

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNTERNET TABANLI GÜÇ KALİTESİ İZLEME SİSTEMİNİN DONANIMSAL VE
YAZILIMSAL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Özal YILDIRIM

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Devreler ve Sistemler

**Danışman: Prof. Dr. Yakup DEMİR
İkinci Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ**

HAZİRAN-2015

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNTERNET TABANLI GÜÇ KALİTESİ İZLEME SİSTEMİNİN DONANIMSAL VE
YAZILIMSAL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Özal YILDIRIM

(101113201)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Devreler ve Sistemler

**Danışman: Prof. Dr. Yakup DEMİR
İkinci Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27.05.2015

HAZİRAN-2015

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNTERNET TABANLI GÜÇ KALİTESİ İZLEME SİSTEMİNİN DONANIMSAL
VE YAZILIMSAL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Özal YILDIRIM
(101113201)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27.05.2015
Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2015**

**Danışman : Prof. Dr. Yakup DEMİR (FÜ)
İkinci Danışman : Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (MEÜ)**

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

HAZİRAN-2015

ÖNSÖZ

Enerji kavramı, günümüzün en popüler konularının başında gelmektedir. Enerji alanındaki bu popülerliğe neden olan en büyük etken, enerjiye ihtiyaç duyan teknolojilerin hızla yaygınlaşmasıdır. Kullanıcılar bu teknolojilerden faydalanmak için, çoğu zaman oldukça yüksek ekonomik zorlukların altına girmektedir. Enerjiden kaynaklanan problemleri nedeniyle kullanıcılar, büyük maddi kayıplarla karşılaşabilmektedir. Meydana gelen problemin kaynağını belirleyebilmek için kullanıcıların kendi enerji akışlarını sürekli olarak ölçmeleri ve kayıt altına almaları gerekmektedir. Bu tez çalışmasının çıkış noktası da, elektrik enerjisinin kalitesi ile ilgili araştırmalara yenilikçi katkılar sunmaktır. Özellikle alçak gerilimde güç kalitesinin izlenmesi noktasında bu alana, yenilikçi ve kolay uygulanabilir bir izleme sisteminin kazandırılması hedeflenmiştir.

Tez çalışmam boyunca desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen ve çalışma disiplini bizlere kazandıran saygı değer danışmanım Sayın Prof. Dr. Yakup DEMİR'e, akademik görüşleriyle bana çok büyük katkıları olan ikinci danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması süresince desteklerini esirgemeyen çok kıymetli dostlarım Sayın Öğr. Gör. Yusuf ÇELİK ile Sayın Öğr. Gör. Vedat TÜMEN'e ve ailemizin kıymetli dostlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca desteğini ve sevgisini eksik etmeyen, benim için akademik kariyerinden büyük fedakarlıklar veren en büyük destekçim olan eşim Öğr. Gör. Nuray YILDIRIM'a, düştüğüm karamsarlıklardan beni bir gülüşüyle çıkaran kimi zaman dalıp gittiğim sanal dünyadan minik elleriyle beni çekip çıkaran çok kıymetli oğlum Harun Eren'e, bugünlere gelmemi sağlayan anneme ve babama teşekkür ederim.

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

Özal YILDIRIM

ELAZIĞ-2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLOLAR LİSTESİ	XII
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Literatür Taraması	3
1.3. Tezin Amacı ve Organizasyonu	6
1.4. Tezin Bilime Katkısı	8
2. GÜÇ KALİTESİ TANIMI, STANDARTLARI VE PARAMETRELERİ	10
2.1. Güç Kalitesi Tanımı	10
2.2. Düşük Kaliteli Gücün Etkileri	11
2.2.1. Tüketiciler Açısından Düşük Kaliteli Gücün Etkileri	11
2.2.2. Şebeke İşletmecileri Açısından Düşük Kaliteli Gücün Etkileri	14
2.3. Güç Kalitesi Problemleri	14
2.3.1. Gerilim Çökmesi	16
2.3.2. Gerilim Sıçraması	17
2.3.3. Kesinti Olayları	18
2.3.4. Harmonikler	19
2.3.4.1. Güç Kalitesi Standartlarına Göre Harmonik Sınırlar	21
2.4. Güç Kalitesi Parametreleri ve Ölçümü	24
2.4.1. Güç Kalitesi Standartları ve Yönetmelikleri	25
2.4.1.1. IEEE Güç Kalitesi Standartları	25
2.4.1.2. IEC Güç Kalitesi Standartları	27
2.4.1.3. EN 50160 Avrupa Güç Kalitesi Standardı	29
2.4.1.4. Türkiye’de Güç Kalitesi Standartları ve Yönetmelikleri	30
2.4.2. Etkin Değer ve Güç Bileşenleri	31
2.4.2.1. Etkin Değer	31
2.4.2.2. Güç Bileşenleri	32
3. GÖMÜLÜ SİSTEMLER VE FPGA TEKNOLOJİSİ	34
3.1. Gömülü Sistem Kavramı ve Yapısı	34
3.2. Gömülü Sistemlerde Kullanılan İşlemci Yapıları	37
3.2.1. Mikroişlemciler	37
3.2.2. Mikrodenetleyiciler	39
3.2.3. DSP İşlemciler	39
3.2.4. Uygulamaya Özgü Tümlleşik Devreler	41
3.2.5. Programlanabilir Lojik Devreler	41
3.2.5.1. Basit Programlanabilir Lojik Devre	43

3.2.5.1.1.	Programlanabilir Lojik Diziler	43
3.2.5.1.2.	Programlanabilir Dizi Lojiği	44
3.2.5.2.	Karmaşık Programlanabilir Lojik Devreler	45
3.2.5.3.	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri.....	47
3.3.	FPGA Programlama Teknikleri.....	48
3.3.1.	SRAM Tabanlı Programlama	48
3.3.2.	Flash/EEPROM Tabanlı Programlama	49
3.3.3.	Karşıt-Sigorta Tabanlı Programlama.....	50
3.4.	VHDL Dili Yapısı ve Özellikleri	50
3.4.1.	VHDL Tasarım Yapısı	51
3.4.1.1.	Kütüphaneler ve Paketler.....	52
3.4.1.2.	Varlık.....	54
3.4.1.3.	Mimari	55
3.5.	FPGA Tasarım Geliştirme Araçları ve Süreçleri.....	55
3.5.1.	Entegre Yazılım Ortamı.....	56
4.	İNTERNET TABANLI GÜÇ KALİTESİ İZLEME SİSTEMİNİN DONANIMSAL VE YAZILIMSAL YAPISI	59
4.1.	Güç Kalitesi İzleme Sisteminin Donanımsal Yapısı	61
4.1.1.	Gerilim Algılayıcı Devresi	62
4.1.2.	Akım Algılayıcı Devresi.....	63
4.1.3.	Analog Sayısal Dönüştürücü Modülü.....	64
4.1.4.	Sayısal Sinyal İşleme Modülü	65
4.1.5.	Test İşlemleri İçin Kullanılan Sistemler	67
4.2.	Güç Kalitesi İzleme Sisteminin Yazılımsal Yapısı	67
4.2.1.	FPGA Tabanlı Yazılımlar.....	68
4.2.1.1.	Sinyal Dönüştürme Modülü	69
4.2.1.2.	Sinyal İşleme Modülü.....	71
4.2.1.2.1.	Frekans Hesaplama Alt Modülü	72
4.2.1.2.2.	Etkin Değer Alt Modülü	73
4.2.1.2.3.	Güç Hesaplamaları Alt Modülü.....	75
4.2.1.2.4.	Harmonik Alt Modülü	77
4.2.1.2.5.	Güç Kalitesi Bozulma Tespit Alt Modülü.....	80
4.2.1.3.	UDP/IP Haberleşme Modülü.....	83
4.2.2.	Bilgisayar Tabanlı Çalışan Yazılımlar	87
4.2.2.1.	Güç Kalitesi Veritabanı Yapısı.....	87
4.2.2.2.	Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi İzleme Otomasyonu	89
4.2.2.3.	Güç Kalitesi Web Uygulaması	92
5.	İGKİS'İN SAHA UYGULAMALARI VE ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	95
5.1.	Güç Kalitesi İzleme Sisteminin Ölçüm Noktalarına Bağlantısı	95

	<u>Sayfa No</u>
5.2. Ölçüm Noktaları ve Ölçüm Süreleri	96
5.3. Ölçüm Noktalarındaki Güç Kalitesi Ölçümleri ve Sonuçları	97
5.3.1. Gerilim Kalitesine Ait Ölçümler	98
5.3.1.1. Gerilim Etkin Değerindeki Değişimler	98
5.3.1.2. Frekans Değişimleri.....	100
5.3.1.3. Gerilimde Meydana Gelen Bozulma Olayları	101
5.3.1.4. Gerilim Harmonikleri	102
5.3.2. Akım Ölçüm Sonuçları.....	105
5.3.2.1. Akım Etkin Değerindeki Değişimler	105
5.3.2.2. Akım Harmonikleri.....	107
5.3.3. Güç Bileşenlerine Ait Ölçümler	108
6. SONUÇLAR.....	111
7. ÖNERİLER.....	114
KAYNAKLAR.....	115
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu tez çalışmasında, elektrik enerji sistemlerinde güç kalitesinin sürekli ve standartlara uygun bir şekilde izlenmesi için donanımsal ve yazılımsal olarak internet tabanlı yeni bir izleme sistemi geliştirilmiştir. Tasarlanan izleme sistemi, şebeke üzerinden akım ve gerilim bilgilerini gerçek zamanlı okuyarak güç kalitesi parametrelerini hesaplamaktadır. İzleme sisteminin yapısında, sinyal işleme alanında gittikçe yaygınlaşan FPGA donanımı kullanılmıştır. Güç kalitesi izleme sistemi ile hem güç kalitesi parametrelerinin izlenmesi hem de güç kalitesi bozulmalarının tespiti sağlanmıştır.

Güç kalitesi izleme sisteminin yazılımsal tasarımları, genel olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama, FPGA tabanlı çalışan yazılımlardır. Bu yazılımlar, güç kalitesi ölçüm ve tespit işlemleri için hazırlanan sinyal işleme algoritmaları ve haberleşme kısımlarından meydana gelmektedir. FPGA tabanlı yazılımların oluşturulmasında, VHDL donanım tanımlama dili kullanılmıştır. İkinci aşama, izleme cihazlarından elde edilen verilerin; kayıt altına alınması, izlenmesi, analizi ve raporlanması gibi işlemleri gerçekleştiren bilgisayar tabanlı yazılımlardır. Sunucu üzerinde çalışan bu yazılımlar, güç kalitesi verilerinin görsel olarak izlenmesi ve sorgulanmasında kullanıcılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, güç kalitesi verilerinin uzaktan izlenmesi için internet tabanlı bir web uygulaması oluşturulmuştur. Hem sayısal hem de grafiksel bilgilere sahip olan web sayfası aracılığı ile kullanıcılar, kendilerine ait güç kalitesi bilgilerini bilgisayar ve mobil platformlar aracılığı ile takip edebilmektedir.

Tez kapsamında tasarlanan güç kalitesi izleme cihazı, Tunceli Üniversitesi bünyesinde bulunan Mühendislik Fakültesi, Tunceli Meslek Yüksekokulu ve AR-GE Laboratuvarları'nın elektrik dağıtım panolarına kurularak test edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarından, tez kapsamında oluşturulan güç kalitesi izleme sisteminin yeni nesil güç kalitesi izleme sistemlerinden beklenen tüm özellikleri sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, FPGA teknolojisinin bu sistemde yer alması, bu alana yenilikçi bir katkı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç Kalitesi, Güç Kalitesi İzleme Sistemi, FPGA, Sinyal İşleme.

SUMMARY

REALIZATION OF AN INTERNET-BASED POWER QUALITY MONITORING SYSTEM IN TERMS OF HARDWARE AND SOFTWARE

In this thesis, an internet based monitoring system has been developed for determining power quality in the electrical energy systems. The hardware and software designs of the power quality monitoring system have been performed for this thesis. A new power quality monitoring device is presented in the study for monitoring the power quality continuously and compliance with the standards. Designed monitoring device is performed the power quality parameter calculations with the real time current and voltage signals that obtained from the network. FPGA technology, which has become widely used in signal processing recently, has been used in structure of the monitoring device. By means of the power quality monitoring device, monitoring the power quality parameters and detecting type of the power quality disturbances have been made.

Software designs of the power quality monitoring system are generally prepared in two parts. The first of these parts are FPGA-based operating softwares. Software running on the FPGA side consist of signal processing algorithms that prepared for the measurement process, and data communications parts. FPGA-based softwares have been created with using VHDL hardware description language. The second part is the computer side softwares that are used for recording, monitoring, analysis and reporting of the data obtained from monitoring device. The softwares that runs on the server are provide great facilities to users for monitoring visually and querying the power quality data. A web-based application has been created for monitoring power quality data over internet remotely. By means of the web application, users can monitor their own power flows with a computer or a mobile platform connected to the internet.

Three different measurement points have been selected for the testing of the power quality monitoring device. These are the Engineering Faculty, Vocational School and Laboratories at Tunceli University campus. The monitoring system has been installed electrical distribution panels at these points. The power quality monitoring system prepared under the thesis provides all the features expected from a new generation of power quality monitoring system. Using FPGA technology in these systems has been provided an innovative contribution to this field.

Key Words: Power Quality, Power Quality Monitoring System, FPGA, Signal Processing.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Endüstri, taşıma ve servis sistemleri için LPQI tarafından yapılan araştırmaya ait sonuçları gösteren grafik.....	13
Şekil 2.2.	EU-25 ülkelerindeki çeşitli güç kalitesi problemlerinin neden oldukları mali kayıp oranları.....	14
Şekil 2.3.	İGKİS'den elde edilen gerilim çökmesi olayının a) dalga şekli ve b) RMS değişimi. (Tunceli Üniversitesi Meslek Yüksekokulu ölçüm noktası 02.09.2014 saat 05:59).....	16
Şekil 2.4.	İGKİS'den elde edilen gerilim sıçraması olayının a) dalga şekli ve b) RMS değişimi.(Tunceli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ölçüm noktası 21.08.2014 saat 19:00:47).....	17
Şekil 2.5.	İGKİS'den elde edilen kesinti olayının a) dalga şekli ve b) RMS değişimi. (Tunceli Üniversitesi ARGE Laboratuvarları ölçüm noktası 08.08.2014 saat 13:43:25).....	19
Şekil 2.6.	Temel sinüs dalga şekli ve bu dalgaya ait harmonik bileşenler	20
Şekil 2.7.	Harmonik üreten yüklerin ortak bağlantı noktasında meydana getirdiği bozulma.....	22
Şekil 2.8.	Güç kalitesi ölçümlerinin genel yapısını gösteren blok gösterimi	24
Şekil 2.9.	IEC 61000-4-30 standardının güç kalitesi için önerdiği ölçüm yapısı.....	28
Şekil 3.1.	Gömülü sistem donanımının temel bileşenlerine ait blok gösterimi.....	35
Şekil 3.2.	Genel bir gömülü sisteme ait bileşenler.	36
Şekil 3.3.	Gömülü sistemlerde kullanılan işlemci yapılarının kategorileri.	37
Şekil 3.4.	Temel bir mikroişlemci tabanlı sistemin blok şeması.....	38
Şekil 3.5.	DSP işlemci mimarisinin blok şeması	40
Şekil 3.6.	Programlanabilir lojik devrelerin gelişim süreçleri.....	42
Şekil 3.7.	Üç girişli ve üç çıkışlı basit bir PROM çalışma yapısı	42
Şekil 3.8.	Programlanabilir lojik devreler ve alt bileşenleri.....	43
Şekil 3.9.	Programlanmış basit bir PLA yapısı	44
Şekil 3.10.	Programlanmış üç girişli ve üç çıkışlı PAL yapısı.....	45
Şekil 3.11.	Tipik bir karmaşık programlanabilir lojik devre yapısı	45
Şekil 3.12.	CPLD ve FPGA yapıları arasındaki bağlantıyı gösteren şema	47
Şekil 3.13.	İki boyutlu mantıksal hücre dizilerini barındıran temel FPGA yapısı	48
Şekil 3.14.	Statik bir hücre yapısını gösteren şekil	49

Şekil 3.15. Genel bir VHDL dosya şablonu	51
Şekil 3.16. VHDL kod tasarım bölümleri	52
Şekil 3.17. Kütüphane ve paket hiyerarşisi	53
Şekil 3.18. VHDL dilinde kütüphane kullanım örneği.	53
Şekil 3.19. Varlık tanımlaması ve bu varlığa ait eşdeğer devre yapısı	54
Şekil 3.20. VHDL dilinde mimari yapısını gösteren kod tanımlaması	55
Şekil 3.21. ISE yazılım aracı ile FPGA programlama aşamaları	57
Şekil 3.22. ISE proje yönetici ekranı.....	57
Şekil 4.1. İGKİS'nin çalışma yapısı	59
Şekil 4.2. Güç kalitesi izleme sisteminin donanımsal yapısını gösteren blok şema	62
Şekil 4.3. Güç kalitesi izleme sistemine ait donanımlar.....	62
Şekil 4.4. Gerilim algılayıcı devresinin görüntüsü.....	63
Şekil 4.5. Güç kalitesi izleme sisteminin akım algılayıcı devresi	64
Şekil 4.6. Güç kalitesi izleme sistemine ait analog sayısal dönüştürücü modülü	65
Şekil 4.7. Virtex5 LX110T FPGA geliştirme kartının üstten görünüşü.....	66
Şekil 4.8. Güç kalitesi izleme sisteminin yazılımsal yapısını gösteren şema.....	68
Şekil 4.9. FPGA ortamında hazırlanan yazılımların genel yapısı	69
Şekil 4.10. Sinyal dönüştürme modülünün çalışmasına ait blok şeması.....	70
Şekil 4.11. Sinyal dönüştürme modülünün çalışmasına ait simülasyon çıktısı.....	71
Şekil 4.12. Sinyal işleme modülüne ait blok şeması	72
Şekil 4.13. Frekans hesaplamasında kullanılan algoritmanın akış diyagramı.....	73
Şekil 4.14. FPGA cihazı içerisine gömülen etkin değer yöntemine ait blok şeması.....	74
Şekil 4.15. Etkin değer hesaplama alt modülünün VHDL dilindeki kaba kod yapısı....	75
Şekil 4.16. Güç hesaplama alt modülünün genel çalışma yapısı.....	76
Şekil 4.17. Radix-4 tabanlı FFT algoritmasının çalışma yapısı	78
Şekil 4.18. Harmonik hesaplama alt modülünün çalışma yapısı.....	79
Şekil 4.19. Güç kalitesi bozulma tespit algoritmasına ait akış diyagramı.....	81
Şekil 4.20. Güç kalitesi bozulma tespit algoritmasının simülasyon çıktısı	82
Şekil 4.21. (a) FPGA cihazına giriş olarak verilen bir bozulma sinyali, (b) FPGA çıkışından elde edilen dalga şekli.	82
Şekil 4.22. İzleme sisteminin UDP/IP tabanlı haberleşme yapısına ait blok şeması	83
Şekil 4.23. Ethernet MAC için tipik bir uygulama yapısı.	84

Şekil 4.24. UDP/IP modülünün TEMAC ile çalışan yapısı	85
Şekil 4.25. UDP/IP haberleşme alt modülü ile aktarımı yapılan paketlerin yapısı	86
Şekil 4.26. Güç kalitesi izleme cihazının göndermiş olduğu UDP paketine ait Wireshark görüntüsü	86
Şekil 4.27. Güç kalitesi veritabanına ait tablolar ve tablolar arasındaki ilişkiler.....	88
Şekil 4.28. Güç kalitesi izleme otomasyonuna ait bir ekran görüntüsü	89
Şekil 4.29. Güç kalitesi otomasyonuna ait anlık sayısal bilgi ekranı	90
Şekil 4.30. Ölçüm noktaları için detaylı izleme ekranına ait görüntü	91
Şekil 4.31. Güç kalitesi izleme otomasyonuna ait parametre raporunun örnek bir görüntüsü.....	91
Şekil 4.32. Harmonik raporlamasına ekranına ait örnek bir sorgu görüntüsü.....	92
Şekil 4.33. Güç kalitesi izleme sisteminin web tabanlı uygulamasına ait görüntü	93
Şekil 4.34. Ölçüm noktasına ait çalışan web tabanlı uygulamanın görüntüsü	93
Şekil 5.1. İzleme cihazının akım ve gerilim bağlantı yapısı a) İzleme cihazının gerilim ölçümü için bağlantı şekli b) İzleme cihazının akım ölçümü için bağlantı şekli	95
Şekil 5.2. Güç kalitesi izleme cihazının ölçüm noktalarındaki trafo merkezlerine yapılan bağlantıları a) Mühendislik Fakültesi, b) AR-GE Laboratuvarları, c) Meslek Yüksekokulu ölçüm noktaları.....	96
Şekil 5.3. İGKİS'e ait veri merkezinin bir görüntüsü	97
Şekil 5.4. Mühendislik Fakültesi Ölçüm Noktasının 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında 3 faz gerilim etkin değerindeki 10'ar dakikalık değişimlerin grafiği.	99
Şekil 5.5. 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasında Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasındaki gerilim etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.	99
Şekil 5.6. 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasında ARGE Laboratuvarları ölçüm noktasındaki gerilim etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.	100
Şekil 5.7. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasına ait yedi günlük frekans değişim grafiği	100
Şekil 5.8. Güç kalitesi izleme sistemi ile tespit edilen bir gerilim çökmesine ait gerilim dalga şekilleri ve gerilim etkin değer değişimlerine ait grafik.	101
Şekil 5.9. 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5. ve 7. harmoniklerin 10'ar dakikalık ortalamalar şeklinde değişimleri.....	103

Şekil 5.10. 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. harmoniklerin 10'ar dakikalık ortalamalar şeklinde değişimleri.....	104
Şekil 5.11. Mühendislik fakültesi ölçüm noktasına ait gerilim harmoniklerinin 3sn'lik ortalamaları	104
Şekil 5.12. Mühendislik Fakültesi Ölçüm Noktasının 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında akımlarının etkin değerindeki 10'ar dakikalık değişimlerin grafiği.	105
Şekil 5.13. 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasında Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasındaki akımların etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.	106
Şekil 5.14. 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasında ARGE Laboratuvarları ölçüm noktasındaki gerilim etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.	106
Şekil 5.15. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5., ve 7. harmonik değerleri	107
Şekil 5.16. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. harmonik değerlerin değişimi	108
Şekil 5.17. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri.....	108
Şekil 5.18. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait güç faktörü bileşeninin değişim grafiği	109

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Güç kalitesi izleme sistemlerinin işlevlerine göre sınıflandırılması.....	2
Tablo 2.1.	LPQI'nin sekiz AB ülkesinde yapmış olduğu araştırmada tüketicilerin raporladığı GK problemleri.	12
Tablo 2.2.	Güç kalitesi problemlerine ait genel bir yapıyı gösteren tablo.....	15
Tablo 2.3.	Standartlara göre kesinti olayına ait tanımlamalar	18
Tablo 2.4.	IEEE 519-1992 standardına göre gerilim harmonik bozulmaların sınırları.....	22
Tablo 2.5.	IEEE 519-1992 standardına göre genel bir dağıtım sistemindeki akım harmonik sınırları	23
Tablo 2.6.	EPDK yönetmeliğinde tanımlanan gerilim harmoniklerine ait sınır değerler	23
Tablo 2.7.	EPDK yönetmeliğinde tanımlanan akım harmoniklerine ait sınır değerler	24
Tablo 2.8.	Güç sistemleri elektromanyetik olaylarının kategorileri ve özellikleri	26
Tablo 2.9.	IEC 61000 serisi standartları ve bu standartların kapsamı	28
Tablo 2.10.	IEC 61000-4-30 standardına göre çeşitli GK parametrelerinin ölçüm aralıkları.....	29
Tablo 2.11.	EN 50160 standardına göre AG ve OG dağıtım sistemleri için gerilim karakteristikleri ile ilgili tanımlamalar	30
Tablo 4.1.	Virtex 5 LX110T FPGA Kartının sahip olduğu teknik özellikler	66
Tablo 4.2.	Güç hesaplamaları için kullanılan bağıntılar.	77
Tablo 4.3.	Güç kalitesi parametrelerinin ölçüm aralıkları ve kapladıkları boyutlar ...	87
Tablo 5.1.	Ölçüm noktalarında meydana gelen gerilim bozulmaları.....	102

KISALTMALAR LİSTESİ

İGKİS	: İnternet Tabanlı Güç Kalitesi İzleme Sistemi
PLD	: Programmable Logical Device (Programlanabilir Lojik Cihaz)
SPLD	: Simple Programmable Logical Device (Basit Programlanabilir Lojik Cihaz)
CPLD	: Complex Programmable Logical Device (Karmaşık Programlanabilir Lojik Cihaz)
FPGA	: Field Programmable Gate Arrays (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)
VHDL	: Very Speed Hardware Describe Language (Çok Hızlı Donanım Tanımlama Dili)
FIFO	: First In First Out (İlk Giren İlk Çıkar)
TEMAC	: Tri-Mode Ethernet Media Access Controller (Üç Mod Ethernet Medya Erişim Denetleyicisi)
MAC	: Media Access Controller (Medya Erişim Kontrolü)
G/Ç	: Giriş Çıkış
GMII	: Gigabit Media Independent Interface (Gigabit Medya Bağımsız Arayüz)
RGMII	: Reduced Gigabit Media Independent Interface (İndirgenmiş Gigabit Medya Bağımsız Arayüz)
SGMII	: Serial Gigabit Media Independent Interface (Seri Gigabit Medya Bağımsız Arayüz)
UDP/IP	: User Datagram Protocol/Internet Protocol (Kullanıcı Veribloğu İletişim Kuralları/ İnternet Protokol)
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
TTB	: Toplam Talep Bozulma
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TS	: Türk Standartları
AG	: Alçak Gerilim
DAQ	: Data Acquisition Card (Veri Toplama Kartı)
AR-GE	: Araştırma Geliştirme

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Güç kalitesi kavramı, son yıllarda güç elektroniği tabanlı cihazların günlük yaşantımızda yaygın kullanımına bağlı olarak oldukça önem kazanmıştır. Güç kalitesi, “güç sisteminin belirli bir noktasındaki elektriksel büyüklüklerin bir dizi referans teknik parametrelere göre değerlendirilmesi” olarak tanımlanmaktadır [1]. Özellikle 1995 yılından sonra, güç kalitesi üzerine yapılan çalışmalarda önemli derecede artış olduğu görülmektedir. Güç kalitesine olan bu ilginin artış nedenleri, şu şekilde sıralanabilir [2,3]:

- Güç sisteminin herhangi bir bölümünde meydana gelen güç kalitesi probleminin enterkonnekte sistemden dolayı sadece oluştuğu bölümü değil de bütün sistemi etkilemesi.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ve yerel elektrik santralleri olarak adlandırılan elektrik üretim sistemlerinin, enerji sistemlerine bağlanması ile yeni güç kalitesi problemlerinin ortaya çıkması.
- Elektrik üretimi ve dağıtımının rekabete açılması ile kullanıcılara kendi elektrik enerji sağlayıcısını seçme imkanı sunulması. Bu seçimde, güç kalitesinin en önemli kriter olması.
- Kullanımı gittikçe yaygınlaşan; tasarruflu aydınlatma cihazları, ayarlanabilir hız sürücüler ve mikroişlemci tabanlı cihazların harmonik üretmesi. Buna bağlı olarak sistem üzerindeki gerilimlerin dalga şekillerinde bozulmaların oluşması.
- Gerilim dalga şeklindeki bozulmalara karşı hassas olan elektriksel cihazların kullanımının artması.
- Tüketicilerin güç kalitesi problemlerine karşı, daha duyarlı ve bilgili hale gelmesi.

Bir güç sistemi üzerinde meydana gelen güç kalitesi problemlerinin çözümü için, sistem üzerindeki parametrelerin sürekli ve standartlara uygun olarak izlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle güç kalitesi izleme sistemleri, güç sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Güç sisteminde belirlenen noktalara yerleştirilen izleme sistemleri ile güç kalitesi olaylarının tespiti ve analizi sağlanmaktadır. Bu izleme sistemleri; ölçüm yapılan sisteminin güç kalitesi performansının belirlenmesi, sistemde meydana gelen bozulma türünün ve kaynağının tespit edilmesi, gerekli işletim şartlarının belirlenmesi gibi işletme ve koruma hakkında önemli bilgiler sunmaktadır [4]. İzleme sistemleri; iletişim

teknolojileri, veri depolama kapasitesi ve veri işleme gücündeki artışa bağlı olarak geniş ölçekli izleme ve verileri sürekli olarak kaydetme imkanı bulmuştur. Güç kalitesi izleme sistemleri, yaygın olarak iki kategoride değerlendirilmektedir. Birinci kategoride yer alan sistemler; gerilim, akım ve güç gibi elektriksel parametrelerin ölçümünün yanı sıra aşırı gerilim, düşük gerilim ve kesinti gibi parametrelerinde ölçümünü gerçekleştirmektedir. İkinci kategorideki sistemler; IEEE, IEC gibi standartlara göre güç kalitesi olaylarını sınıflandırarak bu sonuçları kendi panellerinde veya bilgisayar ortamında görüntülemektedir. Bu sistemler; güç kalitesi ölçümü, sonuçların depolanması ve analizi gibi işlevleri de yerine getirmektedirler. Güç kalitesi sistemlerinin türleri ve işlevlerini özetleyen bilgiler Tablo 1.1’de verilmiştir [5].

Tablo 1.1. Güç kalitesi izleme sistemlerinin işlevlerine göre sınıflandırılması.

Türü	Temel Fonksiyonları
1. Nesil Güç Kalitesi İzleme Sistemleri	Elektrik parametreleri (Temel) + Güç kalitesi (Seçime Bağlı)
2. Nesil Güç Kalitesi İzleme Sistemleri	Güç Kalitesi parametreleri ve olayları + Seri haberleşme + Görüntü
3. Nesil Güç Kalitesi İzleme Sistemleri	Güç Kalitesi + Yüksek hızda iletişim + İstatistiksel analiz + Web tabanlı

Güç kalitesinin izlenmesindeki temel unsurlardan en önemlisi, güç kalitesi olaylarından kaynaklanan ekonomik kayıplardır. Elektrikli cihazlar ve üretim süreçleri üzerinde meydana gelen güç kalitesi problemleri; üretimde kullanılan cihazların hasar görmesi, üretim aksaklıkları ve diğer anormal durumlara yol açmaktadır. Bununla birlikte, güç kalitesinin izlenmesi tek başına yeterli değildir. Fakat izleme işlemi, güç kalitesi problemlerine çözüm bulunmasında öncelikli olarak ihtiyaç duyulan bir süreçtir [6].

Bilişim ve iletişim teknolojilerinin gelişimi ve dünya çapında birçok sunucuya internet üzerinden erişilebilir olması, güç sistemlerinde bu alanların kullanımını gittikçe arttırmıştır. Ağ bağlantıları sayesinde, güç sistemine ait elektriksel verilerin paylaşımı kolaylaşmıştır [7]. Tüm bu ilerlemelerin paralelinde, güç kalitesi izleme sistemleri alanında yenilikçi birçok çalışma ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalar bir sonraki alt bölümde detaylı olarak irdelenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

Güç kalitesi izleme sistemleri alanında yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda, farklı yöntemlere sahip birçok izleme yapısı bulunmaktadır. Güç kalitesi parametrelerinin izlenmesi konusunda yapılan ulusal kapsamdaki en önemli çalışmalardan birisi “Güç Kalitesi Milli Projesi”dir. Bu projenin “Türkiye Elektrik İletim Sistemi Güç Kalitesi İzleme Projesi” isimli alt projesinde, yeni bir güç kalitesi izleme sistemi tasarlanmış ve Türkiye genelinde belirlenen noktalara yerleştirilmiştir. Geliştirilen izleme sistemi, güç kalitesi parametrelerinin IEC 61000-4-30 standardına uygun olarak ölçümünü yapmakta ve bir merkeze aktarmaktadır. Bu ölçümleri, Mini-ITX PC üzerinde çalışan veri işleme yazılımı sayesinde yine standartlara uygun olarak analiz etmektedir [8, 9, 10].

[2]’de, Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında TEİAŞ Ototransit Transformatör Merkezi’nde gerçekleştirilen güç kalitesi ölçümleri incelenmiş ve bu ölçüm sonuçları standartlara göre değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışma içerisinde, ölçümü gerçekleştirilen sistemin çeşitli simülasyonları yapılmıştır. [9]’da, internet üzerinden haberleşen bir güç kalitesi izleme sisteminin donanımsal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu izleme sistemi, Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında kullanılan sistemin donanımsal tasarımlarını içermektedir. [11]’de yapılan tezde, Eskişehir kent merkezinin bir bölümüne hizmet veren beş adet 6.3 kV’luk elektrik enerjisi yer altı besleme hatlarına veri toplama ve analiz kartı yerleştirilmiştir. 2007-2008 yıllarında elde edilen güç kalitesi parametrelerine ait analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır. [12]’de, Kahramanmaraş kent merkezinde bulunan dokuz trafo binasında 3 ile 15 gün arasında değişen güç kalitesi ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde, güç analizörleri yardımıyla; akım analizleri, gerilim analizleri, dalga formu analizi, harmonik analizi, aktif-reaktif ve görünür güç analizleri gerçekleştirilmiştir. [13]’de yapılan çalışmada ise elektrik dağıtım sistemlerindeki güç kalitesinin belirlenmesi için bir güç kalitesi izleme sistemi oluşturulmuştur. Bu izleme sistemi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi dağıtım trafo merkezine yerleştirilmiştir. Aralık 2008 tarihinden itibaren 8 aylık güç kalitesi izleme işlemi gerçekleştirilmiş ve elde edilen güç kalitesi verileri bilgisayar ortamına aktarılarak analizler yapılmıştır.

[14]’te, ENTES firmasının güç kalitesi izleme sistemleri ile ilgili piyasada ürettiği ENTBUS web tabanlı güç kalitesi izleme sistemi bulunmaktadır. Bu sistemde, Sayısal Sinyal İşlemcisi (Digital Signal Processor-DSP) tabanlı izleme sistemi yardımıyla elde edilen güç parametreleri, internet üzerinden bir sunucuya aktarılarak depolanmıştır.

Kullanıcılar, sisteme yeni bir ENTBUS tabanlı izleme sistemi ekleyebilmektedir. Ayrıca kullanıcılar, tasarlanan web sitesi üzerinden, kendi sistemlerine ait çeşitli güç kalitesi parametrelerinin raporlarını elde edebilmektedir. Bu raporlar, sayısal bilgilerden ve bu sayısal bilgilerin zamana göre grafiklerinden oluşmaktadır. [15]'de yapılan çalışmada, piyasada bulunan bir güç analizörü kullanılarak internet tabanlı prototip bir izleme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistemde, sunucu bilgisayarda kayıt altına alınan güç kalitesi verilerine internet üzerinden erişilip, gerekli sorgu ve raporlamaların alınabilmesi için çeşitli yazılımlar hazırlanmıştır.

[16]'daki çalışmada alçak gerilim güç sistemlerinde güç kalitesinin belirlenmesine yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında kurulan deneysel enerji dağıtım sisteminden elde edilen veriler, bilgisayar ortamında LabVIEW yazılımı ile analiz edilmiştir. [17]'de, güç kalitesinin internet tabanlı ölçüm ve analizine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, tasarlanan bir ölçme kartı ile akım ve gerilim bilgileri okunmuş, veri toplama kartı aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan bu veriler, LabVIEW programında hazırlanan yazılımlar yardımı ile eşzamanlı olarak analiz edilmiştir. Ölçümü ve analizi yapılan güç kalitesi verileri, internet ortamına aktararak internet tabanlı bir güç kalitesi izleme sistemi oluşturulmuştur. [18]'de yapılan çalışmada, endüstriyel tesislerdeki doğrusal olmayan yüklerden elde edilen akım ve gerilimlerin harmonik analizleri gerçekleştirilmiştir. Veri toplama kartı ile elde edilen bilgiler, bilgisayar ortamına aktarılmış ve LabVIEW programı ile oluşturulan bir yazılım aracılığı ile çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. [19]'da, LabVIEW tabanlı gelişmiş bir güç kalitesi izleme sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, veri toplama kartı yardımı ile güç kalitesi verilerini bilgisayar ortamına aktararak güç kalitesi analizleri gerçekleştirmiştir.

[20]'de, güç kalitesi parametrelerinin sürekli olarak görüntülenmesi amacıyla bir izleme sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışmada, MATLAB sunucu sayfaları kullanılarak güç kalitesinin uzaktan görüntülenmesi ve analizleri yapılmıştır. [21]'de gerçekleştirilen çalışmada ise şebeke üzerinden elde edilen akım ve gerilim verileri üzerinde güç kalitesi parametrelerinin yazılımsal olarak hesaplamasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Güç kalitesi parametrelerinin hesaplanmasında, ANSI C programlama dili kullanılmıştır. Ayrıca, hesaplanan güç kalitesi parametrelerinin kullanıcılar için kolay şekilde izlenmesi amacıyla C# programlama dilinde bir ara yüz hazırlanmıştır.

[22]'de yapılan çalışmada ise DSP ve mikrodenetleyiciler kullanılarak güç kalitesi problemlerinin belirlenmesi ve bu problemlere ait bilgilerin hazırlanan bir web sunucusuna

aktarılması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir. [23, 24]'de yapılan çalışmalarda, FPGA tabanlı güç kalitesi izleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu izleme sistemleri ile güç sistemi üzerindeki çeşitli güç kalitesi parametrelerinin izlenmesi sağlanmıştır. [25]'de, güç kalitesi bozulmalarının tespiti için FPGA tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem ile güç kalitesinde meydana gelen bozulmaların gerçek zamanlı tespiti sağlanmıştır. [26]'daki çalışmada ise sinyal işleme algoritmaları ile güç kalitesi olaylarının sınıflandırılması yapılmıştır.

Güç kalitesi izleme sistemleri konusunda uluslararası alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde; ABD Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute-EPRI) tarafından 1992–1994 yılları arasında, ABD'de 24 ayrı dağıtım şirketinin faaliyet alanı içindeki 300 farklı noktada değişik güç kalitesi problemleri için yapılan ölçümler, uluslararası alanda gerçekleştirilen en kapsamlı güç kalitesi izleme sistemi olarak ön plana çıkmaktadır [27]. Bu ölçüm sonuçları incelenerek, güç kalitesi ile ilgili önemli bilgilere ulaşılmıştır. 2001-2002 yıllarında aynı kuruluş DPQ-II adı verilen farklı bir program yürütmüştür [28, 29]. Bu araştırma sonucunda tüketiciler açısından karşılaşılan en yaygın problemlerin; gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, geçici durumlar, harmonikler ve topraklamadan kaynaklı problemlerin olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde 1991 yılında Kanada Elektrik Birliği (Canada Electrical Association-CEA), Kanada genelindeki güç kalitesini araştırmak için üç yıllık bir çalışma yürütmüştür [30]. 550 farklı nokta için üç yıl boyunca güç kalitesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçümler; mesken, ticari ve endüstriyel yükler için ayrı ayrı gruplandırılmış ve böylece bu yükler için güç kalitesi açısından değişik genellemelerde bulunulmuştur. [31]'deki çalışmada, I-Grid olarak adlandırılan web tabanlı bir güç kalitesi izleme sistemi tanıtılmıştır. I-Grid kapsamında, DSP tabanlı I-Sense isimli bir güç kalitesi izleme cihazı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu izleme cihazının Amerika ve Kanada ülkelerinde 50.000 farklı noktaya yerleştirilmesi planlanmıştır.

[32]'de, düşük maliyetli bir ölçüm sisteminin yanı sıra, akıllı sensörler kullanılarak dağıtık güç kalitesi ölçüm sistemleri geliştirmedeki sorunlar ve eğilimler incelenmiştir. Bu amaçla, web tabanlı bir ölçüm sistemi sunulmuştur. [33-37]'de, güç kalitesi parametrelerinin ölçümü ve analizine yönelik internet tabanlı çalışmalar sunulmuştur. [38]'de, internet tabanlı bir güç kalitesi izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde, farklı firmalara ait farklı ölçüm cihazlarından TCP/IP protokolü kullanarak veri toplanmasını

sağlayan JAVA tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım aracılığıyla, ölçüm cihazlarından toplanan verilere ilişkin web ortamında çeşitli raporlar sunulmuştur.

[39]'da, PEGASYS yazılımı ve bir güç kalitesi cihazı kullanılarak, web tabanlı çok kanallı bir güç kalitesi izleme sistemi önerilmiştir. Bu izleme sistemi, Hong-Kong'ta 75 farklı noktaya yerleştirilerek çeşitli güç kalitesi ölçümleri yapılmıştır. [40]'daki çalışmada, EtherCAT tabanlı dağıtık bir güç kalitesi izleme sistemi sunulmuştur. Özellikle akıllı şebekelerde kullanılabilecek bir yapı sunan bu çalışmada, güç kalitesi verilerinin elde edilmesi ve analizinde FPGA ve PowerPC teknolojilerinden yararlanılmıştır. Bu çalışmada FPGA teknolojisi, sadece ADC kontrolünde ve verilerin elde edilmesi aşamasında kullanılmıştır.

[41]'de, güç kalitesi parametrelerinin sınıflandırılmasına yönelik olarak DSP-FPGA tabanlı gerçek zamanlı bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. [42]'de, FPGA kullanılarak bir güç kalitesi izleme ve ölçme sisteminin prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir. [43]'de, DSP ve sanal ölçüm teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilen dağıtık bir güç kalitesi izleme sistemi önerilmiştir. [44]'de, güç kalitesi arızalarının tespit ve analizi için sanal bir ölçüm cihazı tasarlanmıştır. [45]'de, güç kalitesi verilerinin analizi için bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm sisteminde kullanılan güç kalitesi izleme sistemi, bilgisayar ve veri toplama kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. [46]'da, güç kalitesi izleme sistemi için USB ve PDA tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. [47]'de yapılan çalışmada güç sistemi üzerindeki gerilim harmoniklerinin izlenmesine yönelik FPGA tabanlı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. [48-50]'de yapılan çalışmalarda ise güç kalitesinde meydana gelen olayların sınıflandırılması ile ilgili çeşitli uygulamalar yapılmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Organizasyonu

Bu tez çalışması ile internet tabanlı yeni bir güç kalitesi izleme sistemi ve bu sisteme ait donanım ve yazılımların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen bu izleme sistemi ile öncelikle, güç sistemi işletmeleri ve güç sistemine bağlı tüketicilerin sisteme ait güç kalitesi verilerini rahatlıkla izleyebilmeleri hedeflenmiştir. Daha sonra, güç kalitesini bozan etkenlerin nelerden kaynaklandığının tespit edilmesi ve varsa gerekli önlemlerin zamanında alınabilmesi gibi bazı avantajların sağlanması amaçlanmıştır. Günümüzde, bu amaçla kullanılan bazı ulusal ve uluslararası alanda izleme sistemleri bulunmaktadır. Fakat

bu izleme sistemlerinin büyük bir çoğunluğu maliyetlerinin yüksek olması, kullanımlarının zor olması ve güncelleme yapılamaması gibi problemlere sahiptirler. Örneğin bir işletme, kendi güç sistemi üzerinde meydana gelen harmonikleri çevirim dışı izlemek istediğinde bile büyük maliyetlerle karşılaşabilmektedir. Bu tez çalışmasında, hem maliyet hem de kullanım kolaylığı açısından oldukça büyük avantajlara sahip olacak, geniş ölçekli bir güç kalitesi izleme sisteminin tasarlanması amaçlanmıştır. Tasarlanan internet tabanlı güç kalitesi izleme sisteminin, bireysel kullanıcılardan büyük işletmelere kadar yaygın kullanım alanı bulacak bir yapıda olması hedeflenmiştir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen yeni bir güç kalitesi izleme sistemi; güç sistemine ait harmonik, güç faktörü, aktif güç, reaktif güç, frekans gibi elektriksel büyüklüklerin ölçümlerini hem sürekli hem de standartlara uygun olarak gerçekleştirmektedir. Ayrıca izleme sistemi, güç sistemi üzerinde meydana gelen ani gerilim yükselmeleri, gerilim çökmeleri ve kesinti gibi güç kalitesi olaylarının tespitini yapmaktadır ve bu olayları kayıt altına alacak bir yapıdadır. İzleme sisteminde kullanılan donanımlar, sinyal işleme alanında kullanılan güncel teknolojileri barındırmaktadır. Geliştirilen izleme sistemi, internet/intranet haberleşme teknolojisini kullanarak, farklı ölçüm noktalarından elde ettiği güç kalitesi parametrelerini yüksek hızda ve gerçek zamanlı olarak veri merkezindeki sunucu bilgisayara aktarmaktadır.

Tez çalışmasının diğer bir amacı da, güç kalitesi izleme sisteminin elde ettiği güç kalitesi verilerini işleyecek ve görsel olarak kullanıma sunacak çeşitli bilgisayar yazılımlarının hazırlanmasıdır. Kullanım açısından oldukça etkin bir yapıya sahip olan bu yazılımlar sayesinde kullanıcılar, kendi güç kalitesini sürekli olarak denetleme imkanı bulacaktır.

Çalışma kapsamında tasarlanan İnternet Tabanlı Güç Kalitesi İzleme Sistemi (İGKİS), Tunceli Üniversitesi yerleşkesinde bulunan Mühendislik Fakültesi, Tunceli Meslek Yüksekokulu ve AR-GE Laboratuvarlarının elektrik dağıtım panolarına yerleştirilmiştir. Bu noktalardan elde edilen güç kalitesi izleme verileri, Tunceli Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Laboratuvarında oluşturulan bir veri merkezine, eş zamanlı olarak aktarılmıştır. Veri merkezinde bulunan bir sunucu yardımı ile elde edilen güç kalitesi verileri, bilgisayar tabanlı hazırlanan güç kalitesi yazılımları aracılığı ile görüntülenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları, güç kalitesi standartları referans alınarak değerlendirilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinin organizasyonu aşağıda verilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde; hem güç kalitesi hem de ulusal ve uluslararası güç kalitesi standartları hakkında bilgiler sunulmuştur. Bu bölüm altında, İGKİS bünyesinde gerçekleştirilen güç kalitesi ölçümlerine ait standartlar çerçevesinde referans bilgilere de yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde; gömülü sistemler ve bu sistemlerin içerisinde kullanılan çekirdek yapıları hakkında bilgiler verilmiştir. İGKİS içerisinde yer alan izleme sisteminin yapısını oluşturan FPGA teknolojisi ile ilgili detaylı bilgiler ve FPGA programlamasında kullanılan yazılım dilleri hakkında genel bilgiler de, bu bölüm içerisinde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; İGKİS'nin donanımsal ve yazılımsal mimarisi hakkında geniş bilgiler bulunmaktadır. Öncelikle, İGKİS kapsamında hazırlanan izleme sisteminin donanımsal olarak çalışmasına ait detaylar verilmiştir. Bu izleme sisteminin akım, gerilim bağlantıları ve bu sinyallerin fiziksel olarak elde edilmesi gibi yapılar bu bölümde sunulmuştur. Daha sonra FPGA ve bilgisayar tabanlı hazırlanan yazılımlar ve sunucu tarafında çalışan veritabanı, otomasyon ve web sayfası tasarımları da, bu bölümde ele alınmıştır.

Beşinci bölümde, İGKİS'nin saha uygulaması ve bu uygulamalardan elde edilen güç kalitesi verilerinin değerlendirilmesi hakkında bilgiler sunulmuştur. Tunceli Üniversitesi yerleşkesinde yer alan Mühendislik Fakültesi, Meslek Yüksekokulu ve AR-GE Laboratuvarlarından elde edilen ölçüm sonuçlarına ait sayısal ve grafiksel veriler bu bölüm içerisinde verilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara ilişkin genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Altıncı bölümde, tezin sonuçları irdelenmiş ve orijinal katkıları vurgulanmıştır.

Yedinci bölümde, ileriye yönelik uygulama alanları ve öneriler tartışılmıştır.

1.4. Tezin Bilime Katkısı

Bu tez çalışmasında, gün geçtikçe önemli bir araştırma konusu olan güç kalitesi alanında etkili bir izleme sistemi yaklaşımı sunulmuştur. Tasarlanan bu izleme sistemi, birçok ölçüm noktasından eş zamanlı ölçüm yapabilen ve bünyesinde yenilikçi yaklaşımları barındıran bir mimariye sahiptir. İzleme sistemi, herhangi bir bilgisayar bağlantısına gereksinim duymadan sadece sistemin internet bağlantısı sağlanarak veri merkezi ile iletişim kurma yeteneğine sahiptir. Böylece, geleneksel güç kalitesi izleme sistemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldıran bir yapı sunulmaktadır.

Literatürdeki güç kalitesi izleme sistemleri incelendiğinde, çoğu izleme sisteminin bilgisayara bağımlı bir şekilde çalıştığı ve elde edilen güç kalitesi parametrelerini piyasada bulunan yazılımlarla elde ettikleri görülmektedir. Ayrıca, bu izleme sistemleri içerisinde yer alan veri toplama kartı gibi donanımların, piyasada satışı yapılan genel amaçlı donanımlar olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında hazırlanan donanımlar ve yazılımlar, doğrudan amaca yönelik ve özgün olarak bu tez kapsamında hazırlanmıştır. İzleme sistemini oluşturan birimlerden her biri birbirinden bağımsız modüller biçimde çalışabilmektedir. Sistemi oluşturan birimlerden herhangi biri çıkarılarak, yerine yeni ve daha gelişmiş olanı eklenebilmektedir. Bu durumlar göz önüne alındığında teknolojiye gelişmelere adapte edilebilecek bir izleme sistemi ortaya çıkmakta ve bu durum sistem için yaygın bir kullanım alanı sağlamaktadır.

Bu tez çalışması, özellikle alçak gerilim kullanıcılarının güç kalitesinden kaynaklanan maddi hasarlarının, kendilerinden mi yoksa enerji dağıtıcı firmadan mı kaynaklı olduğunun tespit edilmesinde büyük bir avantaj sunacaktır. Tüketiciler, geliştirilen bu izleme sistemi ile kendi enerji akışlarını izleyebilecek ve kayıt altına alabileceklerdir. Herhangi bir problemle karşılaşılması durumunda, güç sistemlerine ait enerji verilerini raporlayarak sorunun kaynağını tespit edebileceklerdir. Böylece, yasal süreçlerde kendilerine büyük bir avantaj sağlayacaklardır.

Bu tez çalışmasında hazırlanan izleme sistemi, literatürde yaygın olarak kullanılan DSP ve mikroişlemcilerin yerine, sinyal işleme alanında yaygınlaşan FPGA teknolojisini kullanmaktadır. FPGA ile gerçekleştirilen sinyal işleme algoritmaları, bu cihazın sinyal işleme alanında kullanımına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, güç kalitesi çalışmalarında gerçek verilerin elde edilmesinde yaşanan zorluklardan dolayı, genellikle yapay veriler kullanılmaktadır. İGKİS ile elde edilen gerçek güç kalitesi verileri, bu alanda yapılacak olan çalışmalara büyük katkı sağlayacaktır.

2. GÜÇ KALİTESİ TANIMI, STANDARTLARI VE PARAMETRELERİ

Tezin bu bölümünde, güç kalitesi ile ilgili genel bilgilerin yanı sıra düşük güç kalitesinin güç sistemleri üzerinde meydana getirdiği temel problemler ele alınmıştır. Güç kalitesi ile ilgili ön plana çıkan, ulusal ve uluslararası çeşitli standartlar hakkında temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında tasarlanan izleme sisteminin referans aldığı ölçüm parametreleri, teknikleri ve süreleri ile ilgili detaylı bilgilere de bu bölümde yer verilmiştir.

2.1. Güç Kalitesi Tanımı

Güç kalitesi için çeşitli kişi ve kurumlar tarafından farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Aynı zamanda, bu alandaki kaynaklar “*güç kalitesi*” terimini çeşitli biçimlerde kullanmaktadır. Güç kalitesi için kullanılan yaygın terimler arasında; “*servis kalitesi*”, “*gerilim kalitesi*”, “*akım kalitesi*”, “*tedarik güvenirliliği*”, “*besleme kalitesi*” ve “*tüketim kalitesi*” terimleri yer almaktadır [51, 52]. IEEE 1159 standardına göre güç kalitesi; “hassas elektronik cihazlara güç verme ve topraklama işlemlerinin bu cihazlara uygun bir biçimde gerçekleştirilmesidir”. IEEE 100 Standart Terimleri Sözlüğü’ne göre ise güç kalitesi; “Elektronik cihazlara güç verme ve topraklama işlemlerinin, bu cihazların işleyişine ve kablolama sistemi ile sisteme bağlı diğer ekipmanlara uygun olması” olarak tanımlanmıştır.

Alternatif akım güç sistemleri, belirli bir frekans ve belirli bir genlikte çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Dalga şeklinde, frekansta veya genlikte meydana gelen önemli sapmalar, potansiyel bir güç kalitesi problemini oluşturur. Güç sistemlerindeki akım ve gerilim arasında, çok yakın bir ilişki vardır. Generatörler tarafından mükemmele yakın sinüsoidal gerilim üretilmesine rağmen, empedans üzerinden geçen akım, gerilim dalga şeklinde çeşitli bozulmalara neden olmaktadır [53]. Örneğin;

- Sistemde meydana gelen kısa devre akımları, duruma göre gerilim sıçramasına veya tamamen gerilimin kesilmesine neden olabilirler.
- Güç sistemi içerisinde oluşan ve aydınlatmadan kaynaklı akım darbeleri, sıklıkla yalıtım üzerinde ani yüksek gerilim darbelerine ve kısa devre gibi diğer olayları oluşturabilirler.

