

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLERİN  
MEVCUT ELEKTRİK ŞEBEKESİ İLE ENTEGRASYONU  
VE GÜÇ SİSTEMİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper YILMAZ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**HAZİRAN 2018**



**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLERİN  
MEVCUT ELEKTRİK ŞEBEKESİ İLE ENTEGRASYONU  
VE GÜÇ SİSTEMİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper YILMAZ  
(172082302)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökay BAYRAK**

**HAZİRAN 2018**

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172082302 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alper YILMAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Mevcut Elektrik Şebekesi ile Entegrasyonu ve Güç Sistemine Etkileri” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Gökay BAYRAK** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Nurettin ACIR** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Engin Cemal MENGÜÇ** .....  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

**Savunma Tarihi :** 11.06.2018

**FBE Müdürü :** **Doç. Dr. Murat ERTAŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Alper YILMAZ

İmzası :

X



*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen, tez konusunun belirlenmesi ve yazım süreci başta olmak üzere tezin her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gökay BAYRAK' a teşekkür ederim.

Desteklerini esirgemeyen bölüm hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma, doğduğum andan itibaren tüm imkânları benim için seferber eden ve manevi destekleriyle hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma, Bursa Teknik Üniversitesi tarafından Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 172L25 proje numarasıyla desteklenmiştir.

Haziran 2018

Alper YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
KISALTMALAR .....	viii
SEMBOLLER .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY .....	xv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	3
1.1.1 Tezin özgün değeri.....	4
1.2 Literatür Araştırması .....	5
1.2.1 PV sistemlerde güç kalitesi olaylarının incelenmesinde temel yöntemler..	5
1.2.2 PV sistemlerde akıllı yöntemlerle güç kalitesi olaylarının incelenmesi .....	6
<b>2.ŞEBEKE BAĞLANTILI PV SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ OLAYLARI</b> .....	<b>13</b>
2.1 PV Sistemlerde Güç kalitesi Olaylarının Tanımları ve İlgili Standartlar.....	13
2.1.1 Ada mod çalışma.....	13
2.1.2 Gerilim dalgalanması .....	14
2.1.3 Uzun ve kısa süreli gerilim bozulmaları .....	14
2.1.4 Gerilim dengesizliği.....	16
2.1.5 Harmonikler .....	16
2.1.6 Kırpışma (Flicker).....	18
2.1.7 Çentik (Notch).....	19
2.1.8 Geçici durum olayları (Transients) .....	20
2.1.9 Frekans değişimi .....	20
2.1.10 Doğru akım enjeksiyonu .....	21
2.1.11 Gürültü .....	21
2.2 Şebeke Bağlantılı PV Sistemlerde Güç Kalitesi Olaylarının Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi ve Analizi .....	21
2.2.1 Şebeke bağlantılı PV sistemin modellenmesi .....	21
2.2.2 Gerçekleştirilen güç dağıtım sistemi modeli.....	25
<b>3.DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE GÜÇ KALİTESİ OLAYLARININ TESPİTİ .....</b>	<b>31</b>
3.1 Fourier Dönüşümü Temelli Yöntemler .....	31
3.2 Dalgacık Dönüşümü Yöntemi .....	33
3.2.1 Sürekli dalgacık dönüşümü .....	36
3.2.2 Ayırık dalgacık dönüşümü .....	39
3.2.2.1 Çok çözünürlüklü analiz (Multi resolution analysis (MRA)) .....	40
3.2.3 Dalgacık paket dönüşümü .....	42

3.2.4 Örnek indirgenmemiş dalgacık dönüşümü .....	44
3.3 Güç Kalitesi Olaylarının Dalgacık Dönüşümü Yöntemi ile Analizi.....	47
<b>4. PV SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ OLAYLARININ DD İLE GERÇEK ZAMANLI OLARAK TESPİTİ .....</b>	<b>54</b>
4.1 PV Sistem-Şebeke Bağlantısında Elektriksel Parametrelerin Elde Edilmesi... 55	55
4.2 Labview Programı ve Elektriksel Verilerin Toplanması.....	56
4.3 Elektriksel Verilerin Labview ile Gözlemlenmesi ve Kaydedilmesi .....	57
4.4 Geliştirilen Programın Uzaktan İzlenmesi .....	58
4.5 Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi Olaylarının KSFD Kullanarak Tespiti.....	59
4.5.1 Nominal gerilim işaretinin analizi.....	60
4.5.2 Ani frekans değişimlerinin tespiti .....	61
4.5.3 Alt ve üst gerilim arızasının tespiti .....	62
4.6 Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi Olaylarının ÖİDD Kullanarak Tespiti.....	64
4.6.1 Nominal gerilim sinyalinin analizi.....	66
4.6.2 Gerilim çukuru olayının tespiti .....	66
4.6.3 Gerilim sıçraması olayının tespiti .....	66
4.6.4 Gerilim kesintisi olayının tespiti .....	70
4.6.5 Frekans değişimi olayının tespiti .....	70
4.6.6 Geçici durum olayının tespiti .....	70
4.6.7 Gürültü içeren geçici durum olayının analizi.....	75
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>77</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>80</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>85</b>

## KISALTMALAR

<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>ADD</b>	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
<b>DD</b>	: Dalgacık Dönüşümü
<b>DPD</b>	: Dalgacık Paket Dönüşümü
<b>DVM</b>	: Destek Vektör Makineleri
<b>dbN</b>	: Daubechies Dalgacığı
<b>EN</b>	: European Norm
<b>FD</b>	: Fourier Dönüşümü
<b>GKMP</b>	: Güç Kalitesi Milli Projesi
<b>HADD</b>	: Hızlı Ayrık Dalgacık Dönüşümü
<b>HFD</b>	: Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>IEC</b>	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
<b>IEEE</b>	: Elektrik-Elektronik Mühendisliği Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronic Engineering)
<b>KSFD</b>	: Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
<b>NMCPQ</b>	: Milli Güç İzleme Merkezi
<b>ÖİDD</b>	: Örnek İndirgenmemiş Dalgacık Dönüşümü
<b>PV</b>	: Fotovoltaik
<b>RMS</b>	: Karelerin Toplamının Karekökü
<b>SDD</b>	: Sürekli Dalgacık Dönüşümü
<b>Std.</b>	: Standart
<b>THB</b>	: Toplam Harmonik Bozulma
<b>TTB</b>	: Toplam Talep Bozulma
<b>URL</b>	: Standart Kaynak Kodu
<b>DAQ</b>	: Veri Toplama Kartı
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağı

## SEMBOLLER

<b>a</b>	: Dalgacık yaklaşım katsayısı
<b>A</b>	: İdealite faktörü
<b><math>A_N</math></b>	: Çentik alanı
<b>b</b>	: Öteleme miktarı
<b>d</b>	: Dalgacık detay katsayısı
<b><math>d_{jk}</math></b>	: Benzerlik indeksi
<b>f</b>	: Frekans
<b><math>F(\omega)</math></b>	: Fourier dönüşümü
<b><math>G_r</math></b>	: Referans radyasyon yoğunluğu
<b><math>I_{max}</math></b>	: Maksimum yük akımı
<b><math>I_h</math></b>	: Akım harmonik bileşeni
<b><math>I_{ph}</math></b>	: PV hücresi fotoakımı
<b><math>I_0</math></b>	: Güneş hücresi ters doyum akımı
<b>K</b>	: Boltzman sabiti
<b>L</b>	: Pencere uzunluğu
<b>M</b>	: Pencere genişliği
<b><math>N_{pc}</math></b>	: Paralel hücre sayısı
<b><math>N_{sc}</math></b>	: Seri hücre sayısı
<b><math>P_{LT}</math></b>	: Uzun dönem kırpışma yoğunluğu
<b><math>P_{ST}</math></b>	: Kısa dönem kırpışma yoğunluğu
<b><math>R_s</math></b>	: Temsili güneş hücresi çıkışı gerilim düşümü
<b><math>R_{sh}</math></b>	: Temsili sızıntı akımı
<b>s</b>	: Ölçekleme miktarı
<b>T</b>	: Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık
<b>q</b>	: Elektron yükü
<b><math>\psi</math></b>	: Dalgacık fonksiyonu
<b><math>\alpha</math></b>	: Akım sıcaklık katsayısı
<b><math>\beta</math></b>	: Gerilim sıcaklık katsayısı

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: IEEE 929-2008 tarafından belirlenen şebeke bağlantı esasları .....	14
Çizelge 2.2 : Gerilim dalgalanması için sınır değerleri .....	14
Çizelge 2.3: Gerilim bozulma sınır değerleri .....	17
Çizelge 2.4 : Akım için harmonik sınır değerleri .....	18
Çizelge 2.5 : Kırpışma sınır değerleri .....	19
Çizelge 2.6 : Gerilimde meydana gelen çentik sınır değerleri.....	19
Çizelge 2.7 : Frekans ortalama değer sınırları .....	20
Çizelge 2.8 : HR-200W-24V tipi güneş panelinin etiket parametreleri .....	24
Çizelge 4.1 : 5 seviyeli ÖİDD analizi için katsayı bileşenlerinin frekans aralıkları..	64

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1:</b> PV sistemlerde güç kalitesi olaylarının tespiti ve sınıflandırılması için kullanılan yöntemler .....	5
<b>Şekil 2.1 :</b> (a) Gerilim çökmesi, (b) gerilim sıçraması ve (c) gerilim kesintisi.....	15
<b>Şekil 2.2 :</b> Yüksek derecede harmonik içeren gerilim sinyali .....	16
<b>Şekil 2.3:</b> Kırpışma içeren bir gerilim dalga şekli .....	18
<b>Şekil 2.4 :</b> Geçici durum olayı içeren gerilim dalga şekli.....	20
<b>Şekil 2.5 :</b> 1.2 kWp güce sahip şebeke bağlantılı PV sistem modeli.....	22
<b>Şekil 2.6 :</b> Farklı ışınım değerleri için seçilen PV panele ait I-V ve P-V eğrileri .....	24
<b>Şekil 2.7 :</b> Farklı sıcaklık değerleri için seçilen PV panele ait I-V ve P-V eğrileri...	24
<b>Şekil 2.8 :</b> Geliştirilen güç dağıtım sistemi modeli.....	25
<b>Şekil 2.9 :</b> Üç faz kısa devre arızası sonucunda oluşan gerilimlerin etkin değerleri .	26
<b>Şekil 2.10 :</b> A-B faz-faz arızası sonucunda oluşan gerilimlerin etkin değerleri.....	27
<b>Şekil 2.11 :</b> Transformator enerjilendirilmesi sonucunda A, B ve C fazlarının anlık ve etkin değerlerindeki değişim .....	28
<b>Şekil 2.12 :</b> Transformator enerjilendirilmesi olayının harmonik analizi.....	28
<b>Şekil 2.13 :</b> Asenkron motorun devreye alınması sonucunda alçak gerilim barasındaki gerilim dalga şekilleri .....	29
<b>Şekil 2.14 :</b> Kapasitör bankının devreye alınması sonucunda alçak gerilim barasındaki üç faza ait gerilim dalga şekilleri.....	30
<b>Şekil 2.15 :</b> Lineer olmayan yük için, çentik oluşumu .....	30
<b>Şekil 3.1 :</b> Kısa süreli Fourier dönüşümü .....	32
<b>Şekil 3.2 :</b> Dalgacık dönüşümü yöntemi.....	33
<b>Şekil 3.3 :</b> Uygulamalarda sıkça kullanılan dalgacık fonksiyonları .....	35
<b>Şekil 3.4 :</b> Dalgacık zaman-frekans gösterimi .....	36
<b>Şekil 3.5 :</b> Geçici rejim olayının SDD ile analizi .....	38
<b>Şekil 3.6 :</b> Tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz filtreleme işlemi.....	40
<b>Şekil 3.7 :</b> Tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz filtreleme ve örnek indirgeme işlemi.....	41
<b>Şekil 3.8 :</b> Tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz için filtre çıkışları .....	41
<b>Şekil 3.9 :</b> Çok çözünürlüklü analiz ile katsayıların elde edilmesi.....	42
<b>Şekil 3.10 :</b> 3 seviyeli ayrıştırma ağaç diyagramı.....	43
<b>Şekil 3.11 :</b> Ara frekans sinyal ayrıştırma ağaç diyagramı .....	44
<b>Şekil 3.12 :</b> DD tabanlı gürültü arındırma için geliştirilen Labview program.....	45
<b>Şekil 3.13 :</b> DD tabanlı gürültü arındırma için yöntemlerin karşılaştırılması .....	45
<b>Şekil 3.14 :</b> Eğri uydurma ve ÖİDD yöntemlerinde tepe tespiti karşılaştırması .....	46
<b>Şekil 3.15 :</b> Gerilim çökmesi olayının ADD yöntemi ile analizi.....	48
<b>Şekil 3.16 :</b> Gerilim sıçraması olayının ADD yöntemi ile analizi.....	49
<b>Şekil 3.17 :</b> Gerilim kesintisi olayının ADD yöntemi ile analizi.....	50
<b>Şekil 3.18 :</b> Salınımlı geçici rejim olayının ADD yöntemi ile analizi.....	51
<b>Şekil 3.19 :</b> Harmonik içeren sinyalin ADD yöntemi ile analizi.....	52

<b>Şekil 3.20</b> : Sinyalde meydana gelen frekans değişiminin ADD yöntemi ile analizi	<b>53</b>
<b>Şekil 4.1</b> : Şebeke bağlantılı bir PV sistemin genel yapısı .....	<b>54</b>
<b>Şekil 4.2</b> : Elektriksel parametrelerin elde edilmesinde kullanılan elektronik ölçüm kartı .....	<b>56</b>
<b>Şekil 4.3</b> : Veri toplama kartı sinyal işleme prosedürü.....	<b>56</b>
<b>Şekil 4.4</b> : Gerilim dalga şeklinin gözlenebilmesi için yapılan DAQ bağlantısı .....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.5</b> : Elektriksel verilerin ölçümü için geliştirilen Labview programı .....	<b>58</b>
<b>Şekil 4.6</b> : Ağ sunucusu ayarlarının gerçekleştirilmesi .....	<b>58</b>
<b>Şekil 4.7</b> : Ağ sunucusu ayarlarının gerçekleştirilmesi .....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.8</b> : KSFD ile sinyal analizi yapılan programın ara yüzü .....	<b>60</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Nominal gerilim işaretinin KSFD ile analizi.....	<b>60</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Üst frekans sınır aşımının KSFD ile analizi .....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Alt frekans sınır aşımının KSFD ile analizi .....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Üst gerilim arızasının KSFD ile analizi .....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Alt gerilim arızasının KSFD ile analizi.....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Geliştirilen güç kalitesi olay tespit ve tanıma sistemi akış diyagramı ....	<b>65</b>
<b>Şekil 4.15</b> : Nominal gerilim sinyali ve ÖİDD analizi .....	<b>67</b>
<b>Şekil 4.16</b> : Gerilim çukuru olayı ve ÖİDD analizi .....	<b>68</b>
<b>Şekil 4.17</b> : Gerilim sıçraması olayı ve ÖİDD analizi .....	<b>69</b>
<b>Şekil 4.18</b> : Gerilim kesintisi olayı ve ÖİDD analizi.....	<b>71</b>
<b>Şekil 4.19</b> : Ani frekans yükselmesi olayı ve ÖİDD analizi.....	<b>72</b>
<b>Şekil 4.20</b> : Ani frekans düşüşü olayı ve ÖİDD analizi.....	<b>73</b>
<b>Şekil 4.21</b> : Geçici durum olayı ve ÖİDD analizi.....	<b>74</b>
<b>Şekil 4.22</b> : Gürültü içermeyen geçici durum olayı ve d1,d2 ve d3 katsayıları.....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.23</b> : Yüksek gürültü içeren geçici durum olayı ve d1,d2 ve d3 katsayıları ...	<b>76</b>

# ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLERİN MEVCUT ELEKTRİK ŞEBEKESİ İLE ENTEGRASYONU VE GÜÇ SİSTEMİNE ETKİLERİ

## ÖZET

Enerji talebinin artması, gelişen güç elektroniği teknolojisi ve çevre kirliliği problemleri gibi faktörler, yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin dünya çapında artmasına neden olmuştur. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut elektrik şebekesi ile uyumlu bir şekilde çalışması ve güç sisteminin kararlı ve dengeli bir şekilde çalışabilmesi açısından öncelikli bir konu haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, fotovoltaik (PV) temelli güç sistemleri ise özellikle güneş paneli üretim maliyetlerinin oldukça düşmesi ile günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

PV temelli dağıtık güç üretim sistemleri şebekeye bağlandığında, ulusal ve uluslararası standartlarca belirlenen bir takım elektriksel şartları sağlamalıdır. Türkiye’de şebekeye alçak gerilim seviyesinden bağlanacak tek fazlı PV sistemler ile üç fazlı ancak faz akımı 16 A’den küçük olan PV sistemler için TS EN 50438 standardı kullanılmaktadır.

Son yıllarda, güç sistemlerinde arıza ve güç kalitesi konuları üzerine yapılan çalışmalarda artış olsa da, hataların otomatik olarak tespit edildiği gerçek zamanlı sinyal işleme tabanlı çalışmalar sınırlı sayıdadır. Gerçekleştirilen çalışmaların çoğu bilgisayar üzerinden modelleme ve simülasyondan öteye geçememiş olup, sınırlı sayıda hata türünü tespit etmeye odaklanmıştır.

Günümüzde kullanılan güç kalitesi analizörleri, kısa ve uzun süreli gerilim değişimi olayı tespitinde etkin değer dönüşümünü kullanırken, sinyalin harmonik analizinde ise Hızlı Fourier Dönüşümü yöntemini kullanmaktadır. Ayrıca bu güç analizörleri geçici durum olayları vb. yüksek frekans içerikli ve kısa süreli güç kalitesi olaylarını yakalamada yetersiz kalmaktadır. Geleneksel yöntemler kolaylıkla uygulanabilir olmakla birlikte, eşik değerlerinin seçimindeki zorluklar, gürültülü ölçümler ve çalışma koşullarından kaynaklanan belirsiz durumlardan dolayı hatalı tespit ve algılama eğilimleri gösterirler. Ölçümlerde ve arıza tespitinde kullanılan geleneksel yöntemler yerini yavaş yavaş akıllı yöntemlere bırakmaktadır.

Bir elektrik şebekesinde kullanıcıya kesintisiz enerji sağlanmasının önündeki en büyük engel arızalardır. Arıza tespiti en kısa sürede, en doğru şekilde yapılmalı ve güç sisteminin mümkün olabilecek en az zararla arızadan etkilenmesine çalışılmalıdır. Bu açıdan tez çalışmada, PV temelli bir dağıtık üretim sisteminin mevcut elektrik şebekesi ile entegrasyonu için gerekli standartlar incelenmiş, güç kalitesi olayları sınıflandırılarak mevcut arızaların tespit edilebilmesi için dalgacık dönüşümü temelli gerçek zamanlı bir arıza tespit yöntemi önerilmiştir. Geliştirilen yöntem Labview ile geliştirilen bir yazılım ile deneysel olarak da doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen program ara yüzü üzerinden dalgacık dönüşümü yöntemi ile gerilim

ökmesi, gerilim sıçraması, frekans değişimi ve geçici durum analizi gibi çeşitli güç kalitesi olaylarının tespiti yapılmıştır. Bunun yanı sıra, gerilim, akım, frekans, güç, güç katsayısı, vektör diyagramları gibi verilerin de gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve daha sonra güç kalitesi açısından bu verilerin yorumlanması imkânı da sağlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Güç kalitesi, Dalgacık dönüşümü, şebeke bağlantılı PV sistemler, Otomatik arıza tespiti.



# **INTEGRATION OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC (PV) SYSTEMS WITH CURRENT ELECTRIC NETWORK AND EFFECTS ON POWER SYSTEM**

## **SUMMARY**

Factors such as rising energy demand, developing power electronics technology and environmental pollution problems have caused worldwide renewable energy generation to increase. This has become a priority issue for renewable energy sources to work in harmony with the existing electricity grid and for the power system to operate stably and in a balanced manner. Among the renewable energy sources, photovoltaic (PV) based power systems have started to be widely used today, especially due to the fact that solar panel production costs are considerably reduced.

When PV-based distributed power generation systems are connected to the grid, they must provide a number of electrical conditions determined by national and international standards. In Turkey, the TS EN50438 standard specifies the requirements for a single-phase grid-connected PV systems. This standard also applies to systems with three phases but with a phase current of less than 16A.

Although there has been an increase over the past years in studies on fault and power quality issues in power systems, real-time signal processing based studies where faults are automatically detected are limited. Most of the studies carried out has been limited to computer modeling and simulation and focused on detecting a limited number of faults (two types of breakdowns, such as voltage sag / swell).

Today, power quality analyzers use effective value transformation in detecting short and long time voltage change events and use Fast Fourier Transform (FFT) method in signal harmonic analysis. In addition, these power analyzers can be used to detect transient events, it is insufficient to capture high frequency content and short power quality events. While conventional methods are easily applicable, they exhibit poor detection and detection tendencies due to uncertain situations caused by difficulties in selecting threshold values, noisy measurements, and operating conditions. The conventional methods used for measurements and for troubleshooting are gradually being left to intelligent methods. Intelligent methods used in the determination of power quality and failure events can be examined under four main headings as fuzzy based event detection methods, event estimation based event detection methods, classification based event detection methods and field transformation based methods.

The biggest obstacle to providing uninterrupted power to the user in an electrical grid is faults. Fault detection should be performed as quickly as possible, and the power system should be minimally affected by this fault. In this thesis, the standards for integrating a PV-based distributed generation system with the existing grid are examined and a wavelet transform-based real-time fault detection method is proposed to classify power quality events and detect existing faults. The developed method is experimentally verified with software developed with Labview. Various power quality events such as voltage sag, voltage swell, frequency change and

transient analysis have been detected by the wavelet transform method on the realized program interface. In addition, data such as voltage, current, frequency, power, power coefficient, vector diagrams can be viewed in real time and then interpreted in terms of power quality.

**Keywords:** Power quality, Wavelet transform, Grid connected PV systems, Automatic fault detection.



## 1. GİRİŞ

Elektrik enerji piyasasında her geçen yıl popülerliği artan yenilenebilir enerji, küresel enerji krizinin aşılmasında önemli bir rol üstlenmektedir [1]. Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içerisindeki payının 2023 yılında %30 seviyesinde olması hedeflenirken, Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin hedefi ise 2020 yılı sonunda AB ülkelerinin toplam kurulu gücünün en az %20'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasıdır [2,3]. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut elektrik şebekesine entegre edilmesi, güç sistemleri açısından öncelikli bir konu haline gelmiştir. Fotovoltaik (PV) panel üretim maliyetlerinin son yıllardaki hızlı düşüşü, PV temelli güç sistemlerinin hızlı bir şekilde gelişmesini sağlamıştır. Gelecek yıllarda konutların, güneşten kendi elektrik enerjisini üretip kullanması, ürettiği fazla enerjiyi ise şebekeye geri vermek suretiyle, üretici konumuna gelmesi beklenmektedir. Farklı özelliklere sahip kaynakların bağlı olduğu dağıtım şebekesi mevcut elektrik şebekesinden farklı olarak iki yönlü güç akışına sahiptir. Dolayısıyla bu yeni duruma şebekenin tepkisinin belirlenmesi ve yeni elektriksel koşullara adapte edilmesi gerekmektedir.

PV temelli dağıtık güç üretim sistemleri şebekeye bağlandığında, ulusal ve uluslararası standartlarca belirlenen bir takım elektriksel şartları sağlamalıdır. Bu bağlantı şartlarının sağlanması, şebekenin yüksek güç kalitesine sahip olması ve sistem güvenliğinin tam olarak sağlanması açısından önemlidir. Bununla birlikte, şebeke bağlantılı PV sistemlerin anormal çalışma koşullarında güvenilir bir şekilde çalışması da önemlidir. Şebeke bağlantılı bir PV sistemde güç kalitesini etkileyen unsurların başında, ada mod çalışma, akım/gerilim harmonikleri, frekans düşmesi/yükselmesi, gerilim çökmesi (voltage sag), gerilim sıçraması (voltage swell), gerilim kesintisi (voltage interruption), geçici rejim (transient) olayları, çentik (notch), kırpışma (flicker) ve sistemdeki gerilim dengesizlikleri gibi olaylar gelmektedir. Türkiye'de şebekeye alçak gerilim seviyesinden bağlanacak tek fazlı PV sistemler ile üç fazlı ancak faz akımı 16 A'den küçük olan PV sistemler için TS EN 50438 [4] standardı kullanılmaktadır. Bu nedenle, şebeke bağlantılı PV

sistemlerin Şebeke ile entegrasyonu için gerekli ulusal ve uluslararası standartlara uyulması gerekmektedir. Mevcut Şebeke bağlantılı PV sistemlerde kullanılan ve invertere gömülü olan koruma fonksiyonları, özellikle alçak gerilim seviyesinde önemli bir koruma ölçütüdür. Ancak, bu inverterlerin çoğu Şebeke entegrasyonu noktasında pasif koruma fonksiyonlarına sahiptir ve güvenilirlik noktasında sıkıntılar yaŐanmaktadır. Bu açıdan, otomatik arıza tespiti, güç kalitesi açısından önemli bir konu olarak karŐımıza çıkmaktadır.

Bir elektrik Şebekesinde kullanıcıya kesintisiz enerji sağlanmasındaki en büyük engel arızalardır. Arıza tespiti en kısa sürede, en doğru Şekilde yapılmalı ve g sisteminin mümkün olabilecek en az zararlı arızadan etkilenmesine çalıŐmalıdır. Bu açıdan tez çalışmasında, PV temelli bir dağıtık üretim sisteminin mevcut elektrik Şebekesi ile entegrasyonu için gerekli standartlar incelenmiş, güç kalitesi olayları sınıflandırılarak mevcut arızaların tespit edilebilmesi için dalgacık dönüşümü temelli gerçek zamanlı bir arıza tespit yöntemi önerilmiştir. Geliştirilen arıza tespit sisteminin, Şebeke bağlantılı PV sistemlerin Şebeke ile bağlantısında güvenilir, hatasız, hızlı ve genel amaçlı olarak pratik uygulamalarda da kullanılabilir bir yapıya sahip olmasına çalışılmıştır.

Bu alıŐma, güç kalitesi olaylarını tespit edip, gerekli koruma tedbirlerini otomatik olarak alabilen gerçek zamanlı bir arıza tespit ve koruma alt yapısının oluşturulması düşüncesinin ilk aşamasını oluŐurmaktadır. Bunun için öncelikle güç sisteminde meydana gelen güç kalitesi veya arıza olayları sonucunda oluşan dalga formlarının gözlemlenmesi amacıyla MATLAB/Simulink ortamında PV sistemin de bağlı olduğu bir güç dağıtım sistemi modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinden gerçekleşen arızalarda veya güç kalitesi olaylarında, sistemin bu anormal Şebeke koşulları altındaki tepkisi analiz edilmiştir. Güç kalitesi olaylarının matematiksel modelleri ve geliştirilen model üzerinden elde edilen anormal çalışma koşulları altındaki Şebeke gerilim sinyallerine dalgacık dönüşümü uygulanarak, sistemin arıza Şartları altındaki tepkisi incelenmiştir. Daha sonra, Labview altyapısı kullanılarak, akıllı arıza tespit sisteminin dalgacık dönüşümü yöntemi ile gerçek zamanlı ve deneysel olarak gerçekleŐtirilmesine çalışılmıştır. Deneysel alıŐmada, PV inverter çıkıŐına bağlı olan elektronik lme devre kartlarından elde edilen akım, gerilim, güç, faz açısı, frekans vb. parametreler veri toplama kartı ile alınmaktadır. Dalgacık dönüşümü yöntemi ile gerçek zamanlı olarak geliştirilen Labview yazılımı

yardımıyla ilgili elektriksel parametreler değerlendirilerek güç kalitesi olaylarının tespit edilmesine çalışılmıştır.

Literatürde, konu ile ilgili olarak çoğunlukla teorik ve simülasyona yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çerçevede, tez çalışmasında geliştirilecek güç kalitesi olaylarını tespit edebilen otomatik arıza tespit yöntemleri ile birçok elektriksel parametreyi dikkate alan, gerçek zamanlı olarak bu parametreleri değerlendiren, güvenilir algılamaya sahip, genele uygulanabilen, gelişmiş teknolojik altyapılı, geliştirilmesi ve uygulaması kolay, yeni bir arıza ve olay tespit yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

### **1.1 Tezin Amacı**

Mevcut elektrik şebekesinin frekans, akım, gerilim, faz farkı ve güç gibi parametrelerini değerlendirerek, şebeke bağlantılı bir PV sistemin mevcut elektrik şebekesi ile entegrasyonunda karşılaşılması muhtemel güç kalitesi olaylarının, dalgacık dönüşümü tabanlı geliştirilecek otomatik arıza tespit yöntemi ile gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi tez çalışmasının asıl hedefidir. Gerekli koruma fonksiyonlarının standartlarca belirlenen kriterlere göre gerçek zamanlı olarak otomatik şekilde gerçekleştirilmesi güvenilir algılamaya sahip, genele uygulanabilen ve gelişmiş teknolojik altyapılı bir koruma sisteminin oluşturulması ise tezin diğer hedefleridir.

Güneş enerjisinden elektrik üreten bir dağıtık üretim sisteminin mevcut elektrik şebekesi ile entegrasyonu için gerekli olan standartlar ışığında gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi, geçici durum olayları vb. güç kalitesi olaylarının gerçek zamanlı olarak otomatik tespiti amaçlanmıştır. Geliştirilecek otomatik arıza tespit sistemi ile güç kalitesi olaylarının güvenilir, mümkün olan en yüksek doğrulukta hatasız ve hızlı bir şekilde tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Son yıllarda, mevcut elektrik şebekesine bağlanacak çok sayıda PV santralin, uluslararası standartlara uygun bir şekilde mevcut elektrik şebekesine bağlantısını gerçekleştirmek önemli bir konu haline gelmiştir. Bu kapsamda, PV sistemi gerçek zamanlı olarak izleyerek güç kalitesi olaylarının dalgacık

dönüşümü yöntemi ile tespitine yönelik bir yazılımının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

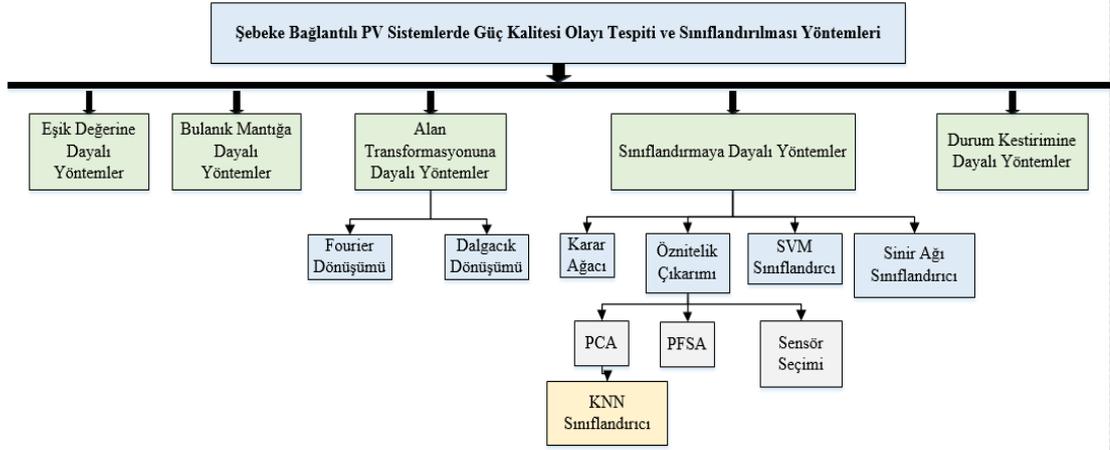
2. Güç kalitesi problemlerinin tespit edilebilmesi için öncelikle arıza durumunda güç sisteminin tepkisi gözlemlenmelidir. Bu amaçla öncelikle MATLAB /Simulink ortamında şebeke bağlantılı bir PV sistemin bağlı olduğu güç dağıtım sistemi modeli oluşturulup, sistemin anormal çalışma koşullarında verdiği tepkinin incelenmesi amaçlanmıştır.
3. Uluslararası standartları esas alan arıza ve güç kalitesi olaylarının tespitini gerçekleştiren ve aynı zamanda PV sistemin takip edilebildiği gerçek zamanlı bir yazılımın gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. PV sistem ve şebeke arasındaki gerilim, akım ve frekans değişimi gibi devre parametreleri gerçek zamanlı olarak ölçme kartları yardımıyla veri toplama cihazı üzerinden değerlendirerek, güç sistemini sürekli olarak izleyen bir yazılımın geliştirilmesi amaçlanmıştır.
4. Gerçekleştirilen program ara yüzü üzerinden dalgacık dönüşümü yöntemi ile güç kalitesi olaylarının tespitinin yanı sıra gerilim, akım, frekans, güç, güç katsayısı, vektör diyagramları gibi verilerin de sürekli olarak izlenmesi hedeflenmiştir.

### **1.1.1 Tezin özgün değeri**

Son yıllarda, güç sistemlerinde arıza ve güç kalitesi konuları üzerine yapılan çalışmalarda artış olsa da, hataların otomatik olarak tespit edildiği gerçek zamanlı sinyal işleme tabanlı çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu nedenle dalgacık dönüşümü yöntemi ile gerçekleştirilen tez çalışmasında kullanılan hata tespit yönteminin literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle arıza tespiti konusunda yapay sinir ağları, bulanık mantık ve dalgacık dönüşümü gibi akıllı yöntemler kullanılarak literatürde son yıllarda önemli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların çoğu simülasyondan öteye geçememiş olup sınırlı sayıda hata türünü (gerilim çökmesi/sıçraması vb. iki tür arıza) tespit etmeye odaklanmıştır. Tez çalışmasında, PV sistemin anormal çalışma koşulları altındaki arıza olaylarını tespit eden dalgacık dönüşümü tabanlı yöntem ile gerçek zamanlı olarak bu parametreleri değerlendiren bir sistemin geliştirilmesi ile literatürdeki sınırlı uygulama çalışmalarından biri olarak konuya katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## 1.2 Literatür Araştırması

Literatürde şebeke bağlantılı PV sistemlerde güç kalitesi olaylarının ve meydana gelen arıza olaylarının tespitine yönelik birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler model tabanlı ve veri odaklı yöntemler olmak üzere iki temel kategoride incelenmektedir. Olay tespiti için modele dayalı yaklaşımlar, model bileşenlerin nasıl çalıştığının ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Tipik olarak model tabanlı yöntemler, deneysel veya veri kartı ile elde edilen gerçek zamanlı veriler yerine, sistem modellerine göre olayları algılar ve bu olayları tanımlayabilen testler oluşturur. Veri odaklı yöntemlerde ise gerçek sistemdeki veriler analiz edilir ve sistemin güvenilirliğini tanımlamak için sağlıklı bir sistem modelinin çıktılarıyla karşılaştırılır. Öte yandan, olay tespiti için veri odaklı yaklaşımlar, gerçek fiziksel sistemden ölçülen deneysel verilere ilişkin analizleri gerçekleştirir. Şekil 1.1’de, bir şebeke bağlantılı bir PV sistemin farklı bileşenlerindeki arızaları ve güç kalitesi olaylarını tanımlamak için kullanılan yöntemler gösterilmiştir [5].



**Şekil 1.1 :** PV sistemlerde güç kalitesi olaylarının tespiti ve sınıflandırılması için kullanılan yöntemler

### 1.2.1 PV sistemlerde güç kalitesi olaylarının incelenmesinde temel yöntemler

Eşik değere dayalı olay tespit yöntemlerinde kullanılan model tabanlı yaklaşımlarda, hem normal hem de arıza veya güç kalitesi olayı koşullarında kritik sistem parametrelerinin veri kümelerini oluşturmak için şebeke bağlantılı PV sistem ve şebeke için ayrıntılı modeller oluşturulur. Daha sonra eşik değerleri, her bir kritik sistem parametresi için güven sınırları belirlenerek tasarlanır. Son aşamada ise, olaya

ilişkin bir sinyalin bu sınırların dışına çıkması durumunda meydana gelen olayı tespit etmek için eşik değeri tabanlı testler geliştirilir. Örneğin Stellbogen tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bir PV panel için eşik tabanlı testler uygulanmış, gerçek ve simüle edilmiş veriler arasındaki güç kaybı karşılaştırılarak PV panellerdeki arıza tespit edilmiştir [6]. Ndiaye vd. ise [7] PV paneldeki kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve maksimum çıkış gücü gibi parametreleri gözlemlemiş ve referans değerler ile karşılaştırma yaparak PV panellerdeki bozulmayı tanımlamışlardır. Ada mod çalışmanın tespiti için yapılan bir başka çalışmada ise [8], üst/alt gerilim ve üst/alt frekans değerleri Labview ile gerçek zamanlı olarak kontrol edilerek, arıza tespit edilmiştir.

Uluslararası standartlarda, güç kalitesi olaylarının tespiti ve sınıflandırılması gerilim sinyaline uygulanan etkin değer dönüşümü (sinyalin karelerinin ortalamasının karekökü (RMS)) ile gerçekleştirilir. Uygulaması kolay olan bu yöntem güç kalitesi olaylarının tespitinde kısıtlı olup yeterli doğruluğa sahip değildir. Çünkü etkin değer dönüşümü uygulanan sinyallerin faz açısı, temel frekansları ve içerdikleri harmonik bileşen bilgileri bilinemez. Bu nedenle literatürde etkin değer dönüşümü yerine çok sayıda akıllı güç kalitesi tespit ve sınıflandırma yöntemi önerilmiştir.

Günümüzde kullanılan güç kalitesi analizörleri kısa ve uzun süreli gerilim değişimi olay tespitinde etkin değer dönüşümünü kullanırken sinyalin harmonik analizinde ise Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) yöntemini kullanmaktadır. Etkin değer dönüşümü ile güç kalitesi olaylarının analizi tezin ikinci bölümünde MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemler kolaylıkla uygulanabilir olmakla birlikte, eşik değerlerinin seçimindeki zorluklar, gürültülü ölçümler ve çalışma koşullarından kaynaklanan belirsiz durumlardan dolayı hatalı tespit ve algılama eğilimleri gösterirler.

