunda ADS8556 ve AD7606 için 40 ksps hızında 6 ve 8 kanallı veri aktarımı sorunsuz olarak gerçekleştirilmiştir. Aynı deneyler tek kart bilgisayarla 10 ksps örnekleme oranı ile başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Veri yakalama donanımının tasarımında kullanılan FPGA kartları Papilio One, MIMAS ve Papilio Pro'dur. Papilio One da Spartan 3E; Papilio Pro ve MIMAS'ta Spartan 6 LX9 FPGA'leri bulunmaktadır. Papilio serisi geliştirme kartları üzerinde çift kanallı USB yapısı sunan FT2232D tümdevresi bulunmaktadır. Bu tümdevrenin

birinci kanalı Xilinx ISE ile geliştirilen konfigürasyon (bitstream, .bit) dosyasının FPGA belleğine (RAM ya da SPI Flash) yüklenmesi amacı ile kullanılmaktadır. MIMAS'ta ise ikili konfigürasyon dosyasının (.bin formatlı) flash belleğe yüklenmesi için PIC18F14K50 mikrodenetleyicisi kullanılmaktadır. FPGA tümdevrelerine ilk enerji verildiğinde, FPGA konfigürasyonu (bitstream) SPI flash üzerinden FPGA RAM'ine aktarılmaktadır.

FPGA konfigürasyonu Xilinx tarafından sağlanan ISE Design Suite 14.7 ile tasarlanmıştır. FPGA konfigürasyonu için geliştirilen projeye ait dosya ağacı Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu projede *pp\_ft2232\_top* en üst seviyedeki Verilog modülü olup (ana modül) diğer modüllerin tamamını donanımsal olarak birleştirmektedir. FPGA tasarımlarında en üst seviye modül (top modüle), *sanal bir anakart* olarak düşünülebilir.



Şekil 3.3. DAQ cihazı konfigürasyonuna ait proje dosya ağacı.

PwmGen Modülü: ADC için örnekleme sinyalini üretmek amacıyla kullanılan modüldür. Papilio kartı üzerindeki 32 MHz lik osilatör sinyalinden %50 görev çevrimi ile (Duty Cycle) 40 KHz'lik örnekleme (PWM) sinyali üretmektedir.

Frequency\_divider\_by2: Papilio üzerindeki 32 MHz'lik saat frekansını ikiye bölerek ADC için okuma; FIFO bellek için yazma sinyali üretmektedir.

aFifo: ADC'den okunan verinin USB üzerinden gönderilmeden önce tutulduğu tampon bellektir. Xilinx tarafından sağlanan FIFO IP (Intellectual Property) Core'dan türetilerek kullanılmıştır. Asenkron moda çalışmakta olup veri yazma ve

okuma hızları birbirinden farklı olduğu durumlarda da kullanılabilir. FTDI seri kanalı üzerinden yapılan çalışmada 16 MHz ile yazılıp 32 MHz ile okunurken; paralel kanal üzerinden yapılan çalışmada 16 MHz ile okunup 16 MHz ile veri yazılmaktadır.

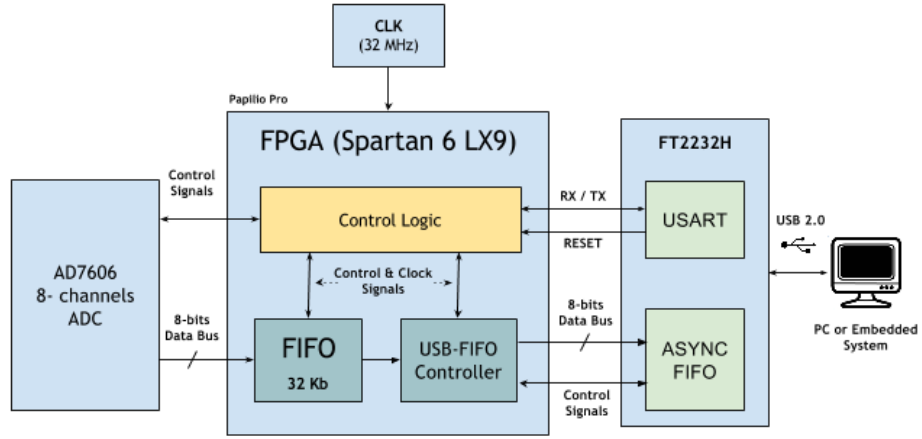
inst\_ad2fifo modülü: ADC'yi okumak ve aFIFO'ya veri yazmak için gereken kontrol sinyallerini üretmek için kullanılan modüldür. ADC'den gelen BUSY kesmesi ile önce ADC'yi sonra FIFO'yu seçmektedir. Böylece 16 MHz'lik saat palsinin düşen kenarında ADC'den kanal verisi okunurken yükselen kenarında okunan veri FIFO belleğe yazılır. Bu modül, ADC ve FIFO arasında senkronizasyonu sağlamaktadır.

Async\_sender modülü: aFIFO'dan ADC verisini okuyup USB tümdevresinin veri iletişim kanalına yazan modüldür. Bu çalışmada FT2232H tümdevresinin 2. Kanalı asenkron FIFO modunda olup ADC verisinin USB üzerinden aktarılması amacı ile kullanılmıştır.

Daq\_interface modülü: Örnekleme işlemini başlatmak ve durdurmak için kullanılan modüldür. Bu modülün alt seviyesinde yer alan *serial\_rx* modülü seri iletişim ile gönderilen verinin okunabilmesi için kullanılan modüldür. Serial\_rx modülü 2 MBaud hızında çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Bu modül FT2232H tümdevresinin seri iletişim için programlanmış kanalı üzerinden DAQ yazılımından komut almaktadır. Ayrıca seri iletişim kanalının ready-to-send (RTS) ucu; DAQ cihazındaki FPGA modüllerini ve ADC'yi sıfırlamak için kullanılmaktadır.

Proje ağacındaki *pp\_ft2232.ucf* dosyası ise FPGA'in mantıksal tasarımındaki giriş/çıkış uçları ile FPGA'in fiziksel uçlarına bağlantı tanımlarını içeren kullanıcı tanım dosyasıdır (User Constraint File).

Bu modüllerin tamamı cihaz işleyişi sırasında paralel olarak çalışmaktadır. Örneğin örneklemeyi durdurma komutu seri port üzerinde FPGA'e yollandığı zaman veriyi değerlendiren *Daq\_interface* modülü örnekleme, okuma ve yazma işlemlerini kesintiye uğratmamaktadır. Şekil 3.4'te cihazın mantıksal tasarımı görülmektedir.



Şekil 3.4. FPGA-DAQ çalışmasında ilişkin mantıksal tasarım.

Yeni donanımda USB-FIFO tümdevresi aynı kaldığından harmonik belirleme yazılımı her iki donanımla da çalışabilmektedir. Böylece aynı işi yapan iki farklı donanım geliştirilmiştir. Mikrodenetleyici kullanılan veri yakalama donanımı yaklaşık 150 mA akım çekerken FPGA ile geliştirilen donanım 100 mA akım çekmektedir. Böylece veri yakalama donanımının güç tüketimi de düşürülmüştür. Bununla birlikte USB-FIFO tümdevresinin TXE# (TX Enable Bayrağı) ucu da kontrol edilerek, FT2232H içindeki dahili tampon belleğin de dolu olup olmadığı kontrol edilmektedir. Böylelikle, aygıt sürücüsünün tamponu boşaltmadığı durumlar da kontrol edilerek veri taşmasının (data overflow) da önüne geçilmiştir. Bu durumda, ADC'den okunan veri FPGA içindeki FIFO tamponunda biriktirilmeye devam etmektedir. Veri akışı bu şekilde güvenceye altına alınmaktadır.

FPGA ile üretilen örnekleme sinyalinde, jitter (deviasyon) olayının daha az olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak FPGA içinde blok-RAM kullanılarak oluşturulan FIFO 32 kilobaytlık tamponu da, harmonik belirleme yazılımı tarafından yaşanan gecikmelerden kaynaklanabilecek darboğazları da en az hale getirmektedir. Fakat FIFO bellekten okuma hızı, yazma hızından düşük hale geldiği andan itibaren FIFO belleğin çok hızlı dolacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Caciotta vd. tarafından yapılan benzer bir tasarımda MAX11046 ADC, FT2232H ve bir CPLD (Complex Logic Programmable Device) kullanılmıştır [56]. Bunlara ek olarak veri akış kontrolü için PIC12F509 mikrodenetleyicisi de kullanılmıştır. Bu

mikrodenetleyicinin kullanılması hem ilave firmware kullanımını gerektirmekte hem de güç tüketimini artırmaktadır. Referans alınan bu cihaz 300 mA akım çekmektedir. Bu tasarımla FPGA kullanımının, düşük güç tüketen, düşük maliyetli ve esnek uygulamaların nasıl gerçekleştirilebildiğini gösterilmektedir.



## BÖLÜM 4

### HARMONİK BELİRLEME YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Harmonik belirleme yazılımı, veri yakalama cihazından gelen sinyal verisini işleyen ve sonuçları görüntüleyip kaydeden yazılımdır. Harmonik belirleme yazılımının işlevleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Veri yakalama cihazından gelen sinyal verisini kuyruğa alma,
2. Sinyal verisini ilgili kanallara ayrıştırarak harmonikleri belirleme,
3. Güç parametrelerini hesaplama,
4. Güç kalitesi bozulma olaylarını tespit edip sınıflandırma,
5. Olay kaydı ve sinyal verisi kaydetme.

Geliştirilen yazılım ilk olarak kişisel bilgisayar ortamında tasarlanmış ve daha sonradan tek kart bilgisayarlara taşınmıştır. Bu yazılımın tasarımı açık kaynak kodlu kütüphaneler ile gerçekleştirilmesi diğer mimari (örneğin ARM) ve işletim sistemlerine (örneğin Linux) taşınmasını kolaylaştırmıştır. Yazılım, Qt Kütüphanesi (uygulama geliştirme çerçevesi) temelli geliştirilmiştir. Qt çerçevesi, programcılara, görsel bileşen desteğinin yanında ağ, iş parçacığı, grafik işlemci kullanımı gibi birçok alanda hazır kütüphaneler sağlamaktadır. Ayrıca çoklu platform desteği (Windows, MacOS, iOS, Android, Linux) ile de yazılımların platformlar arasında taşınmasını da kolaylaştırmaktadır. Bunlara ek olarak, Digia firması ticari olmayan kullanımlar için LPGL lisans modeli ile de geliştiricilere yazılım geliştirme imkânı sunmaktadır. Geliştirilen yazılımın son aşamasında kullanılan sürüm Qt 5.7.1 dir.

Yazılımda kullanılan ikinci açık kaynak kodlu kütüphane ise FFTW kütüphanesidir. FFTW kütüphanesi, güç sinyali işlemenin temel aşaması olan DFT işlemleri için kullanılmıştır. Bu kütüphane de açık kaynak kodlu olup farklı mimari ve işletim

sistemleri için derlenebilmektedir. Sadece x86 ya da ARM komut setleri için değil aynı zamanda SIMD tabanlı NEON, SSE (Streaming SIMD Extensions) ve AVX(Advanced Vector Extensions) komut seti desteği ile de derlenebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan FFTW kütüphanesinin sürümü 3.3.6 dır.

Yapılan testler sonunda gömülü sistem entegrasyonu da göz önünde bulundurulduğunda 10 ksps örnekleme hızı ile çalışılmıştır. Bu örnekleme oranı ile 100. harmoniğe (5 KHz) kadar harmonikler belirlenebilmektedir. Böylelikle harmonik belirleme yazılımı, ölçülen güç sistemi geriliminin frekansı ile beraber RMS, THD, SNR ve faz açısı değerlerini de hesaplamaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde, gerçek zamanlı harmonik belirleme yazılımına eklenecek parametrelerin hesaplanması için gereken algoritmaların kodlanması ve test edilmesi üzerinde durulmuştur. Harmonik belirleme yazılımı, güncel haliyle FFT işlemi sonrasında harmoniklere göre genlik hesabı yapmakta ve bu genlikleri çizdirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında güç sinyaline ait RMS, frekans değeri, THD ve SNR değerlerinin de gerçek zamanlı olarak hesaplanması ve görüntülenmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle, bu parametrelere ilişkin hesaplamalar üzerinde çalışılmış ve test işlemleri için ayrı bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile, HIOKI güç kalitesi analizörü ile kaydedilmiş akım ve gerilim sinyallerini çizdirilip söz konusu parametrelerin hesaplama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu parametrelere ilişkin hesaplamalar ilk olarak MATLAB ile yapılmış daha sonra C++ ile kodlanan algoritmalar ile sonuçları ile test yazılımına eklenmiştir. Bu iki hesaplama ile beraber çekilen aktif güç değeri hesaplanıp görüntülenmektedir.

#### **4.1. KODLANAN ALGORİTMALARIN TEST EDİLMESİ**

Frekans değeri hesabı, RMS, THD ve SNR parametrelerinin, gerçek zamanlı harmonik belirleme yazılımına aktarılmadan önce test edilmesi için ayrı bir test yazılımı geliştirilmiştir. Bu parametrelere ait hesaplamalarının test edilmesi için ilk olarak HIOKI güç kalitesi analizörün ile CSV formatında kaydedilmiş akım ve gerilim değerleri MATLAB çalışma ortamına aktarılmış ve hazır fonksiyonlarla RMS, THD ve SNR değerleri hesaplatılmıştır. Frekans değer hesabı için ise sıfır

geçiş noktaları ve periyotlar arasında geçen süreyi kullanan algoritma kullanılmıştır. CSV formatlı dosyadan okunan sinyal verisi ham sinyal verisi olup herhangi bir filtre işlemi uygulanmadan kaydedilmiştir. Sinyal üzerindeki sıfır geçiş (Zero-Cross) noktalarının hesaplanabilmesi için sıfır seviyesindeki geçişleri de etkileyen gürültünün filtrelenmesi gerekmektedir (Şekil 4.1).

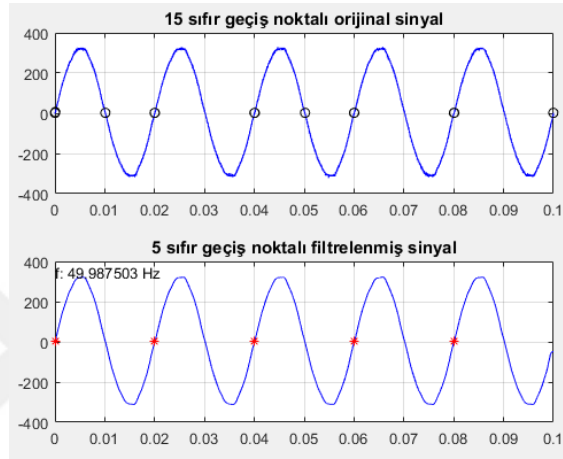


Şekil 4.1. Güç sinyalindeki gürültünün sıfır geçiş noktasındaki bozucu etkisi.