- Harmonik üreten yüklerden dolayı bozulan akımlar, sistem üzerindeki gerilimlerde de bozulmaya neden olurlar. Dolayısıyla, son kullanıcılar bozulmuş bir gerilime maruz kalırlar.

Güç kalitesi teriminin yıllara göre kullanımındaki değişim incelendiğinde, özellikle son yıllarda bu alanda ciddi bir artışın olduğu görülmektedir [3]. Yük akımları üzerine sinüsoidal bir gerilim uygulandığında, yük akımları belirli bir frekans ve genliğe sahip olur. Yük akımının dalga şekli sinüsoidal ise yük “doğrusal” olarak tanımlanır. Eğer yük akımının dalga şekli bozulmuş ise yük “doğrusal olmayan” şeklinde tanımlanır. Yük akımındaki bu bozulmalar, besleme sisteminin geriliminde de çeşitli bozulmalara yol açar. Böylece, güç sistemi üzerinde düşük kaliteli bir güç meydana gelir.

2.2. Düşük Kaliteli Gücün Etkileri

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak tüketiciler, güç elektroniği elemanlarından oluşan teknolojileri yaygın olarak kullanmaya başladılar. Yerleşim birimlerindeki tüketiciler sıklıkla; televizyon, mikrodalga fırınlar, kişisel bilgisayarlar, iklimlendirme cihazları, bulaşık makinesi gibi ev aygıtlarını sıklıkla kullanmaktadırlar. Bunun yanında iş ve ofis alanlarında; iş istasyonları, kişisel bilgisayarlar, fotokopi makineleri, yazıcılar ve aydınlatma gibi cihazlar yaygın olarak bulunmaktadır. Öte yandan endüstriyel kullanıcılar; programlanabilir lojik kontrolörler, otomasyon sistemleri, değişken hız sürücüler, eviriciler, CNC tezgahları gibi endüstriyel cihazları yaygın olarak kullanmaktadır. Bu cihazların birçoğu, güç kalitesi bozulmalarına karşı oldukça hassastır. Düşük kaliteli gücün etkilerini tespit etmeye yönelik olarak farklı ülkelerde birçok çalışma ve araştırma yürütülmüştür [28, 29, 54-58]. Düşük kaliteli gücün etkilerini, hem tüketici hem de şebeke işleticileri açısından ayrı ayrı değerlendirmek gerekir.

2.2.1. Tüketiciler Açısından Düşük Kaliteli Gücün Etkileri

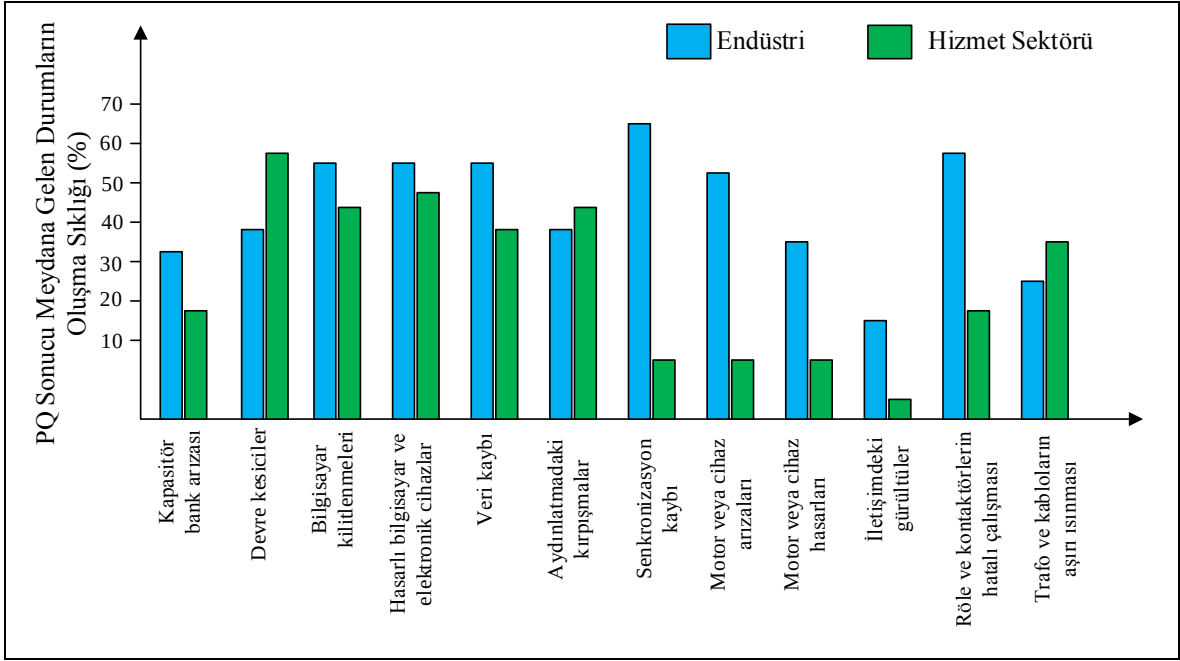
2001’de başlayan bir araştırmada [55], endüstriyel sistemlerin uzun ve kısa süreli kesintilerden çok daha fazla etkilendiği görülmüştür. Gerilim çökmelerinin; yarı iletken teknolojilerinde, seri üretim sanayisinde, iletişim sektörü gibi alanlarda temel güç kalitesi problemi oluşturduğu gözlemlenmiştir. 2001 yılında Leonardo Güç Kalitesi Girişiminin (LPQI) sekiz Avrupa Birliği ülkesinde yapmış olduğu araştırmada, tüketicilerin kendi

bölgelerinde kalitesiz güçten kaynaklanan rahatsızlıklardan duydukları şikayetleri Tablo 2.1’de gösterilen veriler ile şebeke işletmecilerine rapor ettikleri belirlenmiştir.

Tablo 2.1. LPQI’nin sekiz AB ülkesinde yapmış olduğu araştırmada tüketicilerin raporladığı güç kalitesi problemleri.

Algılanan Problem	Etkilenen Cihazlar	Raporlanan PQ problemi
Bilgisayar kilitlenmeleri ve veri kayıpları	Bilgi teknolojileri ekipmanları	Kaçak toprak akımının varlığı iletkenlerde küçük gerilim düşümlerine neden olur.
Cihazlar arasında senkronizasyon kaybı	İşlem kontrol elemanlarının hassas ölçümleri	Şiddetli harmonik bozulmalar bir periyot içerisinde ek sıfır geçişleri oluşturur.
Bilgisayar ve elektronik cihaz hasarları	Bilgisayar ve yazıcı gibi elektronik cihazlar	Yıldırım düşmesi veya ani anahtarlama
Işık titremeleri, yanıp sönme veya kararırma	Kırpışmalar, aydınlatma cihazlarının yanıp sönmesi veya tamamen sönmesi ve diğer görsel ekranlar	Hızlı gerilim değişimleri
Motorların ve cihazların bozulması. Cihazlarda ek ısınma, verimsiz çalışma ve cihaz ömürlerinin kısalması	Motorlar ve işlem cihazları	Güç sisteminde gerilim ve akım harmoniklerinin varlığı
Koruma ekipmanlarının sorunlu tetiklenmesi	Röleler, kesiciler ve kontaktörler	Gerilim çökmesinden dolayı oluşan bozulmuş dalga şekli
İletişim hatlarında gürültü paraziti	Telekomünikasyon sistemi	Elektriksel gürültü

2008’de Manson ve Targoz tarafından yayınlanan raporda; endüstriyel tesislerin ve bankalar, haberleşme, ulaşım gibi hizmet sektörlerinin harmonik problemlerinden daha yoğun etkilendikleri belirlenmiştir. Aynı raporda, hizmet sektöründe düşük kaliteli gücün; hatalı devre kesici sinyalleri ve veri kayıpları gibi temel problemleri oluşturduğu rapor edilmiştir [56]. Şekil 2.1’de, LPQI tarafından yapılan araştırmaya ait endüstri ve hizmet sektöründeki sitemlerde karşılaşılan düşük güç kalitesi problemlerinin oluşma sıklıklarını gösteren grafik verilmiştir.

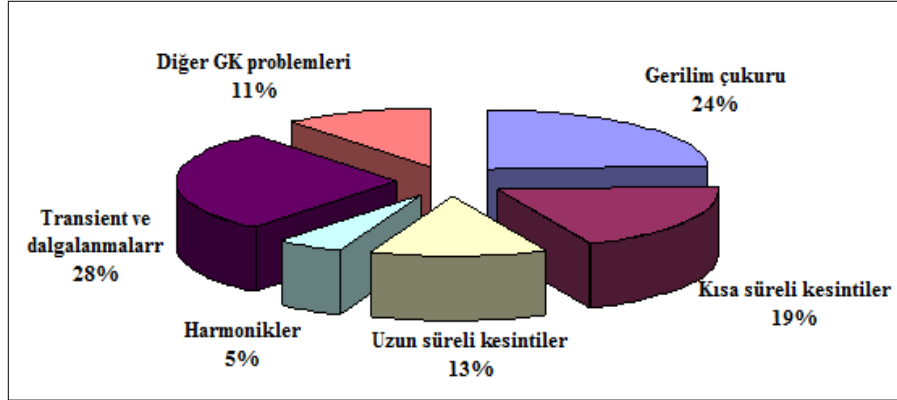


Şekil 2.1. Endüstri ve hizmet sektöründeki sistemler için LPQI tarafından yapılan araştırmaya ait sonuçları gösteren grafik.

Düşük kaliteli gücün etkilerinin tespiti için yapılan bir diğer araştırma, 2000 yılında EPRI ve CEIDS tarafından Amerika Birleşik Devletlerinde yer alan endüstriyel kullanıcılar üzerine gerçekleştirilmiştir [57]. Araştırma sonuçlarına göre düşük güç kalitesinden en çok etkilenen cihazların başında %43'lük oran ile bilgisayarlar ve mikroişlemci tabanlı cihazlar gelmektedir. Bu cihazları %13'lük oran ile ayarlanabilir hız sürücülerini takip etmektedir. Bu dağılımın %8'lik kısmını aydınlatma cihazları, %5'ini motorlar ve %1'ini röleler oluşturmaktadır. Düşük güç kalitesinden etkilenen diğer cihazlar ise %30'luk oranı oluşturmaktadır. 2001-2002 yılları arasında aynı kuruluşlar, DPQ-II adı verilen farklı bir araştırma programı yürütmüştür. Bu araştırma sonucunda; gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, geçici durumlar, harmonikler ve topraklamadan kaynaklı problemlerin tüketiciler açısından karşılaşılan en yaygın problemler olduğu tespit edilmiştir [28, 29].

Düşük kaliteli güce bağlı olarak çeşitli üreticiler, büyük miktarda ekonomik kayıplara uğramaktadır. Farklı araştırmalar, kısa süreli kesintilerin ve gerilim çökmelerinin ekonomik kayıplara neden olan temel güç kalitesi problemi olduğunu göstermiştir [58]. Avrupa Güç Kalitesi'nin yayımladığı rapora göre, güç kalitesi problemlerinden kaynaklı olarak EU-25 ülkelerindeki yıllık toplam mali kayıp 150 milyar Euro civarındadır. 2003-2004 yılları arasında yapılan iki yıllık araştırma sonucuna göre EU-25 ülkelerindeki çeşitli

güç kalitesi problemlerinin neden oldukları mali kayıpların oranı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. EU-25 ülkelerindeki çeşitli güç kalitesi problemlerinin neden oldukları mali kayıp oranları.

2.2.2. Şebeke İşletmecileri Açısından Düşük Kaliteli Gücün Etkileri

Şebeke işletmecileri açısından, generatörler tarafından üretilen standartlara uygun kaliteli gücün dağıtım sistemine bağlanan kullanıcılara aktarılması oldukça zordur. Güç kalitesi problemi olan harmonikler, şebeke bileşenleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Özellikle güç elektroniği tabanlı cihazlar, harmonik üretirler ve harmonik bileşenlere sahip güç değerleri de sisteminin güç faktörünü azaltarak talep edilen toplam görünür gücün artmasına neden olmaktadır. Harmonik akımlar, şebeke empedansı ile birleştiğinde şebeke üzerinde gerilim bozulmalarına yol açmaktadır. Ayrıca özel durumlarda harmonik akımlar, talep edilen gerilim dalga şeklindeki sıfır geçişlerinin kaymasına neden olmaktadır. Transformatörler, kablolar ve güç faktörü düzeltici kapasitörler şebekede güç kalitesinden en çok etkilenen birimlerdir [54].

2.3. Güç Kalitesi Problemleri

Güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılmasında, farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlardan her biri, problemi sınıflandırmak için belirli bir özellik kullanmaktadır. Bu yaklaşımlardan bazıları, güç kalitesi olaylarını “sürekli durum” ve “geçici durum” şeklinde iki başlık altında sınıflandırmaktadır. ANSI C84.1 gibi bazı yönetmeliklerde güç kalitesi problemlerindeki en önemli faktörün olay süresi olduğu belirtilirken, IEEE 519 gibi

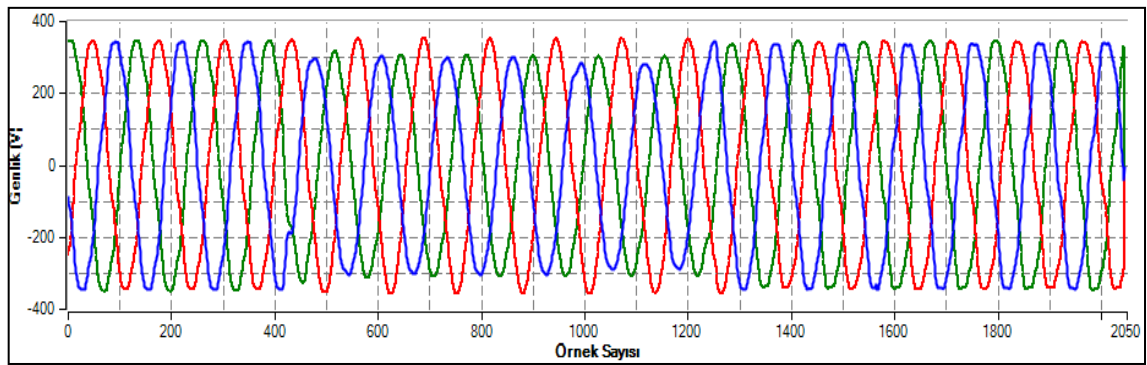
standartlar güç kalitesi problemlerini sınıflandırmada süre ve genliği içeren dalga şeklini kullanmaktadır. Bir diğer standart olan IEC, güç kalitesi problemlerini sınıflandırmada güç kalitesi verisinin frekans aralığını kullanmaktadır. IEC 61000-2-5 standardı, güç kalitesi problemleri için frekans aralığını kullanır ve güç kalitesi problemini üç ana kategoride değerlendirir. Bu kategoriler; düşük frekans (<9 kHz), yüksek frekans (>9 kHz) ve elektrostatik deşarj olayları şeklindedir [51]. Güç kalitesi bozulmalarının karakteristiği aynı zamanda güç kalitesi probleminin tipini de tanımlamaktadır. Gerilim, akım ve frekans gibi sinüs dalgasının temel bileşenlerinde meydana gelen değişimler ile güç kalitesi probleminin karakteristiği hakkında detaylı tanımlamalara erişilebilmektedir. Tablo 2.2’de, güç kalitesi problemlerine ait genel bir yapı verilmiştir. Tabloda, bozulmaya ait dalga şekli ile bozulma nedeni, kaynağı ve etkileri hakkında bilgiler sunulmaktadır. Güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan; gerilim çökmesi, gerilim sıçraması ve kesinti gibi güç kalitesi bozulma türleri ilerleyen kısımlarda detaylı olarak ele alınacaktır.

Tablo 2.2. Güç kalitesi problemlerine ait genel bir yapıyı gösteren tablo.

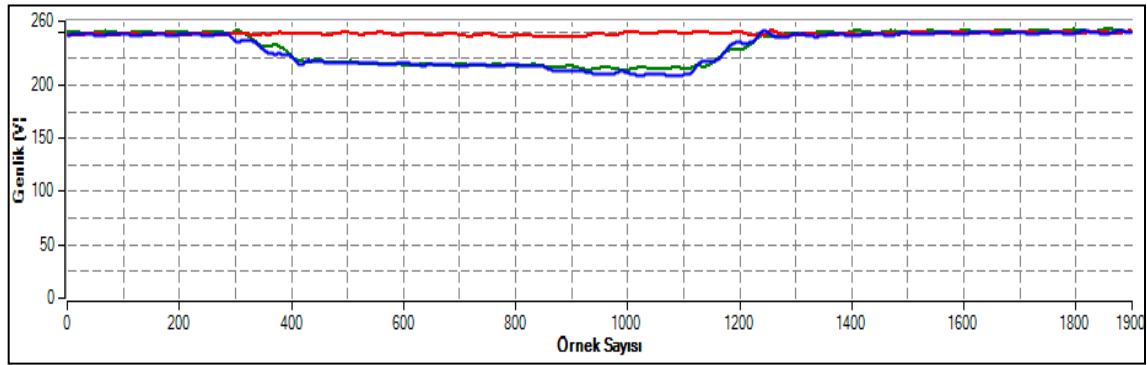
Dalga şekli veya RMS değişimi	Oluşma Nedenleri	Oluşturan Kaynaklar	Etkileri	Çözüm önerileri
	Darbeli geçici durum	-Aydınlatma -Elektrostatik deşarj -Yük anahtarlanması -Kapasitör anahtarlanması	Bilgisayar gibi cihazlara ait entegrelerinin zarar görmesi	-Parafudrlar -Filtreler -Trafo izolasyonu
	Salınımlı geçici durum	-Hat enerjilenmesi -Yük anahtarlanması -Kapasitör anahtarlanması	Bilgisayar gibi cihazlara ait entegrelerinin zarar görmesi	-Parafudrlar -Filtreler -Trafo izolasyonu
	Çökme ve sıçrama (RMS bozulması)	Uzak sistem arızaları	-Motor blokajı ve aşırı ısınması -Bilgisayar arızaları	-Enerji depolama teknolojileri -Kesintisiz güç kaynakları
	Kesintiler	-Sistem koruması -Kesiciler -Sigortalar -Bakım/onarım	-Üretim kayıpları -Cihazların kapanması	-Enerji depolama sistemleri -UPS’ler -Yedek jeneratörler
	Düşük ve aşırı gerilim	-Motor kalkışı -Yük değişimleri	Motor ömürlerinin kısalması	-Gerilim düzenleyiciler
	Harmonik bozulmalar	-Doğrusal olmayan yükler -Sistem rezonansı	-Motor ve trafoların aşırı ısınması -Röle açma -Ölçüm cihazlarının yanlış çalışması	-Aktif veya pasif filtre
	Gerilim kırışmaları	-Kesik kesik yükler -Motor kalkışı -Ark fırınları	-Aydınlatma kırışmaları -Tahriş	-Statik VAR sistemleri

2.3.1. Gerilim Çökmesi

Gerilim çökmesi, elektrik hattına ait gerilimin etkin değerinin kısa bir zaman periyodu boyunca nominal hat geriliminin altına düşmesi olayıdır. Tipik bir gerilim çökmesi; yarım periyot ile 30 periyot arasında ise “anlık”, 30 periyot ile 3 s. arasında ise “kısa süreli” ve 3 s. ile 1 dk arasında ise “geçici” olarak adlandırılır [59]. Gerilim çökmeleri genel olarak, büyük bir yükün devreye girmesiyle veya kesicilerin tekrarlı kapama hareketinden dolayı oluşmaktadır. Şeki 2.3’te, bu tezde tasarlanan İGKİS’den elde edilen bir gerilim çökmesi olayına ait dalga şekli ve RMS değişimi gösterilmiştir.



(a)



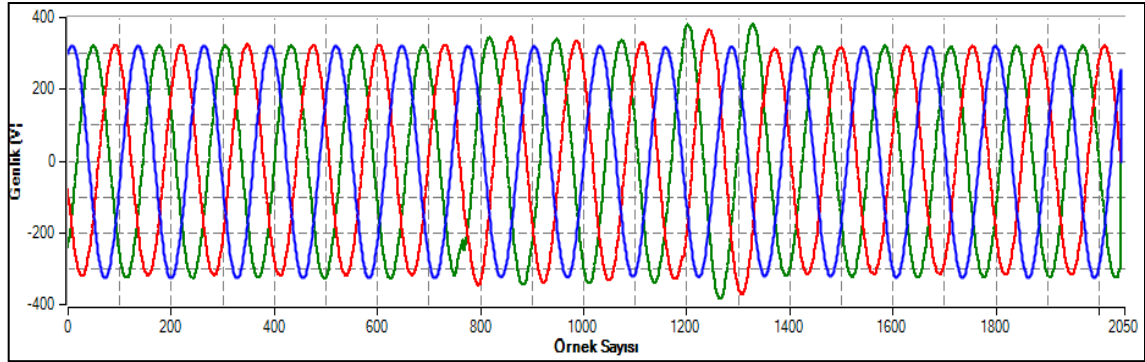
(b)

Şekil 2.3. İGKİS’den elde edilen gerilim çökmesi olayının a) dalga şekli ve b) RMS değişimi. (Tunceli Üniversitesi Meslek Yüksekokulu ölçüm noktası 02.09.2014 saat 05:59)

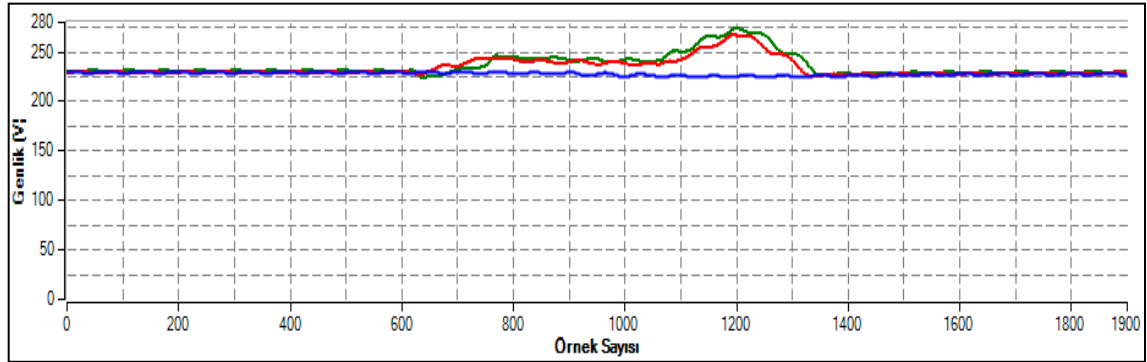
Gerilim çökme olayları; programlanabilir mantıksal kontrolörler, bilgisayarlar ve ayarlanabilir hız sürücüleri gibi gerilim hassasiyetine sahip cihazlarda olumsuz etkilere yol açmaktadır. PLC ve bilgisayar gibi gerilim hassasiyetine sahip cihazların çoğu gerilim büyüklüğünün bir veya iki periyottan fazla sürede % 90’nın altına düşmesinden büyük zararlar görebilmektedir. Özellikle endüstriyel tüketiciler, gerilim çökmelerinin sebep olduğu üretim aksaklıklarından dolayı önemli problemler yaşamaktadırlar [60].

2.3.2. Gerilim Sıçraması

Gerilim sıçraması, gerilimin etkin değerin yarım periyot ile 1 dk zaman aralığında 1.1 pu ve 1.8 pu arasındaki artışı olarak tanımlanmaktadır. Gerilim sıçraması, gerilim çökmesinde olduğu gibi güç sistemindeki arıza durumlarına bağlıdır. Fakat, gerilim çökmeleri kadar yaygın bir güç kalitesi olayı değildir. Şekil 2.4'te, İGKİS'den elde edilen bir gerilim sıçramasına ait dalga şekli ve RMS değişimi gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.4. İGKİS'den elde edilen gerilim sıçraması olayının a) dalga şekli ve b) RMS değişimi.

(Tunceli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ölçüm noktası 21.08.2014 saat 19:00:47)

Gerilim sıçramaları genellikle büyük güçte bir yükün devreden çıkması, kapasitör bankalarının enerjilenmesi veya arıza sonrası hata giderme sürecinde meydana gelmektedir. Gerilim sıçraması, motor veya transformatör gibi ekipmanların yalıtım arızalarına veya açma ve koruma arızalarına neden olabilir. Düşük gerilimde çalışan elektronik cihazların bozulması, kesintisiz güç kaynaklarının arızalanması ve ölçüm-kontrol ekipmanlarının doğru çalışmaması gerilim sıçramalarının oluşturabileceği olumsuz etkiler arasında yer almaktadır.

2.3.3. Kesinti Olayları

Güç kalitesinde kesinti olayı, gerilim genliğinin belirli bir süre zarfında sıfır veya sıfıra yakın bir değerde kalması olarak tanımlanmaktadır. Kesintiler; güç sistemi arızaları, cihaz bozulmaları ve kontrol işlevlerinin bozukluğundan kaynaklanan güç kalitesi olaylarıdır. Güç sistemindeki bir kesintinin tespiti, gerilim değerinin nominal gerilimin % 10'nun altına düşüşü ile belirlenmektedir. Kesinti olayları, şebekeye bağlı birçok kullanıcının bağlantısının kesilmesine neden olmaktadır. Bir güç sistemi üzerinde meydana gelen kesintilerin temel nedenleri, kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir:

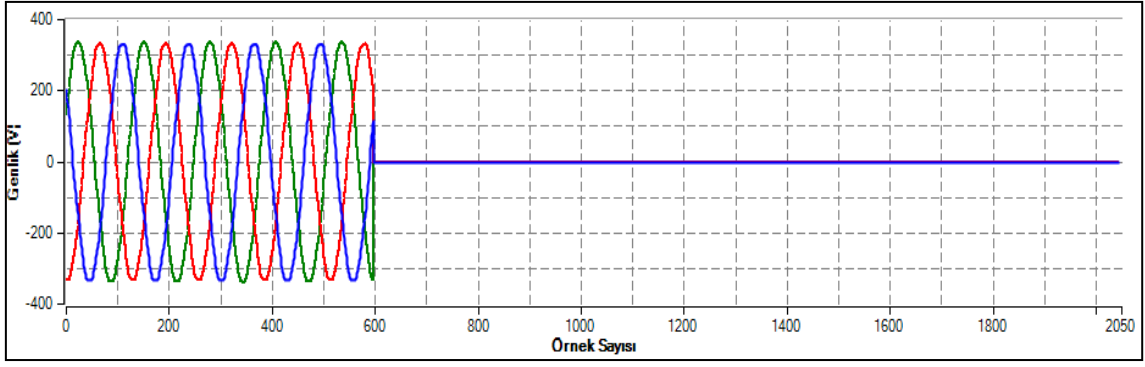
- Kısa devre veya topraklama arızasından dolayı, kesici veya sigortaların açılması (bu olay kesintilerin en yaygın nedenleri arasındadır).
- Anahtarlama cihazları veya bir devre kesici üzerinde, yanlışlıkla yapılan bir işlem.
- Güç sisteminin belirli bir bölümünde, bakım veya onarım için yapılan çalışmalardan dolayı bağlantının kesilmesi.

Birinci ve ikinci nedenlerden dolayı gerçekleşen kesinti olayları, “zorunlu kesintiler” olarak tanımlanır. Bakım veya onarım için yapılan kesintiler ise “planlı kesintiler” veya “önceden belirlenmiş kesintiler” olarak tanımlanır. Tablo 2.3'te, çeşitli standartlara göre kesinti olaylarının sınıfları ve karakteristikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir [60].

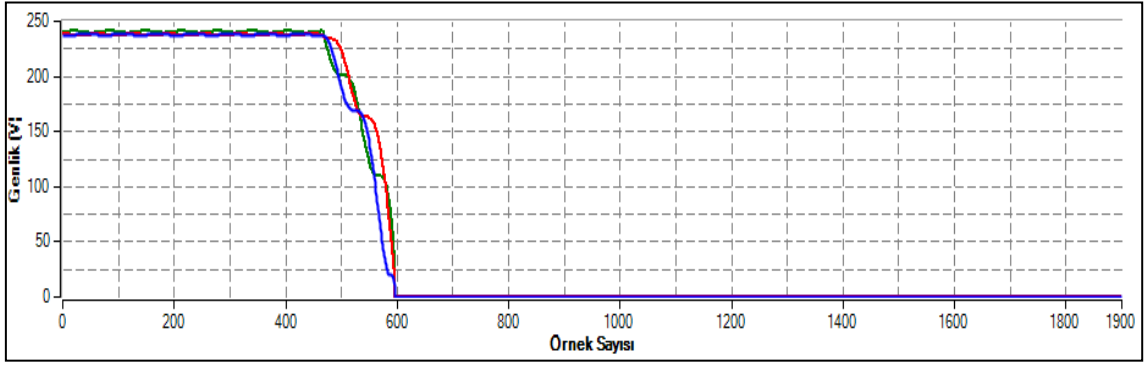
Tablo 2.3. Standartlara göre kesinti olayına ait tanımlamalar.

Standart	Terim	Tanımlama
IEEE 1159	Kesinti	Gerilim değeri nominalin %10'nun altında
	Sürekli kesinti	3s.'den uzun
	Kısa süreli kesinti	0.5 Periyottan 3 dk'ya kadar olan
IEEE 1250	Geçici kesinti	3s.'den 1 dk'ya kadar olan
	Anlık kesinti	30 periyottan kısa süren
	Kısa süreli kesinti	0.5 s. ile 2 s. arasında süren
	Geçici kesinti	2 s. ile 2 dk arasında
EN 50160	Sürekli kesinti	2 dakikadan uzun süreli
	Kısa kesinti	3 dk'dan kısa
IEEE 1366	Uzun kesinti	3 dk'dan uzun
	Geçici kesinti	5 dk'dan kısa
	Sürekli kesinti	5 dk'dan uzun

Şekil 2.5'de, İGKİS'den elde edilen bir kesinti olayına ait dalga şekli ve RMS değişimi gösterilmiştir.



(a)

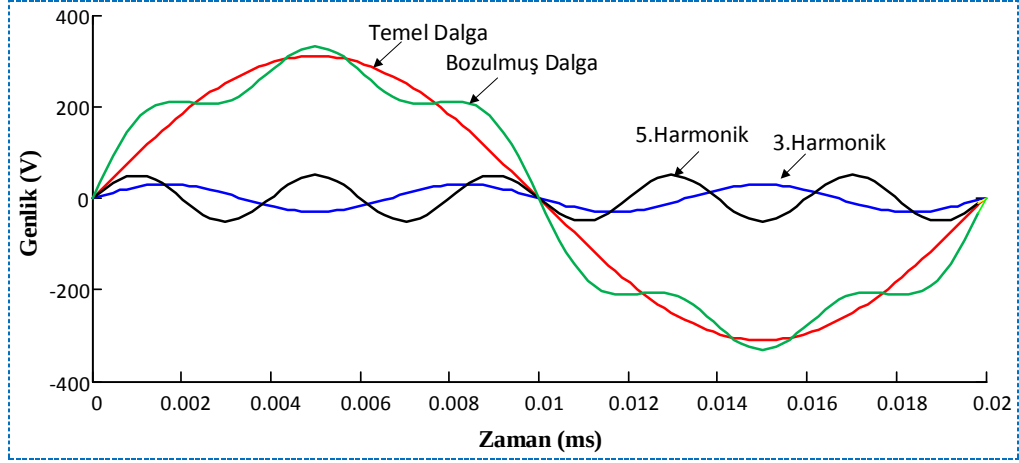


(b)

Şekil 2.5. İGKİS'den elde edilen kesinti olayının a) dalga şekli ve b) RMS değişimi. (Tunceli Üniversitesi AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktası 08.08.2014 saat 13:43:25)

2.3.4. Harmonikler

Harmonikler, frekansları temel frekansın tam katsayısı olan sinüsoidal akım ve gerilim sinyalleridir. Periyodik bozulmuş bir sinyal, temel frekansın ve harmoniklerin toplamından oluşmaktadır. Güç sistemindeki harmonik bozulmalar, sisteme bağlı doğrusal olmayan cihazlar ve yüklerden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.6'da, temel bir sinüs sinyali ve bu sinyale ait harmonik bileşenler ile harmonikler sonucunda bozulmuş dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Temel sinüs dalga şekli ve bu dalgaya ait harmonik bileşenler.

Periyodik sinüsoidal olmayan dalga biçimi, Fourier serisi ile ifade edilebilmektedir. Fourier serisindeki her bir terim, bozulmuş dalga şekline ait harmonik bileşen olarak adlandırılmaktadır. Periyodik fonksiyonların Fourier serisi açılımı (2.1)'de verilmiştir. Bu eşitliğin ilk terimi bir sabit ve diğer terimleri de sinüsler ve kosinüslerden oluşmaktadır.

$$\begin{aligned}
 i(t) &= I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \\
 v(t) &= V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Akım ve gerilime ait harmonikler, simetrik olduğundan kosinüslü terimlerin değeri sıfır olacaktır. İfadenin sadeleştirilmesi için DC bileşen ihmal edildiğinde, akım ve gerilimin anlık değerlerine ait Fourier açılımı

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \alpha_n) \\
 v(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_0 t + \beta_n)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

olacaktır. Burada; ω_0 : temel frekans, n : harmonik derecesi, $I_{(n)}$ ve $V_{(n)}$: n 'inci harmonik için akım ve gerilimin etkin değerleri, β_n ve α_n : n 'inci harmonik için akım ve gerilimin faz açısını ifade etmektedir. Harmonikli akım ve gerilimin etkin değeri (2.3)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_n^2} \\
V &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

Dalga şeklinde meydana gelen harmonik bozulmaların içeriğini tek bir sayısal değer ile göstermek için kullanılan en yaygın harmonik göstergesi, toplam harmonik bozulmadır (THB). THB standartlarda harmoniklerin sınırlandırılması için sıklıkla kullanılan bir ifadedir. THB hesaplanırken, (2.4)'te gösterildiği gibi harmoniklerin etkin değerlerinin toplamının temel bileşen etkin değerine oranı olarak bulunmaktadır. THB değeri genellikle yüzde olarak ifade edilir.

$$THB_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}, THB_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}
\tag{2.4}$$

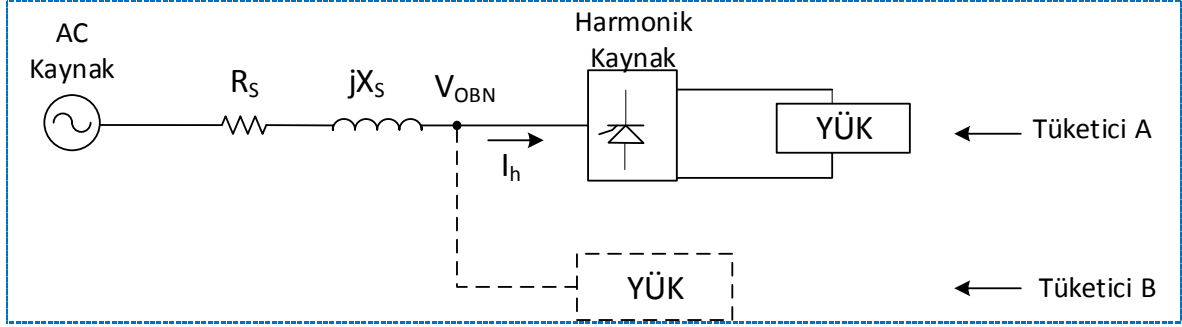
THB'nın sahip olduğu çeşitli dezavantajlar nedeniyle IEEE-519 gibi bazı standartlar toplam talep bozulmasını (TTB) tanımlamışlardır. TTB, bir yüke ait değer olup (2.5)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [51, 61, 62].

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L}
\tag{2.5}$$

2.3.4.1. Güç Kalitesi Standartlarına Göre Harmonik Sınırlar

IEEE 519 standardı (IEEE Std.519-1992) “Elektiriksel Güç Sistemlerinde Harmonik Kontrolü için Gereksinimler ve Tavsiyeler” başlığı ile yayımlanmıştır. Bu standart, güç dağıtım sistemleri için çeşitli bozulma sınırlarını tanımlamaktadır. IEEE 519, güç kalitesi ile ilgili standartları hizmet alınan kuruluş ve son kullanıcılar açısından ele almaktadır. Bu standart, hizmet alınan kuruluşun iyi kalitede sinüs gerilimi üretme sorumluluğunu ve son kullanıcıların da hat üzerinde kendi devrelerindeki harmonik akımlarını sınırlandırmaları sorumluluğunu belirtmektedir. Şekil 2.7’de gösterilen dağıtım sistemi, iki farklı kullanıcıyı

beslemektedir. A tüketicisi, harmonik üreten yüklerden dolayı sistemden belli bir harmonik akımı (I_h) çekmektedir. Bu harmonik akım, ortak bağlantı noktasındaki gerilimde bir bozulmaya neden olur. B tüketicisi, ortak bağlantı noktasından A tüketicisi ile aynı gerilimi paylaştığından dolayı bu bozulmaya maruz kalmaktadır.



Şekil 2.7. Harmonik üreten yüklerin ortak bağlantı noktasında meydana getirdiği bozulma.

Şebeke ortak bağlantı noktasındaki harmonik bozulmaların sınırlamaları, IEEE 519 standardına göre Tablo 2.4'te gösterildiği gibidir.

Tablo 2.4. IEEE 519-1992 standardına göre gerilim harmonik bozulmaların sınırları.

Ortak Bağlantı Noktasındaki Gerilim	Her Bir Harmonik İçin Gerilim Bozulması(%)	Gerilim İçin Toplam Harmonik Bozulması (%)
69 kV ve altı	3.0	5.0
69.001 kV'dan 161 kV'ya kadar	1.5	2.5
161.001 kV ve üzeri	1.0	1.5

IEEE 519-1992 standardı, hizmet alınan kuruluşun kaliteli bir güç için Tablo 2.4'teki harmonik sınırlarına uyması gerektiğini belirtmektedir. Aynı standart, şebeke ortak bağlantı noktasında yükler tarafından sürülen akıma ait harmonik sınırlarını Tablo 2.5'te verildiği gibi tanımlamaktadır. Tablo 2.5'de bulunan I_{sc} parametresi, şebeke ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımıdır. I_L , şebeke ortak bağlantı noktasındaki maksimum talep edilen yük akımıdır. Harmonik bozulma sınırları I_{sc}/I_L oranına göre farklılık göstermektedir. Ayrıca Tablo 2.5'de gösterilmeyen çift harmonikler, kendisinin bir üstündeki tek harmonik bileşenin % 25'i ile sınırlandırılmıştır.

Tablo 2.5. IEEE 519-1992 standardına göre genel bir dağıtım sistemindeki akım harmonik sınırları.

I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	THB
$v \leq 69$ kV						
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69 \text{ kV} < v \leq 161 \text{ kV}$						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$v > 161 \text{ kV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.6	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Ülkemizde Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yürürlüğe konan “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik” kapsamında akım ve gerilim harmonikleri ile ilgili çeşitli sınırlamalar getirilmiştir [63]. Tablo 2.6’da, EPDK’nın yayınladığı yönetmeliğe göre gerilim harmoniklerinin sahip olması gereken sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 2.6. EPDK yönetmeliğinde tanımlanan gerilim harmoniklerine ait sınır değerler.

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3'ün Katları Olmayanlar		3'ün Katları Olanlar			
Harmonik Sırası (h)	Sınır Değer	Harmonik Sırası (h)	Sınır Değer	Harmonik Sırası (h)	Sınır Değer
5	% 6	3	% 5	2	% 2
7	% 5	9	% 1.5	4	% 1
11	% 3.5	15	% 0.5	6...24	% 0.5
13	% 3	21	% 0.5		
17	% 2				
19	% 1.5				
23	% 1.5				
25	% 1.5				

Aynı yönetmelikte akım harmoniklerinin sahip olması gereken sınır değerleri ise Tablo 2.7’de verilmiştir.

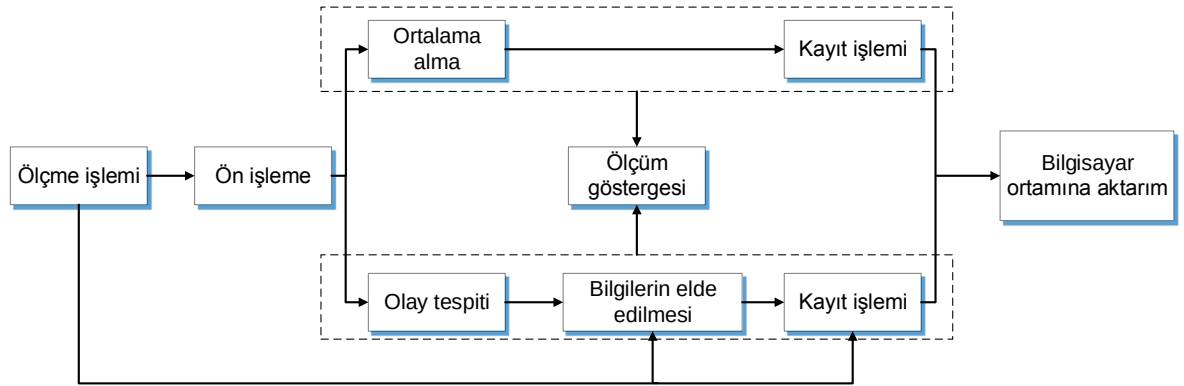
Tablo 2.7. EPDK yönetmeliğinde tanımlanan akım harmoniklerine ait sınır değerler.

Tek Harmonikler						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTB
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Çift harmonikler, kendisinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlandırılmıştır.

2.4. Güç Kalitesi Parametreleri ve Ölçümü

Güç sistemi üzerinde meydana gelen güç kalitesi problemlerinin tespit edilmesi ve bu problemlere yönelik çözümlerin geliştirilmesi için, güç sistemi üzerinde sürekli olarak ölçümler yapılmalı ve bu ölçüm sonuçları belgelenmelidir. Güç kalitesi ölçümleri, sistemde meydana gelen güç kalitesi problemlerinin giderilmesi veya azaltılması işlemleri için gerekli olan ilk aşamaları oluşturur. Şekil 2.8’de, güç kalitesi ölçümlerine ait genel bir yapıyı gösteren blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.8. Güç kalitesi ölçümlerinin genel yapısını gösteren blok gösterimi.

Güç sistemleri üzerinde gerçekleştirilecek güç kalitesi ölçümlerinin, bu alanda tanımlanan belirli standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bir güç sisteminin sahip olması gereken elektriksel parametrelerin sınır değerleri de yine bu standartla tanımlanmıştır. Bu amaçla, güç kalitesine yönelik olarak ulusal ve uluslararası

kuruluşlar tarafından çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, bu kuruluşlar ve geliştirdikleri standartlar ile ilgili gerekli bilgiler verilecektir.

2.4.1. Güç Kalitesi Standartları ve Yönetmelikleri

Güç kalitesi endüstrisi, güç kalitesi standartlarının endüstri açısından oldukça önemli olduğunu kabul etmiştir. Bu nedenle, son zamanlarda bir takım güç kalitesi standartları geliştirmiştir [1,60-69]. Güç kalitesine hızla artan ilgi, bu yönde uyumlu standartların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Hassas elektronik cihazların kullanımındaki artış, enerji verimliliğinde kullanılan doğrusal olmayan yüklerin artışı, karmaşık ve enterkonnekte güç sistemleri, güç kalitesi standartlarının geliştirilmesinde önemli derecede katkıları olmuştur.

Güç kalitesi standartlarının geliştirilmesinde rol oynayan birçok ulusal ve uluslararası kuruluş bulunmaktadır. Bu kuruluşlardan; Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers-IEEE), Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standards Institute-ANSI), Standartlar ve Teknoloji Ulusal Enstitüsü (The National Institute of Standards and Technology-NIST), Ulusal Yangın Önleme Birliği (National Fire Protection Association-NFPA), Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (EPRI), Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (National Electrical Manufacturers Association-NEMA) ABD’de yer alan ve güç kalitesi standartları geliştiren bir takım kuruluşlardır. ABD dışında güç kalitesi standardı geliştiren uluslararası diğer kuruluşlardan bazıları; Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission-IEC) , Avrupa Standartları (EN) ve Güney Afrika standartları için ESKOM dur.

Ülkemizde güç kalitesi alanında, TS EN (Türk Standartları Enstitüsü) tarafından belirlenen standartlar ve EPDK tarafından yayınlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz ve Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” ve “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği” gibi çeşitli yönetmelikler başvuru alan temel kaynaklardır.

2.4.1.1. IEEE Güç Kalitesi Standartları

IEEE kuruluşu; bilgisayar mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, biyomedikal teknolojisi, haberleşme teknolojileri ve havacılık gibi birçok teknik altyapıya sahip üyelerden meydana gelmektedir. Bu kuruluş, güç kalitesini de içeren her türlü elektrik

endüstri standardının geliştirilmesine önemli katkıda bulunmaktadır. Bu enstitünün güç kalitesine yönelik olarak ilgi alanı, genellikle belirli güç kalitesi problemlerini içermektedir. IEEE güç kalitesi standartları öncelikli olarak, şebeke bağlantı noktasında meydana gelen bozulmaların sınırlarını ele almaktadır. IEEE tarafından güç kalitesi üzerine yayımlanan önemli birçok standart bulunmaktadır. Bunlardan özellikle IEEE 519 [64] harmonik standardı, önemli derecede kullanım alanı bulmuştur. IEEE 1366 standardı [65], dağıtım güvenilirliği endekslerini tanımlamaktadır. IEEE 1346 standardı [66], kaynak ve hassas cihazlar arasındaki uyumluluğu tanımlar. IEEE 1100 [67] hassas cihazların güç ve topraklaması ile ilgili standartları belirlemektedir.

Tablo 2.8. Güç sistemleri elektromanyetik olaylarının kategorileri ve özellikleri.

Problem Sınıfı	Frekans Spektrumu	Süresi	Gerilimin Genliği
1. Geçici Durum			
1.1. Darbeli			
1.1.1. Nanosaniye	5 ns yükselme	< 50 ns	
1.1.2. Mikrosaniye	1 µs yükselme	50 ns – 1 ms	
1.1.3. Milisaniye	0.1 ms yükselme	> 1 ms	
1.2. Salınlımlı			
1.2.1. Düşük frekans	<5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2. Orta frekans	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
1.2.3. Yüksek frekans	0.5 – 5 MHz	5 µs	0 – 4 pu
2. Kısa süreli değişimler			
2.1. Ani			
2.1.1. Kesinti		0.5 – 30 periyot	< 0.1 pu
2.1.2. Çökme		0.5 – 30 periyot	0.1 – 0.9 pu
2.1.3. Sıçrama		0.5 – 30 periyot	1.1 – 1.8 pu
2.2. Kısa süreli			
2.2.1. Kesinti		30 periyot – 3sn	< 0.1 pu
2.2.2. Çökme		30 periyot – 3sn	0.1 – 0.9 pu
2.2.3. Sıçrama		30 periyot – 3sn	1.1 – 1.4 pu
2.3. Geçici			
2.3.1. Kesinti		3 sn – 1 dk	< 0.1 pu
2.3.2. Çökme		3 sn – 1 dk	0.1 – 0.9 pu
2.3.3. Sıçrama		3 sn – 1 dk	1.1 – 1.2 pu
3. Uzun süreli değişimler			
3.1. Kalıcı kesinti		>1dk	0.0 pu
3.2. Düşük gerilim		>1dk	0.8 – 0.9 pu
3.3. Yüksek gerilim		>1dk	1.1 – 1.2 pu
4. Gerilim dengesizliği			
		Sürekli durum	% 0.5 – 2
5. Dalga şekli bozulmaları			
5.1. DC bileşen		Sürekli durum	% 0 – 0.1
5.2. Harmonik	0 – 100. harmonik	Sürekli durum	% 0 – 20
5.3. Ara harmonik	0 – 6 kHz	Sürekli durum	% 0.2
5.4. Çentik		Sürekli durum	
5.5. Gürültü	Geniş bant	Sürekli durum	% 0 – 1
6. Gerilim salınımları			
		Kesintili	% 0.1 – 7
7. Frekans değişimleri			
		< 10 sn	

Güç kalitesi ile ilgili en önemli standartlardan birisi olan IEEE 1159-1995 [68] güç kalitesi problemleri ile ilgili önemli bilgiler içermektedir. Bu standarda göre güç kalitesi problemleri; geçici durumlar, kısa süreli değişimler, uzun süreli değişimler, gerilim dengesizliği, dalga şekli bozulmaları, gerilim salınımları ve frekans değişimleri olarak yedi kategori altında incelenmektedir. Tablo 2.8’de, IEEE 1159 standardında tanımlanan kategoriler ve elektromanyetik olaylara ait karakteristikler hakkında bilgi verilmiştir. Bu kategoriler tezin bir sonraki bölümlerinde detaylı olarak ele alınacaktır.

2.4.1.2. IEC Güç Kalitesi Standartları

Güç kalitesi alanındaki en önemli standartlardan birisi, IEC 61000 standart serisidir. Bu standart serisi, Avrupa’da özellikle güç kalitesi üzerine önemli standartları barındırmaktadır. IEC 61000 standartları, performans belirleme üzerine kurulmuştur ve genel olarak güç sistemlerindeki ölçüm yöntemleri üzerinde yoğunlaşmaktadır.

IEC 61000 standart serisi, A ve B olmak üzere iki ayrı sınıfta ölçüm hassasiyetini tanımlamaktadır. A sınıfı ölçüm hassasiyeti, çok hassas ölçümlerin gerekli olduğu durumlar için tanımlanmıştır. Örneğin, sözleşme ile taahhüt edilen uygulamalarda tüketici ve son kullanıcılar arasındaki anlaşmazlıkların çözülmesi için standartlara uygunluğun doğrulanması amacı ile A sınıfı ölçüm hassasiyeti kullanılmaktadır. A sınıfı ölçüm hassasiyetine sahip iki farklı cihaz ile aynı sinyal üzerinde gerçekleştirilen herhangi bir parametrenin ölçümü, ya aynı ya da tanımlanan ölçüm belirsizliği aralığında olacak şekilde sonuç üretmelidir. Örtüşen sonuçların üretilmesi için A sınıfı performansa sahip cihazların gerekli bir bant genişliği ve örnekleme hızlarını sağlamaları gerekmektedir.

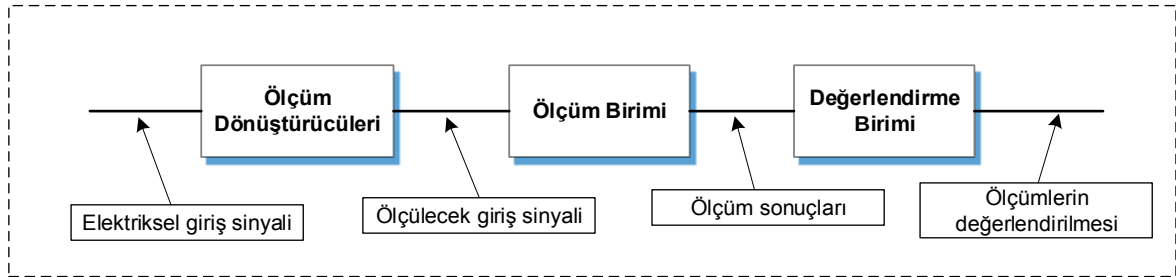
B sınıfı ölçüm hassasiyeti ise A sınıfı kadar hassasiyet gerektirmeyen istatistiksel ölçümler, problem giderme uygulamaları ve kesinliğin önemsiz olduğu diğer uygulamalarda kullanılmaktadır.

IEC 61000 standartları genel olarak 6 kategoride incelenmektedir. Tablo 2.9’da, IEC 61000 serisi standartları ve bu standartların kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir [51, 53].

Tablo 2.9. IEC 61000 serisi standartları ve bu standartların kapsamı.

Standart	Tanımı	İçerik
IEC 61000-1-...	Genel	Genel hususlar, temel ilkeler, tanımlar ve terminoloji.
IEC 61000-2-...	Ortam	Ekipmanların uygulanacağı ortamların karakteristiği, sınıflandırması ve uyumluluk düzeyleri.
IEC 61000-3-...	Sınırlar	Harmonik, kırpışma ve diğer bozulmalara ait sınırlar.
IEC 61000-4-...	Test ve ölçüm teknikleri	Ölçüm ekipmanları ve test süreçleri.
IEC 61000-5-...	Kurulum ve risk azaltma	Topraklama, kablolama ve risk azaltma yöntemleri.
IEC 61000-6-...	Diğer	Konut, ticari, endüstriyel ve güç merkezleri için önlem ve emisyon standartları.

IEC 61000-4-30 standardı [1], özellikle güç kalitesi ölçüm teknikleri hakkında detaylı bilgiler içermektedir. Bu standarda göre ölçümü yapılacak elektriksel büyüklüğün, ya doğrudan erişilebilir olması ya da ölçüm dönüştürücüleri ile erişilebilir olması gerekmektedir. Şekil 2.9’da, IEC 61000-4-30 standardının güç kalitesi için önerdiği ölçüm yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.9. IEC 61000-4-30 standardının güç kalitesi için önerdiği ölçüm yapısı.