### **1.2.2 PV sistemlerde akıllı yöntemlerle güç kalitesi olaylarının incelenmesi**

Güç kalitesi ve arıza olaylarının tespitinde kullanılan akıllı yöntemler, bulanık tabanlı olay tespit yöntemleri, durum tahminine (kestirimi) dayalı olay tespit yöntemleri, sınıflandırmaya dayalı olay tespit yöntemleri ve alan dönüşümü tabanlı yöntemler olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir.

Eşik değeri tabanlı yöntemlerin getirdiği zorlukların aşılması amacıyla bulanık mantığa dayalı yöntemler de literatürde kullanılmıştır. Bu yöntemler, hataları tespit

etmek için mantıksal kurallar oluşturarak daha önceden deneyler ve gözlemler sonucunda elde edilen bilgi tabanlı mantığı kullanmaktadır. Bulanık mantık, kablolarda [9], iletim hatlarında [10] ve PV inverterlerde [11] arıza tespiti için modele dayalı yaklaşım kullanılarak uygulanmıştır. Bulanık mantık tabanlı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların birinde bir dizel generatörde meydana gelen arızaların ne tip arıza olduğu, meydana gelen arızanın büyüklüğü ve yeri tahmin edilmiştir [12]. Başka bir çalışmada [13], rüzgâr türbinlerinde arıza tespiti için bulanık mantık temelli yöntemler gerilim ve akım ölçümleri kullanılarak uygulanmıştır.

Durum tahmini tabanlı yöntemler, gerçek gözlemcilerin ölçümleriyle veya teorik tahminlerle ölçümleri sonucunda elde edilen verileri karşılaştırarak sistemin durumunu tahmin etmeye çalışmaktadır. Bu tip yöntemler, tüm durum parametrelerinin gözlemlenemediği durumlarda genellikle yararlıdır. Model tabanlı yaklaşımlar, karmaşıklığı azaltmak ya da fiziksel sistemdeki sensör boşluklarını doldurmak için sistemin alt modellerini oluşturmaktadır. Arcak vd. [14], bir yakıt hücresinin anot kanalındaki hidrojen kısmi basıncını hesaplamak için durum tahmini temelli yöntem kullanmışlardır. Stettler vd. [15] ise uydu görüntülerinden güneş radyasyonun miktarını tahmin ederek, bu bilgiyi PV panellerin modül arızalarını saptamak için kullanmışlardır. Bu çalışmada tahmini değerler, normal çalışma durumu için model tabanlı simülasyon verileri ile karşılaştırılmıştır. Bir PV panelinin modül arızalarını teşhis edebilecek çıkış sinyallerini ölçen izleme ünitelerini kullanarak, radyasyon parametresi tahmini yapılmıştır. PV panellerinin kısa/açık devre arızaları yapay sinir ağları kullanılarak da tespit edilebilir. Syafaruddin vd. [16] panelin çıkışındaki toplam gerilim ve akım ölçümlerinden, terminal gerilimlerini tahmin etmek için yapay sinir ağı modellerini kullanmıştır. Veri odaklı yaklaşımlar, gerçek sisteminin durumunu tahmin etmek ve farklı çalışma karakteristiklerinin tespiti için rüzgâr türbinleri için de uygulanmıştır. Frenleme, titreşim, rüzgâr hızı, sıcaklık ve güç ölçümleri böyle bir çalışmada incelenmiştir [17].

Elektrik enerjisi alt yapısında arıza ve güç kalitesi olayı tespiti için literatürde çeşitli sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Sınıflandırıcı, ham verileri veya dönüştürülen verileri bir girdi olarak alan ve sistemin normal çalışma durumu hakkında bir karar alan algoritmadır.

Yapay sinir ağı (YSA) tabanlı sınıflandırıcılar, temel olarak insan beyindeki nöron adı verilen hücrelerden esinlenerek geliştirilmiş bir yöntemdir ve günümüzde bilgisayarların işlem kapasitelerinin önemli ölçüde artması ile yeniden popüler hale gelmiştir. Literatürde bu sınıflandırıcılar, tipik olarak bir girdi katmanı, gizli katmanlar ve nöronların çıktısı katmanından oluşur [18]. YSA yönteminde her bir nörona genellikle düğüm (node) adı verilir ve bu düğümlerin girişleri belirli ağırlık katsayıları ile çarpılarak düğümün aktivasyon fonksiyonu ile işlenir. Aktivasyon fonksiyonunun çıkışı ise başka düğümlere giriş olarak verilir. YSA modeli ise birden fazla nöronun bir araya gelerek oluşturduğu bir ağ yapısıdır. Arıza ve olay belirleme sistemi bir örüntü tanıma problemi olup eğitim ve test aşamalarından oluşmaktadır. Bu nedenle eğitim aşamasında bilinen hatalı ve normal sinyaller sisteme giriş olarak verilerek YSA modelindeki her bir düğümün ağırlık katsayılarının belirlenmesi işlemi gerçekleştirilir. Test aşamasında ise bilinmeyen sinyal eğitilmiş YSA sistemine giriş olarak verilerek çıkış düğümünde hesaplanan değere göre test sinyalinin normal ya da hatalı olup olmadığına karar verilir. YSA sınıflandırıcısının çıktısı verileri, mevcut bir arızayı, basit, hızlı ve etkili bir şekilde tespit eder. Bu yöntem, elektrik şebekelerinde kablo ve iletim hattı hatalarının tespiti için simülasyon verilerine dayanan sınıflandırıcı oluşturmak için kullanılmıştır [19]. Chao vd. [20] aynı zamanda, maksimum güç noktasındaki akım değerleri ve açık devre gerilimi temel olarak PV panellerindeki modül hatalarını teşhis etmek için YSA modelini kullanmıştır. Model tabanlı yaklaşımlara benzer şekilde, veri odaklı yaklaşımlarda da olay tespiti ve sınıflandırması için YSA kullanılmıştır. Veri odaklı YSA tabanlı modellerin tasarımındaki tek fark, modeli eğitmek için gerçek verilerin kullanılmasıdır. Bu yöntem rüzgar türbinlerinde dişli kutusu hatalarını sınıflandırmak için de kullanılmıştır [21]. Deneysel veriler kullanılarak bir sinir ağı eğitilmiş ve daha sonra gerçek veriler karşılaştırıldığında eğitilmiş sinir ağının çıktısı arıza tespiti için kullanılmıştır.

Karar ağacı temelli sınıflandırıcılar, sistematik olarak iki sınıfı karşılaştıran mantıksal bir yapı oluşturur. Chouder vd. [22] modül arızaları sırasında kısa sürede ve uzun sürede meydana gelen arızaları teşhis etmeye yardımcı olmak için PV panellerindeki kayıpları tahmin etmişlerdir. Ardından detaylı bir modelden üretilen verilerine dayanarak temel arıza modunu anlamasını sağlayan bir karar tespit ağacı modeli geliştirilmiştir. Karar ağaçları, model odaklı çalışmalara uygulandığı gibi aynı

zamanda gerçek sistemden üretilen verilere dayanan uygulamalarda da kullanılmıştır. Örneğin, gerilim ve akım faktörlerini özellik olarak kullanan PV panel modülü hataları, karar ağaçları kullanılarak izole edilebilmektedir [23].

Destek vektör makineleri (DVM-support vector machines), bir çok örüntü tanıma probleminde başarılı bir şekilde kullanılan bir sınıflandırma yöntemi olup orijinalinde iki sınıfı birbirinden ayırt etmek amacıyla önerilmiş ve tanımlanmış bir sınıflandırıcıdır [24]. DVM yöntemi, iki sınıfa ait eğitim özniteliklerini öznitelik uzayında birbirinden en uygun şekilde ayırabilecek doğrusal bir ayırıcı düzlem (seperating hyperplane) bulma prensibine dayanmaktadır [24]. Daha sonra bu yöntem çekirdek fonksiyonlarından (kernel function) yararlanılarak çok sınıflı örüntü tanıma problemlerine de başarılı bir şekilde uygulanmıştır [25]. Çekirdek fonksiyonlarının kullanım amacı, mevcut uzayda birbirinden doğrusal olarak ayrılamayan özniteliklerin daha yüksek boyutlu bir uzaya taşınması ve özniteliklerin bu yeni yüksek boyutlu uzayda doğrusal olarak birbirinden ayrılabilir hale getirilmesidir. Kullanılabilecek bazı çekirdek fonksiyonları, doğrusal çekirdek fonksiyonu, polinomsal çekirdek fonksiyonu ve radyal tabanlı fonksiyondur [24,25]. Arıza ve güç kalitesi olayı tespiti de iki sınıflı bir örüntü tanıma problemi olduğundan dolayı DVM sınıflandırıcısının otomatik hata tespiti için oldukça uygun bir sınıflandırma yöntemi olduğu düşünülmektedir. Bu sınıflayıcı arıza anının ve yerinin tespit edilmesi için kablolar ve iletim hatlarına [26,27] model tabanlı bir yaklaşımla uygulanmıştır.

Dağıtık üretim sistemlerinde meydana gelen arızaları, özellikle doğrusal olmayan sistemlerde, gürültünün ve diğer belirsizliklerin etkisi altındayken ham sensör verilerini kullanarak tespit etmek oldukça zordur. Bu nedenle, veriler arasındaki ayırt ediciliği artırabilecek bazı yararlı özellikleri tanımlamak için veri ön işleme adımları gereklidir. Örneğin, sistem parametrelerinden türetilen farklı istatistiksel önlemler kullanılarak özellikler çıkarılabilir. Doğru özellikleri belirleyerek, farklı arızalardan gelen veriler, özellik uzayında ayrı kümelere yerleştirilir. Böylece bu özellik alanında eğitilmiş sınıflandırıcıların arızaları teşhis etmesini sağlar. Ayrıntılı modellerden elde edilen verilere dayanarak, arıza duyarlılık özelliklerini hesaplayan bir yöntem Esobet vd. tarafından [28] kullanılmıştır. Bu özellikler, gerçek ve teorik değerler arasındaki farkları kullanarak hesaplanmıştır. Öznitelik çıkarma işlemi model tabanlı sistemlere uygulandığı gibi gerçek sistemden elde edilen veri odaklı sistemlerde de

kullanılabilir. Kurz vd. [29] yaptıkları çalışmada yakıt pili arızalarını tespit etmiştir. Öznitelik çıkarma temelli yöntemler, genellikle hataların daha iyi sınıflandırılmasını sağlayan bir görünümü mümkün kılmaktadır. Ayrıca gerçek sistemden yapılan ölçümlerle elde edilen verilerin, ayrı veri odaklı yaklaşımlarda da kullanılabilmesine imkan sağlar.

Alan dönüşümü tabanlı yöntemler, diğer metotlardan farklı olarak arıza ve güç kalitesi olaylarının tespiti için sinyalin zaman-frekans bileşenlerini kullanır. Bu yöntemler, Fourier dönüşümü tabanlı yöntemler ve Dalgacık Dönüşümü (DD) tabanlı yöntemler olmak üzere 2 kısımda incelenebilir. Fourier Dönüşümleri (FD), kararlı durum sinyallerinin spektrum analizini yaparak arızaları sınıflandırmak için kullanılır. Rüzgâr türbinlerindeki arıza olayları titreşim, rüzgar hızı, güç, gerilim ve akım ölçümlerine dayalı olarak FD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir Jeffries vd. tarafından [30] ise Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılmıştır. DD temelli yöntemlerde ise zaman serilerini eşleştirmek için yararlı olan dalgacık dönüşümleri kullanılmaktadır [31-33].

FD yönteminde olay sinyali genlik-frekans bölgesinde incelenebildiğinden, işaretin zaman bilgisi kaybolur. Bu nedenle FD harmonik oluşumu gibi durağan sinyallerde olumlu sonuç verirken, kısa süreli gerilim değişimleri ve geçicilik olaylarında kullanılamamaktadır. FD'nin durağan olmayan sinyallerde kullanılamama eksikliği, Dennis Gabor tarafından ortaya atılan pencereleme tekniği ile giderilmiştir [34]. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) olarak adlandırılan bu yöntemle sinyal, zaman-frekans tabanlı bir görünüm oluşturulur. KSFD yöntemi güç kalitesi olaylarının analizinde ve tespitinde kullanılmıştır [35]. KSFD durağan olmayan sinyallerde sonuç vermesine rağmen pencereleme işleminde kullanılan ölçeğin sabit olması, sinyalin hem düşük frekanslı hem de yüksek frekanslı bileşenlerini aynı anda analiz etmeyi imkânsız kılmaktadır [36].

DD yönteminin diğer alan dönüşümlü yöntemlere göre en büyük avantajı, sinyali zaman-ölçek alanında lokal olarak analiz etmesidir KSFD ile yapılan analize göre değişken pencere boyutuna sahip olduğundan, DD ile yapılan analiz daha esnek yapıdadır. Güç kalitesi, olay işaretleri hem yüksek frekansta hem de düşük frekansta bozucu işaretler içerebilir. Güç kalitesi olay sinyallerinin, içerdikleri farklı frekanstaki işaret bileşenleri nedeniyle, FD ve KSFD yöntemi yerine DD yöntemi ile analiz edilmesi daha doğru sonuçlar getirecektir.

DD tabanlı gerilim çökmesi/sıçraması tespit algoritmasının önerildiği bir çalışmada iki farklı Daubechies dalgacığı aynı sinyal üzerine uygulanarak hibrit bir yapı oluşturulmuştur [32]. PSCAD/EMTDC analiz programıyla gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından elde edilen sinyallere uygulanan bu algoritma HFD ve d-q dönüşümü gibi yöntemlerle karşılaştırılmış önerilen algoritmanın daha hızlı ve güvenilir olduğu ispatlanmıştır.

Rüzgar türbinlerinde ada mod çalışmanın tespiti için DD tabanlı metodun önerildiği başka bir çalışmada ise veri toplama kartı üzerinden alınan gerilim sinyali 5 seviyeli ayrık dalgacık dönüşümüne (ADD) tabi tutularak d5 katsayısı için belirlenen eşik değere göre ada moda geçilmesini sağlayan bir algoritma önerilmiştir [37]. Şebeke bağlantılı PV sistem modelinin Matlab/Simulink ortamında PowerSim araç kutusundan yararlanılarak oluşturulduğu çalışmada, PV inverter içine gömülen sistem ile akım kontrolü ve DD tekniği ile olay tespiti gerçekleştirilmiştir [38].

Güç sisteminde meydana gelen güç kalitesi olaylarından kaynaklı saf sinyalden sapma miktarını belirlemek için ADD esas alınarak bir güç kalitesi indeksi önerilmiştir [39]. Önerilen indeks, ADD sonucu elde edilen detay katsayılarının yüzde enerji sapmasının toplamı olarak tanımlanmaktadır. Harmonik ve geçici rejim olayı taşıyan hem gerçek sinyaller hem de ATP/EMTP yazılımı ile gerçekleştirilen modelin simülasyonu sonucunda elde edilen sinyaller üzerinde indeks test edilmiş ve doğrulanmıştır.

Alan dönüşümü tabanlı yöntemlerle gerçekleştirilen çalışmalardan birinde Daubechies dalgacık ailesi filtre bankları kullanılarak güç dağıtım sistemi sinyallerinin ADD tabanlı ayrıştırma yoluyla uyumlu, enerji ve entropi değerine göre eşik değer belirleme yöntemi önerilmiştir [40]. Önerilen yaklaşımın testi için kısa süreli gerilim dalgalanmaları, geçici rejim olayları ve harmonik taşıyan sinyaller matematiksel modellerden yararlanarak oluşturulmuştur. Önerilen algoritmanın gerçek sinyallere de uygulanabileceği belirtilmiştir.

IEEE-13 baralı test sistemi modeline rüzgar ve PV generatörlerin bağlanmasıyla oluşturulan hibrit güç sistemi üzerinde, gerilim kesintisi, şebeke ile senkronizasyon ve ada mod tespiti için s-dönüşümü tabanlı olay tespit algoritması denenmiştir [41]. Gerilim sinyalinin negatif bileşenine uygulanan ayrıştırma işlemi ile çıkarılan

özellikler yardımıyla bir güç kalitesi indeksi belirlenmiştir. Gerçek zamanlı dijital simülasyon sistemi yardımıyla simülasyon ile elde edilen sonuçlar onaylanmıştır.

Matematiksel model üzerinden üretilen güç kalitesi olay sinyallerine dalgacık paket dönüşümü (DPD) tabanlı bir yöntemin önerildiği başka bir çalışmada olay sinyallerine öncelikle 3 seviyeli ayrıştırma uygulanmıştır [42]. Elde edilen DPD katsayılarının etkin değeri alınarak yeni bir parametre tanımlanmış ve bu parametreye göre kısa süreli güç kalitesi olayları tespit edilmiştir.

Ülkemizde güç kalitesi problemlerine çözüm bulmak, şebeke hatalarını düzeltmek, koruma fonksiyonları geliştirmek ve mali kayıp analizi yapmak amacıyla Güç Kalitesi Milli Projesi (GKMP) gerçekleştirilmiştir [43]. Proje kapsamında verilerin saklanması amacıyla Milli Güç İzleme Merkezi (NMCPQ) oluşturulmuş, güç akış analizi ve güç kalitesi ile ilgili veriler eş zamanlı olarak Türkiye'deki tüm bölgeleri kapsayan 70 ayrı trafo merkezinden alınmıştır. Bu sayede az sayıda veri içeren geleneksel SCADA sistemlerinden farklı olarak daha esnek ve ileri düzeyde kontrol sistemi geliştirilmiştir.

## **2. ŞEBEKE BAĞLANTILI PV SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ OLAYLARI**

Güç kalitesi parametreleri elektriksel bir cihazın önemli bir performans ve ömür beklentisi kaybı olmadan amaçlanan şekilde çalışmasına izin veren sınır değerleridir. Gerilim, akım ve frekans sapmalarına yol açan herhangi bir güç sistemi problemi, tüketici tarafındaki donanımların arızalanmasına veya yanlış çalışmasına yol açabilir. Şebeke bağlantılı PV sistemlerde güç kalitesini etkileyen unsurların başında akım ve gerilim harmonikleri, frekans düşmesi/yükselmesi, gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi, geçici rejim olayları, çentik oluşumu, kırpışma ve sistemdeki gerilim dengesizlikleri yer almaktadır. Tezin bu bölümünde öncelikle şebeke bağlantılı PV sistemlerde meydana gelen güç kalitesi olaylarının tanımları ve standartları verilmiştir. Daha sonra şebeke bağlantılı bir PV sistemin bağlı olduğu güç sistemi, MATLAB/Simulink ortamında modellenerek güç kalitesi olayları gözlemlenmiştir.

### **2.1 PV Sistemlerde Güç kalitesi Olaylarının Tanımları ve İlgili Standartlar**

Güç kalitesini düzenlemek için birtakım uluslararası standartlar oluşturulmuştur. Örneğin IEEE Std. 1547, şebeke bağlantılı PV sistemlerde harmonik akımların genliği için sınırları belirlemektedir [44]. Diğer önemli bir standart ise gerilim ve akım harmonik sınırlarını belirleyen IEEE Std. 519 standardıdır [45]. IEEE Std. 1159 ise güç kalitesi olaylarının izlenmesini gerçekleştirmek için bazı öneriler sunmaktadır [46]. Türkiye’de şebekeye alçak gerilim seviyesinden bağlanacak tek fazlı PV sistemler ile üç fazlı ancak faz akımı 16 A’den küçük olan PV sistemler TS EN 50438 standardına uygun olmalıdır [4]. Tezin bu bölümünde bazı güç kalitesi olaylarının tanımlarına yer verilmiştir.

#### **2.1.1 Ada mod çalışma**

Ada mod çalışma, bir dağıtım sistemi güç sisteminin kalan kısmından elektriksel olarak izole edildiğinde, enerji akışının halen kendisine bağlı bulunan dağıtık üretim (DG) sistemi tarafından devam ettirilmesi durumudur. Ada mod çalışmada, şebeke

bağlantılı PV sistem, şebeke ile bağlantısı kesildiği halde yükü beslemeye devam eder [47]. Ada mod çalışma güvenlik problemlerini de beraberinde getirir. Gerilim ve frekans değerleri izin verilen standartların dışına çıktığından PV sistem ve şebeke zarar görebilir [48]. IEEE 929-2008 standartlarına [49] göre şebeke bağlantılı bir PV sistem, ada mod çalışmaya geçtiğinde en kısa sürede şebekeden ayrılmalıdır. IEEE 1547-2015 standardına [44] göre bu süre en fazla 2 saniye olarak belirtilmiştir (Çizelge 2.1).

**Çizelge 2.1:** IEEE 929-2008 tarafından belirlenen şebeke bağlantı esasları [49].

No	Frekans	Gerilim	Kesici Açma Süresi
1	$f_{nom}$	$0,5V_{nom}$	6 periyot
2	$f_{nom}$	$0,5V_{nom} < V < 0,88V_{nom}$	2 sn / 120 periyot
3	$f_{nom}$	$0,88V_{nom} \leq V \leq 1,10V_{nom}$	Normal Çalışma
4	$f_{nom}$	$1,10V_{nom} < V < 1,37V_{nom}$	2 sn / 120 periyot
5	$f_{nom}$	$1,37V_{nom} \leq V$	2 periyot
6	$(f_{nom}-0,7) \leq f \leq (f_{nom}+0,5)$	$V_{nom}$	Normal Çalışma
7	$f < (f_{nom}-0,7)$ Hz	$V_{nom}$	6 periyot
8	$f > (f_{nom}+0,5)$ Hz	$V_{nom}$	6 periyot

### 2.1.2 Gerilim dalgalanması

PV santraller devreye girip çıkarken, gerilim düşümü veya yükselmesine neden olabilir. Bu değerler ise IEC 61000-3-3 standartlarına göre şebeke bağlantılı sistem devreye girerken ve çıkarken nominal gerilimin  $\pm \%3,3$ 'ünü aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır [50]. Ayrıca güç sisteminin devrede olduğu sürenin  $\%95$ 'inde standartlar gereği nominal gerilim değerinin  $\pm \%10$ 'unu aşmamalıdır. Özellikle gerilim analizi yapılırken sistemin dayanabileceği sınır değerlerde analiz yapılması bu açıdan önemlidir.

**Çizelge 2.2 :** Gerilim dalgalanması için sınır değerleri [50].

PV Sistem Çalışma Durumu	Maksimum Değer
Şebeke Bağlantılı PV Sistem Devreye Girerken	$\pm \%3,3$ V
Şebeke Bağlantılı PV Sistem Devreden Çıkarken	$\pm \%3,3$ V
Devrede olduğu sürede ( $\%95$ )	$\pm \%10$

### 2.1.3 Uzun ve kısa süreli gerilim bozulmaları

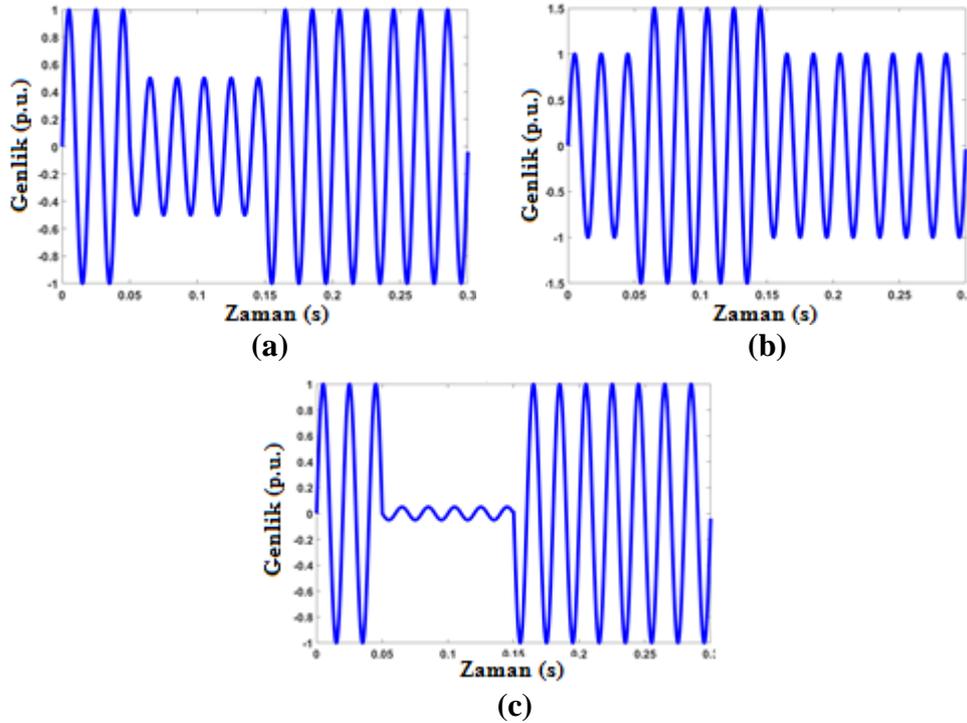
Bir dakikadan daha uzun süre boyunca meydana gelen nominal gerilimin etkin değerindeki değişimler uzun süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır. Gerilim

genlik değerine bağlı olarak bu değişim sistemdeki kalıcı arızalar, yük değişimi ve anahtarlama işlemleri ile ilişkili olabilir.

Gerilim değişiminin büyüklüğüne bağlı olarak, uzun süreli gerilim değişimleri düşük gerilim, aşırı gerilim ve sürekli kesinti durumları olarak sınıflandırılabilir. Şebeke nominal geriliminin etkin değerinde meydana gelen kısa süreli değişimler kısa süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır.

Aşırı güç çeken motorlar, aşırı yüklenme ve hat boyunca meydana gelen arızalar gerilim çökmesine neden olmaktadır. Gerilim çökmesi olayı, şebeke frekansında çalışan bir güç sisteminde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki % 10-90 arasında meydana gelen azalma olarak tanımlanır [46].

Gerilim sıçraması olayı, şebeke frekansında çalışan bir sistemde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki %110-%180 arasında meydana gelen artış olarak tanımlanır [46]. Büyük endüktif yüklerin devreden alınması veya büyük kapasitör banklarının devreye alınması gibi güç sistemindeki manevralar ile simetrik olmayan arızaların, arızasız fazlarında gerilim sıçramaları oluşur. Konumuna ve güç sistemi koşullarına bağlı olarak bir arıza veya güç kalitesi problemi, gerilim çökmesine, gerilim sıçramasına veya gerilim kesintisine neden olabilir. Şekil 2.1'de arıza sonrasında oluşan gerilim şekilleri gösterilmiştir.



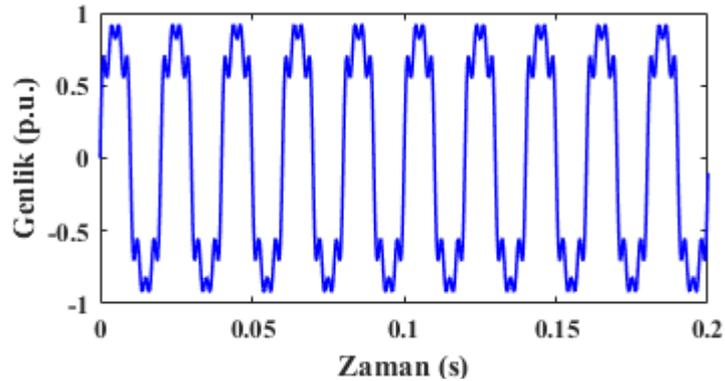
Şekil 2.1 : (a) Gerilim çökmesi, (b) gerilim sıçraması ve (c) gerilim kesintisi

#### 2.1.4 Gerilim dengesizliği

Alçak gerilim şebekesi için sadece gerilimin negatif bileşeni dikkate alınarak oluşturulan EN 50160 standartlarına göre ölçüm süresinin %95'inde gerilim dengesizliği %2'yi geçmemelidir. Gerilim dengesizliğinin önlenmesi amacıyla her bir faza miktarda PV santral bağlanarak, gç fazlara mümkün olduğunca eşit olarak dağıtılmalıdır..

#### 2.1.5 Harmonikler

Güç sisteminde meydana gelen harmoniklerin başlıca kaynakları, yarı iletken kontrollü güç kaynakları, inverterler, frekans dönüştürücüler, kaynak makineleri, ark ocakları ve doğrusal olmayan yüklerdir. Gç sisteminde kullanılan cihazların neredeyse tamamı doğrusal olmayan yüklerden oluşur ve bu da güç kalitesi sorunlarını beraberinde getirir. Harmoniklerin sebep olduğu başlıca problemler ise kontrol sistemlerinde, bilgisayarlarda, endüstriyel elektronik cihazlarda meydana gelen arızalar, transformatörlerdeki ve motorlardaki aşırı ısınma ile dağıtım sisteminde meydana gelen gerilim /akım dalga şekli bozulmaları ve rezonans olaylarıdır. şekil 2.2, yüksek derecede harmonik içeren böyle bir gerilim sinyalini göstermektedir.



şekil 2.2 : Yüksek derecede harmonik içeren gerilim sinyali

Güç sistemlerinde akım harmonikleri dağıtım şebekesindeki tüketiciler tarafından incelenirken, şebeke tarafında ise daha çok gerilim harmonikleri üzerinde durulur. Elektrik retim santrallerinde üretilen ve iletim hatlarıncı taşınan gerilimin harmonik bozulma miktarı çok düşük seviyededir. Ancak dağıtım şebekesindeki tüketiciler noktalarna yaklaşıldığında doğrusal olmayan yüklerin çektiği güce bağlı olarak gerilim ve akım dalga formu sinüs işaretinden oluka uzaklaşabilmektedir. Bu da harmonik bozulmanın ana kaynağının tüketiciler olduğunu göstermektedir.

Gerilim ve akım dalga formundaki temel harmonik dışındaki harmoniklerin toplam etkin değerinin, temel harmoniğin etkin değerine oranı toplam harmonik bozulma (THB) olarak tanımlanır.

$$THB = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} / V_1 \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de  $V_n$ , n’inci harmonik bileşenin genliğini ifade ederken  $V_1$  değeri ise temel gerilim genliğini ifade etmektedir.

IEEE 519, IEC 61000 ve EN 50160 [45,51,52] standartları güç kalitesi ile ilgili düzenlenmiş ve birçok ülke tarafından kabul görmüş standartlardır. IEEE 519 standartlarına bağlı olarak izin verilen toplam harmonik bozulma miktarı, güç sisteminin gerilim seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Alçak gerilim şebekelerinde THB %8’den, her bir harmonik değer ise %5’ten küçük olacak şekilde sınırlandırılmıştır (Çizelge 2.3).

**Çizelge 2.3:** Gerilim bozulma sınır değerleri [45].

PCC Noktasındaki Bara Gerilimi (V)	İç Harmonik Değeri (%)	Toplam Harmonik Bozulma (THB) (%)
$V \leq 1.0$ kV	5,0	8,0
$1$ kV < $V \leq 69$ kV	3,0	5,0
$69$ kV < $V \leq 161$ kV	1,5	2,5
$161$ kV < $V$	1,0	1,5

Alçak gerilim sistemlerinde güç kalitesi ile ilgili olarak en yaygın kullanılan güç kalitesi ile ilgili standartlar sırasıyla IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-2 ve 61000-3-4 standartlarıdır. Bu standartlara göre gerilimdeki THD miktarı 40’ıncı harmonik değerine kadar, gerilimi içeren tüm harmonik değerler için %8’den küçük olmalıdır. EN 50160 standardına göre toplam gerilim harmonik bozulma miktarı haftalık periyodun %95’inde %8’e eşit veya daha az olmalıdır. Ayrıca alçak gerilim şebeke sistemlerinde 25’inci dereceye kadar her bir iç harmonik değerinin sınırı da bu standartlarda belirtilmiştir.

IEEE 519-2014 [45] standardı, 120 V’tan 69 kV’a kadar olan şebekelerde bağlantı noktasında izin verilen akım harmonik bozulma limitlerini tanımlamıştır. Burada, akım harmonikleri için THB tanımı değil, toplam talep bozulma (TTB-Total Demand Distortion) tanımı esas alınmıştır. Bu yöntemde harmonik bileşenlerin etkisi tam yük

akımına oranlanarak bulunur. TTB miktarı, maksimum yük akımı  $I_{max}$  ve akım hamonik bileşeni  $I_h$  olmak üzere denklem (2.2)'deki gibi bulunabilir.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{max}} \quad (2.2)$$

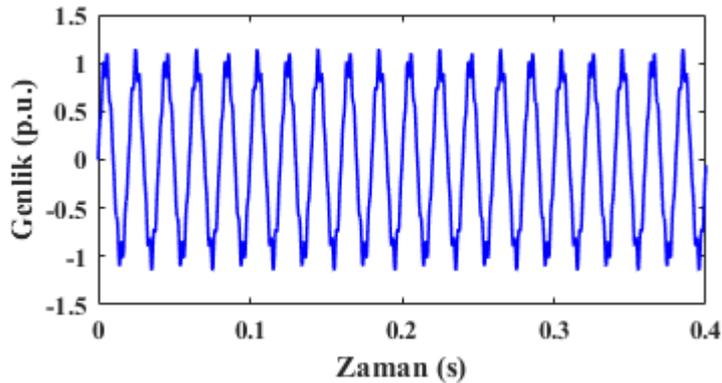
Bir güç sisteminde yüksek harmoniklerin genliği ne kadar büyükse sistemdeki nominal dalga şekli o kadar bozulmuştur. IC 61000-3-2 standartlarına göre olması gereken akım harmonik sınır değerleri Çizelge 2.4'te verilmiştir [53]. Bu değerler, alçak gerilim seviyesinden şebekeye bağlanan PV sistemler için geçerlidir.

**Çizelge 2.4 :** Akım için harmonik sınır değerleri [53].

Harmonik	2	3	5	7	9	11	13	15≤n≤39
Sınır	1,08	2,3	1,14	0,77	0,4	0,33	0,21	0,15

### 2.1.6 Kırpışma (Flicker)

Gerilim dalgalanması sonucunda oluşan kırpışma dağıtım şebekesinden bağımsız, tüketici yüklerden kaynaklanan bir güç kalitesi olayıdır. Güç kalitesi olayları arasında en sık karşılaşılan problemlerden biri olan kırpışma, güç sistemi nominal frekans ve gerilimde çalışırken, gerilimin çeşitli nedenlerden dolayı daha düşük bir frekansta ve genlikte salınmasının sonucunda oluşur. Kırpışma, bir lambada parlaklığın dalgalanmasına, manyetik çekirdeğe sahip cihazlarda arızalara ve elektrik motorlarında hız değişimlerine neden olur. Kırpışmanın büyüklüğü, gerilimdeki değişime ve bu değişimin frekansına bağlıdır. Kırpışma içeren bir gerilim sinyali Şekil 2.3'te verilmiştir. Kırpışma sınır değerleri IEEE Std. 1453-2004 ve IEC 61000-2-2 standartlarına uygun olmalıdır [54]. Ayrıca bu standartlarda, kırpışma olayının hesabı için çeşitli parametreler tanımlanmıştır.



**Şekil 2.3:** Kırpışma içeren bir gerilim dalga şekli

Standartlarla sınırları çizilen kırpışma olayı kısa dönem ve uzun dönem olmak üzere iki başlık altında incelenir.  $P_{ST}$  parametresi on dakikalık ölçümlerle elde edilen kısa dönem kırpışma yoğunluğunu belirtir. Uzun dönem kırpışma için hesaplanan  $P_{LT}$  değeri ise 2 saat boyunca onar dakika aralıklarla yapılan ölçümler sonucu elde edilen  $P_{ST}$  değerlerinden hesaplanır.

$$P_{LT} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{n=1}^{\infty} P_{ST}^3} \quad (2.3)$$

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumuna ait Elektrik Şebekesi Yönetmeliği'nde [53] 1 saat içinde 10 seferden fazla gerçekleşen hızlı gerilim değişimleri kırpışma olarak değerlendirilmiştir. IEC 61000-2-2 ve IEC 6100-3-3 standartlarına göre uzun dönem ve kısa dönem kırpışma sınır değerleri Çizelge 2.5'te verilmiştir.

**Çizelge 2.5 : Kırpışma sınır değerleri [53].**

EC 61000	PV Santral (IEC 100-3-3)	Tüketici (IEC 6100-2-2)
$P_{ST}$ (Kısa Dönem)	$\leq 1.00$	$\leq 1.00$
$P_{LT}$ (Uzun Dönem)	$\leq 0.65$	$\leq 0.80$

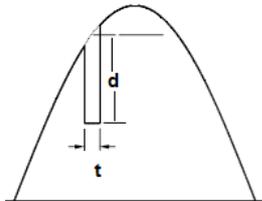
### 2.1.7 Çentik (Notch)

Çentik, şebeke frekansında çalışan bir sistemde, gerilimin bir periyodunda dönüştürücünün (konvertör) darbe sayısı kadar meydana gelen ve tekrar eden yarım periyottan kısa süreli gerilim dalga şekli bozulmasıdır [45]. Çentik etkisi ile oluşan frekans bileşenleri çok yüksek olduğundan klasik harmonik ölçüm cihazları ile tanımlanamazlar. IEEE 519-2015 [45] standardına göre çeşitli uygulama alanları ile farklı türde sistemler için çentik alan ve derinliğine bağlı sınır değerler Çizelge 2.6'daki gibidir.