Sinyaldeki gürültünün filtrelenmesi için kesim frekansı 100 Hz olan 6. dereceden Butterworth filtresi kullanılmıştır. Bu filtreleme işlemi sinyalin frekans domeninde yapıldıktan sonra ters Fourier dönüşümü kullanılarak filtrelenmiş sinyal elde edilmektedir. Filtrelenmiş sinyal üzerinde pozitif yöndeki sıfır geçişleri hesaplanarak periyot sayısı (tamsayı biçiminde) belirlenmekte ve periyot sayısı da geçen süreye bölünerek sinyalin frekansı hesaplanmaktadır. Bu yöntem IEC 61000-4-30 standardı tarafından maksimum 10 saniyelik bir süre zarfı için tanımlanmıştır. Bu çalışmada 10 periyotluk bir sinyal penceresi ile çalışılmaktadır. Frekans hesabı için bu pencerenin ilk sıfır geçiş noktasından itibaren 8 periyot kullanılmaktadır. Frekans, ilk ve son sıfır geçiş noktaları arasındaki süreyi, bu noktalar arasındaki periyot sayısına bölerek elde edilmektedir (Eşitlik 4.1).

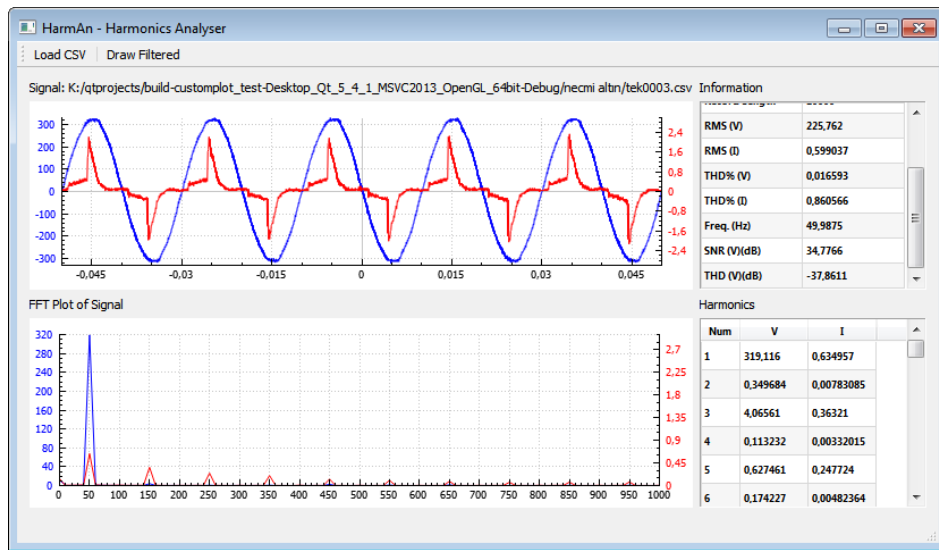
$$f = \frac{t[zci_n] - t[zci_0]}{n} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de  $f$  gerilim sinyalinin frekansını,  $t$  zaman vektörünü,  $z_{cin}$  sıfır geçiş vektörü indisini ve  $n$  ise periyot sayısını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan AD7606 ADC bileşeni tümleşik filtre içerdiğinden gerçek zamanlı harmonik belirleme yazılımında filtre kullanılmasına gerek duyulmayabilir. Şekil 4.2’de sinyalin filtrelenmiş hali ile Frekans, RMS, THD ve SNR değerlerinin hesaplanmış hali MATLAB ortamında çizdirilen grafikten görülmektedir.



Şekil 4.2. MATLAB ortamında elde edilen filtrelenmiş sinyal ve parametre değerleri.

MATLAB ortamında parametre hesaplama işlemleri tamamlandıktan sonra parametre test yazılımı geliştirilmiştir. Parametre test yazılımı akım, gerilim sinyalleri ile bu sinyallere ait genlik spektrumunu da çizmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Güç kalitesi parametrelerinin test edilmesi için geliştirilen yazılım.

Bu yazılımda sinyal çizdirme işlemleri QPainter sınıfını kullanan QCustomPlot bileşeni ile yapılmıştır. Test işlemlerinde gerçek zaman kısıtı olmadığından OpenGL API kullanılmamıştır. QPainter sınıfı ile çizim işlemleri grafik işlemcisi donanıma direkt erişen OpenGL API çizim işlemlerine göre daha yavaş kalmaktadır.

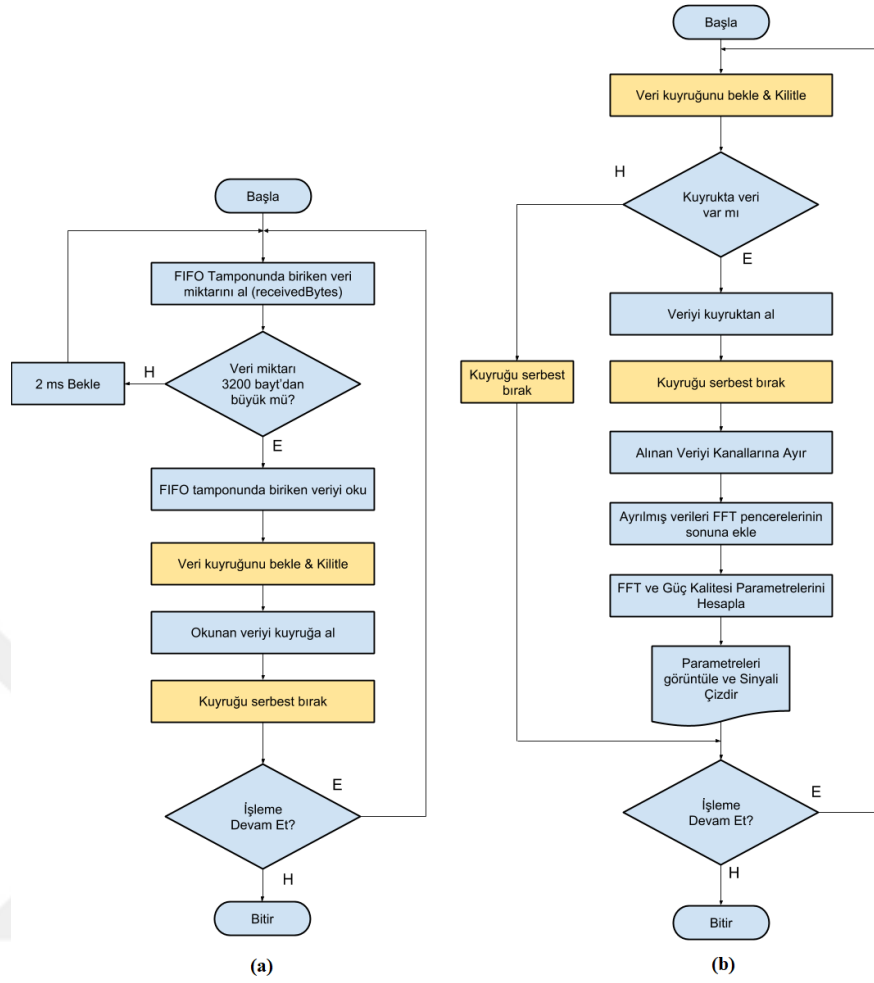
Çizelge 4.1’de MATLAB’ta yapılan parametre hesaplamaları ile test yazılımında yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır. THD ve SNR değerlerindeki farklılık MATLAB yazılımının bu hesaplamaları gerçekleştirirken spektral sızıntı (spectral leakage) değerlerini azaltan *Kaiser* penceresi kullanmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma kapsamında harmonik belirleme işlemleri için *Rectangular* tipi pencere kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1. MATLAB ve test yazılımında hesaplanan parametre değerleri.

	Frekans	RMS (V)	THD (dB)	SNR (dB)
<b>MATLAB</b>	49.9875	225.7624	-37.8131	34.9797
<b>Test Yazılımı</b>	49.9875	225.7620	-37.8611	34.7766

## 4.2. GERÇEK ZAMANLI HARMONİK BELİRLEME YAZILIMI

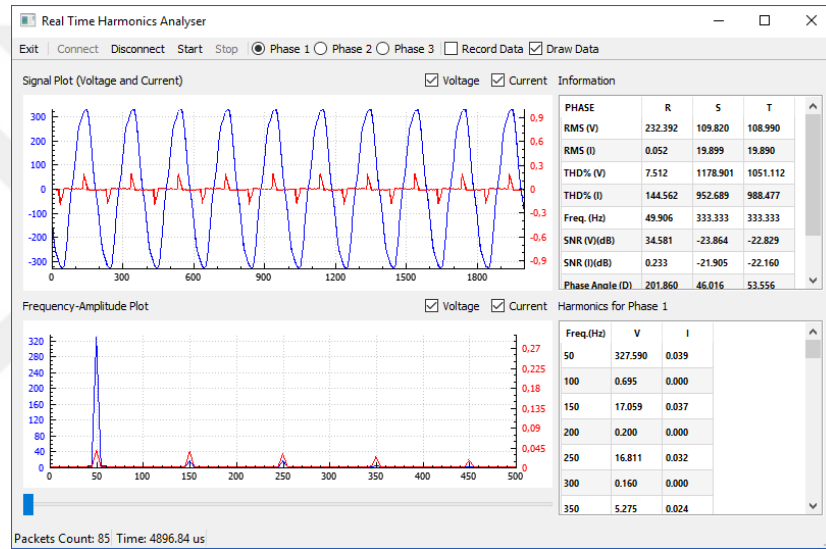
Gerçek zamanlı harmonik belirleme yazılımı üç adet iş parçacığı (thread) ile çalışmaktadır. Bunlar Qt widgets uygulamasının ana iş parçacığı, veri yakalama cihazından gelen veriyi kuyruğa alan *thDataReader* ve kuyrukta bekleyen veriyi alıp işleyen ve sinyali görüntüleyen *thDataProcessor* iş parçacıklarıdır. Kuyruk mekanizmasının senkron çalışabilmesi için kuyruğu kontrol eden bir mutex kullanılmıştır (Şekil 4.4). Ana iş parçacığı grafiksel kullanıcı arabirimi (Graphical User Interface, GUI) için gerekli görevleri yerine getirmektedir. *thDataReader* iş parçacığının öncelik (priority) değeri yüksek (high) olarak ayarlanarak biriken sinyal verisini daha hızlı okuması sağlanmıştır. Bu haliyle geliştirilen yazılım çok çekirdekli sistemler üzerinde daha hızlı çalışacak hale getirilmiştir.



Şekil 4.4. Harmonik belirleme yazılımına ait veri okuma ve veri işleme akışı. a) Veri okuma işlemi, b) Veri işleme akışı .

USB-FIFO tümdevresinin taşıdığı veriyi bilgisayar tarafında okuyabilmek için üretici firma tarafından sağlanan D2XX API kütüphanesi kullanılmıştır. Veri okuma işlemi periyot periyot yapılmaktadır. İzlenen temel sinyalin frekansı 50 Hz olduğundan bu sinyalin bir periyodu tamamlandığında  $0,02 \times 10\ 000 = 200$  örnek yakalanmış olmaktadır. Örnek çözünürlüğü 16 bit (2 bayt) olduğundan tek bir kanal için her bir periyot sonunda 400 bayt bilgisayara aktarılmış olur. Sonuçta 8 kanal için 3200 bayt aktarımı gerçekleştirilmektedir. thDataReader, FT2232H USB-FIFO arabelleğini 4 ms aralıklarla kontrol etmekte ve biriken veri boyutu belirlenen değere geldiğinde (10 ksp/s için 3200 bayt) bu veriyi okuyup kuyruğa atmaktadır. Bu değerlerden yola çıkılarak 10 ksp/s örnekleme hızıyla bir kanal için saniyede  $400 / 0,02 \approx 40$  kbytes aktarım yapıldığı hesaplanabilmektedir.

thDataProcessor, kuyruğa atılan veriyi alıp gerekli işlemleri yapmaktadır. Sinyal işleme yazılımı 10 periyotluk güç sinyali verisini biriktirerek işlem yapar. Her gelen yeni periyot verisi parselleme işleminden sonra FFT penceresinin sonuna yerleştirilir ve ilk periyot verisi atılır. Parselleme işlemi, ardışıl olarak gelen kanal verilerinin ait oldukları kanal dizilerine ayrıştırılması işlemidir. 10 periyotluk veri (200 örnek) x (10) = 2000 örnek içermektedir. Bu halde biriktirilen veri üzerinde FFT işlemi gerçekleştirilir. FFT işlemi tamamlandıktan sonra yakalanmış olan 10 periyotluk veri ve FFT verisine ilişkin grafik uygulama yazılımı tarafından görüntülenmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Harmonik belirleme yazılımının QCustomPlot bileşenli hali.

thDataProcessor, kişisel bilgisayar üzerinde yaklaşık 8 ms de işlem döngüsünü tamamlamaktadır. Çizdirme işlevi devre dışı bırakıldığında hesaplamalar için gereken süre 2 ms'nin altında inmektedir. Çizdirme işleminin bu kadar uzun sürmesinin nedeni, kullanılan çizim bileşeninin QPainter sınıfını kullanmasıdır. QPainter arabirimi çizim işlemleri için CPU kaynağını kullandığından, özellikle de tek kart bilgisayarlar üzerinde çizim işleminin çok uzun sürmesine sebep olmaktadır. Qt 5.7.1 sürümü ile gelen QtCharts bileşeninin OpenGL ve OpenGL ES desteği ile beraber bu performans sorunu çözülmüştür. Yazılımın son halinde QtCharts OpenGL desteği ile beraber çizim işlemleri CPU üzerinden GPU tarafına kaydırılmış ve kayda değer bir performans artışı sağlanmıştır. Qt OpenGL arabirimi Raspberry Pi 3 ve

Beaglebone Black üzerindeki grafik işlemcileri de desteklediğinden tek kart bilgisayarlar üzerindeki çizim problemi de bu şekilde çözülmüştür. OMAP3530 işlemcisi ile Linux framebuffer mekanizmasını kullanan başka bir spectrum görüntüleme uygulamasında [57] çizim süresinin 3,6 s sürdüğü kullandığı bildirilmiştir. Buradan, SoC (System on Chip) yapısı üzerindeki özelleşmiş yapıların ne denli performans artışı sağlayabildiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, sinyal görüntüleme işlemi OpenGL ES 2.0 kütüphanesi ile doğrudan da gerçekleştirildi. Düşük seviyeli OpenGL kodlama ve ölçek işaretlemede kullanılan yazı tiplerinin doku olarak yüklenme zorunluğu gibi olumsuzluklar nedeniyle bu kütüphanenin kullanımından vazgeçilmiştir.

Hamonik belirleme yazılımının gömülü sistem sürümünde 10 kps'lik bir örnekleme oranı kullanılmıştır. Nyquist yaklaşımına göre bu örnek yakalama hızı kullanılarak  $10\ 000 / 2 = 5\ 000\ \text{Hz} = 5\ \text{KHz}$  frekansına kadar olan sinyaller analiz edilebilmektedir. Frekans çözünürlüğü hesabı için ise örnekleme oranı ve FFT penceresi uzunluğuna ihtiyaç duyulmaktadır [58]. Burada verilen hesaplama değerlerine göre uygulamanın frekans çözünürlüğü de Eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte  $\Delta f$  frekans değişim aralığını,  $f_s$  örnekleme oranını ve  $N$  ise FFT alınan nokta sayısını belirtmektedir. Bu uygulamada kullanılan örnekleme oranı 10 000 kps ve FFT pencere uzunluğu 2000 olduğundan frekans çözünürlüğü  $\Delta f = 10\ 000 / 2000 = 5\ \text{Hz}$  olarak bulunmaktadır. Böylelikle FFT işlemi sonunda elde edilen dizinin 0. elemanı DC seviyesini verirken 1. elemanı ise 5 Hz'lik frekans bileşeninin karmaşık değerini vermektedir.