Elektriksel giriş noktalarına bağlanan ölçüm dönüştürücüleri ile elde edilen veriler ölçüm birimine giriş verisi olarak sunulur. Ölçüm birimi, gerekli işlemlerden sonra ölçüm sonuçlarını değerlendirme birimine aktarmaktadır. Değerlendirme biriminde, ölçüm sonuçları değerlendirilir ve ölçüm işlemleri tamamlanmış olur.

IEC 61000-4-30 standardı, ölçümü gerçekleştirilecek parametrelerin ölçüm süreleri ve aralıkları hakkında detaylı bilgiler vermektedir. Bu standarda göre A sınıfı ölçümde, elektriksel büyüklüklerin ölçümleri için zaman aralığı 50 Hz frekanslı güç sistemi için 10-periyot ve 60 Hz frekanslı güç sistemi için 12 periyot olarak belirtilmiştir. Ayrıca ölçüm

sonuçlarının elde edilmesinde, A sınıfı ölçüm için üç farklı zaman aralığı bu standart altında tanımlanmaktadır. Bu zaman aralıkları şu şekildedir;

- 3 s. aralıklarla (50 Hz'lik frekansa sahip güç sisteminde 150 periyot, 60 Hz'lik güç sistemi için 180 periyot)
- 10 dk aralıklarla,
- 2 saat aralıklarla.

B sınıfı için ölçüm zaman aralıkları üretici tarafından belirlenebilir ve ölçüm sonuçlarının kayıt altına alınma sayısı ve süresi yine üretici tarafından tanımlanır. Tablo 2.10'da, bazı güç kalitesi parametrelerinin IEC 61000-4-30 test ve ölçüm teknikleri standardında belirtilen ölçüm aralıkları ve belirsizlik oranları verilmiştir.

Tablo 2.10. IEC 61000-4-30 standardına göre çeşitli GK parametrelerinin ölçüm aralıkları.

Parametre	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Belirsizliği
Frekans	10 s.	± 0.01 Hz
Gerilim (RMS)	10 periyot	$\pm 0.1 \% U_{ref}$
Gerilim Çökmesi ve Sıçraması	1/2 periyotluk RMS ($U_{rms (1/2)}$)	
Kesinti	1/2 periyotluk RMS ($U_{rms (1/2)}$)	
Gerilim Dengesizliği	10 periyot	
Harmonikler	10/12 periyot	

2.4.1.3. EN 50160 Avrupa Güç Kalitesi Standardı

EN 50160 standardı [69], Türkiye'de olduğu gibi birçok ülkede çevirisi yapılarak kullanılan ve güç kalitesi alanında hazırlanan çeşitli ulusal yönetmeliklere temel teşkil eden önemli bir standarttır. EN 50160 standardı, AG ve OG dağıtım sistemleri için ortak bağlantı noktalarının normal işletme koşulları altında ana gerilim parametreleri ve bu parametrelerin izin verilen sapma oranları hakkında bilgiler vermektedir. Standartta tanımlanan AG için gerilimin etkin değeri, faz-faz arası 1000 V'u geçmemeli ve OG için bu değer 1 kV ile 35 kV arasında olmalıdır.

EN 50160 standardı, tedarikçilerin dağıtım sistemlerinden korunmaları amacı ile teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir genel sınırları tanımlamaktadır. Bu standart, farklı güç kalitesi parametrelerinin tavsiye edilen sınırlarını belirler ve bu sınırların zaman bazlı düzenlemelerini gerçekleştirir. Tablo 2.11'de EN 50160 standardında AG ve OG dağıtım sistemleri için besleme geriliminin karakteristiği ve ölçüm aralığı ile ilgili temel gereksinimlerini tanımlayan değerler verilmiştir [70].

Tablo 2.11. EN 50160 standardına göre AG ve OG dağıtım sistemleri için gerilim karakteristikleri ile ilgili tanımlamalar.

Parametre	Ölçüm Aralığı (AG)	Sınırlar ve İzleme Aralığı
Güç frekansı değişimi	10 s.	AG, OG: 10 sn üzerinde ölçülen temel ortalamalar $\pm\%1$ (49.5 - 50.5 Hz) haftanın %99.5'i için. -%6 / +%4 (47- 52 Hz) haftanın %100'ü için.
Gerilim büyüklüğü	10 dk'lık ortalama	AG, OG: 10 dakikalık rms ortalama değeri $\pm\%10$ haftanın %95'i.
Hızlı gerilim değişimleri	2 saat	AG: %5 normal %10 nadiren $P_{lt} \leq 1$ haftanın %95'i için. OG: %4 normal %6 nadiren $P_{lt} \leq 1$ haftanın %95'i için.
Gerilim çukuru	10 dk'lık ortalama	süre <1sn, dip < %60. Yüklerin devreye girmesinden kaynaklanan çukurlar için AG: %10 - 50, OG: %10 - 15
Kısa süreli kesintiler	10 dk'lık ortalama	AG, OG: 3 dakikaya kadar süren %70'inin süresi <1 sn olmak üzere yıllık birkaç yüz
Uzun süreli kesintiler	10 dk'lık ortalama	AG, OG: 3 dakikadan uzun süren Yıllık 10-50 arasında
Geçici Gerilimler		AG: Genellikle < 6kV, OG: Tanımlanmamış.
Gerilim Dengesizliği	10 dk'lık ortalama	AG, OG: %2'ye kadar haftanın %95'i için.

2.4.1.4. Türkiye'de Güç Kalitesi Standartları ve Yönetmelikleri

Ülkemizdeki güç kalitesi uygulamaları, enerji dağıtım şirketlerinin özelleşmesi ile EPDK'nın bu alandaki çalışmaları neticesinde hız kazanmıştır. EPDK; güç kalitesi alanında dağıtım şirketlerinin arıza yönetim sistemlerini kurmaları, tedarik sürekliliğini kayıt altına almaları ve güç kalitesi problemlerini izlemek için enerji analizörleri ile güç kalitesi problemlerini standartlara uygun raporlama hususlarını ele almaktadır [71].

12 Haziran 2006 tarihine kadar ülkemizde enerji kalite sınırları ve zorunlulukları TS EN 50160 çeviri standardı ile uygulanmaktaydı. Bu tarihte yürürlüğe giren “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik” ile teknik ve ticari kalitenin artırılması amaçlanmıştır. Yönetmeliklerde belirtilen güç kalitesi parametrelerinin ölçüm yöntemleri için Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş'nin Ekim 2007'de çıkardığı “Trafo Merkezleri OG-AG

Güç kalitesi ölçüm teknik şartnamesi” yönetmeliğinde belirtilmiştir [72]. Türkiye’de güç kalitesi alanında güncel olan standartlar ve yönetmelikler aşağıda verilmiştir [73, 74]:

- TS EN 50160 (2011) Standardı: AG, OG ve YG besleme karakteristikleri, gerilim olayları ve değişimleri.
- TS EN 61000-2-2 (2005), TS EN 61000-3-2 (2010), TS EN 61000-3-3 (2011), TS EN 61000-3-12 (2012), TS EN 61000-4-7 (2005), TS EN 61000-4-11 (2006), TS EN 61000-4-15 (2012), TS EN 61000-4-30 (2010), TS EN 61000-4-34 (2010).
- 25.09.2002 tarihli ve 24887 sayılı resmi gazetede yayınlanan “ Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği”
- 22.01.2003 tarihli ve 25001 sayılı resmi gazetede yayınlanan “ Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”
- 19.02.2003 tarihli ve 25333 sayılı resmi gazetede yayınlanan “Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği”
- 10.11.2004 tarihli ve 25639 sayılı resmi gazetede yayınlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”
- 12.09.2006 tarihli ve 26287 sayılı resmi gazetede yayınlanan “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik”

2.4.2. Etkin Değer ve Güç Bileşenleri

Bu kısımda güç kalitesine ait; etkin değer, aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve güç faktörü gibi parametrelerin tanımları ve hesaplamaları hakkında bilgiler verilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen güç kalitesi parametre hesaplamaları bu bilgiler dahilinde gerçekleştirilmiştir.

2.4.2.1. Etkin Değer

Etkin değer (RMS-Root Mean Square), alternatif gerilimin doğru gerilime eş değeri olarak isimlendirilir ve V_{rms} şeklinde gösterilir. Sinüsoidal şartlarda hem gerilim hem de akım dalga şekli sadece temel frekans bileşenini içermektedir. Bu durumda akım ve gerilime ait etkin değer ayrı olarak hesaplanırken (2.6)’daki ifade kullanılmaktadır.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N V_n^2}{N}} \quad (2.6)$$

Burada N, RMS değeri hesaplanacak sinyale ait örnek sayısıdır. Periyodik sinüsoidal bir gerilimin T periyodu ile ifadesi $V_{(t)} = V_m \cos(\omega t)$ olup, etkin değer hesaplanırken (2.7.a)'da verilen ifadede gerekli düzenlemeler yapılırsa, etkin değeri (2.7.b)'de verildiği gibi elde edilir.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \cos^2(\omega t) dt} \quad (2.7.a)$$

$$= \sqrt{\frac{V_m^2}{2T} \left[t + \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t) \right]_0^T} \quad (2.7.b)$$

Harmonik bileşen içeren dalga şekli, farklı genliklere sahip harmonik frekanslar içermektedir. Bu durumda akım ve gerilim için gerçekleştirilecek olan etkin değer hesaplamasında, her bir harmonik bileşenin karelerinin toplamının karekökü alınmaktadır. Bu hesaplama, akım ve gerilime ait etkin değer için (2.8)'de gösterildiği biçimde ifade edilir.

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{h_{\max}}^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h \right)^2} \quad (2.8)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_{h_{\max}}^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h \right)^2}$$

2.4.2.2. Güç Bileşenleri

Güç ile ilgili olarak aşağıda belirtilen üç farklı bileşen bulunmaktadır.

- Görünür güç, S (Voltamper, VA),
- Aktif (etkin) Güç, P (Watt, W),
- Reaktif (tepkin) Güç, Q (VoltAmper-reaktif, VAR).

Birçok elektriksel sistem, görünür güç kullanımı ile çalışmaktadır. Generatör, transformatör, motor gibi elektrikli cihazların ve iletim hatlarının maliyeti görünür gücüyle orantılıdır. Görünür gücün hesaplamasında (2.9)'da verilen ifade kullanılmaktadır.

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (2.9)$$

Aktif güç, elektrik enerjisini başka bir enerji biçimine dönüştürmek için cihazların harcadığı güçtür. Aktif güç (2.10)'da gösterildiği gibi anlık gücün ortalaması şeklinde hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (2.10)$$

Aktif gücün ayırık zamanlı hesaplamasında, gerilim ve akım örneklerinin zamana göre çarpımlarının toplamalarının örnek sayısına (N) bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu hesaplama işlemi (2.11)'de gösterildiği gibidir [75].

$$P = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (V[n] \cdot I[n])}{N} \quad (2.11)$$

Reaktif güç, sistemde bulunan kapasitif ve endüktif yüklerin meydana getirdiği bir güç türüdür. İletim sisteminden çekilen veya verilen reaktif güç, iletim sistemi üzerinde ek kayıplara ve simetrisizliklere neden olduğundan dolayı bu güce çeşitli sınırlamalar getirilmiştir. Başka bir güç terimi olan güç faktörü ise şebekeden elde edilen görünür gücün gerçek iş yapan oranını göstermektedir. Güç faktörü, aktif gücün görünür güce oranı olarak tanımlanan sıfır ile bir arasındaki sayıdır.

3. GÖMÜLÜ SİSTEMLER VE FPGA TEKNOLOJİSİ

Tezin bu bölümünde, İGKİS'e ait güç kalitesi izleme sisteminde kullanılan gömülü sistem mimarisinin daha iyi anlaşılması için, gömülü sistemler ve bu sistemlere ait hem yazılımsal hem de donanımsal bir takım ayrıntılar verilmiştir. İGKİS bünyesinde kullanılan FPGA teknolojisi ve bu teknolojinin hem donanımsal hem de yazılımsal tasarım yapısı ile ilgili detaylı bilgiler de bu bölümde verilecektir. Ayrıca, tez kapsamında kullanılan VHDL dili ve FPGA cihazının programlanmasına ait çeşitli bilgiler de bu bölümde sunulacaktır.

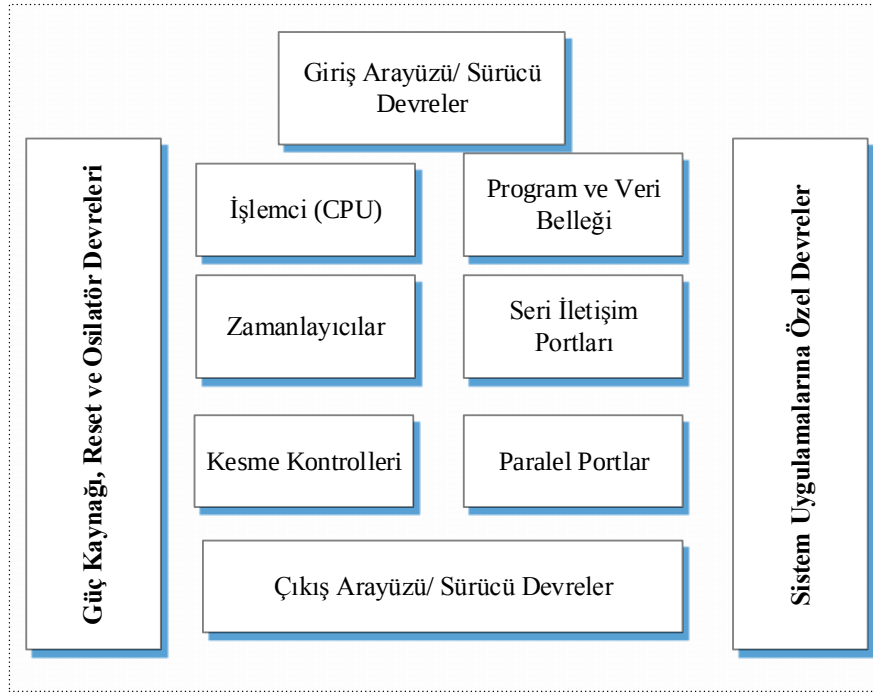
3.1. Gömülü Sistem Kavramı ve Yapısı

Günlük hayatımızda kullanılan kişisel bilgisayarlar veya süper bilgisayarlardan farklı olan gömülü sistemler, amaca özel farklı bilgisayar sistemi uygulamaları olarak tanımlanmaktadır. Gömülü sistemler için yapılan tanımlar, teknolojiye ilerlemeler ve çeşitli donanım ve yazılım maliyetlerinin hızlı bir şekilde düşüşüne paralel olarak oldukça değişkenlik kazanmıştır. Özellikle son yıllarda gömülü sistem alanındaki ilerlemeler, geleneksel gömülü sistem tanımlarına çeşitlilik kazandırmıştır. Gömülü sistemler için yaygın olarak kullanılan tanım “donanım ve yazılım işlevleri bakımından kişisel bir bilgisayardan çok daha fazla sınırlandırılmış sistemler” olarak yapılabilir. Donanım sınırlamaları; işlem performansı, güç tüketimi, bellek, donanım işlevselliği ve buna benzer kısımlardaki sınırlamaları kapsamaktadır. Yazılım açısından sınırlamalar düşünüldüğünde ise bunlar; sınırlı PC uygulamaları, küçük ölçekli uygulamalar, işletim sisteminin olmayışı veya sınırlı bir işletim sisteminin olması, soyutlama düzeyindeki kodların daha az oluşu gibi tanımlanabilir.

Çoğu gömülü sistem uygulaması, tek bir özel fonksiyonu yerine getirecek şekilde tasarlanır. Ancak, günlük hayatta kullanılan televizyon, cep telefonları ve tablet bilgisayarlar gibi yaygın gömülü sistem uygulamaları çok çeşitli işlevler için tasarlanmıştır. Örneğin, televizyon sadece görüntü ve ses ileten bir cihaz olarak tasarlanmıştır. Fakat, günümüzde dijital televizyonlar internete girmek, oyun oynamak gibi oldukça etkileşimli bir yapı kazanmıştır.

Gömülü yapılar, diğer bilgisayar sistemlerinden daha yüksek kalite ve güvenilirlik gerektiren bir bilgisayar sistemidir. Bazı gömülü aygıtlar, çok yüksek kalite ve güvenilirlik toleransına sahiptir. Örneğin, bir uçağın iniş takımlarını kontrol eden sistemin iniş

esnasında arıza vermesi veya ameliyat esnasında kritik bir cihazın çalışmaması çok ciddi problemlere yol açabilir [76]. Gömülü sistem, genel amaçlı kullanım için amaçlanmayan programlanabilir bir bilgisayar içeren sistemlerdir. Örneğin, mikroişlemci tabanlı bir faks makinesi veya saat gömülü bir sisteme örnektir [77]. Burada bahsedilen bilgisayar, mikroişlemci veya mikrodenetleyici olabilir. Gömülü sistemlerin donanımsal yapısı, bir bilgisayar sistemine benzemektedir. Şekil 3.1’de, gömülü bir sistemin donanım bölümleri gösterilmiştir.

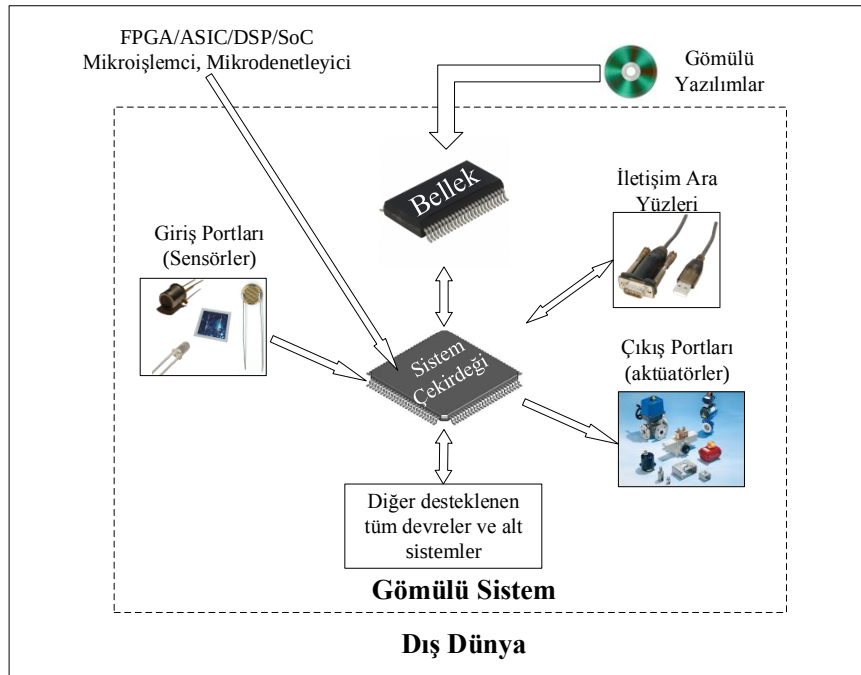


Şekil 3.1. Gömülü sistem donanımının temel bileşenlerine ait blok gösterimi.

Gömülü yazılımlar, ROM veya flash bellek içerisine gömüldüğünden dolayı bilgisayarlardaki gibi CD veya sabit disk gibi ikincil bellek birimlerine ihtiyaç duymazlar. Gömülü sistem, büyük miktarda kalıcı olarak veri depolama ihtiyacı duyuyorsa SD kart gibi ikincil bellek donanımlarını kullanacak şekilde tasarlanabilir. Sistem içerisinde yer alan yazılımlar eş zamanlı olarak birden fazla görevi, işlemi veya iş parçacıklarını yürütebilecek şekilde tasarlanabilirler. Gömülü sistemler içerisinde kullanılan işletim sistemleri, gerçek zamanlı işletim sistemleridir. Bu işletim sistemleri, donanım üzerinde yürütülen yazılımların organizasyonu ve sistem üzerindeki kaynak erişim önceliklerinin belirlenmesi gibi temel işlevleri yerine getirirler [78].

Tipik bir gömülü sistem, sistemin ana beyni olarak nitelendirilen tek bir yonga denetleyici içerir. Bu denetleyici, bir mikroişlemci (Intel 8085 gibi), bir mikrodenetleyici (Atmel, PIC, AT89C51 gibi), bir FPGA (Xilinx Virtex gibi), bir DSP işlemci veya

Uygulamaya Özgü Tüm Devre (Application Specified Integrated Circuit-ASIC) olabilir. Gömülü sistem yazılım ve donanımları, kullanıcılar veya algılayıcılar tarafından elde ettiği giriş sinyaline göre, fiziksel bir değişkeni düzenlemek veya kendisine bağlı olan bazı cihazların konumlarında değişiklik yapmak için gerekli kontrol sinyallerini üretmek üzere tasarlanmaktadır. Şekil 3.2’de, genel bir gömülü sistem yapısına ait bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Genel bir gömülü sisteme ait bileşenler.

Gömülü sistemler içerisinde yer alan donanımlar, sistemin kullanılacağı amaca yönelik olarak çeşitlilik gösterebilmektedir. Örneğin, tasarlanacak olan gömülü sistem cep telefonu gibi taşınabilir bir yapıya sahip olacaksa, bu sistem üzerinde kullanıcıların veri girişi için kullanmaları gereken bir klavyenin olması ve kullanıcının sistem üzerindeki değişiklikleri takip etmesine olanak sağlayacak bir görüntü ara biriminin bulunması gerekir.

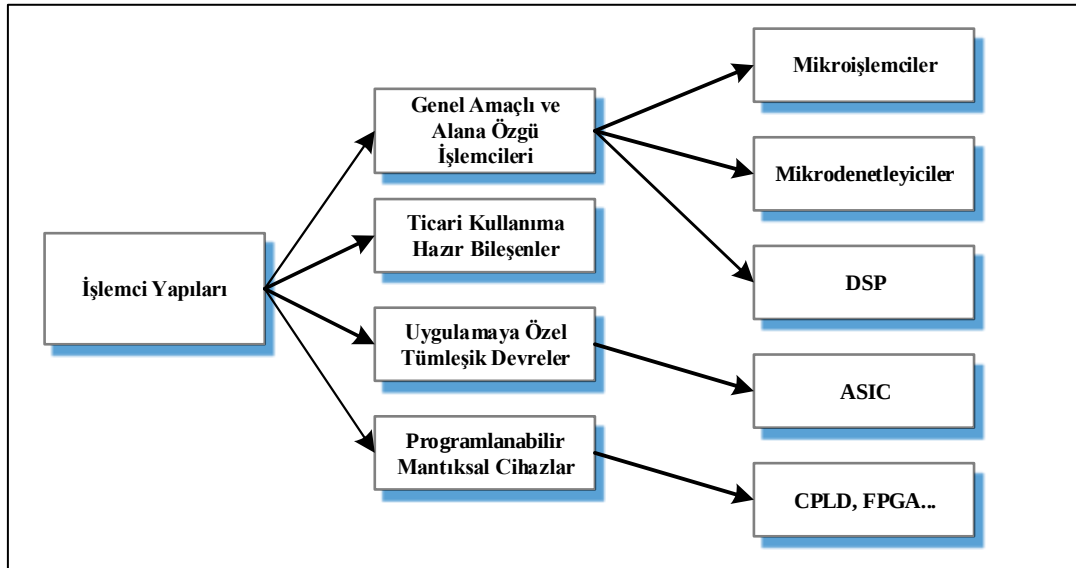
Birçok alanda geniş kullanım yeri bulunan gömülü sistemler; elektronik, ev otomasyonları, telekomünikasyon, sağlık sektörü, kontrol ve cihaz teknolojileri, otomotiv endüstrisi, ticari pazarlama ve banka gibi alanlarda yoğunluklu olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına göre farklı işlevlere sahip olan gömülü sistemler, genel olarak aşağıda verilen bir veya birden fazla işlevi yerine getirmektedir:

- Veri depolama, saklama ve veriyi sunma,
- Veri iletişimi,

- Veri işleme,
- İzleme sistemleri,
- Kontrol sistemleri ve
- Uygulamaya özel kullanıcı ara yüzleri.

3.2. Gömülü Sistemlerde Kullanılan İşlemci Yapıları

Gömülü sistemler, bir merkezi işlemci ve bu işlemci birimi tarafından kontrol edilen hafıza, giriş/çıkış (G/Ç) portları gibi donanım elemanlarını kapsayacak şekilde tasarlanmaktadır. Gömülü sistemin sahip olduğu ve çekirdek olarak adlandırılan merkezi işlemci birimi, genel olarak Şekil 3.3'te gösterildiği gibi farklı kategorilerden meydana gelmektedir.



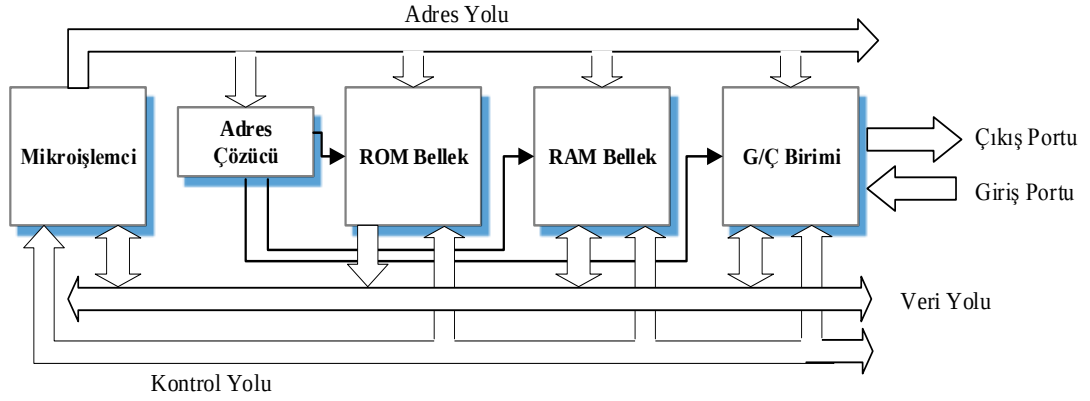
Şekil 3.3. Gömülü sistemlerde kullanılan işlemci yapılarının kategorileri.

Gömülü sistemlerin yaklaşık %80'i işlemci tabanlı olarak tasarlanmaktadır. Sistemdeki bu işlemci, değişik yapılarda olabilmektedir. Aşağıda, işlemci yapıları hakkında bilgi verilecektir.

2.2.1. Mikroişlemciler

Merkezi İşlem Birimi olarak bilinen mikroişlemci, tüm hesaplama ve mantıksal işlemlerinin tek bir yarı iletken devre üzerinde birleştirildiği programlanabilir bir elektronik bileşendir. Mikroişlemcilerin geliştirilmesi, mikrobilgisayar sistemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Mikroişlemciler sadece bilgisayar sistemlerinin değil, aynı zamanda

diğer birçok elektronik cihazın da beyni konumundadır. Örneğin cep telefonları, uydu alıcıları, ev aletleri, oyuncaklar gibi birçok cihaz sisteminde mikroişlemci alt yapısı kullanılmaktadır. Şekil 3.4'te, blok diyagramı görülen temel bir mikroişlemci sistemi; G/Ç ara yüzleri, RAM ve ROM bellek, adres çözücü, veri yolu ve adres yollarından meydana gelmektedir.



Şekil 3.4. Temel bir mikroişlemci tabanlı sistemin blok şeması.

G/Ç birimleri, mikroişlemcinin dış dünya ile iletişimini sağlayan birimlerdir. Bu birimler, programlanabilir bir yapıda olup G/Ç entegresinin birer parçasıdır. Programların ve verilerin saklanması için mikroişlemci, bir hafıza bölgesine gereksinim duyar. Bu hafıza birimleri, rastgele erişimli bellek (RAM) ve sadece okunabilir bellek (ROM) olmak üzere iki ayrı tipten meydana gelir. RAM hem okunabilir hem de yazılabilir yarı iletken hafızadır ve geçici olarak verileri depolar. ROM bellek ise kalıcı tiptedir, yani elektrik bağlantısı kesildiğinde bile veriler tutulur. Bu nedenle sistem programları, bu bellek biriminde saklanır. Mikroişlemcinin G/Ç ve hafıza birimleri arasında haberleşmesi için gereksinim duyduğu işlemci ve çevre birim arasındaki bağlantılar, veri yolu olarak adlandırılır. Bu veri yolları üzerinden adres bilgileri, veri ve kontrol bilgileri taşınmaktadır [79].

İlk mikroişlemci, 1971 yılında Intel firması tarafından geliştirilen sadece 4 bitlik toplama ve çıkarma işlemleri yapan 4004 mikroişlemcisidir. Bu mikroişlemcinin yapısında; 1K veri hafızası, 12 bit program sayıcı, 4K program hafızası, 16 adet 4 bitlik genel amaçlı kayıtçı ve 46 komut bulunmaktadır. 1974 yılında yine Intel firması, 8 bitlik ilk mikroişlemcisi olan 8080'i geliştirdi. Bu model, mikroişlemcilerin kişisel bilgisayarlarda kullanılmasına yönelik olarak tasarlanan ilk elektronik bileşen olup, 16 bit adres yolu ve program sayıcı ile 7 tane 8 bit kayıtçıya sahiptir. Intel 8080, 1970'li yılların ortasında gömülü uygulamalarda ve endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak

kullanılmaya başlandı. Aynı yıllarda Motorola firması, Motorola 6800 işlemcisi ile işlemci pazarına girdi. 1976 yılında Intel firması 8080 modelinde komut sayısı, kesme pinleri ve seri G/Ç birimlerini güncelleyerek Intel 8085 modelini piyasaya sürdü. İşlemci pazarında gerçek manada yükseliş Intel firmasının 1979 yılında IBM PC'lerde kullanmaya başladığı 8088 modeli olmuştur. Bu modeli; 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium II, Pentium III, Pentium 4, Xeon, Atom işlemci modelleri takip ederek günümüze kadar gelmiştir. Intel firmasının yanı sıra AMD, IBM, TI, Cyrix, Hitachi gibi firmalar işlemci pazarında etkin rol almaktadır [80,81].

3.2.2. Mikrodenetleyiciler

Mikrodenetleyiciler, bir denetleyici için gerekli olan tüm bileşenleri tek bir yonga üzerinde barındıran entegre devrelerdir. Mikrodenetleyici yapısında genel olarak bir işlemci, hafıza birimleri ve programlanabilir G/Ç çevre birimleri yer almaktadır. Bağımsız çalışma için gerekli olan tüm fonksiyonları yapısında bulundurmasından dolayı, mikrodenetleyiciler gömülü sistem uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikrodenetleyicilerin genel yapısı aşağıdaki gibi özetlenebilir [82].

- Mikrodenetleyici yapısında, bir merkezi işlem birimi bulunmaktadır.
- Bilgisayarlardaki sabit disklerin işlevini mikrodenetleyicilerde flash bellek ve EEPROM bellekler yerine getirmektedir.
- Mikrodenetleyicilerde de değişken bilgilerini saklamak için bilgisayardaki gibi RAM bellek bulunmaktadır.
- Mikrodenetleyici üzerinde çevre cihazlara bağlantı sağlayan veya kullanıcıların veri girmesini sağlayan G/Ç üniteleri bulunmaktadır.

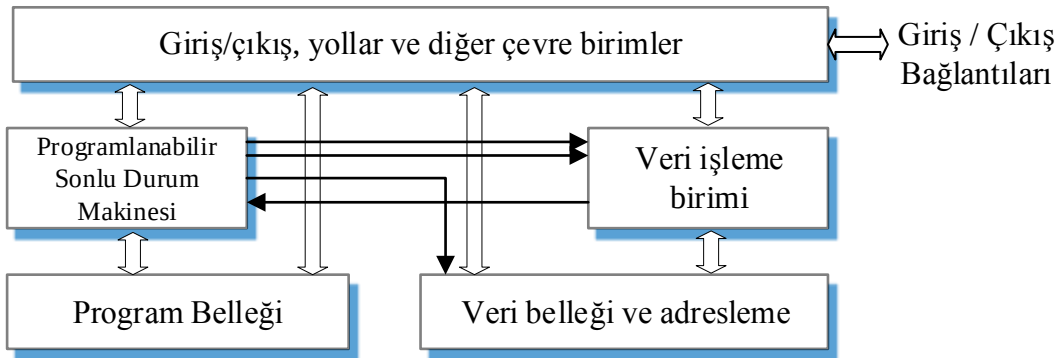
3.2.3. DSP İşlemciler

DSP'ler, sayısal sinyal işlemeye özgü algoritmaların yürütülmesi için özel olarak tasarlanmış genel amaçlı gömülü sistemlerdir. Genel tanımı ile DSP, ayrık işaret işlemcisidir. Ayrık zamanlı sinyal işleme, sinyalin bir sayısal eleman tarafından sayısal değerlere dönüştürülüp belli algoritmalara göre işlenmesi şeklinde olmaktadır [83]. DSP sistemleri; ses sinyalinin işlenmesi, ses ve video sıkıştırma, konuşma tanıma, sayısal görüntü işleme, sayısal haberleşme, biyomedikal uygulamalar, sismoloji ve radar

uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [84]. DSP'lerin sahip oldukları genel özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir [85].

- Gerçek zamanlı sinyal işleme kapasitesine sahiptirler. DSP'ler tipik olarak verileri gerçek zamanda işlemek zorundadır.
- DSP'ler, ses kaydı ve çoklu ortam verisi gibi yüksek hızlı veri akışını gerçek zamanlı olarak işleyebilmektedir.
- DSP'lerin programları yürütme zamanları, doğru bir şekilde öngörülebilir. Bu yüzden istenilen performansın tekrarlanması sağlanabilir.
- Herhangi bir donanım değişikliği yapılmadan, farklı davranıştaki sistemlerin programlanması kolayca gerçekleştirilebilmektedir.

Genel bir DSP işlemcisi; program belleği, programlanabilir sonlu durum makinesi, veri ve adres belleği, veri işleme birimi ve G/Ç birimleri olarak beş temel bileşenden meydana gelmektedir. Şekil 3.5'de, DSP işlemcisinin sahip olduğu mimariye ait blok şeması verilmiştir.



Şekil 3.5. DSP işlemci mimarisinin blok şeması.

Program hafızası, ikilik makine kodundaki programların depolanması amacı ile kullanılan birimdir ve kontrol yolunun bir parçasıdır. Programlanabilir sonlu durum makinesi, bir program sayıcı ve bir komut çözücünden oluşmaktadır. Bu birim, program hafızasına komut getirilmesi işlemi için adres bilgisini sağlamaktadır. Veri belleği, işlenecek olan bilgilerin depolandığı birimdir. Veri belleğinde; G/Ç verileri, hesaplama birimindeki ara veriler ve parametreler veya katsayılar bulunmaktadır. Adres belleği ise veri belleğine adres bilgilerini sağlayan birimdir. Veri işleme birimi, aritmetik ve mantıksal hesaplamaların gerçekleştirildiği kısımdır. Veri işleme birimi en az bir dosya kayıtçısı, bir çarpım ve toplama birimi ve bir aritmetik mantık biriminden meydana gelmektedir. Son olarak G/Ç birimi, dış dünya ile bağlantının sağlandığı kısımdır [86].

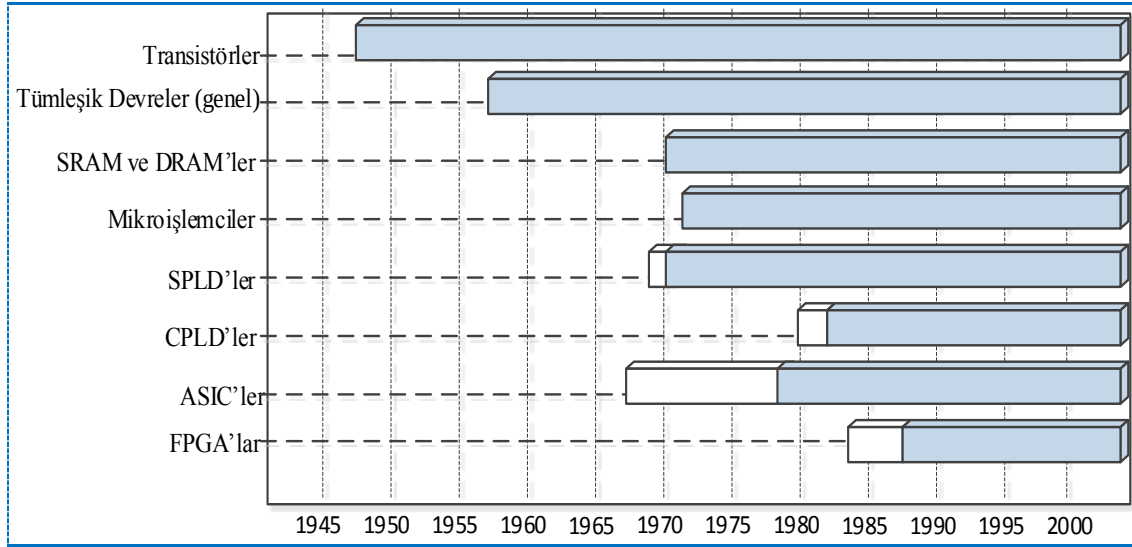
3.2.4. Uygulamaya Özgü Tümleşik Devreler (ASIC)

ASIC'ler, genel olmayan sadece ilgili uygulamaya yönelik tasarlanan tümleşik devrelerdir. Örneğin, sadece ses kaydı için tasarlanan bir yonga ASIC'e örnek olarak verilebilir. Modern ASIC'ler sıklıkla dahili mikroişlemciler, ROM, RAM, EEPROM, flash bellek ve diğer geniş tasarım bloklarını içermektedir. ASIC'lerin tam özel tasarım, yarı özel tasarım ve programlanabilir ASIC'ler olarak farklı çeşitleri bulunmaktadır [87].

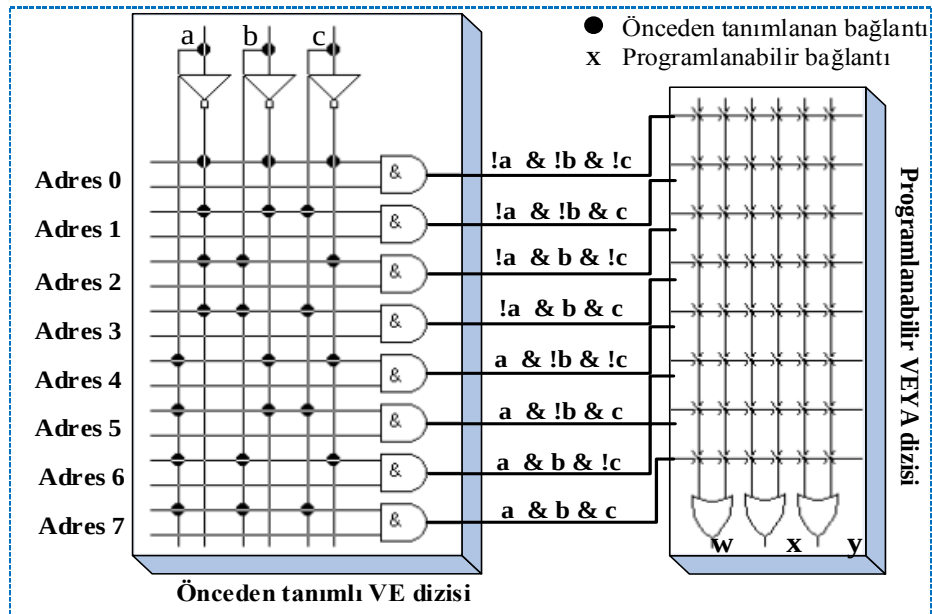
Tam özel tasarımda; dirençler, transistörler, mantık kapıları, kapasitörler ve analog devrelerin hepsi devre modelinde konumlandırılmıştır. Genel olarak, bu tip tasarım el işçiliği olarak tanımlanmaktadır. Mikroişlemciler, tam özel tasarıma verilebilecek en iyi örnektir. Yarı özel tasarımda ise önceden tanımlanmış mantık hücreleri kullanılmaktadır. Bu mantık hücreleri, gerçekleştirilecek fonksiyona göre programlanmaktadır. Yarı özel tasarıma verilecek en iyi örnek ise maskelenmiş kapı dizileridir.

3.2.5. Programlanabilir Lojik Devreler

Programlanabilir Lojik Devreler (Programmable Logic Devices-PLD), yeniden programlanabilir devreler oluşturmak için kullanılan elektronik elemanlardır. PLD yapısında bulunan mantık kapıları belirli bir işleve yönelik değildir. Üretim esnasında, PLD yapısındaki mantık kapıları, tanımsız işleve sahip olarak üretilmektedirler. Kullanım amacına yönelik olarak, PLD yapısındaki mantık kapıları yapılandırılmaktadır [88]. PLD elemanlarının tarihsel gelişim süreçleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Sayısal sistem tasarımlarında kullanılan ilk programlanabilir lojik devre elemanı, 1970'li yıllarda elektronik dünyasında yerini alan PROM elemanıdır. PROM'lar genel olarak önceden tanımlı "VE" işlemlerinden oluşan sabit dizi çıkışlarını, programlanabilir "VEYA" fonksiyonlarına süren bir yapı ile çalışırlar. Şekil 3.7'de ise üç girişten oluşan ve üç çıkışa sahip basit bir PROM çalışma yapısı verilmiştir.



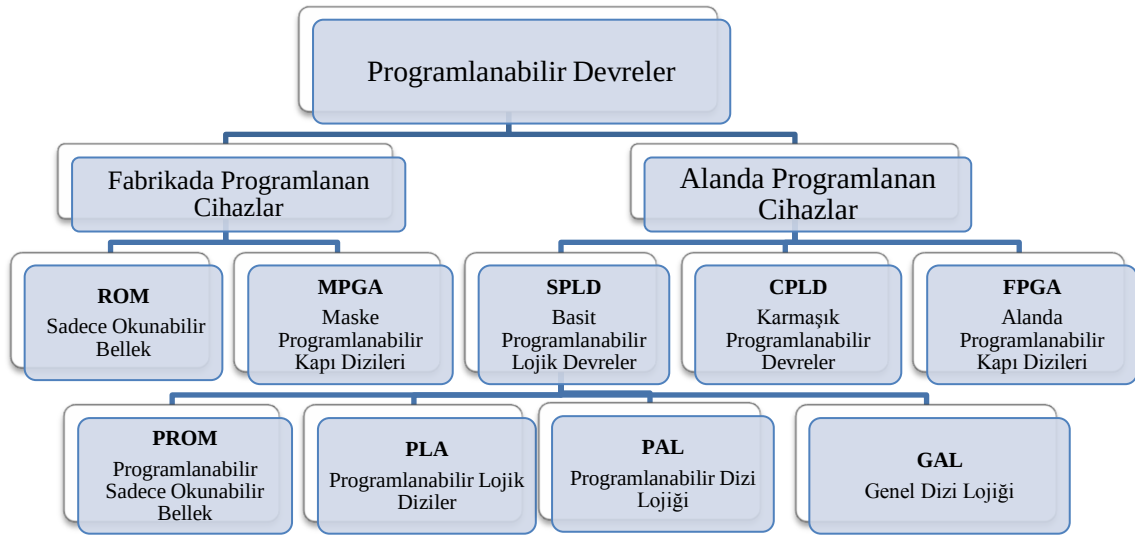
Şekil 3.6. Programlanabilir lojik devrelerin gelişim süreçleri.



Şekil 3.7. Üç girişli ve üç çıkışlı basit bir PROM çalışma yapısı.

“VE” dizisinde yer alan her bir “VE” fonksiyonu; a,b ve c girişlerinin kendisi veya tümleyeninden meydana gelmektedir. “VEYA” dizisi içerisindeki “VEYA” işlemlerinin girişleri “VE” dizisinin sekiz çıkışından oluşmaktadır. PROM’lar, bilgisayarlarda program bilgilerini ve sabit veri değerlerini saklamaya yönelik olarak geliştirilmiş olmasına rağmen tasarımcılar PROM’ları durum makineleri, basit bir algoritma veya bir mikroişlemci programı yerine getirmede kullanmaktadır. PROM yapıları genellikle karmaşık lojik fonksiyonlar için verimsizdirler. PLD’ler, fabrikada programlanabilir ve alanda programlanabilir olmak üzere iki alt kategoriye ayrılır. Fabrikada programlanabilir

elemanlar; ROM ve Maske Programlanabilir Kapı Dizileri (Masked Programmable Gate Arrays-MPGA) içermektedir. Alanda programlanabilen yapılar içerisinde; Basit Programlanabilir Lojik Devre (Simple Programmable Logic Devices-SPLD), Karmaşık Programlanabilir Lojik Devre (Complex Programmable Logic Devices-CPLD) ve FPGA olarak dört bölümde incelenebilirler. Şekil 3.8’de, PLD’lerin bölümleri ve bu bölümlere ait alt bölümler gösterilmiştir [89].



Şekil 3.8. Programlanabilir lojik devreler ve alt bileşenleri.

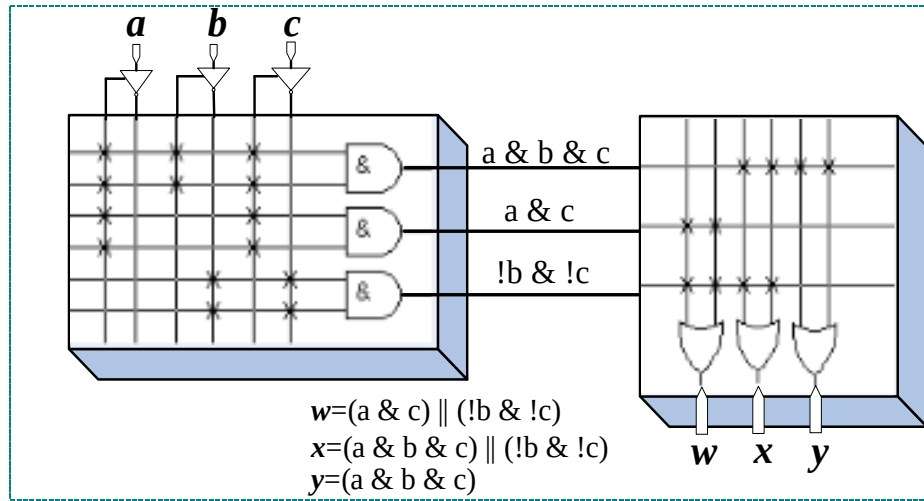
3.2.5.1. Basit Programlanabilir Lojik Devre (SPLD)

SPLD, programlanabilir lojik ailesinin en küçük ve en ucuz üyesidir. SPLD’ler, PROM, Programlanabilir Lojik Dizi (Programmable Logic Array-PLA), Programlanabilir Dizi Lojiği (Programmable Array Logic-PAL) ve Genel Dizi Lojiği (General Array Logic-GAL) olmak üzere dört kısma ayrılırlar. Bu bölümlerden PAL ve PLA yapıları yaygın olarak kullanılan cihazlardır.

3.2.5.1.1. Programlanabilir Lojik Diziler

PLA, PROM mimarisindeki sınırlamaları ele almak üzere PLD’nin gelişim sürecinde yer alan bir sonraki elemandır. Yapısındaki “VE” ve “VEYA” dizilerinin her ikisinin de programlanabilmesinden dolayı, çoğu kullanıcı tarafından ayarlanabilir basit PLD’lerdir. Bir önceki bölümde PROM’lar için verilen üç girişli ve üç çıkışlı tasarım örneğinin PLA

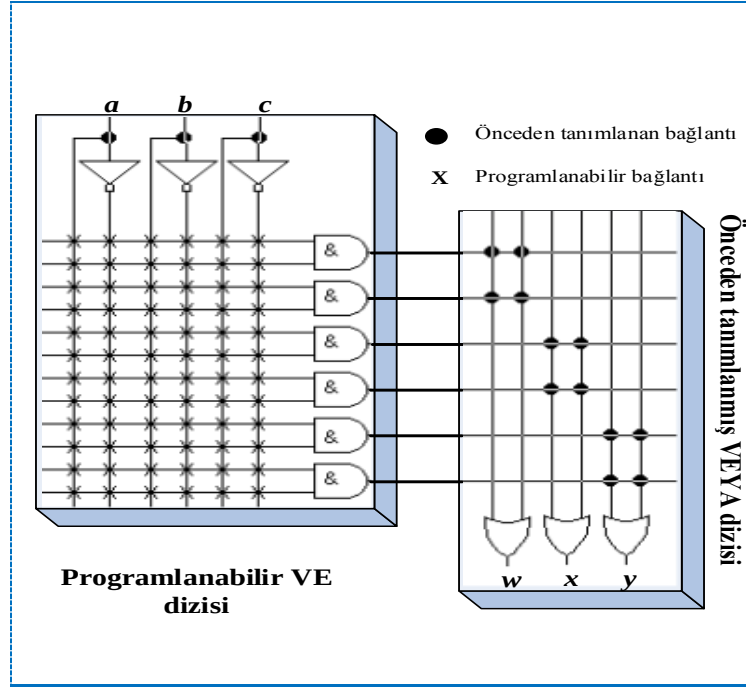
ile gerçekleştirilmesine ait yapı, Şekil 3.9’da gösterilmiştir. PROM’lardan farklı olarak “VE” dizisi içerisindeki “VE” işlem sayısı giriş sayısından bağımsızdır. Ayrıca “VE” fonksiyonları, basitçe diziler içinde daha fazla satır tanımlanarak oluşturulabilir. Benzer şekilde, “VEYA” dizisi içerisindeki “VEYA” işlem sayısı hem aygıt girişinden hem de “VE” dizisi içindeki “VE” fonksiyonlarının sayısından bağımsızdır. “VEYA” fonksiyonları da, diziler içinde daha fazla sütun tanımlanarak basitçe oluşturulabilirler.



Şekil 3.9. Programlanmış basit bir PLA yapısı.

3.2.5.1.2. Programlanabilir Dizi Lojigi

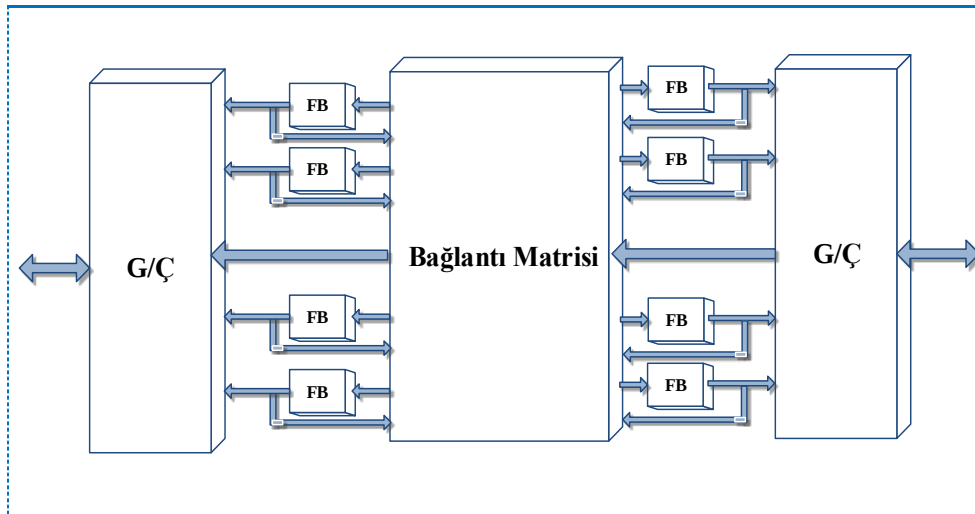
PAL, PLA’lardaki hız problemlerini gidermek için 1970’li yılların sonunda yeni bir cihaz sınıfı olarak ortaya çıkmıştır. PAL mimarisi, PROM mimarisinin tam tersi şeklindedir. Programlanabilir “VE” dizileri ve önceden tanımlı “VEYA” dizilerine sahiptir. PROM’lar içerisindeki “VE” dizileri önceden tanımlıdır “VEYA” dizileri de programlanabilir yapıya sahiptirler. Programlanmamış basit bir üç girişli ve üç çıkışlı PAL yapısı, Şekil 3.10’da gösterilmiştir. PAL’lar, programlanabilir bir dizisi olmasından dolayı PLA’lara göre çok hızlıdır. En büyük dezavantajları ise birbirleri arasında “VEYA” işlemine tabi tutulacak çok sınırlı sayıda çarpım terimlerine izin verilmesidir [89].



Şekil 3.10. Programlanmış üç girişli ve üç çıkışlı PAL yapısı.

3.2.5.2. Karmaşık Programlanabilir Lojik Devreler

CPLD, temel olarak bir çapraz geçiş anahtarı üzerinden birbirine bağlı çok sayıda PAL'ın tek yonga üzerinde tasarlanmasından oluşur. CPLD ve PAL aynı geliştirme araçlarını ve programlama özelliklerini kullanırlar. Fakat CPLD'ler daha karmaşık lojik işlemleri yerine getirebilmektedirler. Tipik bir CPLD yapısı, Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Tipik bir karmaşık programlanabilir lojik devre yapısı.