**Çizelge 2.6 : Gerilimde meydana gelen çentik sınır değerleri [45].**

	Özel Uygulamalar (Hastane, Hava Limanı vb.)	Genel Sistem	Dönüştürücü Bulunduran Sistemler
Çentik Derinliği	% 10	% 20	% 50
Çentik Alanı ( $A_N$ )	16400	22800	36500

Çentik Alan ve  
Derinliği Tanımı  
(IEEE 519-2014)

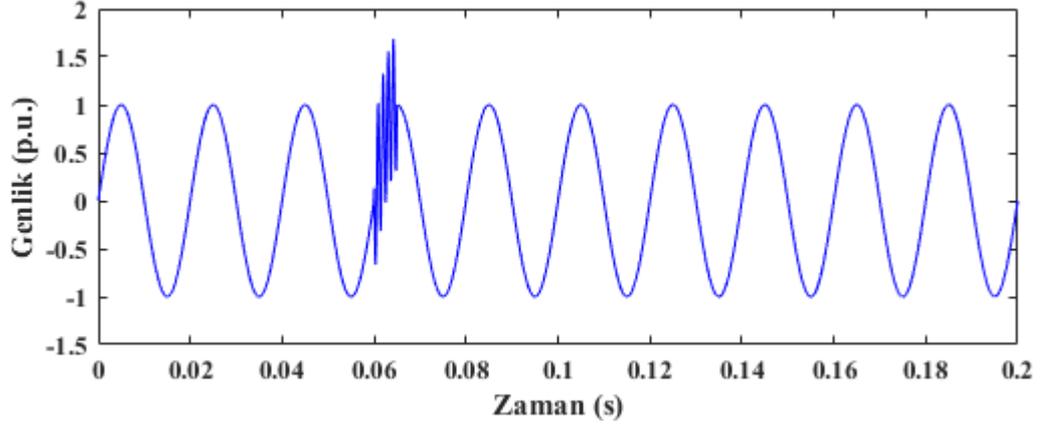


$$\% \text{ Çentik derinliği} = d/V \times 100$$

$$A_N = td = u \sec \times \text{volt}$$

### 2.1.8 Geçici durum olayları (Transients)

Geçici olaylar yüksek frekans bileşenleri içermekle beraber yarım periyottan daha kısa süren olaylardır. Bu olay sonucunda oluşan bozulmanın, genlik değeri nominal gerilimin 8 katına kadar çıkabilir. Güç sistemlerinde anlık olarak oluşan geçici durumlar, salınımlı ve darbeli olmak üzere iki grupta incelenir. Darbe sonucunda oluşan geçici durum olayları, genellikle yıldırımdan kaynaklı olup ani ve tek yönlüdür. Salınımlı geçici olaylar ise negatif ve pozitif olmak üzere çift yönlü özellik göstermekle beraber yarım periyot kadar sürebilirler. Salınımlı geçici olaylar kapasitör banklarının devreye alınması, büyük yüklerin devreden çıkarılması, hat veya transformatör enerjilendirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Salınımlı geçici durum olayı içeren gerilim dalga formu Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Geçici durum olayı içeren gerilim dalga şekli

### 2.1.9 Frekans değişimi

Frekans değişimi, güç sistemindeki frekans değerinin nominal değerinden sapmasıdır. Güç sistemdeki yük miktarı ile üretilen güç miktarının uyuşmaması frekans değişimine yol açar. Frekans değişiminin boyutu ve süresi ise yük kontrol sisteminin cevabına bağlıdır. TS EN 50160 standartlarına göre normal çalışma şartları altında şebeke bağlantılı bir PV sistemde ve şebekede yıl içindeki çalışma sürelerine göre sınır aralıkları Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Frekans ortalama değer sınırları.

TS EN 50160	Yüzde sınırı	Değer Aralığı	Çalışma Süresi
Frekans	50 Hz $\pm$ %1	49,5 Hz-50,5 Hz	%99,5
	50 Hz +%4/ -%6	47 Hz-52 Hz	%100

### 2.1.10 Doğru akım enjeksiyonu

AG şebekesine bağlı PV üretim santralindeki inverterler sisteme DC akım verebilirler. DC akım enjeksiyonu dağıtım transformatörünü doyuma götürerek dalga şeklinin nominal koşulların dışına çıkmasına neden olur. IEEE Std 929-2000 standartlarına göre inverterler üzerinden sisteme verilen bu DC akım, nominal akımın %0,5'i ile sınırlandırılmıştır [44].

### 2.1.11 Gürültü

Gürültü, bir güç sisteminde nominal akım ve gerilim dalgası üzerine binen ve istenmeyen elektriksel işaretlerdir. Gürültü olayı, güç elektroniği cihazlarından, anahtarlama güç kaynağı içeren yüklerden veya yüksek ark cihazlarından kaynaklanabilir. Özellikle mikroişlemci ve PLC gibi hassas cihazlara zarar verir.

## 2.2 Şebeke Bağlantılı PV Sistemlerde Güç Kalitesi Olaylarının Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi ve Analizi

Güç kalitesi problemlerinin tespit edilebilmesi için öncelikle arıza durumunda güç sisteminin tepkisi gözlemlenmelidir. Bu amaçla MATLAB/Simulink ortamında güç dağıtım sistemi modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen model üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar, faz-faz ve faz-toprak kısa devre arızalarını, büyük güçlü bir asenkron motora yol verilmesini, transformatör enerjilendirilmesini, kapasitör bankının enerjilendirilmesini ve lineer olmayan yük altında sistem davranışlarını içermektedir. Önerilen güç sistemi modeli gerilim çökmesi ve sıçraması, geçici durumlar, harmonikler, gerilim dalgalanmaları ve çentik oluşumu gibi güç kalitesi olaylarının incelenmesine imkan vermektedir. Güç kalitesi olaylarının sistem gerilimi üzerindeki etkisinin daha iyi gözlemlenmesi amacıyla etkin değer dönüşümü kullanılmıştır.

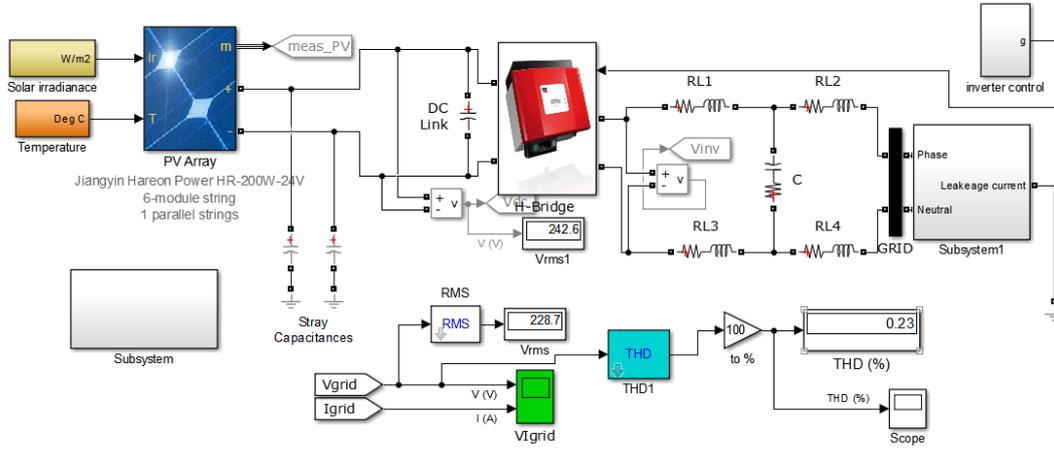
$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u(i)^2} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te M pencere genişliğini,  $u(i)$  ise i'inci örneğin dalga şeklini temsil etmektedir.

### 2.2.1 Şebeke bağlantılı PV sistemin modellenmesi

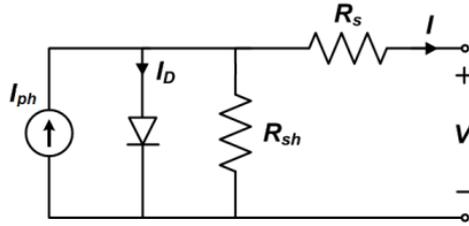
Bu bölümde, şebeke bağlantılı bir PV sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Şekil 2.5'te, geliştirilen modeli oluşturan PV dizisi, H-köprü

dönüştürücüsü, MPPT denetleyici modülü, filtreler, yük ve şebeke alt modelleri görülmektedir.



**Şekil 2.5 :** 1.2 kWp güce sahip şebeke bağlantılı PV sistem modeli

Şebeke bağlantılı PV sistem modellemesinde ilk basamak güneş pilinin modellenmesidir. Güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi, tek diyotlu model, çift diyotlu model, ampirik model ve akbaba modeli ile temsil edilebilir. Bütün bu yöntemlerin arasında tek diyotlu eşdeğer devre modeli basitliği ve yeterli doğruluğu nedeniyle en çok kullanılan yöntemdir. Bir güneş pilinin tek diyot eşdeğer devresi Şekil 2.6'da verilmiştir. Modelde  $I_{ph}$  PV hücresinin foto-akımını,  $R_{sh}$  sızıntı akımını ve  $R_s$  çıkıştaki gerilim düşümünü temsil etmektedir.



**Şekil 2.6 :** Güneş piline ait tek diyot devre modeli

Şekil 2.6'da verilen güneş hücresi eşdeğer devresinde Kirchoff gerilim yasası, denklem 2.3'deki kaynak akım ifadesini elde etmek için uygulanır. Çıkış gerilimi ( $V_{pv}$ ) ile akım arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile açıklanabilir:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_{pv} + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Burada  $I_{ph}$  güneş hücresi akımını,  $I_0$  güneş hücresi ters doyum akımını,  $q$  elektron yükünü ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),  $A$  idealite faktörünü,  $k$  Boltzmann sabitini ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı ifade eder.

Tek bir güneş hücresinin verimliliğine bağlı olarak çıkış gücü birkaç watt seviyesindedir. Bu nedenle çok sayıda güneş hücresi seri veya paralel bağlanarak istenen gerilim ve güç değerine ulaşılabilir. Güneş hücreleri PV modülleri oluşturmak için birleştirilir. Bir PV modülün çıkış gerilimi ile çıkış akımı arasındaki ilişki denklem 2.4'teki gibidir.

$$I = N_{pc} \left\{ I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_{pv} + IR_s)}{AkTN_{sc}} \right] - 1 \right\} \right\} - \left( \frac{V_{pv} + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te  $N_{pc}$  seri bağlı hücrelerin sayısı,  $N_{sc}$  ise paralel bağlı hücrelerin sayısıdır.

Güneş modüllerinden oluşan bir PV panelin çıkış gücü solar radyasyon yoğunluğunun ve çevre sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Genel olarak, I-V değerlerini bulmak için çeşitli matematiksel hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Denklem (2.3) ve (2.4) kullanılarak, PV panelin I-V karakteristiği kolayca elde edilebilir.

$$I_{new} = I_r + \left[ \alpha \left( \frac{G}{G_r} \right) (T_m - T_{mr}) + \left( \frac{G}{G_r} - 1 \right) I_{sc} \right] \quad (2.5)$$

$$\Delta I = \left[ \alpha \left( \frac{G}{G_r} \right) (T_m - T_{mr}) + \left( \frac{G}{G_r} - 1 \right) I_{sc} \right] \quad (2.6)$$

$$V_{new} = -\beta (T_m - T_{mr}) - R_s \Delta I + V_r \quad (2.7)$$

Burada sırasıyla  $G$  ve  $G_r$  ( $W/m^2$ ) değerleri etkin ve referans solar radyasyon yoğunluğudur.  $T_m$  ve  $T_{mr}$  (Kelvin) ise sırasıyla PV modülün etkin ve referans sıcaklığını temsil etmektedir. Bu denklemlerde  $I_r$  ve  $V_r$ , I-V eğrisini belirten referans akım ve gerilim değerleridir.  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları akımın ve gerilimin sıcaklık katsayılarıdır.

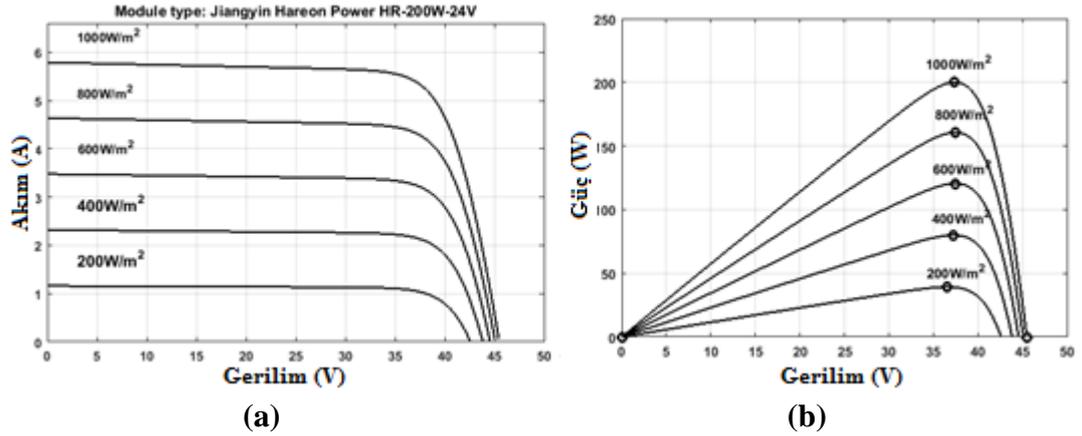
İnverter kontrol sistemi, maksimum güç noktası takibini (MPPT) gerçekleştirirken, tasarlanan gerilim ve akım regülasyonu ile de şebeke ile senkronizasyonunun sağlanmasını gerçekleştirir. MPPT için literatürde çok sayıda yöntem önerilmiştir. MPTT takibi için bu çalışmada basit ve güvenilir bir metot olan Değiştir-Gözle (P&O) algoritması kullanılmıştır. İnverter içine gömülü olan P&O algoritması, PV diziden maksimum güç çıkışı verecek bir gerilim elde etmek için gerilim regülatörünün referans sinyalini belirtilen yönde yukarı veya aşağıya doğru değiştirme prensibine dayanır.

Geliştirilen sistem modeli, farklı sıcaklık, radyasyon ve yük altında test edilmiştir. Bu amaçla, Bursa Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Akıllı Şebekeler Laboratuvarı'nda bulunan Jiangyin HR-200W-24V tipi güneş panelleri, Matlab/Simulink ortamında modellenmek üzere seçilmiş olup PV panelin parametreleri Çizelge 2.8'de verilmiştir.

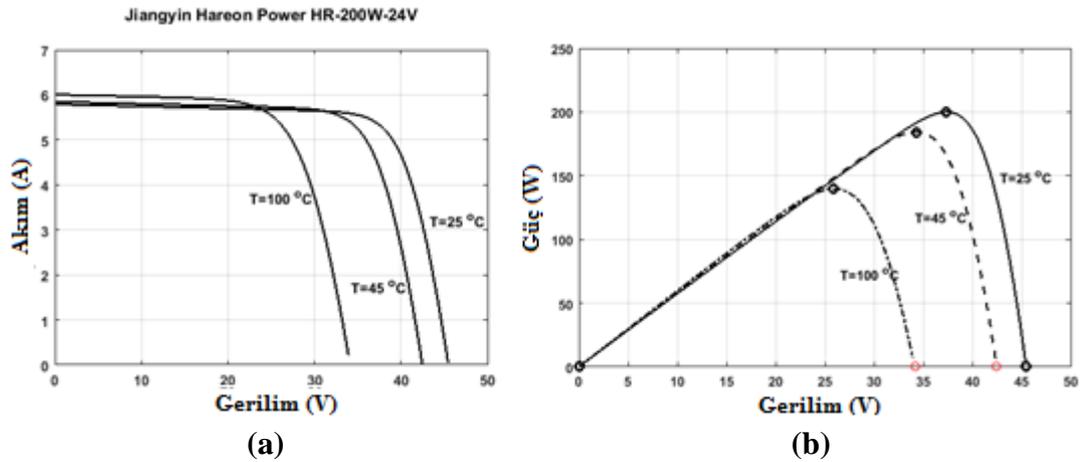
**Çizelge 2.8 :** HR-200W-24V tipi güneş panelinin etiket parametreleri.

Maksimum Güç (Pmax)	200 W	Kısa Devre Akımı (Isc)	5.79 A
MPP Gerilimi (Vmpp)	37.39 V	Açık Devre Gerilimi (Voc)	45.5 V
MPP akımı (Impp)	5.35 A	Modüldeki Pil Sayısı	72
$\beta$	-0.33	$\alpha$	0.05

Farklı sıcaklık ve solar radyasyon (ışınım) değerlerinde elde edilen HR-200W-24V güneş paneline ait akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri sırasıyla Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmiştir.



**Şekil 2.6 :** Farklı ışınlam değerleri için seçilen PV panelde (a) I-V ve (b) P-V eğrileri



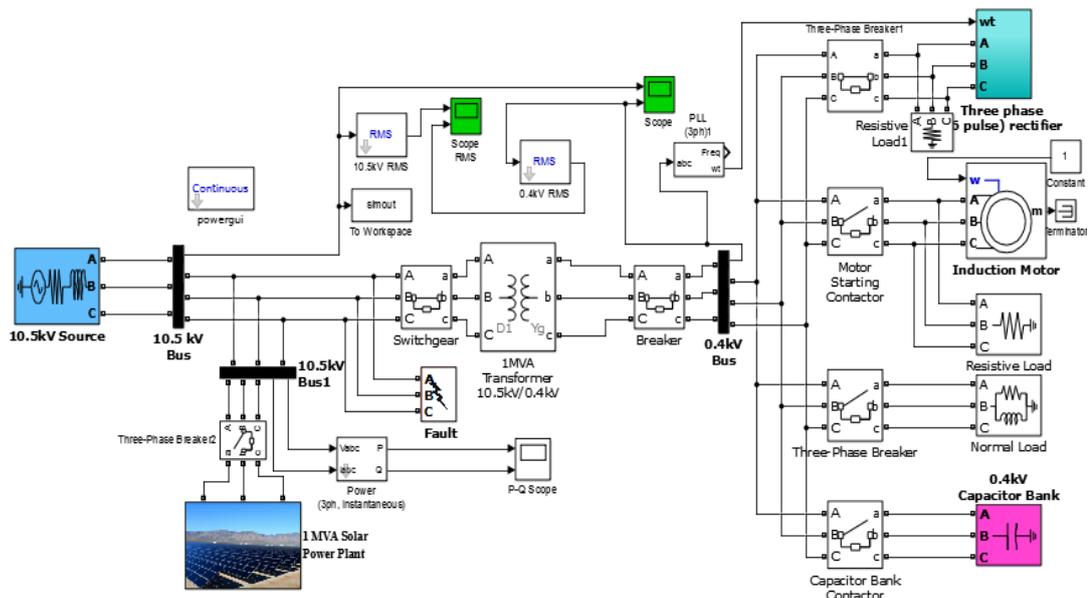
**Şekil 2.7 :** Farklı sıcaklık değerleri için PV panele ait (a) I-V ve (b) P-V eğrileri

Ayrıca Matlab/Simulink ortamında modellenen şebeke bağlantılı PV sistem için akım ve gerilim harmonikleri ile kırpışma etkilerinin 5 kVA yük bağlı durumda sisteme etkisi araştırılmıştır. İncelemeler sonucunda yükün nominal değerlerde sürüldüğü, gerilimin etkin değerinin şebeke koşullarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Sistemin kısa süreli kırpışma değerleri standartlarla uyumlu olup gerilimdeki THD miktarı ise %0,23'tür. Gerilim ve akım harmonikleri başta olmak üzere güç kalitesi parametreleri geliştirilen model ile incelenebilmektedir.

## 2.2.2 Gerçekleştirilen güç dağıtım sistemi modeli

Şebeke bağlantılı PV sistemlerde güç kalitesi olaylarının tespit edilebilmesi için öncelikle arıza durumunda güç sisteminin verdiği tepki gözlemlenmelidir. Gerçekleştirilen güç dağıtım sistemi modeli simülasyonları, faz-faz ve faz-toprak kısa devre arızalarını, büyük güçlü bir asenkron motora yol verilmesini, transformatör enerjilendirilmesini, kapasitör bankının devreye alınmasını ve lineer olmayan yük altında sistem davranışlarını içermektedir. Önerilen güç sistemi modeli gerilim çökmesi ve sıçraması, geçici durumlar, harmonikler, gerilim dalgalanmaları ve çentik oluşumu gibi güç kalitesi olaylarının incelenmesine imkân vermektedir.

Önerilen güç dağıtım sistemi modeli Şekil 2.8'de verilmiştir. 1 MWp güce sahip bir PV santralden alınan gerilim DC link üzerinden inverter girişine aktarılmış ve inverter çıkışı LCL filtreden geçirilerek ortak bağlantı noktasından (Bus1) ana şebekeye bağlanmıştır.

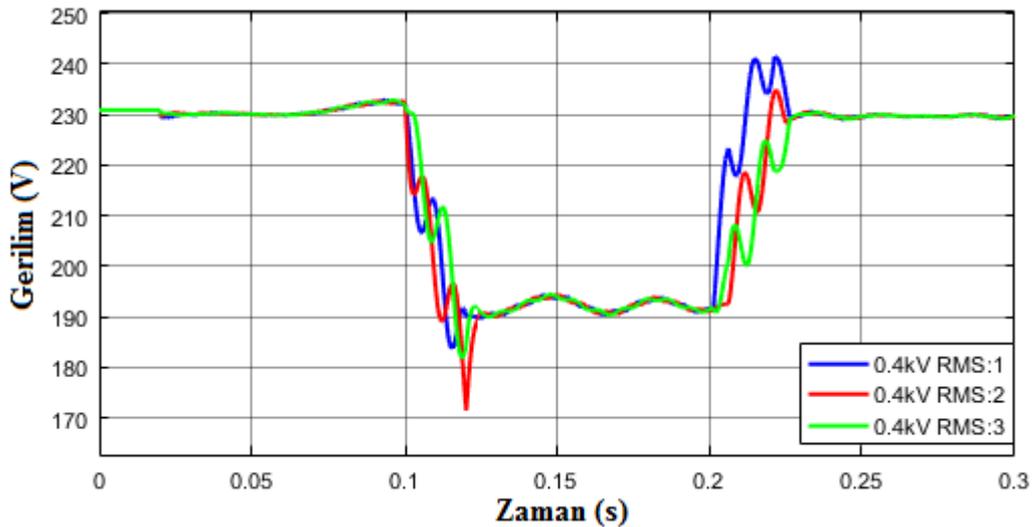


Şekil 2.8 : Geliştirilen güç dağıtım sistemi modeli

Güç dağıtım sistemi modeli 10 MVA ve 10,5 kV'luk ana şebeke hattı, 1 MWp'lik şebeke bağlantılı PV santral, iki sarımlı üçgen/yıldız bağlı düşürücü transformatör, indüktif ve rezistif yükler, sincap kafes asenkron motor, büyük güçlü kapasitör bankı ve üç fazlı lineer olmayan bir yükten oluşmaktadır. 10,5 kV/0,4 kV'luk transformatör üzerinden üç fazlı lineer olmayan (20 kVA RL) bir yük ve normal (150 kVA RL) bir yük, sincap kafesli 160 kW indüksiyon motoru beslemektedir. 0,4 kV yük barasına ayrıca 50 kVA güce sahip bir kapasitör bankı bağlanmıştır.

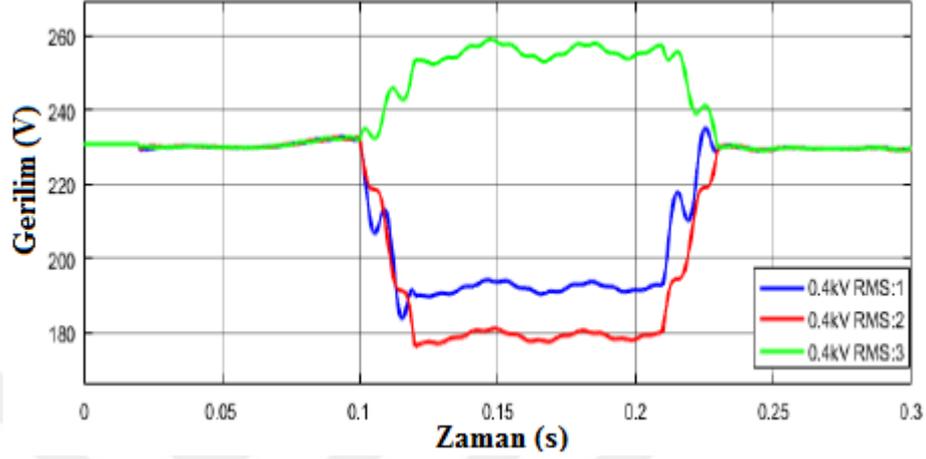
Çalışmanın bu bölümünde, şebeke bağlantılı PV sistemin ana şebekeye ve diğer elektriksel donanımlara, güç kalitesi problemleri içeren arıza veya güç sistemi manevra olayları sonucunda verdiği tepkisi incelenmektedir. Öncelikle güç sistemi modeli oluşturulmuş, sonrasında geliştirilen model üzerinde arıza olayları, farklı yük durumlarındaki sistem tepkileri ve yapılan manevralar sonucunda meydana gelen değişimler için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model üzerinde gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, geçici durum olayları, gerilim harmonikleri, gerilim dalgalanmaları ve çentik oluşumu gibi güç kalitesi olayları gözlemlenebilmektedir.

Üç fazlı sistemlerde fazlar arasında ve fazlarla toprak arasında olan arızalar simetrik ve asimetrik arızalar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Şekil 2.9'da 0,15 ve 0,25 saniyeleri arasında üç fazın birbiriyle kısa devre olması sonucu oluşan arıza sonucundaki gerilimlerin etkin değerleri görülmektedir. Gözlemlenen gerilim değerleri AG barasındaki değerlerdir. A, B ve C fazları benzer şekilde bir etki gösterdiğinden simetrik bir arıza oluşumu söz konusudur.



Şekil 2.9 : Üç faz kısa devre arızası sonucunda oluşan gerilimlerin etkin değerleri

Şekil 2.10'da A-B fazları arasında 0,1 ve 0,2 saniyeleri arasında oluşan arıza için oluşturulan modelde kısa devre arıza direnci 7 ohm seçilmiştir. C faz geriliminin etkin değeri az da olsa yükselirken (gerilim sıçraması), A ve C fazlarında ise gerilim çökmesi gözlemlenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi iki faz arızaları, tek faz ve iki faz toprak arızaları asimetrik özellik göstermektedir.



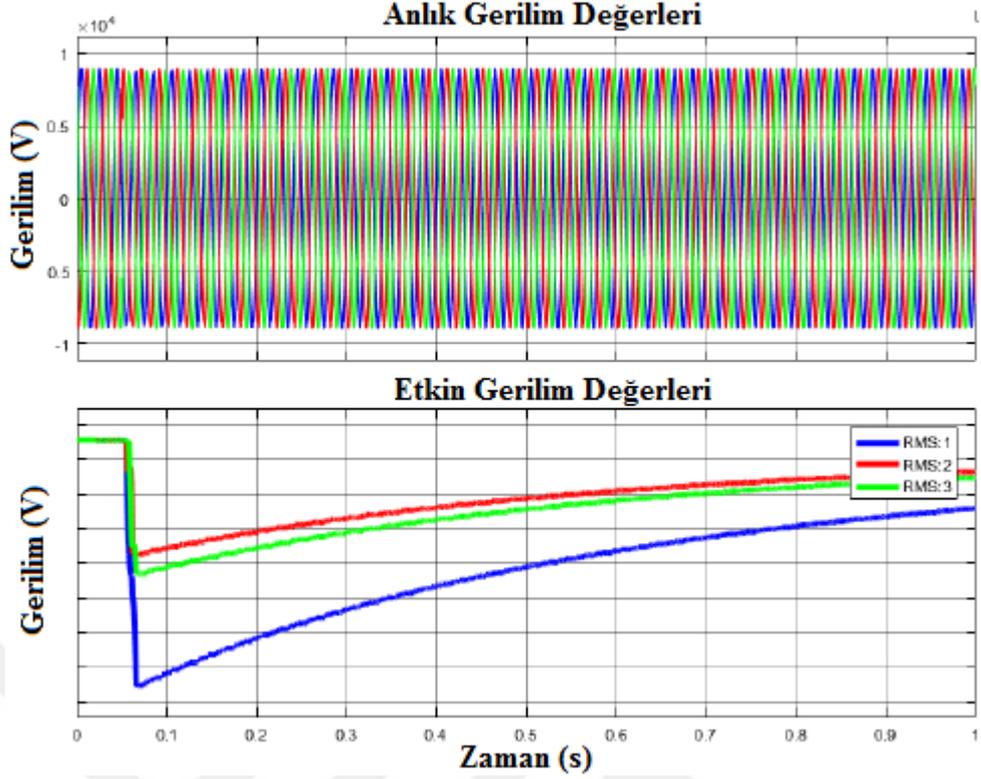
Şekil 2.10 : A-B faz-faz arızası sonucunda oluşan gerilimlerin etkin değerleri

Transformatör enerjilendirilmesi sonucunda oluşan gerilim çökmesinin gözlemlenmesi amacıyla model üzerinden gerçekleştirilen simülasyonda, 0,05'inci saniyede transformatör devreye alınmıştır. Oluşan gerilim çökmesine ait gerilim dalga şekilleri ve harmonik bozulmanın tespitinde kullanılan Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) analizi sırasıyla Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de görülmektedir.

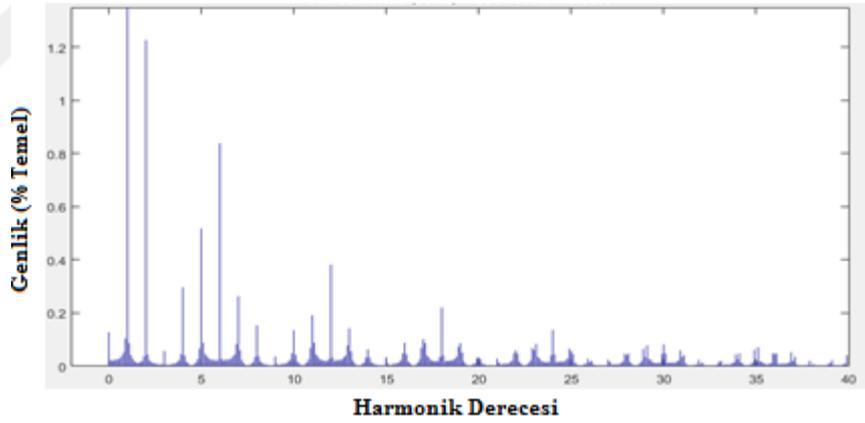
A, B ve C fazlarına ait faz açılarının farklı olması nedeniyle gerilim çökmelerinin boyutlarında ve toparlanma süresinde farklılık gözlemlenmiştir. Sistem geriliminde ani bir düşüş ve bunu takiben yavaş bir toparlanma süreci söz konusudur.

Transformatör enerjilendirilmesi sonucunda oluşan gerilim çökmesinin asıl sebebi ise oluşan darbe akımı ve çekirdeğin doyuma gitmesidir. Simülasyon çalışmalarında transformatör gücü veya hat gücü arttırıldığında gerilim çökmesinin daha büyük boyutta olduğu gözlemlenmiştir.

2 Hz ve 10 periyot pencere ayarı kullanılarak yapılan HFD analizinde 2'inci, 6'ıncı, 12'inci, 18'inci ve 24'üncü harmoniklerin transformatörün enerjilendirilmesinden en çok etkilenen harmonik bileşenler olduğu görülmüştür.



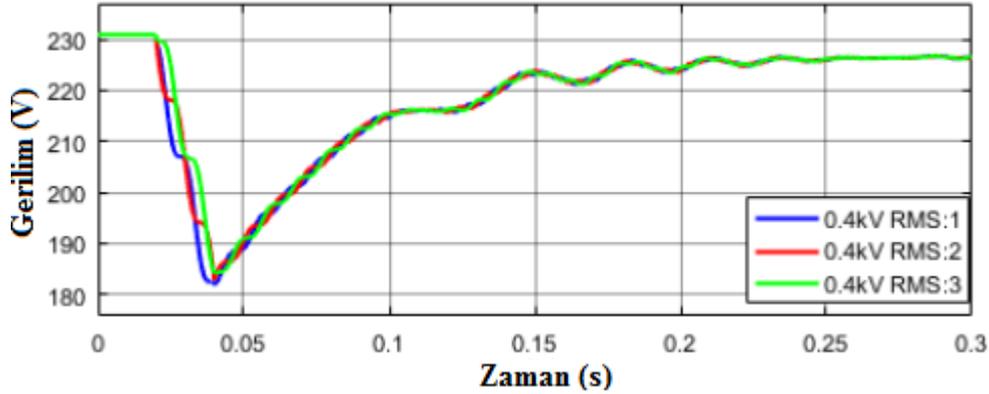
**Şekil 2.11 :** Transformatör enerjilendirilmesi sonucunda A, B ve C fazlarının anlık ve etkin değerlerindeki değişim



**Şekil 2.12 :** Transformatör enerjilendirilmesi olayının harmonik analizi

Asenkron motorun devreye alınması sonucunda 400 V alçak gerilim barasında oluşan A, B ve C fazlarına ait gerilim dalga şekilleri Şekil 2.13'te görülmektedir. Model üzerinden gerçekleştirilen simülasyonun süresi 4 saniye olup 0,02'inci saniyede asenkron motor, kendine ait kesicinin kapanması ile devreye alınmıştır. Oluşan gerilim çökmesi sonucunda 400 V değerli barada gerilim etkin değerlerinde yaklaşık %20'lik bir düşüş meydana gelmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları çökme miktarının motorun gücüne bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Oluşan arıza

transformatör enerjilendirilmesinden farklı olarak dengeli bir dağılışı göstermiş olup, 3 faz gerilimi de benzer bir davranışı göstermiştir.



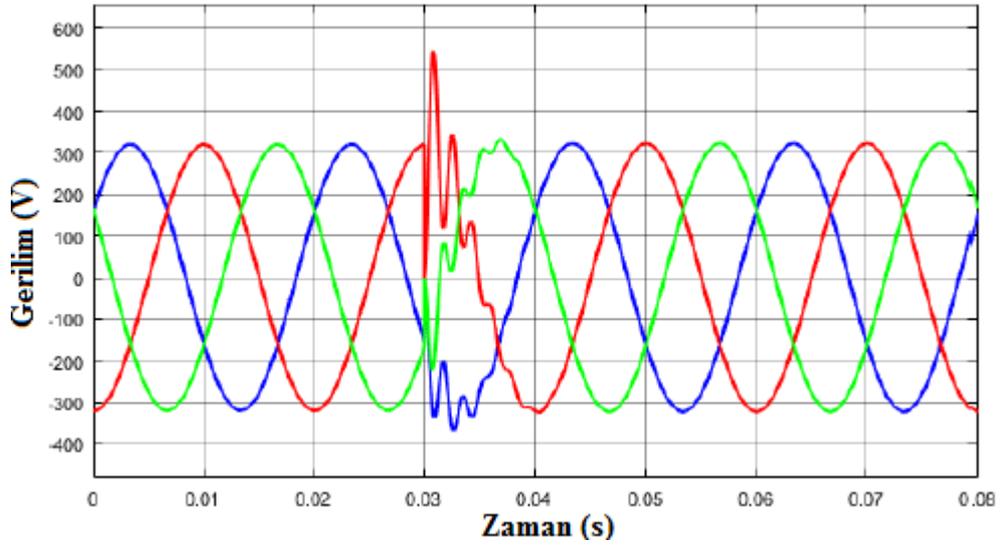
**Şekil 2.13** : Asenkron motorun devreye alınması sonucunda alçak gerilim barasındaki gerilim dalga şekilleri

Kapasitör bankının devreye alınması sonucu oluşacak güç kalitesi değişiminin gözlemlenmesi amacıyla oluşturulan 0,08 saniye süreli simülasyonda, 400 V alçak gerilim barasında bulunan 0,4 kV değere sahip kapasitör bankı 0,03'üncü saniyede devreye alınmıştır (Şekil 2.14). Anahtarlama sonucunda A, B ve C fazlarında geçici olay oluşumu gözlemlenmiştir.

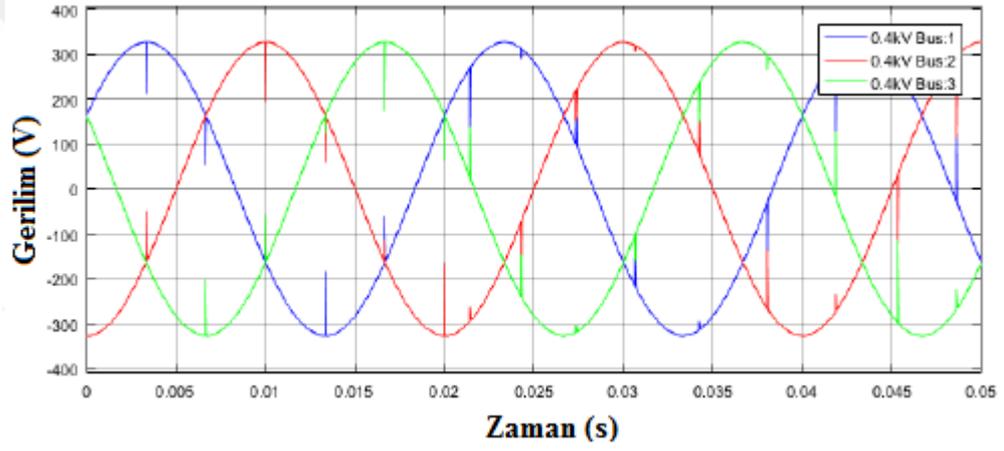
Kısa süreli oluşan geçici olayda gerilimin etkin değeri B fazında iki katın üstünde artış göstermiştir. İlk yükselme anında sonra ise bu salınım gerilimde artış ve azalışlar olarak devam ederek en son nominal değerde oturmuştur.

Gerilim geçici frekansı kapasitör bankının büyüklüğüne bağlıdır. Büyük boyuttaki kapasitör bankı daha düşük değerde gerilim geçici frekansına neden olur. Büyük güçte yük daha yüksek sönümlenme faktörü sağlar. Böylece geçici salınımlar daha hızlı sönümlenir.

Çentik oluşumunun gözlemlenmesi için üç fazlı anahtarlama bir dönüştürücü üzerinden lineer olmayan karakteristikte bir yük beslenmiştir. Her bir darbeye benzer bir derinliğe ve süreye sahip çentiklerin oluştuğu Şekil 2.15'te görülmektedir. Çentik oluşumu sonucunda alınan HFD'de 5'inci, 7'inci, 11'inci ve 13'üncü harmonik değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Gerilim çentiğinin yeri ve derinliği, konvertörün tetikleme açısı ve kontrolüne bağlıdır. Çentik genişliği ise indüktif yük miktarına bağlıdır ve yük miktarı arttıkça artar.