Bu çalışmada kullanılan 10 kps örnekleme oranı spektral sızıntıyı (spectral leakage) en aza indirgeyecek şekilde yeterli bir örnekleme oranıdır. Güç sinyali analizi için genel olarak 50. harmoniğe kadar yapılan ölçümler yeterli olsa da sinyal analizinin

doğru sonuçlanabilmesi için örnekleme frekansının mümkün olduğu kadar yüksek seçilmesi ideal bir çözüm olarak ele alınabilir. Aşağı örnekleme yöntemi (down sampling) ile toplanan sinyal verisi boyutu indirgenerek analize devam edilebilir. Literatürde spektral sızıntıyı azaltmak için farklı çözümler ele alınmıştır. Fakat spektral sızıntı etkisinin üstesinden gelebilmek için örnekleme frekansının, şebeke sinyali temel frekansı ile eşzamanlı olarak üretilmesi gerekmektedir [59]. Bu işlem için veri toplama cihazına bir faz kilitlemeli döngü devresi eklenebilir [54]. Fakat konum temelli bir güç sinyali izlenmesine ihtiyaç duyuluyorsa, örnekleme frekansının GPS (Global Positioning System) ile eşzamanlanmış bir şekilde üretilmesi gerekmektedir.

Gerçek zamanlı harmonik belirleme yazılımına eklenen diğer bir özellik de yakalanan sinyallerinin kaydedilmesidir. Yazılım, istendiği takdirde 8 kanalın cihazdan gelen 16 bitlik ham ADC verisini de kaydedebilmektedir. Bu ham veri daha sonradan MATLAB gibi yazılımlarla ile kullanılabilir.

### **4.3. PARALEL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE HARMONİK BELİRLEME**

Çalışmanı bu bölümünde geçek zamanlı harmonik belirleme işlemi için kullanılabilir paralel hesaplama yöntemleri de ele alınmıştır. Bu amaçla CPU için FFTW kütüphanesinin çoklu FFT planı; GPU için ise CUDA kütüphanesi kullanılmıştır.

CUDA (Compute Unified Device Architecture) çerçevesi, nVidia firması tarafından üretilen grafik işlemciler üzerinde yüksek performanslı hesaplama işlemlerinin gerçekleştirilebilmesini sağlayan ve yine bu firma tarafından sunulan kütüphanedir. Bu kütüphane sayesinde grafik kartının işlemcisi yardımcı bir işlemci modunda kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında CUDA 7.5 kütüphanesi ile gelen CuFFT kütüphanesi gelmiştir.

Grafik işlemci ile harmonik belirleme işleminde ilk olarak 4 kanallı ve 100 kpsps örnekleme hızı ile çalışılmıştır. Bu deneysel çalışmada FFT işlemi 4 kanal için ayrı ayrı hesaplanıyordu. Hesaplama sonuçlarına ilişkin sonuç değerleri Çizelge 4.2'de

verilmiştir. Çizelgedeki değerlere göre ortalama işlem zamanı CPU tarafında çalışan FFTW kütüphanesi ile daha iyi sonuç vermektedir. Her iki işlem de 20 ms'nin altında tamamlanmaktadır. CuFFT kütüphanesi kullanılırken sistem işlemcisinin yükü de azalacağından GPU ile FFT işlemi FFTW yerine kullanılabilir.

Çizelge 4.2. 4 kanal 100 kps örneklem hızı ile sinyal işleme süreleri.

Hesaplama süreleri ( $\mu$ s)	Kütüphane	
	FFTW	CuFFT
Maksimum	3631.09	14993.6
Minimum	435.567	303.378
Ortalama	491.678	1014.48

Bu çalışmanın ilk aşamasında her bir kanal için 100 kps örnekleme hızında 10 periyotluk 20 000 noktalı FFT işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonunda, ortalama işlem zamanları dikkate alındığında FFTW kütüphanesi 491,678  $\mu$ s'lik işlem süresi ile daha iyi sonuç vermiştir.

Daha sonra veri yakalama cihazının örnekleme hızı 40 kps'e düşürülmüş ve kanal sayısı 8'e çıkarılmıştır. Buna ek olarak, her bir kanalın FFT işleminin bağımsız gerçekleştirilmesi yerine FFTW ve CuFFT kütüphanelerinin çoklu FFT özelliğinden faydalanılarak bütün kanalların FFT işlemi tek bir basamakta tamamlanmıştır.

40 kps hızında her bir kanalın 10 periyotluk FFT işlemi için 8000 nokta kullanılmaktadır. Çoklu FFT işlemi CuFFT kütüphanesinde FFT planı oluşturmak için kullanılan **cufftPlan1d(&plan, window\_size, CUFFT\_C2C, howMany)** fonksiyonunda *howMany* parametresi değeri 8; *window\_size* değeri 8000 yapılarak gerçekleştirilmiştir. Girdi sinyal değerlerinin tamamı bir diziye atılmış olup FFT sonucu dizi içinden her bir kanalın başlangıç indis değerleri ile ayrıştırılmaktadır. FFTW kütüphanesi ile çoklu FFT işleminin gerçekleştirilebilmesi için **fftw\_plan\_many\_dft()** fonksiyonu ile plan oluşturulmuş ve **cuFFTPlan1d** fonksiyonu ile aynı parametre değerleri kullanılarak çoklu FFT işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ayarlamalarda tek kanal ve 8 kanal için gerçekleştirilmiş performans ölçüm değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Tek ve 8 kanallı çoklu FFT işlemlerinin performans ölçüm değerleri.

Hesaplama süreleri ( $\mu$ s)	Tek kanal planı		Çoklu kanal modu	
	FFTW	CuFFT	FFTW	CuFFT
Maksimum	578	3056	1796	2416
Minimum	241	308	985	834
Ortalama	266	505	1098	1004

Çizelge 4.3'te verilen ortalama işlem zamanlarına bakıldığında, tek kanal çalışma düzeninde CuFFT kütüphanesinin FFTW kütüphanesinin gerisinde kaldığı gözlemlenmektedir. Fakat 8 kanal çalışma düzeninde CuFFT kütüphanesinin düşük bir farkla (94  $\mu$ s) daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu durumda hem işlemci yükünü azaltması hem de ortalama işlem süresinin yakın olması bakımından GPU ile gerçekleştirilen CuFFT kütüphanesinin tercih edilebileceği görülmektedir.

## BÖLÜM 5

### GÜÇ KALİTESİ SINIFLANDIRMA

Enerji dağıtım şebekelerinde gerçekleşen sıradan yük ve devre anahtarlama, güç elektroniği ekipmanlarının ve doğrusal olmayan yüklerin artışı, yenilenebilir enerji kaynağı santrallerinin dağıtık olarak şebekeye katılması gibi nedenlerden dolayı şebeke geriliminin sinyalinde bozulmalar oluşmaktadır [60]. Şebeke sinyalindeki bozulmalar güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüzde hassas elektronik aygıtların kullanımının artmasıyla beraber elektrik güç kalitesi konusu da önem kazanmıştır. Güç kalitesinin iyileştirilmesi, güç sinyalinin izlenmesi ve kaliteyi bozan etkenlerin tespit edilmesiyle gerçekleştirilebilir. Güç kalitesini bozan etkenlere ait özelliklerinin çıkarılması (extract) ve bunların otomatik olarak tanımlanması geniş bir sinyal kümesinin analiz edilmesi ile gerçekleştirilebilir. Güç kalitesi bozulmaları konusunda birçok araştırma yapılmış ve otomatik tanımlama sistemleri geliştirilmiştir [42].

Güç kalitesini bozan etkenler gerilim düşmesi (sag, dip), gerilim yükselmesi (swell), kesinti (interruption, outage) osilasyonu geçişler (oscillatory transients) gibi sıralanabilir [42]. Bir güç kalitesi sınıflandırma sistemi, izlenen güç sinyalinin özelliklerini kullanarak söz konusu etkenlerin hızlı olarak belirlenmesi amacı ile kullanılır. Bölüm 1’de, genel olarak bir güç kalitesi sınıflandırma sisteminin işleyişi ele alınmıştı. Güç kalitesi bozulma tipinin belirlenebilmesi için, yakalanan sinyal verisinin ön işleme olmadan geçirilerek özelliklerin çıkartılması ve bu özelliklere göre sınıflandırma işlemi yapılması gerekmektedir. Ön işleme basamağında, literatürde farklı güç sinyali işleme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bunlardan en yaygın kullanılanları Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform), Kısa zamanlı Fourier dönüşümü (Short Time FFT), Dalgacık dönüşümü (Wavelet Transform) ve Stockwell Dönüşümü (S-Transform) gibi yöntemlerdir.

Önişleme aşamasından çeşitli istatistiksel (ortalama değer, standart sapma gibi) yöntemlerle bozulan sinyale ait özellikler hesaplanmaktadır. Daha sonra bu özellikler kullanılarak YSA, Bulanık Mantık (Fuzzy Logic, FL), DVM ve Karar Ağaçları (Classification and Regression Trees, DT) gibi yöntemler kullanılarak güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir [43]. Sınıflandırma doğruluğunu artırmak için bu sınıflandırıcıların beraber kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Bu bölümde, bu tez çalışmasında yapılan sınıflandırma çalışması ile beraber literatürde kullanılan yöntemlerle de ele alınarak karşılaştırma işlemleri yapılmıştır.

Dalgacık dönüşümü güç sinyalinden hem zaman hem de frekans domeninde ayrı ayrı özellikleri çıkarabilmektedir. Bu yönüyle Dalgacık dönüşümü güç kalitesi özelliklerini tespit ve sınıflandırılması için kullanılsa da karmaşık hesaplama, gürültü seviyesi hassasiyeti ve seçilen dalgacığa göre doğruluk değerinin değişmesi gibi dezavantajları vardır. S-dönüşümü, dalgacık dönüşümünü esas alan bir uzantı veya değişken pencere uzunluğuna sahip bir kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve her ikisinin karma ve gelişmiş hali gibi düşünülebilir [39,40]. Son yıllarda S-dönüşümü ile yapay sinir ağları, bulanık mantık ve destek vektör makineleri gibi desen sınıflandırıcılar beraber kullanılarak güç kalitesi olaylarını sınıflandırmak için kullanılmıştır. Eğitim gerektiren bu sistemlerin tamamında eğitim örnekleri uygun değilse sınıflama doğruluğu düşmektedir. Bu yöntemlere alternatif olarak kural tabanlı karar ağaçları da kullanılmıştır [3,42].

## **5.1. GÜÇ KALİTESİ BOZULMA TÜRLERİNİN SINIFLANDIRILMASI**

Güç kalitesi bozulmalarının tanımlanabilmesi için geliştirilen algoritmaların eğitiminde kullanılan sinyallerin temsil yeteneklerinin yüksek olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında üzerinde çalışılan bozulma çeşitlerine ait sinyallerin modellenmesi amacıyla literatürde [60-62] kullanılan yöntemlerden faydalanılmıştır. Bu yöntemlerde çeşitli sinyallerin modellenmesi için kullanılan matematiksel ifadeler aynı olsa da çalışma akışına göre parametreler değişebilmektedir. Örneğin 10 periyot kullanılarak yapılan bir gerilim düşümü tanımlama çalışmasında [61] en fazla 9 periyotluk gerilim düşümü üretilebilirken; 5 periyot kullanılan bir çalışmada en

fazla 4 periyotluk gerilim düşümü üretilmektedir [63]. Bu sınırlamalar, eğitim için modellenen bozulan türlerine ilişkin standart tanımlamalarından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada güç kalitesi bozulma çeşitlerini temsil eden sinyallerin temel (taban) frekansı 50 Hz'dir. Bu frekans, üzerinde çalışılan şebeke çeşidine göre değiştirilebilir. Güç sinyaline ait bozulmanın sınıflandırılması için ise 5 periyotluk pencere uzunluğu seçilmiştir. Sinyallerin üretilirken kullanılan örnekleme frekansı 10 KHz'dir. Bu örnekleme oranı ile frekansı 5 KHz'e kadar olan sinyaller tespit edilebilse de hesaplama yükünü hafifletmek için S-dönüşümünde 1,6 KHz'e olan sinyal bileşenleri üzerinde çalışılmıştır. Farklı durumlara ait sinyal değişimlerini temsil edebilmek amacı ile bozulma çeşidine ilişkin matematiksel ifadelerin tekil parametreleri izin verilen sınır aralığında rastgele değiştirilmektedir. Bu parametrelere örnek olarak genlik, bozulma başlangıç anı, bozulma süresi verilebilir [61]. Saf sinüs şeklinde güç sinyalini üretebilmek için Eşitlik 5.1 kullanılmaktadır.

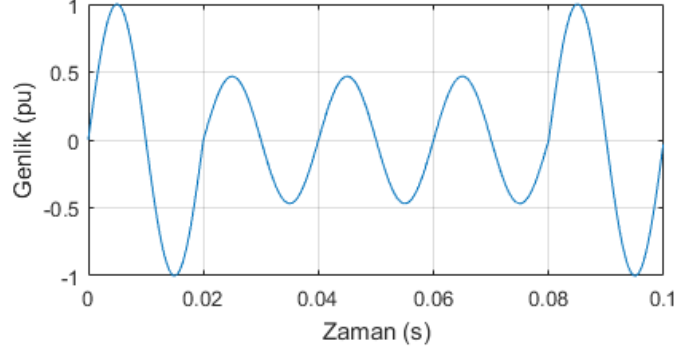
$$y(t) = A \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

Gerilim düşümünün modellenmesi: Genel olarak gerilim düşümü ve yükselişleri yük geçişlerinde, motor başlangıçlarında ya da şebeke problemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu gibi durumlar ekipmanların durmasına ya da hassas yüklerin yanlış çalışmasına neden olabilmektedir. Gerilim düşümünün matematiksel modeli Eşitlik 5.2 ile verilebilir.

$$y(t) = A[1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega t) \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.2'de  $\alpha$ , gerilim düşümünün genliği olup  $0.1 < \alpha < 0.9$  olmalıdır. Gerilim düşümünün süresi  $t_2 - t_1$  ifadesi ile belirlenmektedir.  $T < t_2 - t_1 < 5T$  ifadesi gerilim düşümü süresinin sınır şartlarıdır.  $T = 2\pi/\omega = 20$  ms dir.  $t_1$  gerilim düşümünün başlangıç anı,  $t_2$  gerilim düşümünün sona erdiği belirtmektedir. Gerilim düşümü bitişi, değerlendirmeye alınacak periyot sayısına göre değişebilir. Gerilim düşümünün tanımında, yarım periyottan itibaren ifadesi geçtiğinden 5 periyodun değerlendirmeye alındığı bir sınıflandırma işleminde  $9T$ ; 5 periyodun değerlendirmeye alındığı bir işlemde  $4T$  seçilebilir. Eşitlik 5.2'de  $u(t)$ , *birim adım*

fonksiyonudur.  $A = 1$ ,  $\alpha = 0,5318$ ,  $t_1 = 0,02$ ,  $t_2 = 0,05$  ve örnekleme frekansı 10 KHz olarak belirlendiğinde Şekil 5.1'deki 5 periyot içinde gerilim düşümüne ait dalga şekli oluşmaktadır.

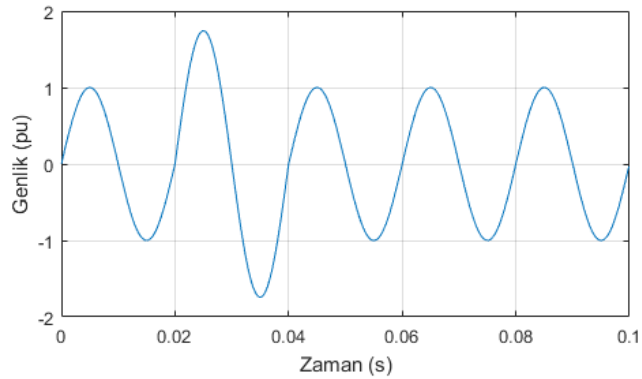


Şekil 5.1. Gerilim düşümüne ait dalga şekli.

Gerilim yükselişin modellenmesi: Bu duruma ilişkin matematiksel model Eşitlik 5.3'te belirtilmiştir:

$$y(t) = A[1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega t) \quad (5.3)$$

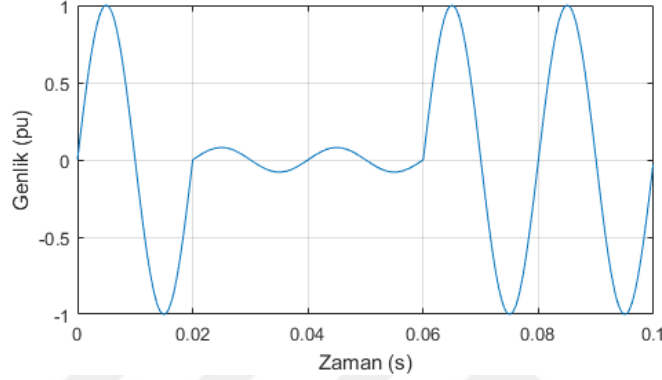
Bu modelin gerilim düşümü modelinden tek farkı katsayı ( $\alpha$ ) işaretinin pozitif olmasıdır.  $A = 1$ ,  $\alpha = 0,7418$ ,  $t_1 = 0,02$ ,  $t_2 = 0,04$  ve örnekleme frekansı 10 KHz olarak belirlendiğinde Şekil 5.3'teki 5 periyot içinde gerilim yükselişine ait dalga şekli oluşmaktadır



Şekil 5.2. Gerilim yükselişine ait dalga şekli.

Gerilim kesintisinin modellenmesi: Gerilim kesintisi hat üzerindeki gerilimin 0.1 p.u.'nun altına düştüğü durumdur. Gerilim kesintileri hat kopması ya da aşırı

yüklemeye gibi durumlarda gerçekleşmektedir. Gerilim kesintisine ilişkin matematiksel model, gerilim düşümü ile aynıdır. Gerilim düşüş katsayısı  $\alpha$ ,  $0.9 < \alpha < 1$  aralığında değer almaktadır.  $A = 1$ ,  $\alpha = 0,9205$ ,  $t_1 = 0,02$ ,  $t_2 = 0,06$  ve örnekleme frekansı 10 KHz olarak belirlendiğinde Şekil 5.3'deki 5 periyot içinde gerilim kesintisine ait dalga şekli oluşmaktadır.

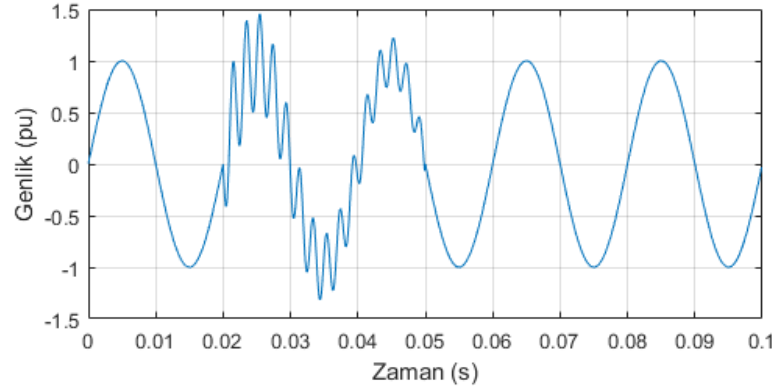


Şekil 5.3. Gerilim kesintisine ait dalga şekli.

Osilasyonlu geçişin modellenmesi: Osilasyonlu geçişler hat, yük veya kondansatör gruplarının devreden çıkarılması gibi anlarda gerçekleşmektedir. Osilasyonlu geçişler hassas güç elektroniği ekipmanlarında kalıcı hasarlara yol açabilmektedir. Osilasyonlu geçişe ait matematiksel model Eşitlik 5.4'te verilmiştir.

$$y(t) = A[\sin(\omega t) + \alpha e^{\frac{t-t_1}{\tau}} (\sin(\omega_n(t-t_1)))(u(t-t_2) - u(t-t_1))] \quad (5.4)$$

Osilasyonlu geçiş modelinde  $\alpha$  osilasyon sönüm katsayısı olup  $0.1 < \alpha < 0.9$  aralığında değer almaktadır.  $f_n$  osilasyon frekans katsayısı olup  $300 \text{ Hz} < n < 900 \text{ Hz}$  aralığında değer almaktadır. Osilasyon süresi  $t_2 - t_1$  ifadesi ile belirlenmektedir. Bu ifade içinde  $t_1$  osilasyon başlangıç zamanını,  $T < t_2 - t_1 < 2T$  ifadesi osilasyon süresinin sınır şartlarıdır.  $A = 1$ ,  $\alpha = 0,5742$ ,  $t_1 = 0,02$ ,  $t_2 = 0,05$ ,  $f_n = 504,55 \text{ Hz}$  ve örnekleme frekansı 10 KHz olarak belirlendiğinde Şekil 5.5'teki 5 periyot içinde osilasyonlu geçişe ait dalga şekli oluşmaktadır.



Şekil 5.4. Osilasyonlu geçişe ait dalga şekli.

Çizelge 5.1’de güç sistemlerinde karşılaşılan genel güç kalitesi bozulmalarına ilişkin sinyal modelleri verilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan sınıflandırma algoritmalarının eğitimi ve testi için kullanılan sinyal modelleri MATLAB ortamında simüle edilmiştir. Üretilen yapay sinyallerin temsil yeteneğini artırmak ve eğitime yeteri kadar farklı örnek sağlayabilmek için her bozulma çeşidinden 50’şer adet örnek üretilmiştir.

Çizelge 5.1. Güç kalitesi bozukluklarına ilişkin sinyal modelleri.

Bozulma Tipi	Matematiksel Modeli	Parametreler
Saf Sinüs	$y(t) = A\sin(\omega t)$	$A = 1$ (p. u.) $\omega = 2\pi \cdot 50$ rad/sec
Gerilim Düşümü (Sag, Dip)	$y(t) = A[1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))]\sin(\omega t)$	$0.1 < \alpha < 0.9,$ $T < t_2 - t_1 < 8T$
Gerilim Yükselişi (Swell)	$y(t) = A[1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))]\sin(\omega t)$	
Kesinti (Interruption, Outage)	$y(t) = A[1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))]\sin(\omega t)$	$0.9 < \alpha < 1,$ $T < t_2 - t_1 < 8T$
Harmonikli (Harmonics)	$y(t) = \alpha_1\sin(\omega t) + \alpha_3\sin(3\omega t) + \alpha_5\sin(5\omega t) + \alpha_7\sin(7\omega t)$	$0.05 < \alpha_3 < 0.15$ $0.05 < \alpha_5 < 0.15$ $0.05 < \alpha_7 < 0.15$ $\sum \alpha_i^2 = 1$
Flicker (Kırpışma)	$y(t) = [1 + \alpha \sin(2\pi\beta t)]\sin(\omega t)$	$0.1 < \alpha < 0.2,$ $5\text{Hz} < \beta < 20\text{Hz}$

Çizelge 5.1. (Devam ediyor).

Osilasyonlu Geçiş (Oscillatory Transient)	$y(t) = A[\sin(\omega t) + ae^{-\frac{(t-t_1)}{\tau}} \sin \omega_n(t-t_1) - u(t-t_2) + u(t-t_1)]$	$0.9 < \alpha < 1,$ $0.5T < t_2 - t_1 < 3T,$
Harmonikli Gerilim Düşüşü (Sag with harmonics)	$y(t) = [\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t)][1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))]$	$0.1 < \alpha < 0.9,$ $T < t_2 - t_1 < 8T$ $0.05 < \alpha_3 < 0.15$
Harmonikli Gerilim Yükselişi (Swell with harmonics)	$y(t) = [\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t)][1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))]$	$0.05 < \alpha_5 < 0.15$ $0.05 < \alpha_7 < 0.15$ $\sum \alpha_i^2 = 1$
Gerilim Çentikleşmesi (Notching)	$v(t) = \begin{cases} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + 0.5p \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right), & k = 1 \\ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) - 0.5p \cos(\omega t), & k = 5 \\ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) - p \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right), & k = 9 \\ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right), & \text{diğer durumlar} \end{cases}$	$\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/sec}$ $p = 0.5$ $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, \mu < \alpha$ $\mu = \frac{365000 \times 2\pi / 20000}{460px \sin(\alpha)}$ $k \in \left[0, \frac{3\pi}{2}\right]$

Bu çalışmada sekiz adet basit ve iki adet kombine karakteristiğe sahip güç kalitesi bozulma türü sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Basit olarak ele alınan güç kalitesi bozulma türleri Normal, Gerilim düşmesi, Gerilim yükselmesi, Kesinti, Harmonikli gerilim, Osilasyonlu geçiş, Kırılma ve Gerilim çentikleşmesidir. Kombine bozulma türleri ise Gerilim yükselmesi ve harmonik ile Gerilim düşümü ve harmonik durumlarıdır. Sınıflandırma işlemi için seçilen bozulma türleri ve sınıf etiketleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Bu çalışma kapsamında ele alınan güç kalitesi bozulma türleri.

Bozulma Türü	Sınıf Etiketi
Normal	C1
Gerilim Düşmesi (Voltage Sag, Dip)	C2
Gerilim Yükselmesi (Swell)	C3
Kesinti (Interruption, Outage)	C4
Harmonikli Gerilim	C5

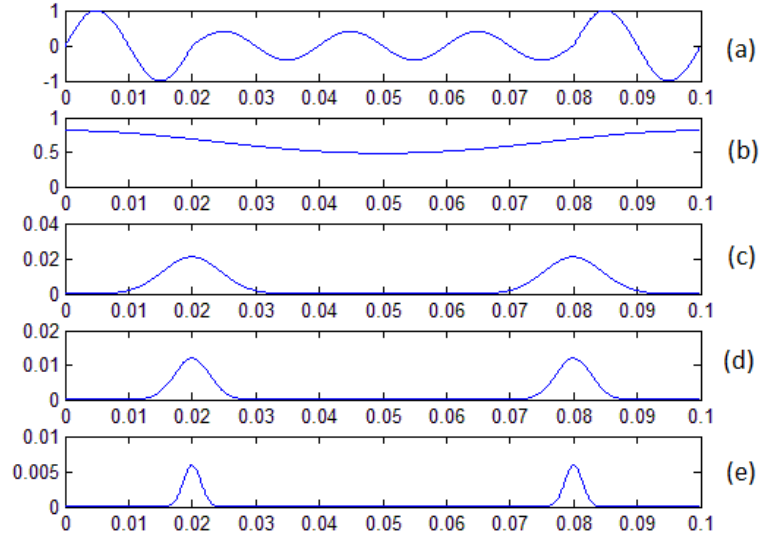
Çizelge 5.2. (Devam ediyor).

Osilasyonlu Geçiş (Oscillatory Transient)	C6
Kırpışma (Flicker)	C7
Gerilim Düşmesi ve Harmonik	C8
Gerilim Yükselmesi ve Harmonik	C9
Çentikleşme (Notching)	C10

## 5.2. GÜÇ KALİTESİ BOZULMA TÜRLERİNİN S-DÖNÜŞÜMÜ İLE ANALİZ EDİLMESİ

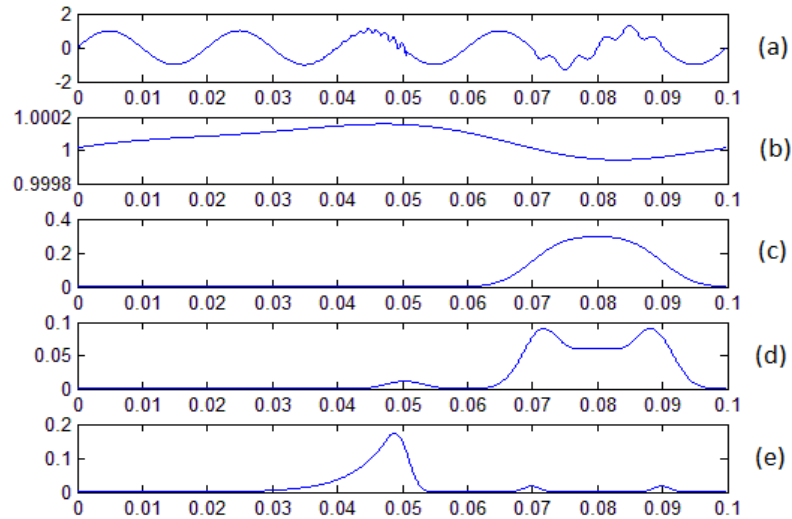
S-dönüşümü eşyükselti eğrilerinin (contours) gözlemlenmesi ile güç sinyalindeki bozulma türünün tespit edilmesini kolaylaştıran karakteristikler elde edilebilmektedir. Farklı bozulma türleri içeren sinyallere ilişkin S-dönüşümü eşyükselti grafiklerinde de bu bozulmalara ait karakteristikler gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle eşyükselti hatları (eğrileri), bozulma türlerine ilişkin özelliklerin çıkarılabilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi S-dönüşümü sinyaldeki bozulmalara hat değişimleri ile cevap vermektedir.

Şekil 5.5’da gerilim düşümüne ilişkin sinyal grafikleri verilmiştir. 50 Hz ile ilişkili eğrinin (b) gerilim düşümü sürecinde azaldığı görülmektedir. Bu eğri gerilim kesintilerinde daha da derinleşmektedir. Şekil 5.6 (c)-(d) grafikleri sırasıyla 150 Hz, 250 Hz ve 700 Hz’lik bileşenlere ait hatları göstermektedir. Bu bileşenler gerilim düşümünün başında ve sonunda küçük bir enerji varlığı göstermektedir. Bu enerji varlığı gerçekleşen olayın tespit edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.5. Gerilim düşümünün S-dönüşüm eğrileri ile incelenmesi. a) Gerilim düşmesi, b) 50 Hz eğrisi, c) 150 Hz eğrisi, d) 250 Hz eğrisi ve e) 700 Hz eğrisi.

Şekil 5.6'da geçici osilasyon ve 5. Harmonik içeren bir güç sinyaline (a) ve sırasıyla 50 Hz, 250 Hz, 350 Hz ve 700 Hz eğrilerinin (b)-(e) grafik verilmiştir. (c)'de harmonik içeren sinyal kesiti ile (e)'de osilasyonlu geçiş kesiti için yüksek enerji gözlemlenmektedir.



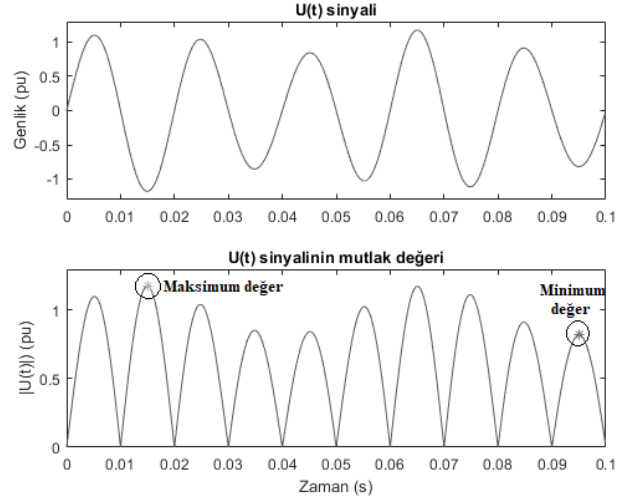
Şekil 5.6. Osilasyonlu geçiş ve harmonikli sinyalin S-dönüşümü eğrileri ile incelenmesi. a) Osilasyonlu geçiş ve 3. Harmonik içeren güç sinyali, b) 50 Hz eğrisi, c) 150 Hz eğrisi, d) 250 Hz eğrisi ve e) 700 Hz Eğrisi.

Farklı bozulma türlerine ilişkin karakteristikler S-dönüşümü ile elde edilen eğrilerin sağlamış olduğu avantajlar ile elde edilebilmektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilen örneklerle farklı seviyelerdeki harmonikler ya da değişik tipteki osilasyonlu geçiş gibi bozulma tiplerini de içine alan çeşitli güç kalitesi bozulmalarının tespit edilebilmesi için yol göstermektedir. Güç sinyali analizi ile çıkarılan özelliklerin tekil ve belirgin olması, sınıflandırma basamağını kolaylaştırması açısından önemlidir.

### **5.2.1. Güç Kalitesi Bozulma Türlerine İlişkin Özelliklerin Belirlenmesi**

Bir sınıflandırma uygulamasında özellik seçimi sınıflandırıcının başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, sinyaldeki değişimleri en iyi temsil eden özelliklerin tespit edilmesi gerekir. Özellik tespiti için genelleştirilmiş bir yol olmamakla beraber uygulamadan uygulamaya değişen bir çalışma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan özellikler Rodríguez ve Abdel-Galil'in çalışmalarında kullandığı özellikler temel alınarak belirlenmiştir [43,44,63,64]. Bu çalışmalarda kullanılan özellikler hesaplanması kolay ve gerçek zaman çalışmasına uygun olduğu için tercih edilmiştir.

S-dönüşüm genlik matrisi (STA) grafiği incelendiğinde, 50 Hz'lik eğrinin ortalaması gerilim düşmesi, yükselmesi ve kesinti hakkında önemli bir özellik değeri taşımaktadır. Bu nedenle 50 Hz'lik eğrinin ortalama değeri (X1) ayırt edici özellik olarak seçilmiştir [64,65]. Rodríguez vd. tarafından yapılan bir çalışmada gerilim düşmesi ile kesintinin ayırt edilebilmesi için 50 Hz'lik eğrinin minimum değerinin kullanılması önerilmiştir [64]. Buna karşın, söz konusu çalışmanın deneysel sonuçları incelendiğinde, PSCAD ile üretilen güç sinyalleri sınıflandırılırken gerilim düşmesi ve kesinti durumlarının birbirine karıştığı gözlemlenmiştir. Buna neden olarak gerilim düşmesi ile kesinti arasındaki %10'luk değer sınırının S-dönüşümü içinde yapılan filtreleme işlemi sebebiyle kayması gösterilebilir. Bu sorunun aşılabilmesi amacıyla, bu çalışmada zaman domeninde yakalanmış olan sinyalin minimum (X2) değerinin yanında maksimum (X3) tepe de özellik desenine eklenmiştir. X2 ve X3 özellikleri için maksimum ve minimum tepe değerleri Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. X2 ve X3 özelliklerinin sinyal üzerinde belirlenmesi. a) 5 periyotluk kırpışma sinyali, b) kırpışma sinyalinin maksimum ve minimum tepe değerleri.

Yine Rodríguez vd. tarafından yapılan çalışmada 3., 5. ve 7. harmonikleri içeren bozulma tiplerinin tespit edilebilmesi için bu harmoniklerin (150 Hz, 250 Hz ve 350 Hz) enerji değerleri ayırt edici özellik olarak kullanılmıştır [64]. Bu çalışmada ise gömülü sistem çalışması da dikkate alınarak enerjiler yerine bu eğrilerin ortalama değerleri kullanılmıştır.

600 Hz'den Nyquist frekansına kadar olan frekans bileşenlerinin enerji toplamları başka bir özellik olarak seçilmiştir. Bu özelliğin aldığı yüksek değerler sinyal içindeki yüksek frekanslı geçişlerle (transients) ilgili bilgi vermektedir. Bu yaklaşım Nyquist koşulu sınırları içinde diğer harmoniklere genişletilebilir. Bir önceki basamaktaki gibi bu özellik için de ortalama değer özellik olarak seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ayırt edici özellikler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. S-Dönüşümü sonrasında elde edilen ayırt edici özellikler.

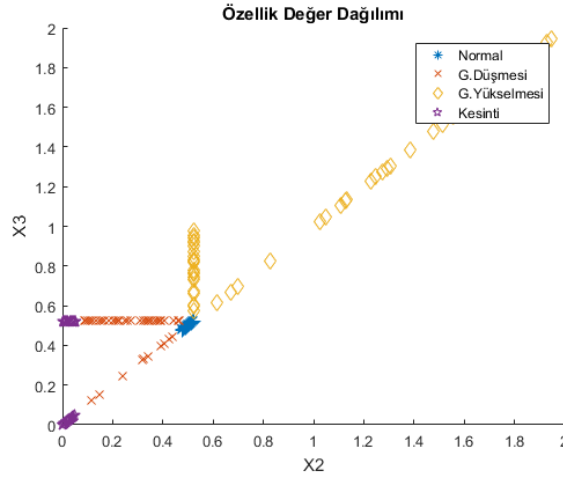
Özellik	Anlamı
X1	Temel frekans bileşenine ait eğrinin ortalama değeri
X2	Temel frekans bileşenine ait eğrinin minimum değeri
X3	Temel frekans bileşenine ait eğrinin maksimum değeri
X4	3. harmoniğe ait ortalama değer (150 Hz)

Çizelge 5.3. (Devam ediyor).

X5	5. harmoniğe ait ortalama değer (250 Hz)
X6	7. Harmoniğe ait ortalama değer (350 Hz)
X7	600 Hz'den 1600 Hz'e kadar eğri ortalamaları toplamı

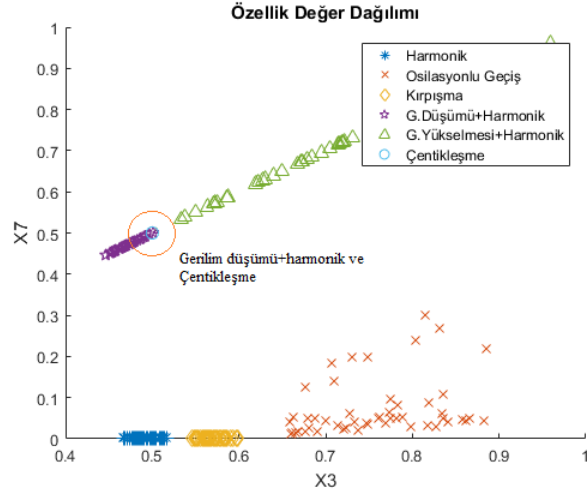
### 5.2.2. Seçilen Özelliklerin Ayırt Edici Özelliklerinin İncelenmesi

Bu bölümde, seçilen özelliklerin güç kalitesi bozulma tiplerini nasıl ayırdığı açıklanmaktadır. Bu amaçla, seçimi yapılmış olan 10 farklı durum için rastgele parametrelerle üretilmiş olan 500 adet bozulma türünün ayırt edilişi dağılım grafikleri (scatter plot) ile gösterilmiştir (Şekil 5.8). Şekilde X2 ve X3 özelliklerinin Normal, Gerilim Düşümü, Gerilim Yükselmesi ve Kesilme olaylarını nasıl iyi bir şekilde ayırdığını görüntülenmiştir.



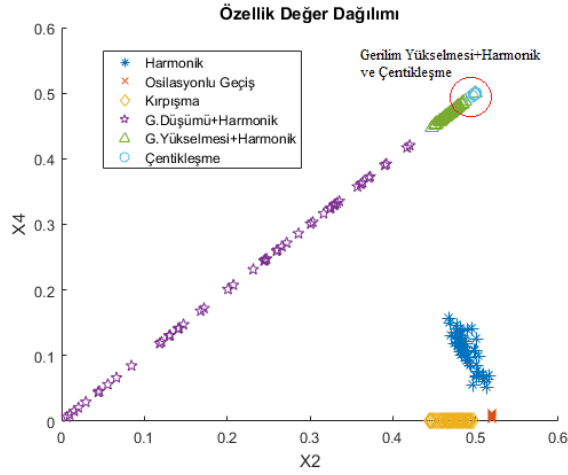
Şekil 5.8. X2 ve X3 özelliklerinin dört farklı olayı ayırt edilişi.

Şekil 5.9'da Harmonikli durum, Osilasyonlu geçiş, Kırpışma, Gerilim düşümü ve Harmonik, Gerilim Yükselmesi ve harmonik ve çentiklenme durumlarının ayırt edilişi gösterilmiştir. Şekil 5.9'da kullanılan iki özellik (X3 ve X7) için Gerilim düşümü ve harmonik ile çentikleşme durumlarının üst üste geldiği durumlar (overlap) da görüntülenmiştir. Bu durum, iki sınıf arasındaki ayırımın hatalı olarak gerçekleşebileceğini göstermektedir.



Şekil 5.9. X3 ve X7 ile 6 farklı bozulma türünün ayırt edilişi.

Bu çalışmada sınıflandırıcı olarak seçilen YSA, söz konusu karışıklığı X2 ve X4 özelliklerinin katkısıyla çözümlenmektedir (Şekil 5.10). Şekil 5.10’da ise Gerilim yükselmesi ve harmonik ile çentikleşmenin üst üste bindiği durumlar da görülmektedir.

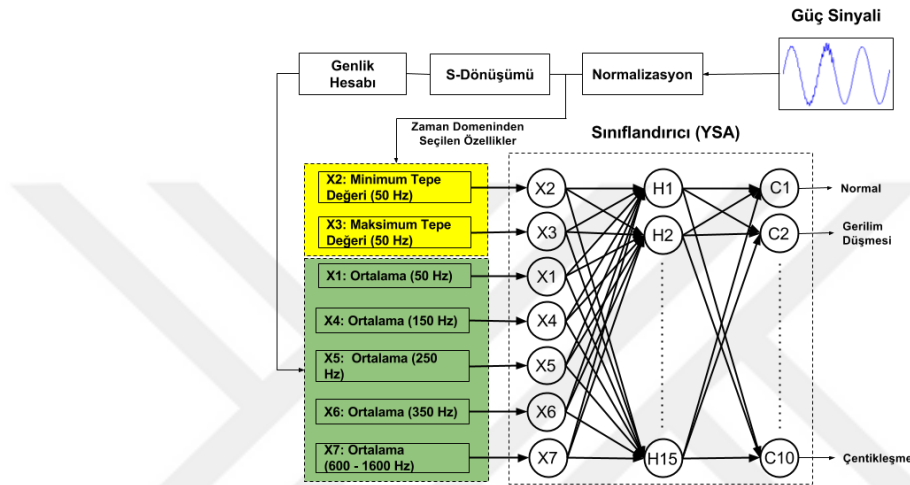


Şekil 5.10. X2 ve X4 özellikleri ile bozulma durumlarının ayırt edilişi.

### 5.3. YAPAY SİNİR AĞI İLE SINIFLANDIRMA İŞLEMLERİ

Yapay sinir ağı ile eğitim ve sınıflandırma uygulaması ilk olarak MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ileri beslemeli yapay sinir ağı, giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. Giriş

katmanındaki düğüm sayısı  $n$  olmak üzere gizli katmandaki düğüm sayısı  $2n+1$  ifadesi ile hesaplanmaktadır [64]. Özellik sayısı 7 olduğundan gizli katmandaki düğüm sayısı 15 olarak belirlenmiştir. Ele alınan bozulma türü sayısı 10 olduğundan çıkış katmanında da 10 adet düğüm belirlenmiştir. Şekil 5.11’de yapay sinir ağı kullanılarak gerçekleştirilen otomatik güç kalitesi sınıflandırıcının çalışmasına ilişkin blok diyagram verilmiştir [62,66].

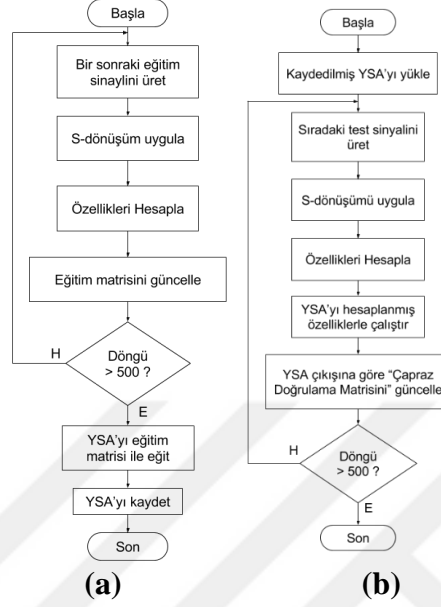


Şekil 5.11. S-dönüşümü ve ileri beslemeli YSA ile güç kalitesi sınıflandırma.

Gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki transfer fonksiyonu olarak *tansig* fonksiyonu kullanılmıştır. Gizli katman ve çıkış katmanı arasındaki transfer fonksiyonu ise *lineal* olarak seçilmiştir. Yapay sinir ağı geri yayılım öğrenme algoritması olarak *traingd* algoritması kullanılmıştır. *Learning rate* (öğrenme oranı) 0,07 ve *epoch* (öğrenme adım sayısı) ise 100 000 olarak belirlenmiştir.

MATLAB ortamında rastgele parametrelerle üretilen 500 adet (her bozulma türü için 50 adet) sinyalin S-dönüşümü alınmış ve elde edilen 7 özellik içeren eğitim matrisi (500x7 boyutlarında eğitim kümesi) yapay sinir ağına girdi olarak uygulanmıştır. Bu şekilde eğitim işlemi tamamlanmış ve YSA kaydedilmiştir (Şekil 5.12 (a)). Kaydedilmiş olan YSA'nın test edilmesi için yine aynı yolla 500 adet sinyal üretilmiş ve üretilen sinyal özellikleri daha önceden eğitilmiş olan YSA'ya uygulanmıştır. Her bozulma türü için elde edilen doğrulama sonucu ile çapraz doğrulama matrisinin ilgili hücresi güncellenmiştir (Şekil 5.12 (b)). Doğrulama

döngüsü tamamlandığında, sınıflandırma doğruluğu çapraz doğrulama matrisi kullanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.12. YSA eğitimi ve doğrulanmasına ilişkin akış diyagramları. a) eğitimi aşaması, b) doğrulama aşaması.

Sentetik sinyaller kullanılan bu uygulama sonucunda %98,4 oranında sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Sınıflandırma doğruluğu bu kadar yüksek olan YSA'nın gerçek sinyallerle (daha önceden yakalanmış ve kaydedilmiş bozulmalara ait sinyaller) yapılan deneme sonucunda başarısız olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin gerçek şebeke sinyali bir miktar harmonik içerebilmektedir. Bu sinyal sınıflandırma işlemine tabi tutulduğunda Harmonikli gerilim olarak sınıflandırılmıştır. Bu nedenle test için üretilen sinyallere Çizelge 5.4'te genlikleri verilmiş olan harmonikler eklenerek tekrar değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.4. YSA eğitimi için kullanılan sinyallere eklenen harmonik genlikleri.

Harmonik Frekansı	Genlik Değeri
150 Hz	0,056379
250 Hz	0,06528
350 Hz	0,014343
450 Hz	0,008286

Bu harmonikler, gerçek gerilim sinyalinde tespit edilmiş olan harmoniklerdir. Sınıflandırma sonucunda elde edilen doğrulama oranı %80 olup bu sonuç gerçek sinyalde var olan harmoniklerin diğer bozulma türlerinin sınıflandırma sonuçlarını da etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle YSA eğitimi harmonik enjekte edilmiş sinyal özellikleri ile yeniden yapılmıştır. 100 000 tekrar ile yapılan eğitimde elde edilen MSE (mean square error) değeri 0,0293'tür. Eğitilen YSA ile tekrar doğrulama işlemi yapılmış ve %94,7'lik bir doğrulama oranı elde edilmiştir. Bu test işlemi için elde edilen çapraz doğrulama matrisi Çizelge 5.5'te verilmiştir. Çizelge 5.4'te üretilen sinyallere göre çapraz doğrulama matrisi verilmiştir. Bu matriste köşegen elemanları doğru yapılmış olan sınıflandırma işlemlerini göstermektedir. Diğer elemanlar ise hatalı yapılmış olan sınıflandırma işlemlerini göstermektedir. Bu çizelgede görüldüğü gibi en kötü durumda gerilim düşümü işlemi 6 kez Kesinti; 5 kez Normal olarak sınıflandırılmıştır. Bu bölümümde ele alınan çalışmalar ile gerçek şebeke sinyaline ait özelliklerin eğitim aşamasında kullanılarak sınıflandırma doğruluğunun artırılabilceğini göstermektedir.

Çizelge 5.5. Test verileri için çapraz doğrulama matrisine ait çizelge.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	5	39	0	6	0	0	0	0	0	0
C3	1	0	43	0	0	3	3	0	0	0
C4	0	3	0	47	0	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0
C7	1	0	0	0	0	0	49	0	0	0
C8	0	0	0	1	6	0	0	43	0	0
C9	0	0	0	0	1	0	0	0	49	0
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Genel doğrulama oranı									<b>94.7%</b>	

Çizelge 5.6'da, güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılmasında S-dönüşümü kullanılan bazı çalışmalara ilişkin bilgiler verilmiştir. Uyar vd. [66] sentetik sinyallerle yapmış oldukları sınıflandırma çalışmasında çok yüksek bir doğruluk oranı elde etmişlerdir. Fakat söz konusu kullanılan çalışmada kullanılan 14 adet özelliğin hesabı gerçek zaman çalışması için zorlayıcı olabilecek sayıdadır. Biswall

ve Dash [67] karar ağacı kullandıkları çalışmada, laboratuvar ortamında kurmuş oldukları düzenekten elde ettikleri gerçek sinyaller ile yine yüksek bir sınıflandırma oranı elde etmişlerdir. Fakat bu çalışmada da üzerinde çalışılan özellik sayısı bir önceki çalışmada olduğu gibi yüksektir. Li ve Chilukuri [68] yapmış oldukları çalışmada DVM ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada ise sınıflandırılan güç kalitesi bozulma türleri diğer çalışmalara göre sınırlı sayıda kalmıştır. Rodríguez vd. [64] yapmış oldukları çalışmada kural tabanlı sınıflandırma işlemi kullanmışlardır. Araştırmacılar, geliştirmiş oldukları yöntemi farklı gürültü seviyesinde üretilmiş sentetik sinyaller ile test etmişlerdir. Yine aynı çalışmada test sonuçlarını YSA ile elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve kural tabanlı metot ile %99,5; YSA ile %98,4'lük bir doğrulama oranı elde etmişlerdir. Buna karşın 20 dB gürültü oranı ile üretilmiş sinyaller kullanıldığında kural tabanlı metot ile %72,7; YSA ile %89'lük bir doğrulama oranı elde etmişlerdir. Bu sonuç ile YSA kullanımının genel olarak diğer sınıflandırma yöntemlerine göre daha uygun olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.6. Farklı sınıflandırma yöntemleri ile S-dönüşümü performansı.

Çalışma	Sınıflandırıcı Tipi	Veri Tipi	Kullanılan Özellik Sayısı	Sınıflandırılan Bozulma Tipi Sayısı	Doğruluk Oranı
Uyar vd. [66]	YSA	Sentetik	14	9	99,67%
Biswall ve Dash [67]	Karar Ağacı	Gerçek	20	13	94,8%
Li ve Chilukuri [68]	DVM ve PSO	Sentetik	5	7	99%
Rodríguez vd. [64]	Kural Tabanlı Metot	Sentetik	6	11	99,5%
Kumar vd. [69]	YSA ve Karar Ağacı	Sentetik	5	13	99,9%
Lee ve Dash [70]	OSA + Kural Tabanlı Metot	Sentetik	3	10	95,33%
Mishra vd. [71]	OSA	Sentetik	4	11	94,7%
Chilukuri ve Dash [72]	Bulanık Model	Sentetik	5	7	99,28%
<b>Yayınlanmış olan yöntem</b>	<b>YSA</b>	<b>Sentetik+Gerçek sinyal Harmonikleri</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>94,7%</b>

Kumar vd. [69] yapmış oldukları çalışmada YSA ile karar ağacını beraber kullanmışlardır. Kombine sınıflandırıcı yapısı kullanılarak yüksek doğruluk oranları elde edilebilse de bu tür çalışmalar gerçek zamanlı çalışma için uygun olmayan ek hesaplamaları işlemlerini de beraberinde getirebilmektedir. Benzer bir şekilde Lee ve

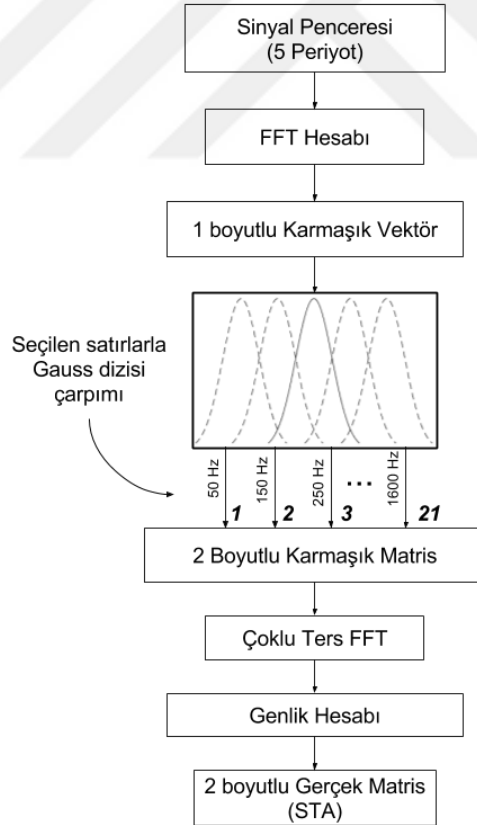
Dash [70] yapmış oldukları çalışmada kombine sınıflandırıcı yapısı kullanmışlar ve sentetik sinyaller ile %95,33'lük bir doğrulama oranı elde etmişlerdir. Mishra vd. [71] yapmış oldukları çalışmada, güç kalitesi bozulma türü sınıflandırma işlemi için olasılıksal yapay sinir ağı (OSA) kullanmışlardır. OSA'nın bu çalışmada kullanılmasının nedenlerini basit olması, adaptif bir yapıya sahip olması ve öğrenme başağının çok hızlı olması olarak sıralamışlardır. Fakat bu çalışmada kullanılan özelliklerin ikisi, STA üzerinde sütun tabanlı hesaplama gerektirdiğinden tam spektrumlu S-dönüşümü hesaplanmasına gereksinim duyulmaktadır. Chilukuri ve Dash [72] yapmış oldukları çalışmada Bulanık Mantık tabanlı sınıflandırma yaklaşımını kullanmışlardır. Bu çalışmada 40 dB SNR seviyesinde üretilen sentetik sinyallerle %99,28'lik bir doğrulama oranı elde etmişlerdir. Buna karşın bu çalışmada ele alınan bozulma türü sayısı çalışma [68]'de olduğu gibi düşüktür. Buna ek olarak Biswall ve Dash de yapmış oldukları başka bir çalışmada bulanık mantık kuralları ile karar ağaçları yapısını beraber kullanarak %98,66 oranında bir sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir [73]. Sınıflandırma konusunda güncel bir çalışma da Ma vd. tarafından yapılmıştır [74]. Araştırmacılar bu çalışmada derin öğrenme yaklaşımı ile beraber PSO yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada, gürültüsüz sinyal ile %99,75'lik bir doğruluk oranı ile literatürdeki en yüksek sınıflandırma doğruluğunu elde ettiklerini bildirmişlerdir. Buna karşın derin öğrenme tekniklerinin kullanıldığı uygulamalarda yüksek performanslı bilgisayar donanımı ihtiyacı göz ardı edilmemelidir. Derin öğrenme yaklaşımı ile sınıflandırma yapan başka bir çalışma Balouji ve Salor tarafından yapılmıştır [75]. Bu çalışmada güç sinyalinin her periyodu için RMS hesaplanmakta ve 150 periyotluk (3 sn) RMS değişimi bir görüntü formatına dönüştürülmektedir. Sınıflandırma işlemi ise yine görüntü formatı ile eğitilmiş derin YSA ile yapılmaktadır. Araştırmacılar bu çalışmada normal, gerilim düşümü, gerilim yükselmesi ve kesinti durumları için %100 sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir.

Çizelge 5.6'da verilen çalışmalar incelendiğinde, sınıflandırma doğruluk oranının, kullanılan yöntemle beraber ele alınan bozulma türü ve özellik sayısı ile de ilişkili olduğunu göstermektedir. Yapılan literatür araştırmasında görüldüğü gibi, güç kalitesi sınıflandırma işlemlerinde YSA'ların kullanımının diğer yöntemlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, gürültü altındaki durumlar

incelendiğinde, YSA'ların iyi modellenmemiş bozulma tiplerinin sınıflandırılmasında daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Bu çalışmada, gerçek sinyal harmoniklerinin kullanımı ile elde edilen doğruluk oranının, gerçek zamanlı bir kalitesi sınıflandırma sisteminde kullanılabileceğini göstermektedir.

#### 5.4. S-DÖNÜŞÜMÜNÜN HIZLANDIRILMASI

Bu çalışmada S-dönüşümünün hızlandırılması amacıyla sadece sınıflandırma deseninde kullanılan özellikler için dönüşüm uygulaması yapılmıştır. Seçilen özellikler sayesinde tam spektrum S-dönüşümü uygulanmasına gerek kalmadığından S-dönüşümü işleminde gömülü sistem üzerinde dahi gerçek zaman çalışması için yeterli performans elde edilmiştir. Bu şekilde 1 adet FFT ve 21 adet ters FFT işlemi ile S-dönüşümü tamamlanmaktadır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Seçilmiş frekanslarla ayrıık S-dönüşümü hesaplanmasına ait akış.

He vd. [65] S-dönüşümü için gereken işlemleri indirgeyebilmek için istenmeyen (ihtiyaç duyulmayan) frekansları *Dynamics (Dyn)* yöntemiyle eleme yoluna gitmişlerdir. Bu yöntem, gürültü içeren bir dizide ekstrem noktaları bulmak için kullanılmaktadır. Söz konusu çalışmada anlamlı olmayan frekans bileşenleri, bu yöntemle yine frekans domeninde elenerek S-dönüşümü için kullanılacak frekans satırları sayısı azaltılmıştır. Başka bir çalışmada *Fast Dyadic Frequency Scaling* adı verilen yöntem kullanılmıştır [76]. Bu yöntemde frekans domeninde öne çıkan harmonikler tespit edilmekte (genliği belli bir eşik değeri geçen) ve harmonik frekanslarına göre S-dönüşümü uygulanmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler, S-dönüşümü öncesinde fazladan işlem yapılmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışmasında, özellik deseninde kullanılan frekans bileşenleri daha önceden belirlenmiş olduğundan S-dönüşümü öncesinde ek işlemlere gerek duyulmamaktadır.

S-dönüşümü hesabında kullanılan Gauss dizisi (penceresi), [65]'de kullanılan yönteme benzer şekilde sınıflandırma yazılımının başlangıcında hesaplandığından, S-dönüşümü hesaplanması için gereken süre daha da azaltılmıştır. S-dönüşümü sırasında kullanılan FFT hesaplamaları, FFTW kütüphanesi ile gerçekleştirilmiştir. FFTW işlemleri çift işlemci çekirdeğine dağıtılacak şekilde planlandığından, çok çekirdekli işlemci teknolojisinin de avantajlarından faydalanılmıştır. Buna ek olarak 21 adet ters FFT işlemi de toplu işlem (batch) modu ile yapıldığından tek bir fonksiyon çağırısı ile gerçekleştirilmektedir.

## 5.5. GÜÇ KALİTESİ SINIFLANDIRMA YAZILIMI

Güç kalitesi sınıflandırma yazılımı (GKS), Bölüm 4'te tanıtılan harmonik belirleme yazılımına ek olarak S-dönüşümü ve YSA özelliklerinin kullanımıyla geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı güç kalitesi sınıflandırma işlemleri üç fazlı gerilim sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle yakalanan sinyalin sadece 3 kanalı kullanılmaktadır.

Sınıflandırma yazılımı, güç sinyalini 5 periyot halinde işlemektedir. Kullanılan örnekleme oranı 10 ksps olup hem kişisel bilgisayar hem de tek kart bilgisayar çalışmasında aynı örnekleme oranı kullanılmıştır. Ayrık S-dönüşümü, bir önceki

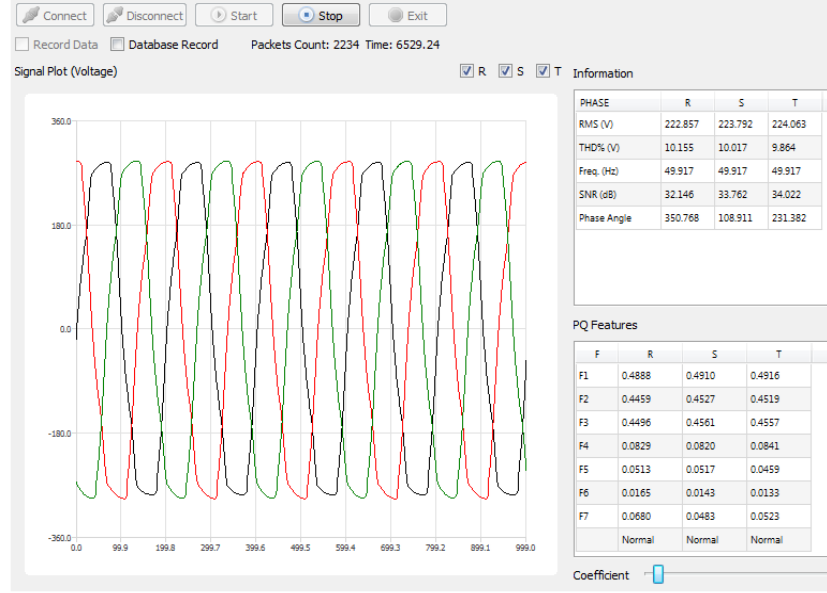
bölümde açıklandığı gibi sınıflandırma yazılımına eklenmiştir. YSA çalışmasında ise Bölüm 5.3'te eğitimi yapılan YSA ağırlıkları kullanılmıştır. Bu ağırlıklar MATLAB ortamından bir metin dosyasına aktarılmış ve geliştirilen uygulamanın başlangıcında hafızaya yüklenerek kullanılmaktadır. Eğitim işleminden sonra, giriş katmanı ve eşik ağırlıkları ( $W1$  ve  $B1$ ); gizli katman ve eşik ağırlıkları ( $W2$  ve  $B2$ ) tek bir metin dosyasına kaydedilmektedir. GKS yazılımı bu ağırlıkları kaydedilmiş olan dosyadan yükleyerek kullanmaktadır. Sınıflandırma işlemi bu ağırlıklar ve işlenen 5 periyotluk sinyal penceresinden elde edilen özellik vektörü kullanılarak iki matris çarpımı ile tamamlanmaktadır (Eşitlik 5.5).

$$y = B2 + W2 * \tanh(B1 + W1 * x) \quad (5.5)$$

Bu eşitlikte  $y$  çıkış vektörü;  $x$  ise özellik vektörüdür. Bu işlem her 5 periyotta bir tekrarlanarak çıkış vektöründeki en büyük eleman seçilerek sınıflandırma sonuç elde edilmektedir. Güç kalitesi sınıflandırma yazılımı, herhangi üç fazdan birinde güç kalitesi bozulması olayı tespit ettiğinde bunu veritabanındaki tabloya da yazmaktadır. Tabloya kaydedilen alanlar olayın gerçekleştiği tarih, zaman, bozulma tipi ve 5 periyotluk ham şebeke sinyalidir. Ham şebeke sinyali kaydı üç faz için de gerçekleştirilmektedir. Böylece fazların birinde hata gerçekleştiğinde diğer fazların durumu da gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmada, geliştirilen uygulamanın masaüstü sürümünde PostgreSQL, tek kart bilgisayar sürümünde ise SQLite veritabanları kullanılmıştır. PostgreSQL, yüksek sistem kaynakları gereksiniminden dolayı gömülü sistem sürümünde kullanılmamıştır. Geliştirilen uygulamanın pencere görüntüsü Şekil 5.14'te verilmiştir.

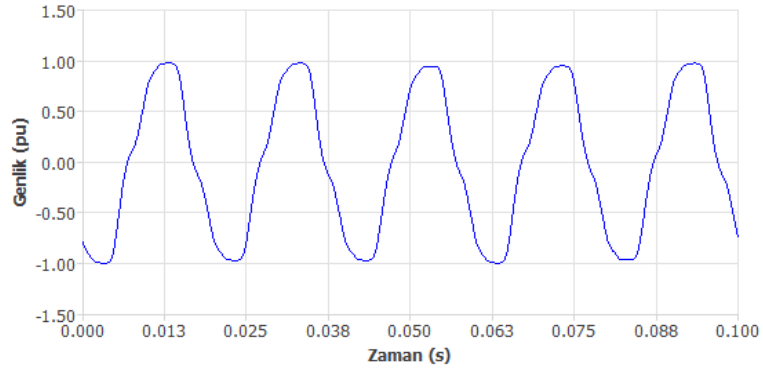
Şekil 5.14'te verilen görüntüde üç fazlı gerilim sinyalinin çizildiği ve işlendiği görülmektedir. Güç sinyali işlenmeden önce bir kalibrasyon katsayısı kullanılarak 1 V genlik değerine normalize edilmektedir. Bu işlem normal şebeke koşullarına göre uygulamanın kalibre edilmesi gibi düşünülebilir. Kalibrasyon katsayısı uygulama arayüzünden *Coefficient* ile etiketlenmiş kaydırma çubuğu ile ayarlanabilmektedir. S-dönüşüm işlemine geçilmeden önce yakalanmış olan sinyalden DC bileşen

çıkarılmaktadır. AD7606 üzerinde 2. dereceden anti-alias analog filtre olduğundan bu uygulamada dijital olarak sinyal filtreleme işlemi kullanılmamıştır.

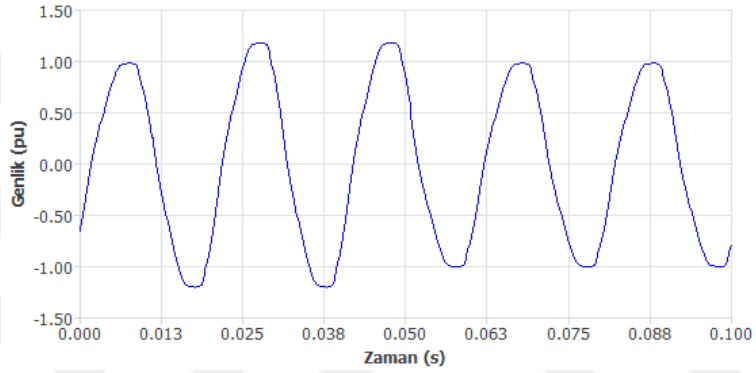


Şekil 5.14. Güç kalitesi sınıflandırma uygulamasına ait pencere görüntüsü.

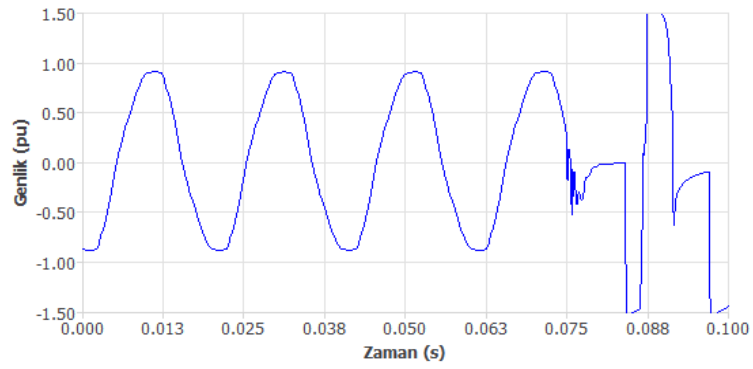
Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de geliştirilen uygulama ile tespit edilmiş güç kalitesi bozulması olaylarına örnekler verilmiştir. Şekil 5.15’te verilen görüntüde kırpışma durumu gözlemlenmektedir. Bu durum uygulama tarafından kırpışma olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 5.16’de gerilim yükselmesi gözlemlenmektedir. Bu durum uygulama tarafından gerilim yükselmesi olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 5.17’de ise hem gerilim yükselmesi hem de osilasyonlu geçişin olduğu kombine bir güç kalitesi bozulması gözlemlenmektedir. Bu durum, uygulama tarafından osilasyonlu geçiş olarak sınıflandırılmıştır. Bu sinyal, düşük bataryalı bir kesintisiz güç kaynağının kesintiye gitme anında kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen uygulamanın sınıflandırma işlemlerinde başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.15. Kırpışma içeren güç sinyali.



Şekil 5.16. Gerilim yükselmesi içeren sinyal.



Şekil 5.17. Osilasyonlu geçiş içeren sinyal.

## 5.6. DENEYSSEL ÇALIŞMA VE PERFORMANS ÖLÇÜMÜ

Geliştirilen sistemin performans ölçümü için 220 V ve 50 Hz AC şebeke sinyali kullanılmış ve işlem zamanı süreleri gözlemlenmiştir. Uygulama 5 periyotluk güç

sinyalinin toplanmasının ardından sinyal işleme ve diğer işlemleri gerçekleştirmektedir. Bu aşamada gerçekleştirilen işlemler toplanan sinyalin okunması, kanallarına ayrılması, S-dönüşümü hesabı, YSA sınıflandırma işlemi, sinyalin çizdirilmesi ve veritabanı kayıt işlemleridir. Sunulan sistem, gerçek zaman gereksinimlerini karşılayabilmek için bütün bu işlemleri 5 periyotluk bekleme süresinin (100 ms) altında tamamlamalıdır. Çizelge 5.7’de, Raspberry Pi 3 tek kart bilgisayarı ile 6 saatlik gözlem sonunda elde edilen işlem süreleri verilmiştir.

Çizelge 5.7. Gerçek zamanlı işleme sırasından elde edilen zamanlama değerleri.

İşlem (Üç faz için)	Geçen süre (µs)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama
Sinyal Çizimi	134	317	160
S-dönüşümü (22x1000 double tipli eleman) ve Özellik Çıkartma	13568	23687	14016
YSA Hesabı	48	146	51
Veritabanı kaydı (5 periyotluk ham veri)	19160	215837	26294
<b>TOPLAM</b>	32910	239987	<b>40521</b>

Çizelge 5.7’ye bakıldığından ortalama işlem sürelerinin 41 ms’nin altında olduğu görülmektedir. Bu süre sunulan sistemin gerçek zaman kriterini karşıladığını göstermektedir. Referans [64]’te sunulan sistemin sınıflandırma süresi tek faz için 71 ms olarak rapor edilmiştir. Üstelik bu çalışmada sinyal kaydı ve çizim işlemleri de gerçekleştirilmemiştir. DSP tabanlı donanım ve karar ağacı kullanılan başka bir çalışmada [77] sınıflandırma süresi tek faz için 90 ms olarak rapor edilmiştir. Referans [67]’de, *fast dyadic scaling* yöntemi ile tek faz için 3,2 ms’lik bir S-dönüşümü süresi rapor edilmiştir. dSpace ile gerçekleştirilen bu uygulamada FFT işlemleri için 640 nokta kullanıştır. Bu çalışmada sınıflandırma işlemi için geçen toplam süre rapor edilmemiştir. Referans [78]’de LabVIEW ve S-dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilen bir güç kalitesi monitörü sunulmuştur. Bu çalışmada güç sinyali NI SCXI-1600 veri toplama kartı ile toplanmıştır. Uygulamada S-dönüşümü sonrasında elde edilen 3 boyutlu S-dönüşümü eğrileri görüntülenmektedir. Bu uygulamada gerçek zamanlı güç kalitesi bozulma tipleri için sınıflandırma uygulaması yapılmamıştır. Bu çalışmanın araştırmacıları 0,75 s’lik bir S-dönüşümü süresi rapor etmişlerdir. Dönüşümün bu kadar uzun sürmesinin nedeni ise tam

spektrumlu S-dönüşümü hesabı olarak düşünülebilir. Buna ek olarak bu çalışmada kullanılan örnekleme oranı rapor edilmemiştir. Referans [3]'de ise 640 noktalı tek faz S-dönüşümü işlemi 0,137 s'de tamamlandığı bildirilmiştir.

Literatür incelemesinde görüldüğü gibi bu çalışmada sunulan sistem etkili ve yüksek performanslı olarak güç kalitesi sınıflandırma işlemlerini tamamlamaktadır. Çizelge 5.7 incelendiğinde, en uzun süreyi veritabanı kayıt işleminin aldığı görülmektedir. Bu zamanlama değeri yazma hızı yüksek olan bir harici kayıt ortamı ile daha da aşağı çekilebilir. Deneysel çalışma sırasında kullanılan depolama ortamı USB 3.0 bağlantı arabirimine sahip Sandisk Ultra Dual sürücüsüdür. Buna karşın Raspberry Pi 3, USB 3.0 bağlantı arabirimine sahip değildir.

Sinyal işleme görevini yerine getiren iş parçacığı, disk yazma işlemi sırasında bekleme durumuna geçmektedir. Buna karşın veri okuma işlemini gerçekleştiren iş parçacığı FIFO kuyruğundan gelen verileri biriktirmeye devam etmektedir. Bu şekilde ara bellekler (tamponlar) üstünde veri taşması (data overflow) engellenmektedir. Veritabanına kayıt işlemi, sadece güç sinyalinde bozulma tespit edildiği anda yapıldığından, bu işlem için geçen süre ihmal edilebilir niteliktedir. Bu soruna alternatif bir çözüm için ise SQLite veritabanı bağlantısı üzerinde senkron yazma (synchronous off) seçeneğini pasif hale getirmektedir. Bu şekilde, veritabanına yazma işlemi için beklenmesine gerek duyulmaksızın işletim sistemi tarafından asenkron olarak yazma işlemi yapılır. Fakat bu yöntem, sinyal işleme görevini yerine getiren bilgisayarın enerjisi kesilmediği sürece güvenlidir. Geliştirilen sınıflandırma yazılımı, Core i7 3537U işlemcili, 8 Gb belleğe ve katı diske sahip bir notebook bilgisayarda, veritabanı kaydı hariç bütün işlemleri 5 ms'nin altında tamamlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçek zamanlı harmonik belirleme yazılımının geliştirilmesi konusunda bir bildiri [79] ve gerçek zamanlı güç kalitesi sınıflandırma konusunda ise bir yayın [80] hazırlanmıştır.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, düşük maliyetli bir gerçek zamanlı güç kalitesi tanıma ve harmonik izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, üç fazlı bir elektrik şebekesinde, güç kalitesinde meydana gelen bozulma olaylarını tespit edip sınıflandırmaktadır. İzlenen güç hatlarındaki gerilim sinyalleri FPGA ve USB-FIFO kullanılarak geliştirilmiş olan veri toplama arabirimi ile eş zamanlı olarak yakalanmaktadır. Toplanmış olan güç sinyallerindeki değişimlere ait özelliklerin tespit edilebilmesi için S-dönüşümü kullanılmıştır. Güç kalitesindeki bozulmaların tespiti için S-dönüşümü sonrasında elde edilen özellikler ileri beslemeli geri yayımlı YSA yapısı kullanılmıştır. Geçmiş çalışmalardan farklı olarak, gerçek gerilim sinyalinde tespit edilen harmonikler, YSA eğitim aşamasında üretilen sinyallere kısmi olarak eklenmiştir. Böylelikle, sınıflandırma işleminin gerçek sinyal ile daha iyi sonuç vermesi sağlanmıştır. Buna ek olarak S-dönüşümü, sadece özellik deseninde (vektöründe) kullanılan frekanslar ile gerçekleştirilmiştir. Böylece sistemin gerçek zaman çalışması iyileştirilmiştir.

Sınıflandırma işlemi için 7 adet özellik kullanılırken 10 adet güç kalitesi bozulma türü sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. MATLAB ortamında yapılan YSA çalışmalarından elde edilen ağırlıklar direkt olarak sınıflandırma yazılımında kullanılmıştır. Böylelikle tekrar eğitim işlemlerinin yapılmasına gerek duyulmadan uygulama gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma işlemi yapılırken aynı zamanda toplanan sinyallerin çizim işlemleri de GPU desteği ile yapılmaktadır. Böylelikle hem çizim işlemleri için gereken süre azaltılmıştır.

Geliştirilen sistemin kullanıcı arabirimi ile de 100. dereceye kadar olan harmonikler gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Harmonik belirleme işlemi için 10 periyotluk sinyal penceresi kullanılmıştır. Her yeni gelen periyot verisi işlem

penceresinin sonuna eklenerek harmonik belirleme işlemi tekrarlanmaktadır. Zamanlama sonuçları, geliştirilen sistemin gerçek zamanlı bir güç kalitesi izleme ve tespit cihazı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda geliştirilen bu izleme sisteminin, Nesnelerin İnternet'i (İnternet of Things - IoT) yaklaşımı ile geniş çaplı bir uzaktan izleme sistemine dönüştürülmesi planlanmaktadır. Bu işlem için MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protokolü aday olarak gösterilebilir. Böylelikle hem uzaktan kontrol edilebilen hem de uzak veri toplama işlemlerinin gerçekleştirilebildiği bir sistem pratik olarak gerçekleştirilebilir.



## KAYNAKLAR

1. Yörür, K., “Elektrik İletim Hatlarının Güç Kalitesi Parametrelerinin Yazılımla Hesaplanması ve Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-32 (2008).
2. Öztürk, S. D., “Labview Tabanlı Gelişmiş Güç Kalitesi Analizörü”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 1-27, 47-53 (2010).
3. Uyar, M., “Güç kalitesindeki bozulma türlerinin akıllı örüntü tanıma yaklaşımları ile belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*, 1-10, (2008).
4. Roy, S. and Nath, S., “Classification of Power Quality Disturbances using Features of Signals”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2 (11): 1-3 (2012).
5. Atalık, T., “İnternet Üzerinden Haberleşen Güç Kalitesi Monitör Cihazı Donanım Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-22 (2007).
6. Gökozan, H., “Endüstriyel tesislerde güç kalitesinin izlenmesi, analizi ve uygun harmonik filtre seçimi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-47 (2011).
7. İnternet: Güç Kalitesi Milli Projesi “Proje Hakkında”, <http://www.guckalitesi.gen.tr/tr/about/mission.php> (2014).
8. Sankaran, C., “Power Quality”, *CRC PRESS LLC*, Boca Raton, 55-60 (2002).
9. Apay, T., “Güç kalitesi parametrelerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 36-40 (2008).
10. Radil, T., and Ramos, P. M., "Methods for Estimation of Voltage Harmonic Components", Power Quality, Mr Andreas Eberhard (Ed.), *InTech*, Rijeka, 313-321 (2011).
11. Frigo, M. and S. G. Johnson, "FFTW: An adaptive software architecture for the FFT", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Seattle, 1381-1384 (1998).

12. Sanders, J. and Kandrot, E., "CUDA By Example", *Addison-Wesley*, Boston, 238-240 (2010).
13. Jain, S. and Singh, S. N. "Harmonics estimation in emerging power system: key issues and challenges", *Electric Power Systems Research*, 81(9): 1754-1766 (2011).
14. Spanik, P., Sedo, J., Dragona, P. and Frivaldsky, M., "Real time harmonics analysis of recuperative current through utilization of digital measuring equipment", *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 19 (5): 33-38 (2013).
15. Chen, Y., "Research and design of intelligent electric power quality detection system based on VI", *Journal of Computers*, 5 (1): 158-165 (2010).
16. Penghui, L., Lijie, Z., Haijun, B. and Yanhua, Z., "Power quality monitoring of power system based on spectrum analysis", *International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, Henan, 1-4 (2010).
17. Tse, N. C. F., "Practical application of wavelet to power quality analysis", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, 1-5 (2006).
18. Barros, J., Diego, R. I. and Apráiz, M. "Applications of wavelet transform for analysis of harmonic distortion in power systems: a review", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61 (10): 2604-2610 (2012).
19. Faisal, M. F., Mohamed, A., Hussain, A. and Nizam, M., "Support vector regression based S-transform for prediction of single and multiple power quality disturbances", *European Journal of Scientific Research*, 34 (2): 237-251 (2009).
20. Gu, Y. and Bollen, M. H. J., "Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances", *IEEE Transaction on Power Delivery*, 15 (4): 1279-1284 (2000).
21. Bollen, M. H. J., "What is power quality", *Electric Power Systems Research*, 66 (1): 5-14 (2003).
22. Flores, R. A., "State of the art in the classification of power quality events, an overview", *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Rio de Janeiro, 1-4 (2002).
23. Saxena, D., Verma, K. S. and Singh, S. N., "Power quality event classification: an overview and key issues", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2 (3): 186-199 (2010).
24. Salor, Ö., Ermiş, M., vd., "Nationwide real-time monitoring system for electrical quantities and power quality of the electricity transmission system", *IET Generation, Transmission and Distribution*, 5 (5): 540-550 (2011).

25. Wang, A., Pan, F., Li, Y. ve Tao, R., “The Design of Power Quality Detecting System Based of OMAP-L138”, *IEEE 13th Workshop on Control and Modelling for Power Electronics*, Kyoto, 1-4 (2012).
26. Guo, H., Yu, H., Sun, C., Zhang, Z. ve Zheng, E., “Continuous and Real-time Vibration Data Acquisition ana Analysis System Based on S3C6410 and Linux”, *IEEE Fifth Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Hong Kong, 389-392 (2013).
27. Zhian, H. and Yufeng, L., “The Design of Analog Acquisition System in Distribution Automation”, *China International Conference on Electricity Distribution*, Shanghai, 1-5 (2012).
28. She, X. and Xiong, J., “Multi-channel Electrical Power data acquisition system Based on AD7606 and NIOSII”, *International Conference on Electrical and Control Engineering*, Yichang, 1625-1627 (2011).
29. Qiang, Wu. and Yangong, B., “Hardware Design of a High Performance Multi-Channel High Speed Signal Acquisition and Processing System”, *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, Xian, 733-776 (2007).
30. Wenyi, L. ve Hongcheng, Y., “Design of High Speed Synchronous Multi-channel Data Acquisition and Processing System Based on TMS320C6747”, *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering*, Singapore, 758-760 (2010).
31. Uyar, M., Yıldırım, S. and Gencoğlu, M. T., “An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals”, *Electric Power Systems Research*, 78 (10): 1747-1755 (2008).
32. Uyar, M., Yıldırım, S. ve Gencoğlu, M. T., “Güç kalitesindeki bozulma türlerinin sınıflandırılması için bir örüntü tanıma yaklaşımı”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 26 (1): 41-56 (2011).
33. Yazlık, Ö., “Design and development of a simple power quality monitor for low voltage distribution system”, Yüksek Lisan Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2-47) 2014.
34. Wenda, A., Hussain, A., Hannan, Mohamed, A. and Salina, A., “Web based automatic classification of power quality disturbances using the S-transform and rule based expert system”, *Journal of Information & Computational Science*, 8 (12): 2375-2383 (2011).
35. Miron, A., Dorin, M. and Cziker, A. C., “Software tool for real-time power quality analysis”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 13 (4): 125-132 (2013).

36. Erişti, H., “Güç kalitesi için dalgacık dönüşümü ve destek vektör makine tabanlı bir olay tanıma tekniğinin geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-35 (2010).
37. Găşpăresc, G., "Methodes of Power Quality Analysis", Power Quality Monitoring, Analysis and Enhancement, *Intech*, Rijeka, 102-106 (2011).
38. Arı, N., Özen, Ş. ve Çolak, Ö. H., “Dalgacık Teorisi”, *Palme Yayıncılık*, Ankara, 23-27 (2008).
39. Stockwell, R.G., Mansinha, L. and Lowe, R.P., "Localization of the complex Spectrum: the S-transform", *IEEE Trans. on Signal Processing*, 44: 998-1001 (1996).
40. Salem, M. E., Mohamed, A. and Samad, S. A., “Rule based system for power quality disturbance classification incorporating S-transform features”, *Expert Systems with Applications*, 37 (4): 3229-3235 (2010).
41. Dash, P. K., Panigrahi, B. K. and Panda, G. “Power Quality Analysis Using S-transform”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (2): 406-411 (2003).
42. Zhao, F. ve Yang., R., “Power Quality Disturbance Recognition using S-Transform”, *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, 944-950 (2007).
43. Abdel-Gail, T.K., Kamel, M., Youssef, A. M., El-Saadany, E. F., ve Salama, M. M. A., “Power Quality Disturbance Classification Using the Inductive Inference Approach”, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 19 (4): 1812-1818 (2004).
44. Rodríguez, A., Merino, E., Aguado, J., Lopez, J.J., Munoz, F., Martin, F.I. ve Munoz, J., “A Decision Tree and S-Transform Based Approach for Power Quality Disturbance Classification”, *IEEE Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, İstanbul, 1093-1097 (2013).
45. Xu, J., Song, S. and Shao, S., “Application in harmonic signal detection based on STFT and S Transform”, *Journal of Information & Computational Science*, 12 (9): 3658-3661 (2015).
46. Zhang, G.P., "Neural Networks for Classification: A Survey", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—part c: applications and reviews*, 30 (4): 451-462 (2000).
47. Chen, C., “A two-stage solution procedure for digital power metering according to IEEE Standart 1459-2010 in single-phase system”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (12): 5550-5552 (2013).

48. Kaewarsa, S., "Classification of power quality disturbances using S-transform based artificial neural network", *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, 566-570 (2009).
49. İnternet: mbed, "NUCLEO-F401RE Katalog Verileri", <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F401RE> (2017).
50. Toulson, R. and Wilmshurst, T., "Fast and Embedded System Design", *Newness*, Oxford, 15-25 (2012).
51. İnternet: Analog Devices, "AD7606 ADC Tümdevresi Katalog Verileri", <http://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/precision-adc-20msps/simultaneous-sampling-ad-converters/ad7606.html> (2017).
52. İnternet: FTDI, "FT2232H Tümdevresi Katalog Verileri", <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT2232H.html> (2017).
53. Molloyd, D., "Exploring Beaglebone", *Wiley*, Indianapolis, 503-506 (2015).
54. Sozański, Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits, *Springer-Verlag*, London, 11-13 (2013).
55. İnternet: Linear Technology, "LTC6904 Osilatörü katalog verileri", <http://www.linear.com/product/LTC6904> (2015).
56. Caciotta, M., Giarnetti, S., Leccese, F. and Trinca, D., "Development of an USB data acquisition system for power quality and smart metering applications", *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Rome, 835-839 (2012).
57. Betea, B., Tomesc, L., Dobra, P. and Turusca, M., "Spectrum analyzer based on OMAP3530", *Proceedings of the 5th European Education and Research Conference*, Amsterdam, 257-260 (2012).
58. Cerna, M. and Harvey, A. F., "The fundemantals of FFT-based signal analisys measurement", Application Note 041, *National Instruments*, 4-5 (2000).
59. Rens, J. and Swart, P., "Analysis of Waveforms in Modern Power Systems", *Handbook of Power Quality*, *Wiley*, Sussex, 300-302 (2008).
60. Jiasheng, L., Saichun, H., Weichu, X. and Biao, Q., "The Application Study of S-Transform Modulus Time-frequency Matrix in Detecting Power Quality Transient Disturbance", *Information Technology Journal*, 11 (3): 354-358 (2012).
61. Xiao, X., Xu, F. and Yang, H., "Short duration disturbance classifying based on S-transform maximum similarity", *Electrical Power and Energy Systems*, 31 (7-8): 374-378 (2009).

62. Youssef, A. M., Abdel-Galil T. K., El-Saadany, E. F. and Salama M. M. A., "Disturbance Classification Utilizing Time Warping Classifier", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 (1): 272-278 (2004).
63. Rodríguez, A., Jose, A. A. Lopez J. J., Martín, F., Munoz, F. and Ruiz, J., "Time-Frequency Transforms for Classification of Power Quality Disturbances", Power Quality, Mr Andreas Eberhard (Ed.), *InTech*, Rijeka (2011).
64. Rodriguez, A., Aguado, J. A., Martin, F., Lopez, J. J., Muñoz, F. and Ruiz, J. E., "Rule-based classification of power quality disturbances using S-transform", *Electric Power Systems Research*, 86: 113-121 (2012).
65. He, S., Li, K and Zhang, M., "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, 2013.
66. Uyar, M., Yildirim, S., and Gencoglu M. T., "An Expert System Based on S-Transform and Neural Network for Automatic Classification of Power Quality Disturbances", *Expert Systems with Applications*, 36: 5962-5975, 2009.
67. Biswal, M. and Dash, P. K., "Detection and characterization of multiple power quality disturbances with a fast S-transform and decision tree based classifier", *Digital Signal Processing*, 23 (4): 1071-1083 (2013).
68. Li, J. and Chilukuri, M. V., "Power supply quality analysis using S-Transform and SVM classifier", *Journal of Power and Energy Engineering*, 2 (4): 438-447 (2014).
69. Kumar, R., Singh, B., Shahani, D. T., Chandra, A. and Al-Haddad, K., "Recognition of power quality disturbances using S-Transform-Based ANN classifier and rule-based Decision tree", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (2): 1249-1258 (2015).
70. Lee, I. W. C. and Dash, P. K., "S-Transform based intelligent system for classification of power quality disturbance signals", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50 (4): 800-805 (2003).
71. Mishra, S., Bhende, C. N. and Panigrahi, B. K., "Detection and classification of power quality disturbances using S-Transform and probabilistic neural network", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (1): 280-287 (2008).
72. Chilukuri, M. V. and Dash, P. K., "Multiresolution S-Transform based fuzzy recognition system for power quality events", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 (1): 323-330 (2004).
73. Biswall, M. and Dash, P. K. "Measurement and classification of simultaneous power signal patterns with S-Transform variant and fuzzy decision tree", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9 (4): 1819-1827 (2013).

74. Ma, J., Zhang, J., Xiao, L., Chen, K and Wu, J. "Classification of Power Quality Disturbances via Deep Learning", *IETE Technical Review*, 34 (4): 408-415 (2017).
75. Balouji, E. and Salor, Ö., "Classification of power quality events using deep learning on event images", *3<sup>rd</sup> International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*, Shahrekord, 216-221 (2017).
76. Hooshmand, R. and Enshae, A., "Detection and classification of single and combined power quality disturbances using fuzzy systems oriented by particle swarm optimization algorithm", *Electric Power Systems Research*, 80 (12): 1552-1561, 2010.
77. Zhang, M. and Li, K., "DSP-FPGA based real-time power quality disturbances classifier", *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, New Orleans, 1-6 (2010).
78. Reddy, M. J. B., Sagar, K. and Mohanta, D. K., "A multifunctional real-time power quality monitoring system using Stockwell transform", *IET Science, Measurement and Technology*, 8 (4): 155-169 (2014).
79. Gök, M., Görgünoğlu, S. and Sefa, İ., "Design of a real-time USB interfaced multi-channel power system harmonics detection system", *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, 521-524 (2015).
80. Gök, M. and Sefa, İ., "Research and Implementation of a USB Interfaced Real-Time Power Quality Disturbance Classification System", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 17 (3): 61-70 (2017).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Mehmet GÖK, 1981 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Kahramanmaraş Anadolu Meslek Lisesi Bilgisayar Yazılımı Bölümünden 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümünde öğrenime başlayıp 2004 yılında mezun oldu. 2004 yılında Bilecik Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Bilgisayar bölümünde öğretmen olarak göreve başladı. 2010 yılında Kahramanmaraş Sosyal Bilimler lisesine atandı. Üç yıl burada görev aldıktan sonra 2013 yılında Kahramanmaraş İl Mili Eğitim Müdürlüğü bünyesinde Fatih Projesi Eğitimci olarak görevlendirildi ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir. 2008 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Sistemleri Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını 2011 yılında tamamladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Kahramanmaraş İl Milli Eğitim Müdürlüğü  
Ek Hizmet Binası İsmetpaşa Mh. Öğretmenler Cad. No: 4  
Dulkadiroğlu / Kahramanmaraş  
Tel : (505) 649 4434  
E-posta : gokmehmet@outlook.com