CPLD'ler; G/Ç birimleri, Fonksiyon Blokları (FB) ve bağlantı matrisinden oluşmaktadırlar. G/Ç birimleri, giriş ve çıkış sinyallerini uygun gerilim ve akım değerlerinde CPLD pinlerine sürmektedirler. FB'ler, çeşitli lojik fonksiyonları içerisinde barındıran bloklardır. Bağlantı matrisi ise tüm birimlerden gelen sinyalleri, diğer tüm birimlere iletmekte kullanılan programlanabilir bir birimdir. Sayısal tasarımlarda CPLD kullanırken aşağıdaki kriterlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir:

a. Programlama teknolojisi,

- EPROM, EEPROM veya Flash EPROM seçenekleri arasından birinin belirlenmesinde, tasarımcıya programlama araçlarındaki ihtiyaçlarını belirlemesinde ve cihazın bir kez mi yoksa birden fazla mı programlanabileceğine ilişkin önemli bilgi verir.

b. Fonksiyon bloklarının kapasitesi,

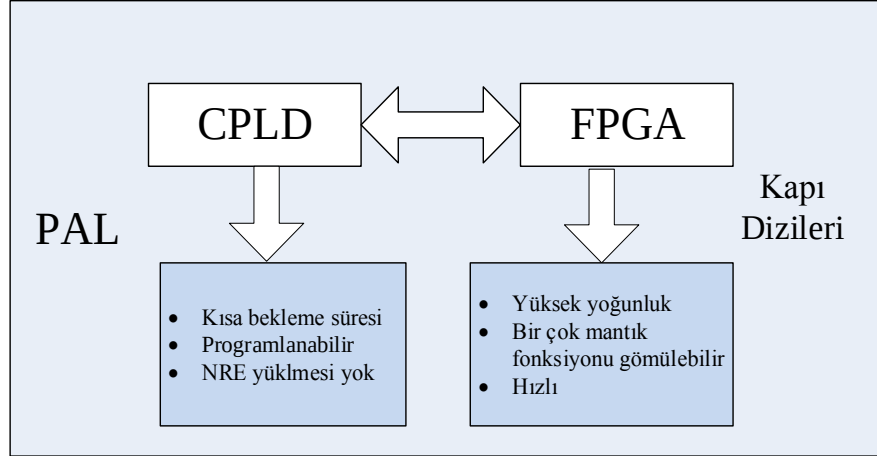
- Cihaz içerisinde, kaç tane fonksiyon bloğunun mevcut olduğu hakkında bilgi verir.
- Kaç tane çarpım ve toplam terimlerinin kullanılabilir olduğu ile ilgili bilgi sunar.
- Lojikler arasındaki maksimum ve minimum gecikme sürelerinin, ne kadar olduğu hakkında bilgi verir
- XNOR, ALU gibi ek lojik kaynaklar var mı, varsa neler olduğu ile ilgili bilgi sunar.
- Ne çeşit bir kayıtcı kontrolünün mevcut olduğu, fonksiyon bloklarına olan lokal G/Ç ve global G/Ç sayısının ne kadar olduğu ile ilgili detay sunar..

c. Cihazın G/Ç kapasitesi,

- Bağımsız G/Ç sayısının ne kadar olduğu ve bunlardan kaç tanesinin herhangi bir fonksiyonu işlemede kullanılabileceği ile ilgili bilgi verir.
- Kaç tane G/Ç biriminin saat sinyali, sıfırlama sinyali olarak kullanılabileceği hakkında bilgi sunar.

Yukarıdaki kriterler genel olarak CPLD tasarımları için belirtilmiş olsa da, bu kriterler genel bir PLD elemanı kullanımında göz önünde bulundurulması gereken başlıca kriterlerdir. İdeal olarak, donanım tasarımcıları programlanabilir aygıtların fazla uğraştırıcı bir yapıdan uzak, daha esnek ve karmaşık ASIC'ler tasarlamasına imkan vermesini bekler. Bu soruna çözüm olarak, CPLD ve FPGA cihazları ön plana çıkmıştır. CPLD ve

FPGA’lar, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi PAL ve Kapı Dizileri arasında köprü oluşturmuşlardır. CPLD’ler, PAL’lar kadar hızlı fakat daha karmaşık yapılardır. FPGA yaklaşımının temelini ise karmaşık kapı dizileri oluşturur. Fakat FPGA’lar yeniden programlanabilir bir yapıya sahiptirler [90].



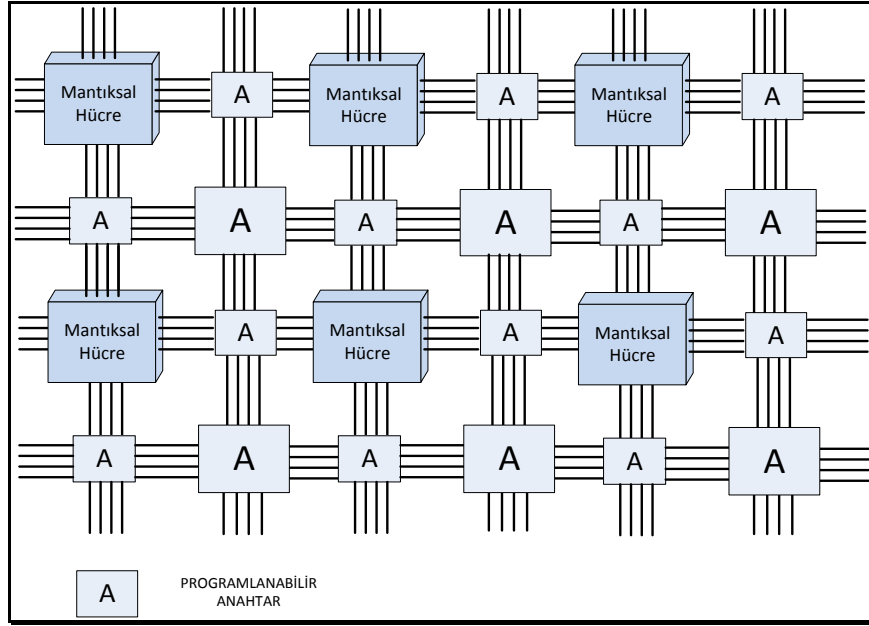
Şekil 3.12. CPLD ve FPGA yapıları arasındaki bağlantıyı gösteren şema.

3.2.5.3. Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri

FPGA, mantıksal işlemleri yerine getirmek için binlerce ve hatta milyonlarca transistörün bağlantısından oluşan lojik bir cihazdır. Karmaşık sayısal filtreler, hata tespiti ve iyileştirmesi gibi işlemler için basit toplama ve çıkarma fonksiyonlarını yerine getirirler. FPGA’lerin kullanıldığı alanlardan bazıları; hava araçları, otomobiller, radar sistemleri, savunma sanayi ve bilgisayarlardır. FPGA’lar, “mantık hücreleri” olarak adlandırılan programlanabilir mantık elemanlar içermeleri sayesinde, temel lojik kapılar (VE, VEYA, ÖZEL-VEYA) ya da kod çözücü gibi daha karmaşık yapıdaki devre elemanları olarak yapılandırılabilirler [91].

Bir mantıksal hücre birimi, basit bir işlevi yerine getirmek için programlanabilir. Programlanabilir anahtar elemanları, mantıksal hücreler arasındaki bağlantıyı sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Uygulanmak istenen tasarım için, her mantık hücresinin işlevi ve hücreler arasındaki bağlantıyı sağlayacak programlanabilir anahtar elemanı ayarlanarak gerçekleştirilmek istenen tasarımlar yapılır. Tasarım sentezleme işlemleri tamamlandıktan sonra cihazın sahip olduğu programlama özellikleri kullanılarak, istenilen mantık hücresi ve anahtar eleman ayarlamaları cihaza gömülür. Bu işlemler fabrikasyondan ziyade alanda gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla bu cihazlar “Alanda Programlanabilir” aygıtlar olarak

adlandırılmaktadır [92]. Yapısında, programlanabilir anahtar elemanları ve iki boyutlu mantıksal hücre dizilerini barındıran temel FPGA'ların yapısı, Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



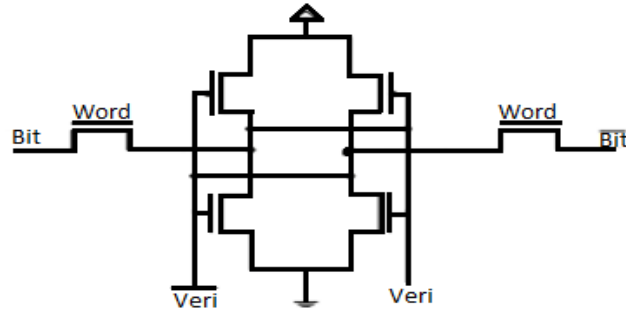
Şekil 3.13. İki boyutlu mantıksal hücre dizilerini barındıran temel FPGA yapısı.

3.3. FPGA Programlama Teknikleri

Bütün FPGA'ların programlama teknikleri, FPGA'ya programlanabilirlik özelliğini sağlayan programlanabilir anahtar elemanlarının kontrolü üzerine kurulmuştur. Birbirlerine göre farklı avantaj ve dezavantajlara sahip çeşitli programlama teknolojileri bulunmaktadır. EPROM, EEPROM, Flash, SRAM ve karşıt-sigorta en genel programlama teknolojileridir. Bu yaklaşımlardan flash, SRAM ve karşıt-sigorta teknolojileri modern FPGA'larda yaygın kullanım alanı bulmuşlardır.

3.3.1. SRAM Tabanlı Programlama

SRAM tabanlı programlama, Xilinx ve Altera aygıtlarında yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu aygıtlarda statik hafıza hücreleri, yapılandırmayı sağlamak üzere FPGA geneline dağıtılmıştır. Şekil 3.14'te, statik hafıza hücrelerinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Statik bir hücre yapısını gösteren şekil.

Bu teknolojiye, statik hafıza hücrelerinin iki önemli kullanımı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, ara bağlantı sinyallerini yönlendirmek için çoklayıcı girişlerine uygulanacak seçim satırlarını belirlemektir. İkincisi ise doğruluk tabloları içerisinde veri depolamada kullanılırlar. SRAM programlama teknolojisi FPGA’lerde giderek baskın bir rol oynamaktadır. Bunun temel olarak iki önemli nedeni; yeniden programlanabilirlik ve standart Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (CMOS) teknolojisini kullanmasıdır.

3.3.2. Flash/EEPROM Tabanlı Programlama

Flash/EEPROM hafıza hücreleri, SRAM programlama teknolojisindeki bazı eksikleri gidermek için alternatif teknolojileri içerisinde barındırır. Bu hücreler geçici olmadığından dolayı, cihaz kapatıldığında dahi bilgiler silinmez. EEPROM hafıza hücreleri, doğrudan FPGA sinyallerini anahtarlama kullanılmamışlar. EEPROM’lar, yapısındaki statik güç kaybı nedeni ile çok düşük kapasiteli cihazlar haricinde artık yaygın olarak kullanılan bir teknoloji değildir. Fakat flash bellek hücreleri, özellikle geliştirilmiş alan verimleri nedeniyle günümüzde tercih edilen bir teknolojidir ve yaygın olarak silinmeyen bellek yongaları için kullanılırlar.

Flash tabanlı programlamanın çeşitli avantajları vardır. Bunlardan en önemlisi, geçici olmamasıdır. Flash tabanlı bir cihaz, açıldığı anda aygıt yapılandırma bilgilerini beklemek zorunda kalmadan işlem yapabilir. Flash tabanlı yaklaşım, SRAM tabanlı yaklaşıma göre daha verimlidir. Bu yaklaşımın en önemli dezavantajları; sonsuz sayıda programlanabilme özelliklerinin olmamasıdır ve standart olmayan CMOS teknolojisine ihtiyaç duymalarıdır.

3.3.3. Karşıt-Sigorta Tabanlı Programlama

Bu teknoloji, normal şartlar altında çok yüksek direnç değerlerine sahip yapılara dayanmaktadır. Fakat, düşük dirençli bağlantı oluşturmak için de programlanabilir yapıdadırlar. SRAM ve diğer teknolojilerden farklı olarak bu bağlantı kalıcıdır. Programlanabilir eleman olan bir karşıt-sigorta, FPGA sinyallerini taşımada doğrudan kullanılır. Karşıt-Sigorta tabanlı programlamanın en öncelikli avantajı, sahip oldukları alanın düşük olmasıdır. Bir diğer avantajı ise diğer teknolojilere göre daha düşük dirençleri ve parazitlik kapasitanslarının olmasıdır. Standart olmayan CMOS teknolojisine sahip olması bu yapının dezavantajları arasındadır. Ayrıca yeni tüm devre üretim süreçleri göz önüne alındığında, sigorta materyallerinin özelliklerine ait önemli değişiklikleri içeren programlama mekanizması çeşitli ölçekleme zorluklarına yol açacaktır [93].

3.4. VHDL Dili Yapısı ve Özellikleri

VHDL, fiziksel olarak gerçekleştirilecek bir sistem veya devrenin davranışını tanımlamak için kullanılan bir donanım tanımlama dilidir. VHDL, Çok Hızlı Tüm Devreler (VHSIC) donanım tanımlama dilinin kısaltılmış şeklidir. VHSIC, 1980'lerde ABD Savunma Bakanlığı tarafından finanse edilen bir girişim olup, VHDL dilinin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. Bu dilin ilk sürümü VHDL-87 olup, sonrasında yükseltmeler yapılarak adlandırılan yeni sürümü VHDL-93'tür. VHDL, IEE1076 standardı ile IEEE tarafından standartlaştırılmış ilk ve orijinal donanım tanımlama dilidir [94].

VHDL, devre sentezi ve aynı zamanda devrenin simülasyonu için tasarlanmış bir dildir. Bu dilin içerisindeki tüm yapıların tamamen benzetimlerinin yapılabilmesine rağmen, bu yapıların hepsi sentezlenebilir değildir. VHDL'in temel kullanım nedenleri arasında, öncelikle bir standart olması gösterilebilir. Aynı zamanda taşınabilir ve yeniden kullanılabilir olması da, bu dilin kullanımını cazip hale getiren nedenlerdir. CPLD-FPGA ve ASIC'lerde, VHDL dilinin iki farklı uygulaması mevcuttur. VHDL kodu yazıldıktan sonra bu kodlar, programlanabilir cihazlar üzerinde tasarlanan devreyi gerçekleştirmek için kullanılırlar. Ayrıca bu kodlar, ASIC üretimi için uygulamaya özgü üretimler yapan firmalara kendi tasarımlarını gerçekleştirmek üzere sunulabilirler.

VHDL, C/C++, Pascal gibi sıradan bilgisayar programlama dillerine benzemez. Bu tür bilgisayar programlama dillerinde, işlevler ardışık olarak gerçekleştirilir. Yani, deyimler

yazıldıkları sıraya göre işletilir ve sonuç üretirler. VHDL dilinde ise bu yapı doğası gereği paraleldir. Sadece PROCESS, FUNCTION veya PROCEDURE deyimleri içerisindeki kodlar ardışıktır. VHDL, bir program değil de daha çok kod olarak adlandırılır.

3.4.1. VHDL Tasarım Yapısı

Bir VHDL tasarımı üç bölümden meydana gelir. Bunlar entity (varlık), architecture (mimari) ve library (kütüphane) dir.

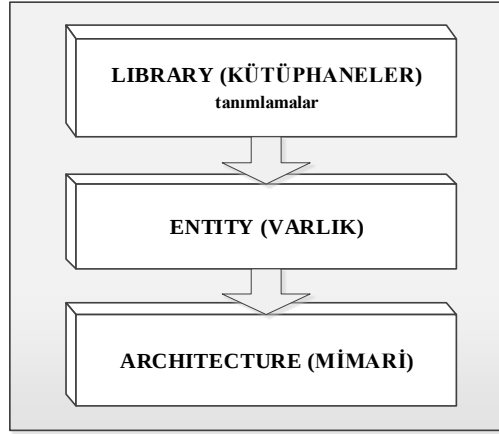
- **Varlık** : Tasarıma G/Ç/G-Ç portlarını tanımlayan bölümdür.
- **Mimari**: Tasarımın davranışının tanımı ile ilgili kodların bulunduğu kısımdır. Yani tasarımın iç mimarisini tanımlayan kısımdır.
- **Kütüphane**: Tasarım içerisinde kullanılacak olan tüm kütüphanelerin listesini içeren kısımdır. Örneğin: IEEE, std, work gibi...

Genel bir VHDL dosyasının şablonu Şekil 3.15’ te verilmiştir.

```
--Genel bir VHDL dosya yapısı
LIBRARY <Kütüphane adı>;
USE <Kütüphane_adı>.<alt_kütüphane_adı>.ALL
ENTITY <varlık_adı> IS
PORT (
<port_adı>: <port_yönü> <port_tipi>;
<port_adı>: <port_yönü> <port_tipi> );
END <varlık_adı>
ARCHITECTURE <mimari_adı> OF <varlık_adı> IS
SIGNAL <sinyal_adı> : <sinyal_tipi> := "<başlangıç değeri>;
```

Şekil 3.15. Genel bir VHDL dosya şablonu.

Her VHDL tasarımı için, sadece bir tane varlık tanımlaması vardır. Bunun yanı sıra bazı tasarımlar, çoklu mimari tanımlaması içerebilir. Fakat, genel olarak en fazla tercih edilen tasarımlar bir varlık ve bir mimari içeren tasarımlardır. Bu kodlama şekli, hem basit hem de daha görsel olduğundan fazlaca tercih edilmektedir. Basit anlamda VHDL kod yapısını gösteren akış algoritması Şekil 3.16’da gösterildiği gibi olup üç kısımdan meydana gelmektedir. Şekil 3.16’daki hiyerarşiye uygun olarak bu bölümlerin açıklamaları ve kullanım şekilleri hakkında gerekli bilgiler alt bölümlerde sunulmuştur.

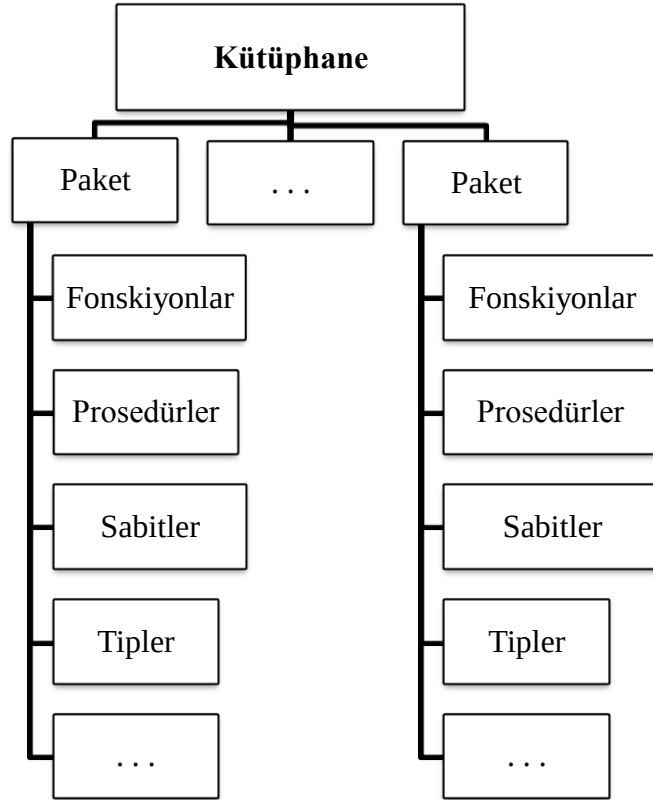


Şekil 3.16. VHDL kod tasarım bölümleri.

3.4.1.1. Kütüphaneler ve Paketler

Kütüphane ve paket yapıları, birçok işleve yönelik olarak önceden oluşturulmuş kodları yeniden kullanmak için çalışan ortak mekanizmalardır. Kütüphaneler ve paketler, kullanıcılar tarafından oluşturulabilir. Kütüphane bir veya birden fazla paket koleksiyonudur. Kütüphane, yapıları genel olarak üç farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar kullanıcılar tarafından, VHDL standardının bir parçası olarak IEEE tarafından ya da üçüncü parti bileşen sağlayıcıları tarafından oluşturulabilir. Paketler tipik olarak bileşen tanımlamaları, sabitler, fonksiyonlar, prosedürler ve kullanıcı tanımlı veri tiplerini içerirler.

Kütüphane ve Paketler, VHDL dosyalarının ilk tanımlama kısımlarında yer alırlar. Ayrıca FPGA tasarımında sıklıkla kullanılan *std_logic* tipi IEEE kütüphaneleri içerisinde bulunduğundan dolayı, kütüphane ve paket yapılarının kullanımı bu kısımda üzerinde durulması gereken konulardır. Kütüphane ve paket arasındaki hiyerarşik ilişkiyi gösteren yapı, Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Kütüphane ve paket hiyerarşisi.

Kütüphane, basit olarak iki kısımdan meydana gelmektedir. Birinci kısımda, VHDL dosyası oluşturulduğunda başlangıçta oluşan kütüphanedir. Bu kısım, sentezleme aracına bu kütüphanenin kullanılmasının zorunlu olduğu bilgisini verir. Burada yer alan “STANDART” kütüphanesi, temel veri tiplerini içerir. İkinci kısımda ise “use” ifadesi bulunmaktadır. Bu ifade, kütüphane içerisindeki hangi paketlerin ve paketler içindeki hangi öğelerin yüklenmesi gerektiğini gösterir. Kütüphane kullanımına basit bir örnek Şekil 3.18’de verilmiştir.

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEE.NUMERIC_STD.ALL;

library IEEE_PROPOSED;
use IEEE_PROPOSED.float_pkg.all;
use IEEE_PROPOSED.fixed_pkg.all;
  
```

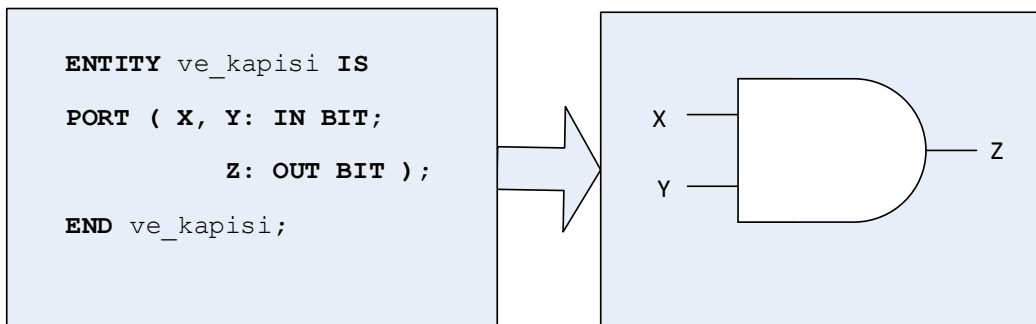
Şekil 3.18. VHDL dilinde kütüphane kullanım örneği.

Şekil 3.18'deki örnek, gerçekleştirilen bu çalışmada VHDL kodları içerisinde iki farklı kütüphane kullandığını göstermektedir. IEEE kütüphanesi, standart olarak kullanılması gereken kütüphane olmakla birlikte “IEEE_PROPOSED” kütüphanesi, FPGA içerisinde yapılacak farklı işlemlere göre özel olarak tanımlanmış bir kütüphanedir. Bu kütüphane içerisinde, kayan nokta ve sabit nokta tipli sayılar ile ilgili çeşitli yapılar bulunmaktadır. IEEE kütüphanesinin içerdiği sıklıkla kullanılan birkaç paket mevcuttur. Bunları genel olarak açıklamak gerekirse:

- **Std_logic_1164:** STD_LOGIC ve STD_ULOGIC veri tiplerini tanımlayan pakettir.
- **Std_logic_arith:** SIGNED ve UNSIGNED veri tiplerini tanımlar. Bu tipler ile ilgili aritmetik ve karşılaştırma işlemlerini içerir. Ayrıca içerisinde bir veri tipini başka bir veri tipine dönüştüren tip dönüşüm fonksiyonları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları *conv_integer(a)*, *conv_unsigned(a,b)*, *conv_signed(a,b)*, *conv_std_logic_vector(a,b)* dir.
- **Std_logic_signed:** STD_LOGIC_VECTOR veri tipi üzerinde SIGNED veri tipiymiş gibi işlem yapılmasına imkan sağlayan fonksiyonları içeren pakettir.
- **Std_logic_unsigned:** STD_LOGIC_VECTOR veri tipi üzerinde UNSIGNED veri tipiymiş gibi işlem yapılmasına imkan sağlayan fonksiyonları içeren pakettir.

3.4.1.2. Varlık

VHDL içerisindeki varlık bölümü, devrenin bütün giriş ve çıkış pinlerinin tanımlamalarını içeren listedir. Varlık tanımlamasının basit bir örneği ve bu tanımlamaya ait eşdeğer devre yapısı Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Varlık tanımlaması ve bu varlığa ait eşdeğer devre yapısı.

Burada X, Y ve Z pinleri giriş çıkış olarak varlık içerisinde tanımlanmıştır. VHDL dilinde bir pinin giriş, çıkış veya giriş-çıkış olduğunu belirtmek için IN, OUT ve INOUT ifadeleri kullanılır. “BIT” ifadesi ise bu pinlerin veri tiplerini belirtmektedir. Buradaki BIT ifadesi portların “1” veya “0” gibi tek değer alabildiklerini ifade etmektedir.

3.4.1.3. Mimari

Mimari, genel olarak VHDL tasarımının ikincil ve seçime bağlı kısmını oluşturan yapıdır. Mimari, tasarlanan devrenin nasıl bir işlev göreceğini belirler. Bu belirleme işlemi, iki ayrı bölüm altında incelenmektedir. Bu bölümleri ve mimari yapısını gösteren kod tanımlaması, Şekil 3.20’de verilmiştir. Birinci kısım, “ARCHITECTURE” ifadesi ile ”BEGIN” arasında kalan tanımlamalar kısmıdır. Tanımlamalar bölümünde çeşitli sinyaller, sabitler, fonksiyonlar, prosedürler ve diğer modüller yer almaktadır. İkinci kısım ise “BEGIN” ifadesi ile “END” arasındaki kod kısmıdır. Kod bölümü, önceden tanımlanan sinyaller ve modüllerin bir birleri arasındaki bağlantıları ve davranışlarını belirtilir [94, 95].