**Şekil 2.14** : Kapasitör bankının devreye alınması sonucunda alçak gerilim barasındaki üç faza ait gerilim dalga şekilleri



**Şekil 2.15** : Lineer olmayan yük için çentik oluşumu

### 3. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE GÜÇ KALİTESİ OLAYLARININ TESPİTİ

Son yıllarda örüntü tanıma uygulamalarında sıkça kullanılan, temelleri A. Haar [64] tarafından atılan dalgacık dönüşümü (DD) yöntemi, veriyi farklı ölçek ve çözünürlükte işleme yeteneğine sahip, bir sinyal işleme yöntemidir. Bu tez çalışmasında güç kalitesi olay işaretlerinin analizinde ve tespitinde DD yöntemi kullanılmıştır.

DD yöntemi, Fourier Dönüşümü (FD) yönteminin aksine olay işaretini ölçek-frekans çerçevesinde değerlendirdiğinden içinde zaman bilgisini de barındırır. Ayrıca Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) yönteminde sinyal işaretine uygulanan sabit olan pencere boyutu, DD yönteminde değişken özellik kazanır. Doğal olarak KSFD ile yapılan analizde pencere boyutu tüm frekans değerleri için sabit kalırken DD ile yapılan analiz daha esnek yapıdadır. Güç kalitesi olay işaretleri hem yüksek frekansta hem de düşük frekansta bozucu işaretler içerebilir. Güç kalitesi olay sinyallerinin içerdiği farklı frekanstaki işaret bileşenleri nedeniyle, FD ve KSFD yöntemi yerine tez çalışmasında DD yöntemi tercih edilmiştir.

Tezin bu bölümünde DD dönüşümün daha iyi anlaşılması için öncelikle FD ve KSFD yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Daha sonra dalgacık kuramı, dalgacık türleri ve DD yöntemleri ele alınmıştır. Son olarak da güç sisteminde meydana gelen Güç kalitesi olayları MATLAB/Wavelet Toolbox ortamında DD yöntemleri ile analiz edilmiştir.

#### 3.1 Fourier Dönüşümü Temelli Yöntemler

Joseph Fourier tarafından temelleri atılan ve günümüzde en çok kullanılan sinyal işleme tekniği olan FD yöntemi, sinyal işaretini farklı frekanslardaki sinüs dalga formlarına ayırarak, sinyalin zaman-frekans bölgeleri arasında bir ilişki sağlar. Yani zaman tabanlı sinyalin, frekans bölgesindeki karşılığı Fourier dönüşümü ile bulunur. Fourier dönüşüm formülü, denklem (3.1)'de belirtilmiştir.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt, \quad \omega \in (-\infty, \infty) \quad (3.1)$$

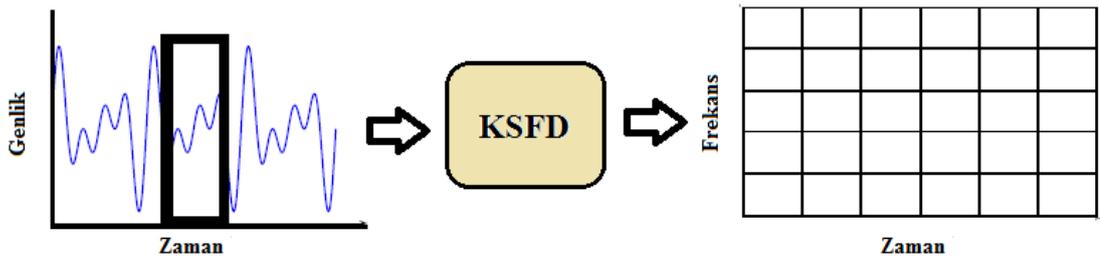
Sinyal işaretine genel bir yaklaşım sağlayan FD sonuçları, frekans bileşenlerinin lokal olarak incelenmesine imkan vermemektedir. Bu nedenle FD yöntemi harmonik oluşumu, DA enjeksiyonu ve gürültü oluşumu gibi durağan ve sürekli sinyallerde olumlu sonuç verirken, kısa süreli gerilim değişimleri ve geçici durum olaylarında sinyalin zamanla değişken olması ve ani değişimler barındırması nedeniyle kullanılamamaktadır.

FD yöntemi ile değişken özellik taşıyan sinyallerin incelenememe sorunu, Dennis Gabor (1946) tarafından ilk kez kullanılan sinyalin daha küçük bileşenlere ayrılarak incelenmesini sağlayan pencereleme yöntemi ile giderilmiştir. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) adı verilen bu dönüşümde sinyal, pencereleme işlemi ile kısa süreli işaretlere ayrılır ve her bir pencere için FD hesaplanır. KSFD formülü, denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\omega(t - \tau)e^{-j\omega t} dt, \quad \omega \in (-\infty, \infty) \quad (3.2)$$

Burada  $f(t)$  sinyali, analiz için kullanıcı tarafından seçilen  $\omega(t - \tau)$  kayan pencere fonksiyonunu çarparak zaman-frekans düzleminde haritalar. Güç kalitesi olaylarının analizinde sıkça kullanılan pencere fonksiyonları ise Bartlett, Hanning, Kaiser, dikdörtgen ve üçgen pencere fonksiyonlarıdır.

KSFD, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi zaman ve frekans arasında tam bir ilişki kurup pencereleme boyutuna bağlı olarak sinyalin hangi zamanda hangi frekansla oluştuğunun bilinmesine imkan sağlar. Kullanılan pencere boyutu sabit olup pencere boyutu büyüdükçe sinyalin frekans çözünürlüğü artarken pencere boyutu küçüldükçe zaman çözünürlüğü artar. KSFD yöntemi ile bir işaretin hem yüksek hem de alçak frekanslı bileşenlerinin aynı anda incelenmesi mümkün değildir. Bu da KSFD yönteminin en büyük dezavantajıdır.

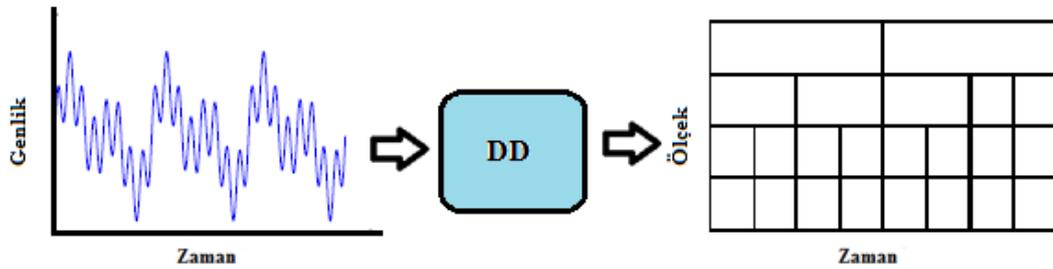


**Şekil 3.1** : Kısa süreli Fourier dönüşümü

### 3.2 Dalgacık Dönüşümü Yöntemi

Son yıllarda örüntü tanıma uygulamalarında sıkça kullanılan, temelleri A. Haar [64] tarafından atılan dalgacık dönüşümü (DD) yöntemi, veriyi farklı ölçek ve çözünürlükte işleme yeteneğine sahip bir sinyal işleme yöntemidir. DD yöntemi, güç kalitesi olaylarının tespitinde diğer sinyal işleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı yüksek dereceli türevlerdeki süreksizlikleri ve sinyaldeki ani değişimleri lokal olarak inceleyebilir.

FD yönteminde olay sinyali genlik-frekans bölgesinde incelenebildiğinden, işaretin zaman bilgisi kaybolur. Bu nedenle FD harmonik oluşumu gibi durağan sinyallerde olumlu sonuç verirken, kısa süreli gerilim değişimleri ve geçici durum olaylarında kullanılamamaktadır. KSFD ise durağan olmayan sinyallerde sonuç vermesine rağmen pencereleme işleminde kullanılan ölçeğin sabit olması, sinyalin hem düşük frekanslı hem de yüksek frekanslı bileşenlerini aynı anda analiz etmeyi imkânsız kılmaktadır [36]. DD yönteminde, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi bu iki yöntemden farklı olarak sinyal zaman-ölçek ekseninde analiz edilerek daha esnek bir gösterim elde edilmektedir. Esnek bir zaman-frekans gösteriminden kasıt işarete uygulanan DD’de harmonik vb. düşük frekans eğilimli bileşenleri açmak için geniş pencere, geçici rejim olayları vb. yüksek frekans eğilimli bileşenleri açmak için dar bir pencere kullanımına izin vermesidir.



Şekil 3.2 : Dalgacık dönüşümü yöntemi

1909 yılında Alfred Haar tarafından tanımlanan ve ilk dalgacık fonksiyonu olarak değerlendirilen dalgacık Haar dalgacıdır. Haar dalgacı ilk kez P. Levy tarafından parçacıkların rastlantısal hareketinin modellenmesinde FD yönteminin yerine kullanılmıştır. DD yönteminin tanımı ise Marsilya Teorik Fizik Merkezi'nde çalışan A. Grossman ve Morlet tarafından yapılarak DD yönteminin matematiksel temeli oluşturulmuştur [55]. Stephane Mallat ve Ingrid Daubechies 1989 yılında yaptıkları

çalışmalarında ayrık sinyal dönüşümünün matematiksel temelini oluşturmuştur. Mallat tarafından ortaya atılan DD ile yüksek ve alçak geçiren filtre kullanarak bir işareti ikiden fazla alt frekans değerine ayrıştırmaya yarayan çok çözünürlüklü ayrıştırma yöntemi günümüzde de en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Daha sonrasında R. Coifman ve V. Wickerhauser tarafından çok çözünürlüklü ayrıştırmanın devamı niteliğinde olan dalgacık paket dönüşümü geliştirilmiştir [56].

KSFD yönteminde kullanılan pencere kavramının yerine, DD yönteminde dalgacık denilen ölçeklenebilir pencere kavramı kullanılır. Ana dalgacıklar, FD yöntemindeki sinüs işaretiyle farklı olarak sonlu olup, asimetric ve düzensiz özellik gösterir. Analiz yapılırken pencere fonksiyonu yerine kullanılan ana dalgacık fonksiyonu ( $\psi(x)$ ), ölçeklendirilir ve kaydırılır. Kullanılan dalgacık fonksiyonu yüksek frekanslı sinyal incelemesinde kısa süreli, düşük frekans değerlerinde ise uzun süreli oluşturulursa sinyal hakkında daha net bir bilgi verebilir. Oluşturulan fonksiyona dalgacık fonksiyonu denilmesi için fonksiyonun integrali sıfır olmalıdır ve aynı fonksiyonun karesinin integrali bir olmalıdır [57].

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.3)$$

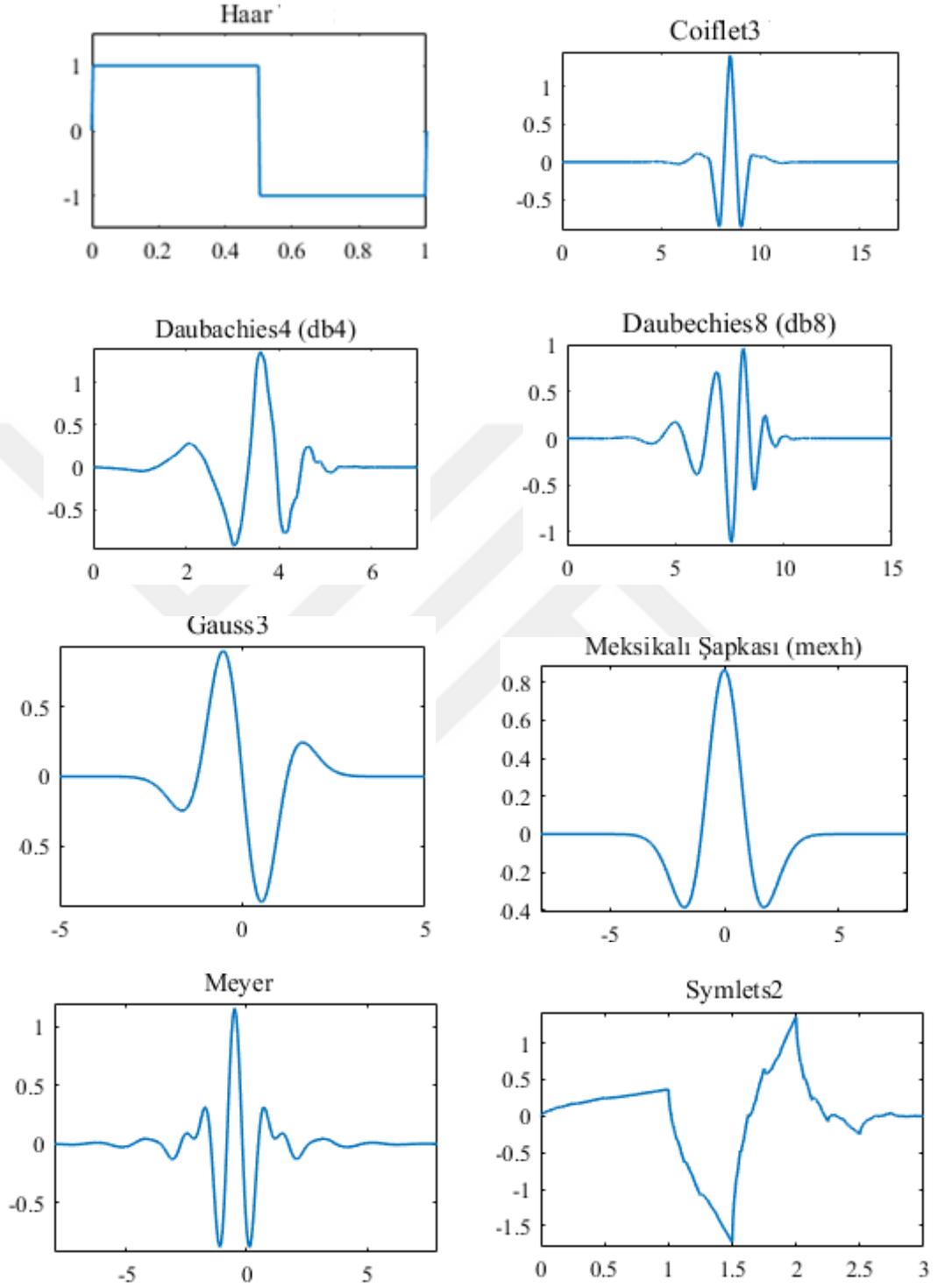
$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t) dt = 1 \quad (3.4)$$

Haar dalgacığının matematiksel ifadesi denklem (3.5)'te verilmiştir.

$$\psi_{Haar}(t) = \begin{cases} -1/\sqrt{2}, & -1 < x \leq 0 \\ 1/\sqrt{2}, & 0 < x \leq 1 \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.5)$$

Matematiksel ifade şartlarını sağlayan en basit fonksiyon olan Haar dalgacığı aynı zamanda Daubechies dalgacığının (dbN) özel bir tanımıdır. Ingrid Daubechies tarafından bulunan bu dalgacık türü güç kalitesi olaylarında ve arıza tespitinde özellikle ayrık dalgacık dönüşümü uygulamalarında en sık kullanılan türdür. Dalgacık numarası büyüdükçe dalgacık zaman ekseninde daha sık görüleceğinden

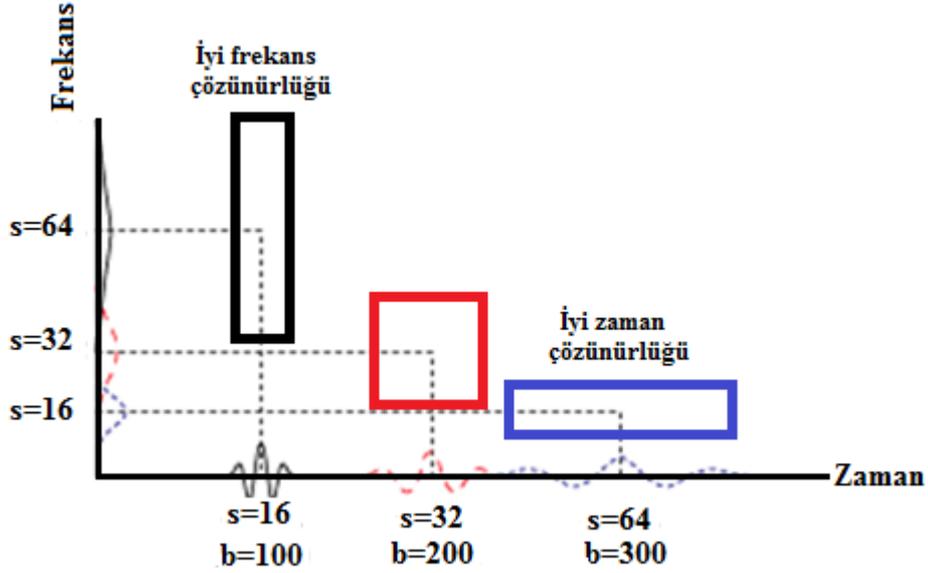
geçici rejim olayları gibi yüksek frekans taşıyan olayların tespiti kolaylaşmaktadır. Uygulamalarda sıkça kullanılan dalgacık fonksiyonları Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Uygulamalarda sıkça kullanılan dalgacık fonksiyonları

Şekil 3.4'te DD için kullanılan dalgacıkların zaman-frekans gösterimi verilmiştir. Burada s ve b parametreleri sırasıyla ölçek ve öteleme miktarlarına karşılık gelmektedir.

Ölçek miktarının artması (dalgacığın genişlemesi) düşük frekans eğilimlerini ortaya çıkarırken aksi durumda yüksek frekans eğilimleri elde edilir.



Şekil 3.4 : Dalgacık zaman-frekans gösterimi

### 3.2.1 Sürekli dalgacık dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), ötelenmiş bir dalgacık fonksiyonunun ölçekleme miktarı ile çarpıldıktan sonra tüm zaman boyunca çarpılmasıyla elde edilir [58]. Çarpım sonucunda çok sayıda dalgacık katsayısı oluşur. Öteleme miktarı b, ölçekleme miktarı s olmak üzere sürekli dalgacık fonksiyonu ( $\psi_{s,b}$ ) denklem (3,6)'daki gibi olur. Öteleme pozitif reel sayı, kaydırma faktörü gerçek sayı olmalıdır.

$$\psi_{s,b} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-b}{s}\right) \quad (3.6)$$

Dalgacık fonksiyonu kullanılarak, SDD denklem (3.7)'deki gibi hesaplanır.

$$SDD(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{s}\right) dt \quad (3.7)$$

Burada  $f(t)$  sinyal işaretidir. Öteleme (zaman) ve ölçekleme parametreleri farklı frekans değerlerinde analiz için ayrışım filtrelerini temsil eder. Öteleme parametresi (b) 0'dan büyükse sinyal sağa, 0'dan küçükse sola doğru kayar. Ölçekleme parametresi (s) ise 1'den büyükse zaman ekseninde fonksiyon büyür ve sinyalin genlik değeri düşer. Aksi durumda zaman ekseninde fonksiyon daralır ve sinyal

genliği küçölür. Ana dalgacık seçimi uygulamadan uygulamaya farklılık gösterirken, sinyal ile dalgacık arasındaki benzerlik oranı arttıkça (korelasyon) doğruluk artar.

Bir sinyal işaretine SDD uygulanırken ana dalgacık zaman eksenini boyunca öteleme değeri bağlı olarak kaydırılır. Her kaydırma işleminde dalgacık ile sinyal işareti arasındaki benzerlik katsayısı hesaplanır. Tüm sinyal kaplanana kadar katsayı bulma işlemi devam ettirildikten sonra, dalgacık ölçeği değiştirilerek her bir ölçek değeri için aynı adımlar tekrar edilir.

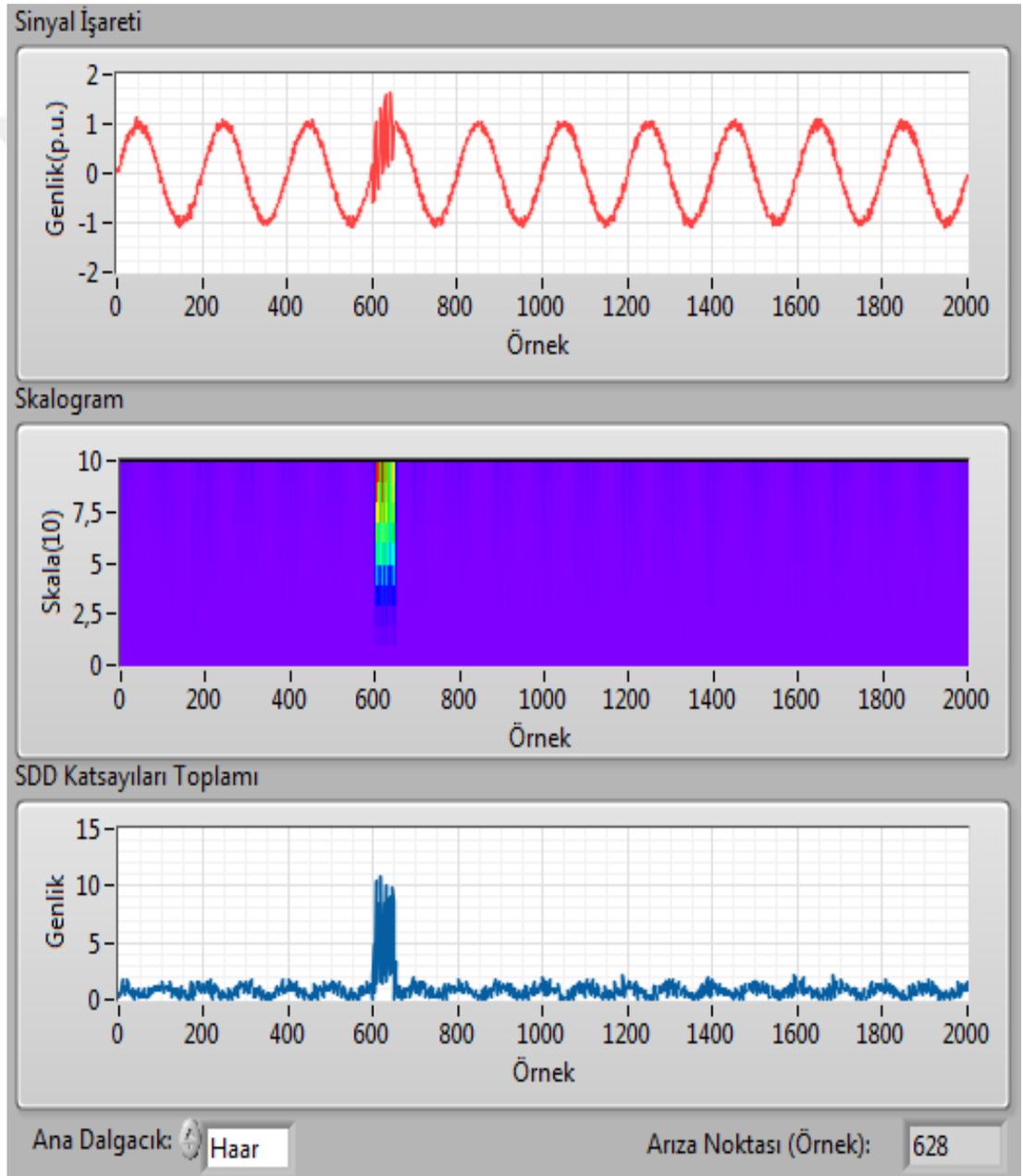
SDD yöntemi ile arıza tespitine örnek vermek için geçici rejim olayı ele alınmıştır. Geçici rejim olayının tespiti için önce sinyalin SDD'si, Haar dalgacıkları kullanılarak alınır. Daha sonra SDD katsayılarının kareleri hesaplanır ve skalogram (dalgacık güç spektrumu) grafiği oluşturulur. Arıza noktasının tam olarak tespiti için ise SDD katsayıları ölçek eksenini üzerinde biriktirilerek kümölasyon grafiği elde edilir. Son aşamada ise SDD katsayıları kümölasyon grafiğindeki tepe değeri tespit edilir. Tespit edilen tepe değeri arıza noktalarını vermektedir.

Sinyal işareti üzerinde SDD yöntemi ile yapılan analizde katsayılar arıza anında ve yüksek gürültü değeriinde daha büyük değeri alır. Katsayılar, arıza noktalarında tüm ölçeklerde pozitif ve negatif değeri alır. Gürültü durumunda ise ortaya çıkan katsayılar bazı ölçeklerde pozitif diğer ölçeklerde negatif değeri alır. SDD katsayıları kümölasyon grafiğinde olduğu gibi katsayılar tüm ölçeklerde biriktirilirse farklı ölçeklerdeki gürültü katsayıları birbirini sönmeler. Aynı zamanda arıza noktalarına karşılık gelen katsayı değeri genişler. SDD katsayıları kümölasyon grafiğindeki tepe değeri, gürültü katsayılarının birbirini sönmelerinden dolayı sadece arıza anına karşılık gelmektedir.

Şekil 3.5'te geçici durum olayına ait gerilim sinyali için SDD analizi gerçekleştirilmiştir. 50 Hz şebeke frekansında olan normalize edilmiş sinyalde örnekleme frekansı 10 kHz ve simölasyon süresi 0,2 saniyedir. Şekil 3.5'teki sinyal MATLAB ortamında elde edilmiş olup, örnekleme frekansı 10 kHz ve simölasyon süresi 0,2 saniyedir. Salınımlı geçici rejim olayı 0,06 – 0,65 saniye arasında gerçekleşmiş olup frekansı 900 Hz'dir ve olay anındaki gerilimin genlik değeri nominal gerilimin 2 katına kadar çıkmıştır. Ayrıca sinyal üzerinde yüksek miktarda gürültü seviyesini temsilen standart sapması 0,4 ve varyansı 0,16 olan beyaz Gauss

gürültüsü bulunmaktadır. SDD için kullanılan dalgacık ise en temel dalgacık olan Haar dalgacıdır.

SDD yöntemi yoğun hesaplama gerektirdiğinden, gerçek zamanlı uygulamalarda sınırlı olarak kullanılabilir. Denklem (3.7)'de de görüldüğü gibi integralin kapalı form çözümü birkaç durum hariç bulunamaz. Bu nedenle Şekil 3.5'teki örnekte olduğu gibi bir sinyalin SDD'si alınırken önce ayrık zamanlı olarak değerler elde edilir. Elde edilen bu değerlerin ışığında SDD için ölçek ve öteleme değerleri belirlenir ve işaretin SDD katsayıları bulunur.



Şekil 3.5 : Geçici durum olayının SDD ile analizi

### 3.2.2 Ayrık dalgacık dönüşümü

SDD yöntemi çok fazla işlem yükü gerektirdiğinden uygulamalarda 2 ve katları şeklinde öteleme ve ölçekleme yapan Ayrık Dalgacık dönüşümü (ADD-Discrete Wavelet Transform) kullanılır [59]. Dalgacık fonksiyonu kullanılarak, ADD denklem (3.8)'den hesaplanır.

$$ADD(s, b) = 2^{-s/2} \int f(t) \psi(2^{-s}t - b) dt \quad (3.8)$$

Burada  $s$  değeri ölçek miktarına (frekans),  $b$  değeri ise öteleme (zaman) değerine denk gelmektedir. ADD dönüşümü yaparken ölçek değişim miktarı, analizin doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Ölçek miktarının küçük seçilmesinin işlem hızını yavaşlatacağı, büyük seçilmesinin de frekans çözünürlüğünü düşüreceği unutulmamalıdır.

ADD yöntemi, uygulamalarda filtre bankı kullanımı ile gerçekleştirilir. ADD için ayrık ifadesi öteleme ve ölçek kavramlarına karşılık gelmektedir. ADD, eşitlik (3.9)'daki gibi de tanımlanabilir [60].

$$ADD(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} S(n) g_{j,k}(n), \quad g_{j,k} \in \mathbb{Z}, j \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{Z} \quad (3.9)$$

Burada,  $g_{j,k}(n)$  sınırlı enerjili ve hızlı ayrıştırılabilir zaman fonksiyonu olup ana dalgacık olarak adlandırılır.

$$g_{j,k}(n) = a_0^{-j/2} g(a_0^j n - k b_0) \quad (3.10)$$

$a_0$  ve  $b_0$  katsayılarının seçimi ölçeklenmiş ve ötelenmiş ana dalgacık sınıfına bağlıdır. Basitçe,  $a_0=2$  ve  $b_0=1$  seçildiğinde ikincil ortonormal dalgacık dönüşüm fonksiyonu elde edilir [37].  $S(n)$  ile  $g_{j,k}(n)$  arasındaki ilişki eşitlik (3.11)'deki gibi ifade edilebilir.

$$S(n) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} g_{j,k}(n) \quad (3.11)$$

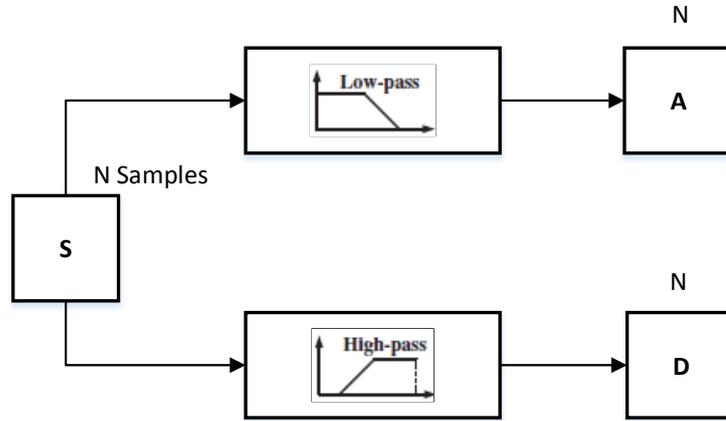
ADD ile üretilen  $d_{j,k}$  katsayıları sinyal işareti ile ana dalgacık arasındaki benzerlik indeksi olarak adlandırılır. Benzerlik oranı güçlüyse indeks büyük değer alır. Aksi halde indeks küçük değerlidir.

Bir sinyalin ADD'si, yüksek frekanslı bileşenleri ayırt etmek için bir dizi yüksek geçiren filtreden geçirerek ve düşük frekanslı bileşenleri ayırt etmek için bir dizi alçak geçiren filtreden geçirilerek hesaplanır. Sinyalin alçak frekans bilgisi yaklaşım katsayıları ( $cA_n$ ) ile analiz edilirken, düşük frekans bilgisi ise detay katsayıları ( $cD_n$ ) ile elde edilir [61]. Katsayıların matematiksel denklemleri (3.12)'de verilmiştir.

$$cA[n] = \sum_k S(k)g[2n - k]; \quad cD[n] = \sum_k S(k)h[2n - k] \quad (3.12)$$

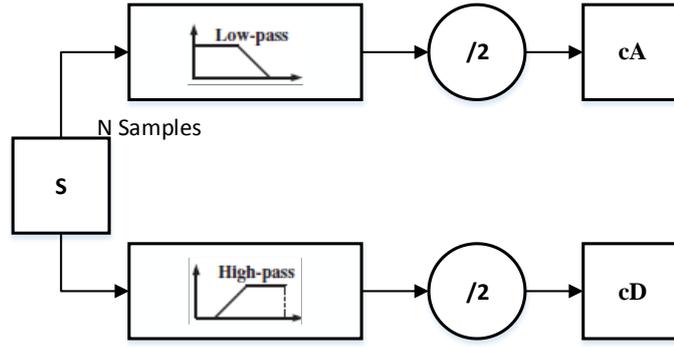
### 3.2.2.1 Çok çözünürlüklü analiz (Multi resolution analysis (MRA))

Mallat tarafından 1988 yılında ortaya atılan, yüksek ve alçak geçiren filtre kullanarak bir işareti ikiden fazla alt frekans değerine ayrıştırmaya yarayan çok çözünürlüklü analiz yöntemi günümüzde de en çok kullanılan ADD yöntemlerinden biridir [55]. Filtre bankı modeline dayanan ve Hızlı Ayrık Dalgacık Dönüşümü (HADD-Fast discrete wavelet analyze) yapan bu algorithmada yaklaşım katsayıları ( $cA_n$ ) yüksek ölçekli ve düşük frekanslı işaretleri gösterirken, detay katsayıları ( $cD_n$ ) ise Şekil 3.6'da gösterildiği gibi düşük ölçekli ve yüksek frekanslı bileşenleri belirtmektedir [58].

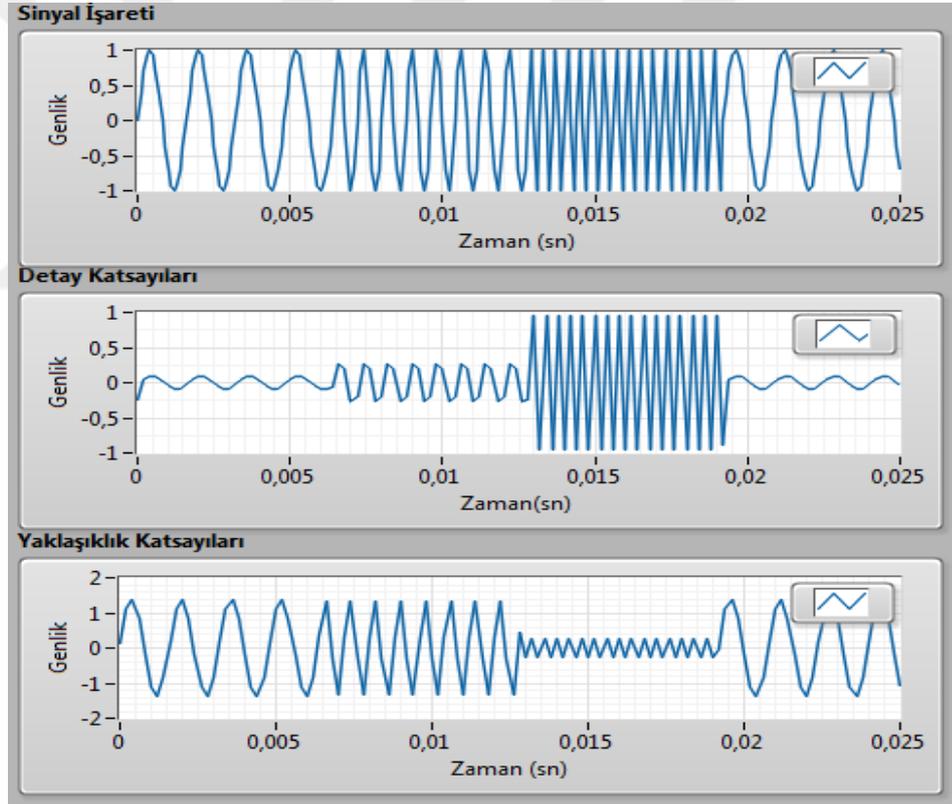


**Şekil 3.6 :** Tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz filtreleme işlemi

Örnek sayısının iki katına çıkmasının önlenmesi için çok çözünürlüklü analiz uygulamalarında örnek sayısı yarıya düşürülebilir. Bu süreç için yaklaşım ve detay katsayılarının durumu Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Her bir filtre çıkışında örnek sayısının yarıya düşürülmesi, analiz edilen sinyalde özellikle düşük frekanslı bileşenlerin bilgisinin kaybolmasına yol açabilir.

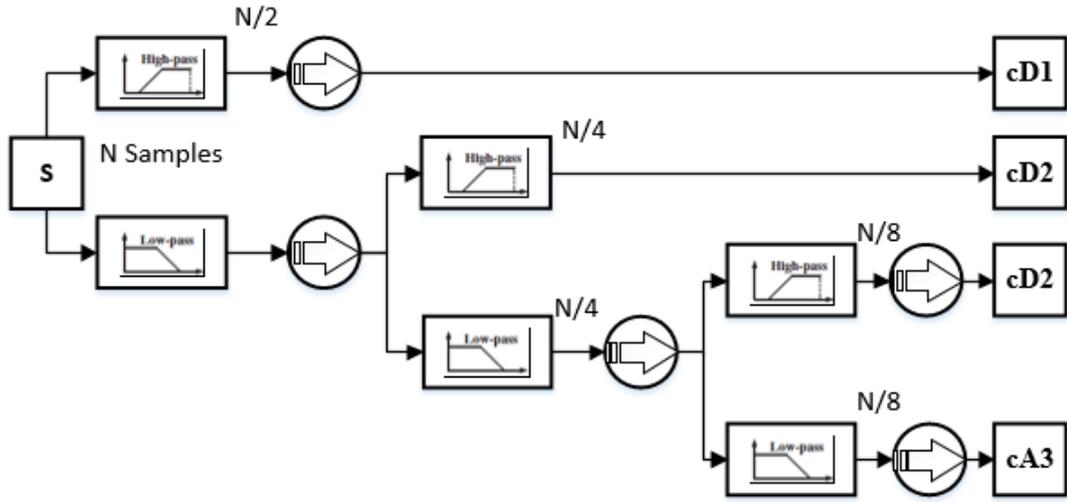


**Şekil 3.7 :** Tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz filtreleme ve örnek indirgeme işlemi. Frekansı değişken alınmış bir sinyal için tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz sonuçlarındaki filtre çıktıları Şekil 3.8’de verilmiştir. Sinyal işaretine benzerlik oranının, düşük frekanslarda yaklaşım katsayılarında; yüksek frekanslarda ise detay katsayılarında daha yüksek olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.8 :** Tek seviyeli çok çözünürlüklü analiz için filtre çıktıları

Çok çözünürlüklü analiz yönteminde sinyalin alçak geçiren filtreden geçirilmesiyle elde edilen yaklaşım bileşeni, tekrar alçak ve yüksek geçiren filtreleme işlemine tabi tutularak sinyalin incelenmek istenen frekans bant aralığı elde edilebilir. 3 seviyeli dalgacık dönüşümü uygulanan işaretin detay ve yaklaşım katsayıları ve her seviyedeki örnek miktarı Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 : Çok çözünürlüklü analiz ile katsayıların elde edilmesi

### 3.2.3 Dalgacık paket dönüşümü

R. Coifman ve V. Wickerhauser tarafından çok çözünürlüklü ayrıştırmanın devamı niteliğinde olan dalgacık paket dönüşümü (DPD) geliştirilmiştir. ADD yönteminde olduğu gibi DPD de, filtre bankları kullanılır.

DPD yönteminde ADD'den farklı olarak, daha iyi frekans çözünürlüğü sağlamak için ayrıştırma işlemi, her seviyede aynı anda hem detay hem de yaklaşım katsayılarına uygulanır. ADD işleminde ise ayrıştırma işlemi asla yeniden detay katsayılarına uygulanamaz. ADD ve SDD tabanlı teknikler arasında hibrit bir yöntem olarak kabul edilen DPD yöntemi, yeterli frekans çözünürlüğü ile hesaplama açısından diğer yöntemlere göre daha verimli bir alternatif sağlar.

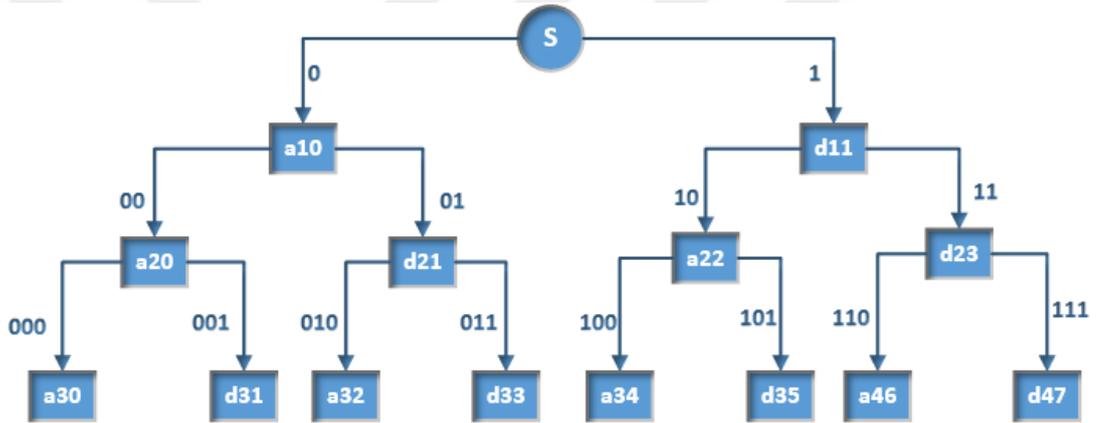
Matematiksel olarak  $S^n(x)$  sinyal işaret fonksiyonu denklem (3.13)'teki gibi DPD işlemine tabi tutulur. Burada  $n = 0,1,2,\dots,(2^i - 1)$  frekans parametresini (düğüm numarası) temsil ederken,  $i$  ise dalgacık paket ağacının ayrıştırma seviyesini (parametre derinliği) temsil etmektedir. Ayrıca konum parametresi (örnekleme zamanı)  $j$  ile ifade edilmiştir.

$$S_{i,j}^n(x) = 2^{-j/2} S^n(2^i x - j) \quad (3.13)$$

Şekil 3.10'da 3 seviyeli DPD ile yapılan analiz sonucunda oluşan ayrıştırma ağaç diyagramı verilmiştir. Kutucuk içindeki sayılar dalgacık katsayılarını gösterirken yolun üzerindeki sayılar ise sinyale uygulanan işleme karşılık gelmektedir. 0 sayısı

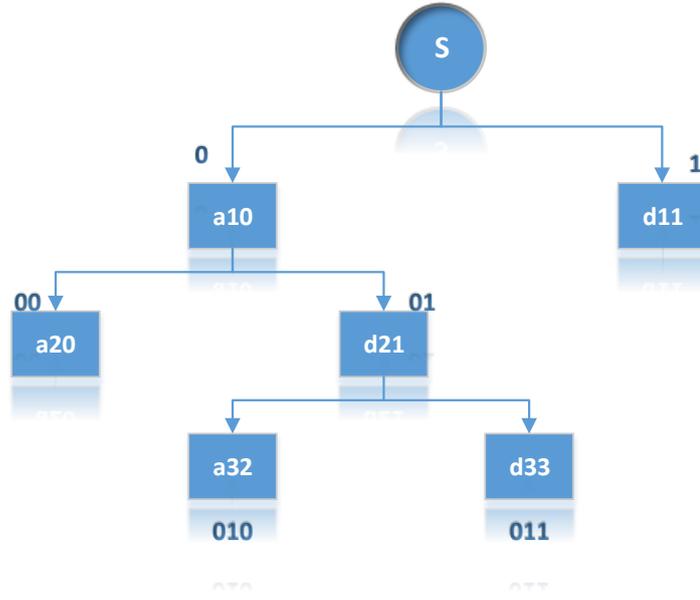
sinyalin alçak geçiren filtreden geçirildiğini; 1 sayısı ise sinyalin yüksek geçiren filtreden geçirildiğini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi her seviyede hem detay hem de yaklaşım katsayıları için ayrıştırmaya uğrayarak işlem sonucunda  $2^n$  tane katsayı elde edilir.

Örnek olarak, 50 Hz şebeke frekansındaki bir sinyal işaretine 10 kHz örnekleme frekansında 5 seviyeli bir DPD uygulandığında 32 adet dalgacık katsayısı elde edilir. Elde edilen dalgacık katsayılarının her birinin bant genişliği 156.5 Hz kadar olur. Doğru parametreler seçildiği takdirde, sinyalde incelenen frekans aralıkları oldukça küçük seçilebilir. Bu nedenle DPD, literatürde özellikle harmonik analizlerinde sıkça kullanılır. HFD tabanlı harmonik analizine göre işlem yükünü arttırmasına rağmen daha doğru sonuçlar verir.



**Şekil 3.10** : 3 seviyeli ayrıştırma ağaç diyagramı

DPD ile yapılan analizde sinyal i sırasıyla her seviye için yüksek ve alçak geçiren filtreden geçirilir. Daha çok işlem yükü ve zaman kaybı anlamına gelen bu yükten kurtulmak için eğer incelenecek frekans bant aralığı belirli ise sadece istenen seviyelerde istenilen filtreleme işlemi ile ara frekanslar için sinyal ayrıştırması gerçekleştirilir. Şekil 3.11’de ara frekans ayrıştırması için örnek ağaç diyagramı verilmiştir. Burada a32 katsayısını elde etmek için sinyal önce alçak geçiren filtreden geçirilmiş daha sonrasında sırasıyla yüksek ve alçak geçiren filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Özellikle arıza ve hata analizlerinde olayın tespitinin algılanabildiği frekans bant genişliği biliniyorsa, ara frekans ayrıştırılması işlemi büyük kolaylık sağlar.



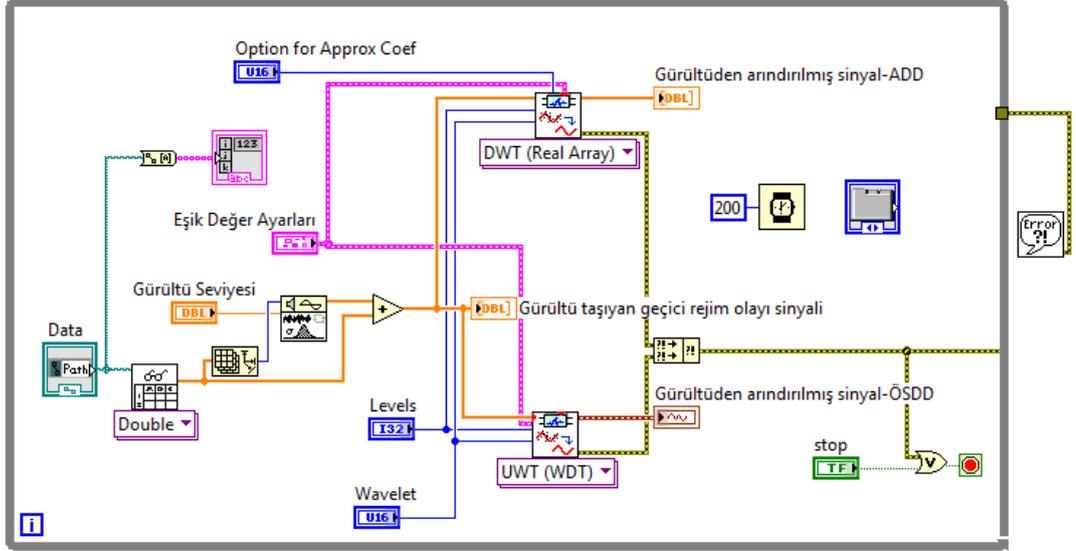
**Şekil 3.11** : Ara frekans sinyal ayrıştırma ağaç diyagramı

### 3.2.4 Örnek indirgenmemiş dalgacık dönüşümü

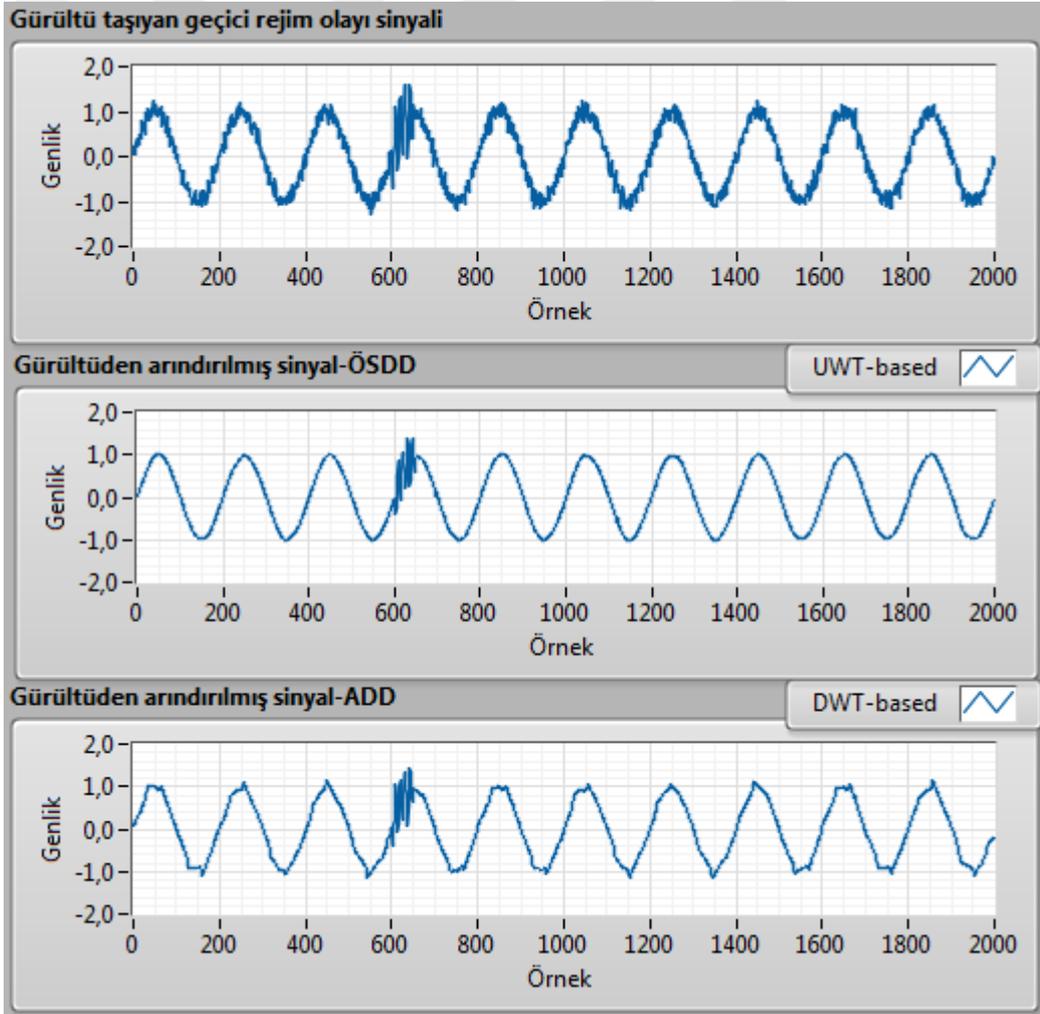
Uygulamalarda sıkça kullanılan örnek indirgenmemiş dalgacık dönüşümünde (ÖİDD-Undecimated Wavelet Transform), ADD yönteminde olduğu gibi her ayrıştırma seviyesinde, yaklaşım ve detay katsayılarının örnek sayısı yarıya indirgenmeyerek katsayıların uzunluğunun ana sinyal işareti ile aynı olması sağlanmıştır. ÖİDD yöntemi ile gerçekleştirilen analiz, zamanda kaymadan bağımsızdır. ÖİDD ile ADD karşılaştırıldığında, ÖİDD özellikle gürültü azaltmada, tepe veya çukur değer tespitinde ve gerçek zamanlı sinyal analizinde çok daha avantajlı bir yöntemdir [62].

Sinyalin gürültüden arındırılması işlemi için ÖİDD ve ADD yöntemlerinin karşılaştırılması amacıyla Şekil 3.12'deki Labview programı geliştirilmiştir. Önceden kaydedilmiş geçici durum olay sinyaline gürültü işareti eklenerek, Wavelet Denoise Express VI bloğuna hem ADD hem de ÖİDD analizi için giriş olarak verilmiştir. Her iki DD yöntemi için de dalgacık olarak db4 dalgacığı seçilmiş olup, 6 seviye olarak uygulanmıştır.

Şekil 3.13'te görüldüğü gibi ÖİDD tabanlı gürültü arındırma işlemi sonucunda ADD tabanlı yöntemle göre aslına daha yakın ve doğruluğu yüksek bir sinyal elde edilmiştir. Bu da ÖİDD yönteminin biraz daha fazla işlem yükü gerektirmesine rağmen performansının daha iyi olduğunu göstermektedir.

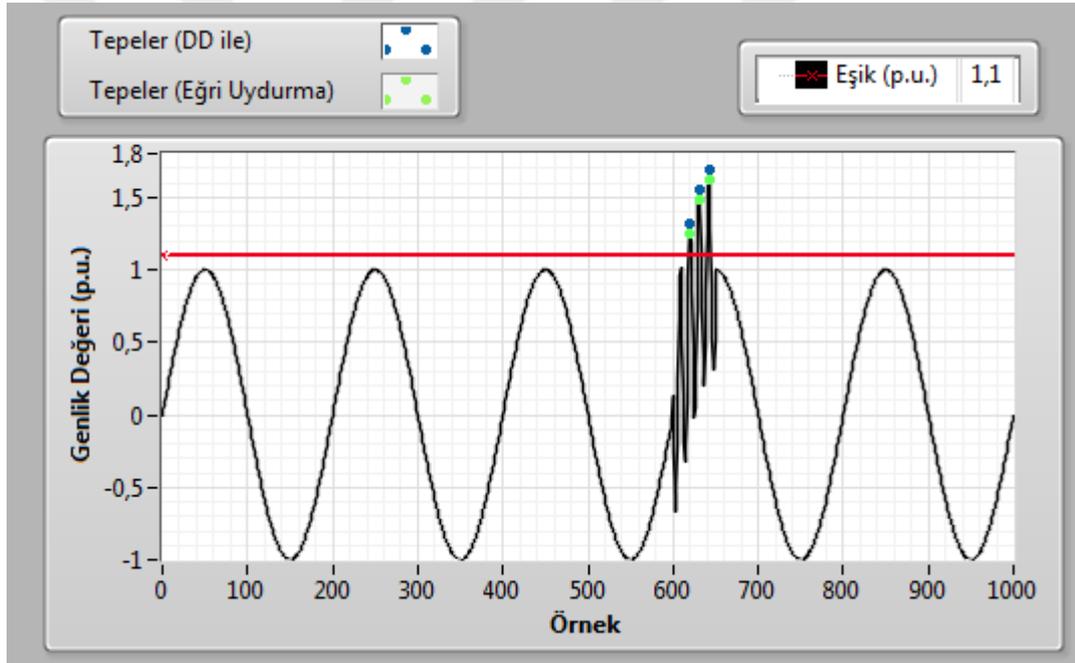


Şekil 3.12 : DD tabanlı gürültü arındırma için geliştirilen Labview program



Şekil 3.13 : DD tabanlı gürültü arındırma için yöntemlerin karşılaştırılması

DD yöntemi, sinyal işareti üzerinde tepe ve çukur tespitinde sıkça kullanılır. ADD tabanlı yapılan tepe algılama işlemine göre ÖİDD ile yapılan algılama işlemi daha güvenilir sonuçlar vermekle beraber, gürültüye karşı daha az duyarlıdır. Bunun sebebi ise ÖİDD tabanlı yöntemin, öncelikle düşük çözünürlükteki sinyallerde sıfır geçiş noktalarını bulması ve sonrasında aynı işlemi daha yüksek çözünürlükteki katsayılara uygulamasıdır. Sıfır geçişlerin tespiti, düşük çözünürlükteki katsayılara uygulanınca gürültüyü azaltırken, yüksek çözünürlükteki katsayılara uygulandığında ise genlik değerinin en yüksek olduğu konumların tespitindeki hassaslığı artırır. Şekil 3.14'te ÖİDD tabanlı yöntem ile eğri uydurma temelli yöntem ile tepe tespiti işlemi sonuçları, geçici rejim olayı gözlenen sinyal üzerinde karşılaştırılmaktadır. Eşik değerinin 1,1 p.u. olarak belirlendiği analizde, ÖİDD bazlı tepe tespit yöntemi ile genlik değeri bire bir örtüşen sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 3.14 :** Eğri uydurma ve ÖİDD yöntemlerinde tepe tespiti karşılaştırması

Bu tez çalışmasında gerçek zamanlı olarak güç kalitesi olaylarının tespiti için ÖİDD kullanılmıştır. ÖİDD, zamanda kaymadan bağımsız olup, gürültü arındırmada ve tepe ile çukur tespitinde diğer yöntemlere göre daha başarılıdır. Ayrıca örnek sayısının ADD yöntemindeki gibi her filtreleme işleminden sonra yarıya düşürülmediğinden, incelenen sinyalin farklı frekans bileşenlerinin incelenmesinde ADD yönteminden üstündür.

### 3.3 Güç Kalitesi Olaylarının Dalgacık Dönüşümü Yöntemi ile Analizi

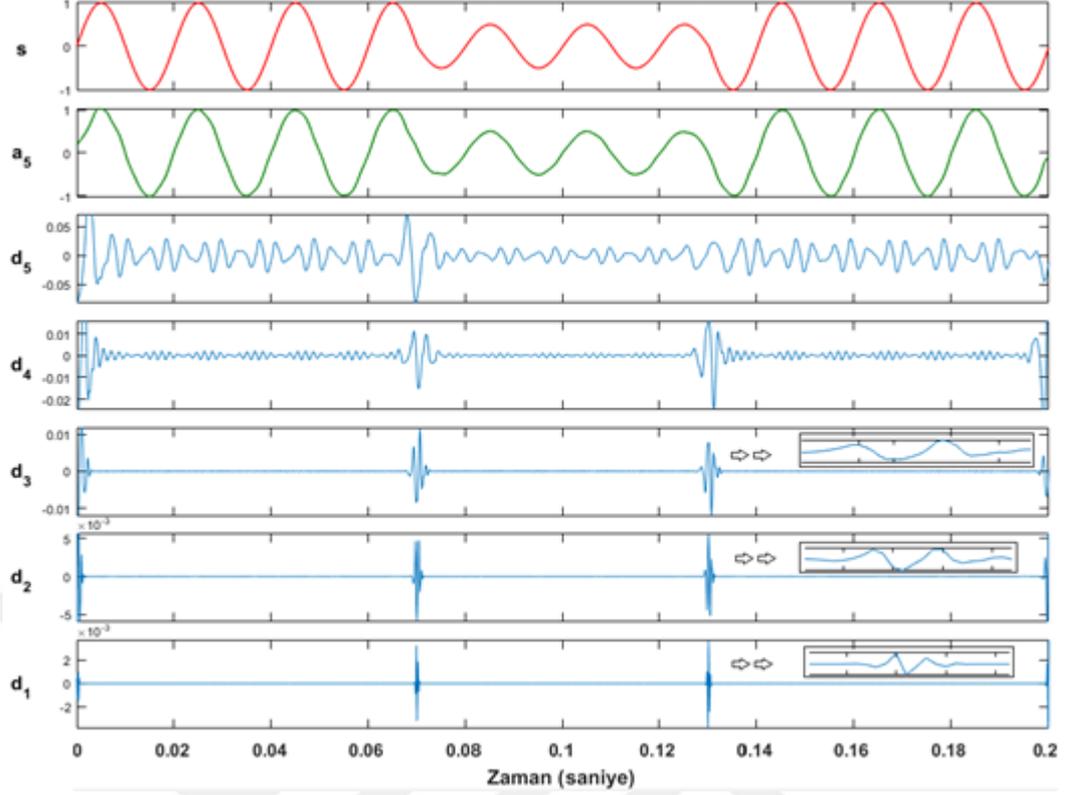
Güç kalitesi olaylarının dalga şekilleri, matematiksel yöntemlerle, simülasyon çalışmalarıyla veya doğrudan güç sisteminden elde edilen gerçek zamanlı verilerle elde edilebilir. Güç kalitesi problemlerinden kaynaklanan sinyallerin dalga formlarının analizi için matematiksel yöntem önerilen bir çalışmada, güç kalitesi olaylarının tespit ve sınıflandırılmasında gerçek olay verileri yerine bu yöntemden elde edilen dalga formlarının kullanılabilmesi belirtilmiştir [63].

Tez çalışmasında, güç kalitesi olaylarına ait dalga şekilleri, MATLAB/Simulink ortamında 50 Hz şebeke frekansı için elde edilmiş olup, örnekleme frekansı 10 kHz ve simülasyon süresi 0,2 saniye olarak seçilmiştir. Analiz için kullanılan dalgacık ise Daubechie 04 (db4) dalgacık formudur. db4 dalgacığı, güç kalitesi olaylarının karakteristiğine uygun özellik gösterdiği için seçilmiştir. Ayrıca az örnek içerdiği ve kısa bir dalgacık türü olduğu için db4 dalgacığı işlem yükünü azaltmaktadır. Gerçekleştirilen ADD analizinin daha iyi sonuç vermesi için ayrıştırma işlemi sonucunda elde edilen frekans bant aralıklarının, temel frekans (50 Hz) ve harmonik barındıran frekans değerlerinin özelliklerini çıkaracak değer aralıkları arasında seçilmelidir. 5 seviyeli ADD analizinde, d1, d2, d3, d4 ve d5 katsayıları sırasıyla 5 kHz-2,5 kHz, 2,5 kHz-1,25 kHz, 1,25 kHz-625 Hz, 625 Hz-312 Hz ve 312 Hz-156 Hz bilgilerini taşıırken, a5 yaklaşım katsayısı 0-156 Hz bilgilerini taşır.

Gerilim çökmesi olayının dalgacık dönüşümü ile analizi için 0,07 – 0,13 saniye süreleri arasında gerilim değeri nominal gerilimin %50'si kadar düşürülmüştür. 0,2 saniye süreli olay verisinin ADD analiz sonuçları Şekil 3.15'de verilmiştir. Detay katsayılarından d1 ve d4 katsayılarının artışı, sistemde meydana gelen geçici durumu gösterirken; d5 katsayısının artışı ise harmonik değerlerdeki artıştan kaynaklanmaktadır. Meydana gelen gerilim çökmesi olayı, a5 yaklaşım katsayısındaki değerlere bakılarak tespit edilebilir. Gerilim çökmesini temsil eden veri üretilirken denklem (3.14)'te verilen matematiksel model kullanılmıştır [64].

$$y(t) = A(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) \sin(\omega t) \quad (3.14)$$

Burada  $\alpha$  katsayısı çökme miktarını belirtirken değeri 0,1 ile 0,9 arasında değerler alır. Gerilim çökmesinin süresi ise  $t_1$  ve  $t_2$  değişkenlerine göre belirlenirken A katsayısı ile gerilim genlik değeri arttırılabilir.



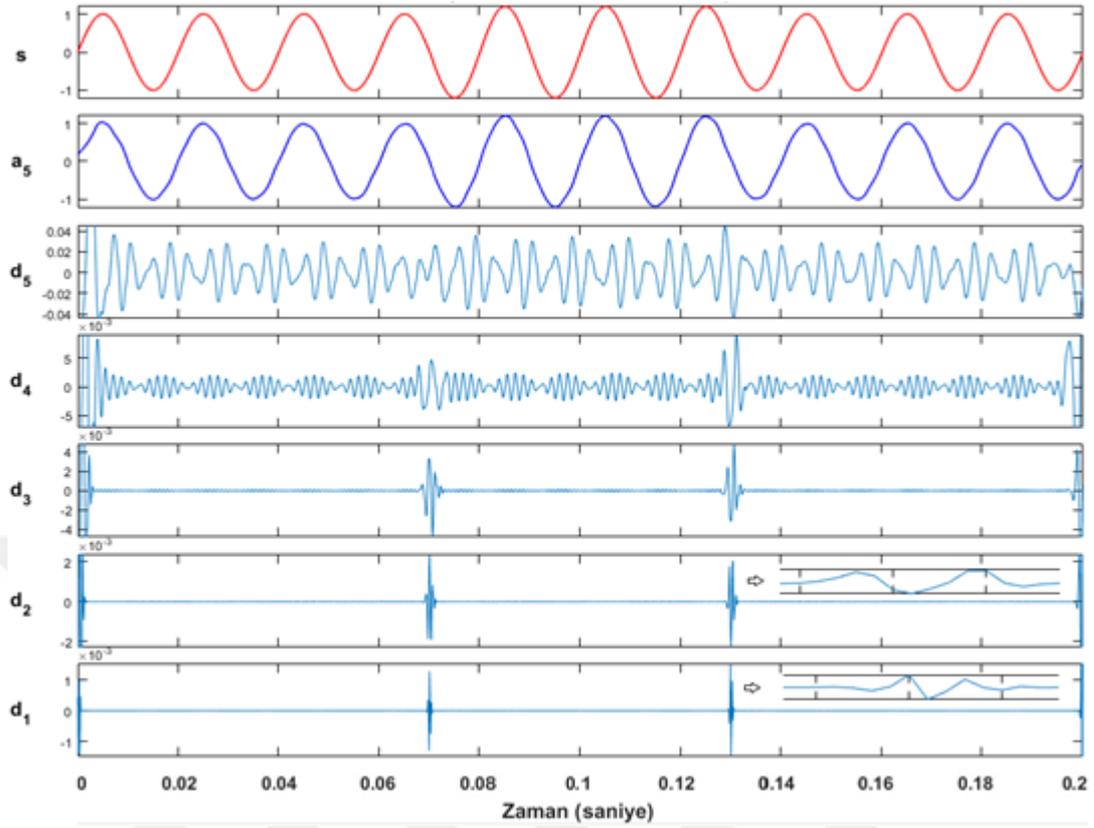
**Şekil 3.15 :** Gerilim çökmesi olayının ADD yöntemi ile analizi

Gerilim sığraması olayının ADD ile analizi için 0,07 – 0,13 saniye süreleri arasında gerilim değeri nominal gerilimin %20’si kadar atırılmıştır. 0,2 saniye süreli olay verisinin ADD analiz sonuçları Şekil 3.16’da verilmiştir. Detay katsayılarından  $d_1$  –  $d_3$  katsayılarındaki anlık artışlar sistemde meydana gelen olay anındaki süreksizliği ve kırılmayı gösterirken,  $d_5$  katsayısının artışı ise harmonik değerlerdeki artıştan kaynaklanmaktadır. Meydana gelen gerilim sığraması olayı,  $a_5$  yaklaşım katsayısındaki değerlere bakılarak da tespit edilebilir.

Gerilim sığramasını temsil eden veri üretilirken denklem (3.15)’te verilen matematiksel model kullanılmıştır [64].

$$y(t) = A(1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

Burada  $\alpha$  katsayısı gerilimdeki yükselme miktarını belirtirken değeri 0,1 ile 0,8 arasında değerler alır. Gerilim sığraması olayı, güç sistemlerinde çok sık görülmeyen bir arıza olup büyük güçlü yüklerin devreden alınması, kapasitör banklarının devreye alınması veya simetrik olmayan kısa devre arızalarında, kısa devre olmayan faz veya fazlarda meydana gelir.



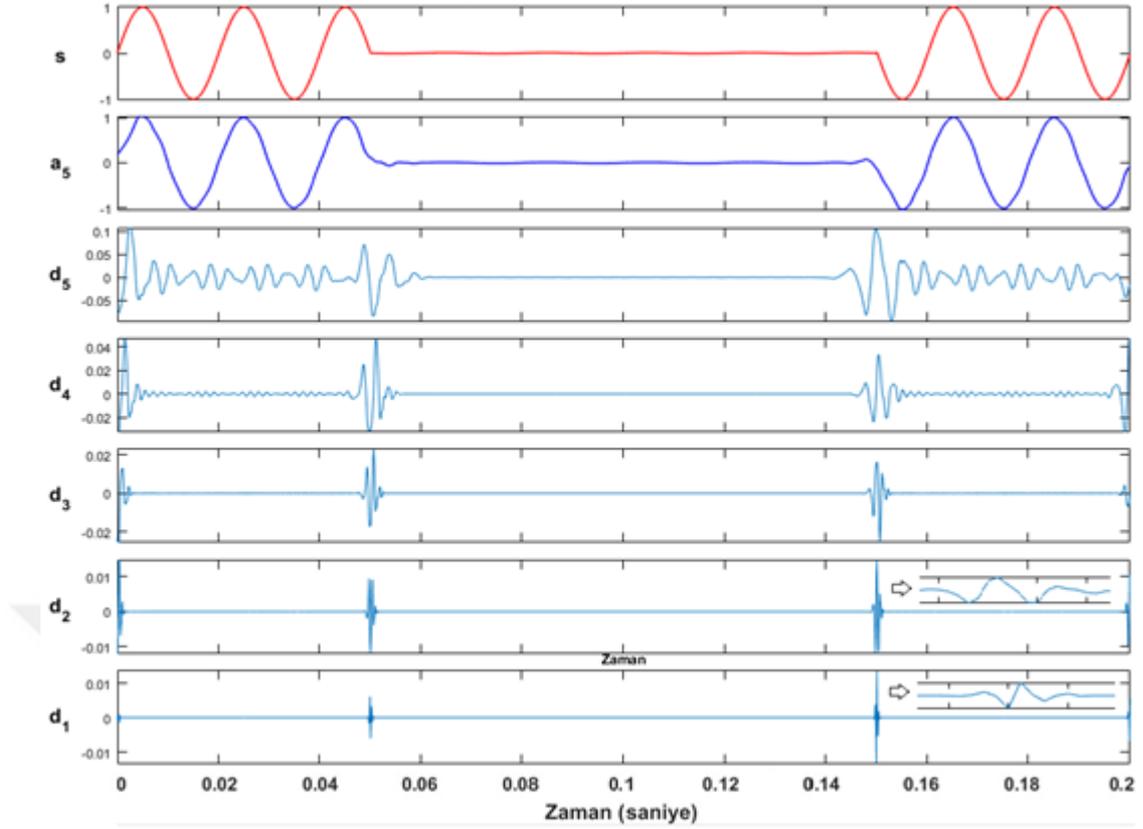
**Şekil 3.16 :** Gerilim sığraması olayının ADD yöntemi ile analizi

Gerilim kesintisi olayının ADD ile analizi için 0,05 – 0,15 saniye süreleri arasında gerilim değeri nominal gerilimin %99’u kadar düşürülmüştür. 0,2 saniye süreli olay verisinin ADD analiz sonuçları Şekil 3.17’de verilmiştir. Detay katsayılarından d1 – d3 katsayılarındaki anlık artışlar, sistemde meydana gelen olay anındaki süreksizliği ve kırılmayı gösterirken, d5 katsayısının artışı ise harmonik değerlerdeki artıştan kaynaklanmaktadır. Meydana gelen kısa süreli gerilim kesintisi olayı a5 yaklaşım katsayısındaki değerlere bakılarak da tespit edilebilir.

Gerilim kesintisini temsil eden veri üretilirken denklem (3.16)’da verilen matematiksel model kullanılmıştır [64].

$$y(t) = A(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) \sin(\omega t) \quad (3.16)$$

Burada  $\alpha$  katsayısı gerilimdeki kesinti miktarını belirtirken değeri 0,9 ile 1 arasında seçilmelidir. Gerilim kesintisi olayının süresi,  $t_1$  ve  $t_2$  değişkenlerine bağlıdır. A katsayısı ise gerilim genlik değerini etkilemektedir.

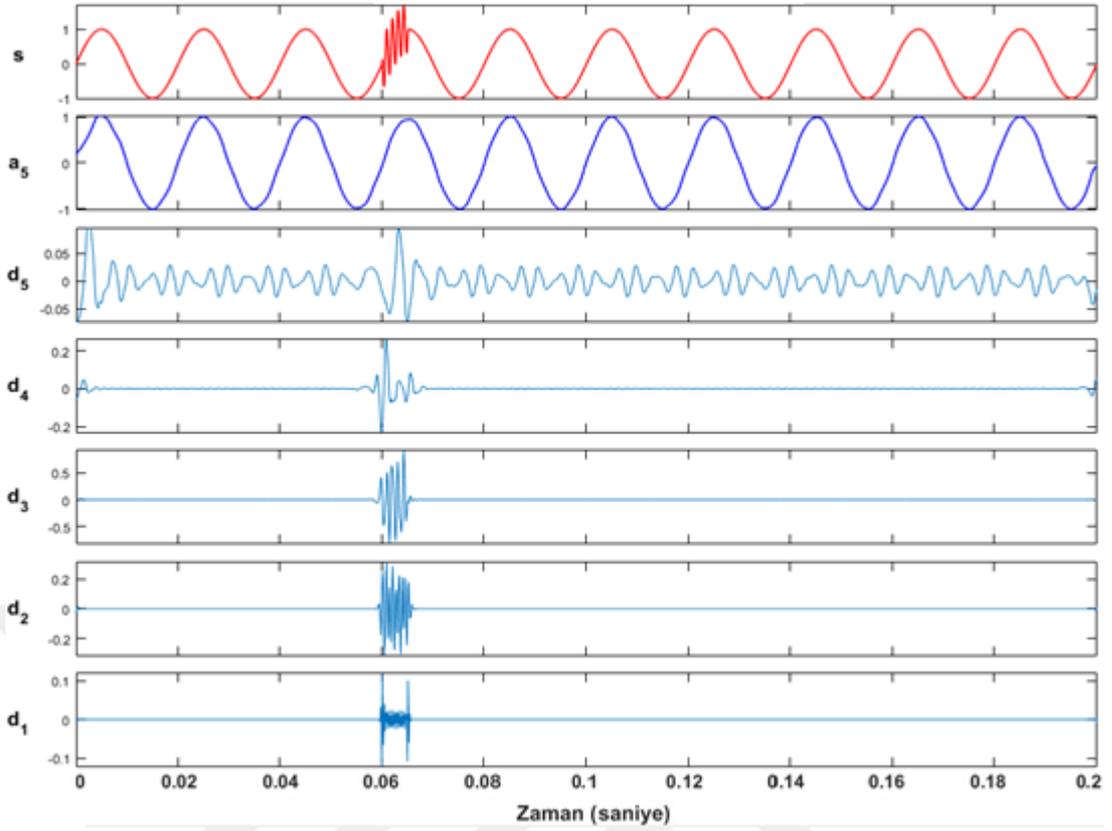


**Şekil 3.17 :** Gerilim kesintisi olayının ADD yöntemi ile analizi

Salınlı geçici rejim olayının ADD ile analizi için matematiksel model üzerinden üretilen sinyalin salınım frekansı 900 Hz olup, olay süresi 5 ms'dir. Geçici rejim olayı 0,06 – 0,65 saniye arasında meydana gelmiştir. Olay anındaki gerilimin genlik değeri nominal gerilimin 2 katıdır. 0.2 saniye süreli salınlı geçici rejim olay verisinin ADD analiz sonuçları Şekil 3.18'de verilmiştir. Detay katsayılarından d1 ve d2 katsayısı geçici durum olaylarının tespitinde ve olay süresinin belirlenmesinde büyük önem taşır. Ancak geçici durum olayı anındaki frekansın belirlenmesinde etkin rol oynamaz. Salınlı geçici rejim olayını temsil eden veri üretilirken denklem (3.17)'de verilen matematiksel model kullanılmıştır [64].

$$y(t) = A[\sin(\omega t) + \alpha \frac{-(t-t_1)}{\tau} \sin \omega_n(t - t_1) - (u(t_2) - u(t_1))] \quad (3.17)$$

Burada  $\alpha$  katsayısı geçici durum olayının meydana geldiği andaki artış miktarını temsil etmektedir. Salınım frekansı olan  $f_n$  ise 300 Hz ile 900 Hz arasında değer almaktadır. Gerilim sinyalinde meydana gelen geçici durum olayının süresi ise  $t_1$  ve  $t_2$  değişkenlerine göre belirlenir.



**Şekil 3.18 :** Salınlımlı geçici rejim olayının ADD yöntemi ile analizi

Harmonik bozulma işaretini temsil eden veri üretilirken, denklem (3.18)'de verilen matematiksel model kullanılmıştır. Harmonik kavramı, sistem frekansının kendinden daha yüksek tam katlarındaki frekans bileşenlerini içeren sinyale karşılık gelir. Bu nedenle periyodik olarak belirli frekanslarda tekrar eder. Üretilen olay verisi 3., 5. ve 7. harmonik bileşenler içermekte olup,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  sırasıyla 0,15, 0,13 ve 0,11 seçilmiştir. Sonuçta 150 Hz, 250 Hz ve 350 Hz değerlerinde miktarı gittikçe azalan bir harmonik bozulma oluşturulmuştur.

$$y(t) = \alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) \\ + \alpha_7 \sin(7\omega t) + \dots$$

$$0.05 \leq \alpha_1 \leq 0.15$$

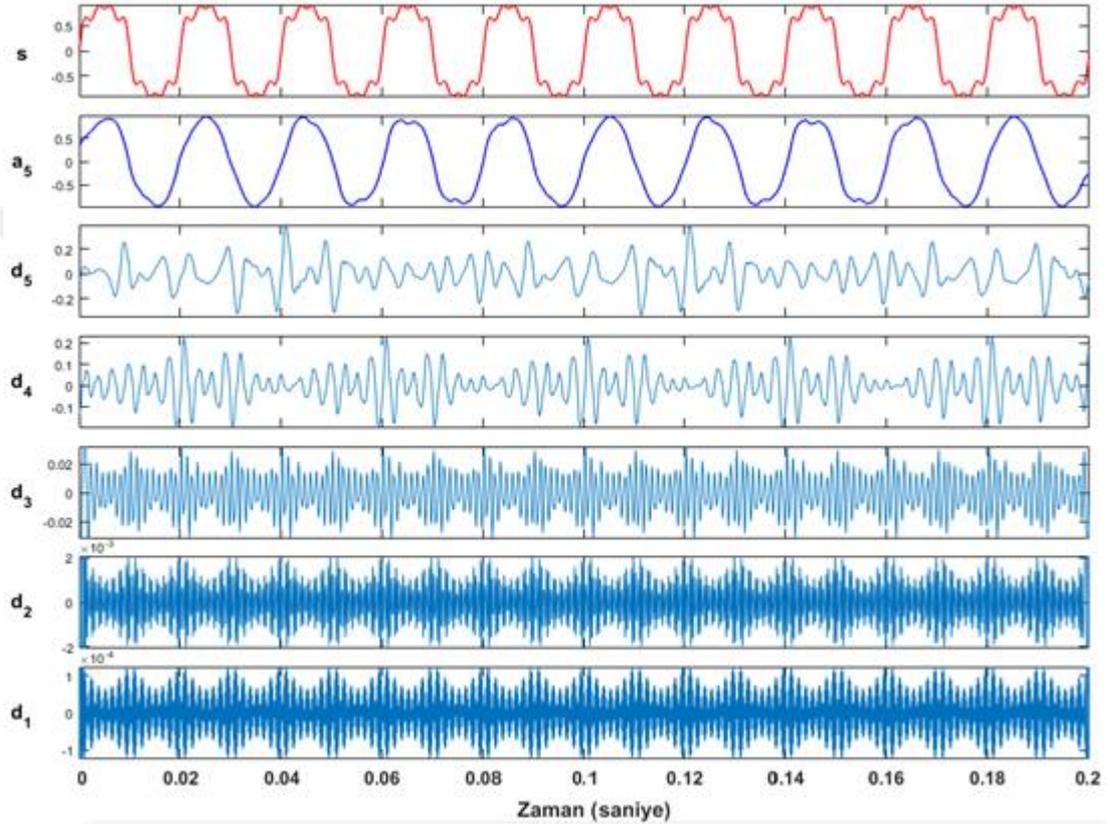
$$0.05 \leq \alpha_2 \leq 0.15$$

$$0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15$$

$$\sum \alpha_i^2 = 1$$

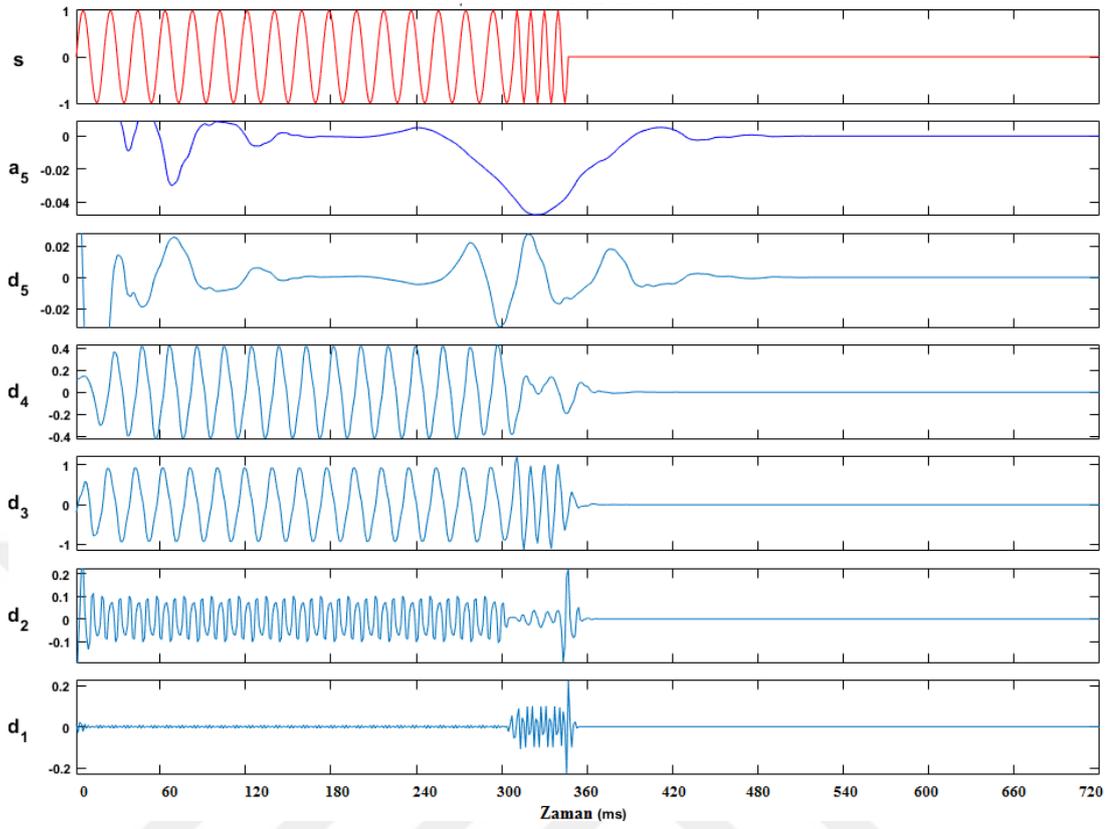
(3.18)

Yüksek harmonik içeren sinyalin ADD ile analizi için matematiksel model üzerinden üretilen sinyalin analiz sonuçları Şekil 3.19'da verilmiştir. Detay katsayılarından farklı frekansta bir bileşenin olduğu kolaylıkla fark edilmektedir.  $d_5$  detay katsayısı, 5. ve 7. harmonik katsayılarını;  $a_5$  yaklaşım katsayısı ise 3. harmonik katsayılarını yansıtmaktadır. Yapılan analiz, harmonik olayının DD yöntemi ile tespit edilebildiğini ancak hangi frekansta hangi harmonik değerinin yüksek olduğunu belirlemediğini göstermiştir.



**Şekil 3.19 :** Harmonik içeren sinyalin ADD yöntemi ile analizi

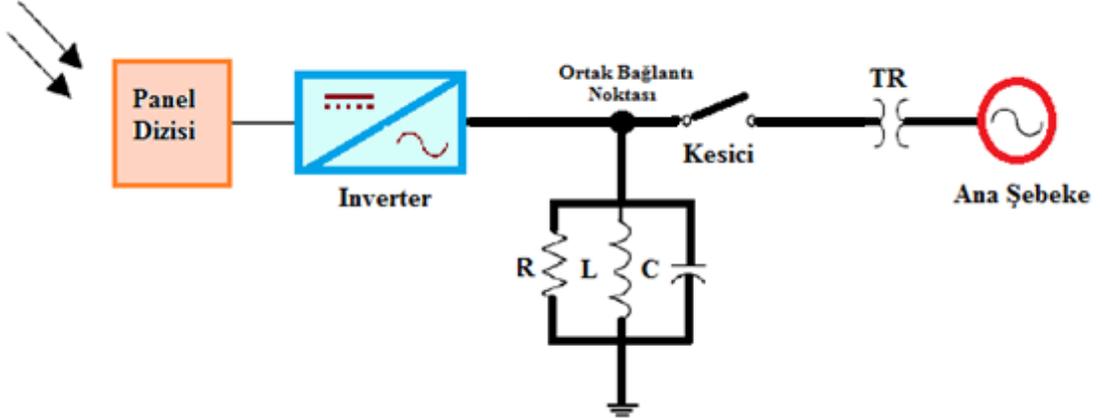
Güç sisteminde meydana gelen frekans değişiminin ADD ile analizi için Şekil 3.20'deki sinyal işaretinden yararlanılmıştır. Daha düşük frekansta örneklenmiş olan bu sinyalde, gerilim kesintisi meydana gelmeden önce 300 ms ve 350 ms arasında yaklaşık 50 ms boyunca gerilim sinyalinin frekansında değişim gözlemlenmiştir. Detay katsayılarından  $d_1$  üzerindeki değişim net olarak sinyal frekansından sapıldığını göstermektedir. Yapılan analiz, frekans değişimi olayının ADD yöntemi ile tespit edilebildiğini göstermiştir. Frekans değişimine bağlı olarak, sinyal işaretine benzerlik oranının, düşük frekanslarda yaklaşım katsayılarında; yüksek frekanslarda ise detay katsayılarında daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.20 : Sinyalde meydana gelen frekans değişiminin ADD yöntemi ile analizi

#### 4. PV SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ OLAYLARININ DD İLE GERÇEK ZAMANLI OLARAK TESPİTİ

Tezin bu bölümünde sırasıyla, geliştirilen elektronik ölçüm kartları ile şebekeden elektriksel verilerin alınması, alınan verilerin Labview programı ile değerlendirilmesi ve son olarak gerçek zamanlı olarak güç kalitesi olaylarının dalgacık dönüşümü yöntemiyle tespit edilmesine çalışılmıştır. Literatürde kullanılan mevcut yöntemlerle, tez çalışmasında kullanılan gerçek zamanlı DD tabanlı yöntem, olay tespiti bakımından karşılaştırılmıştır. Şebeke bağlantılı bir PV sistemin genel yapısı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Tez çalışmasında, PV sistemin şebekeye bağlanması durumunda, şebeke tarafındaki anormal çalışma koşullarından kaynaklanan güç kalitesi problemlerinin gerçek zamanlı olarak dalgacık dönüşümü yöntemi ile tespit edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.1 : Şebeke bağlantılı bir PV sistemin genel yapısı

Şebeke bağlantılı bir PV sistemde şebeke ile uygun bağlantı şartları, inverter çıkışındaki ortak bağlantı noktası üzerinden sağlanmaktadır. Tez çalışmasında, ortak bağlantı noktasına bağlanan elektronik ölçme kartından akım ve gerilim sensörleri yardımı ile elde edilen şebeke ölçüm sinyalleri, veri toplama kartı üzerinden gerçek zamanlı olarak alınmıştır. Alınan veriler, dalgacık dönüşümü tekniğini kullanan Labview tabanlı arıza tespit yazılımı tarafından değerlendirilmekte ve standartlarca belirlenen eşik değerlere göre arıza durumları tespit edilmektedir. Bu bölümdeki olay

örgüsü, gerçekleştirme, veri toplama, bilgi edinme ve güç kalitesi olaylarının tespiti alt başlıkları altında incelenmiştir.

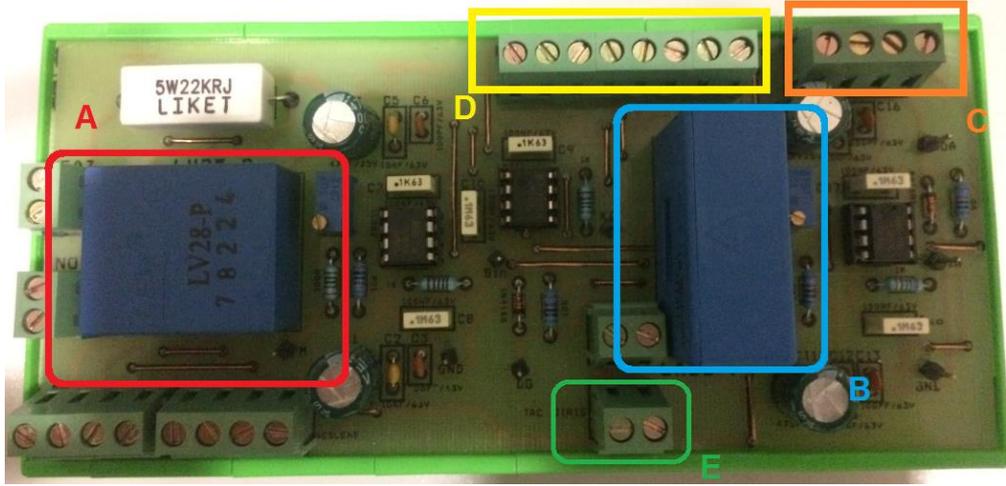
Gerçekleştirilen uygulama çalışmasında, güç kalitesi olaylarının tespitinde diğer yöntemlere göre daha avantajlı olan ÖİDD yöntemi kullanılmıştır. ÖİDD özellikle gürültü azaltmada, tepe veya çukur değer tespitinde ve gerçek zamanlı sinyal analizinde çok daha iyi sonuçlar verir. Ölçüm kartından alınan gerçek zamanlı gerilim sinyali, geliştirilen DD ile arıza tespitinin yapıldığı ara yüz programında ÖİDD işlemine tabi tutularak, çeşitli detay katsayıları üzerinden standartlarca belirlenen eşik değerlere göre olay türü belirlenmiştir.

#### **4.1 PV Sistem-Şebeke Bağlantısında Elektriksel Parametrelerin Elde Edilmesi**

Tez çalışmasında, ortak bağlantı noktasına bağlanan elektronik ölçme kartından akım ve gerilim sensörleri yardımı ile elde edilen şebeke ölçüm sinyalleri, veri toplama kartı üzerinden gerçek zamanlı olarak alınmıştır. Alınan veriler, dalgacık dönüşümü tekniğini kullanan Labview tabanlı arıza tespit yazılımı tarafından değerlendirilmekte ve standartlarca belirlenen eşik değerlere göre arıza durumları tespit edilmektedir.

Geliştirilen ölçüm kartı ile şebeke bağlantılı PV sistem ve şebeke arasındaki gerilim, akım ve frekans bilgileri veri toplama kartının (DAQ) girişine aktarılmıştır. Ölçüm kartlarından gerilim değerinin alınması için LV28-P tip gerilim dönüştürücü; akım değerinin gözlemlenmesi için ise LA 55-P tip akım sensörü kullanılmıştır. Akım, gerilim ve istenildiği takdirde frekans bilgilerinin alınabildiği elektronik ölçme kartı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

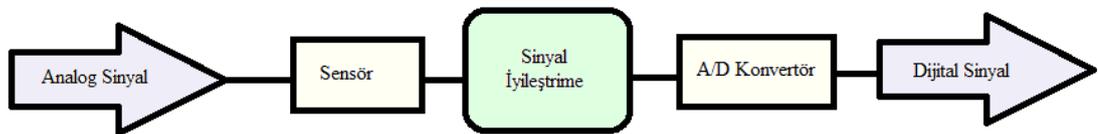
Elektronik kart üzerinde Şekil 4.2’de (A) ile gösterilen yerde LV28-P gerilim sensörü, (B) ile gösterilen yerde ise LA 55-P akım sensörü yer almaktadır. (C) ile gösterilen kısımdan tam dalga sinüs şeklinde akım ve gerilim dalga şekilleri elde edilmektedir. (D) ile gösterilen bölgede, DAQ Kart girişine uygulanacak olan akım, gerilim ve frekans verilerine ait sensör çıkışları yer almaktadır. (E) ile gösterilen kısımda ise LA 55-P akım sensörüne gelen akımın giriş ve çıkış bağlantıları yapılmaktadır [64].



**Şekil 4.2 :** Elektriksel parametrelerin elde edilmesinde kullanılan elektronik ölçüm kartı [65]

#### 4.2 Labview Programı ve Elektriksel Verilerin Toplanması

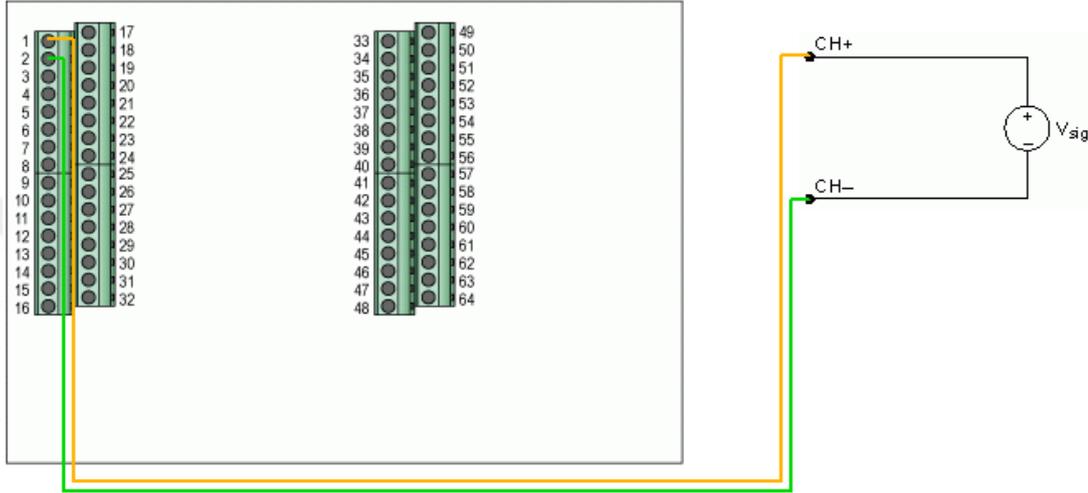
Geliştirilen sistemdeki bilgilerin doğrulanması ve gerekli güç analizlerinin yapılabilmesi için geliştirilen Labview ile gerçek zamanlı olarak geliştirilen yazılım kullanılmıştır. DAQ kartları, ortamdaki fiziksel verileri toplayarak Labview vb. bilgisayarda kullanılan yazılımların işleyebileceği hale çeviren elektronik kartlardır. Bir DAQ sistemi 6 temel bileşenden oluşur. Bunlar, bilgisayar, sensörler, sinyal sınırlandırma, veri toplama donanımı, sürücü sistemi ve gerçekleştirilen uygulama yazılımıdır. DAQ sistemi blok diyagramı Şekil 4.3'te verilmiştir. PV sistemin bağlı olduğu şebekeden ölçme kartı tarafından alınan veriler DAQ kartı ile toplanır ve daha sonrasında ileri işlemler için Labview yazılımı yüklü bilgisayara gönderilir. Gerçekleştirilen sistemde kullanılan veri toplama kartı DAQ MX USB-6221 tip sinyal işleme kartıdır.



**Şekil 4.3 :** Veri toplama kartı sinyal işleme prosedürü

Şebekeye ait akım ve gerilim verileri elektronik ölçüm kartlarıyla Labview DAQ kartının sinyal giriş değerleri aralığına uygun hale getirildikten sonra sinyalin durumuna göre 0-10 V aralığında değişen değerler olarak DAQ kartının analog girişlerine bağlanmıştır. Elde edilen verilerin yazılım panelinde görüntülenebilmesi için DAQmx kontrol bloğu kullanılmıştır. Analog giriş sinyali seçildikten sonra,

DAQ Assistant Express bloğu kullanılarak DAQ kartının girişine uygulanacak sinyalin tipi belirlenebilir. Kart üzerinde AI0 giriş terminali DAQ Assistant bloğu ile seçildikten sonra giriş gerilimi DAQ kartın AI0 bacağına bağlanmıştır. Bu bağlantı Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Gerekli bağlantı yapıldıktan sonra analog giriş geriliminin minimum-maksimum aralığı, terminal bağlantısı çeşidi ve veri toplama yöntemi seçilmiştir. Ayrıca bu bilgilerin sürekli olarak Labview ortamına aktarılmasını sağlamak amacıyla gerekli program yazılmıştır.

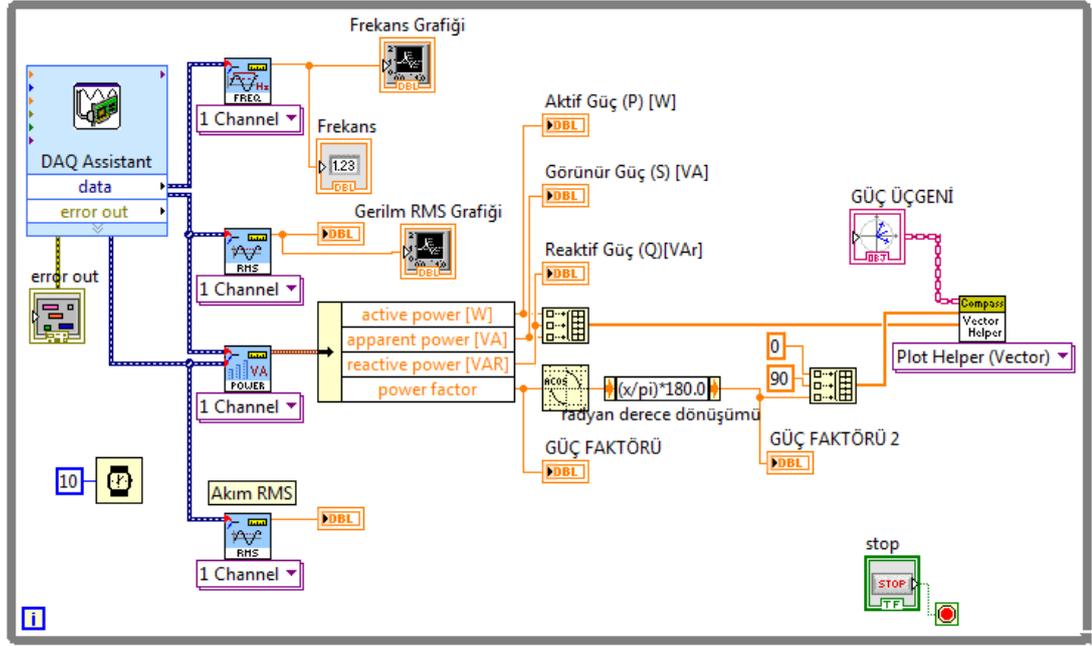


**Şekil 4.4 :** Gerilim dalga şeklinin gözlemlenmesi için yapılan DAQ bağlantısı

### 4.3 Elektriksel Verilerin Labview ile Gözlemlenmesi ve Kaydedilmesi

DAQ kartına giriş gerilimi ve akımı bilgilerinin bağlanmasından sonra, Labview ile gerçekleştirilen yazılım ile gerilim, akım, frekans, güç, güç katsayısı, vektör diyagramları gibi verilerin bilgisayar ortamına aktarılarak izlenmesi sağlanmıştır. Şekil 4.5'de gerilim ve akım ölçümünden yararlanarak gerilim, akım, frekans, güç, güç katsayısı, vektör diyagramları gibi verilerin elde edildiği program görülmektedir. Bu şekilde Labview ön panelinde verinin dalga şekli, etkin değerleri, tepe değerleri, frekans bilgisi, güç üçgeni gibi parametre değerleri sayısal veya grafiksel olarak gözlemlenebilmektedir.

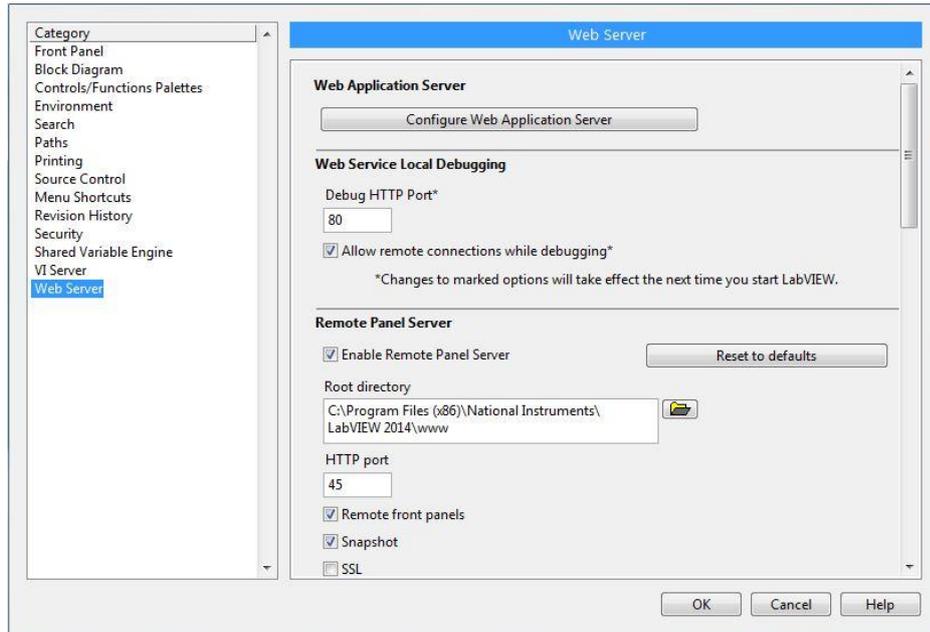
Labview programına aktarılan veriler, gerçek zamanlı olarak geliştirilen Labview ara yüzünden takip edilebilmektedir. Bununla birlikte, özellikle olay anında meydana gelen değişimlerin daha sonra incelenebilmesi amacıyla bu veriler Labview ilgili araçları kullanılarak belirli aralıklarla kaydedilmiştir.



Şekil 4.5 : Elektriksel verilerin ölçümü için geliştirilen Labview programı

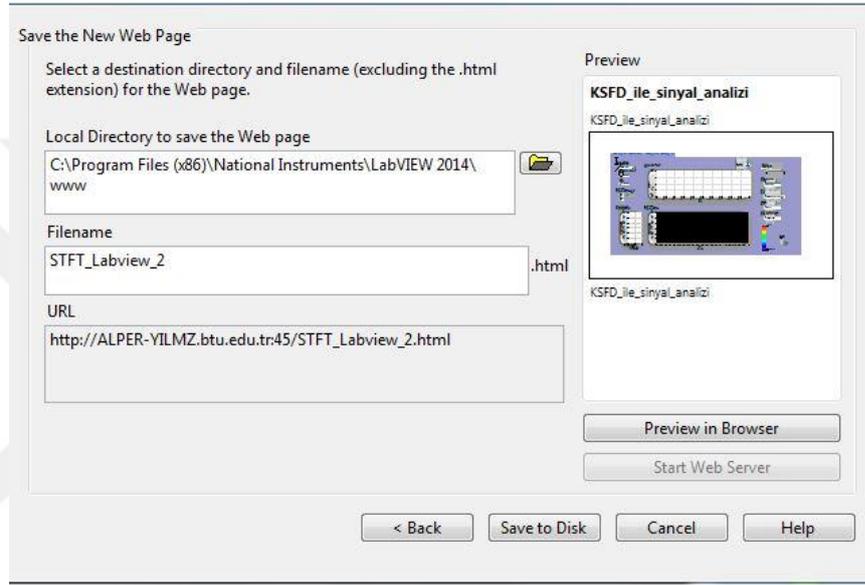
#### 4.4 Geliştirilen Programın Uzaktan İzlenmesi

Labview programı ara yüzünün ağ sunucusu üzerinde internet bağlantısı olan herhangi bir noktadan izlenmesi ve kontrol edilmesi için çeşitli ayarların yapılması gerekmektedir. Öncelikle Araçlar>>Ayarlar>>Ağ Sunucusu yolu izlenerek uzaktan kontrolün etkinleştirilmesi gerekir. Uzaktan kontrolün etkinleştirilmesi için gerekli ayarlar Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 : Ağ sunucusu ayarlarının gerçekleştirilmesi

Ağ sunucusu ayarları gerçekleştirildikten sonra ağ yayınlama aracı üzerinden oluşturulacak dokümanın ismi ve standart kaynak bulucu (URL) adresi belirlenir. Şekil 4.7’de şebeke sinyaline uygulanan KSFD analizine ait programı için ağ yayınlama aracı üzerinde gerçekleştirilen ayarlar verilmiştir. Ana yazılımın olduğu bilgisayardan izin istenerek sadece gözlemci veya hem gözlemci hem kontrolcü olarak internet tarayıcısı üzerinden arayüzde değişiklikler yapılabilir. Bu sayede sistemin izlenmesi ve kontrolü için kurulumun yapıldığı yerde olunması gerekmemektedir.



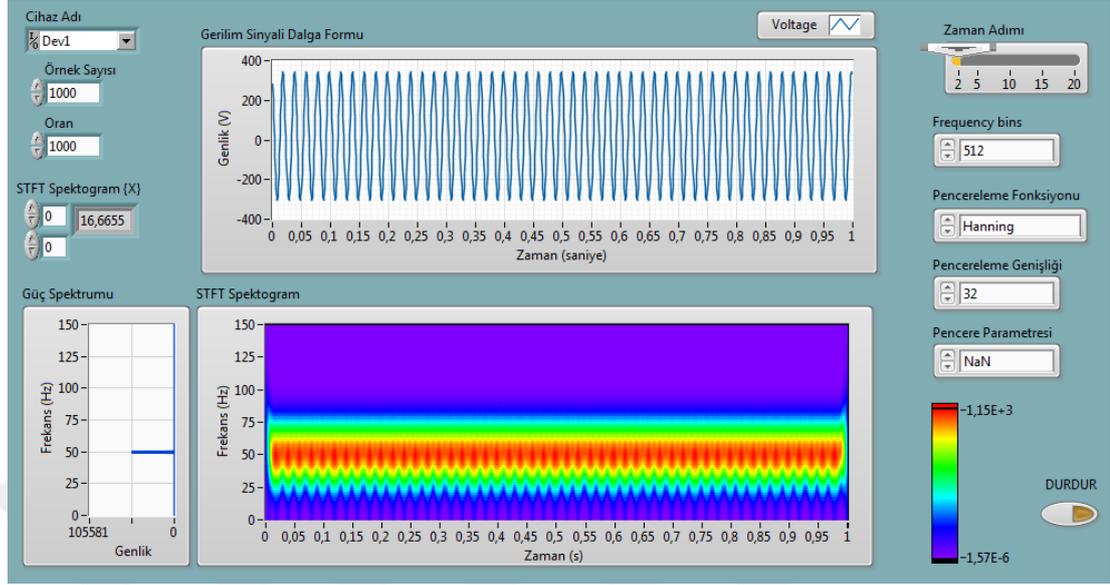
Şekil 4.7 : Ağ sunucusu ayarlarının gerçekleştirilmesi

#### 4.5 Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi Olaylarının KSFD Kullanarak Tespiti

Zaman-frekans tabanlı bir analiz olan Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD), zaman ve frekans arasında tam bir ilişki kurup, pencereleme boyutuna bağlı olarak sinyalin hangi zamanda hangi frekansla oluştuğunun bilinmesine imkân sağlar. Bu amaçla, gerçek zamanlı KSFD sinyal analizinin gerçekleştirilmesi için geliştirilen Labview programına ait ara yüz Şekil 4.8’de verilmiştir. DAQ kart üzerinden alınan gerilim sinyalinin KSFD analizinde, arayüz üzerinden sinyal örnekleme frekansı, KSFD analizi için kullanılacak pencere fonksiyonu ve genişliği ayarlanabilmektedir. KSFD analizi için tasarlanan ara yüz üzerinden gerilim dalga formu ve frekans-güç spektrumu grafiğine de ulaşılabilir.

Bu kısımda incelenecek güç kalitesi olay sinyallerinin analizinde, pencereleme fonksiyonu olarak Hanning fonksiyonu seçilmiş olup, pencere uzunluğunun analize

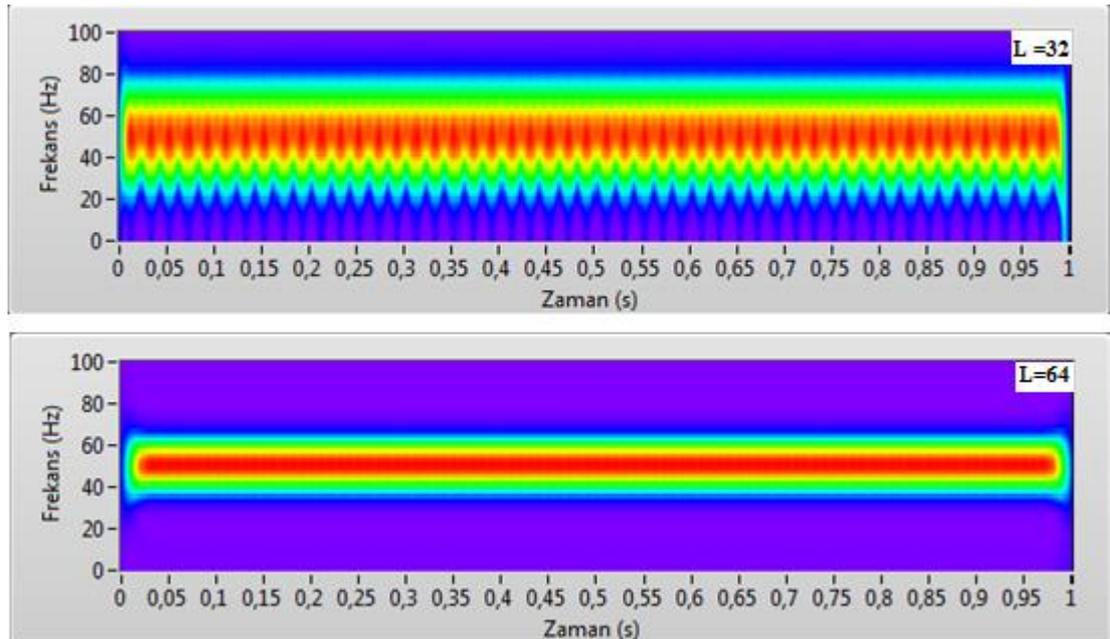
etkisinin incelenmesi için  $L=32$  ve  $L=64$  olmak üzere iki farklı pencereleme genişliğinde analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 : KSF ile sinyal analizi yapılan programın ara yüzü

#### 4.5.1 Nominal gerilim işaretinin analizi

Nominal gerilim işaretinin KSF ile analizi için pencereleme fonksiyonu olarak Hanning fonksiyonu seçilmiş olup 32 ve 64 olmak üzere iki farklı pencereleme genişliği için analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9’da gerçekleştirilen analiz sonrasında oluşan KSF spektrogram grafikleri gösterilmiştir.

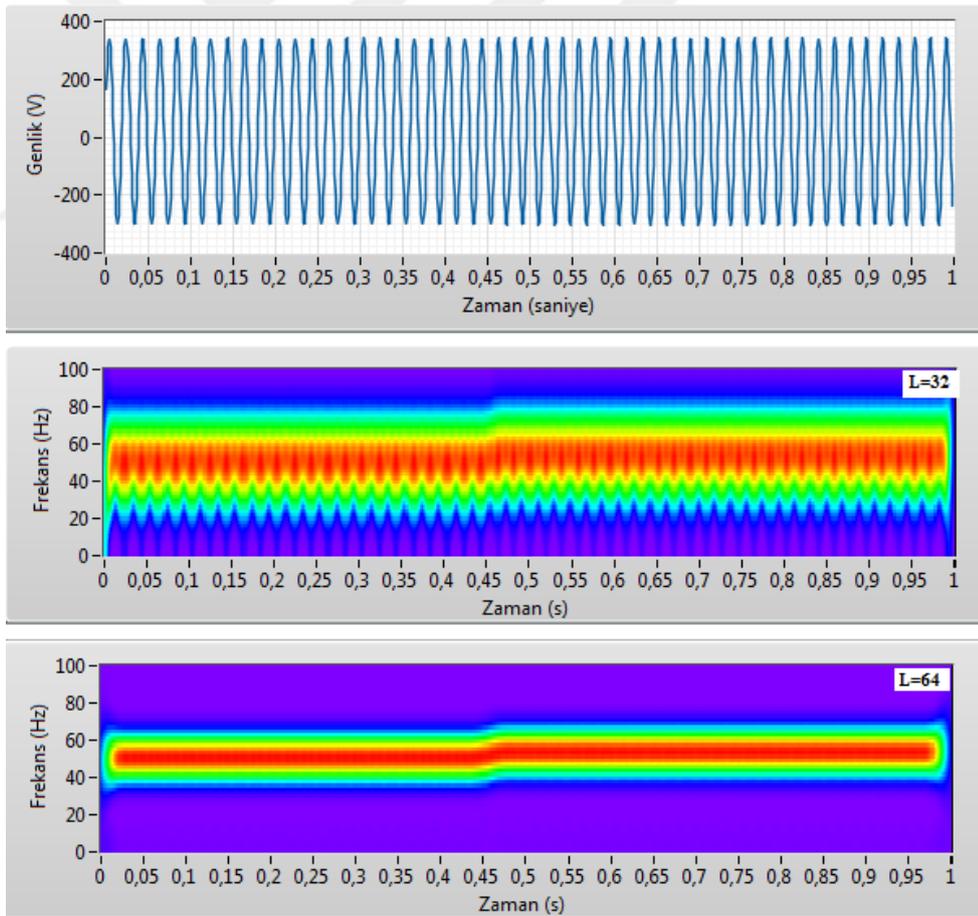


Şekil 4.9 : Nominal gerilim işaretinin KSF ile analizi

#### 4.5.2 Ani frekans değişimlerinin tespiti

Ani frekans değişimi, dağıtık gc sistemindeki frekans değerinin nominal değerinden sapmasıdır. Bu sapma özellikle gc siteminde üretilen gc ile yük miktarının doğru dengelenmemesinden kaynaklanır. şebeke bağlantılı PV sistemler, Bölüm 2’de anlatıldığı gibi standartlarca belirlenen alt ve üst frekans aralıklarında çalışmalıdır. Frekans değişimine bağlı olarak şebeke bağlantılı PV sistemin ada moda geçiş süresi değişmektedir.

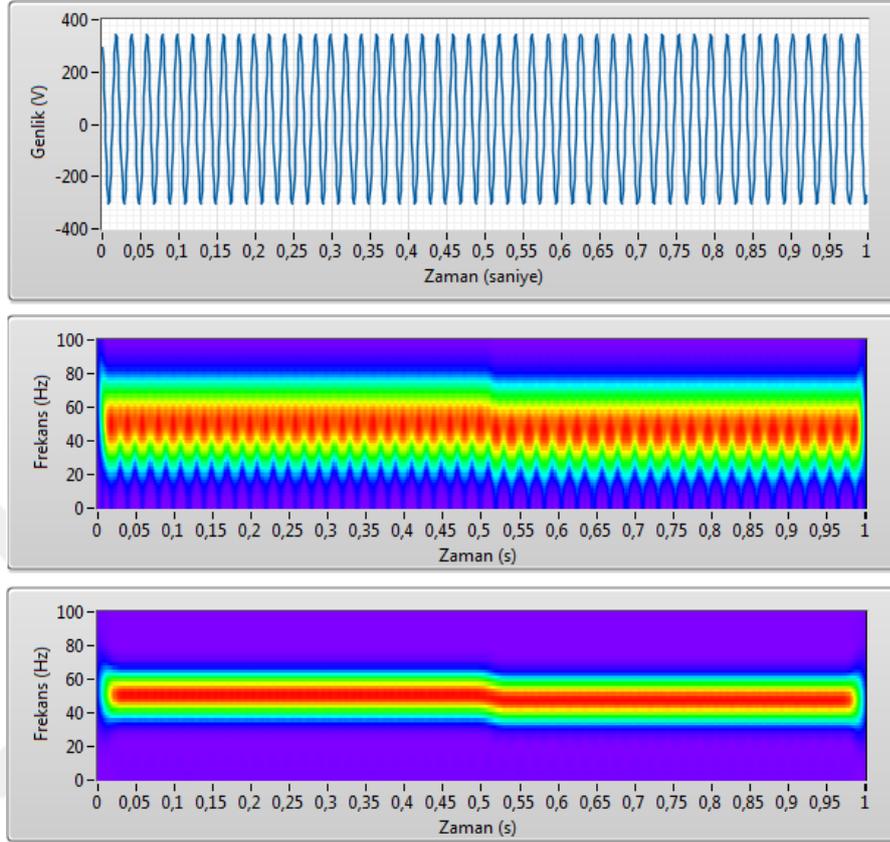
Ani frekans değişiminin KSFD analizi ile tespiti için pencereleme fonksiyonu olarak Hanning fonksiyonu seçilmiş olup  $L=32$  ve  $L=64$  olmak üzere iki farklı pencereleme genişliği için analiz gerçekleştirilmiştir. Üst frekans ve alt frekans aşımı için gerçekleştirilen analiz sonrasında oluşan KSFD spektogramları, sırasıyla şekil 4.10 ve şekil 4.11’de verilmiştir. Her iki analiz için de şebeke frekansı 50 Hz olup örnekleme frekansı 1 kHz’dir.