```
ARCHITECTURE mimari_adı OF varlık_adı IS
    --tanımlamalar
BEGIN
    --kod
END mimari_adı;
```

Şekil 3.20. VHDL dilinde mimari yapısını gösteren kod tanımlaması.

3.5. FPGA Tasarım Geliştirme Araçları ve Süreçleri

Modern tasarımları tüm yönleriyle ele almak ve platforma bağlı kalmaksızın kolayca hızlı tasarımlar gerçekleştirmek için günümüze kadar birçok Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) aracı üretilmiştir. Bu tasarım araçları mimari çizimler, makine mühendisliği, devre tasarımı gibi birçok alanda verimli bir şekilde kullanılmaktadır. 1960’lı yıllardan günümüze kadar olan süreçte, BDT araçları dijital devre tasarımında, tasarlanan devrenin bir sanal kopyasını bilgisayarda oluşturmak ve devreyi fiziksel olarak gerçekleştirmeden

önce çeşitli benzetimler yaparak devrenin davranışını test etmek için kullanılmaktadır. Başlangıçlarından günümüze kadar olan süreçte, BDT araçları sürekli bir gelişim göstermektedir.

Modern tasarım araçları, piko saniyeler mertebesindeki çok hassas tasarımlara olanak sağlamaktadır. Bu araçlar, devrelerin otomatik sentezlenmesi ve bu tasarımların çeşitli teknolojilerde uygulanmasına imkan tanımaktadırlar.

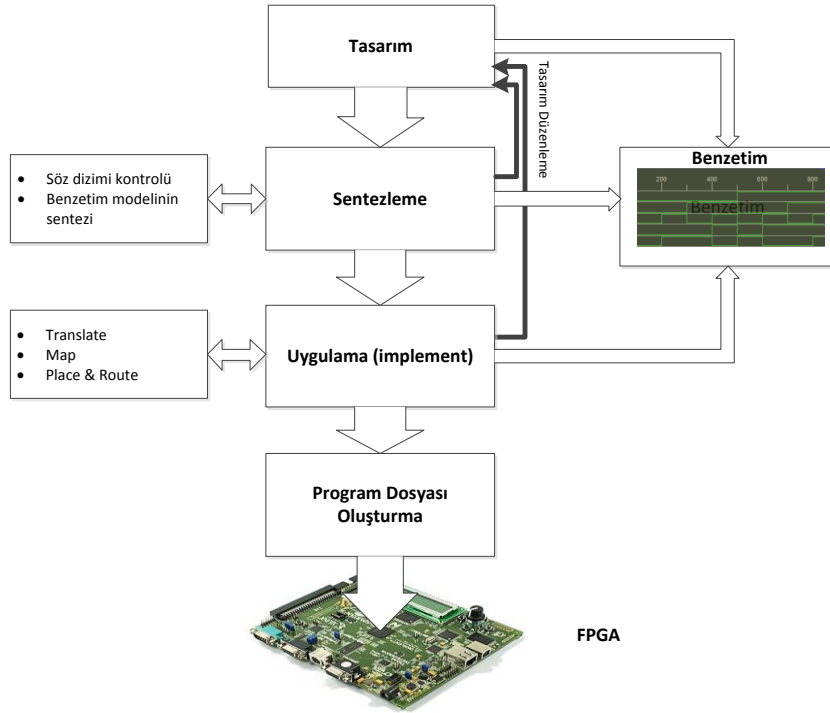
1980'lerin başlangıcında, sayısal tasarım mühendisleri karmaşık sayısal sistemleri tek bir yonga üzerinde uygulamak için daha yeni ve güçlü teknolojiler kullanmaya başladılar. Bu yongalar, FPGA olarak adlandırılmaktadır. FPGA'lar ile birlikte sayısal tasarımda yaşanan devrim, bilgisayar destekli tasarım araçlarında da yeni bir sınıf oluşmasına yol açmıştır. FPGA programlamasında kullanılan BDT araçlarının sahip olduğu tipik özellikler şu şekildedir;

- Şematik tasarım,
- Sentezleme,
- Benzetim,
- Uygulama ve
- Cihaz programlama aracı.

VHDL kullanarak devre sentezleme, uygulama ve benzetim işlemlerinde kullanılan birkaç BDT yazılımı mevcuttur. Bu yazılımlar içerisindeki bazı araçlar, satıcı firma tarafından yazılımın bir parçası olarak kullanıcılara sunulmaktadır. Altera firmasının ürettiği CPLD/FPGA'lerinin programlanması için Quartus-II yazılım aracı kullanılırken, Xilinx firmasının ürettiği CPLD/FPGA'lerin programlanmasında ise ISE Suite yazılım aracı kullanılmaktadır [96].

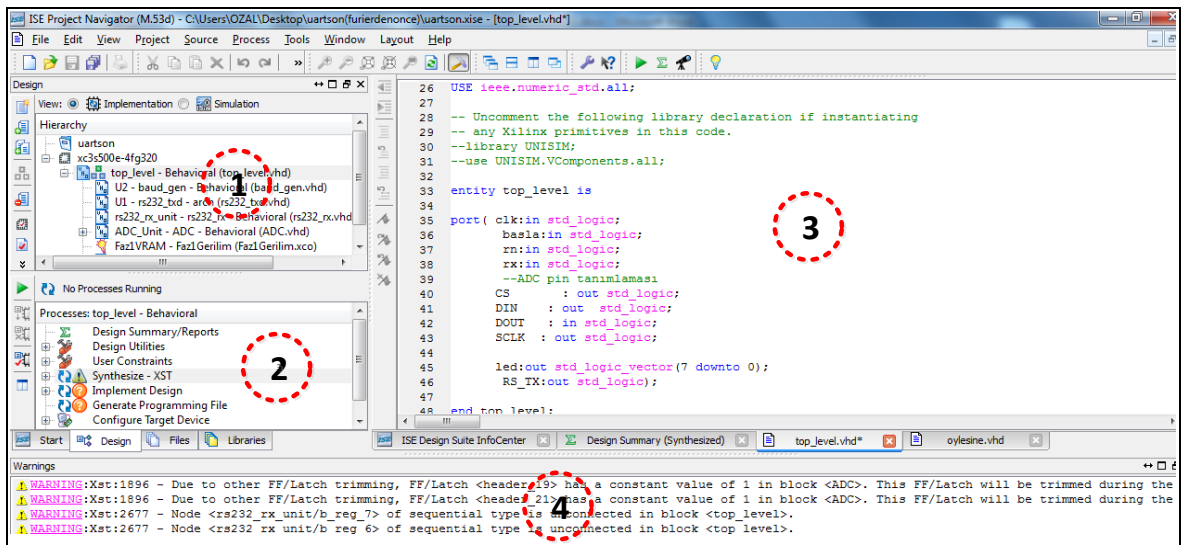
3.5.1. Entegre Yazılım Ortamı

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulamalarda Xilinx firmasının üretmiş olduğu Virtex 5 FPGA cihazı kullanıldığından dolayı bu bölümde, ISE yazılımının sahip olduğu özellikler ve kullanım şekli ile ilgili temel bilgiler sunulmuştur. Şekil 3.21'de, FPGA programlamasında ISE yazılım aracı kullanarak tasarım sürecinden programlama sürecine kadar olan aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 3.21. ISE yazılım aracı ile FPGA programlama aşamaları.

Tüm bu araçlar, tasarım dosyalarını ve işlemlerini organize eden tek bir yönlendirici aracı ile başlatılmaktadır. ISE yazılımı içerisinde tüm bu işlemleri ve dosyaları barındıran yönlendirici aracı “Project Navigator” olarak adlandırılmaktadır. Bu araca erişebilmek için, ISE program kurulduktan sonra masa üstünde yer alan ilgili ikona tıklanarak ya da başlat menüsünden “Başlat → Tüm Programlar → Xilinx ISE Design Suite 12.1 → Project Navigator” yolu ile erişilebilir. Şekil 3.22’de, proje yönlendirici aracına ait ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.22. ISE proje yönlendirici ekranı.

Proje yönetici ekran görüntüsü üzerindeki işaretli bölümler şu şekilde sıralanabilir:

1-) *Kaynak penceresi*: Tasarıma ait tüm kaynak dosyalarının yer aldığı penceredir. Bu pencere içerisindeki herhangi bir dosyaya çift tıklandığında, dosya içeriği görüntülenmektedir.

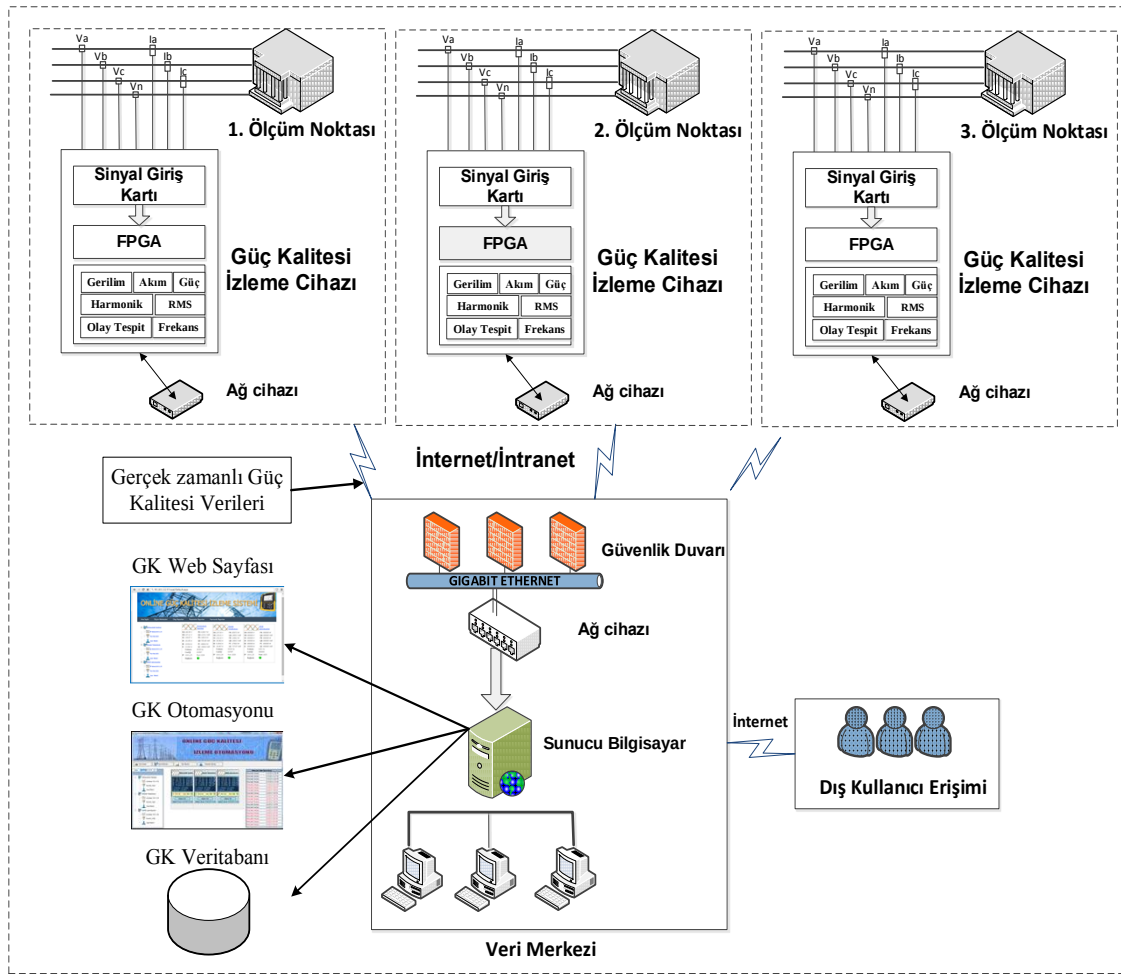
2-) *İşlem penceresi*: Bu pencere içerisinde, tasarıma ait işlemler yer almaktadır. Bu işlemlerden herhangi birisine çift tıklandığında, ilgili işlem yürütülmektedir. Bu işlemler sırası ile sentezleme, uygulama, program dosyası oluşturma ve cihaz programlama şeklindedir.

3-) *Kod penceresi*: Seçilen herhangi bir HDL dosyasına ait kodları göstermektedir. Ayrıca bu pencere üzerinde tasarıma ait donanımsal bilgiler ve diğer gerekli sayfalar da görüntülenmektedir.

4-) *Konsol penceresi*: İşlemlerin durumları hakkında bilgiler sunmaktadır. Yürütülen işlemler sırasında oluşan tüm hata ve uyarı mesajları bu panel üzerinde görüntülenmektedir.

4. İNTERNET TABANLI GÜÇ KALİTESİ İZLEME SİSTEMİNİN DONANIMSAL VE YAZILIMSAL YAPISI

Bu bölümde, tez kapsamında tasarlanan İGKİS'in çalışma yapısına ilişkin yazılımsal ve donanımsal tasarımlara yönelik kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır. Güç kalitesi izleme sisteminin donanımsal yapısının yanı sıra hem FPGA hem de bilgisayar tabanlı yazılımların tasarım aşamaları bu bölüm altında detaylı olarak sunulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen İGKİS'in genel çalışma yapısı Şekil 4.1'de verilmiştir.



İGKİS, ölçüm noktalarından elde ettiği güç kalitesi parametrelerini, internet veya yerel ağ üzerinden eş zamanlı olarak belirlenen bir izleme merkezine aktarmaktadır. İzleme merkezinde oluşturulan bilgisayar tabanlı yazılımlar aracılığı ile güç kalitesi verileri anlık veya geçmişe dönük olarak kapsamlı bir şekilde izlenebilmektedir.

Güç kalitesi izleme sisteminin mimarisi, donanımsal ve yazılımsal olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Yazılımsal bölümde, izleme sisteminin gerek duyduğu tüm yazılımların tasarımları ve uygulamaları bulunmaktadır. Donanımsal bölümde ise, izleme sisteminde kullanılan donanımlar ve bu donanımlara ait tasarımlar yer almaktadır.

Güç kalitesi izleme sistemi, ölçüm noktalarındaki güç kalitesi verilerini sürekli ve standartlara uygun bir şekilde ölçmektedir. Bu ölçümlerden elde edilen güç kalitesi verilerinin hatasız bir şekilde merkeze aktarılmasını sağlamaktadır. Tasarlanan izleme sistemi, sinyal giriş modülü ve sayısal sinyal işleme modülü olmak üzere iki alt kısımdan oluşmaktadır. Sinyal giriş kısmı, her bir ölçüm noktasından üç akım, üç gerilim ve bir nötr olmak üzere toplam yedi girişe sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Ölçüm noktalarındaki akım ve gerilim sinyallerinin, uygun seviyelere hatasız bir şekilde indirgenmesi amacı ile sinyal giriş birimi üzerinde çeşitli akım ve gerilim algılayıcı devreleri bulunmaktadır. Ayrıca sinyal giriş modülü üzerinde, analog akım ve gerilim sinyallerinin sayısal değerlere dönüştürülmesini sağlayacak ADC entegresi yer almaktadır. Bu entegre, her bir faza ait akım ve gerilim sinyalini 6.4 KHz örnekleme frekansı (periyot başına 128 örnek) ile örneklemektedir.

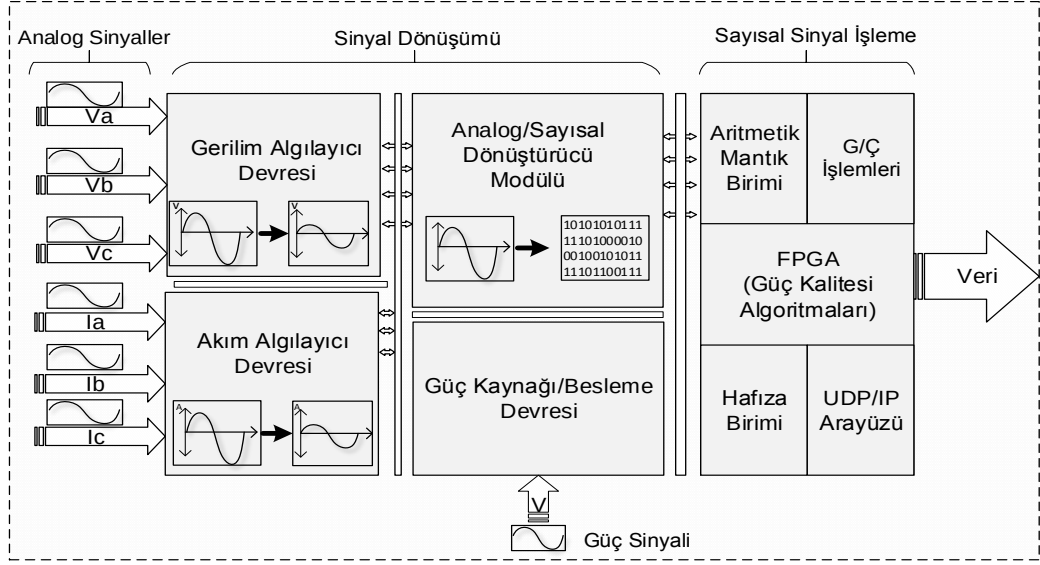
Sinyal giriş modülü aracılığıyla dönüşüm işleminden geçen akım ve gerilim sinyalleri, izleme sisteminin sayısal sinyal işleme birimine aktarılmaktadır. Sinyal işleme tarafındaki algoritmalar, FPGA donanımı üzerinde çalışmaktadır. IEC 61000-4-30 gibi çeşitli güç kalitesi standartlarına uygun olarak ölçümü yapılan güç kalitesi verileri, UDP/IP haberleşme protokolü aracılığı ile anlık olarak izleme merkezine aktarılmaktadır. Güç kalitesi otomasyon yazılımı ile ölçüm noktalarından gelen anlık güç kalitesi verileri ayıklanarak sunucu üzerinde yer alan güç kalitesi veritabanında depolanmaktadır. Ayrıca, ölçüm noktalarına ait hem anlık parametrelerin görüntülenmesi hem de geçmişe dönük raporlamaların oluşturulması için güç kalitesi otomasyonu üzerinde çeşitli modüller oluşturulmuştur. İGKİS'in ölçüm noktalarındaki güç kalitesi verilerine uzaktan erişebilmek için, bir web uygulaması hazırlanmıştır. Bu sayede, kullanıcılar veya sistem yöneticileri internet bağlantısının bulunduğu herhangi bir noktadan izleme merkezine bağlanabilmektedir. Böylece, ölçüm noktalarına ait anlık veya geçmişe dönük güç kalitesi parametrelerine kolayca erişilmektedir.

4.1. Güç Kalitesi İzleme Sisteminin Donanımsal Yapısı

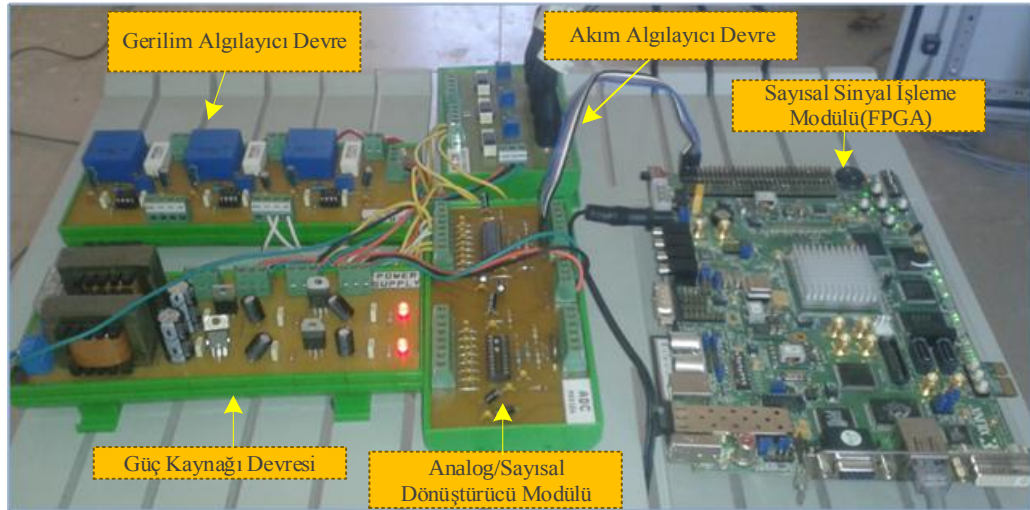
Güç kalitesi izleme sistemleri için yaygın olarak kullanılan bir kaç tasarım yaklaşımı bulunmaktadır. Bu yaklaşımlarda DSP, mikroişlemci, bilgisayar ve veri toplama kartları (DAQ) gibi donanımlar ya tek başına ya da hibrit bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yaklaşımların birbirlerine göre maliyet, yazılım geliştirme süreçleri, haberleşme ve çevre birimler açısından çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, bilgisayar ve DAQ kartını tümleşik olarak kullanan sistemler; yazılım geliştirme ve tasarım sürecinin kısa olması, çevre birimlerin kolayca kontrol edilebilmesi ve haberleşme fonksiyonlarını kolayca yerine getirebilme gibi avantajlara sahiptir. Fakat bu sistemlerde yer alan donanım elemanlarının genel amaçlı olması, donanım yapısına müdahale etmeyi zorlaştırmaktadır. Bunun gibi problemleri aşmak için, bu tarz sistemlerde çeşitli ek tasarımlara ihtiyaç duyulur. Ayrıca, bu sistemler seri üretim açısından uygun yapılar değildir. DSP ve mikroişlemci tabanlı yapılarda ise özellikle yazılım aşamasında karşılaşılan zorluklar ve haberleşme gibi önemli fonksiyonların yetersiz olması, bu yaklaşımın dezavantajlarını oluşturmaktadır [9]. Buna karşın, yüksek hızlarda işlem yapabilmeleri, amaca yönelik olmaları ve seri üretim açısından verimli olmaları bu yaklaşımların genel tercih nedenlerini oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, güç kalitesi izleme sisteminin tasarımında FPGA donanımının kullanılması tercih edilmiştir. Bu tercihin nedenleri; yüksek hızlarda işlem yapabilmesi, yazılımsal olarak DSP ve mikrodenetleyicilere göre çok daha esnek yapılar sunması ve haberleşme fonksiyonlarını etkili olarak kullanılabilmesi gibi avantajlardır. Tasarlanan izleme sistemi, güç kalitesi parametrelerini kesintisiz bir şekilde ve sürekli olarak standartlara uygun biçimde ölçebilecek ve ölçüm sonuçlarını anlık olarak merkeze iletebilecek yapıdadır.

Güç kalitesi izleme sisteminin donanım yapısını, beş alt başlık altında incelemek mümkündür. Bu başlıklar; gerilim sinyal algılayıcı devresi, akım sinyal algılayıcı devresi, analog/sayısal dönüştürücü modülü, sayısal sinyal işleme modülü ve güç kaynağı/besleme devresidir. Bu başlıklar ilerleyen bölümlerde detaylı olarak ele alınacaktır. Şekil 4.2’de, güç kalitesi izleme sisteminin donanımsal yapısına ait blok şeması gösterilmiştir. Şekil 4.3’te ise, güç kalitesi izleme sistemine ait donanımların görüntüsü verilmiştir.



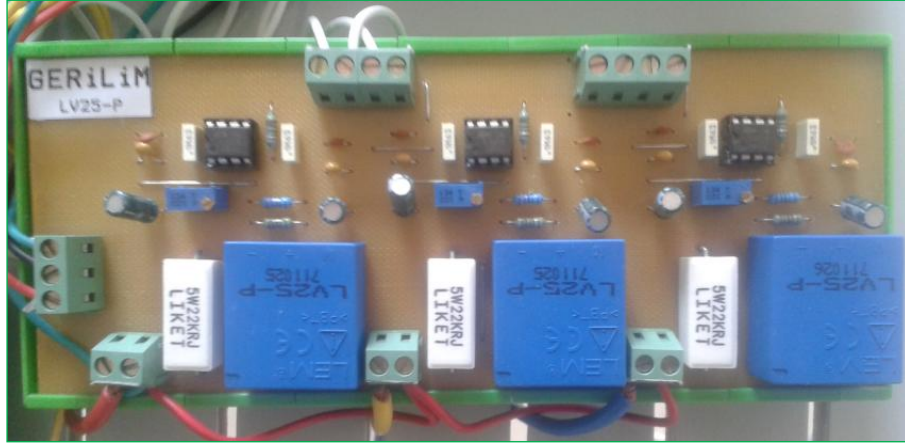
Şekil 4.2. Güç kalitesi izleme sisteminin donanımsal yapısını gösteren blok şema.



Şekil 4.3. Güç kalitesi izleme sistemine ait donanımlar.

4.1.1. Gerilim Algılayıcı Devresi

Güç kalitesi izleme sistemi üzerinde, üç faz ve bir nötr olmak üzere dört gerilim girişi bulunmaktadır. Bu gerilim girişleri, ölçüm noktalarındaki gerilim baralarına bağlanmaktadır. Standartlarda belirtildiği gibi [97] gerilim algılayıcı devresi, analiz edilecek besleme geriliminin en yüksek değeri ve frekansı için uygun bir yapıdadır. Ölçüm karakteristiği ile doğruluğunu, gerilimin 1.2 katında değişmeden tutabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ölçme işlemleri için en az 1.5 tepe faktörü yeterli olmaktadır. Çalışma kapsamında tasarlanan gerilim algılayıcı devresinin görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir.



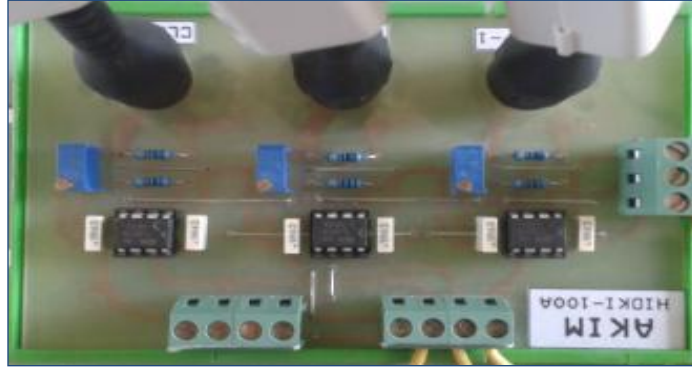
Şekil 4.4. Gerilim algılayıcı devresinin görüntüsü.

Bu devrede, gerilim dönüşümü işlemini gerçekleştiren çeşitli elektronik elemanlar bulunmaktadır. Gerilim dönüşümü için kullanılan bu elemanlar, yüksek gerilim sinyalini düşük gerilim seviyelerine indirgemedi kullanılmaktadır. Tasarlanan izleme sisteminin gerilim sinyal algılayıcı devresi üzerinde, gerilim dönüşümü için LEM firmasına ait LV25-P gerilim sensörleri kullanılmıştır. Sahip olduğu yüksek doğruluk, doğrusallık ve yüksek bant genişliği gibi avantajlar bu çalışmada LV25-P gerilim sensörlerinin tercih ölçütlerini oluşturmuştur.

Gerilim sensörü, ± 500 V primer anma gerilimi için yüksek hassasiyette dönüşüm işlemi sağlamaktadır. Şebeke geriliminin analog/sayısal dönüştürücü biriminde işlenebilmesi için bu gerilim, ± 2.048 V seviyelerine dönüştürülerek aktarılmıştır. Hazırlanan gerilim sinyal algılayıcı devresinin tüm testleri, laboratuvar ortamında yapılmış ve şebekeye ait gerilim sinyallerinin yüksek doğrulukta dönüştürülerek elde edildiği görülmüştür.

4.1.2. Akım Algılayıcı Devresi

Akım algılayıcı devresi, şebeke üzerinden geçen akımın doğru ve sürekli bir şekilde ölçümünü gerçekleştirmek amacı ile tasarlanmış elektronik devredir. Akım sinyal algılayıcı devresi üzerinde, akım sensörleri ve bu sensörlerin çalışması için gerekli olan çeşitli elektronik elemanlar bulunmaktadır. Akım sensörlerinin seçiminde; doğruluk, kararlılık, frekans tepkisi, izolasyon gibi kriterler göz önüne alınmıştır. Şekil 4.5’de, izleme sisteminin akım algılayıcı devresinin yapısı gösterilmiştir.



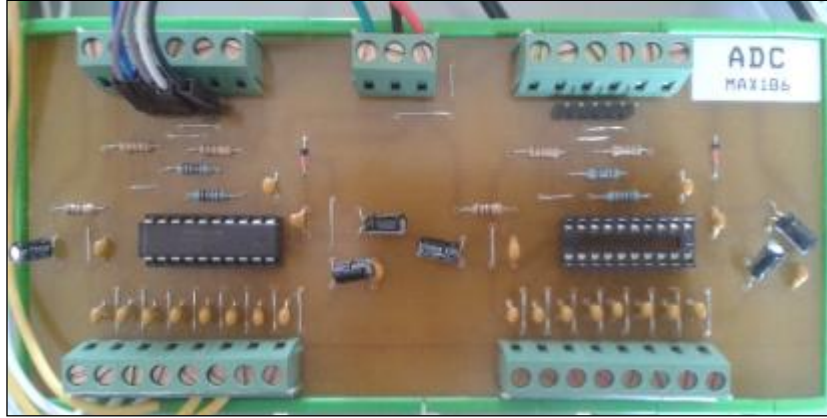
Şekil 4.5. Güç kalitesi izleme sisteminin akım algılayıcı devresi.

Endüstriyel uygulamalarda, akım ölçümü için izlenen çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerde; şönt direnç, akım trafosu ve hall etkili sensörler kullanılır. Akım ölçümü için kullanılan en yaygın yöntemde, hall etkili akım sensörleri kullanılır. Hall etkisi, manyetik alan içerisinde bulunan ve üzerinden akım geçen bir iletken boyunca gerilim oluşması olayı olarak bilinmektedir. Hall etkili sensörler, elektron hareketliliği yüksek olan yarı iletken malzemelerden yapılmaktadır. Prensip olarak akım taşıyan iletkenlerin yakınına yerleştirilip, bu akım tarafından oluşturulan manyetik alana maruz bırakılırlar. Hall etkili sensörler, devreyi kesmeden devreden geçen akımı ölçmek amacı ile kullanılırlar. Bu tez çalışmasında, tasarlanan güç kalitesi izleme sisteminin akım girişleri için HIOKI firmasına ait 1000 amperlik 9660 modeli akım sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerin seçim nedeni, doğruluk ve kararlılık gibi ölçütlerin yanı sıra izleme sistemlerinin monte edilecekleri noktalardan akım verilerini devreyi kesmeden alabilmeleri ve montajlarının oldukça rahat olmasıdır.

4.1.3. Analog Sayısal Dönüştürücü Modülü

Analog sayısal dönüştürücü modülü, akım ve gerilim algılayıcı devrelerinden elde edilen analog akım ve gerilim sinyallerinin sayısal sinyallere dönüştürülmesi amacı ile kullanılmaktadır. Analog sayısal dönüştürücü modülü üzerinde, Max186 Dcpp ADC entegresi ve bu entegrenin çalışması için gerekli olan elektronik bağlantılar yer almaktadır. Bu modül üzerinde yer alan ADC entegresi, analog gerilim ve akım sinyallerini belirlenen ölçekleme oranı veya karşılaştırma şemasına göre sinyal işleme tarafındaki FPGA işlemcisinin algılayabileceği sayısal ifadelerle dönüştürmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan Max186 entegresi, 12 bit çözünürlüğe sahip, 8 farklı kanallı yüksek bant

genişliğinde ve yüksek dönüştürme hızında seri arayüze sahip bir analog sayısal dönüştürücü entegresidir. Bu entegre, bipolar +5 V veya unipolar ± 5 V besleme gerilimi ile yüksek doğrulukta dönüştürme işlemi gerçekleştirmektedir. Şekil 4.6’da, tez kapsamında tasarlanan güç kalitesi izleme sistemine ait analog sayısal dönüştürücü modülünün yapısı verilmiştir.



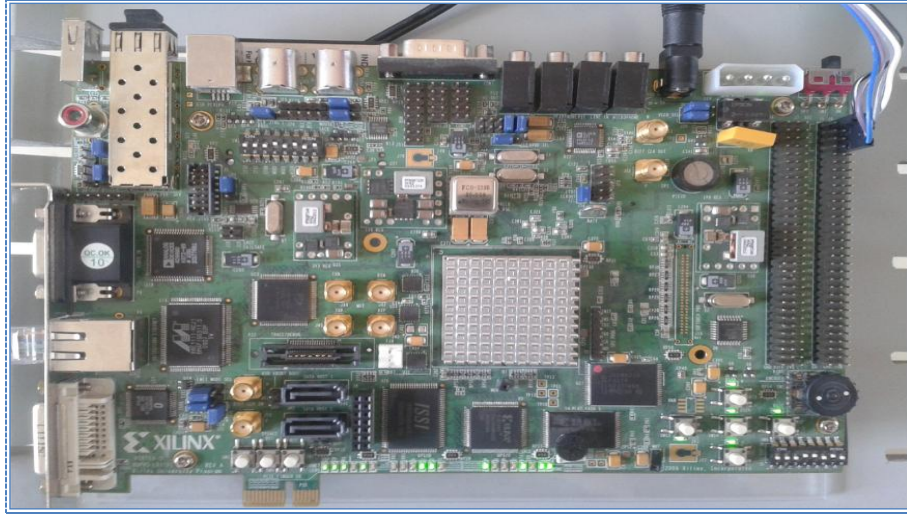
Şekil 4.6. Güç kalitesi izleme sistemine ait analog sayısal dönüştürücü modülü.

Güç kalitesi izleme sistemi üzerinde yer alan analog sayısal dönüştürücü modülü, gerilim ve akım sinyal algılayıcı devrelerinden gelen gerilim ve akım sinyal değerlerini doğrudan sayısal sinyal işleme modülüne seri bir ara haberleşme ara yüzü ile aktarmaktadır. Sayısal sinyal işleme modülüne gelen sayısal akım ve gerilim değerleri bu kısımda işlenerek, sinyal işleme algoritmalarına giriş verisi olarak sunulmaktadır.

4.1.4. Sayısal Sinyal İşleme Modülü

Güç kalitesi izleme sisteminin en önemli bölümünü oluşturan sayısal sinyal işleme modülü, akım ve gerilim giriş verilerine göre güç kalitesi parametrelerinin standartlara uygun olarak ölçülmesi ve bu parametrelerin bilgisayar tarafındaki güç kalitesi veritabanına aktarılması işlemlerini gerçekleştirmektedir. Sayısal sinyal işleme modülü, sinyal verilerinin işleneceği bir FPGA işlemcisi ve bu işlemciye ait çevre birimlerden oluşmaktadır. FPGA donanımının paralel işlem yapabilme yeteneği ve çevre birimlerin kontrolü açısından zengin bir yapıya sahip olması, tez çalışmasında başlıca tercih nedeni olmuştur. Bu çalışmada, Xilinx firması tarafından üretilen Virtex ailesinin Virtex5

LX110T modeli olan FPGA geliştirme kartı kullanılmıştır. Şekil 4.7’de, Virtex5 FPGA geliştirme kartının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.7. Virtex5 LX110T FPGA geliştirme kartının üstten görünüşü.

FPGA cihazlarının programlanması işlemleri, Verilog veya VHDL gibi donanım tanımlama dilleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan Virtex5 LX110T modeli FPGA geliştirme kartının sahip olduğu çeşitli teknik özellikler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Virtex 5 LX110T FPGA Kartının sahip olduğu teknik özellikler.

Xilinx XC5VLX110T FPGA	AC97 Ses codec
2 adet 32 Mb Xilinx XCF32P Platform Flash	RS-232 seri port
Xilinx System ACE CompactFlash	2 satır, 16 karakter LCD ekran
64-bit, 256 MB DDR2 DIMM Bellek	PS/2 fare veya klavye portu
Programlanabilir sistem saat üretici	VGA ekran bağlantı portu
Harici saat sinyali	10/100/100 Ethernet PHY yuvası
Genel Amaçlı DIP anahtarlar(8), LED(8), butonlar	8-Kb IIC EEPROM
Genişletme pinleri	FPGA/CPLD hata ayıklama/programlama ara yüzü
SPI flash (2 MB)	Intel P30 StrataFlash (32 MB)
	JTAG yapılandırma portu

Güç kalitesi izleme sisteminin, gömülü bir sistem olarak sürekli ve doğru bir şekilde çalışması ve seri üretim aşamasında getireceği büyük avantajlar açısından FPGA cihazının kullanımı oldukça önem taşımaktadır. FPGA işlemcisinin, DSP ve bilgisayar donanımlarına göre oldukça uzun zaman alan bir programlama süreci bulunmaktadır. Fakat

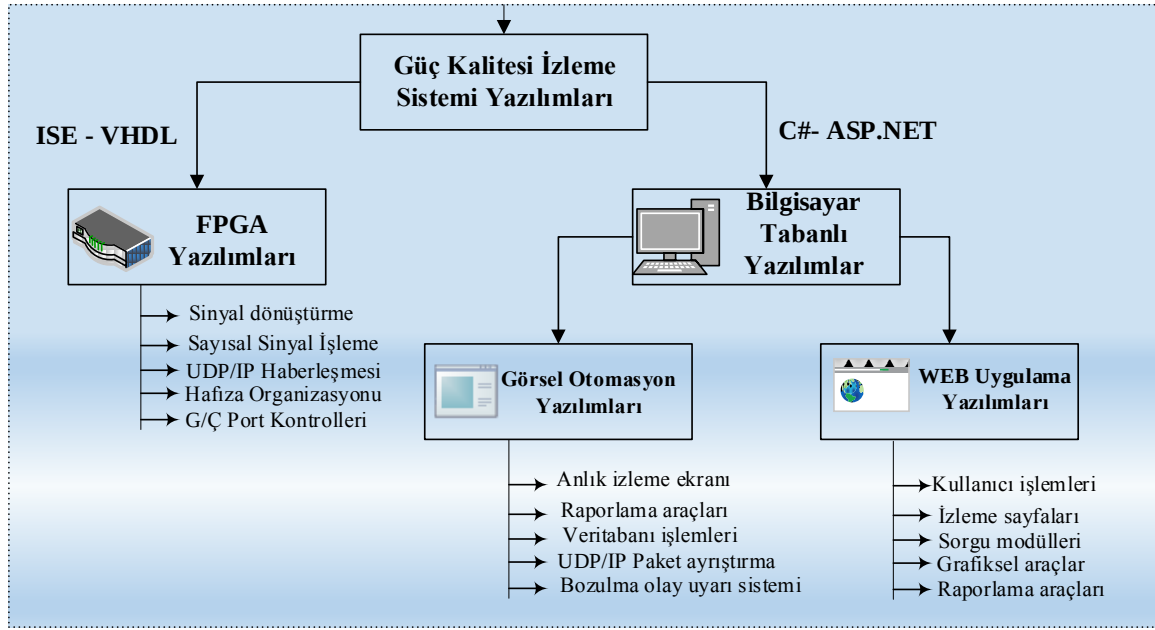
sahip olduğu hız ve sinyal işleme alanındaki verimliliği dikkate alındığında, güç kalitesi izleme sisteminin sinyal işleme modülünde kullanımı önemli katkılar sağlamıştır.

4.1.5. Test İşlemleri İçin Kullanılan Sistemler

Tez çalışması kapsamında geliştirilen güç kalitesi izleme sisteminin elde ettiğı güç kalitesi parametrelerinin doğruluğunun tespitinde, gerek donanımsal gerekse de yazılımsal olarak çeşitli test platformları kullanılmıştır. Yazılımsal olarak gerçekleştirilen algoritmaların doğruluğunun test edilmesinde, MATLAB yazılım ortamı kullanılmıştır. FPGA içerisinde donanım tanımlama dili ile oluşturulan sinyal işleme algoritmaları, öncelikle MATLAB ortamında derlenmiştir. Daha sonra, aynı giriş verisi ile FPGA ortamından elde edilen sonuçlar, MATLAB ortamından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Donanımsal olarak kullanılan test düzeneklerinde ise çeşitli ölçüm sistemleri referans alınmıştır. Bu ölçüm sistemleri içerisinde; laboratuvar ortamındaki osiloskop, multimetre ve güç kalitesi analizörleri gibi cihazlar bulunmaktadır. Güç kalitesi analizörü olarak test aşamasında, Hioki firmasına ait 3196 ürün kodlu güç ve harmonik analizör cihazı kullanılmıştır. Güç kalitesi analizörünün elde ettiğı ölçüm sonuçları ile tasarlanan izleme sisteminin sonuçları karşılaştırılarak gerekli test işlemleri yapılmıştır.

4.2. Güç kalitesi İzleme Sisteminin Yazılımsal Yapısı

Güç kalitesi izleme sistemi yazılımları, genel olarak iki farklı platform altında hazırlanmıştır. Bu yazılımlar, hem güç kalitesi izleme sistemi üzerindeki sinyal işleme yazılımlarını hem de bilgisayar ortamındaki güç kalitesi izleme yazılımlarını kapsamaktadır. İzleme sistemi üzerinde hazırlanan yazılımlar, ISE platformu altında VHDL donanım tanımlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında çalışan yazılımlar ise Microsoft Visual C# ve Microsoft ASP.NET programlama dilleri kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 4.8’de, güç kalitesi izleme sisteminin yazılımsal alt yapısına ait bir şema verilmiştir.



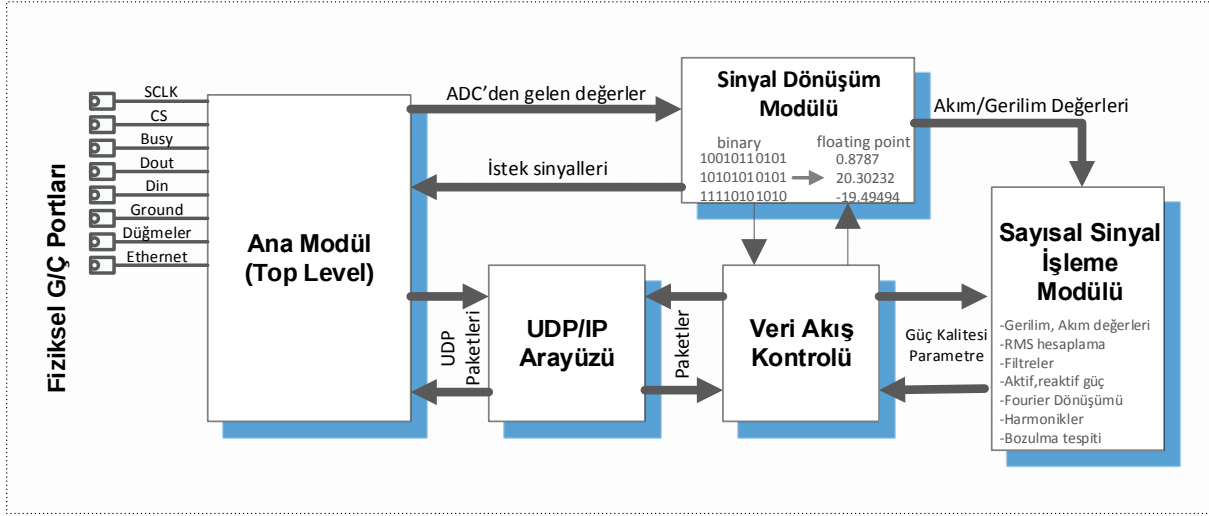
Şekil 4.8. Güç kalitesi izleme sisteminin yazılımsal yapısını gösteren şema.

İzleme sistemi üzerinde bulunan FPGA yazılımları, sistem içerisinde yürütülecek sinyal işleme algoritmalarını ve bu algoritmalarından elde edilen sonuçların bilgisayar tabanlı yazılımlara aktarılması gibi çeşitli alt bölümlerden oluşmaktadır. Bilgisayar tabanlı hazırlanan yazılımlar ise izleme sisteminden güç kalitesi bilgilerinin anlık olarak elde edilmesi, saklanması ve bu verilerin görsel ara yüzler ile kullanıcıların kullanımına sunulmasını sağlayan alt yazılımlardan meydana gelmektedir. İlerleyen bölümlerde, bu yazılımların her birine ait detaylı bilgiler farklı başlıklar altında verilecektir.

4.2.1. FPGA Tabanlı Yazılımlar

Güç kalitesi izleme sisteminin ölçüm noktalarından sürekli ve doğru ölçüm yapması, güç kalitesi parametrelerini hatasız bir şekilde standartlara uygun olarak tespit etmesi son derece önem taşımaktadır. Bu amaç doğrultusunda, izleme sistemi üzerindeki gömülü yazılımların hem hızlı hem de verimli bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, FPGA cihazının programlanmasında çeşitli ortamlar detaylı olarak incelenmiş ve sonuç olarak VHDL dili ile izleme sisteminin yazılımlarının tasarlanması uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. VHDL dili ile programlama süreçleri her ne kadar uzun olsa da, gerek yazılımlara doğrudan müdahale edilebilmesi gerekse de hata ayıklama

işlemlerinin daha sağlıklı irdelenebilmesi açısından avantajları oldukça fazladır. FPGA ortamında hazırlanan yazılımların genel yapısı, Şekil 4.9’da gösterildiği gibidir.



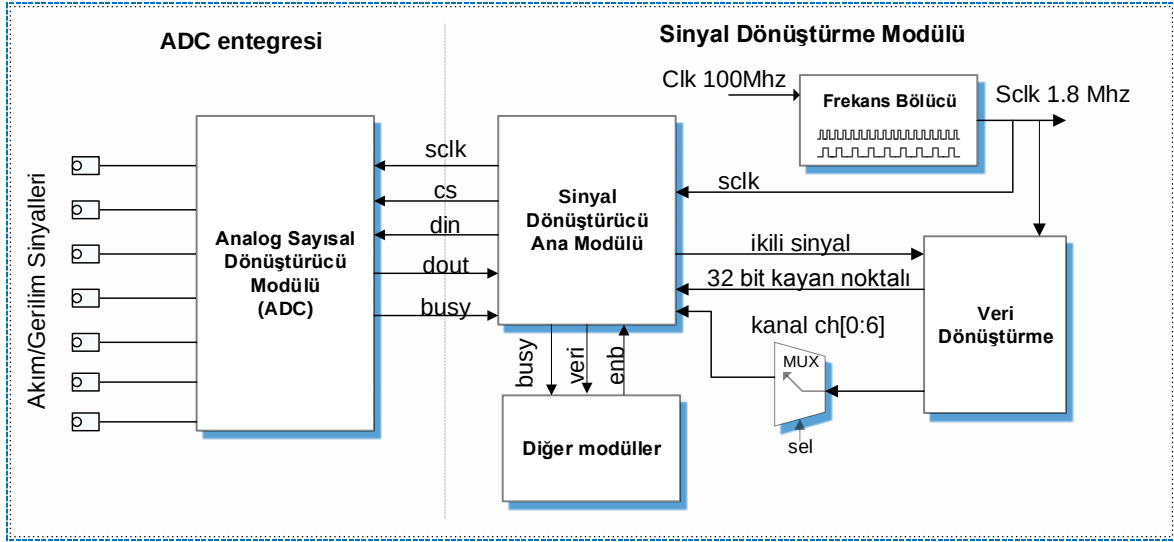
Şekil 4.9. FPGA ortamında hazırlanan yazılımların genel yapısı.

Farklı modüller şeklinde tasarlanan FPGA içerisindeki gömülü yazılımların her biri, paralel şekilde çalışmaktadır. Ana modül bölümünde, gömülü yazılımların fiziksel ortam ile iletişimini sağlayan G/Ç bağlantıları ve tüm alt yazılımların birbirleri ile olan bağlantıları sağlanmaktadır. Sinyal dönüştürme kısmında, sistemden gelen 1-0 şeklindeki ikili sayısal gerilim ve akım verileri şebeke değerlerine dönüştürülmekte ve diğer bölümlere aktarılmaktadır. ADC entegresine ait bütün kontroller, bu kısımda gerçekleştirilmektedir. Sinyal işleme algoritmalarının yer aldığı bölümde ölçüm noktasına ait; frekans, akım, gerilim, harmonik, aktif güç, reaktif güç, görünür güç, güç faktörü ve bozulma gibi güç kalitesi parametrelerinin tespitinde kullanılan sayısal sinyal işleme algoritmaları bulunmaktadır. Veri akış kontrolü bölümünde, sinyal işleme algoritmaları ve veri dönüştürme modüllerinden gelen verilerin bilgisayar ortamına aktarımının sağlanması amacı ile bu verilerin paketlere dönüştürülmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. UDP/IP haberleşme kısmında ise veri paketlerinin Ethernet ara yüzü ile UDP/IP haberleşme protokolü kullanılarak belirlenen, IP adresine sahip sunucuya gönderilmesi işlemleri yapılmaktadır.

4.2.1.1. Sinyal Dönüştürme Modülü

İzleme sistemi üzerindeki gerilim ve akım sinyal algılayıcı devrelerinden elde edilen sinyallerin işlenmesi, bu sinyallerin uygun örnekleme frekansında elde edilmesi ve paralel

olarak diğer modüllere dağıtılması işlemleri, sinyal dönüştürme modülü içerisinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, ADC entegresine ait G/Ç kontrolleri bu modül altında sağlanmaktadır. FPGA işlemcisi içerisine gömülen sinyal dönüştürme modülünün çalışma yapısını gösteren blok şeması, Şekil 4.10'da verilmiştir.

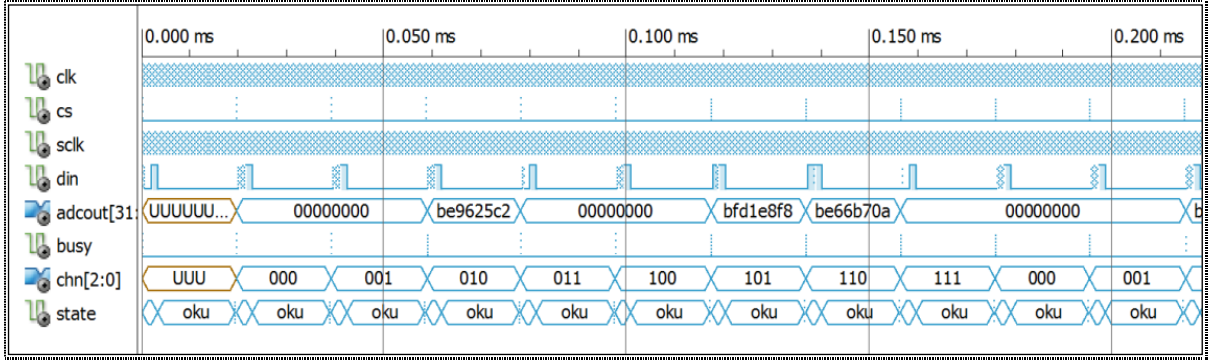


Şekil 4.10. Sinyal dönüştürme modülünün çalışmasına ait blok şeması.

ADC entegresinden alınan ikili kodlanmış sayısal bilgiler, seri bir veri yolundan sinyal dönüştürme modülüne aktarılmaktadır. İkili kodlanmış verilerin, sinyal işleme algoritmaları ve bilgisayar tabanlı yazılımlar içerisinde işlenebilmesi için uygun bir formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, 32 bit IEEE-754 kayan noktalı sayı sistemi kullanılmıştır. Veri dönüştürme alt modülü içerisinde, kanallar arasında dolaşarak kanallara ait sinyal verileri gerekli dönüşüm işlemlerinden geçirilip ana modüle aktarılmakta ve buradan da diğer alt modüllere ulaştırılmaktadır. ADC entegresinin ayarlanması gereken bir diğer parametresi de, örnekleme frekansıdır. Bu çalışmada, akım ve gerilim sinyallerinin 6.4 kHz örnekleme frekansına sahip olacak şekilde elde edilmesi hem FPGA tarafındaki yazılımların verimliliği hem de bilgisayar tarafındaki veritabanında fazla yer kaplamaması açısından tercih edilmiştir.

FPGA cihazı içerisinde yürütülecek yazılımların fiziksel olarak gerçekleştirilmesinden önce detaylı bir şekilde test işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Yazılımda karşılaşılabilecek herhangi bir problemin, fiziksel uygulama sırasında tespit edilmesi oldukça zordur. Aynı şekilde hazırlanan yazılımların, fiziksel olarak uygulaması için derleme işlemi uzun süreler gerektirmektedir. Bu nedenlerden dolayı, FPGA üretici firmalar kendi geliştirme kartları

için yazılımsal olarak çeşitli simülasyon ortamları sunmaktadır. Simülasyon ortamında, bütün sinyallerin takibini gerçekleştirmek ve sonuçları adım adım gözlemlemek mümkündür. Şekil 4.11’de, tez çalışması içerisinde hazırlanan sinyal dönüştürme modülüne ait simülasyon çıktısı verilmiştir.



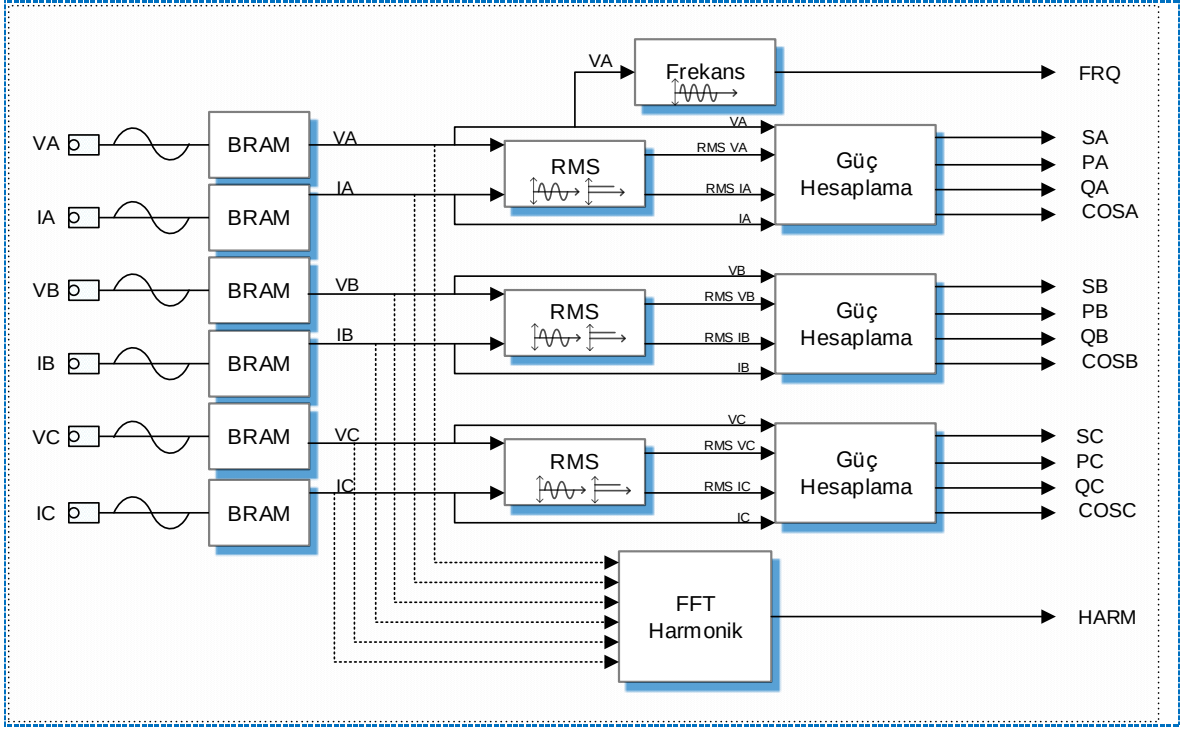
Şekil 4.11. Sinyal dönüştürme modülünün çalışmasına ait simülasyon çıktısı.

Simülasyon çıktısından görüleceği gibi, hazırlanan program ADC entegresinin kanalları arasında sırası ile dolaşmakta ve her bir kanaldan elde ettiği veriyi 32 bit kayan sayı formatına dönüştürmektedir. 32 bit kayan sayı formatında elde edilen sinyal bilgileri, anlık olarak bütün modüllere bu kısımdan aktarılmaktadır.

4.2.1.2. Sinyal İşleme Modülü

Sinyal işleme modülü içerisinde, güç kalitesi parametrelerinin standartlara uygun bir şekilde belirlenmesi amacı ile çeşitli sinyal işleme algoritmaları yer almaktadır. Sinyal dönüştürme modülünden elde edilen sayısal akım ve gerilim bilgileri, sinyal işleme modülündeki algoritmalara giriş verisi olarak girilmektedir. Şekil 4.12’de blok şeması verilen sinyal işleme modülü içerisinde; ölçüm noktasına ait akım ve gerilim sinyalinin etkin değeri, şebeke frekans bilgisi, aktif güç, reaktif güç, görünür güç, güç faktörü, harmonik bilgileri ve güç kalitesi bozulmalarının tespiti gibi alt birimler yer almaktadır.

Güç kalitesi standartlarında belirlenen ölçüm aralıklarına göre elde edilen anlık akım ve gerilim değerleri, hafıza birimlerinde depolanmaktadır. Bu hafıza birimleri üzerindeki sinyal bilgileri kullanılarak, gerekli parametrelerin hesaplanması işlemleri gerçekleştirilmektedir.

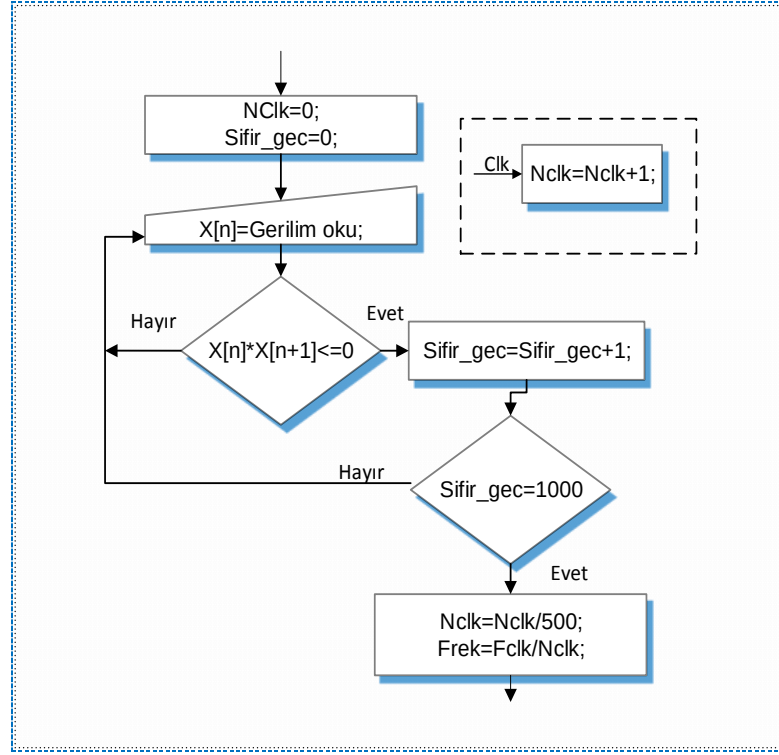


Şekil 4.12. Sinyal işleme modülüne ait blok şeması.

Sinyal işleme modülü; frekans hesaplama, etkin değer hesaplama, güç hesaplama, harmonik hesaplama ve güç kalitesi bozulma tespit modülü olmak üzere beş alt modüle ayrılmaktadır.

4.2.1.2.1. Frekans Hesaplama Alt Modülü

Güç kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biriside, şebeke frekansının nominal frekanstan ne kadar saptığının tespit edilmesidir. Şebeke gerilimine ait frekansın normal şartlarda 50 Hz olması beklenir. Çeşitli nedenlerden dolayı, şebeke frekansında sapmalar meydana gelmektedir. Güç kalitesi izleme sistemi, ölçüm noktalarındaki gerilimin frekans değerini hesaplayarak bu değer standardlar çerçevesinde belirlenen değerlerden ne kadar saptığını tespit etmektedir. IEC61000-4-30 standardına göre, şebeke frekansı ölçümünün 10 saniye aralıklarla belirlenmesi tavsiye edilmiştir. Bu kapsamda, ölçüm noktalarındaki gerilimin frekansı 10 saniyelik aralıklarla belirlenerek bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Bu çalışmada, frekans hesaplamasında sıfır geçiş noktasının belirlenmesine dayalı bir yöntem kullanılmıştır. Frekans hesaplaması için kullanılan algoritmanın akış şeması Şekil 4.13'te verilmiştir.



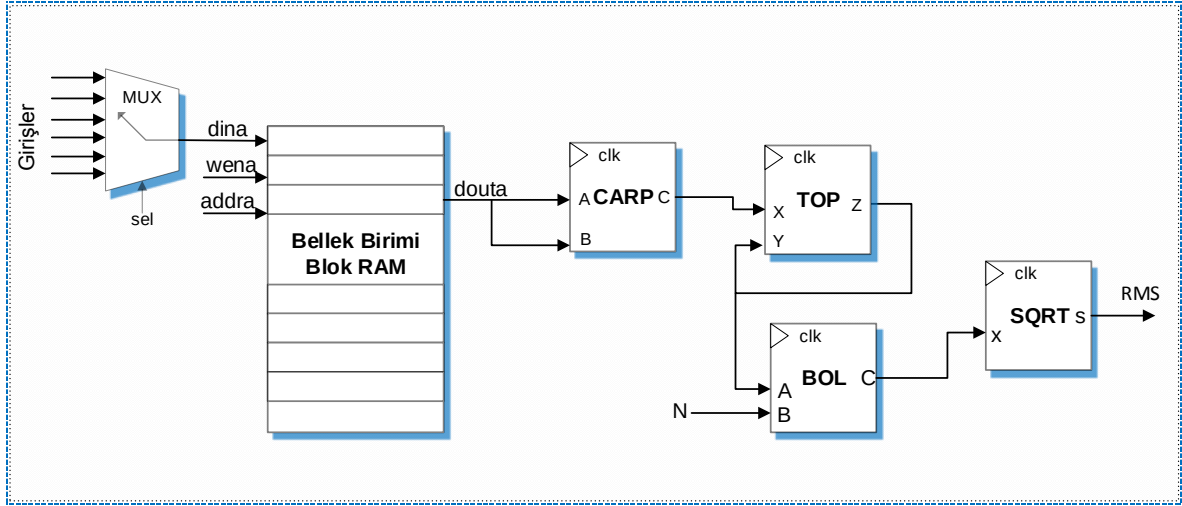
Şekil 4.13. Frekans hesaplamasında kullanılan algoritmanın akış diyagramı.

Frekansı hesaplanacak gerilim değerleri, öncelikle sinyal dönüştürme modülünden elde edilerek gerilime ait sıfır geçiş noktaları tespit edilmektedir. Gerilim için sıfır geçiş noktaları, her bir yarım periyot için hesaplanmaktadır. Normal şartlarda 50 Hz şebeke frekansı için 10 s.'lik veride 1000 adet geçiş noktası olması beklenir. Frekans tespit algoritması, 1000 adet geçiş noktası için FPGA cihazının üretmiş olduğu saat darbe sinyalinin sayısını hafızada saklamaktadır. FPGA cihazı içerisinde kullanılan saat sinyalinin frekansı 100 MHz'dir. "Nclk" değeri, algoritmanın işleyişi boyunca cihazın saat sinyalinin sayısını üzerinde tutmaktadır. Sıfır geçiş noktaları belirlenen sayıya ulaştığında, her bir döngü için "Nclk" sayısı bulunur ve saat sinyalinin frekansına bölünerek gerilimin sahip olduğu frekans değeri tespit edilmiş olur. Frekans tespit işlemi, üç faz gerilimi için ayrı ayrı yapılmamakta sadece tek bir faz için ölçümler elde edilmektedir.

4.2.1.2.2. Etkin Değer Alt Modülü

Ölçüm noktalarına ait anlık gerilim ve akım değerlerinin sayısal olarak gözlemlenmesi ve güç kalitesinde meydana gelen bozulmaların tespitinde, etkin değer hesaplaması kullanılmaktadır. Güç kalitesi standartlarına göre gerilim ve akım etkin değerinin

hesaplanması 10 periyotluk örnekler üzerinden gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle, etkin değeri hesaplanacak akım veya gerilim sinyallerinden 10 periyotluk örnekler alınarak bellek üzerine kaydedilmekte ve bu örnekler üzerinden etkin değer hesaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. FPGA cihazı içerisine gömülen etkin değer yönteminin çalışmasını gösteren blok şeması, Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. FPGA cihazı içerisine gömülen etkin değer yöntemine ait blok şeması.

10'ar periyotluk örneklerle alınan akım ve gerilim sinyalleri, kayan nokta sayı tabanlı çarpım bloğuna girmekte ve bu blok içerisinde sinyalin karesi elde edilmektedir. Daha sonra sırası ile toplama, bölme ve karekök bloklarından geçen akım ve gerilim sinyallerin etkin değeri hesaplanarak çıkışa aktarılmaktadır. FPGA cihazı içerisinde gömülü olarak çalışan bu algoritmalar, VHDL dili kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 4.15'te, etkin değer hesaplamasına ait alt modülün FPGA ortamında uygulanan VHDL dilindeki kaba kod yapısı verilmiştir.