şekil 4.10 : Üst frekans sınır aşımının KSFD ile analizi

şekil 4.10’da grldğu gibi 450. ms’de kart üzerinden alınan gerilim sinyalinde ani frekans artışı meydana gelmiştir. Frekanstaki bu artış ile yeni frekans değeri 53 Hz

olmuştur. Şekil 4.11’de ise 500’üncü ms’de kart üzerinden alınan gerilim sinyalinde ani frekans düşüşü meydana gelmiş ve bunun sonucunda alt frekans sınır değerinden sapılmıştır. Frekanstaki bu azalış ile yeni frekans değeri 47,5 Hz olmuştur.



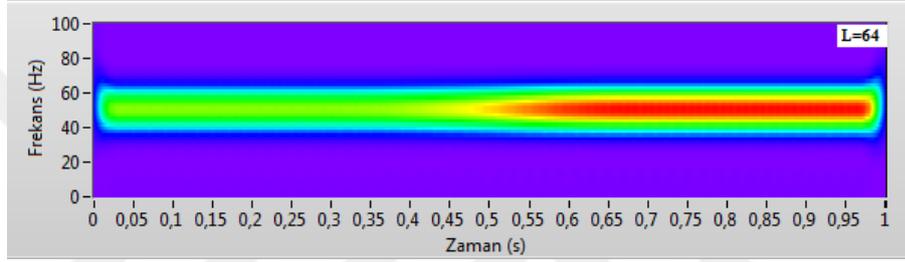
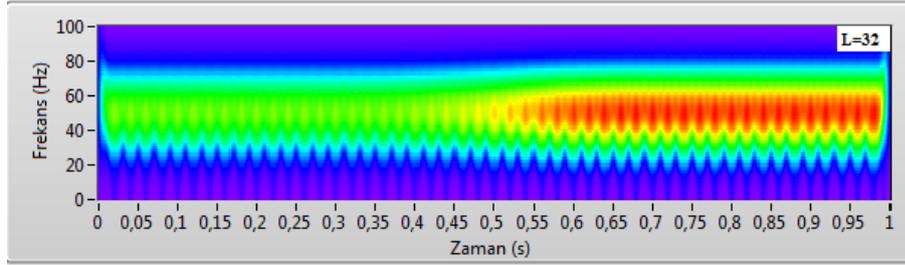
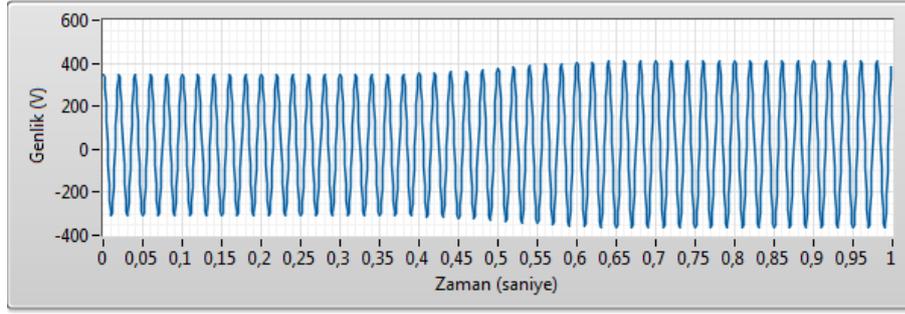
**Şekil 4.11** : Alt frekans sınır aşımının KSFDF ile analizi

### 4.5.3 Alt ve üst gerilim arızasının tespiti

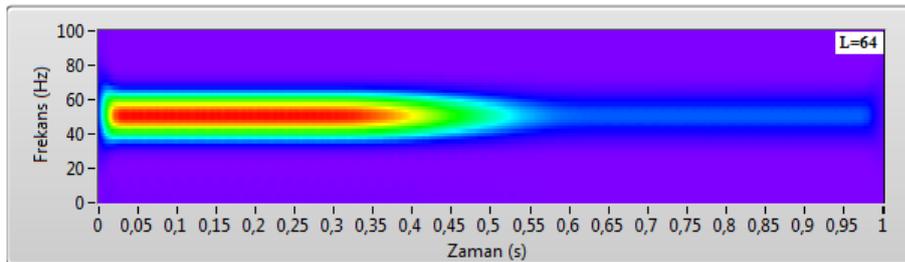
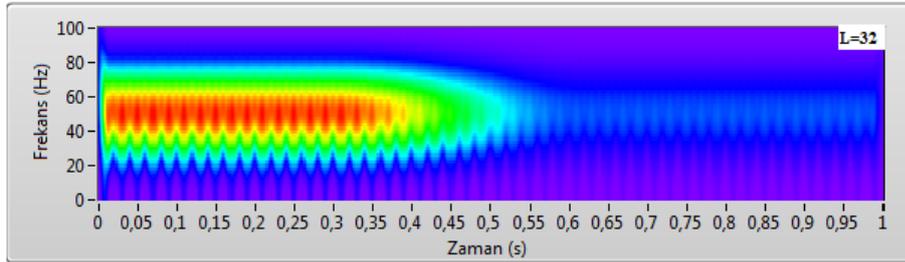
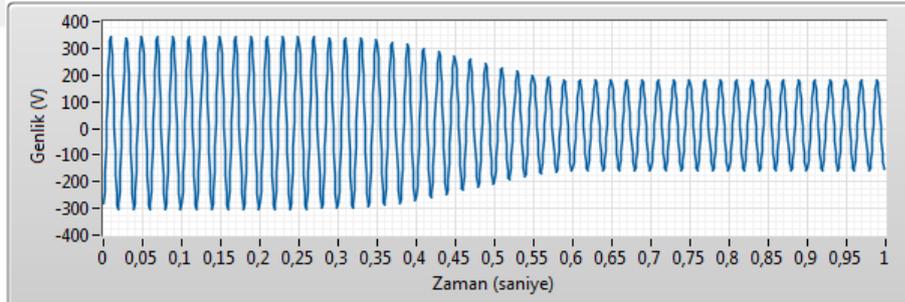
Alt ve üst gerilim arızası, dağıtık güç sistemindeki gerilim değerinin nominal değerinden sapması olup, aşırı güç çeken motorlar, aşırı yüklenme ve hat boyunca meydana gelen arızalardan kaynaklanmaktadır.

Üst gerilim arızası için gerçekleştirilen analiz sonrasında oluşan KSFDF spektrogramı Şekil 4.12’de verilmiştir. Şebeke frekansı 50 Hz olan gerilim dalga şeklinde 350’nci ms’den sonra gerilim genlik değeri nominal değerinin %120’sine çıkmaktadır. Farklı pencereleme genişliğine ait KSFDF analiz sonuçları şekilde yer almaktadır.

Alt gerilim aşımı için gerçekleştirilen analiz sonrasında oluşan KSFDF spektrogramı Şekil 4.13’te verilmiştir. Şebeke frekansı 50 Hz olan gerilim dalga şeklinde 375’inci ms’den sonra gerilim genlik değeri nominal değerinin %75’ine düşmektedir. Bu noktada, geliştirilen gerçek zamanlı yazılım ile alt gerilim arızası durumu tespit edilmektedir.



**Şekil 4.12 : Üst gerilim arızasının KSFD ile analizi**



**Şekil 4.13 : Alt gerilim arızasının KSFD ile analizi**

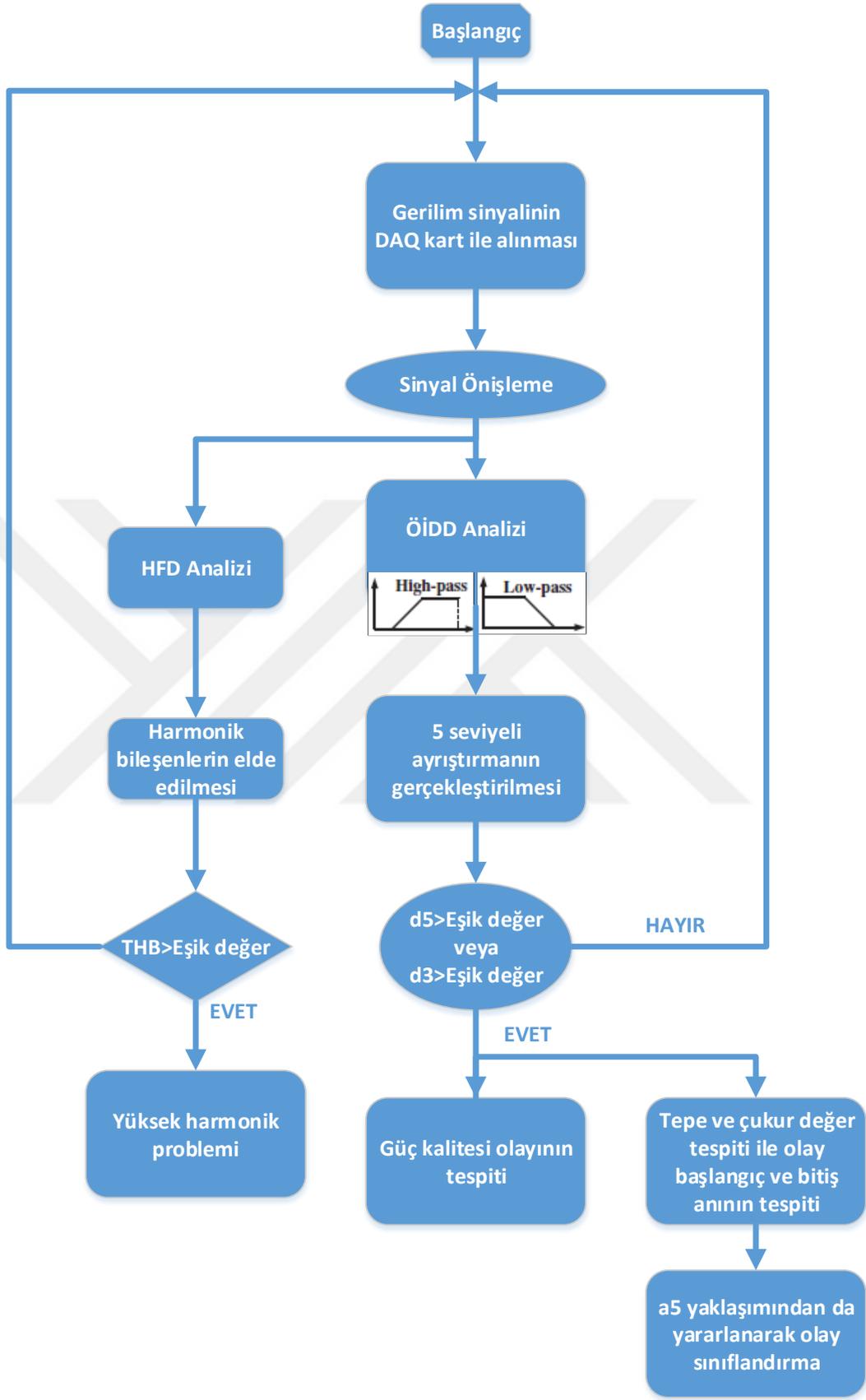
#### 4.6 Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi Olaylarının ÖİDD Kullanarak Tespiti

Bu bölümde, öncelikle gerçek zamanlı olarak güç kalitesi olaylarının tespiti için geliştirilen DD tabanlı olay tanıma sisteminin yapısı ele alınmıştır. Gerçekleştirilen sistemin başarımlı ve kullanılabilirlik değerlendirmesi ise gerçek zamanlı olarak elde edilen güç kalitesi olay sinyallerinin analiziyle yapılmıştır.

Şekil 4.14'te geliştirilen güç kalitesi olay tespit ve tanıma sisteminin blok şeması verilmiştir. 10 kHz örnekleme frekansında, veri toplama kartı ile alınan gerilim sinyali ÖİDD ile Daubechies8 (db8) ana dalgacığından yararlanarak 5 seviyeli ayrıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Analiz sonrasında elde edilen detay ve yaklaşım katsayılarının frekans aralıkları Çizelge 4.1'deki gibidir. Gerilim çökmesi, gerilim sıçraması ve gerilim kesintisi gibi olayların belirgin olduğu frekans aralığı d5 yaklaşım katsayısına karşılık gelirken; geçici durum olaylarının belirgin olduğu frekans aralığı ise d3 katsayısına karşılık gelmektedir. ÖİDD analizinden sonra güç kalitesi olaylarının tespiti için ulusal ve uluslararası standartlar ışığında eşik değerler belirlenmiştir. Belirlenen katsayılar için eşik değerler aşıldığında güç kalitesi tespit edilmekte ve hangi güç kalitesi olayına karşılık geldiği tespit edilmeye çalışılmaktadır. Olay başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenerek olay süresinin tespiti için eşik değerleri aşan tepe ve çukur noktaları tespit edilmiştir. Maksimum ve minimum değerlerden yararlanarak olay süresi belirlenmiştir. Olay süresinin belirlenmesi gerilim çökmesi ve gerilim sıçraması gibi olay türleri ile geçici durum olayları gibi olayların ayırt edilmesinde kullanılabilir. Güç kalitesi olay süresi belirlendikten sonra a5 yaklaşım katsayısının olay öncesi ve sonrası meydana gelen etkin değerindeki farktan yararlanarak, güç kalitesi olayının gerilim kesintisi, gerilim çökmesi veya gerilim sıçraması olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 4.1 :** 5 seviyeli ÖİDD analizi için katsayı bileşenlerinin frekans aralıkları

Seviye	Katsayı Değeri	Frekans Aralığı
1	Detay1 (d1)	2,5-5 kHz
2	Detay2 (d2)	1,25-2,5 kHz
3	Detay3 (d3)	625 Hz-1,25 kHz
4	Detay4(d4)	312-625 Hz
5	Detay1 (d5)	156-312 Hz
5	Yaklaşım5 (a5)	0-156 Hz



Şekil 4.14: Geliştirilen güç kalitesi olay tespiti ve tanıma sistemi akış diyagramı

Geliştirilen güç kalitesi olay tespit ve tanıma sisteminde harmonik analizi için ise HFD analizinden yararlanılmıştır. 40. harmonik değerine kadar analizin yapıldığı bu yöntemde, IEEE 519 standartları esas alınmıştır. Bu standartlara göre alçak gerilim şebekelerinde THB %8'den, her bir harmonik değere ise %5'ten küçük olmalıdır. Belirlenen eşik değerler standartlardaki değerlere karşılık gelmektedir. Sınır değer aşıldığında yüksek harmonik problemi sekmesi ara yüz üzerinde aktif olacaktır.

#### **4.6.1 Nominal gerilim sinyalinin analizi**

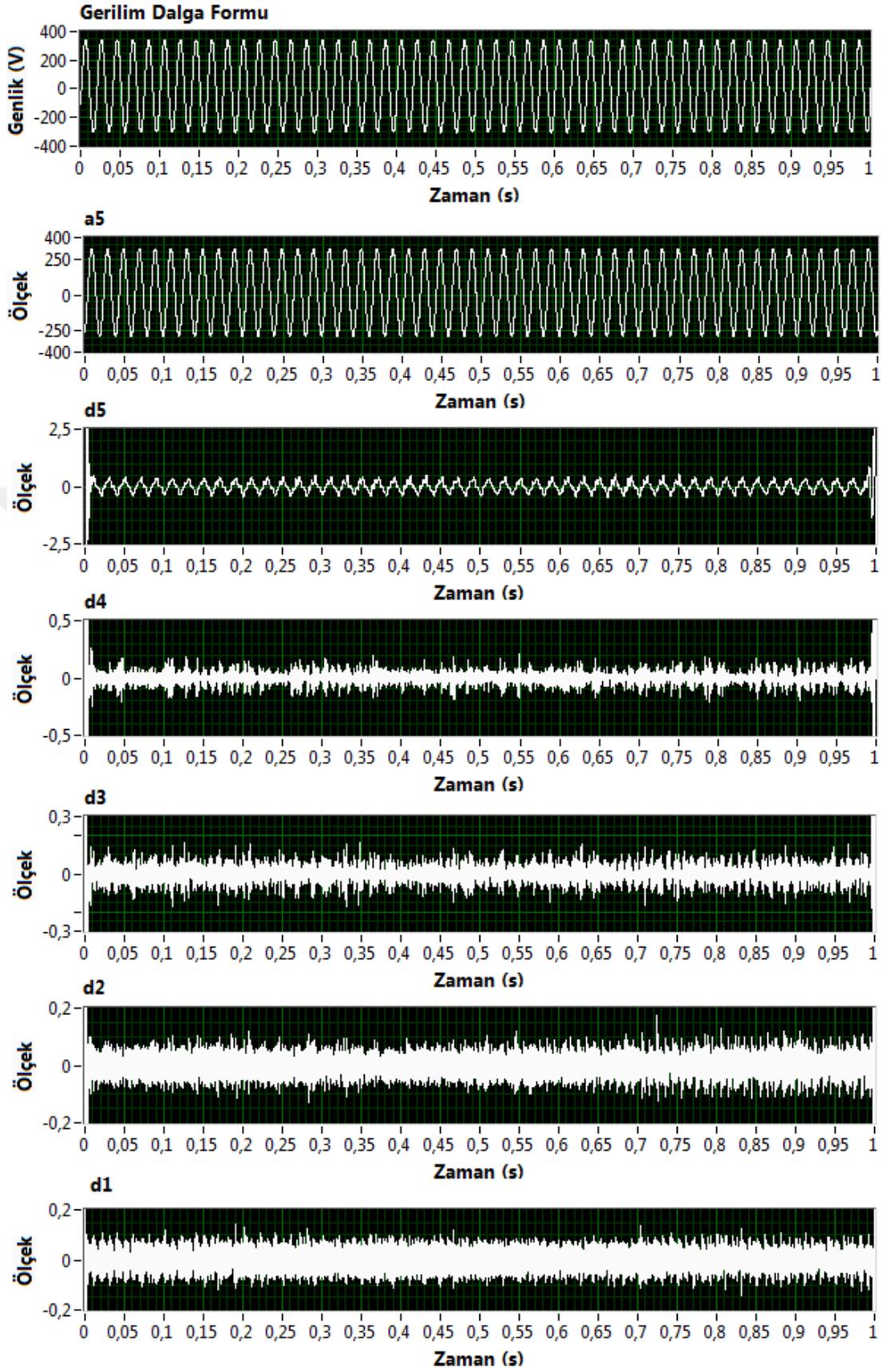
Güç kalitesi olay sinyallerinin daha kolay tanımlanabilmesi için öncelikle DAQ kart üzerinden alınan nominal gerilim sinyali analiz edilmiştir. Şekil 4.15'de nominal gerilim dalga şekli ve 5 seviyeli ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayıların grafiği verilmiştir.

#### **4.6.2 Gerilim çukuru olayının tespiti**

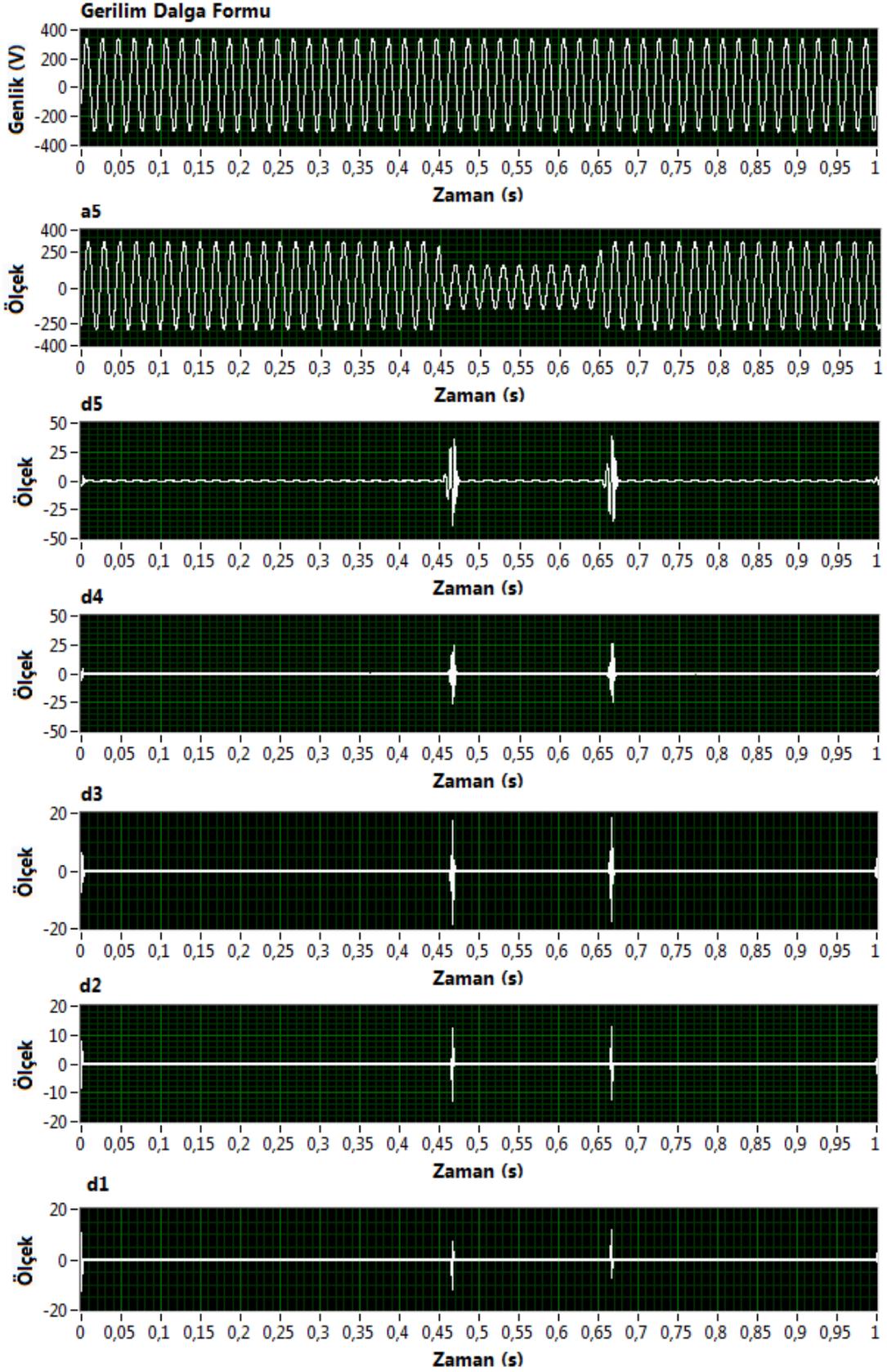
Gerilim çukurları Bölüm 2'de belirtildiği gibi ulusal ve uluslararası standartlarda olayın meydana geldiği süre ve olay genliği için değerlendirilmektedir. DAQ kart üzerinden 10 kHz örnekleme frekansında alınan gerilim sinyalinde 464'üncü ms'de gerilim seviyesinde nominal gerilimin %48'i kadar azalma olmuş ve bu gerilim düşümü 665'inci ms'ye kadar sürmüştür. Şekil 4.16'da gerilim çukuru taşıyan dalga şekli ve 5 seviyeli ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayıların grafiği verilmiştir. ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayılardan d5 detay katsayısı olay anı ve süresi hakkında bilgi verirken; a5 katsayısı ise gerilim genliğinde meydana gelen düşüm hakkında bilgi vermektedir.

#### **4.6.3 Gerilim sıçraması olayının tespiti**

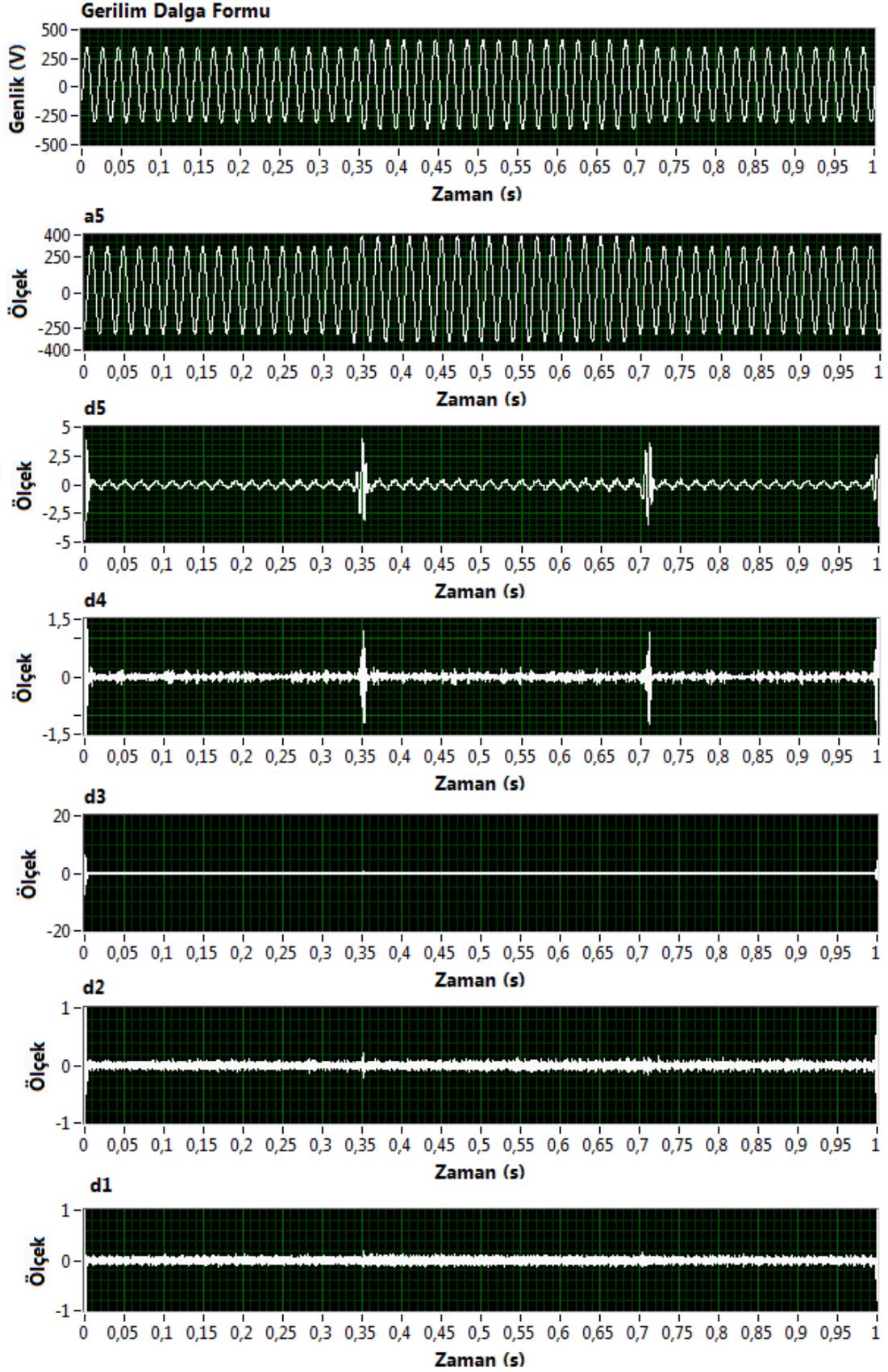
Gerilim sıçraması olayı, şebeke frekansında çalışan bir sistemde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki %110-180 arasında meydana gelen artış olarak tanımlanır. DAQ kart üzerinden 10 kHz örnekleme frekansında alınan gerilim sıçraması taşıyan sinyalde, 351'inci ms'de gerilim seviyesinde nominal gerilimin %20'sini aşan bir artış olmuş ve bu olay 711. ms'ye kadar sürmüştür. Şekil 4.17'de gerilim sıçraması taşıyan dalga şekli ve 5 seviyeli ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayıların grafiği verilmiştir. ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayılardan d5 detay katsayısı olay anı ve süresi hakkında bilgi verirken; a5 katsayısı ise gerilim genliğinde meydana gelen artış hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 4.15 : Nominal gerilim sinyali ve ÖİDD analizi



Şekil 4.16 : Gerilim çukuru olayı ve ÖİDD analizi



Şekil 4.17 : Gerilim sıçraması olayı ve ÖİDD analizi

#### **4.6.4 Gerilim kesintisi olayının tespiti**

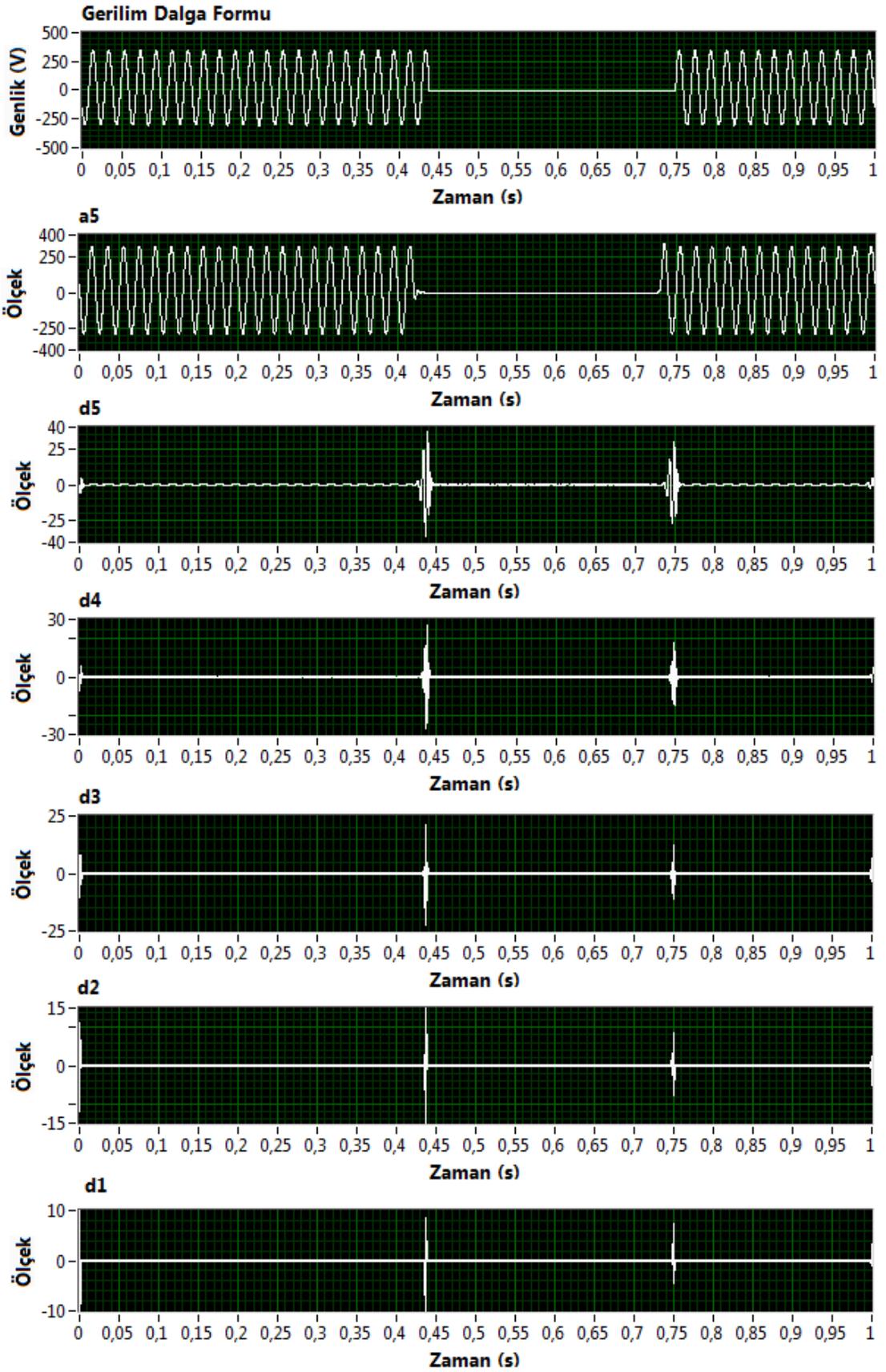
Gerilim kesintisi olayı, şebeke frekansında çalışan bir sistemde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilim genliğinde %90'dan daha fazla meydana gelen düşüş olarak tanımlanır. Gerilim kesintisi taşıyan sinyalde, 436'ncı ms'de gerilim gerilim kesintisi meydana gelmiş ve bu kesinti 749. ms'ye kadar sürmüştür. Şekil 4.18'de gerilim kesintisi taşıyan dalga şekli ve 5 seviyeli ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayıların grafiği verilmiştir. ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayılardan d5 detay katsayısı olay anı ve süresi hakkında bilgi verirken; a5 katsayısı ise gerilim genliğinde meydana gelen düşüş hakkında bilgi vermektedir.

#### **4.6.5 Frekans değişimi olayının tespiti**

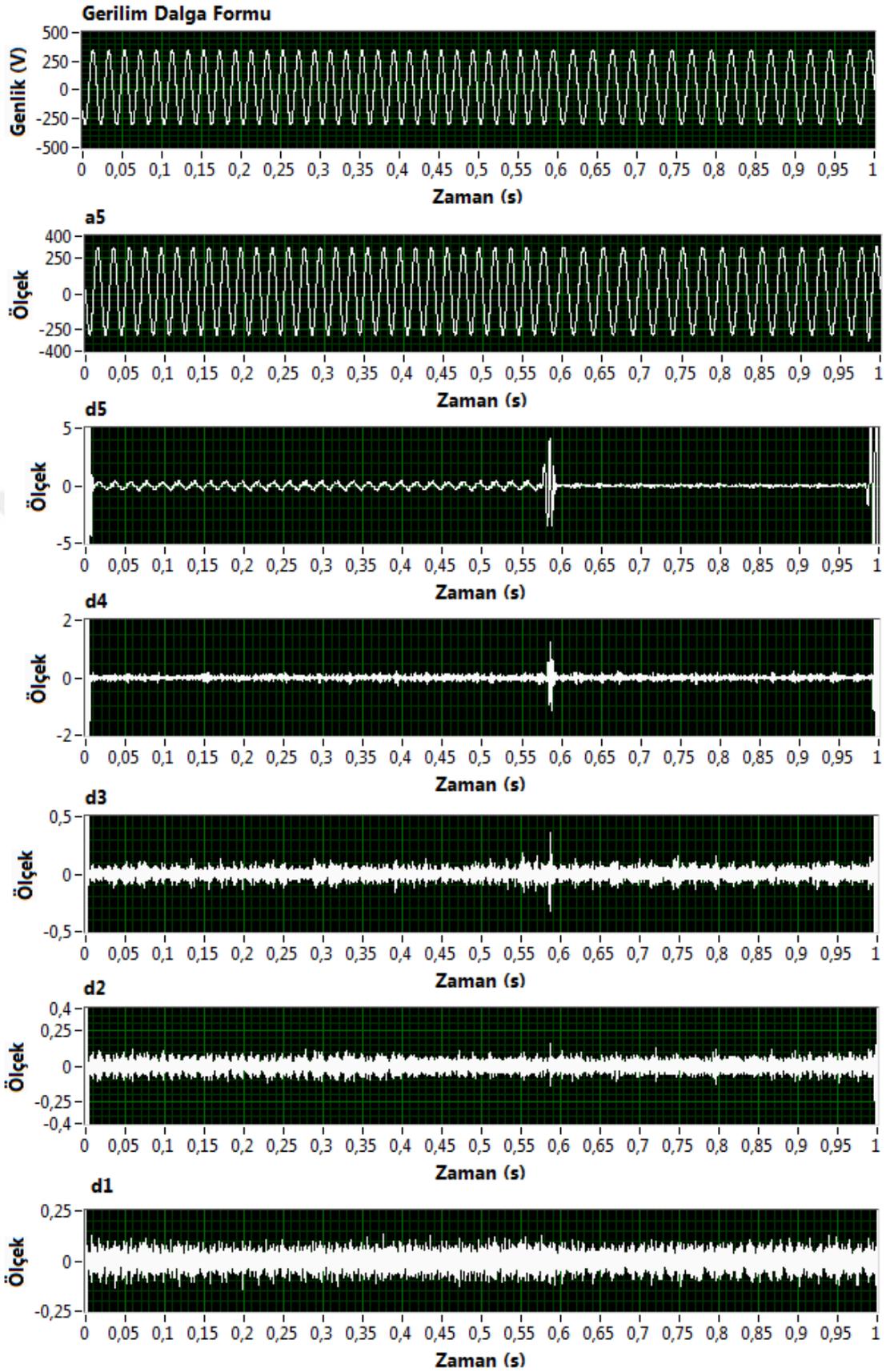
Frekans değerinin Bölüm 2'de belirtildiği gibi ulusal ve uluslararası standartlarca belirlenen aralıkta tutulması gerekmektedir. Ani frekans düşmesi ve ani frekans yükselmesinin gözlemlendiği gerilim sinyalleri ve ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayılar sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi gerçek zamanlı olarak DAQ kart üzerinden alınan gerilim sinyalinin 587'nci ms'de 50 Hz olan şebeke frekansı 47 Hz değerine düşmüştür. Ani frekans yükselmesinin meydana geldiği olayda ise 553'üncü ms'de 50 Hz olan şebeke frekansı 53 Hz mertebesine çıkmıştır. ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayılardan d5 detay katsayısındaki değişim her iki durum için de olayla ilgili belirgin özellikler taşımaktadır.