```

ARCHITECTURE Behavioral OF RMS IS
COMPONENT CARPMA port(...)
COMPONENT TOPLAMA port(...)
COMPONENT KAREKOK port(...)
COMPONENT BOLME Port(...)
TYPE d_tip is (Bas,Veri,Kare,Toplam,Bol,Karekok,Dur)
signal durum:drum_tip;
signal ADCout:STD_LOGIC_VECTOR(31 downto 0);
Begin
PROCESS (CLK)
Begin
IF rising_edge (CLK) Then
CASE durum IS
WHEN BAS=>
DRUM<=VERI;
WHEN VERI=>
RAMV<=ADCout; --10 periyotluk veriyi oku
WHEN KARE=>
RAMV(i)<=RAMV(i)^2;
WHEN TOPLAM=>
top<=RAMV(i); -- Kareleri topla
WHEN BOL=>
top<=top/N; -- Örnek sayısına böl
WHEN KAREKOK=>
RMS<=SQRT(TOP);-- Karekök al
WHEN DUR=>
DRUM<=BAS;
END CASE
END IF
END PROCESS;
END

```

Şekil 4.15. Etkin değer hesaplama alt modülünün VHDL dilindeki kaba kod yapısı.

4.2.1.2.3. Güç Hesaplamaları Alt Modülü

Güç hesaplamalarına ait alt modül içerisinde, izleme sisteminin bağlı olduğu ölçüm noktasına ait çeşitli güç bileşenleri hesaplanmaktadır. Bu güç bileşenleri; görünür güç, aktif güç ve reaktif güç şeklindedir. Ayrıca, bu modül içerisinde güç faktörü parametresinin hesaplanması da yapılmaktadır. Güç bileşenleri hesaplanırken, standartlara uygun olarak akım ve gerilim sinyal değerlerinin 10'ar periyotluk örnekleri kullanılmaktadır. Ölçüm noktasından elde edilen akım ve gerilim sinyalleri üzerinde, ADC entegresi ve diğer elektronik ekipmanlardan kaynaklanan ofset etkisi oluşmaktadır. Bu ofset etkisinin yok edilmesi amacı ile örnekler, öncelikle yüksek geçiren bir filtreden (YGF) geçirilmektedir. Böylece düşük frekans bileşenlerinin eliminasyonu sağlanmaktadır. YGF katsayıları MATLAB yazılım ortamından hesaplatılarak, FPGA cihazı içerisinde hazırlanan algorithmada kullanılmıştır. Bu modül içerisinde gerçekleştirilen hesaplamalara ait genel yapı Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.2. Güç hesaplamaları için kullanılan bağıntılar.

Güç Bileşeni	Formül	Birimi
Görünür Güç	$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$	VA (Volt Amper)
Aktif Güç	$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (V[n] \cdot I[n])$	W (Watt)
Reaktif Güç	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	VAR (Volt Amper Reaktif)
Güç Faktörü	$Pf = \frac{P}{S}$	--

FPGA cihazı üzerinde güç bileşenleri hesaplanırken; doğruluk, hız ve verimli kaynak tüketimi açısından en uygun olacak bağıntıların seçimine dikkat edilmiştir. Test ortamında elde edilen güç parametreleri incelendiğinde, izleme sisteminin hesapladığı güç bileşenleri ile referans olarak alınan test cihazlarının hesapladığı güç bileşenleri arasında yaklaşık olarak $\pm 1\%$ ’lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark başarımlı açısından oldukça yeterli bir değerdir.

4.2.1.2.4. Harmonik Alt Modülü

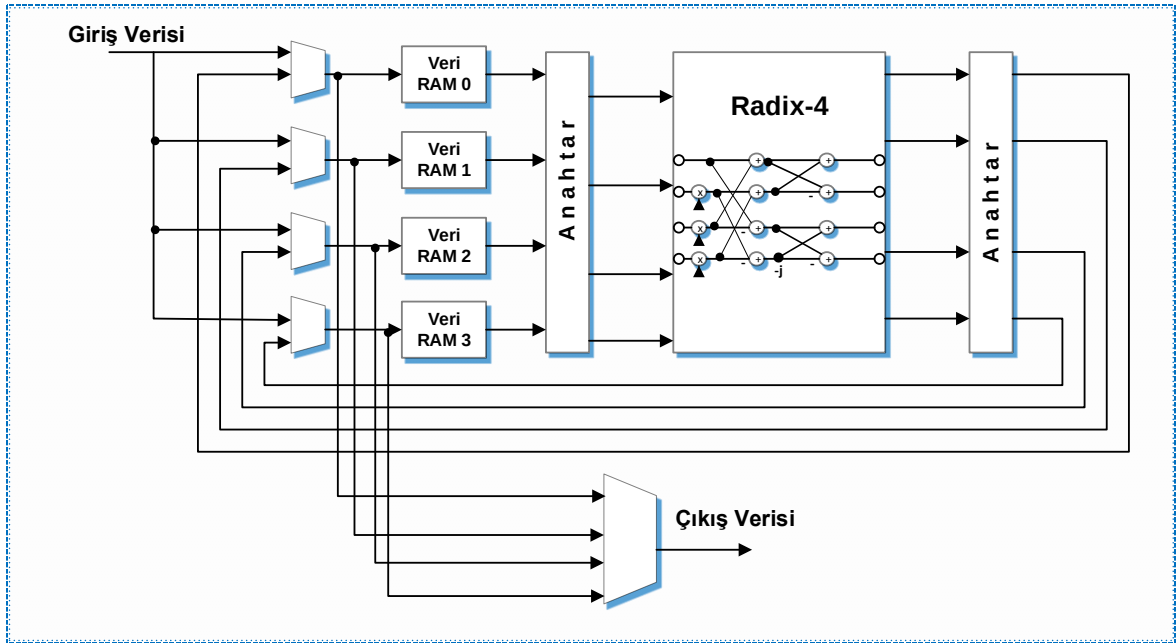
Güç kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden birisi de harmoniklerdir. Harmonikler, ana frekansın tam sayı katları şeklinde frekanslara sahiptirler. Devrede doğrusal olmayan elemanlar veya sinüsoidal olmayan kaynakların yer alması, harmoniklerin oluşmasındaki temel etkenlerdir. Bunun sonucunda, çeşitli elemanlar veya olaylar nedeniyle enerji sistemindeki sinüzoidal dalga biçimi bozulmaktadır. Endüstriyel sistemlerde, harmonik ölçümlerinin üç temel amacı vardır. Bunlardan birincisi, harmoniklerin kaynağını ve karakteristiklerini belirlemektir. İkincisi, güç sistemi üzerine etki eden harmonik etkileri azaltmak için gerekli filtreleme sistemlerini tasarlamak ve kurmaktır. Üçüncüsü ise güç sistemi üzerindeki toplam harmonik bozulmanın standartlara uygun olmasını sağlamaktır. Bu amaçlar doğrultusunda, harmonik izleme sistemleri elektrik tesisleri ve bu tesislerin yararlanıcıları için büyük önem arz etmektedir [98, 99].

Bu tez çalışmasında, ölçüm noktalarına ait gerilim ve akım harmoniklerinin sürekli bir şekilde tespit edilmesi için bir alt modül hazırlanmıştır. Bu alt modül altında, gerilim ve akım sinyallerine ait 53. dereceye kadar olan harmoniklerin ölçümü gerçekleştirilmektedir. Harmonik ölçümü için Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) algoritmasının FPGA ortamında uygulaması kullanılmıştır. Xilinx firması tarafından

kullanıma sunulan FFT çekirdeği [100] yardımı ile harmoniklerin doğru bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır. FFT çekirdeği içerisinde Ayırık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform-DFT) için kullanılan genel bağıntı (4.4)'te verilmiştir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-jnk2\pi/N} \quad k = 0, \dots, N \quad (4.4)$$

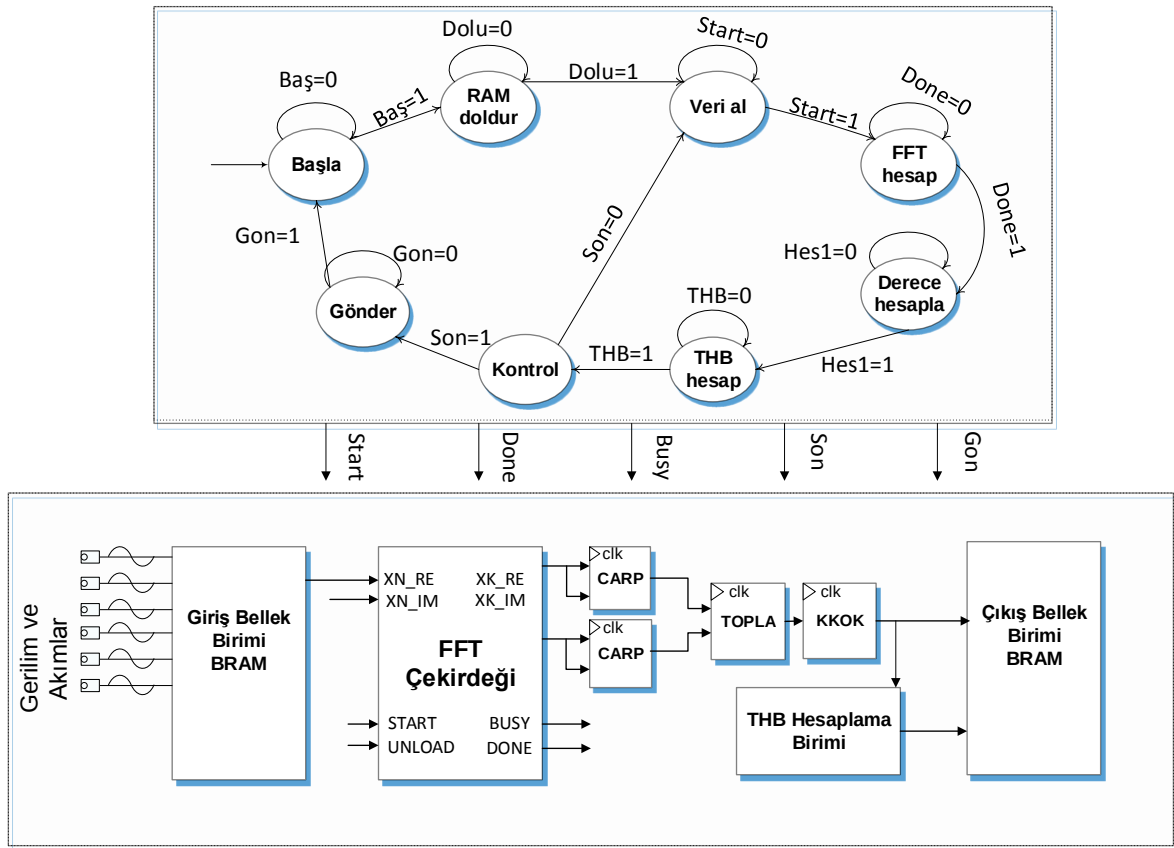
FFT çekirdeği içerisinde, DFT hesaplamasında kullanılan farklı ayrıştırma algoritmaları yer almaktadır. Bunlar genel olarak, Radix-2 ve Radix-4 algoritmalarıdır. Bu algoritmalar, kaynak tüketimi ve dönüştürme hızı açısından birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu tez çalışmasında, izleme sistemi içerisindeki harmoniklerin hesaplanması için geçen sürede herhangi bir kısıtlama olmadığından ve daha düşük kaynak tüketimi dolayısıyla çalışma prensibi Şekil 4.17'de gösterilen Radix-4 ayrıştırma algoritmasına sahip FFT çekirdeği kullanılmıştır.



Şekil 4.17. Radix-4 tabanlı FFT algoritmasının çalışma yapısı.

Radix-4 tabanlı FFT algoritmasında, giriş ve çıkış verileri dönüşüm hesaplamasından ayrı olarak yüklenip boşaltılmaktadır. Giriş ve çıkış verisi ile işlemler eş zamanlı değildir. Bu nedenle daha düşük kaynak ihtiyacının yanında daha uzun dönüşüm süresi, bu algoritmanın yapısal özelliğidir. FFT çekirdeği, çalışma yapısından dolayı sadece giriş örneklerinin Fourier Dönüşümünü (FD) gerçekleştirmektedir. FD sonrasında, gerçek ve

sanal olarak iki ayrı çıkış verisi üretilmektedir. Bu veriler, tek başına harmonik dereceleri hakkında detaylı bir bilgi vermemektedir. Bundan dolayı, FFT çekirdeği ile uyumlu bir şekilde çalışacak ve harmonik dereceleri ile harmonik bozulma oranlarını anlık olarak hesaplayacak bir hesaplama bölümü bu alt modül içerisinde oluşturulmuştur. Tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan harmonik hesaplama alt modülünün çalışma yapısını gösteren blok şeması Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Harmonik hesaplama alt modülünün çalışma yapısı.

VHDL dilinde durum makineleri, sıklıkla kullanılan bir yapıdır. Özellikle sıralı akışlar için çokça tercih edilmektedir. Şekil 4.18’de üst blokta bir durum makinesi verilmiştir. Bu durum makinesi, yazılımsal olarak harmonik hesaplamalarını kontrol eden ana bölümdür. Durum makinesi “Başla” durumundayken gelen “Baş” sinyali ile harmonik hesaplama işlemi başlamaktadır. Öncelikle hesaplamaların yapılacağı an için, tüm akım ve gerilimlerden belirlenen örnekleme sayısında sinyal örnekleri alınarak bellekte depolanmaktadır. Bellek dolduğu zaman, sırası ile hesaplanacak akım ve gerilim verileri FFT çekirdeğine giriş verisi olarak girilmektedir. FFT çekirdeği, gerçek ve sanal olmak üzere iki giriş veri seti almaktadır. Harmonik bileşeni hesaplanacak olan akım ve gerilim

sinyalleri sadece gerçek değerlere sahiptir. Bu nedenle, giriş kısmındaki sanal bileşenler sıfır olarak girilmektedir. FFT çekirdeğindeki dönüşüm işlemi tamamlandığında, gerçek ve sanal olmak üzere aynı boyutta iki veri seti çıkışa aktarılmaktadır. Bu veriler, harmonik bileşenlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Harmonik bileşenlerin hesaplamasında kullanılan denklem, (4.5)'te verilmiştir.

$$Harm_i = \frac{\sqrt{X_{re_i}^2 + X_{im_i}^2}}{Harm_1} \times 100 \quad (4.5)$$

Burada; X_{re} : çıkış sinyalinin gerçek bileşenlerini ve X_{im} : sanal bileşenlerini ifade etmektedir. Harmonik bileşenlerin hesaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra, ölçüm noktasının her bir akım ve gerilim fazına ait toplam harmonik bozulma (THB) hesaplaması (4.6)'ya göre yapılmaktadır.

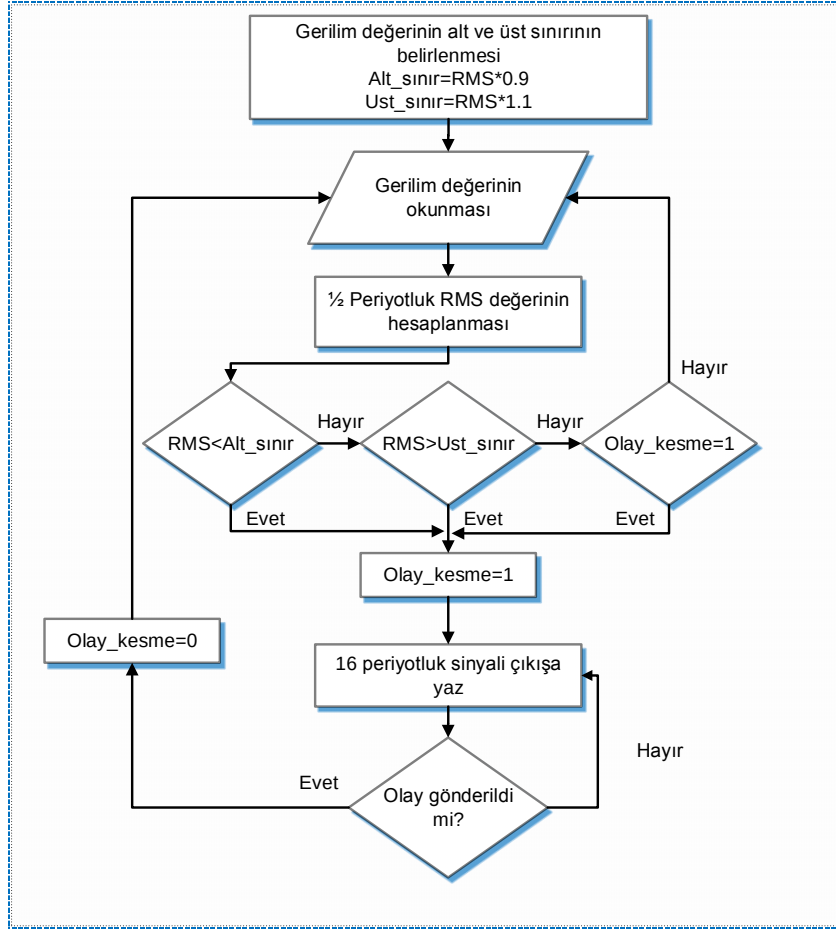
$$THB = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + H_4^2 + \dots + H_n^2}}{H_1} \times 100 \quad (4.6)$$

Ölçüm noktasındaki akım ve gerilim harmoniklerine ait bileşenler ve THB oranları, harmonik ölçüm alt modülü içerisinde tespit edilmektedir. Daha sonra, FPGA ortamından bilgisayar ortamındaki ara yüz programına belirlenen aralıklarda bu veriler aktarılmaktadır. İzleme sistemi içerisinde oluşturulan harmonik hesaplama alt modülünden elde edilen sonuçlar, MATLAB ortamında FFT algoritması ile test edildiğinde sonuçların örtüştüğü gözlemlenmiştir. İzleme cihazı içerisindeki harmonik hesaplamaları, standartlara uygun ve doğru bir biçimde gerçekleştirilmektedir.

4.2.1.2.5. Güç Kalitesi Bozulma Tespit Alt Modülü

Bu alt modül içerisinde, ölçüm noktası üzerinde meydana gelen güç kalitesi bozulmalarının gerçek zamanlı tespiti için RMS tabanlı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Güç sisteminde meydana gelen olaylar, FPGA içerisine gömülen etkin değer yöntemi ile anlık olarak tespit edilmektedir. VHDL programlama dili kullanılarak oluşturulan tespit algoritması ile güç kalitesi standartlarında belirtilen gerilim sinyallerine ait yarım periyotluk RMS değeri anlık olarak hesaplanmaktadır. Gerilim sinyalinin RMS değeri

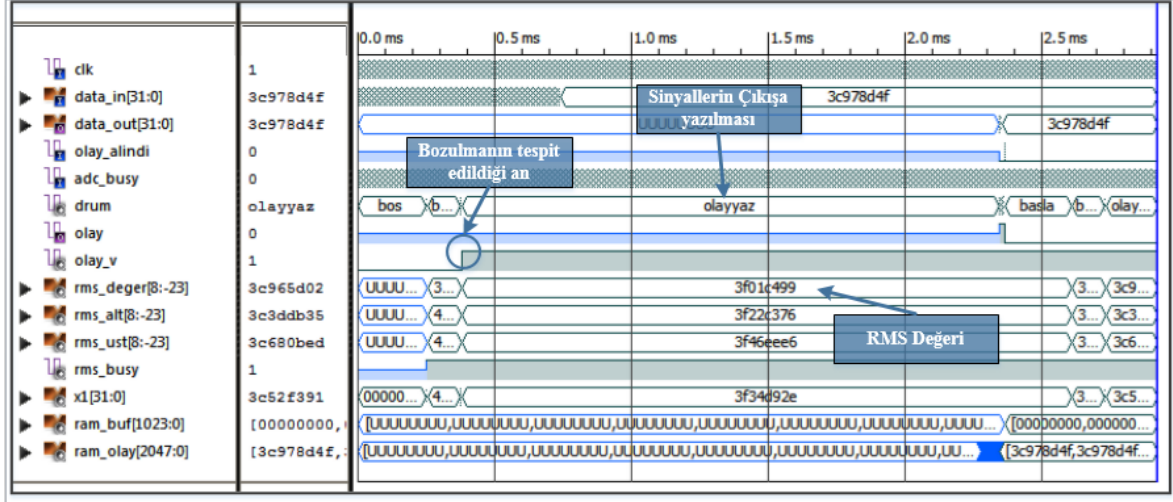
%10'un altına düşer veya yükselirse, tespit sistemi bir bozulma meydana geldiğini belirler. Giriş sinyalinde bir bozulma belirlendiği anda bir periyotluk bozulma sinyali, yedi periyot bozulma öncesi sinyal ve sekiz periyot bozulma sonrası sinyal olmak üzere toplam 16 periyotluk gerilim sinyali FPGA çıkışına gönderilmektedir. Şekil 4.19'da FPGA tabanlı güç kalitesi bozulma tespit sisteminin çalışmasına ait akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Güç kalitesi bozulma tespit algoritmasına ait akış diyagramı.

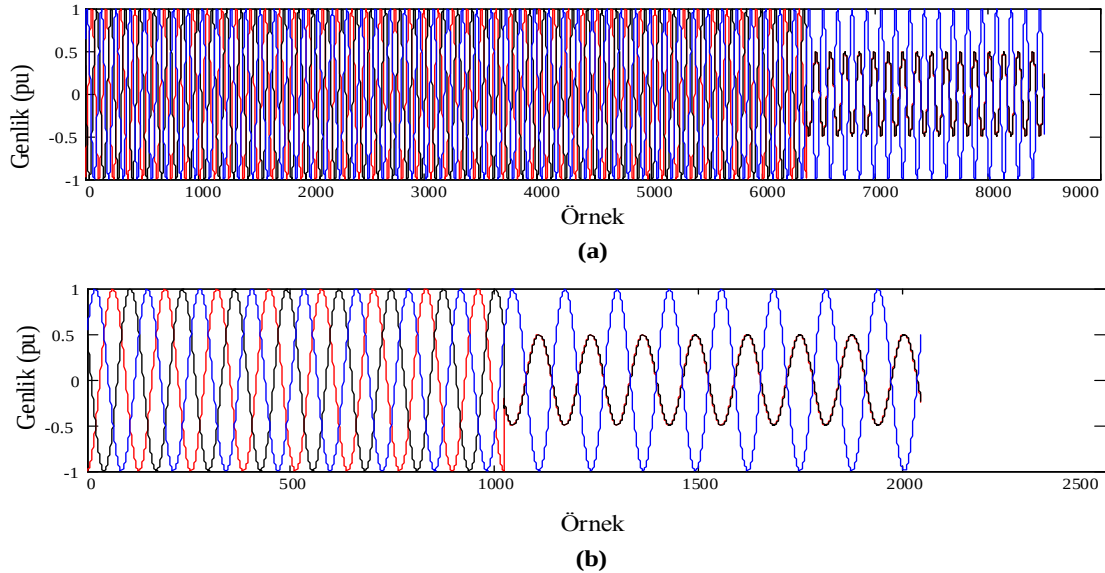
Güç kalitesi bozulmalarının tespitinde, öncelikle etkin değerin alt ve üst sınırları standartlar çerçevesinde belirlenmektedir. Daha sonra, gerçek zamanlı olarak okunan gerilim değerleri için yarım periyotluk anlık etkin değer hesaplaması gerçekleştirilmektedir. Hesaplanan gerilim değeri belirlenen sınır değerler dışına çıktığında, algoritma sistemde bir bozulma olayının meydana geldiğini tespit etmektedir. Her faz için eş zamanlı olarak yürütülen güç kalitesi tespit sisteminin içerisine, fazlar arasında haberleşmeyi sağlayan bir kesme algoritması yerleştirilmiştir. Bu kesme sayesinde herhangi bir fazda bozulma meydana geldiğinde, diğer fazlar üzerinde yürütülen işlemler

durdurulup gerilim değerleri çıkışa aktarılmaktadır. Şekil 4.20’de, çalışma kapsamında hazırlanan güç kalitesi bozulma tespit algoritmasının FPGA tasarımına ait bir simülasyon görüntüsü verilmiştir. Simülasyon penceresinden görülebileceği gibi tasarlanan sistem, giriş sinyalindeki bozulma verisini başarılı bir şekilde belirleyebilmektedir.



Şekil 4.20. Güç kalitesi bozulma tespit algoritmasının simülasyon çıktısı.

Şekil 4.21’de, FPGA cihazına giriş olarak verilen örnek bir bozulma olayı ve cihaz çıkışında elde edilen bozulma sinyal bilgisini içeren dalga formu görülmektedir.



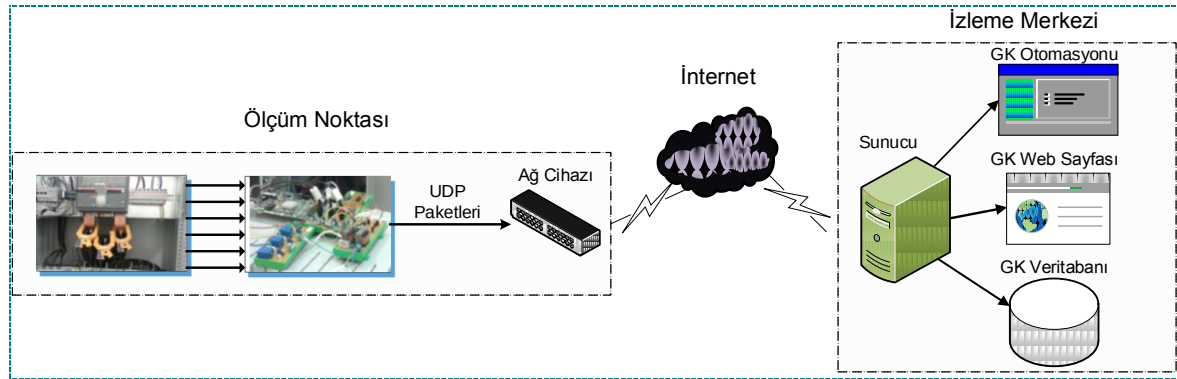
Şekil 4.21. (a) FPGA cihazına giriş olarak verilen bir bozulma sinyali, (b) FPGA çıkışından elde edilen dalga şekli.

Güç kalitesi bozulma tespit sisteminin doğruluğunu test etmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan farklı bozulma olayları kullanılmıştır. Bu

bozulma olayları, FPGA tabanlı olay tespit sistemine giriş verisi olarak sunulmuş ve sistemin bu bozulmaları tespit ederek çıkışa aktarması sağlanmıştır. Toplam 200 farklı bozulma verisi ile test edilen sistemin bütün bozulma olaylarını başarılı bir şekilde tespit ettiği gözlemlenmiştir.

4.2.1.3. UDP/IP Haberleşme Modülü

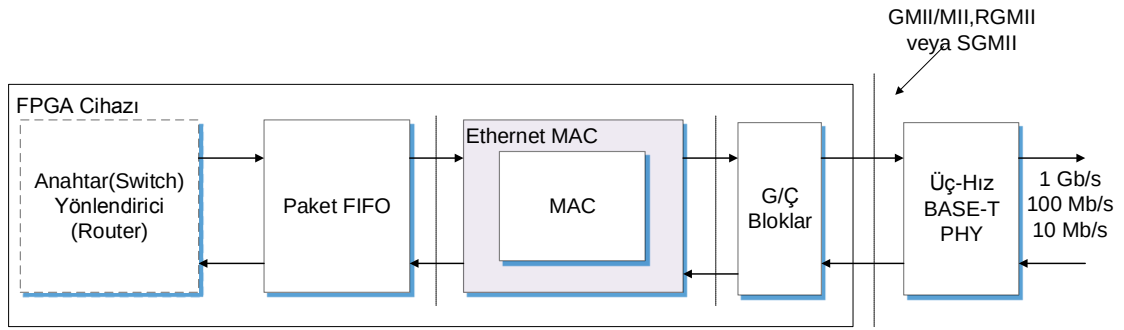
UDP/IP haberleşme alt modülü, güç kalitesi izleme sisteminin ölçüm noktalarından elde edilen verileri bilgisayar ara yüz programına gönderilmesini sağlayan bölümdür. Güç kalitesi izleme sisteminin, ölçüm noktasından elde ettiği parametreleri izleme merkezine aktarması işlemleri belirlenen bir yerel ağ ya da internet ortamından sağlanmaktadır. Bu amaçla izleme sistemi içerisine, Ethernet ara yüzü ve UDP/IP haberleşme ara yüzü yazılımları gömülmüştür. Bu sayede, izleme sistemi verileri bulunduğu noktadan hiçbir çevre birimine bağlı olmadan, sadece internet ağına açılan bir bağlantı kablosu ile izleme merkezine aktarmaktadır. Şekil 4.22’de, güç kalitesi izleme sisteminin UDP/IP tabanlı haberleşme yapısını gösteren blok şeması verilmiştir.



Şekil 4.22. İzleme sisteminin UDP/IP tabanlı haberleşme yapısına ait blok şeması.

Gömülü sistemler için oldukça avantaj sağlayan Ethernet iletişimi, RS232 gibi seri iletişim protokollerinin bilgisayara bağımlılığını ve düşük hızlarda verileri iletmeye gibi dezavantajlarını ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, uzak bağlantı özelliği ile Ethernet iletişimi cihaza dışarıdan müdahaleyi oldukça kolaylaştırmaktadır. Gömülü sistemlerde, Ethernet ara yüzlerinin baştan programlanması oldukça uzun ve zor süreçleri gerektirmektedir. Bu nedenle firmalar, genellikle hazır çekirdekler sunmaktadır. Xilinx firmasına ait Virtex5 modeli FPGA geliştirme kartı bünyesinde Tri-Mod Ethernet MAC (TEMAC) çekirdeği

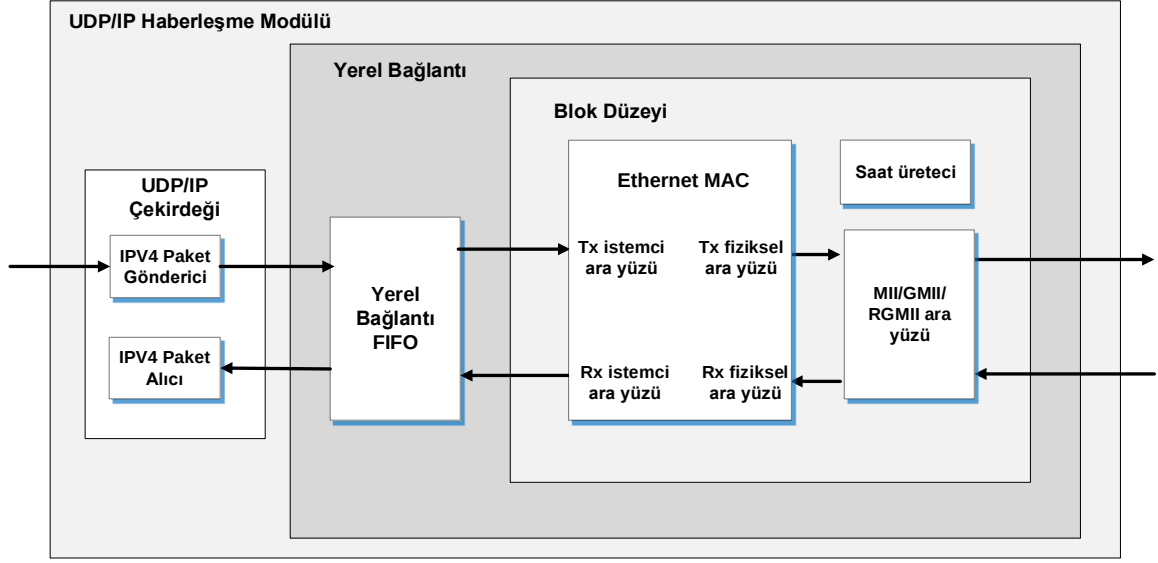
barındırmaktadır [101]. TEMAC sayesinde cihazların switch ve router gibi ağ ekipmanları ile iletişim kurmaları oldukça kolaylaşmaktadır. TEMAC çekirdeği ile IEEE 802.3 özelliklerindeki 10/100/1000 Mb/s hızlarında Ethernet tasarımları gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, TEMAC tam ve yarım ikili işlemleri destekleme özelliğine sahiptir. Şekil 4.23'te, tekli bir Ethernet MAC için tipik bir uygulama yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Ethernet MAC için tipik bir uygulama yapısı.

Çekirdeğin fiziksel ara yüzü; 1Gb/s, 100 Mb/s ve 10 Mb/s hızlardaki standart veri hızına sahip hazır Ethernet cihazına bağlanmıştır. Ethernet MAC istemci tarafı bağlantıyı tamamlamak üzere ağ cihazları ile bağlantılı FIFO bloğuna bağlanmıştır.

Xilinx firmasının kendi cihazları için sunduğu TEMAC IP çekirdeği, sadece Ethernet iletişimini gerçekleştirmektedir. UDP/IP veya TCP/IP iletişimi için herhangi bir IP çekirdeği bulunmamaktadır. Güç kalitesi izleme cihazının internet üzerinden verileri aktarabilmesi için UDP/IP veya TCP/IP fonksiyonlarının TEMAC ile uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlayacak bir VHDL yazılımının oluşturulması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, [102]'de PC-FPGA iletişimi için sunulan UDP/IP çekirdek algoritması kullanılarak bilgisayar ve FPGA arasındaki veri iletişimi için yeni bir yazılım oluşturulmuştur. Şekil 4.24'te UDP/IP modülünün TEMAC ile çalışma yapısı gösterilmiştir.

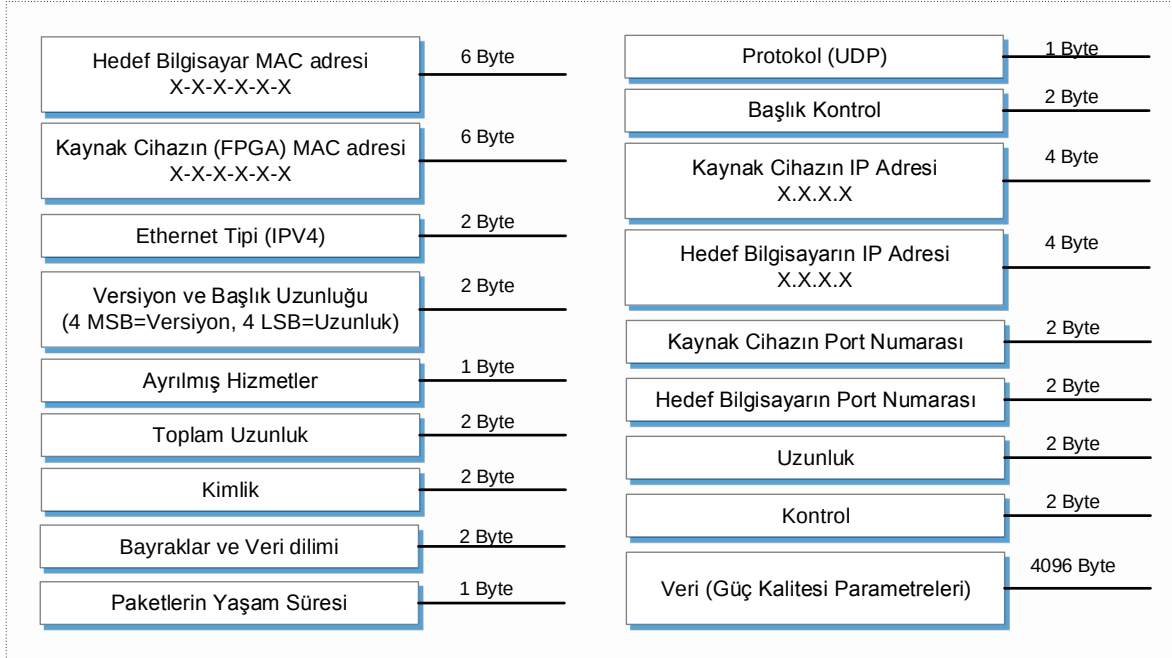


Şekil 4.24. UDP/IP modülünün TEMAC ile çalışan yapısı.

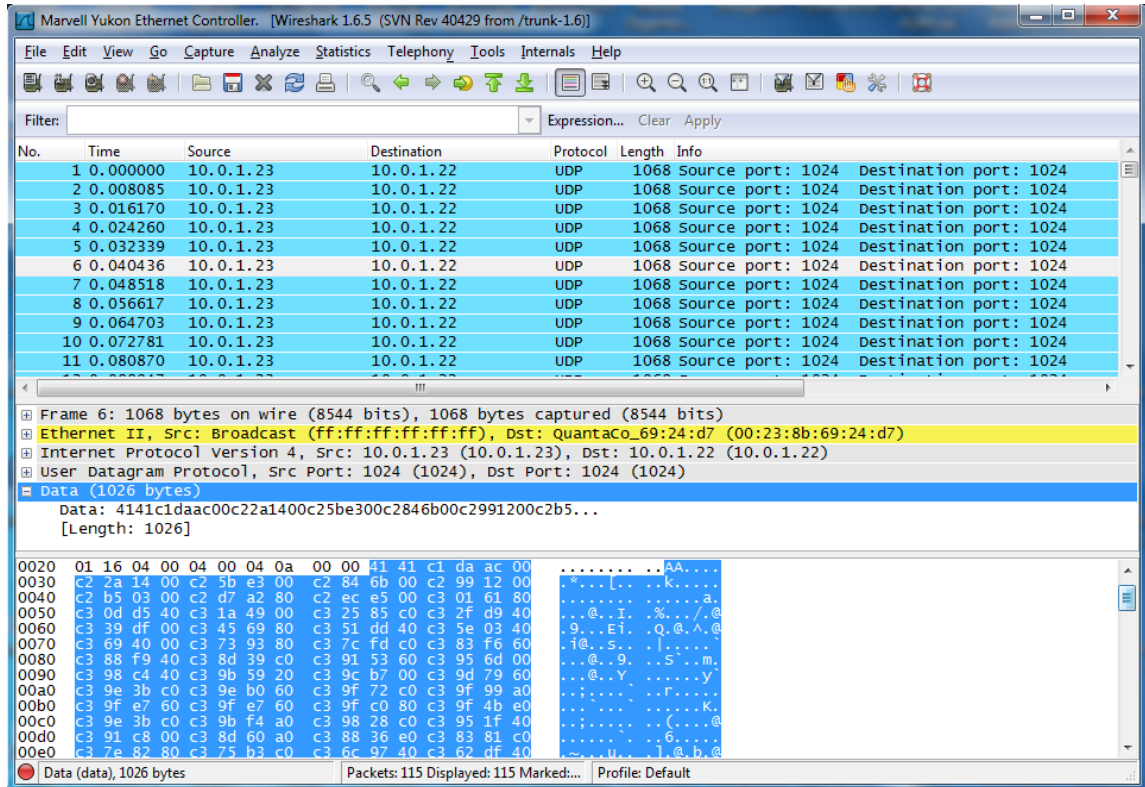
Virtex-5 cihazının Ethernet MAC modülünün giriş ve çıkış portlarına bağlanabilen VHDL uygulaması, bilgisayar ve FPGA cihazı arasındaki bağlantıyı düzgün bir şekilde sağlayabilmektedir. Bu tez çalışmasında, TCP/IP protokolünün gerektirdiği paket erişim kontrolünden kaynaklanan hız problemi ve bu protokolün donanım tabanlı uygulamasının zorluğu nedeni ile UDP/IP protokolü tercih edilmiştir. Güç kalitesi verilerinin aktarımında yaşanabilecek çeşitli problemler yazılımsal olarak giderilmeye çalışılmış ve sağlıklı bir biçimde paket aktarımı sağlanmıştır. Özellikle, güç kalitesi bozulma olaylarına ait paketlerin bilgisayar tarafına aktarımı noktasında herhangi bir kaybın oluşmaması için hem bilgisayar tarafındaki yazılıma hem de cihaz tarafındaki yazılıma bir erişim doğrulaması algoritması yazılmıştır. Bu sayede, güç kalitesi bozulma olaylarının herhangi bir kayıp olmaksızın aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca, herhangi bir bağlantı kesintisinde FPGA cihazı gerekli parametreleri bünyesinde bulunan SD kart üzerinde depolamakta ve bağlantı sağlandığında bu paketlerin aktarımını gerçekleştirmektedir. Tez çalışmasında hazırlanan UDP/IP alt modülüne ait aktarım yapılan veri paketlerinin yapısı ve veri boyutları Şekil 4.25'te gösterilmiştir.

Belirtilen hedef bilgisayarın sahip olduğu IP adresi ve port numarasına gönderilen paketler, hazırlanan bir C# yazılımı aracılığı ile okunmakta ve bu paketler içerisindeki güç kalitesi verileri ayıklanarak veritabanlarına ve görsel formlara aktarılmaktadır. Özellikle, anlık gerilim ve akım sinyal grafiklerinin çizdirilmesi için paket aktarım işlemlerinin yüksek hızda gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu noktada, UDP/IP protokolü paketlerin erişim kontrolü olmaksızın hızlı aktarımında daha elverişli bir yapı sunmaktadır. Güç

kalitesi izleme sisteminden bilgisayara aktarılan paketlerin yapısını gösteren bir Wireshark program görüntüsü Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.25. UPD/IP haberleşme alt modülü ile aktarımı yapılan paketlerin yapısı.



Şekil 4.26. Güç kalitesi izleme sisteminin göndermiş olduğu UDP paketine ait Wireshark görüntüsü.

Wireshark adlı ağ paket analizi yazılımı ile 10.0.1.23 IP numarasına sahip güç kalitesi izleme sisteminden elde edilen verilerin, 10.0.1.22 IP numarasına sahip sunucuya UDP protokolü kullanılarak başarılı bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca güç kalitesine ait çeşitli parametre verilerinin de bu paket içerisinde yer aldığı Şekil 4.26'dan görülmektedir.

4.2.2. Bilgisayar Tabanlı Çalışan Yazılımlar

Bu kısımda, güç kalitesi izleme sistemine ait bilgisayar tabanlı yazılımlar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Bilgisayar tabanlı yazılımlar genel olarak iki başlık altında tasarlanmıştır. Birincisi, ölçüm noktalarından elde edilen verilerin gerçek zamanlı olarak kontrolünü sağlamak amacı ile kullanılan bir görsel otomasyon yazılımıdır. İkincisi ise ölçüm noktalarına ait verilerin internet üzerinden kontrolünü gerçekleştirebilecek bir web ara yüzü yazılımıdır.

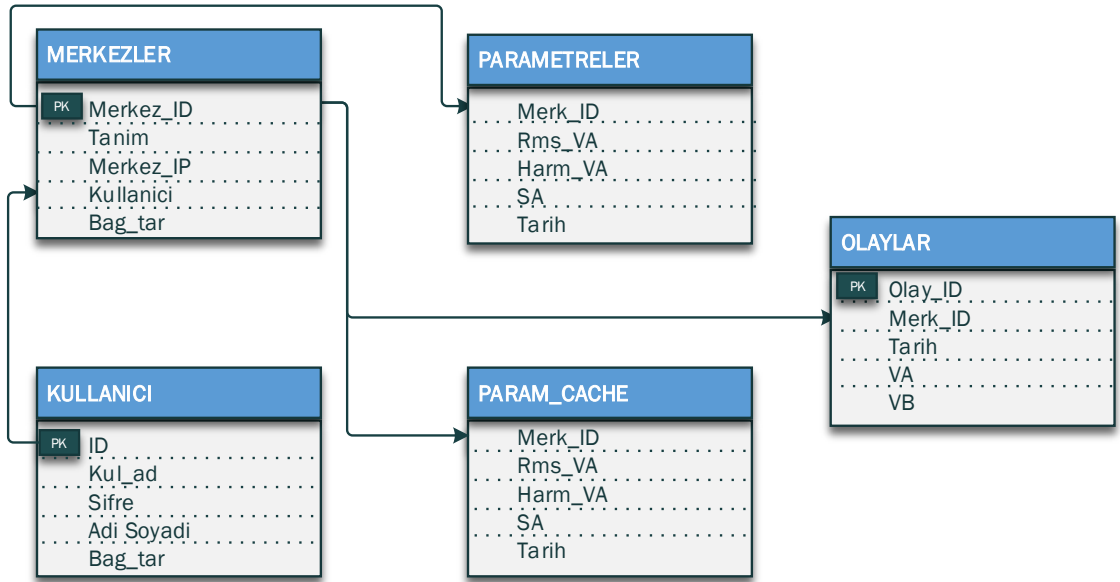
4.2.2.1. Güç Kalitesi Veritabanı Yapısı

Güç kalitesi izleme sisteminin, bilgisayar tabanlı yazılımlarına ait ortak noktası kullandıkları veritabanıdır. Güç kalitesi parametrelerinin saklandığı veritabanı, her iki yazılım için ortak olarak kullanılmaktadır. Güç kalitesi izleme sistemine ait veritabanı içeriğinde saklanan parametrelere ait ölçüm aralıkları ve veritabanında kapladıkları alan ile ilgili bilgiler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Güç kalitesi parametrelerinin ölçüm aralıkları ve kapladıkları boyutlar.

Ölçülen değer	Ölçüm aralığı	Verinin boyutu	Ölçülen Fazlar
Anlık gerilim dalga şekli	8 periyot	12288 bayt	Tüm fazlar
Anlık akım dalga şekli	8 periyot	12288 bayt	Tüm fazlar
Gerilimin etkin değeri	10 periyot, 3s., 10 dk	12 bayt	Tüm fazlar
Akımın etkin değeri	10 periyot, 3s., 10dk	12 bayt	Tüm fazlar
Aktif güç	10 periyot, 3s., 10dk	12 bayt	Tüm fazlar
Reaktif güç	10 periyot, 3s., 10dk	12 bayt	Tüm fazlar
Güç katsayısı	10 periyot, 3s., 10dk	12 bayt	Tüm fazlar
Frekans	10 s.	4 bayt	Tek faz
53 Gerilim harmonikleri	10 periyot, 3s., 10dk	636 bayt	Tüm fazlar
53 Akım harmonikleri	10 periyot, 3s., 10dk	636 bayt	Tüm fazlar
Gerilim THB	10 periyot, 3s., 10dk	12 bayt	Tüm fazlar
Akım THB	10 periyot, 3s., 10dk	12 bayt	Tüm fazlar
Bozulma olayı	0.5 periyot	24576 bayt	Tüm fazlar

Güç kalitesi parametrelerinin ölçüm aralıkları, IEC-61000-4-30 güç kalitesi standartlarında belirlenen değerlere uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Güç kalitesi izleme sisteminin güncellenebilir özelliği sayesinde, parametrelerin belirlenen depolama aralıkları değiştirilebilmektedir. Anlık akım ve gerilim dalga şekilleri, veritabanında sürekli olarak kayıt altına alınmamaktadır. Kullanıcılar, gerektiğinde belirledikleri bir zaman aralığında bu dalga şekillerinin kayıt işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Ölçümler genellikle 10 periyot aralıklarında gerçekleştirilmekte ve bu ölçümlerin 3s.'lik ortalamaları elde edilmektedir. Elde edilen bu parametrelerin 10 dk'lık ortalamaları veritabanında kayıt altına alınmaktadır. Güç kalitesi veritabanına ait tablolar ve bu tablolar arasındaki ilişkileri gösteren genel bir yapı Şekil 4.27'de verilmiştir.



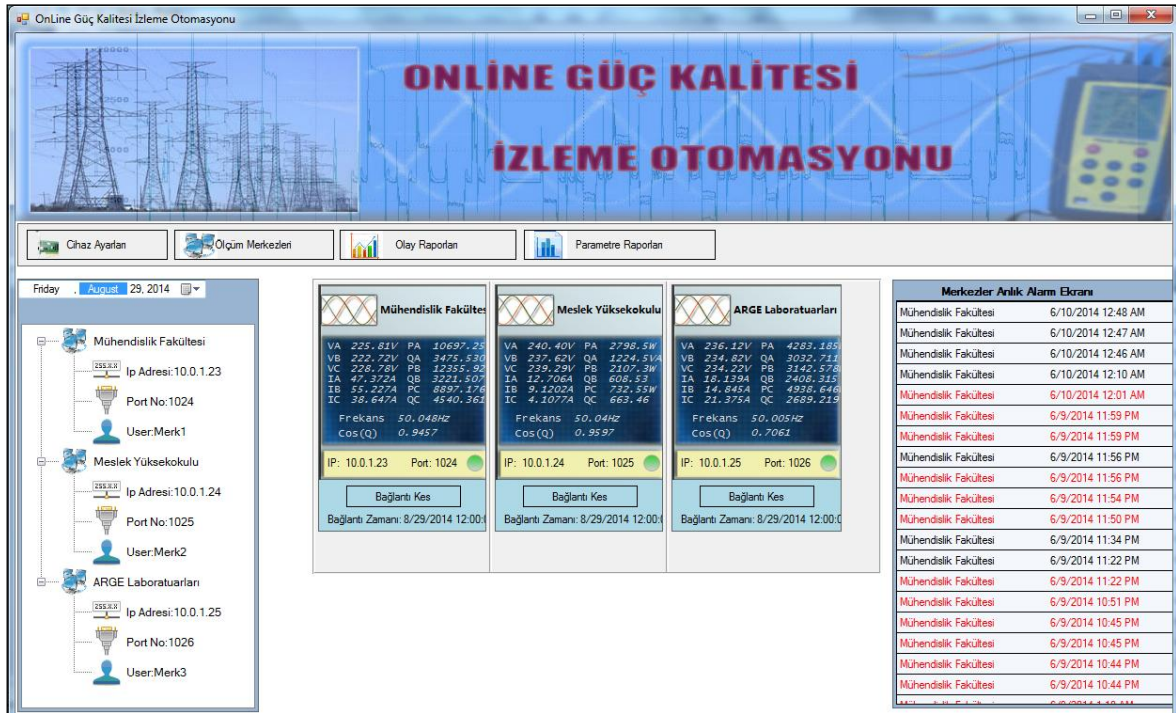
Şekil 4.27. Güç kalitesi veritabanına ait tablolar ve tablolar arasındaki ilişkiler.

Şekil 4.27'de yer alan “Merkezler” tablosunda, ölçüm noktalarına ait genel bilgiler yer almaktadır. Bunlar genel olarak ölçüm noktasının sahip olduğu IP adresi, port numarası ve son bağlantı zamanı gibi bilgilerdir. “Kullanıcılar” tablosunda, hem güç kalitesi otomasyonu hem de web tabanlı yazılım için tanımlanan kullanıcıların bilgileri yer almaktadır. “Parametre” tablosunda, ölçüm noktalarına ait güç kalitesi parametrelerinin belirli aralıklarla değerleri saklanmaktadır. “Param_cache” tablosunda, güç kalitesi otomasyonu ekranında anlık olarak görüntülenecek değerler saklanmaktadır. Bu değerler kalıcı olarak depolanmamakta olup, sadece sürekli olarak güncellenmektedir. Bu sayede, veritabanına fazladan bir yük binmeden gerçek zamanlı görevler yerine getirilmektedir.

Son olarak “Olay” tablosunda, ölçüm noktalarında meydana gelen güç kalitesi bozulmalarına ait bilgiler saklanmaktadır.

4.2.2.2. Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi İzleme Otomasyonu

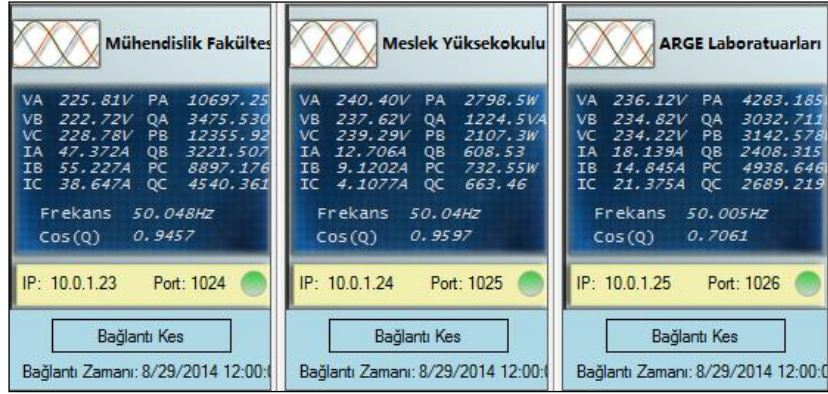
Gerçek zamanlı güç kalitesi izleme otomasyonu, güç kalitesi verilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve bu verilerin güç kalitesi veritabanında depolanmasını sağlayan görsel formlardan oluşmaktadır. Microsoft Visual C# programlama platformu ile hazırlanan güç kalitesi otomasyonu, kullanıcıların ölçüm noktalarına ait güç kalitesi parametrelerini grafiksel ve sayısal olarak izleyebilmelerine imkan tanımaktadır. Şekil 4.28’de, güç kalitesi izleme otomasyonuna ait bir ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.28. Güç kalitesi izleme otomasyonuna ait bir ekran görüntüsü.

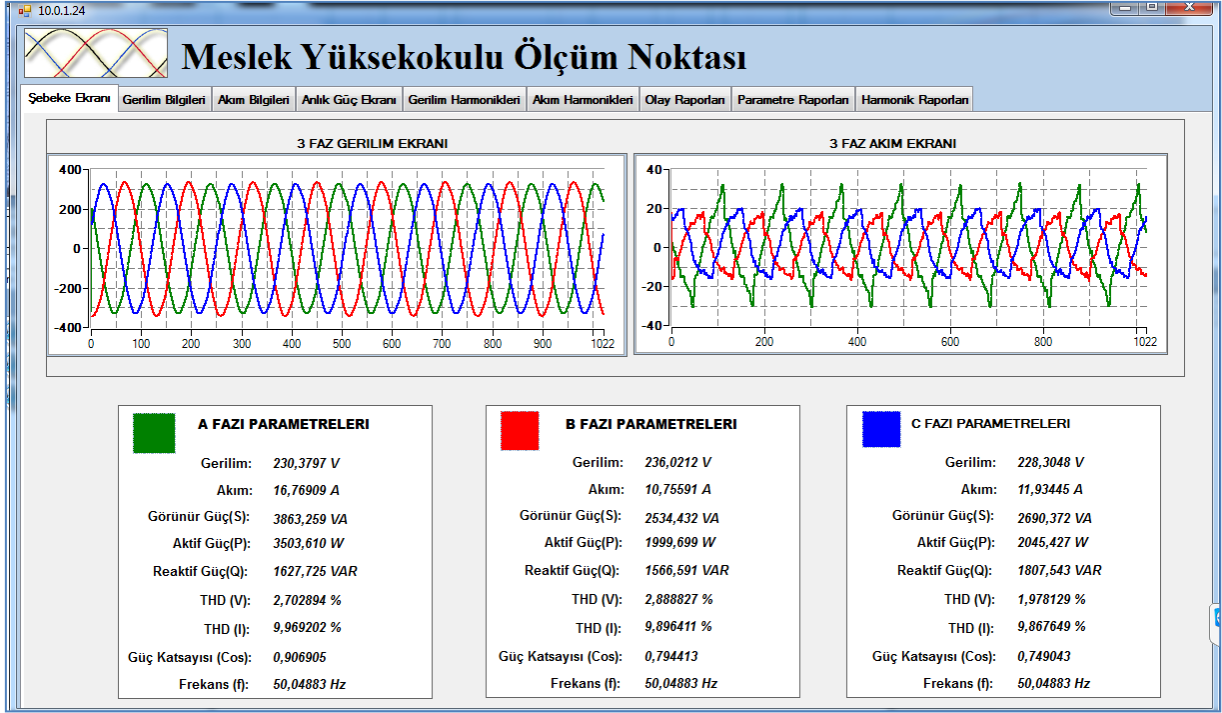
Tasarlanan güç kalitesi izleme otomasyonu içerisinde, birden fazla ölçüm noktası tanımlanabilmekte ve bu ölçüm noktaları ile gerçek zamanlı bağlantı kurulabilmektedir. Ölçüm noktalarına ait anlık sayısal bilgi ekranı ile gerçek zamanlı olarak her bir ölçüm noktasına ait güç kalitesi parametreleri, Şekil 4.29’da gösterildiği gibi kullanıcılara sunulmaktadır. Anlık sayısal bilgi ekranında ölçüm noktalarına ait; gerilim, akım, aktif güç, reaktif güç, frekans ve güç faktörü gibi değerler görüntülenmektedir. Otomasyon

ekranında, merkezlere ait bilgilerin yanı sıra çeşitli raporlamaları gerçekleştirebilecek menüler yer almaktadır. Ayrıca, her bir ölçüm noktasında meydana gelen bozulmalar uyarı şeklinde kullanıcılara bilgi olarak ana ekranda verilmektedir.

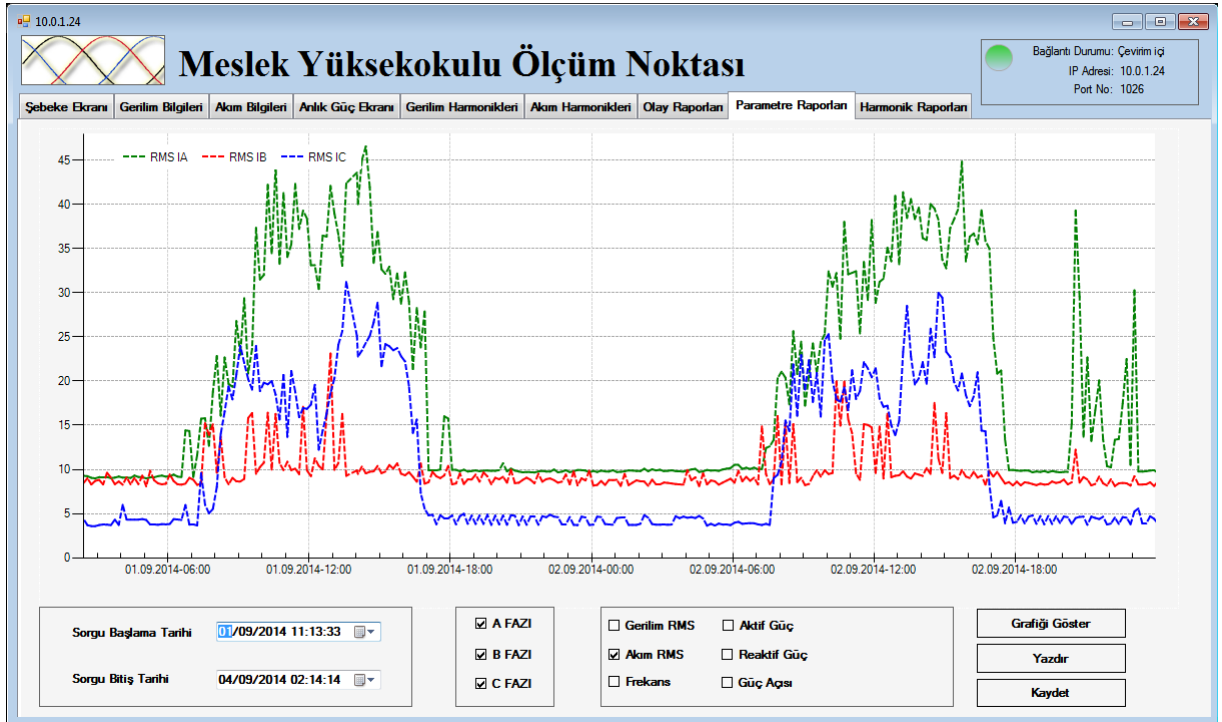


Şekil 4.29. Güç kalitesi otomasyonuna ait anlık sayısal bilgi ekranı.

Her bir ölçüm noktası için detaylı bir şekilde izleme gerçekleştirebilecek ekranlara, ölçüm merkezlerinin seçimi yapılarak ulaşılabilir. Şekil 4.30'da, seçilen bir ölçüm noktası için detaylı izleme ekranının bir görüntüsü verilmiştir. Ölçüm noktaları için otomasyon üzerinde detaylandırılan izleme ekranında; anlık gerilim grafikleri, anlık akım grafikleri, şebekeye ait elektriksel parametreler, güç bileşenlerinin izlenebileceği anlık güç ekranı, gerilim harmonikleri, akım harmonikleri, bozulmalara ait olay raporları, güç kalitesi parametrelerine ait raporlamalar, akım ve gerilim harmoniklerine ait raporlamalar yer almaktadır. Detaylı izleme ekranı içerisindeki güç kalitesi parametreleri hem grafiksel hem de sayısal olarak kullanıcılara sunulmaktadır.



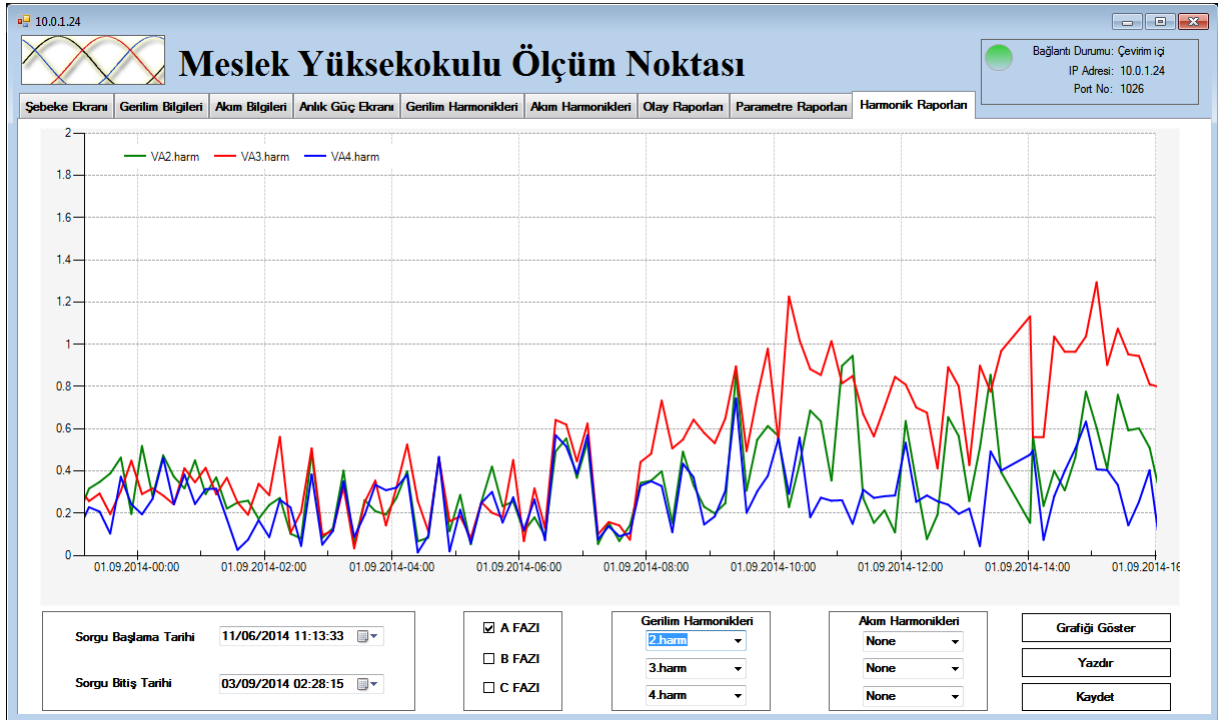
Şekil 4.30. Ölçüm noktaları için detaylı izleme ekranına ait görüntü.



Şekil 4.31. Güç kalitesi izleme otomasyonuna ait parametre raporunun örnek bir görüntüsü.

Otomasyon içerisinde, ölçüm noktalarına ait parametrelerin geçmişe dönük olarak sorgulanması için kapsamlı menüler yer almaktadır. Şekil 4.31’de görüldüğü gibi her bir fazın seçimi gerçekleştirilmekte ve bu fazlar için sorgulanacak parametrelerin seçimleri

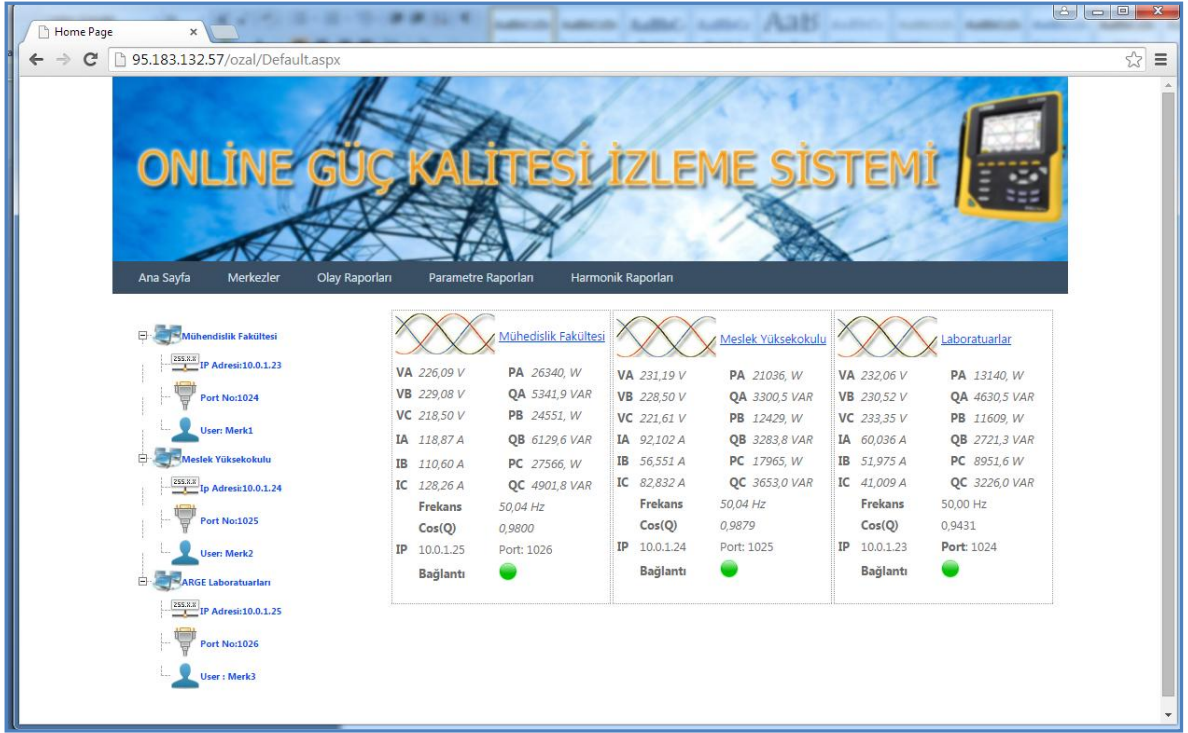
yapılmaktadır. Belirtilen tarih aralıklarında, güç kalitesi parametreleri grafiksel olarak otomasyon üzerinde gösterilmektedir. Güç kalitesi hakkında önemli bilgiler sunan harmonikler için, ayrı bir sorgu ekranı otomasyon üzerinde yer almaktadır. Harmonik raporlama ekranı üzerinde belirtilen fazlara ait akım ve gerilim harmonikleri seçilerek, sorgulama tarihleri arasında grafiksel olarak izlenebilmektedir. Şekil 4.32’de, harmonik raporlama ekranına ait örnek bir sorgulama sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.32. Harmonik raporlama ekranına ait örnek bir sorgu görüntüsü.

4.2.2.3. Güç Kalitesi Web Uygulaması

Tez çalışmasında, ölçüm noktalarına ait verileri internet bağlantısı bulunan herhangi bir ortamdan anlık olarak izlemek için web tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir. ASP.NET teknolojisi kullanılarak hazırlanan web sayfası, izleme merkezindeki sunucu üzerinde çalışarak, güç kalitesi verilerine erişim sağlamaktadır. Güç kalitesi verilerinin internet üzerinden izlenmesine olanak tanıyan bu web uygulaması ile sistemde tanımlanan kullanıcılar, kendilerine ait ölçüm noktaları hakkında detaylı bilgilere uzaktan erişebilmektedir. Şekil 4.33’te, çalışma kapsamında hazırlanan güç kalitesi web uygulamasına ait görüntüye yer verilmiştir. Şekil 4.34’te, seçimi gerçekleştirilen bir ölçüm noktası için web tabanlı uygulamanın çalışan hali gösterilmiştir.



Şekil 4.33. GK izleme sisteminin web tabanlı uygulamasına ait görüntü.



Şekil 4.34. Ölçüm noktasına ait çalışan web tabanlı uygulamanın görüntüsü.

Web sayfası içerisinde hazırlanan menüler, kullanıcılara ölçüm noktaları ile ilgili hem sayısal hem de grafiksel veriler sunmaktadır. Ana sayfa ekranında, kullanıcıya tanımlanan ölçüm noktaları ile ilgili anlık parametre bilgileri görüntülenmektedir. Bu bilgiler 3 s. aralıklar ile sürekli olarak güncellenmektedir. Güç kalitesi izleme otomasyonu yazılımında olduğu gibi, izleme sistemine ait web uygulaması da güç kalitesi verilerini detaylı bir şekilde raporlayabilecek alt menülere sahiptir. Kullanıcılar, seçimini gerçekleştirdikleri herhangi bir ölçüm noktasına ait anlık verilere erişebilmektedir. Ayrıca, web üzerinden grafiksel ve sayısal olarak çeşitli raporlamalar yapabilmektedir.

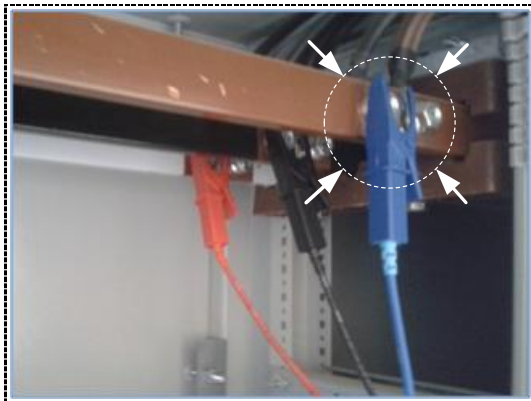
Hazırlanan web tabanlı güç kalitesi izleme sistemine, akıllı telefon gibi mobil platformlar aracılığıyla da erişilebilmektedir. Bu sayede, internet bağlantısı bulunan akıllı bir cihaz ile kullanıcılar ölçüm noktalarına ait güç kalitesi bileşenlerini anlık olarak kontrol etme imkanına sahiptir.

5. İGKİS'İN SAHA UYGULAMALARI VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Tezin bu bölümünde, tasarlanan izleme sistemi İGKİS'in belirlenen ölçüm noktalarına kurulması ve ölçüm noktalarından elde edilen güç kalitesi verilerinin değerlendirilmesi ile ilgili detaylı bilgilere yer verilmiştir. Çalışma kapsamında oluşturulan sistem, Tunceli Üniversitesi yerleşkesinde bulunan Mühendislik Fakültesi, AR-GE Laboratuvarları ve Meslek Yüksekokulu binasındaki dağıtım panolarına kurulmuştur. Ölçüm noktalarından elde edilen veriler, Tunceli Üniversitesi Elektrik-Elektronik Laboratuvarına kurulan izleme merkezine sürekli olarak aktarılmıştır. Ayrıca bu bölümde, ölçüm sonuçlarıyla ilgili genel değerlendirmeler yapılmıştır.

5.1. Güç Kalitesi İzleme Sisteminin Ölçüm Noktalarına Bağlantısı

Güç kalitesi izleme sistemi, ölçüm noktalarından üç faz gerilim, üç faz akım ve bir nötr sinyal bilgisini alacak şekilde monte edilmektedir. Gerilim ölçümünde, kullanımı oldukça kolay olan özel gerilim kısıkaçları Şekil 5.1(a)'da gösterildiği gibi ait oldukları her bir fazın barasına bağlanmaktadır. Akım bağlantısı, Şekil 5.1(b)'de gösterildiği gibi iletkeni geçen akımın yönü dikkate alınarak akım klemplarının iletkeni çevreleyecek şekilde bağlanması ile gerçekleştirilmektedir. Çalışmada kullanılan akım klempları, özellikle şebekeye montajının kolay olması ve devreyi kesmeden monte edilebilmesi açısından oldukça kullanışlıdır.



(a)

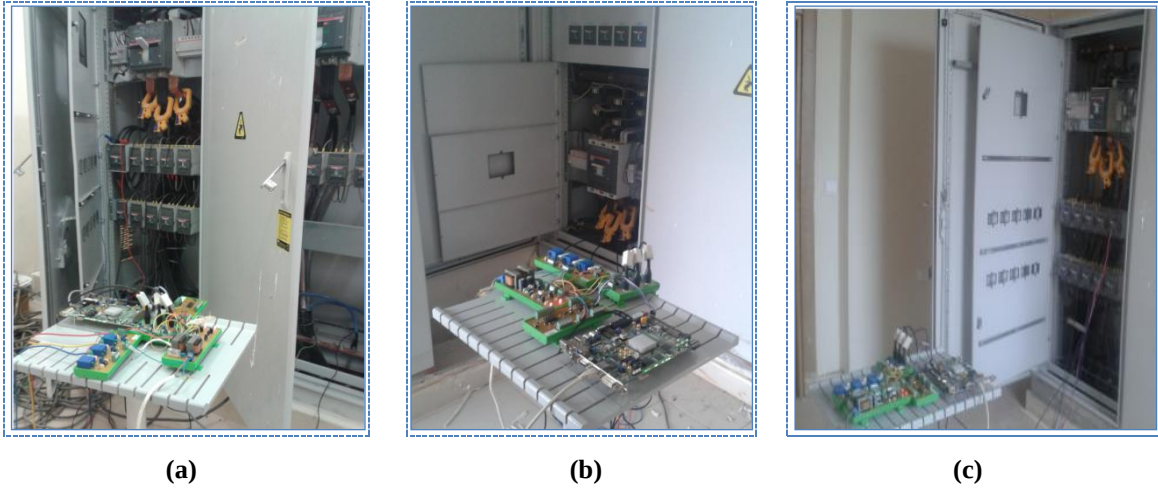


(b)

Şekil 5.1. İzleme sisteminin akım ve gerilim bağlantı yapısı **a)** İzleme cihazının gerilim ölçümü için bağlantı şekli **b)** İzleme cihazının akım ölçümü için bağlantı şekli.

5.2. Ölçüm Noktaları ve Ölçüm Süreleri

Tez çalışması kapsamında hazırlanan İGKİS'nin testlerini gerçekleştirmek için üç farklı ölçüm noktası belirlenmiştir. Bu ölçüm noktalarının bulundukları yerler Tunceli Üniversitesi bünyesindeki; Mühendislik Fakültesi, ARGE Laboratuvarları ve Meslek Yüksekokulu binalarıdır. Tunceli Üniversitesi yerleşkesi, 2013-2014 eğitim-öğretim yılında faaliyete geçen yeni bir yapıdır. Şekil 5.2(a)'da, Mühendislik fakültesi ölçüm noktasına ait trafo merkezi ve sistemin trafoya olan bağlantısı gösterilmiştir. Mühendislik Fakültesi 4 katlı bir bina ve bu binada 40 adet derslik ile 120 adet akademik ve idari personele ait çeşitli bürolar bulunmaktadır.



Şekil 5.2. Güç kalitesi izleme cihazının ölçüm noktalarındaki trafo merkezlerine yapılan bağlantıları
a) Mühendislik Fakültesi, b) AR-GE Laboratuvarları, c) Meslek Yüksekokulu ölçüm noktaları.

Mühendislik fakültesi binasında gerçekleştirilen ölçümler, 18.08.2014 tarihi ile 22.08.2014 tarihleri arasında 5 gün kesintisiz olarak yapılmıştır. Bir diğer ölçüm noktası olan Meslek Yüksekokulu, 20 adet akademik ve idari personel bürosu, 80 adet derslikten oluşmaktadır. Cihazın Meslek Yüksekokulu trafo merkezindeki bağlantısı Şekil 5.2(b)'de gösterilmiştir. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasından 28.08.2014 ile 03.09.2014 tarihleri arasında 7 günlük kesintisiz ölçümler yapılmıştır. Son ölçüm noktası olan AR-GE Laboratuvarları, 28 laboratuardan oluşan 4 katlı bir binadır. Bilgisayar Mühendisliği laboratuvarları, Elektrik-Elektronik Mühendisliği laboratuvarı ve Makine Mühendisliği laboratuvarı aktif olarak kullanılan başlıca laboratuvarlardır. Şekil 5.2(c)'de, izleme cihazının AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasındaki trafo merkezine bağlantısı gösterilmiştir.

08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasında AR-GE Laboratuvarlarında 6 günlük kesintisiz ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm noktalarına bağlantısı gerçekleştirilen güç kalitesi izleme sisteminin elde ettiği ölçüm sonuçları, internet bağlantısı üzerinden Elektrik-Elektronik Mühendisliği laboratuvarına kurulmuş olan izleme merkezindeki sunucu bilgisayara aktarılmıştır. Sunucu bilgisayar üzerinde; güç kalitesi otomasyonu, veritabanı ve güç kalitesi web uygulaması yer almaktadır. Şekil 5.3'te, İGKİS'e ait veri merkezinin bir görüntüsü verilmiştir. İzleme sisteminin web uygulaması, bu merkezde yer alan sunucu bilgisayar üzerinde hizmet vermektedir.



Şekil 5.3. İGKİS'e ait veri merkezinin bir görüntüsü.

5.3. Ölçüm Noktalarındaki Güç Kalitesi Ölçümleri ve Sonuçları

Ölçüm noktalarından elde edilen güç kalitesi parametrelerinin, standartlar çerçevesinde belirlenen sınır değerlere göre değerlendirmesi bu kısımda gerçekleştirilmektedir. Ölçüm sonuçları genel olarak; gerilim, akım ve güç bileşenleri olmak üzere üç farklı başlık altında incelenmiştir. Gerilim ölçümleri; gerilimin etkin değerindeki değişimler, gerilim harmonikleri, gerilim frekansındaki değişimler ve gerilimde meydana gelen güç kalitesi bozulma olayları şeklindedir. Akım ölçümlerinde ise, akım etkin değerlerindeki değişimler ve akım harmonikleri ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir. Güç bileşenleri ile ilgili ölçümlerde ise her bir ölçüm noktasının A fazına ait; aktif güç değişimi, reaktif güç değişimi ve güç faktörünün değişimine yer verilmiştir. Ek Şekil 1.1'de, ölçüm

noktalarından herhangi bir anda elde edilen şebeke parametreleri verilmiştir. Ek Şekil 1.2’de, ölçüm noktalarındaki akım ve gerilim dalga şekillerine bir örnek verilmiştir.

5.3.1. Gerilim Kalitesine Ait Ölçümler

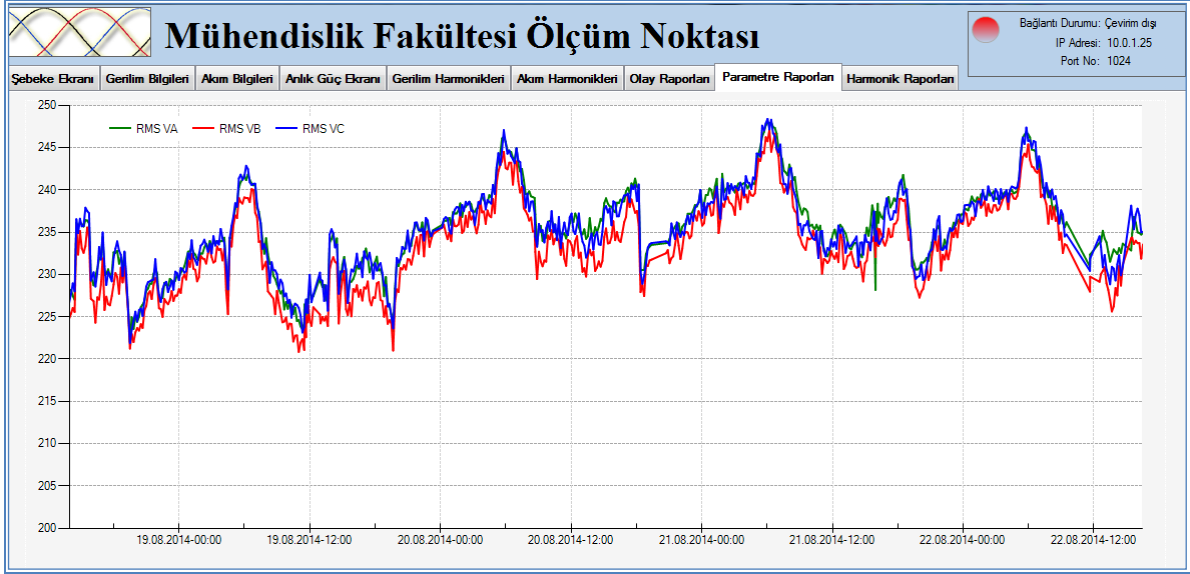
Bu kısımda, ölçüm noktalarındaki gerilimin kalitesini belirlemeye yönelik aşağıda belirtilen çeşitli ölçümler gerçekleştirilmiştir:

- Gerilim etkin değerinin zamana göre değişimi,
- Gerilim frekansının değişimi,
- Gerilimde meydana gelen bozulma olayları ve
- Gerilim harmonikleri.

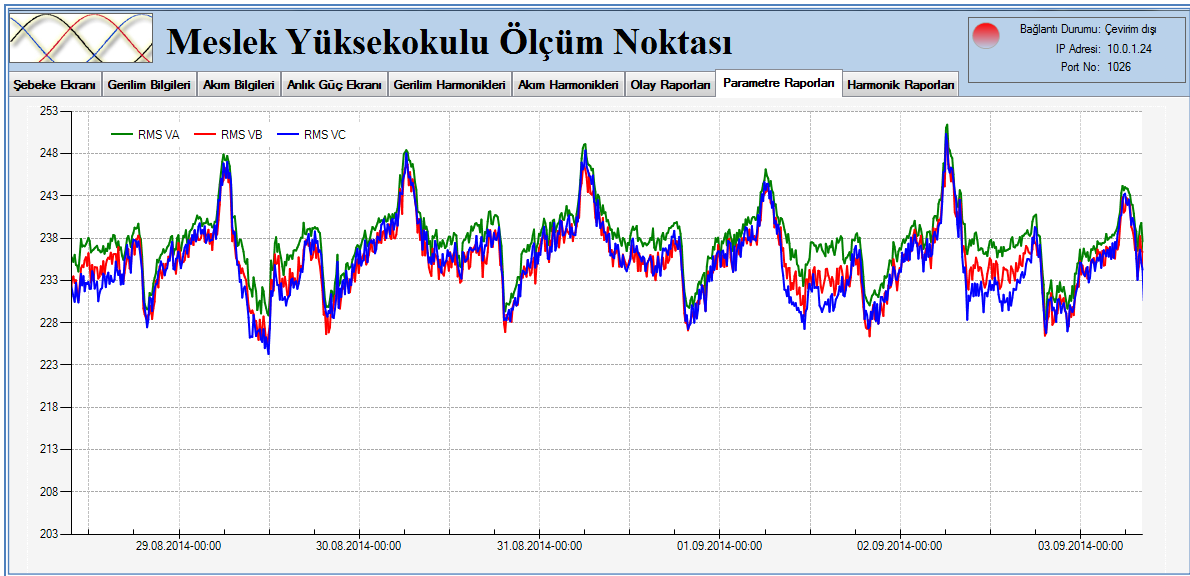
5.3.1.1. Gerilim Etkin Değerindeki Değişimler

“Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik”te, gerilim kalitesi ile ilgili olarak “ AG seviyesi için ölçüm periyodu boyunca ölçülen gerilim etkin değerlerinin 10’ar dakikalık ortalamalarının, en az % 95’i nominal etkin gerilim değerinin en fazla $\pm$ % 10’u kadar, tamamı ise nominal etkin gerilim değerinin en fazla + % 10 ile % 15 aralığında değişmelidir” ifadesi yer almaktadır. Aynı yönetmelikte AG seviyesindeki nominal gerilim tanımı; fazlar arası 400 V, faz nötr arası 230 V olarak belirtilmektedir. Bu tanımlamalar paralelinde, ölçüm noktalarının her bir fazına ait gerilim etkin değerindeki 10’ar dakikalık ortalamaların değişimleri grafiksel olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 5.4’te, Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasına ait 18.08.2014–22.08.2014 tarihleri arasında üç faz gerilimlerin etkin değerindeki 10’ar dakikalık ortalamaları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, ölçüm noktasındaki gerilim değişimlerinin yönetmelikte belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasındaki gerilimlerin etkin değeri, 5 günlük kesintisiz ölçümlerde maksimum 248.4 V ve minimum 220.6 V değerlerine ulaşmıştır. Gerilimlere ait en yüksek değerler, sabah 06:00 ile 08:00 saatleri arasında ve en düşük değerler 19:00 ile 20:30 saatleri arasında ölçülmüştür. Benzer şekilde, Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasına ait 28.08.2014–03.09.2014 tarihleri arasında 7 günlük ölçümlerden elde edilen gerilimin etkin değerindeki değişimlerin grafiği Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.4. Mühendislik Fakültesi Ölçüm Noktasının 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında 3 faz gerilim etkin değerindeki 10'ar dakikalık değişimlerin grafiği.



Şekil 5.5. 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasında Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasındaki gerilim etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.

Meslek Yüksekokulu ölçüm noktası için gerçekleştirilen gerilim ölçümlerinde, gerilim etkin değerinin minimum 224.4 V ve maksimum 251.3 V değerlerine ulaştığı görülmektedir. Gerilim etkin değerindeki değişimlerin, yönetmelikte belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasında olduğu gibi gerilimlerin en yüksek seviyelerine sabah 06:00–07:00 saatlerinde çıktığı ve minimum değerlerine 19:00–20:30 saatleri arasında düştüğü gözlemlenmiştir. Son olarak AR-GE Laboratuvarlarında yapılan gerilim etkin değeri ölçümlerine ait sonuçlar Şekil 5.6'da

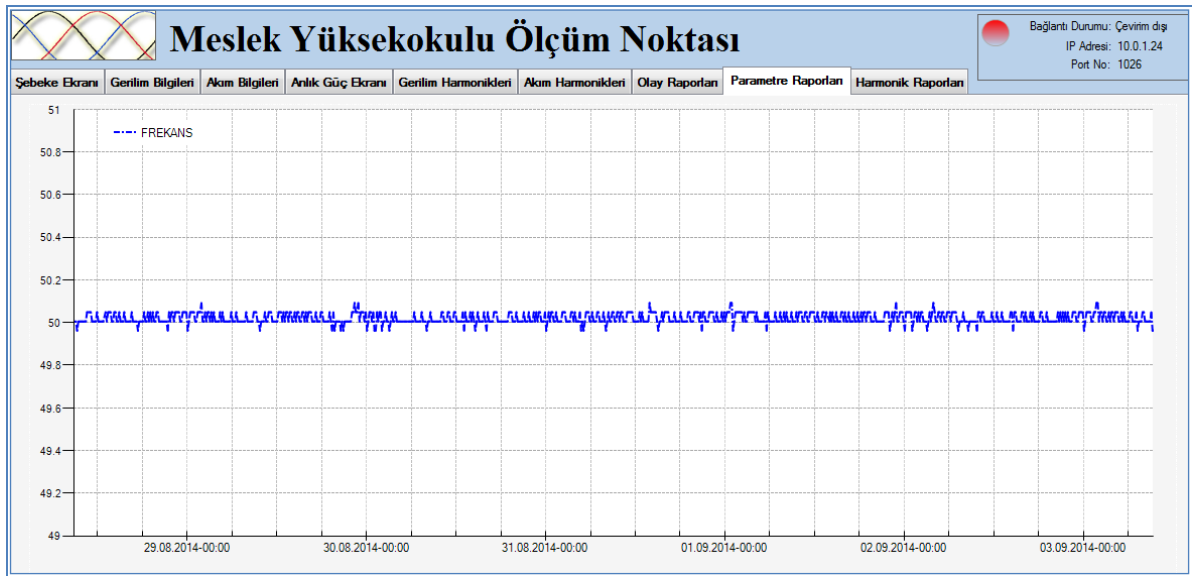
verilmiştir. 08.08.2014–13.08.2014 tarihleri arasında gerçekleştirilen ölçümlerde, gerilim etkin değerlerinin 242.8 V maksimum ve 222.3 V minimum değerlerle yönetmelikte belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.6. 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasında AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasındaki gerilim etkin değerlerinin 10’ar dakikalık aralıklarla değişimi.

5.3.1.2. Frekans Değişimleri

Güç kalitesi izleme sistemi içerisinde, her bir ölçüm noktasına ait frekans parametreleri için tek bir faz üzerinden ölçümler alınmıştır. Şekil 5.7’de, Meslek Yüksekokulu ölçüm noktası için 7 günlük frekans değişimlerini gösteren ekran görüntüsü verilmiştir.

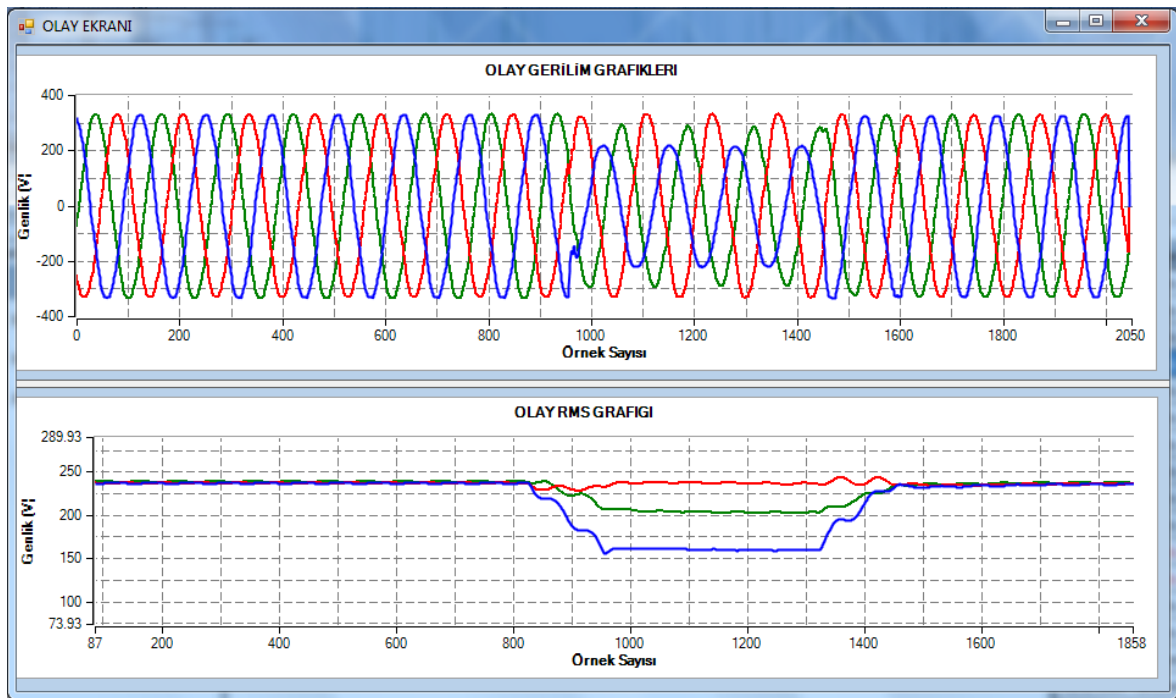


Şekil 5.7. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasına ait yedi günlük frekans değişim grafiği.

“Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliğı ve Kalitesi Yönetmeliğı”nde frekans ile ilgili olarak “Sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hertz etrafında 49.8 Hz ile 50.2 Hz aralığında kontrol edilir. Normal sistem işletmesi ve otomatik kontrolü için hedef sistem frekansı 49.95- 50.5 Hz arasındadır” tanımlamaları yer almaktadır. Her üç ölçüm noktası için elde edilen frekans ölçümleri incelendiğinde, frekansların ortalama 50 Hz civarında olduğı görülmüştür. Ek Şekil 1.3’te, Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasına ait frekans değışim grafiğı Ek Şekil 1.4’de ise AR-GE Laboratuvarlarına ait elde edilen frekans ölçümlerinin değışim grafiğı verilmiştir.

5.3.1.3. Gerilimde Meydana Gelen Bozulma Olayları

IEC 61000-40-30 standardında belirlenen ölçüm aralıklarına göre gerçekleştirilen olay tespit sistemi, ölçüm noktalarındaki gerilimlerde meydana gelen bozulmaları gerçek zamanlı olarak tespit etmektedir. Bozulma olayına ait gerilim dalga şekli 8 periyot olay öncesi ve 8 periyot olay sonrası olmak üzere toplam 16 periyotluk veriden oluşmaktadır. Olay tespit sistemi; gerilim çökmesi, gerilim sıçraması ve kesinti olaylarını başarılı bir şekilde belirleyebilmektedir. Şekil 5.8’de, olay tespit sistemi ile tespit edilen bir gerilim çökmesine ait gerilim dalga şekli ve gerilim etkin değıerindeki değıişimler gösterilmiştir. Tablo 5.1’de, ölçüm noktalarından elde edilen gerilim bozulmalarına ait sayısal bilgiler verilmiştir.



Şekil 5.8. Güç kalitesi izleme sistemi ile tespit edilen bir gerilim çökmesine ait gerilim dalga şekilleri ve gerilim etkin değıer değıişimleri grafiğı.

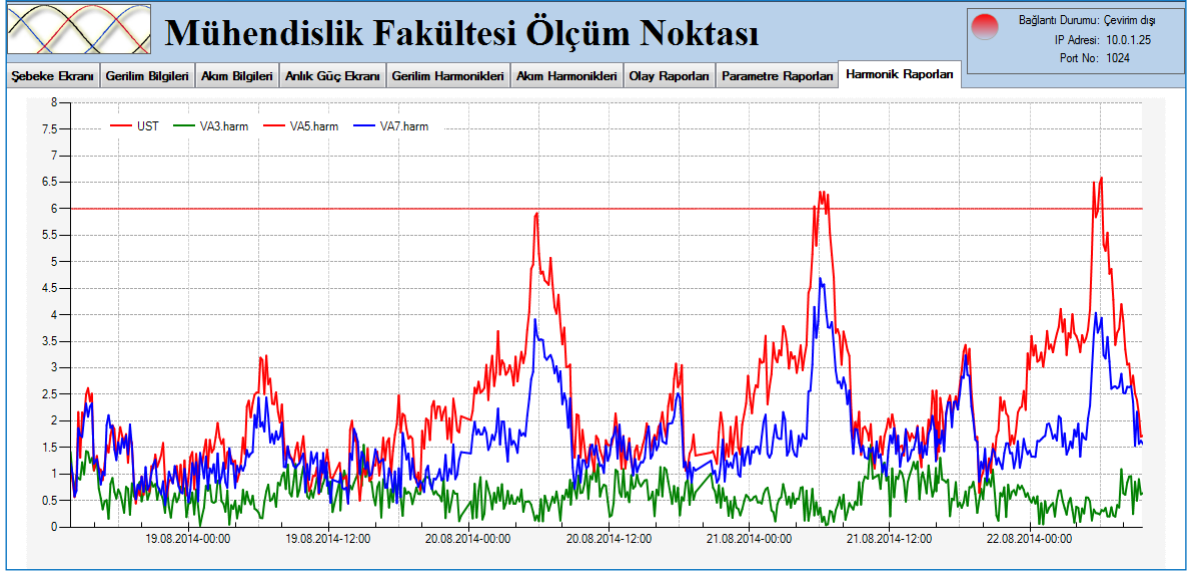
Tablo 5.1. Ölçüm noktalarında meydana gelen gerilim bozulmaları.

AR-GE Laboratuvarları		Mühendislik Fakültesi		Meslek Yüksekokulu	
Bozulma Türü	Tarih	Bozulma Türü	Tarih	Bozulma Türü	Tarih
Kesinti	08.08.2014 13:43:25	Çökme (sag)	19.08.2014 13:41:35	Kesinti	28.08.2014 11:30:14
Sıçrama (swell)	08.08.2014 13:43:34	Çökme (sag)	19.08.2014 13:52:42	Çökme (sag)	29.08.2014 07:12:02
Çökme(sag)	09.08.2014 06:08:23	Çökme (sag)	19.08.2014 15:43:30	Çökme (sag)	29.08.2014 17:36:39
Çökme(sag)	09.08.2014 13:17:33	Kesinti	21.08.2014 18:54:05	Çökme (sag)	30.08.2014 04:50:12
Kesinti	09.08.2014 17:24:20	Sıçrama (swell)	21.08.2014 19:00:47	Çökme (sag)	30.08.2014 05:26:18
Çökme(sag)	10.08.2014 17:17:39	Çökme (sag)	22.08.2014 14:17:03	Çökme (sag)	31.08.2014 08:42:31
Sıçrama(swell)	10.08.2014 17:24:05			Çökme (sag)	02.09.2014 05:59:47
Çökme(sag)	11.08.2014 07:11:16			Çökme (sag)	03.09.2014 14:47:58

Ölçüm süreleri boyunca, ölçüm noktalarında toplam 22 adet gerilim bozulması olayı kaydedilmiştir. Gerilim olayları incelendiğinde, ölçüm noktalarında sıklıkla meydana gelen bozulma türü gerilim çökmesi olmuştur. Geliştirilen güç kalitesi izleme sistemi içerisinde, gerilimde meydana gelen bozulma olaylarına ait grafiksel ve sayısal verilere kolaylıkla erişilebilmektedir.

5.3.1.4. Gerilim Harmonikleri

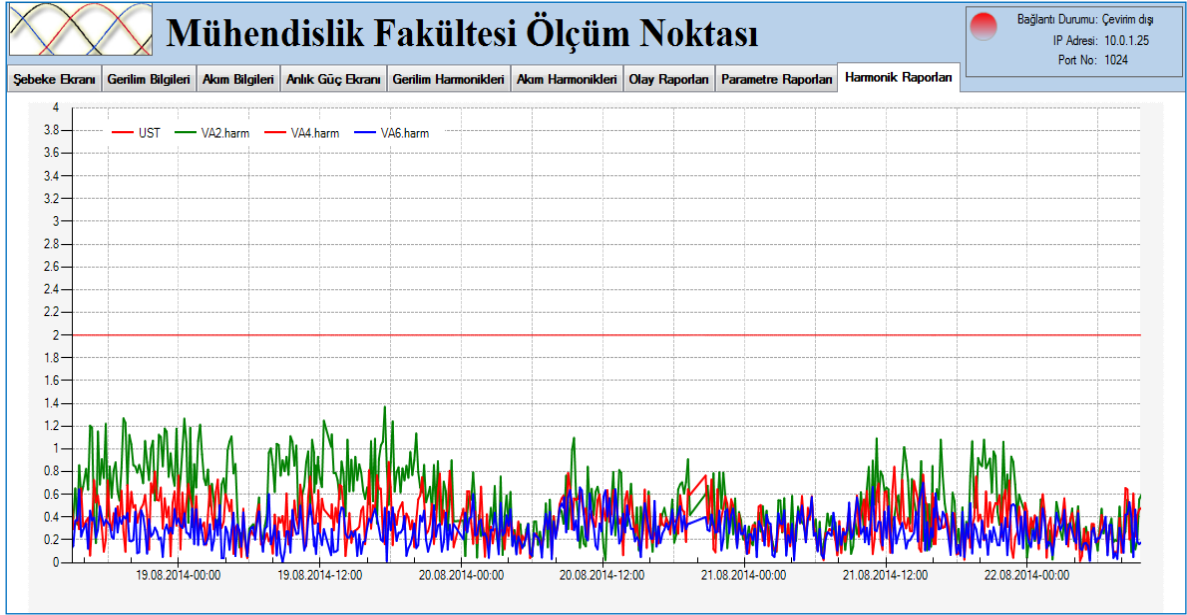
Gerilim harmonikleri ile ilgili ölçüm sonuçları, her bir ölçüm noktasının A fazı üzerinden elde edilen veriler ile değerlendirilmiştir. Gerilim harmoniklerine ait sınır değerler, “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliği”nde belirtilen sınır değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.9’da, Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait 18.08.2014–22.08.2014 tarihleri arasında 3., 5. ve 7. harmoniklerin 10’ar dakikalık ortalamalar şeklindeki değişimlerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.9. 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5. ve 7. harmoniklerin 10’ar dakikalık ortalamalar şeklinde değişimleri.

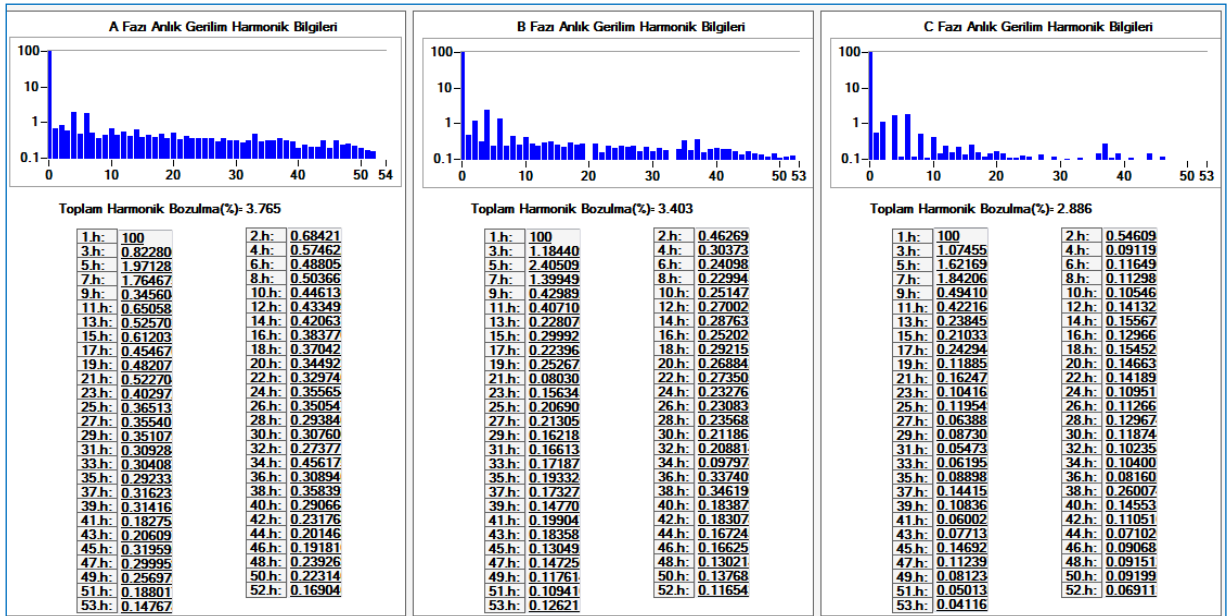
EPDK tarafından belirlenen gerilim harmonik sınır değerlerine göre, 3. ve 7. harmonik için sınır değer % 5 iken, 5. harmonik için bu sınır değer % 6 dır. Ölçüm noktasına ait gerilim harmonikleri incelendiğinde; genel olarak harmonik değerlerin bu sınır değerler içerisinde kaldığı, 5. ve 7. harmonik değerlerinin 3. harmonik bileşenine göre oldukça yüksek çıktığı görülmektedir.

Şekil 5.10’da, aynı tarihler arasında Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. harmoniklerin değişim grafiği verilmiştir. Çift harmoniklerin standartlarda belirtilen sınır değerlerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Bu sınır değerler 2. harmonik için % 2, 4. harmonik için % 1 ve 6. harmonik için % 0.5’dir. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5. ve 7. gerilim harmonik değerlerin değişimi Ek Şekil 1.5’te; 2., 4. ve 6. gerilim harmonik değerlerin değişimi de Ek Şekil 1.6’da verilmiştir. AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5. ve 7. gerilim harmonik değerlerin değişimi Ek Şekil 1.7’de; 2., 4. ve 6. gerilim harmonik değerlerin değişimi de Ek Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 5.10. 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. harmoniklerin 10’ar dakikalık ortalamalar şeklinde değişimleri.

İnternet tabanlı güç kalitesi izleme sistemi üzerinde gerilim harmoniklerinin 3’er saniyelik ortalama değişimleri gerçek zamanlı olarak sayısal biçimde izlenebilmektedir. Ayrıca, her bir faz için THB değerleri yine aynı ekran üzerinden görüntülenmektedir. Şekil 5.11’de, Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasına ait 20.08.2014 tarihinde ölçülen gerilim harmoniklerinin 3 s.’lik ortalaması verilmiştir.



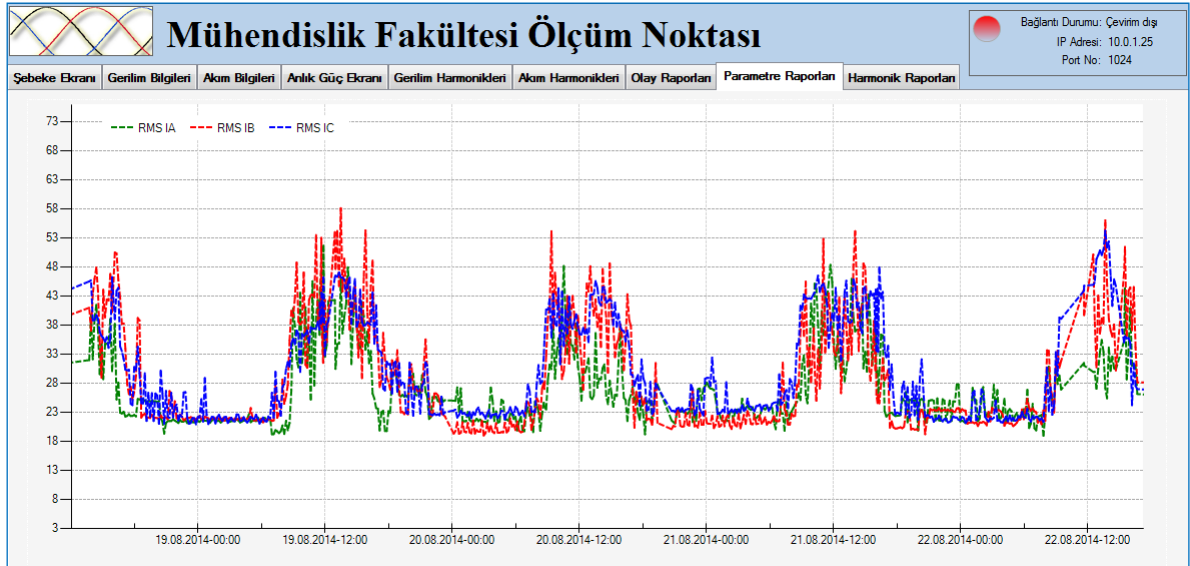
Şekil 5.11. Mühendislik fakültesi ölçüm noktasına ait gerilim harmoniklerinin 3sn’lik ortalamaları.

5.3.2. Akım Ölçüm Sonuçları

Bu kısımda, her bir ölçüm noktasının akımlarına ait etkin değer değişimleri ve harmonik parametreleri ile ilgili ölçümlere ait genel değerlendirmeler sunulmuştur.

5.3.2.1. Akım Etkin Değerindeki Değişimler

Akım ölçümlerinde, her bir faza ait ölçüm süreleri boyunca 10'ar dakikalık ortalamalar şeklinde etkin değer değişimleri ölçülmüştür. Şekil 5.12'de, Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasına ait 18.08.2014–22.08.2014 tarihleri arasında 5 günlük ölçümlerden elde edilen üç faza ait akımların etkin değerindeki değişimler verilmiştir.

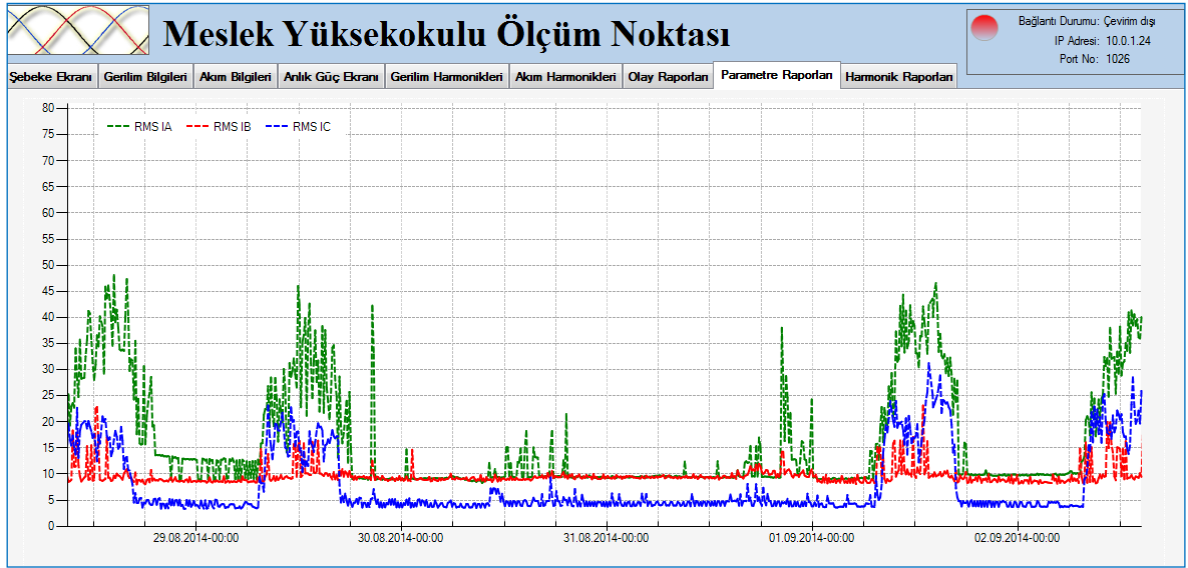


Şekil 5.12. Mühendislik Fakültesi Ölçüm Noktasının 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasında akımlarının etkin değerindeki 10'ar dakikalık değişimlerin grafiği.

Grafik incelendiğinde fazlar arasında akımlar dengeli bir şekilde dağılmıştır. Akımların, mesai saati olan 08:00 ile 17:00 saatleri arasında yükseldiği ve mesai dışındaki saatlerde düştüğü görülmektedir. Ölçülen akımların en yüksek değeri 58.1 A ve en düşük değeri 18.85 A'dır.

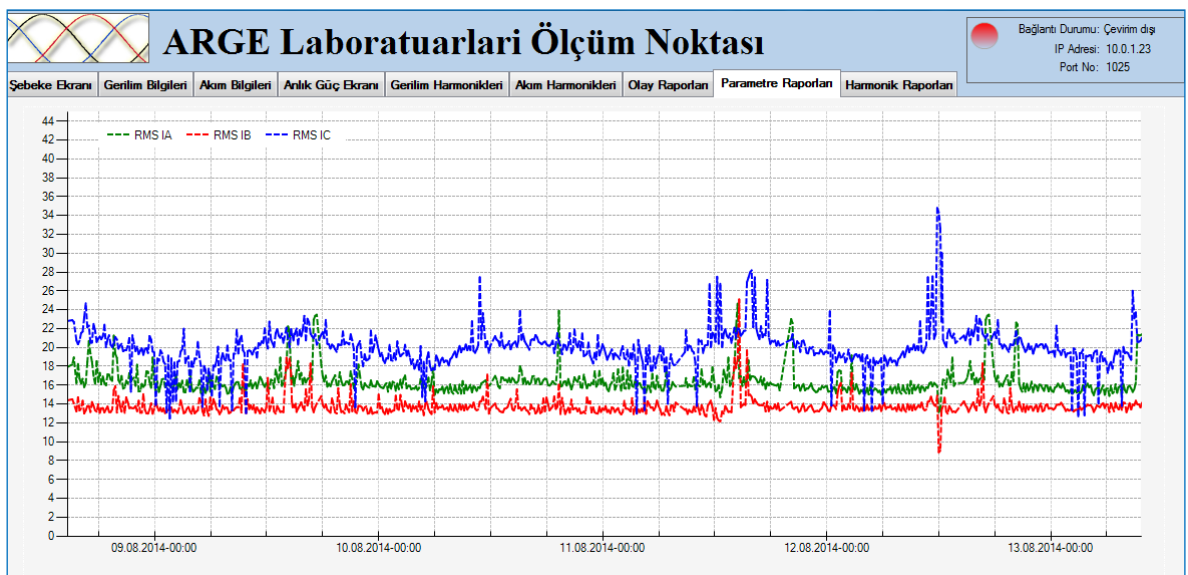
Şekil 5.13'te, Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasına ait 28.08.2014–03.09.2014 tarihleri arasındaki üç faza ait akımların etkin değerindeki değişimler gösterilmiştir. Benzer şekilde, bu ölçüm noktasındaki akımların da mesai saatleri içerisinde yükseldiği ve mesai dışı saatlerde düştüğü görülmektedir. Meslek Yüksekokulundaki akımlar incelendiğinde fazların dengesiz yüklendiği görülmüştür. Mesai saatleri içerisinde en fazla akım A fazı ve C fazı üzerinden çekilmekte ve B fazındaki akımın ortalama 10 A civarında seyrettiği görülmektedir. Bunun temel nedenlerinden birisi, B fazına bağlı olan atölye ve dersliklerin

aktif kullanılmaması olarak gösterilebilir. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasındaki en yüksek akım değeri 48.1 A ve en düşük akım değeri 3.4 A değerleridir.



Şekil 5.13. 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasında Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasındaki akımların etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.

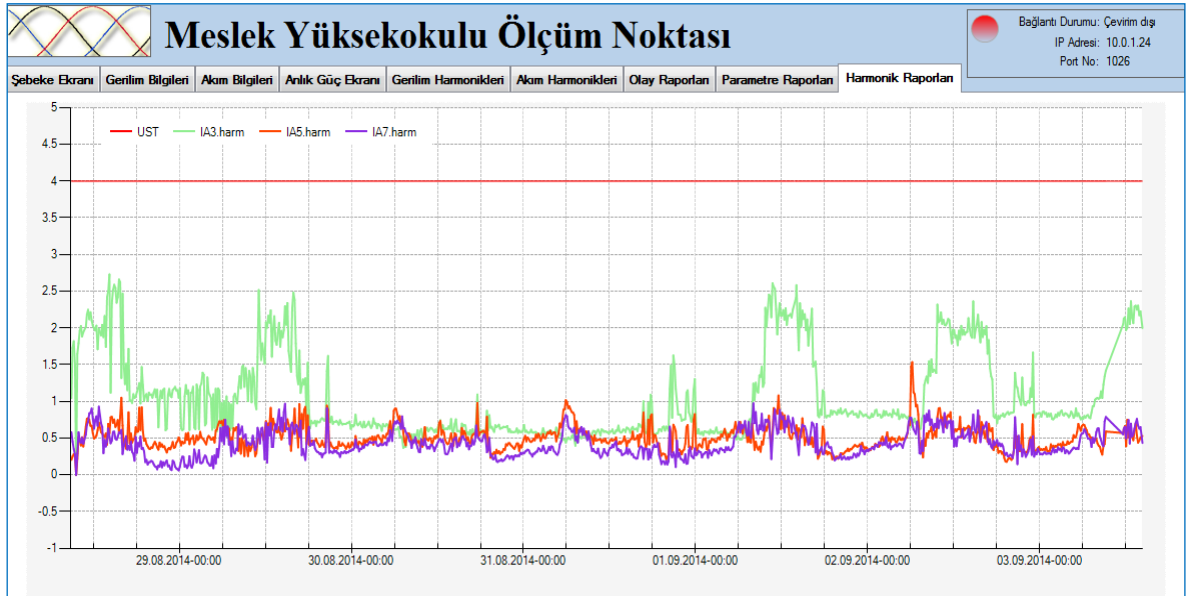
AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktası için gerçekleştirilen akım etkin değer ölçümleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde, ölçüm noktasındaki akımlarda fazla bir sapmanın olmadığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, ölçüm noktasında bulunan birçok laboratuvarın aktif olmaması olarak gösterilebilir. A fazına ait akımın 16 A seviyelerinde, B fazına ait akımların 13 A seviyelerinde ve C fazına ait akımların 21 A seviyelerinde seyrettiği görülmektedir.



Şekil 5.14. 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasında ARGE Laboratuvarları ölçüm noktasındaki gerilim etkin değerlerinin 10'ar dakikalık aralıklarla değişimi.

5.3.2.2. Akım Harmonikleri

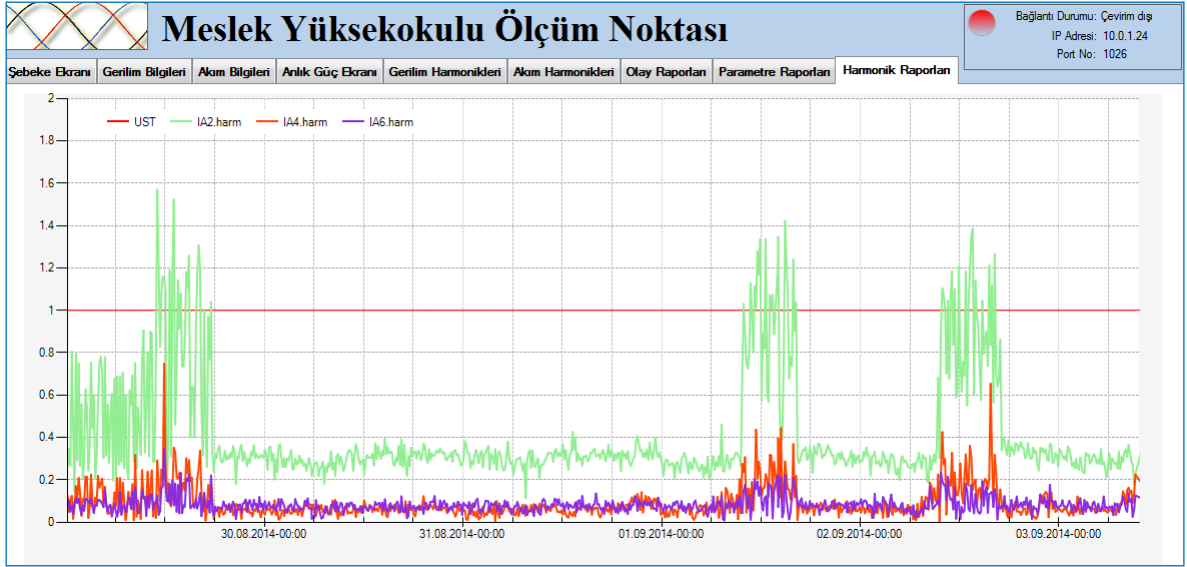
Akım harmonikleri ile ilgili ölçüm sonuçları, “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik” içerisinde yer alan Tablo 11’de belirtilen akım harmonikleri için sınır değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Her bir ölçüm noktasının A fazı için gerçekleştirilen ölçümlerde, akım harmoniklerinin 10’ar dakikalık ortalamaları verilmiştir. Şekil 5.15’te, Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5., ve 7. harmonik değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5., ve 7. harmonik değerleri.

Akım harmoniklerine ait elde edilen grafik incelendiğinde, harmonik değerlerin belirtilen sınırların oldukça altında kaldığı görülmektedir. 3. harmonik değeri, 5. ve 7. harmonik değerlerine göre özellikle çalışma saatlerinde daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, mesai saatleri içerisinde bilgisayarlar ve diğer elektronik cihazların aktif olarak kullanımı gösterilebilir.

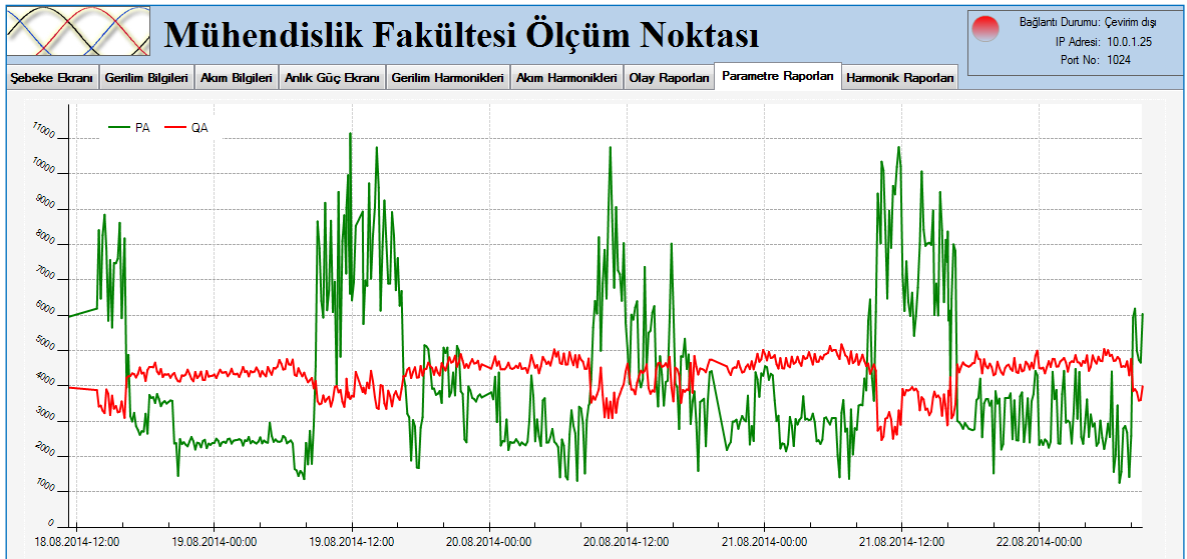
Şekil 5.16’da, Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. harmoniklerine ait 28.08.2014–03.09.2014 tarihleri arasındaki değerlerinin zamana göre değişimleri verilmiştir. 2. harmonik değerinin özellikle çalışma saatleri içerisinde bazen standartların üstüne çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.16. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. harmonik değerlerin değişimi.

5.3.3. Güç Bileşenlerine Ait Ölçümler

Güç bileşenleri ile ilgili gerçekleştirilen ölçümler; aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve güç faktörü parametrelerini kapsamaktadır. Güç sistemi üzerindeki güç bileşenlerinin ölçümü, oldukça önem arz etmektedir. Sistemin çektiği enerji miktarlarının sürekli bir şekilde gözlenmesi ve kayıt altına alınması, şebeke işletmecileri açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktası için 18.08.2014–22.08.2014 tarihleri arasında kayıt altına alınan aktif ve reaktif güç bileşenlerinin değişimi Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının 18.08.2014-22.08.2014 tarihleri arasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri.

Reaktif güç bileşeni incelendiğinde, ortalama 4.5 kVAR arasında bir değişime sahiptir. Aktif güç bileşeni, özellikle çalışma saatlerinde büyük oranda artmakta ve 11.44 kW seviyelerine ulaşmaktadır. Çalışma saatleri dışında, aktif güç bileşeninde önemli derecede düşüş yaşanmaktadır. Ek Şekil 1.9’da, Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasına ait, Ek Şekil 1.10’da da AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasına ait aktif ve reaktif güç değişimleri görülmektedir.

“Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”nde aktif ve reaktif enerji ile ilgili hükümlerde, “Sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı %20’yi, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise %15’i geçemez. Bu oranlar TEİAŞ tarafından uygun görülen iletim sistemine bağlı tüketiciler için farklı olarak uygulanabilir.” ifadeleri yer almaktadır. Bu nedenle güç sistemi üzerindeki aktif ve reaktif bileşenlerin izlenmesi oldukça önem kazanmıştır. Güç sınırlarını aşan kullanıcıya, dağıtım şirketi tarafından “Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği” hükümleri çerçevesinde bağlantı anlaşmasında düzenlenmiş bulunan yaptırımlar uygulanır. Güç faktörü EPDK tarafından, aktif gücün görünür güce oranı olarak tanımlanmıştır. Güç sistemi üzerindeki güç faktörünün değişimi, sistemdeki güç bileşenleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 5.18’de, Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait güç faktörünün değişimini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 5.18. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasının A fazına ait güç faktörü bileşeninin değişim grafiği.

Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasına ait güç faktörü değişimi incelendiğinde, çalışma saatleri dışında 0.30 seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. Güç faktörünün, çalışma saatleri içerisinde 0.95 seviyelerine yükseldiği görülmüştür. Güç faktörüne ait grafikten anlaşılabacağı gibi Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasındaki kompanzasyon sisteminde problemler olduğu sonucuna varılmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu tezde, güç kalitesini standartlara uygun ve sürekli bir şekilde izlemek için İGKİS olarak isimlendirilen internet tabanlı yeni bir sistem geliştirilmiştir. Bu izleme sistemine ait hem donanımsal hem de yazılımsal çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Donanımsal çalışmalar altında, yeni nesil bir güç kalitesi izleme sisteminin tasarımı yapılmıştır. Bu izleme sistemi, ölçüm noktalarına kolayca monte edilerek bu noktalardan güç kalitesi verilerinin kesintisiz bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, bünyesinde yer alan sinyal işleme algoritmaları ile sinyallere ait analizleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirebilmektedir. Tasarımı yapılan yeni nesil güç kalitesi sisteminde, son zamanlarda sinyal işleme alanında ön plana çıkan FPGA teknolojisi kullanılmıştır. Paralel işlem yapabilme yeteneğinden kaynaklanan hızı ve sinyal işlemeye uygun mimariye sahip olması açısından FPGA donanımı tercih edilmiştir. Güç kalitesi izleme sistemi, çoklu giriş kanallarından akım ve gerilim sinyallerini yüksek doğruluk ve uygun bant genişliğinde okuyarak bu sinyalleri sayısal biçime dönüştürmektedir. Bu işlemler için sistem üzerinde oldukça hassas elektronik ekipmanlar kullanılmıştır. Sistem üzerinde; akım algılayıcı devresi, gerilim algılayıcı devresi ve sinyal dönüştürme birimleri modüler bir şekilde tasarlanmıştır. Sayısal değerlere dönüştürülen akım ve gerilim sinyalleri, anlık olarak FPGA içerisinde işlenerek gerekli bilgilerin çıkışa aktarılması sağlanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında hazırlanan İGKİS bünyesinde geliştirilen yazılım çalışmaları, genel olarak iki farklı kategoriye ayrılmıştır. Bunlardan birincisi, FPGA tarafında VHDL programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılımlardır. Bu yazılımlar içerisinde yapılan işlemler genel olarak şu şekildedir:

- ADC entegresinin kontrolü ile sinyal dönüştürme işlemleri,
- Akım ve gerilim sinyalleri üzerinde gerçek zamanlı sinyal işleme algoritmalarının yürütülmesi,
- Güç kalitesi verilerinin aktarımı ve dışarıdan gelen komutların işlenmesi için UDP/IP haberleşmesi,
- Hafıza organizasyonu ile güç kalitesi verilerinin depolanması ve modüller arasında paylaşılması ve
- G/Ç port kontrollerinin sağlanmasıdır.

Güç kalitesi izleme sistemi içerisindeki sayısal sinyal işleme algoritmaları ile ölçümü gerçekleştirilen parametreler genel olarak; akım ve gerilimin RMS değeri, şebeke frekansı,

akım ve gerilim harmonikleri, güç kalitesi bozulma olayları ve güç bileşenleri şeklindedir. Tüm bu ölçümler, güç kalitesi standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmektedir.

İGKİS'in yazılımlarını oluşturan ikinci kategori ise bilgisayar tabanlı yazılımlardır. Bilgisayar tabanlı yazılımlarda, güç kalitesi izleme sisteminden elde edilen verilerin depolanması ve çeşitli görsel ara yüzlerle kullanıcılara sunulması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bilgisayar tabanlı çalışan temel iki yazılım mevcuttur. Bunlar, güç kalitesi izleme otomasyonu ve güç kalitesi web uygulamasıdır. Bu uygulamalar, izleme merkezindeki bir sunucu bilgisayar üzerinde çalışmaktadır. Güç kalitesi izleme otomasyonu, kullanıcıların kendi şebeke bilgilerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmeleri ve geçmişe dönük olarak çeşitli raporlamaları alabilmelerine imkan tanıyan geniş ölçekli bir yazılımdır. Güç kalitesi otomasyonu, etkili grafik bileşenleri ile desteklenerek kullanıcılara büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu sayede, kullanıcılar kendi güç akışlarını hem sayısal hem de grafiksel olarak izleyebilirler.