#### **4.6.6 Geçici durum olayının tespiti**

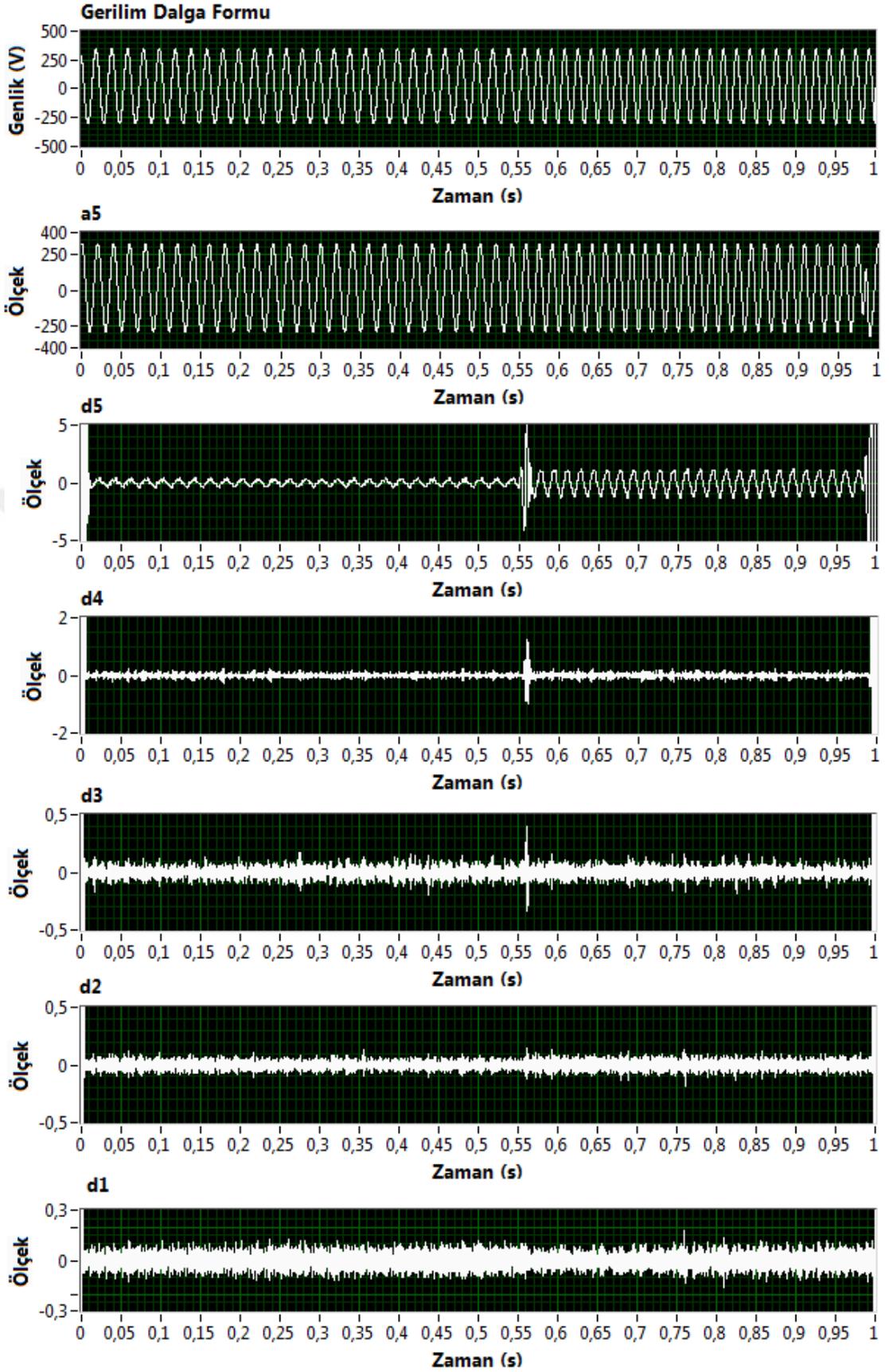
Geçici durum olayları yüksek frekans bileşenleri içermekle beraber, yarım periyottan daha kısa süren güç kalitesi olaylarıdır. Güç sistemlerinde meydana gelen geçici durum olayları 300-900 Hz aralığında değer almaktadır. Geçici durum olayının gözlemlenmesi amacıyla, sinyal generatöründen elde edilen nominal gerilim işaretine Labview ortamında önce gürültü eklenmiş daha sonrasında 900 Hz frekansında, 5 ms süreli salınımlı bir geçici olay oluşturulmuştur. Şekil 4.21'de elde edilen bu sinyalin dalga formu ve ÖİDD analizi sonucunda elde edilen katsayılara ait grafikler yer almaktadır. Gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi veya frekans değişiminden farklı olarak oluşna güç kalitesi olayı yüksek frekans içerdiğinden d3 ve d4 katsayılarında daha belirgin karakteristikler taşımaktadır. Geçici durum olayı 90'nci ms'de başlayıp 95'inci ms'de son bulmuştur.



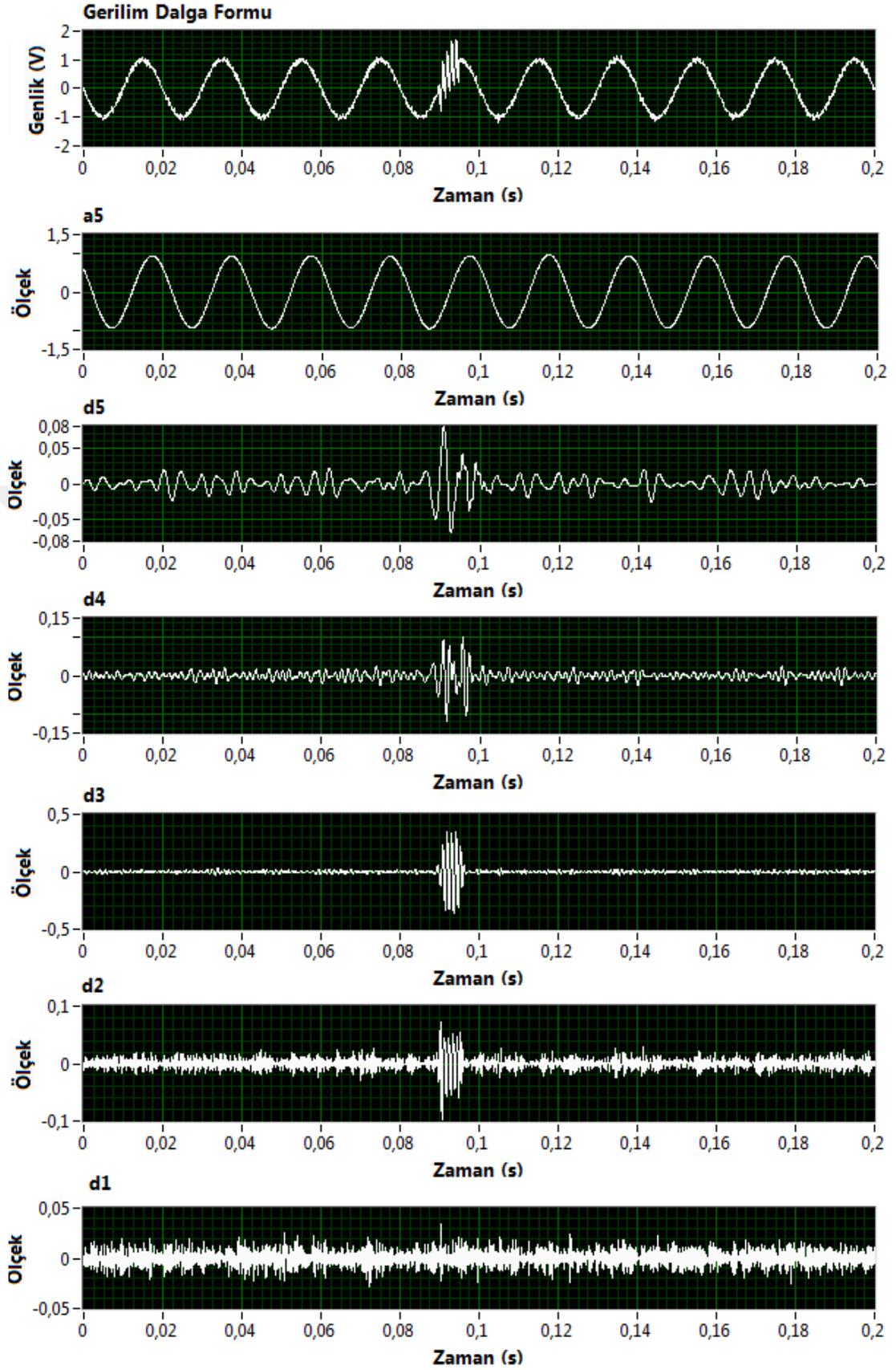
Şekil 4.18 : Gerilim kesintisi olayı ve ÖİDD analizi



Şekil 4.19 : Ani frekans yükselmesi olayı ve ÖİDD analizi



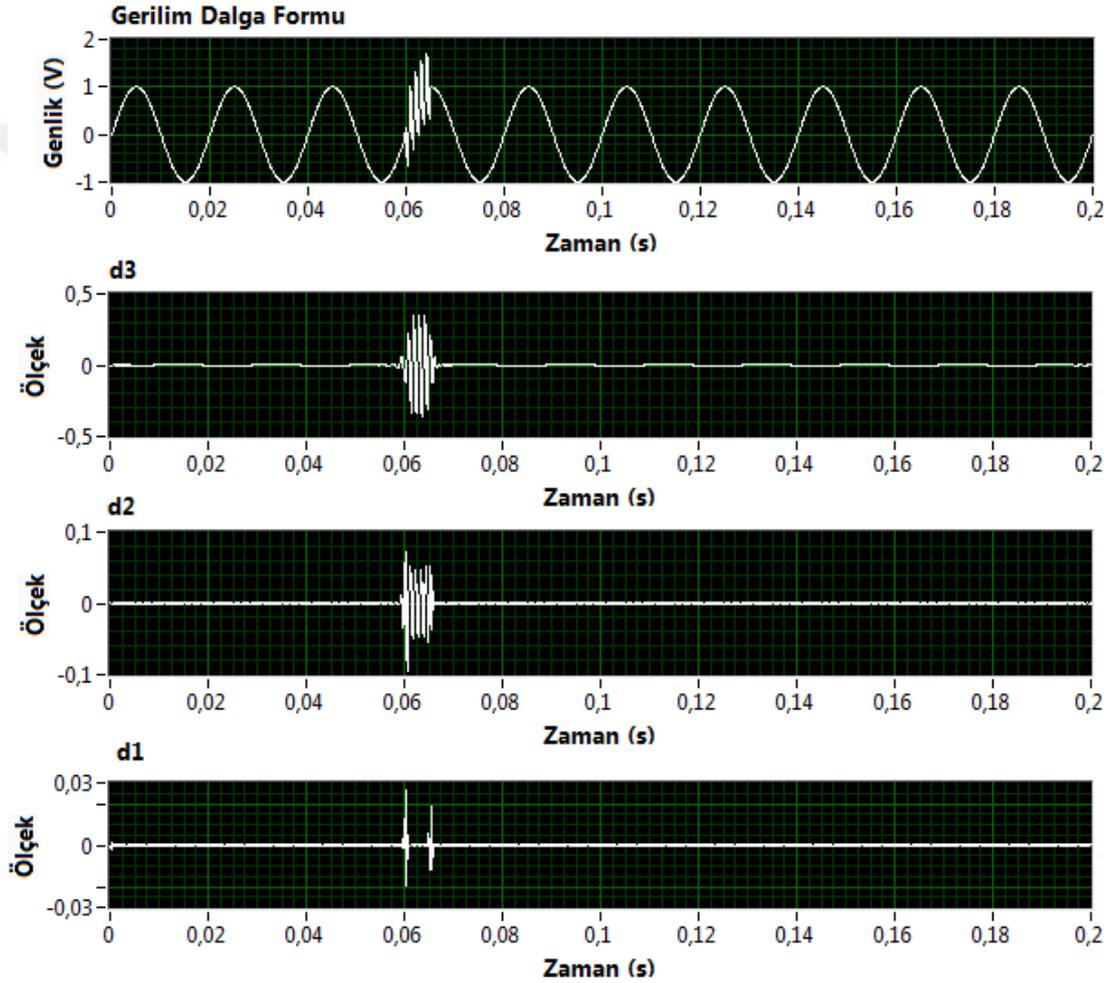
Şekil 4.20 : Ani frekans düşüşü olayı ve ÖİDD analizi



Şekil 4.21 : Geçici durum olayı ve ÖİDD analizi

#### 4.6.7 Gürültü içeren geçici durum olayının analizi

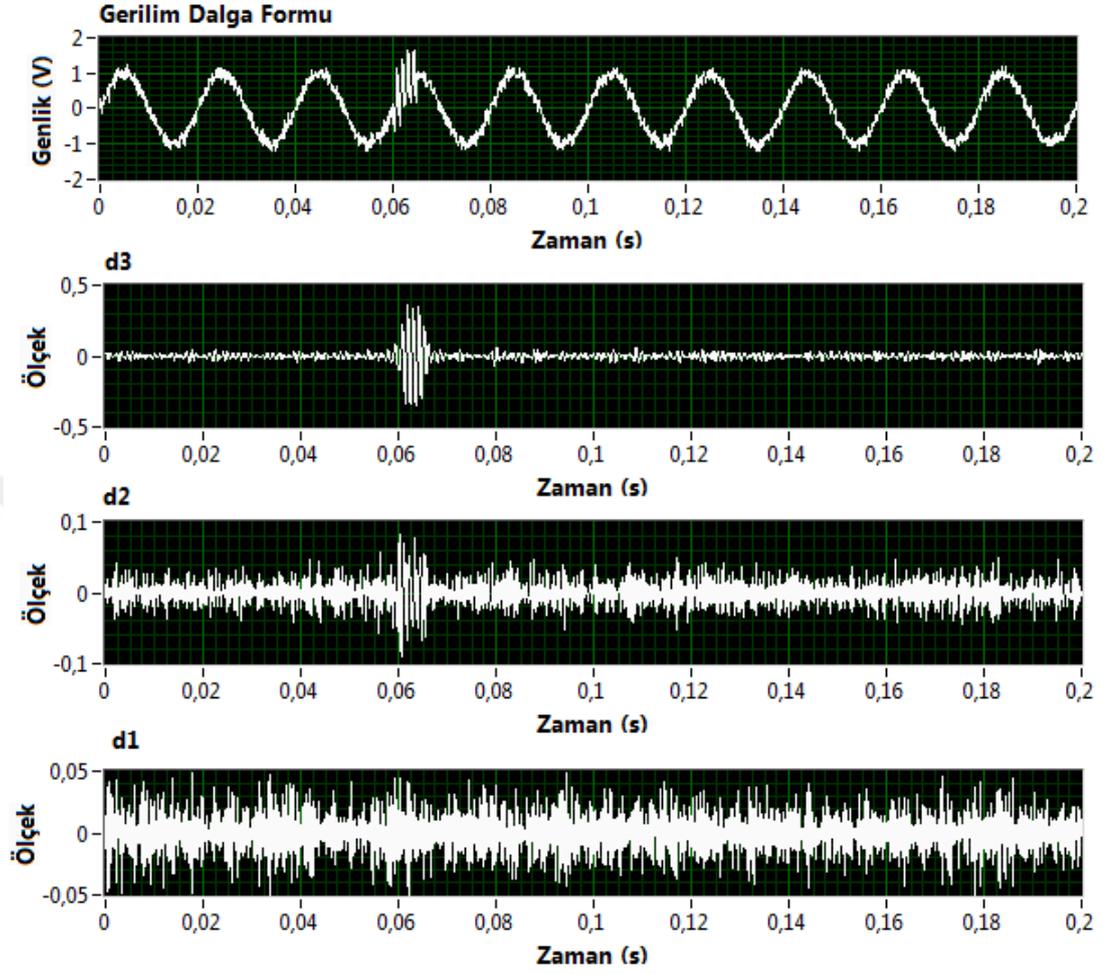
Geçici durum olayının gözlemlenmesi ve farklı gürültü koşulları altında incelenmesi amacıyla, sinyal generatöründen elde edilen nominal gerilim işaretine Labview ortamında önce çeşitli seviyelerde gürültü eklenmiş, daha sonrasında 900 Hz frekansında, 5 ms süreli salınımlı bir geçici olay oluşturulmuştur. Gürültü barındırmayan ve yüksek gürültü içeren geçici durum olaylarına ait dalga formları ve ÖİDD analizi ile elde edilen d1, d2 ve d3 detay katsayı grafikleri sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.22 : Gürültü içermeyen geçici durum olayı ve d1, d2 ve d3 katsayıları

Gürültü içermeyen geçici durum olayı neredeyse tüm detay katsayıları ile belirlenebilmektedir. Gürültü miktarının artması ise Şekil 4.25’de görüldüğü gibi katsayılardan yeterli bilgi alınmasını engellemiştir. ÖİDD analizi, gürültü içeren sinyallerde ADD ve DPD yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermesine rağmen;

yüksek gürültü içeren sinyallerde eşik değerlere göre doğru ve güvenilir bir analiz sunmada yetersiz kalmaktadır.



Şekil 4.23 : Yüksek gürültü içeren geçici durum olayı ve d1, d2 ve d3 katsayıları

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mevcut elektrik şebekesinin frekans, akım, gerilim, faz farkı ve güç gibi parametreleri değerlendirilerek, şebeke bağlantılı bir PV sistemin mevcut elektrik şebekesi ile entegrasyonunda karşılaşılabilecek muhtemel güç kalitesi olaylarını gerçek zamanlı olarak dalgacık dönüşümü yöntemiyle ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak tespit edilebilmesine ve olay türünü belirleyebilen bir olay tanıma sisteminin geliştirilmesine çalışılmıştır. Ayrıca Labview ile geliştirilen dalgacık dönüşümü tabanlı (DD) yazılım programı yardımıyla PV sistem gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir. Güç sistemine ait gerilim, akım, frekans, güç değerleri, güç katsayısı, vektör diyagramları gibi veriler tasarlanan ara yüz üzerinden sürekli olarak takip edilebilmektedir.

Önerilen dalgacık dönüşümü tabanlı güç kalitesi olaylarını tespit sistemi, üç aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle gerçek zamanlı olarak veri toplama kartı yardımıyla alınan gerilim sinyali normalize edildikten sonra Daubechies8 (db8) ana dalgacığından yararlanarak 5 seviyeli örnek indirgenmemiş dalgacık dönüşümü (ÖİDD) analizine tabi tutulmuştur. Gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi ve ani frekans değişimi gibi olayların belirgin olduğu frekans aralığı d5 detay katsayısına karşılık gelirken; geçici durum olaylarının belirgin olduğu frekans aralığı ise d2 ve d3 detay katsayılarına karşılık gelmektedir. ÖİDD analizinden sonra güç kalitesi olaylarının tespiti için ulusal ve uluslararası standartlar ışığında eşik değerler belirlenmiş bu değerlerin aşımına göre güç kalitesi olayı tespiti gerçekleştirilmiştir. Eşik değeri aşan tepe ve çukurlar üzerinden belirlenen olay süresinin tespiti geçici durum olayları ile diğer arıza türlerini birbirinden ayırmada kullanılmıştır. Güç kalitesi olay süresi belirlendikten sonra a5 yaklaşım katsayısının olay öncesi ve sonrası meydana gelen etkin değerindeki farktan yararlanarak, güç kalitesi olayının gerilim kesintisi, gerilim çökmesi veya gerilim sıçraması olduğu belirlenmiştir. Önerilen olay tespit ve tanıma sisteminde, şebeke geriliminde meydana gelen harmoniklerin analizi için Hızlı Fourier Dönüşümünden yararlanılmıştır. IEEE 519 standartlarında belirtilen sınır değerler için toplam harmonik bozulma hesaplanmıştır.

Güç kalitesi olaylarının tespitinin doğru şekilde yapılabilmesi için anormal koşullar altında güç sisteminin davranışlarının incelenmesi gerekmektedir. Öncelikle bu tez çalışmasında, güç sisteminde meydana gelen güç kalitesi veya arıza olayları sonucunda oluşan dalga formlarının gözlemlenmesi amacıyla MATLAB/Simulink ortamında PV sistemin de bağlı olduğu bir güç dağıtım sistemi modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen model simülasyonları sonucu elde edilen olay verileri ve matematiksel yöntemlerle elde edilen olay verileri ile güç kalitesi olayları için veri kümesi hazırlanmıştır. Bu olay verileri üzerinde MATLAB ortamında çok çözünürlüklü analiz gerçekleştirilmiştir.

Tezde geliştirilen gerçek zamanlı olarak güç kalitesi olaylarını tespit eden sistemin performansını değerlendirmek amacıyla, gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi, ani frekans değişimleri ve geçici durum olayları gibi güç kalitesi olay sinyallerinden yararlanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda gerçek zamanlı güç kalitesi olay tespiti için başarı oranının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle geliştirilen güç kalitesi olay tespit ve tanıma sisteminin, arıza tespiti ve olay süresi belirlemede oldukça başarılıdır. Ayrıca geliştirilen sistem, güç kalitesi olaylarının Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) analiziyle tespit sonuçları ile karşılaştırılmıştır. KSFD analizinin işlem süresi, ÖİDD yöntemine göre daha çok vakit almaktadır. Ayrıca KSFD analizinde pencereleme boyutu değiştirilemediğinden işaretin aynı anda hem yüksek frekans hem de alçak frekans bilgisi tam olarak elde edilemediği gözlemlenmiştir. ÖİDD ile yapılan analizde ise düşük frekanslı bileşenler için d5 detay ve a5 yaklaşım katsayılarından yararlanılmış; yüksek frekanslı bileşenler içinse d2 veya d3 yaklaşım katsayılarından yararlanılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde güç kalitesi olay tanımları yapılmış ve aynı zamanda çok sayıda ülke tarafından kabul görmüş güç kalitesi ile ilgili standartlar incelenmiştir. Son yıllarda, mevcut elektrik şebekesine bağlanacağı düşünülen çok sayıda PV santralin, uluslararası standartlara uygun bir şekilde mevcut elektrik şebekesine bağlantısını gerçekleştirmek önemli bir konu haline geldiğinden, yapılan çalışma bu açıdan büyük önem taşımaktadır.

Tez çalışmasında geliştirilen gerçek zamanlı olarak güç kalitesi olaylarını tespit eden sistem aynı zamanda şebekeye ait gerilim, akım, frekans, güç değerleri, güç katsayısı ve vektör diyagramları gibi elektriksel verileri sürekli olarak izleyip gerekli durumlarda kayıt yapabildiğinden, modern güç analizörü görevi de görmektedir.

Literatürde güç kalitesi olay verilerinin tespiti ve sınıflandırılması ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmaların çok büyük bir kısmı simülasyon veya gerçek zamanlı olmayan çalışmalar olup, genelde sınırlı sayıda hata türünü tespit etmeye odaklanmış çalışmalardır. Hataların otomatik olarak tespit edildiği gerçek zamanlı sinyal işleme tabanlı çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Bu nedenle dalgacık dönüşümü yöntemi ile gerçekleştirilen tez çalışmasında kullanılan hata tespit yönteminin literatüre önemli katkılar sağlayacağı açıktır. Bu çalışmadan elde edilen birikim, güç kalitesi olaylarını tespit edip, gerekli koruma tedbirlerini otomatik olarak alabilen gerçek zamanlı bir arıza tespit ve koruma alt yapısının oluşturulması düşüncesinin ilk aşamasını oluşturacaktır.

Tezde geliştirilen gerçek zamanlı olarak güç kalitesi olaylarını tespit eden sistem, şebeke üzerinde sürekli arıza ve güç kalitesi olayları meydana gelmediğinden, laboratuvar ortamındaki bir sinyal üretici üzerinden alınan veriler ışığında test edilmiştir. Gerçekleştirilen programı test edecek bir veri kümesinin olmaması büyük sorun oluşturmaktadır. Güç analizörü vb. donanımla en az bir yıllık verinin toplanması, daha sonraki çalışmalarda sistemin başarımlarının testi için önemlidir.

Geliştirilen olay tanıma sistemi, tek bir olay oluşumu hakkında tespitte bulunurken, güç sisteminde meydana gelen arızalar yapılan manevralar ile birbirini izleyen çoklu arızalara neden olabilir. Daha sonraki çalışmalarda bu faktör de göz önünde bulundurulmalıdır.

Tez çalışmasında, harmonik analiz için HFD tabanlı analiz yöntemi kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda Dalgacık Paket Dönüşümü (DPD), her frekans bandıyla ilgili ayrıntılı bilgi içerdiğinden sıkça kullanılmaktadır. HFD yöntemi yerine, DPD analizinin kullanılması analizi daha güvenilir hale getirebilir.

Tezde önerilen olay tespit yöntemi, yüksek gürültü içeren sinyallerde arıza olayını yakalamada yetersiz kalmaktadır. Özellikle geçici durum olayı gibi yüksek frekanslı bileşenlerin bilgisini taşıyan detay katsayıları eşik değerlerden sapmaktadır. Şebeke sinyalinin de gürültü içerdiği düşünüldüğünde, olay tespitinde daha yüksek doğruluk oranı için veri toplama kartı (DAQ) ile alınan işaretin bir filtreden geçirilmesi fayda sağlayabilir. Örnek DAQ kart ile alınan sinyal önce DD tabanlı gürültü arındırma işleminden geçirildikten sonra tekrar DD analizi gerçekleştirilebilir. İşlem yükü ve süresinde artış olmasına rağmen olay tespiti daha yüksek başarımlar gösterebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Hamzaoui, I., Bouchafaa, F., & Hadjammar, A.** (2011). Investigation of the behavior of a three phase gridconnected photovoltaic system to control active and reactive power with DPC, *Energy Procedia*, 6, 493-502.
- [2] **Elektrik enerjisi piyasası ve arz güvenliği stratejisi belgesi.** (2009). Yüksek Planlama Kurulu, 2009/11, 18 Mayıs 2009.
- [3] **An energy policy for Europe.** (2007). Commission of the European Communities, COM 1, Brussels.
- [4] **Mikro generatörlerin alçak gerilim dağıtım şebekeleri ile paralel bağlanması için kurallar.** (2010).” TS EN 50438, Haziran 2010.
- [5] **Hare, J., Shi, X., Gupta, S., & Bazzi, A.** (2016). Fault diagnostics in smart micro-grids: A survey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1114-1124.
- [6] **Houssein, A., Heraud, N., Souliman, I., Pellet, G.** (2010). “Monitoring and fault diagnosis of photovoltaic panels.” *In: Proceedings of the IEEE international energy conference and exhibition.*
- [7] **Ndiaye, A., Kebe, C.M., Ndiaye, P.A., Charki, A., Kobi, A., Sambou, V.** (2013). “A novel method for investigating photovoltaic module degradation”, *Energy Procedia*, 36, 1222–31.
- [8] **Bayrak. G., Kabalcı. E.** (2016). “Implementation of a new remote islanding detection method for wind–solar hybrid power plants”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1-15.
- [9] **Das, B., Reddy, J.V.** (2005). “Fuzzy-logic based fault classification scheme for digital distance protection”. *IEEE Trans Power Deliv*, 20, 609–616.
- [10] **Ferrero, A., Sangiovanni, S., Zappitelli, E.** 1995. “A fuzzy set approach to fault type identification in digital relaying”, *IEEE Trans Power Deliv*, 10, 169–75.
- [11] **Chen, W., Bazzi, A.M.** (2013). “A generalized approach for intelligent fault detection and recovery in power electronic systems”, *In: Proceedings of the energy conversion congress and exposition.*
- [12] **Kimmich, F., Schwarte, A., Isermann, R.** (2005). Fault detection for modern diesel engines using signal and process model based methods, *Control Eng Pract*, 13, 189–203.
- [13] **Garcia, M. C., Sanz-Bobi, M. A., & del Pico, J.** (2006). SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox. *Computers in Industry*, 57(6), 552-568.
- [14] **Arcak, M., Gorgun, H., Pedersen, L. M., & Varigonda, S.** (2004). A nonlinear observer design for fuel cell hydrogen estimation, *IEEE Transactions on control systems technology*, 12(1), 101-110.
- [15] **Stettler, S., Toggweiler, P., & Remund, J.** (2006). SPYCE: satellite photovoltaic yield control and evaluation, *In Proceedings of the 21st European photovoltaic solar energy conference* (pp. 2613-2616).

- [16] **Karatepe, E., & Hiyama, T.** (2011, September). Controlling of artificial neural network for fault diagnosis of photovoltaic array, *In Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- [17] **Abdelmalek, S., Rezazi, S., & Azar, A. T.** (2017). Sensor Faults Detection and Estimation for a Dfig Equipped Wind Turbine, *Energy Procedia*, 139, 3-9.
- [18] **Haykin, S.** (2008). Neural networks and learning machines. Hamilton Ontario Canada, *Pearson*. 3rd edition.
- [19] **Silva, K. M., Souza, B. A., & Brito, N. S.** (2006). Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(4), 2058-2063.
- [20] **Sanz-Bobi, M. A., San Roque, A. M., De Marcos, A., & Bada, M.** (2012). Intelligent system for a remote diagnosis of a photovoltaic solar power plant, *In Journal of Physics: Conference Series*, (Vol. 364, No. 1, p. 012119). IOP Publishing.
- [21] **Zaher, A. S. A. E., McArthur, S. D. J., Infield, D. G., & Patel, Y.** (2009). Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis, *Wind Energy*, 12(6), 574-593.
- [22] **Chouder, A., & Silvestre, S.** (2010). Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis, *Energy conversion and Management*, 51(10), 1929-1937.
- [23] **Zhao, Y., Yang, L., Lehman, B., de Palma, J. F., Mosesian, J., & Lyons, R.** (2012). Decision tree-based fault detection and classification in solar photovoltaic arrays, *In Applied power electronics conference and exposition (APEC), 2012 twenty-seventh annual IEEE* (pp. 93-99). IEEE.
- [24] **Burges, C. J.** (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition, *Data mining and knowledge discovery*, 2(2), 121-167.
- [25] **Haykin, S. S.** (2009). *Neural networks and learning machines (Vol. 3)*. Upper Saddle River, NJ, USA:Pearson.
- [26] **Dash, P. K., Samantaray, S. R., & Panda, G.** (2007). Fault classification and section identification of an advanced series-compensated transmission line using support vector machine. *IEEE transactions on power delivery*, 22(1), 67-73.
- [27] **Parikh, U.B., Das, B., Maheshwari, R.** (2010). "Fault classification technique for series compensated transmission line using support vector machine", *Int J Electr Power Energy Syst*, 32, 629–36.
- [28] **Escobet, T., Feroldi, D., De Lira, S., Puig, V., Quevedo, J., Riera, J., Serra, M.** (2009). Model based fault diagnosis in PEM fuel cell systems, *J Power Sources*, 192, 216–23.
- [29] **Kurz, T., Hakenjos, A., Krämer, J., Zedda, M., & Agert, C.** (2008). An impedance-based predictive control strategy for the state-of-health of PEM fuel cell stacks, *Journal of Power Sources*, 180(2), 742-747.
- [30] **Jeffries, W. Q., Chambers, J. A., & Infield, D. G.** (1998). Experience with bicoherence of electrical power for condition monitoring of wind turbine blades. *IEE Proceedings-vision, image and signal processing*, 145(3), 141-148.

- [31] **Pinto, S. J., & Panda, G.** (2015). Wavelet technique based islanding detection and improved repetitive current control for reliable operation of grid-connected PV systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 39-51.
- [32] **Latran, M. B., & Teke, A.** (2015). A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 71, 131-139.
- [33] **Hatata, A. Y., Abd-Raboh, E. H., & Sedhom, B. E.** (2017). Proposed Sandia frequency shift for anti-islanding detection method based on artificial immune System, *Alexandria Engineering Journal*.
- [34] **Cohen, L.** (1995). *Time-frequency analysis* (Vol. 778). Prentice hall.
- [35] **Styvaktakis, E., Bollen, M. H., & Gu, I. Y.** (2000). Classification of power system events: Voltage dips. In *Harmonics and Quality of Power, Proceedings. Ninth International Conference on* (Vol. 2, pp. 745-750).
- [36] **Jurado, F., & Saenz, J. R.** (2002). Comparison between discrete STFT and wavelets for the analysis of power quality events, *Electric Power Systems Research*, 62(3), 183-190.
- [37] **Karegar, H. K., & Sobhani, B.** (2012). Wavelet transform method for islanding detection of wind turbines, *Renewable Energy*, 38(1), 94-106.
- [38] **Pinto, S. J., & Panda, G.** (2015). Wavelet technique based islanding detection and improved repetitive current control for reliable operation of grid-connected PV systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 39-51.
- [39] **Naik, C. A., & Kundu, P.** (2013). Power quality index based on discrete wavelet Transform, *International Journal of electrical power & energy systems*, 53, 994-1002.
- [40] **Andrade, L. C., Oleskovicz, M., & Fernandes, R. A.** (2016). Adaptive threshold based on wavelet transform applied to the segmentation of single and combined power quality disturbances, *Applied Soft Computing*, 38, 967-977.
- [41] **Shaik, A. G., & Mahela, O. P.** (2018). Power quality assessment and event detection in hybrid power System, *Electric Power Systems Research*, 161, 26-44.
- [42] **Naik, C. A., & Kundu, P.** (2015). Wavelet Packet Transform Based Parameter for the Analysis of Short Duration Power Quality Disturbances, *IFAC-PapersOnLine*, 48(30), 485-489.
- [43] **Demirci, T., Kalaycioglu, A., Salor, O., Pakhuylu, S., Dagli, M., Kara, T., & Sezen, U.** (2007). National PQ monitoring network for Turkish electricity transmission System, *In Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, (pp. 1-6). May.
- [44] **IEEE Std. 1547.** (2015), IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, .
- [45] **IEEE Std 519.** (2014). IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems,.
- [46] **IEEE Std 1159.** (2009). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,.

- [47] **Bayrak, G.** (2015). A remote islanding detection and control strategy for photovoltaic-based distributed generation systems, *Energy Conversion and Management* 96: 228-241.
- [48] **Bayrak G., Cebeci M.**, (2013). Şebeke Bağlantılı PV Güç Sistemlerinde Ada Modlu Çalışma ADMÇ ve Tespit Yöntemleri, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, Türkiye*, 26-28 Eylül.
- [49] **IEA International Energy Agency.** (2002) Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility Interactive Power Systems, in Task V Report,
- [50] **Electromagnetic Compatibility (EMC).** (2002) Part 3-3, Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional connection, IEC 61000-3-3.
- [51] **Regina Lamedica, Alberto Prudenzi, Enrico Tironi, Dario Zaninelli.** (1999). Analysis of Harmonics Distortion Limits in IEC and IEEE Standards, *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, 5(2), 47-52.
- [52] **SR EN 50160.** (1998). The Characteristics of The Voltage in Romanian Public Distribution System, Bucuresti,
- [53] **Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğ.** (2013). *EPDK*, T.C. Resmi Gazete, 28783, 02 Ekim 2013.
- [54] **Hernández, J. C., Ortega, M. J., De la Cruz, J., & Vera, D.** (2011). Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation, *Electric Power Systems Research*, 81(7), 1247-1257.
- [55] **Grossmann, A., & Morlet, J.** (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM journal on mathematical analysis*, 15(4), 723-736.
- [56] **Polikar, R.** (1999). The story of wavelets, *Physics and modern topics in mechanical and electrical engineering*, 192-197.
- [57] **Percival, D. B., & Walden, A. T.** (2006). *Wavelet methods for time series analysis (Vol. 4)*, New York, Cambridge university press.
- [58] **Strang, G., & Nguyen, T.** (1996). *Wavelets and filter banks*. Wellesley, SIAM.: Wellesley-Cambridge Press.
- [59] **Ari, N., Özen, Ş., & Çolak, Ö. H.** (2008). *Dalgacık teorisi*. Ankara, Palme Yayıncılık.
- [60] **Zhao, W., Song, Y. H., & Chen, W. R.** (2001). Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis, *International journal of electrical power & energy systems*, 23(5), 403-411.
- [61] **Zhao, W., Song, Y. H., & Min, Y.** (2000). Wavelet analysis based scheme for fault detection and classification in underground power cable systems, *Electric Power Systems Research*, 53(1), 23-30.
- [62] **National Instruments,** LabVIEW 2014 advanced signal processing toolkit manual (2014).

[63] **Abdel-Galil, T. K., Kamel, M., Youssef, A. M., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. A.** (2004). Power quality disturbance classification using the inductive inference approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(4), 1812-1818.

[64] **Bayrak, G.** (2013). *Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Sistemin Tasarımı ve Farklı Şebeke Koşulları Altında Analizi* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.



## ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ  
VESİKALIK  
FOTOĞRAF

**Ad-Soyad** : Alper YILMAZ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 12.02.1992  
**E-posta** : alper.yilmaz@btu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2018, Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi – Bursa Teknik Üniversitesi (2017-...)
- II. International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET 2017) konferansında En İyi Bildiri (Elektrik) Ödülü

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Bayrak, G., **Yılmaz, A.** (2017). Design and Performance Assessment of A Grid-Connected PV System for Residential Power Generation, *7th International 100% Renewable Energy Conference*, (pp: 62-67). İstanbul,18-20 May.
- **Yılmaz A.**, Bayrak G. (2017). Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemlerde Güç Kalitesi Problemleri, *II. International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET) Conference*, (pp: 1125-1134). Bayburt,21-23 September.
- **Yılmaz A.**, Bayrak G. (2017). Detection and Classification of Voltage Sags and Swells in Grid Connected PV Systems, *International Advanced Researches & Engineering Congress (IAREC)*, (pp: 1146-1147). Osmaniye, 16-18 November.
- **Yılmaz A.**, Bayrak G. (2018). Modeling of Voltage Sag/Swell Disturbances in Distributed Generation Systems, *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science*. Safranbolu, 11-13 May.