Yeni nesil güç kalitesi izleme sistemlerinin yapı taşını oluşturan en önemli bileşen, sistemin uzaktan erişimli olmasıdır. Bu nedenle, İGKİS içerisinde geniş kapsamlı bir web uygulaması hazırlanmıştır. Güç kalitesi web uygulaması aracılığıyla, kullanıcılar kendi güç akışlarını internet bağlantısı olan herhangi bir bilgisayar veya mobil bir platform üzerinden takip edebilmektedir. Aynı zamanda, güç kalitesi web uygulaması üzerinden bağlantı noktalarına ait güç kalitesi verileri geçmişe dönük sorgulanabilmektedir. Bu işlemler, güç kalitesi web uygulamasının sahip olduğu grafiksel ara yüzler ile oldukça kolaylaştırılmıştır.

Tez kapsamında hazırlanan İGKİS'in test işlemleri için, üç farklı ölçüm noktası belirlenmiştir. Bu ölçüm noktaları Tunceli Üniversitesi yerleşkesinde bulunan; Mühendislik Fakültesi, Meslek Yüksekokulu ve AR-GE Laboratuvarlarıdır. İzleme sistemi bu bölgelere kurularak her bir ölçüm noktası için belirlenen sürelerde kesintisiz güç kalitesi verileri elde edilmiştir. Ölçüm noktalarından elde edilen güç kalitesi verileri, gerçek zamanlı olarak Tunceli Üniversitesi Elektrik-Elektronik Laboratuvarına kurulan bir izleme merkezine aktarılmıştır. Ölçüm süresince elde edilen güç kalitesi verileri değerlendirildiğinde:

1. Her üç ölçüm noktasının gerilim etkin değerinde, aşırı saptmaların olmadığı ve bu değerlerin yönetmeliklerde belirtilen aralıklarda kaldığı görülmüştür.
2. Şebeke frekansı açısından değerlendirildiğinde, ölçüm noktalarındaki frekansın standartların dışına çıkmadığı belirlenmiştir.

3. Ölçüm noktalarının akım etkin değerlerine bakıldığında, Meslek Yüksekokulu ve AR-GE Laboratuvarlarında fazların dengesiz yüklendiği tespit edilmiştir.
4. Akım ve gerilim harmoniklerinde standartların üstüne çıkılmadığı, fakat çalışma saatlerinde bazı harmonik bileşenlerin yükseldiği belirlenmiştir.
5. Ölçüm noktalarındaki güç kalitesi bozulma parametreleri incelendiğinde ise en fazla gerilim çökme olayının meydana geldiği gözlemlenmiştir.
6. Güç faktörü incelendiğinde, özellikle bazı ölçüm noktalarında bu değer in standartların oldukça dışına çıktığı tespit edilmiştir. Genellikle mesai saatleri dışında yaşanan bu sapmaların nedenleri, binaların UPS sistemleri ile beslenmesi ve UPS'lerden kaynaklanan bileşenler olduğu düşünülmektedir.

İGKİS'in saha uygulamaları sonucunda elde edilen veriler, tez kapsamında hazırlanan izleme sistemin uygulanabilirliği ve kullanışlılığı noktasında oldukça başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu tez çalışması sonucunda ortaya çıkan İGKİS'e ait üstünlükler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Bünyesindeki yenilikçi yaklaşımlarla, geleneksel güç kalitesi izleme sistemleri arasında ön plana çıkmaktadır.
- Özgün tasarımların getirmiş olduğu avantajlarla, sürekli güncellenebilir bir yapıya sahiptir.
- İzleme sistemi, yapısında barındırdığı FPGA teknolojisi ile bilgisayardan bağımsız gömülü bir sistem olarak çalışabilmektedir.
- Gömülü sistem şeklinde tasarlandığı için, seri üretime elverişlidir.
- Yeni nesil izleme sistemlerinden beklenen uzak erişim teknolojilerini sağlamaktadır ve internet üzerinden erişilebilir bir yapıdadır.
- Birden fazla ölçüm noktasına yerleştirilen güç kalitesi sistemlerine ait veriler, tek bir merkezden kontrol edebilmektedir.
- Tasarlanan izleme yazılımlarının kullanımındaki kolaylıklarla, kullanıcılara büyük avantajlar sağlanmaktadır.
- Kullanıcılar, kendi ölçüm noktalarındaki güç kalitesi verilerini standartlara uygun raporlayabilirler.
- Geniş ölçekli veritabanı yapısı ile güç kalitesi verileri sürekli bir şekilde kayıt altına alınabilmektedir.
- Sahip olduğu gömülü sistem yapısı ve haberleşme teknolojileri ile akıllı şebekeler alanında kullanılabilir bir yapıdadır.

7. ÖNERİLER

Bu tezde, güç kalitesi verilerinin izlenmesi için geniş kapsamlı bir izleme sistemi oluşturulmuştur. Bu izleme sistemi içerisinde hem donanımsal hem de yazılımsal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen donanım ve yazılımlar, güç kalitesi izleme sistemleri için yapılacak olan çalışmalara önemli katkılar sağlayacaktır.

Gerçekleştirilen güç kalitesi izleme sistemi ile günümüzde gittikçe önem kazanan güç kalitesi alanında, bireysel kullanıcılardan endüstriyel tüketicilere kadar birçok kullanıcı rahatlıkla kullandığı elektrik enerji sisteminin güç kalitesi parametrelerini elde edebilir. Böylece kullanıcılar, kendi sistemlerinde kullandıkları enerjinin standartlara uyumlu olup olmadığını gözlemleyebilirler.

Güç kalitesi alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle simülasyon ortamından elde edilen verilerin kullanıldığı görülmektedir. İGKİS sistemi ile elde edilen güç kalitesi verilerinin kullanımı ile bu alanda gerçek veriler üzerine çalışmalar yürütülebilir. Ayrıca güç kalitesi ile ilgili yapılan çalışmalarda, teoride birçok akıllı yöntemin kullanıldığı fakat bu yöntemlerin uygulamada pek fazla yer bulamadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile izleme sistemleri için gerek FPGA tabanlı gerekse de bilgisayar ortamında gerçek zamanlı çalışan akıllı sistemler geliştirilebilir.

Güç sistemi üzerindeki problemlerin tespiti için öncelikli olan işlem, güç kalitesi verilerinin sürekli olarak izlenmesidir. Daha sonraki aşamada, bu problemlerin gerçek zamanlı olarak giderilmesidir. Güç kalitesi problemlerin giderilmesi için de çeşitli iyileştirme sistemleri geliştirilmektedir. İGKİS sistemi ile bu iyileştirme sistemlerinin entegrasyonu gerçekleştirilerek, ileriye dönük kapsamlı araştırmalar yapılabilir.

Akıllı şebekelerde, üretilecek olan enerjinin olabildiğince yüksek verimde kullanılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle akıllı şebekelerin, barındırdığı bütün bileşenleri izleyebilmesi ve olası hatalara otomatik olarak müdahale edebilmesi gerekir. Bu tezde gerçekleştirilen izleme sistemi, FPGA gibi sahip olduğu güncel donanım bileşenleri ile geleceğin akıllı şebekelerinde kullanılabilecek bir yapıdadır. Bu konuda çalışmalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **IEC 61000-4-30**, 2003, Electromagnetic Compability (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 30: Power quality measurement methods, *International Electrotechnical Commission*, Switzerland.
- [2] **Apay, F. T.**, 2008, Güç kalitesi parametrelerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Bollen, M.H.J., and Gu, I.Y.H.**, 2006, Signal processing of power quality disturbances, John Wiley & Sons, New York.
- [4] **Erişti, H.**, 2010, Güç kalitesi için dalgacık dönüşümü ve destek vektör makine tabanlı bir olay tanıma tekniğinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [5] **Won, D.J, Chung, I.I.Y., Kim, J.M, Moon, S.I.I., Se, J.C., Cho, J.W.**, 2002, Development of power quality monitoring system with central processing scheme, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, **18**, 915-919.
- [6] **Zooba, A.F., Canteli, M.M., Bansal, R.**, 2011, Power quality: monitoring, analysis and enchancement, Intech Open Access, Croatia.
- [7] **Qiu, B., and Gooi, H.B.**, 2000, Web-based SCADA display systems (WSDS) for access via internet, *IEEE Transactions on Power Systems*, **15(2)**, 681 – 686.
- [8] <http://www.guckalitesi.gen.tr>, Milli Güç Kalitesi Projesi. Eylül 2014.
- [9] **Atalık, T.**, 2007, İnternet üzerinden haberleşen güç kalitesi monitör cihazı donanım tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] **Küçük, D., İnan, T., Salor, Ö., Demirci, T., Akkaya, Y., Burhan, S., Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Altıntaş, E., Haliloğlu, B., Çadırcı, I., Ermiş, M.**, 2010, An extensible database architecture for nationwide power quality monitoring, *Electrical Power and Energy Systems*, **32**, 559-570.
- [11] **Aykut, H.K.**, 2008, Eskişehir kent merkezinde güç kalitesi olaylarının gerçek zamanda izlenmesi ve analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- [12] **Özalp, A.**, 2011, Kahramanmaraş Göksu edaş kök hücresinde güç kalitesinin gerçek zamanda izlenmesi ve analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [13] **Erişti, H., Demir, Y.**, 2011, Gerçek zamanlı güç kalitesi izleme sistemleri ile elektrik dağıtım sistemlerindeki güç kalitesinin incelenmesi, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim, Elazığ, 351-356.
- [14] www.enerjiizle.com, ENTBUS Enerji İzleme Sistemi.
- [15] **Tan, A., Şenses, M.O., Teke, A., Meral, M.E., Bayındır, K.Ç., Tümay, M.**, 2009, İnternet tabanlı elektrik enerjisi ve güç kalitesi izleme sistemi, 3. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, Mayıs 2009, 286-290.
- [16] **Ağalar, Ş.**, 2003, Alçak gerilim güç sistemlerinde enerji kalitesinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [17] **Bayhan, S.**, 2008, Enerji kalitesinin internet tabanlı ölçüm ve analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [18] **Gökozan, H.**, 2011, Endüstriyel tesislerde güç kalitesinin izlenmesi, analizi ve uygun harmonik filtre seçimi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [19] **Öztürk, S.D.**, 2010, Labview tabanlı gelişmiş güç kalitesi analizörü, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [20] **Vural, B.**, 2007, Elektrik enerji kalitesi ölçümleri için bir analizör prototipi geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Yörür, K.**, 2008, Elektrik iletim hatlarının güç kalitesi parametrelerinin yazılımla hesaplanması ve değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22] **Akın, S.**, 2009, Elektrik enerji kalitesi olayları için gömülü sistem uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [23] **Yıldırım, Ö., Erişti, B., Erişti, H., Ünal, S., Erol, Y., Demir, Y.**, 2015, FPGA Tabanlı Bir Güç Kalitesi İzleme Sistemi, *Sinyal İşleme ve İletişim Kurultayı-SİU2015*, 16-19 Mayıs, Malatya, 1194-1197.

- [24] **Yıldırım, Ö., Erişti, B., Erişti, H., ve Demir, Y.**, 2012, Gerçek zamanlı akım ve gerilim sinyallerinin izlenmesi için FPGA tabanlı bir sistem tasarımı, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO'12)*, Bursa, 2012, Bildiriler Kitabı, 654-658.
- [25] **Yıldırım, Ö., Erişti, H., Demir, Y.**, 2013, Güç kalitesi bozulmalarının gerçek zamanlı tespiti için FPGA tabanlı bir sistem, *15. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı(TOK2013)*, Malatya.
- [26] **Erişti, H., Yıldırım, Ö., Erişti, B., ve Demir, Y.**, 2012, Dalgacık dönüşümü ve birliktelik kuralları kullanarak güç kalitesi olaylarının sınıflandırılması, *20. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, 18–20 Nisan 2012, Fethiye/MUĞLA.
- [27] **Gunther, E.W., Mehta, H.**, 1995, A survey of distribution power system power quality preliminary results, *IEEE Transaction on Power Delivery*, **10(1)**, 322-329.
- [28] **Melhorn, C. J., Maitra, A., Sunderman, W., Wacławski, M., Sundaram, A.**, 2005, Distribution system power quality assessment phase-II: voltage sag and interruption analysis, *Copyright IEEE*, PCIC- 2005-13.
- [29] **McNulty, B.H.S.**, 2002, Power quality problems and renewable energy solutions, analysis of the prospects for renewable PQ solutions in massachusetts, *Massachusetts Renewable Energy Trust*, USA.
- [30] **Hughes, M.B., Chan, J.S.**, 1996, Canadian national power quality survey results, *IEEE Proceedings on Transmission and Distribution Conference*, 45-51.
- [31] **Divan, D., Luckjiff, G., Brumsickle, W.**, 2002, I-Grid™: Infrastructure for nationwide real-time power monitoring, *IEEE 37th IAS Annual Meeting*, **3**, October 2002, 1740-1745.
- [32] **Gonzales de la Rosa, J.J, Munoz, A.M, Gil de Castro, A., Lopez, V.P, Castillejo, J.A.S.**, 2010, A web-based distributed measurement system for electrical power quality assessment, *Measurement*, **43**, 771-780.
- [33] **Monteiro, M.E., Moura, E.S., Drago, A.B., Bonino, L.O., Pereiraf, J.G., Amaral, P.F.S., Simonetti, D.S.L., Rosa, P.F., Bazelatto, G.D.**, 2003, An internet-based power quality monitoring system, *ISIE'03*, 9-11 June, 333-336.
- [34] **Leou, R. C., Tsai, W. R., Chang, Y.N.**, 2004, A power quality monitoring system based on J2EE architecture, *TENCON 2004*, 21-24 Nov., **3**, 291-294.

- [35] **Adam, I., Mohammed, A., Sansui, H.**, 2011, Embedded web-based power quality data logger, *Journal of Engineering Technology*, **1**, 58-62.
- [36] **Chen, Y.H., Cheng, J.C., Hwang, L.C., Teng, J.H., Cheng, S.Y.**, 2005, Embedded web server based power quality recorder, *TENCON 2005*, 21-24 Nov., 1-6.
- [37] **Zhang, M., Li, K.**, 2009, A power quality monitoring system over the internet, *International Conference on Information Science and Engineering*, 1577-1580.
- [38] **Monteiro, M. E., Moura, E. S., Drago, A. B., Bonino, L. O., Pereiraf, J. G., Amaral, P.F.S., Simonetti, D.S.L., Rosa, P.F., Bazelatto, G.D.**, 2003, An internet-based power quality monitoring system, *ISIE'03*, 9-11 June, **1**, 333-336.
- [39] **Lee, R. P. K, Lai, L.L, Tse, N.**, 2002, A web-based multi-channel power quality monitoring system for a large network, *Fifth International Conference Power System Managment and Control*, 17-19 April, 112-117.
- [40] **Xu, W., Xu, G., Xi, Z., Zhang, C.**, 2012, Distributed power quality monitoring system based on ethercat, *China International Conference on Electricity Distribution*, 5-6 Sept, Shanghai.
- [41] **Zhang, M., Li, K., Yisheng, H.**, 2011, Dsp-fpga based real-time power quality disturbances classifier, *Metrology and Measurement Systems*, **17(2)**, 205-216.
- [42] **Femine, A.D., Gallo, D., Landi, C., Luiso, M.**, 2009, Power quality monitoring instrument with fpga transducer compensation, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **58(9)**, 3149-3158.
- [43] **Zou, Z., Liu, Y., Zhao, F., Peng, M.**, 2009, Design and data processing of a real-time power quality monitoring instrument, *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Beijing, 16-19 Aug., 353-357.
- [44] **Gonzales de la Rosa, J.J, Munoz, A.M.**, 2010, A web-based distributed measurement system for electrical power quality monitoring, *Sensors Applications Symposium(SAS)*, 206-211.

- [45] **Becirovic, V., Nikolic, B., Turkovic, I., Pavic, I.,** 2012, Development of measurement system for analyzing the power quality, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Sorrento, 20-22 June, 1283-1289.
- [46] **Chan, S.Y., Teng, J.H., Chen, C.Y., Chang, D.,** 2010, Multi-functional power quality monitoring and report-back system, *Electrical Power and Energy Systems*, **32**, 728-735.
- [47] **Erişti, B., Yıldırım, Ö., Erişti, H., Demir, Y.,** 2013, An FPGA-based system for real-time monitoring of voltage harmonics, *19th IMEKO Symposium Measurements of Electrical Quantities*, 18-19 July Barcelona, Spain.
- [48] **Erişti, H., Yıldırım, Ö., Erişti, B., and Demir, Y.,** 2013, Optimal feature selection for classification of the power quality events using wavelet transform and least squares support vector machines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **49**, 95-103.
- [49] **Erişti, H., Yıldırım, Ö., Erişti, B., and Demir, Y.,** 2014, Automatic recognition system of underlying causes of power quality disturbances based on s-transform and extreme learning machine, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **61**, 553-562.
- [50] **Erişti, H., Tümen, V., Yıldırım, Ö., Erişti, B., Demir, Y.,** 2015, Automatic classification of harmonic data using k-means and least square support vector machine, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, DOI: 10.3906/elk-1303-13.
- [51] **Fuchs, E.F., Masoum, M.A.S.,** 2008, Power quality in power systems and electrical machines, Academic Press.
- [52] **Sankaran, C.,** 2002, Power quality, CRC Press.
- [53] **Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W.,** 2004, Electrical power systems quality, McGraw-Hill.
- [54] **Eberhard, A.,** 2011, Power quality, InTech, Rijeka, Croatia.
- [55] **Keulenaer, H. De.,** 2003, The hidden cost of poor power quality, *Leonardo Energy*, European Copper Institute, October 2003. Available: www.leonardo-energy.org

- [56] **Manson, J., Targosz, R.**, 2008, European power quality survey report, Leonardo Energy, November 2008, www.leonardo-energy.org.
- [57] **Lineweber, D., McNulty, S.R.**, 2001, The cost of power disturbances to industrial & digital economy companies, *EPRI IntelliGrid Initiative (A Primer report from EPRI & CEIDS)*, June 2001, Available: www.epri.com/ceids.
- [58] **Targosz, R., Manson, J.**, 2007, PAN European LPQI power quality survey, *Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution*, May 2007, Vienna.
- [59] **Putrus, G., Wijayakulasooriya, J., Minns, P.**, 2007, Power quality: overview and monitoring, *Second International Conference on Industrial and Information Systems*, 8-11 August, 551-558.
- [60] **IEEE Standard 519**: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE-519, 1992. Standard power systems, IEEE-519 (1992).
- [61] **Demirbaş, Ş., Bayhan, S.**, 2009, Güç sistemlerinde harmoniklerin gerçek zamanlı ölçüm ve analizi, *Gazi Üniv. Müh.Mim.Fak.Der.*, **24(3)**, 461-468.
- [62] **Şenyurt, Ö.**, 2006, Elektrik tesislerinde hızlı fourier dönüşümü ile harmonik analizinin yapılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [63] Resmi Gazete, Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik, **26287**, 12/09/2006.
- [64] **IEEE Standart 519-1992**: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.
- [65] **IEEE Standart 1366-2003**: IEEE guide for electric power distribution reliability indices. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2004.
- [66] **IEEE Standart 1346-1998**: Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment.
- [67] **IEEE Standart 1100-2005**: IEEE recommended practice for powering and grounding electronic equipment. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

- [68] **IEEE Standart 1159-1995:** IEEE recommended practice for monitoring electric power quality.
- [69] **EN 50160:2000,** Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
- [70] **Markiewicz, H., Klajn, A.,** 2004, Voltage disturbances standard EN 50160 - voltage characteristics in public distribution systems, Leonardo Power Quality Initiative (LPQI).
- [71] **Sarıkayalar, O.,** 2013, Enerji kalitesinde IEC61000-4-30 class A ve EN50160 yeterli mi, *SGE Mühendislik Teknik Yayın*, Ref=SGE19092013.
- [72] **TEDAŞ,** 2007, Trafo Merkezleri OG-AG Güç kalitesi ölçüm teknik şartnamesi, Ekim 2007.
- [73] **Ünlüsoy, B.,** 2013, Enerji kalitesi, TS EN 50160 standardı ve ülkemizdeki uygulamaları, III.Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, İzmir, 21-24 Kasım.
- [74] **Günaydın, S.,** 2008, Enerji kalitesi ile ilgili ülkemizdeki bazı standartlar, yönetmelikler, şartnameler, Alternatif Yayın Grubu ST Elektrik-Enerji Dergisi, İstanbul.
- [75] **Atmel AVR1631:** Single Phase Energy Meter using XMEGA A application notes, 42039a-AVR-11/2012.
- [76] **Noergaard, T.,** 2005, Embedded systems architecture: a comprehensive guide for engineers and programmers, Newnes.
- [77] **Wolf, W.,** 2008, Computers as components: principles of embedded computing system design, Morgan Kaufman, United States of America.
- [78] **Kamal, R.,** 2008, Embedded systems: architecture, programming and design, McGraw-Hill, New Delhi.
- [79] **Matur, S.,** 2011, Microprocessor 8086: architecture, programming and interfacing, PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- [80] **Shibu, K.V.,** 2009, Introduction to embedded systems, McGraw-Hill, NewDelhi.
- [81] **Brain, M.,** 2001, Marshall Brain's how stuff works, John Wiley & Sons.

- [82] **Şahin, H., Dayanık, A., Altınbaşak, C.**, 2006, Pic programlama teknikleri ve pic16f877a, Altaş Yayıncılık, Ankara.
- [83] **Chassaing, R., Horning, D.W.**, 1990, Digital signal processing with the TMS320C25, John Wiley & Sons, USA,
- [84] <http://www.futureelectronics.com/en/microprocessors/digital-signal-processors.aspx>, Digital signal processor, Eylül 2014.
- [85] **Angoletta, M.E.**, 2008, Digital signal processor fundamentals and system design, CERN, Geneva, Switzerland.
- [86] **Rameshlal, D.V., Kumar, N.**, 2010, Embedded dsp processor design using cware processor designer and magma layout tool, *BSC thesis*, National Institute of Technology, Rourkela.
- [87] [http://www.mepits.com/tutorial/169/Programmable - Devices / Application - Specific-Integrated-Circuit](http://www.mepits.com/tutorial/169/Programmable%20Devices/Application%20Specific%20Integrated%20Circuit), Application specific integrated circuit, Eylül 2010.
- [88] **Sarıtaş, E., Karataş, S.**, 2013, “Her yönüyle FPGA ve VHDL, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [89] **Maxfield, C.**, 2004, The design warrior’s guide to FPGAs, Newnes, Burlington.
- [90] **Zeidman, B.**, 2001, Introduction to CPLD and FPGA design, www.Chalknet.Com.
- [91] **Smith, G. R.**, 2010, FPGAs 101: everything you need to know to get started, Newnes , ISBN: 978-1-85617-706-1 D/L.
- [92] **Chu, P.P.**, 2008, FPGA prototyping by VHDL examples: xilinx spartan-3 version, Wiley-Interscience, ISBN: 0470185317.
- [93] **Kuon, I., Tessier, R., ve Rose, J.**, 2007, FPGA architecture: survey and challenges, *Foundations and Trends in Electronic Design Automation*, 2(2), 135-253.
- [94] **Pedroni, V. A.**, 2004, Circuit design with VHDL, The Massachusetts Institute of Technology Press, ISBN 0-262-16224-5.
- [95] **Lee, W.**, 2000, VHDL coding and logic synthesis with synopsys, Academic Press, London, UK.
- [96] **Digilent, Inc.**, 2003, Xilinx ise/webpack: introduction to schematic capture and simulation, Digilent.

- [97] **TS EN 61000-4-7**, 2005, Elektromanyetik Uyumluluk(EMU)- Bölüm 4-7: Deneyler ve ölçme teknikleri- güç kaynağı sistemlerinde ve bunlara bağlı cihazlardaki harmonik ve ara harmoniklerin ölçmeleri ve ölçme cihazı için genel kılavuz, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 2005.
- [98] **Chi-Jui, W., Wei-Nan, C.**, 1997, Developing a harmonics education facility in a power system simulator for power engineering education, *IEEE Transactions on Power Systems*, **12**(1), 22-29.
- [99] **Lin, H.**, 2006, An internet-based graphical programming tool for teaching power system harmonic measurement, *IEEE Transactions on Education*, **49**(3), 404-414.
- [100] **Xilinx**, 2011, LogicCore IP Fast Fourier transform v7.1, Product Specification, DS260.
- [101] **Xilinx**, 2011, LogiCore IP tri-mode ethernet mac v4.5, Product Specification, DS297.
- [102] **Alachiotis, N., Berger, S.A., Stamatakis, A.**, 2010, Efficient PC-FPGA communication over gigabit ethernet, *The Exelixis Lab*, Exelixis-RRDR-2010-4, TU Munich.

ÖZGEÇMİŞ

Özal YILDIRIM

Tunceli Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

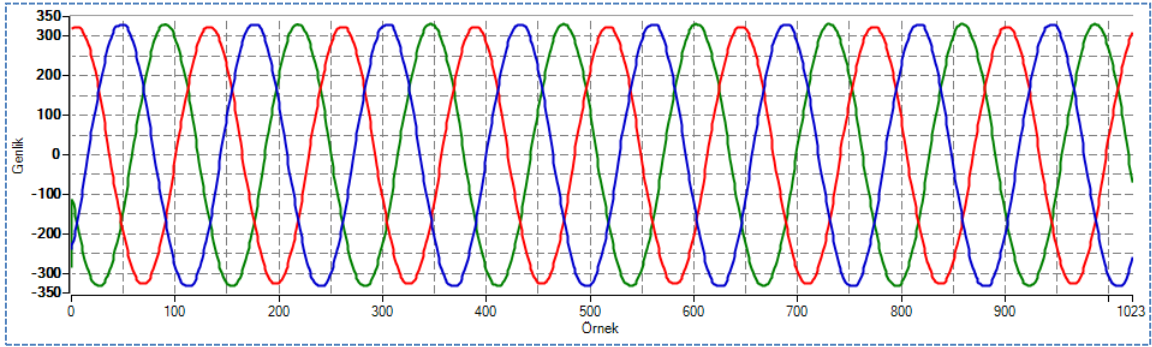
E-Posta: yildirimoza1@hotmail.com

- 1983** Tunceli/Çemişgezek'te doğdu
- 1999–2001** Elazığ Atatürk Lisesini tamamladı
- 2002–2006** Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümünden mezun oldu.
- 2006–2007** Muğla/Bodrum Gündoğın Fahriye Ilıcak A.M.L ve E.M.L de sözleşmeli bilgisayar öğretmeni olarak görev yaptı.
- 2007–2009** Hakkari Anadolu Meslek ve Ticaret Meslek Lisesinde kadrolu bilgisayar öğretmeni olarak görev yaptı. Aynı zamanda Hakkari MYO da bilgisayar programcılığı bölümünde çeşitli dersler verdi.
- 2008-2010** Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Yazılım A.B.D'da Yüksek Lisans eğitimini tamamladı.
- 2010-** Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Devreler ve Sistemler A.B.D.'da Doktora Eğitimine başladı ve halen devam etmektedir.
- 2009-2014** Tunceli Üniversitesi Tunceli Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığı Programında öğretim görevlisi kadrosunda çalıştı.
- 2014-** Tunceli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

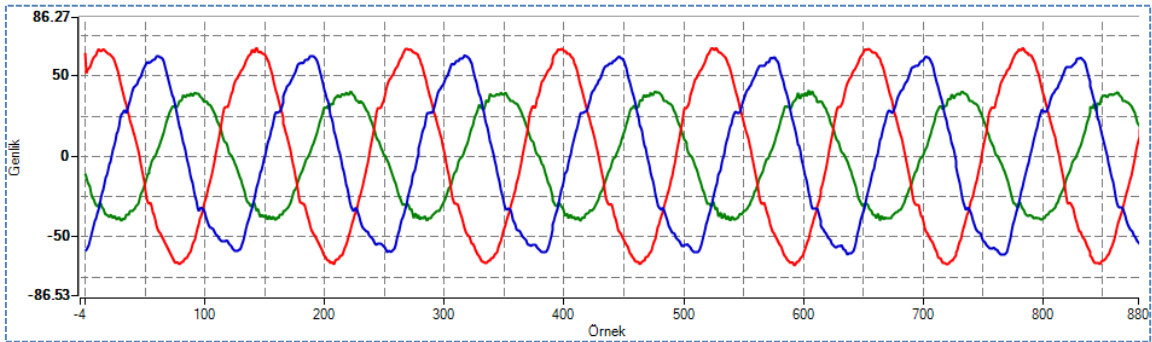
EKLER

A FAZI PARAMETRELERİ	B FAZI PARAMETRELERİ	C FAZI PARAMETRELERİ
Gerilim: 230.6510 V Akım: 38.10758 A Görünür Güç(S): 8789.554 VA Aktif Güç(P): 8191.967 W Reaktif Güç(Q): 3185.583 VAR THD (V): 2.098514 % THD (I): 8.012751 % Güç Açısı(Cos): 0.932011 Q Frekans (f): 50.00542 Hz	Gerilim: 227.1596 V Akım: 39.36216 A Görünür Güç(S): 8959.791 VA Aktif Güç(P): 8014.203 W Reaktif Güç(Q): 3989.928 VAR THD (V): 2.754673 % THD (I): 9.681279 % Güç Açısı(Cos): 0.895571 Q Frekans (f): 50.00542 Hz	Gerilim: 230.8384 V Akım: 45.86503 A Görünür Güç(S): 10588.82 VA Aktif Güç(P): 9765.737 W Reaktif Güç(Q): 4092.338 VAR THD (V): 2.222237 % THD (I): 9.666553 % Güç Açısı(Cos): 0.923081 Q Frekans (f): 50.00542 Hz

Ek Şekil 1.1. Ölçüm noktalarından herhangi bir anda elde edilen şebeke parametreleri.

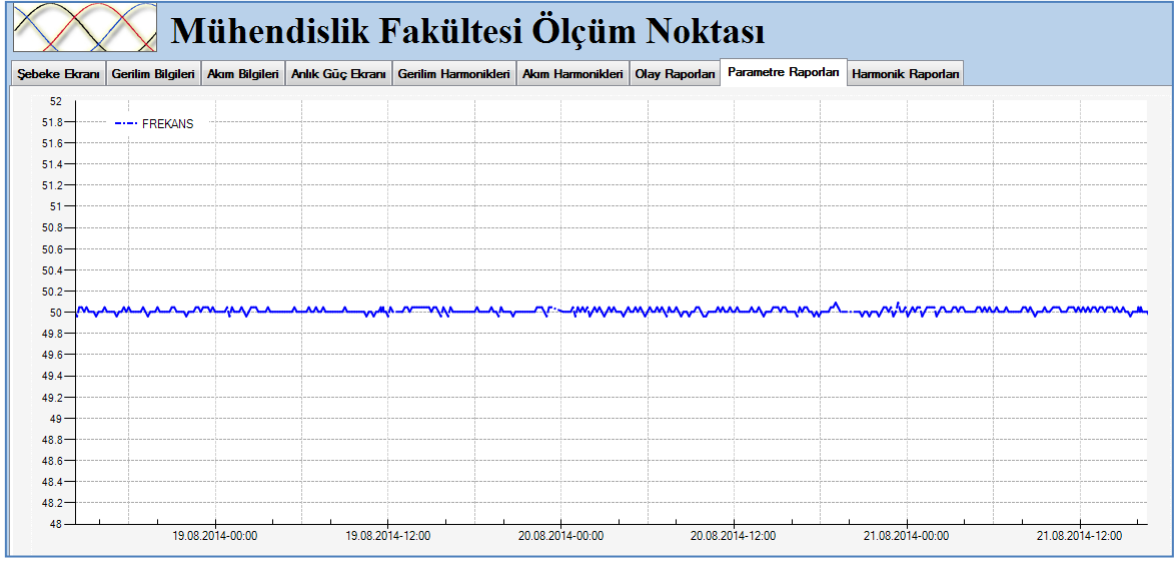


(a)

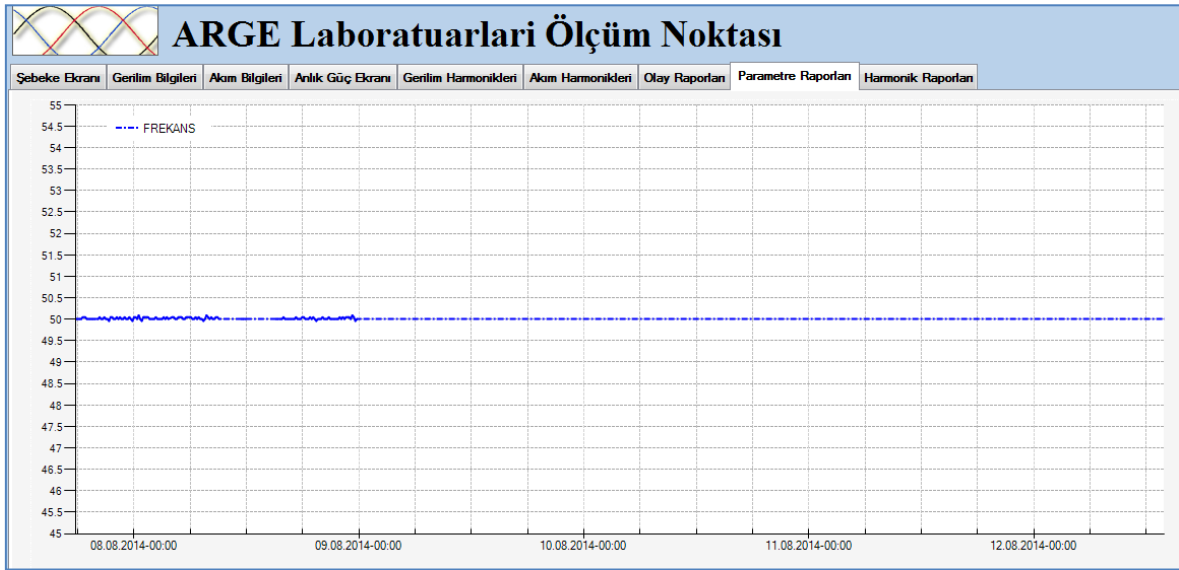


(b)

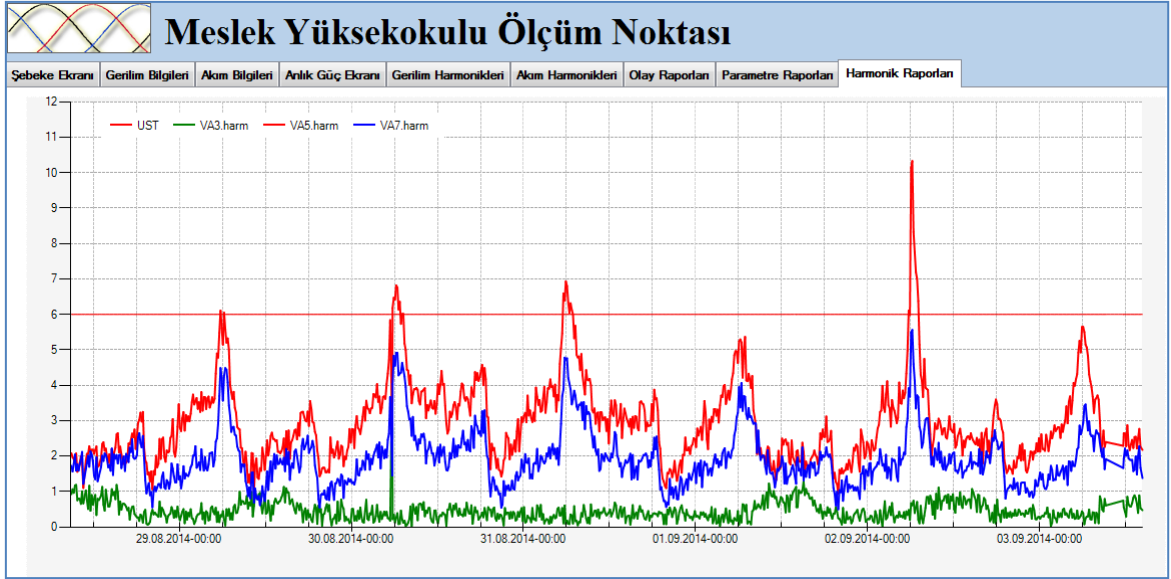
Ek Şekil 1.2. Ölçüm noktalarındaki akım ve gerilim dalga şekline örnek. a) Gerilim dalga şekilleri b) Akım dalga şekilleri.



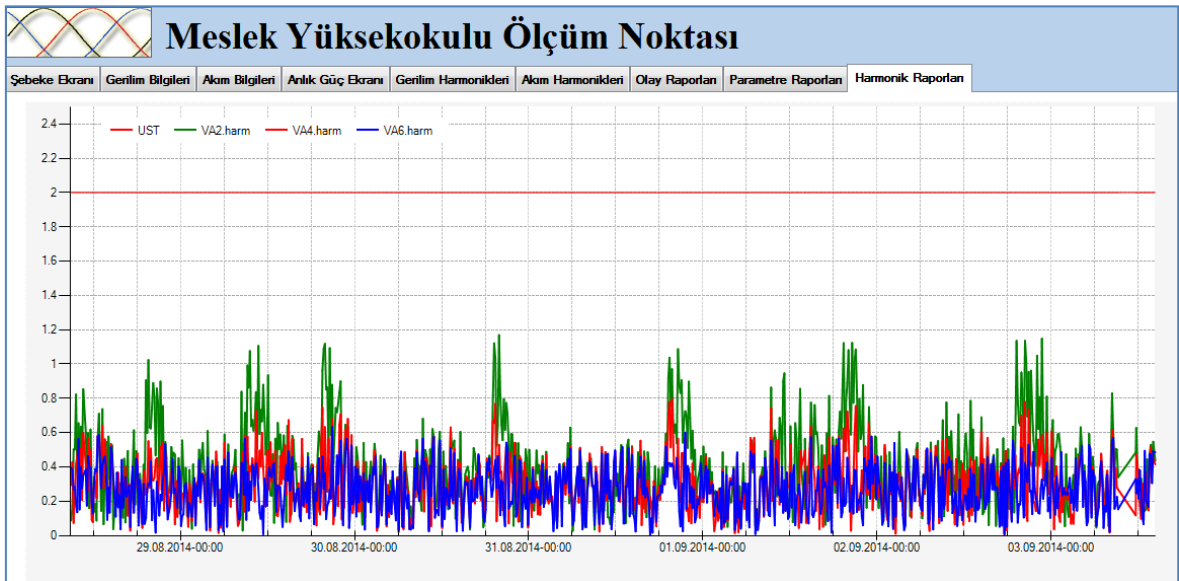
Ek Şekil 1.3. Mühendislik Fakültesi ölçüm noktasına ait frekans değişim grafiği.



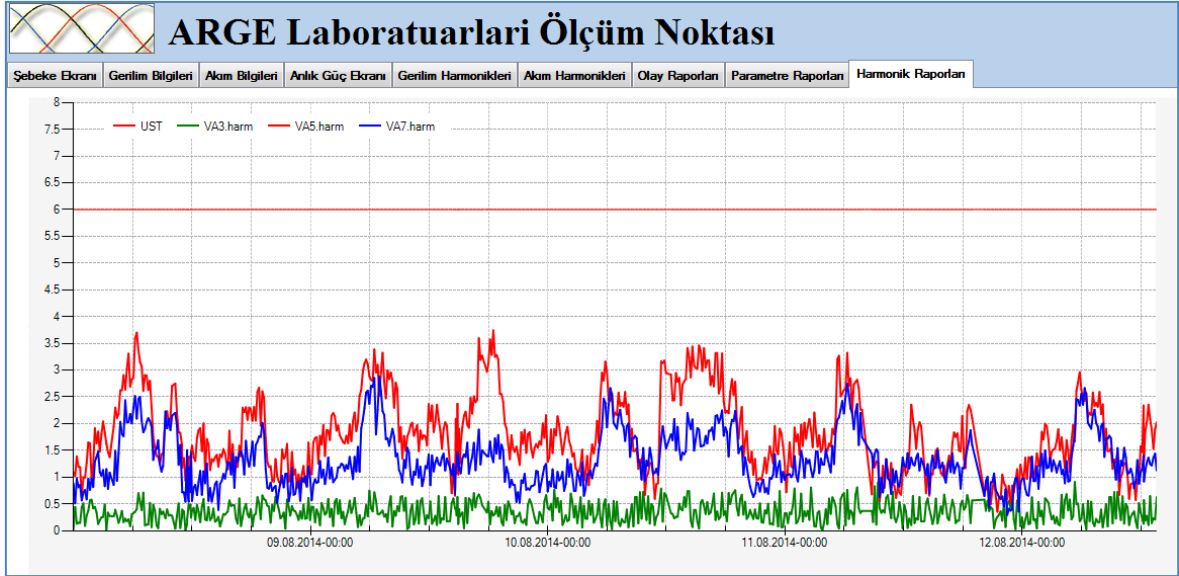
Ek Şekil 1.4. AR-GE Laboratuvarlarına ait elde edilen frekans ölçümlerinin değişim grafiği verilmiştir.



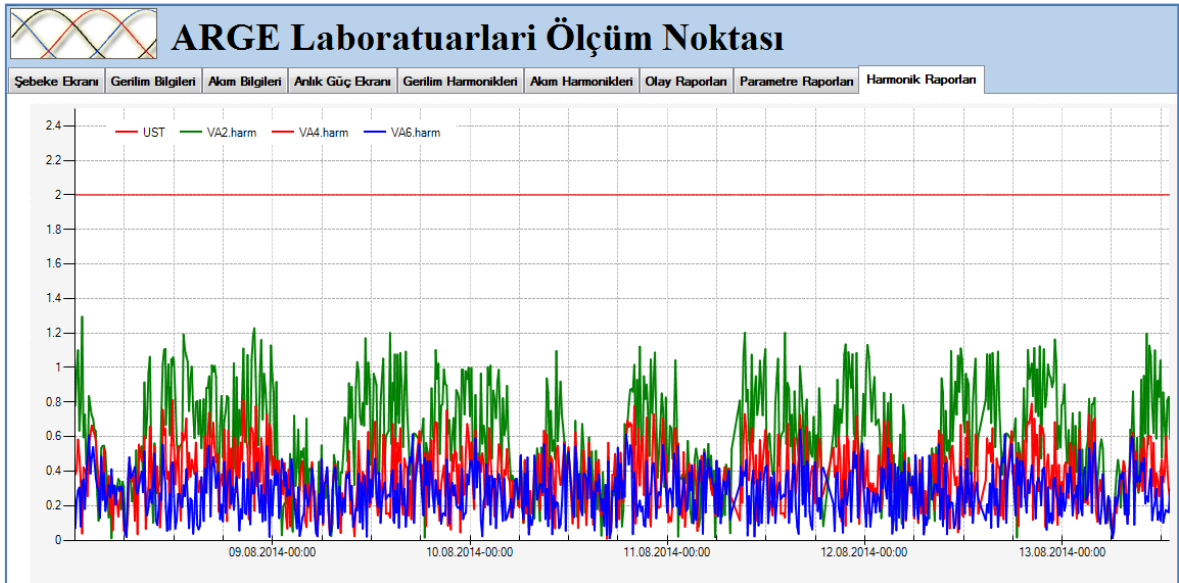
Ek Şekil 1.5. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5. ve 7. gerilim harmonik değerlerin 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasındaki değişimleri.



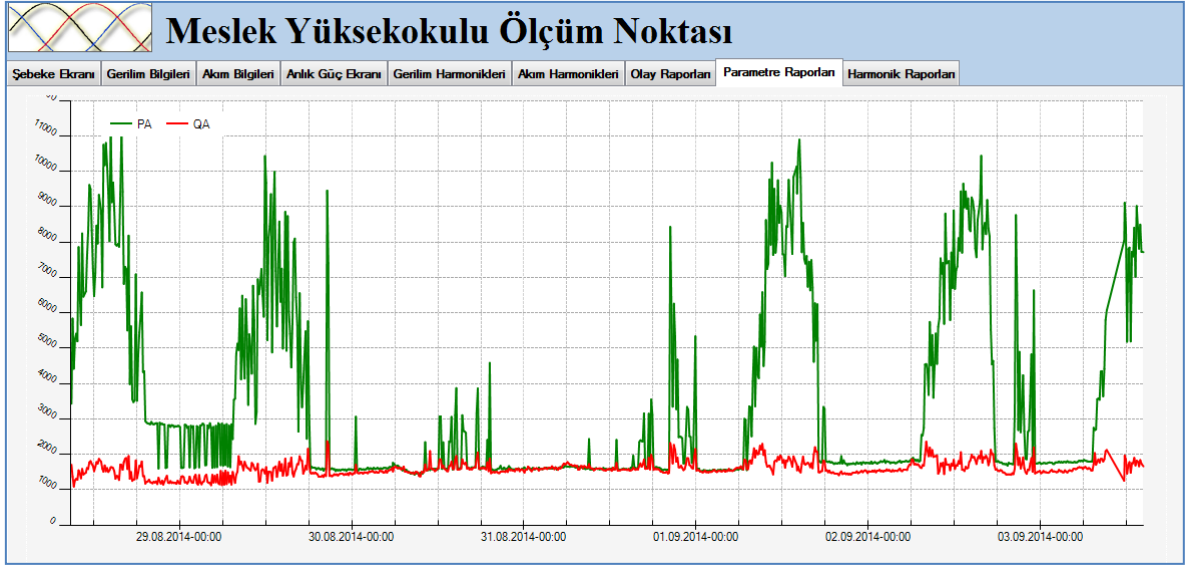
Ek Şekil 1.6. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. gerilim harmonik değerlerin 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasındaki değişimleri.



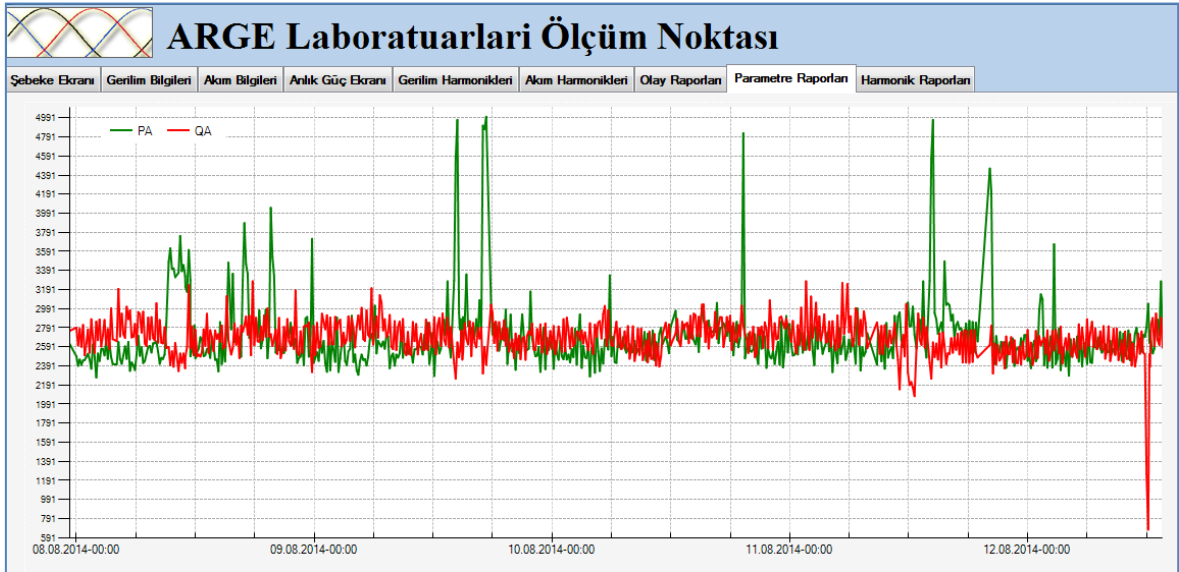
Ek Şekil 1.7. AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasının A fazına ait 3., 5. ve 7. gerilim harmonik değerlerin 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasındaki değişimleri.



Ek Şekil 1.8. AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasının A fazına ait 2., 4. ve 6. gerilim harmonik değerlerin 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasındaki değişimleri.



Ek Şekil 1.9. Meslek Yüksekokulu ölçüm noktasına ait 28.08.2014-03.09.2014 tarihleri arasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri.



Ek Şekil 1.10. AR-GE Laboratuvarları ölçüm noktasına ait 08.08.2014-13.08.2014 tarihleri arasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri.