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

# ŞEBEKEYE BAĞLI GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN HARMONİK ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

**Emre NEDİMOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DİYARBAKIR**
**Temmuz-2019**

T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Emre NEDİMOĞLU tarafından yapılan "Şebekeye Bağlı Güneş Enerjisi Santrallerinin Harmonik Etkilerinin Araştırılması" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan: Doç.Dr. Bilal GÜMÜŞ

Üye : Dr.Öğr.Üyesi M.Ali ARSERİM

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Hakan ÇELİK

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 12-07-2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

29/07/2019

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Bilal Gümüş'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım sırasında bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Bölüm Başkanlığı'na ve değerli hocalarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sürecinde moral ve motivasyon anlamında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım aileme ve çok değerli arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER


**Sayfa**

**TEŞEKKÜR**…… I

**İÇİNDEKİLER**……..... II

**ÖZET**……..... IV

**ABSTRACT**……..... V

**ÇİZELGE LİSTESİ**……..... VI

**ŞEKİL LİSTESİ**……..... VII

**KISALTMA VE SİMGELER**…… IX

**1. GİRİŞ**……..... 1

1.1. Genel Bilgi……..... 1

1.2. Türkiye'de Güneş Enerjisinin Durumu ..... 3

1.3. Diyarbakır İlinin Güneş Enerjisi Potansiyelinin Kullanımı ..... 5

1.4. Güç Kalitesine Etkileyen Parametreler ..... 7

1.5. Tezin Amacı ..... 9

1.6. Tezin Yapısı ..... 10

**2. KAYNAK ÖZETLERİ**…… 11

**3. MATERYAL ve METOT**…… 17

3.1. Fotovoltaik Güneş Santrallerine Genel Bakış…… 17

3.1.1 Fotovoltaik Panel..... 17

3.1.2 Eviriciler..... 18

3.1.3 Gerilim Kaynaklı Eviriciler..... 18

3.14 Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM)…… 19

3.1.4.1 Sinüzoidal PWM (SPWM)…….. 19

3.1.4.2 Uzay Vektör Modülasyonu……..… 21

3.2 Güneş Santrallerinde Güç Kalitesi …… **22**

3.2.1 Güç Kalitesinin parametreleri…… **24**

3.2.2 Harmonikler. ……. 24

3.2.3 Harmonik büyüklüklerinin tanımı…….. 26

3.2.4 Harmonik Etkileri…….. 28

3.3 Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Güneş enerji santralleri…… 29

3.4 Benzetim Programı…… 31

**4. BULGULAR VE TARTIŞMA**……

4.1. 1MW'lık Güneş Santralin Benzetimi…… 33

4.2 İdeal Koşullarda Benzetim…… 43

4.3 Harmoniklere ışıma etkisi…… 46

4.4 Harmoniklere Sıcaklık Etkisi……. 49

4.5 İdeal Koşullarda Harmoniklere PV Panel Sayısının Etkisi…….. 52

4.6 Filtre kullanılmaması halinde toplam harmonik bozulma faktörünün değişimi 54

**5. SONUÇ VE ÖNERİLER**…….…….... 57

**6. KAYNAKLAR**……..... 61

ÖZGEÇMİŞ …….. 65

# ÖZET

ŞEBEKEYE BAĞLI GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİN HARMONİK ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre NEDİMOĞLU

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

Küresel iklim değişikliğinin önlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar ve geliştirilen politikalar enerji üretiminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını hızla artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin şebekeye bağlantısı, güvenlik, güç kalitesi ve yönetim açısından önem arz etmektedir. Azalan kurulum maliyetleri güneş enerjisinden elektrik üreten sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerinin şebekeye bağlantılarında en önemli sorunlardan birisi de sistemden kaynaklanan harmoniklerdir. Şebeke bağlantısında kullanılan eviriciler harmonik üretimine neden olmaktadır. Oluşan harmonikler şebekenin güç kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmada şebekeye bağlı güneş enerjisi santrallerinin oluşturduğu harmonik etkiler araştırılmıştır.

Bu amaçla öncelikle fotovoltaik güneş enerji santrali MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetimi yapılarak harmonik etkiler elde edilmiştir. Yapılan benzetim gerçek bir güneş santralinden alınan harmonik verileriyle karşılaştırılmıştır. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla harmoniklere etki eden parametreler araştırılmıştır. Güneş santrallerinde oluşan harmonikler üzerinde ışımanın ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Birinci incelemede sıcaklık sabit iken ışımanın değişimin harmonik üzerine etkisi araştırılmıştır. İkinci inceleme de ise ışıma sabit iken sıcaklık değişimin harmonikler üzerindeki etkisine bakılmıştır. Ayrıca Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Güneş Enerjisi Santralinin harmonikleri de yapılan benzetim modeli ile elde edilmiştir. Bunun yanında, harmoniklerin azaltılması için öneriler de bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik, Harmonik, Evirici, Güneş Işınımı, Güç kalitesi, yenilenebilir enerji, Toplam Harmonik Bozulma faktörü

## ABSTRACT

HARMONICS EFFECTS OF GRID CONNECTED SOLAR POWER PLANT

MASTER'S THESIS

Emre NEDİMOĞLU

DICLE UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

2019

Studies and policies developed in energy production have accelerated the use of renewable energy sources, in order to reduce climate change, the issue of safety, energy quality and the connected way in which electricity power generated from renewable energy sources takes great importance. The use of solar energy centers has spread, because of its cost has been reduced, when connecting solar centers with the grid, the most important problems that we can face are the harmonics caused by the system. Inverter is the main reason for generating harmonics, which has negatively affected on energy quality. In this thesis we have studied the effects of harmonics when connecting a solar power center with the grid.

To achieve this study, a solar power center has been simulated by MATLAB / Simulink environment. Harmonic effect was obtained. The results that obtained has been compared with real data taken from the solar power center its capacity 1 MW. Simulation results has been proved its validity through an acceptable error rate, Accordingly the factors affecting the harmonics were studied. The effect of both radiation and temperature on harmonics have been studied. First, study has done when the temperature was constant, we have studied the effect of radiation change on harmonics. Second, study has done when the radiation was constant, we have studied the effect of temperature change on harmonics. After that the harmonics that produced by the solar energy center which located at the University of Dicle were determined. Finally, suggestions were made to reduce the impact of harmonics.



**Keywords:** Photovoltaics, Harmonics, Solar Radiation, Inverter, Renewable Energy, Power Quality, Total Harmonic Distortion

# ÇİZELGE LİSTESİ


| Çizelge No | | Sayfa |
|---|---|---|
| **Çizelge 1.1.** | Dünyada Son Yıllarda Kurulmuş Fotovoltaik (FV) Santral Kapasitesi | 2 |
| **Çizelge 1.2.** | 2014 Sonu İtibarı ile Türkiye'deki Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Dağılımı | 4 |
| **Çizelge 4.1.** | 30 Mayıs Saat 10:00 ile Saat 14:00 arası Güç analizör ile alınan Akım Harmonik Seviyeleri | 37 |
| **Çizelge 4.2.** | 30 Mayıs Saat 10:00 ile Saat 14:00 arası Güç analizör ile alınan Gerilim Harmonik Seviyeleri | 39 |
| **Çizelge 4.3** | Benzetimden 12:00 – 13:00 saatleri arasında elde edilen Akım İçin THD Faktörü | 40 |
| **Çizelge 4.4** | Saat 13:00' te Akım ve gerilimin Harmonik Seviyeleri | 43 |
| **Çizelge 4.5** | İdeal Işıma ve Sıcaklık Koşullarında Akım ve Gerilim Harmonikleri | 43 |
| **Çizelge 4.6** | Işıma-THD İlişkisi | 47 |
| **Çizelge 4.7** | FFT ile Akım Harmoniklerinin Seviyeleri | 48 |
| **Çizelge 4.8** | Sıcaklık –THD İlişkisi | 51 |
| **Çizelge 4.9** | Dizi Sayısı Değiştirildiğinde Nominal Güç | 53 |
| **Çizelge 4.10** | PV Panel Sayısı – THD İlişkisi | 54 |
| **Çizelge 4.11** | Saat 12:00 – 13:00 Arasında Filtreli ve Filtresiz Toplam Harmonik Bozulma Faktörü | 55 |

# ŞEKİL LİSTESİ


| Şekil No | | Sayfa |
|---|---|---|
| **Şekil 1.1.** | Dünyada Son Yıllarda Arasındaki Kurulmuş Fotovoltaik (FV) Santral Kapasitesinin Gelişimi | 1 |
| **Şekil 1.2.** | Türkiye'nin Güneş Haritası | 4 |
| **Şekil 1.3.** | Başkent EDAŞ'a Yapılan Fotovoltaik Santral Başvuru Sayısının Yıllara Göre Değişimi | 5 |
| **Şekil 1.4.** | Başkent EDAŞ'tan Talep Edilen Fotovoltaik Santral Güçlerinin Yıllara Göre Değişimi | 5 |
| **Şekil 1.5.** | Diyarbakır'ın Güneş Işıma Haritası | 6 |
| **Şekil 1.6.** | . Dicle Üniversitesinde Kurulmuş 250 kW'lık Güneş Santrali | 9 |
| **Şekil 3.1.** | Güneş Santralin Şebekeye Bağlandığında Genel Modeli | 17 |
| **Şekil 3.2.** | Üç Fazlı Tam Köprü Eviricinin Konfigürasyonunu | 19 |
| **Şekil 3.3.** | Sinüzoidal PWM Çalışma Prensibi | 20 |
| **Şekil 3.4.** | Uzay Vektör Modülasyonu | 21 |
| **Şekil 3.5.** | Bir SPWM Evirici İçin Genlik Modülasyon İndeksi ve Gerilim Harmoniği | 23 |
| **Şekil 3.6.** | Bir SVM Evirici İçin Genlik Modülasyon İndeksi ve Gerilim Harmoniği. | 23 |
| **Şekil 3.7.** | Temel Dalga, 3., 5., ve 7. Harmonikler ile Bunların Bileşkesi Olan Bileşke Dalga | 26 |
| **Şekil 3.8.** | Dicle Üniversitesinde Bulunan Santralin Genel Modeli | 30 |
| **Şekil 3.9** | 1MW'lık Güneş Santralin Genel Modeli | 30 |
| **Şekil 4.1.** | Güneş Santralin MATLAB Benzetimi | 35 |
| **Şekil 4.2.** | Perşembe Günü 30 Mayıs 2019 Gün Boyunca Ortalama Işıma Değişimi | 36 |
| **Şekil 4.3.** | Perşembe Günü 30 Mayıs 2019 Gün Boyunca Ortalam sıcaklık Değişimi | 36 |
| **Şekil 4.4.** | Saat 12:00 – 13:00 Arası Işıma Değişimi | 40 |
| **Şekil 4.5.** | Saat 12:00 – 13:00 Arası Sıcaklık Değişimi | 40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Şekil 4.6.** | 1MW'lık Güneş Santralin Akim için Gerçek THD ve Benzetimden Elde Edilen THD | 41 |
| **Şekil 4.7.** | 1MW'lık Güneş Santralin Gerilim için Gerçek THD ve Benzetimden Elde Edilen THD | 41 |
| **Şekil 4.8.** | FFT İle Saat 13:00'te Alınan akım Harmonik Seviyeleri | 42 |
| **Şekil 4.9.** | İdeal Koşullarda Şebeke Tarafındaki Gerilim Sinyali | 44 |
| **Şekil 4.10.** | İdeal Koşullarda Şebeke Tarafındaki Akım Sinyali | 44 |
| **Şekil 4.11.** | İdeal Koşullarda FFT ile Akım Harmoniklerin Analizi | 45 |
| **Şekil 4.12.** | İdeal Koşullarda Sistemin Çıkış Gücü | 45 |
| **Şekil 4.13.** | Işımanın 0-1100 w/m2 Arasında Değişimi | 46 |
| **Şekil 4.14.** | Işıma Değiştirildiğinde Sistem Performansı | 46 |
| **Şekil 4.15.** | Işıma – Akım için THD İlişkisi | 47 |
| **Şekil 4.16.** | Işıma – Gerilim için THD İlişkisi | 48 |
| **Şekil 4.17.** | Işıma Arttığında Şebeke Tarafında Gerilim Sinyali | 49 |
| **Şekil 4.18.** | Işıma Arttığında Şebeke Tarafında Akım Sinyali | 49 |
| **Şekil 4.19.** | Sıcaklığın -5 İle 45 Arasında Değişimi | 50 |
| **Şekil 4.20.** | Sıcaklık Değiştirildiğinde Sistemin Ürettiği Güç | 50 |
| **Şekil 4.21.** | Sıcaklık – Akım için THD İlişkisi | 51 |
| **Şekil 4.22.** | Sıcaklık – Gerilim için THD İlişkisi | 52 |
| **Şekil 4.23.** | MATLAB Benzetimde Hücre Sayısının Değişimi | 53 |
| **Şekil 4.24.** | PV Hücre Sayısı – Akım THD İlişkisi | 54 |
| **Şekil 4.25.** | Filtresiz ve Filtreli Sistemde Toplam Harmonik Bozulma Faktörünün Değişimi | 55 |

## KISALTMA VE SİMGELER

| | |
|---|---|
| THD | Toplam Harmonik Bozulma |
| DF | : Destrosyon Faktörü |
| Cf | : Tepenin faktörü |
| HF | : Harmonik Faktörü |
| Vn | : Harmonik Gerilimine Ait Efektif Değeri |
| V1 | : Gerilimin Temel Bileşeninin Efektif Değeri |
| In | : Harmonik Akıma Ait Efektif Değeri |
| I1 | : Akımın Temel Bileşeninin Efektif Değeri |
| PV | : Fotovoltaik |
| MPPT | : Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası İzleyici) |
| PWM | : Darbe Genişliği Modülasyonu |
| SPWM | : Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu |
| SVM | : Uzay Vektör Modülasyonu |

# 1. GİRİŞ

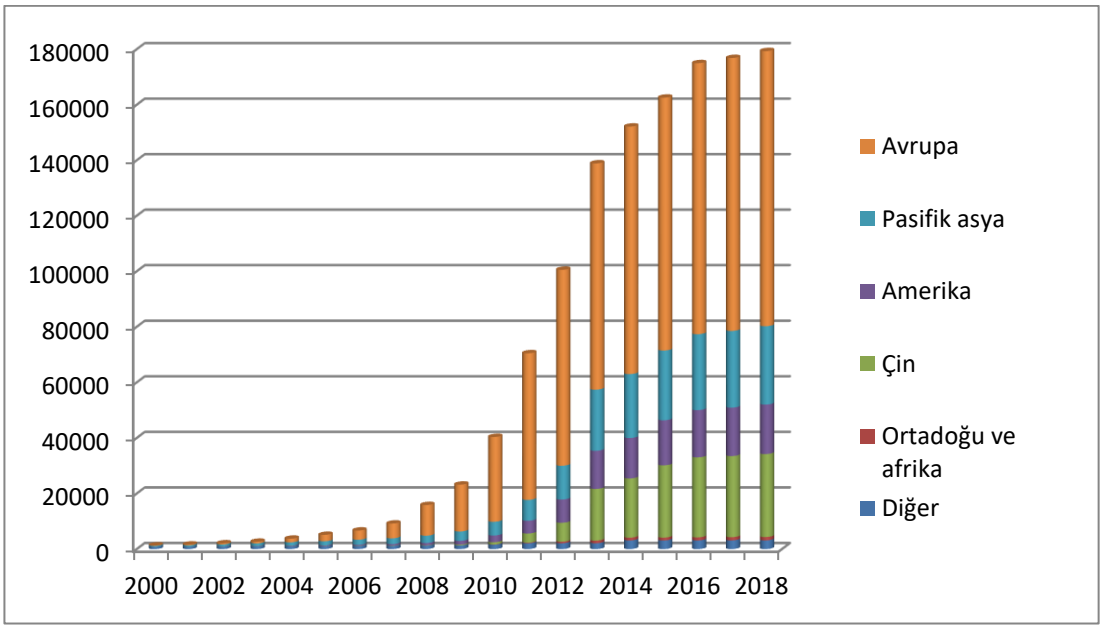
## 1.1. Genel Bilgi

Son yıllarda Yenilenebilir enerji, artan enerji talebi ile daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretilmesinde temiz ve ucuz bir alternatif olarak tercih edilmektedir. Birçok yenilenebilir enerji türü vardır ve bunlardan en önemli yenilenebilir enerji türü de Güneş enerjisidir.

Dünyada elektrik dağıtım şebekelerine bağlı fotovoltaik (FV) güneş enerjili elektrik üretim sistemlerinin sayısı hızla artmaktadır. Güneş enerjisi, yeryüzünün her yerinde geniş ölçüde mevcut olan bir enerji türüdür ve fotovoltaik yolla (FV) enerji üretimi sırasında kirletici madde yaymayan ve çok az su tüketen temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı sunar. Fotovoltaik enerji üretim sistem kurulum maliyetlerinin hızla düşmesiyle dünya genelinde enerji üretiminde güneş enerjisinin payı da hızla artmaktadır.

Elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmek için şebeke bağlantılı fotovoltaik güneş enerjisi santrallerinin kurulumu yönünde destek ve teşvikler çıkarılmıştır.

Şekil 1.1 ve Çizelge 1.1 de 2000-2018 yılları arasında Dünya genelinde kurulmuş güneş enerjisi santrallerin kapasite gelişimi gösterilmiştir. Çizelgeye bakıldığında görüldüğü gibi 2008 yılında sadece 15.844 MW olan kurulan güneş enerjisi kurulu gücü, hızlı bir şekilde artarak 2018 sonunda on iki katına kadar büyümüştür. (Çelikkaya 2018)




**Şekil 1.1.** Dünya Genelinde 2000 ve 2018 Yılları Arasında Kurulmuş Fotovoltaik Santral Kapasitesinin Gelişimi

**Çizelge 1.1.** 2000-2018 Yılları Arasında Kurulmuş Fotovoltaik Santral Kapasitesinin Kıtalara Göre Dağılımı

| Yıl | Ortadoğu ve Afrika | Çin | Amerika | Pasifik Asya | Avrupa | Diğer | Toplam |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2000** | 0 | 19 | 21 | 368 | 129 | 751 | 1288 |
| **2001** | 0 | 24 | 24 | 496 | 265 | 807 | 1615 |
| **2002** | 0 | 42 | 54 | 686 | 399 | 887 | 2069 |
| **2003** | 0 | 52 | 102 | 916 | 601 | 964 | 2635 |
| **2004** | 1 | 62 | 163 | 1198 | 1306 | 993 | 3723 |
| **2005** | 1 | 70 | 246 | 1502 | 2291 | 1003 | 5112 |
| **2006** | 1 | 80 | 355 | 1827 | 3289 | 1108 | 6660 |
| **2007** | 2 | 100 | 522 | 2098 | 5312 | 1150 | 9183 |
| **2008** | 3 | 140 | 828 | 2628 | 11020 | 1226 | 15844 |
| **2009** | 25 | 300 | 1328 | 3373 | 16854 | 1306 | 23185 |
| **2010** | 80 | 800 | 2410 | 4951 | 30505 | 1590 | 40336 |
| **2011** | 205 | 3300 | 4590 | 7513 | 52764 | 2098 | 70469 |
| **2012** | 570 | 6800 | 8365 | 12159 | 70513 | 2098 | 100504 |
| **2013** | 953 | 18600 | 13727 | 21992 | 81488 | 2098 | 138856 |
| **2014** | 1007 | 21300 | 14568 | 23008 | 89125 | 3105 | 152113 |
| **2015** | 1026 | 26000 | 16223 | 25100 | 91080 | 3105 | 162534 |
| **2016** | 1098 | 28800 | 17000 | 27325 | 97624 | 3113 | 174952 |
| **2017** | 1151 | 29200 | 17430 | 27600 | 98320 | 3126 | 175676 |
| **2018** | 1217 | 29850 | 17820 | 28200 | 99100 | 3126 | 178096 |

Güneş enerjisi santralleri Dünyanın enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Güneş enerjisi santralleri, yenilebilir enerjiden faydalanmak için kullanılan sistemlerin başında gelmektedir. Bu enerji türü elektrik sistemlerine çok önemli yararlar sağlarken bazı olumsuzlukları da bulunmaktadır. Güneş enerji sistemlerin sağladığı yararlar iki başlık altında toplanabilir. Bunlar toplumsal ve sosyoekonomik yararlardır.

Toplumsal yararlar:

- Fosil yakıtlardan ve çevre kirlenmesine sebep olan zehirli gaz yayılımını azaltmaktadır.
- Arazilerin tarıma elverişli duruma getirilmesine katkı sağlamaktadır
- Elektrik üretiminde dağıtım hatlarına olan ihtiyacı azaltmaktadır.

Sosyoekonomik yararlar:

- Yerel enerji bağımsızlığı artmaktadır.
- Enerji pazarında yeni üretim aktiviteleri daha fazla olmaktadır.
- Enerji üretiminde kaynaklar daha güvenli ve daha çeşitli olmaktadır.
- Elektrik şebekesinden uzak köylere elektrik ulaştırma imkânı yükselmektedir.

Fotovoltaik Sistemlerin negatif etkileri ise aşağıdaki gibi özetlenebilir:

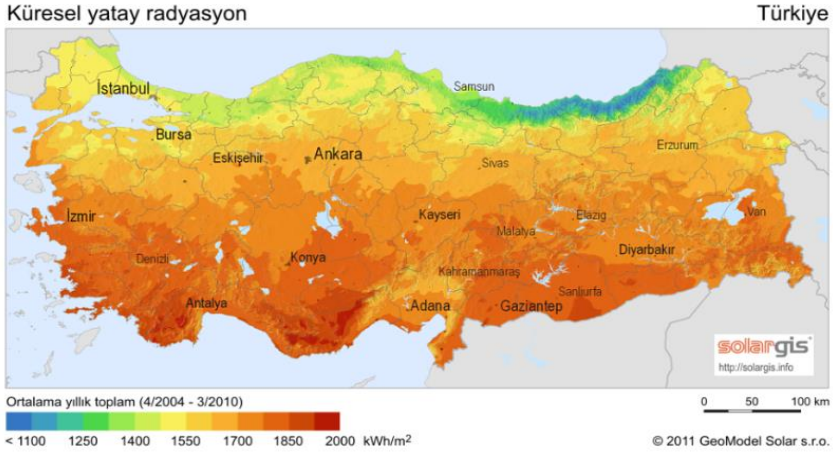
- Santralin kurulumu, bakımı ve yıkamasından gelen kirlilikler.
- Yapım sırasında ortaya çıkan ses, çalışma ve gürültü kirliği

Bu etkiler gün geçtikçe ve teknik gelişmeler ile beraber zaman içinde daha az olacaktır.

### 1.2. Türkiye'de Güneş Enerjisinin Durumu

Türkiye'deki Güneş santrallerin gelişiminde dünyadaki gelişime paralel olarak son yıllarda büyük bir artış yaşanmaya başlamıştır. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli bakımından çok iyi bir konumda bulunmaktadır. Türkiye, 783.560 $km^2$ yüzey alanı ile, 36-42$^0$ kuzey enlemleri, 26-45$^0$ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Elektrik İşleri İdaresi verilerine göre Türkiye'nin yıllık ortalama yatay güneş ışınım şiddeti 1.311 $kWh/m^2$ ve ortalama yıllık güneşlenme süresi 2.640 saattir. Türkiye yıllık 2.640 saati aşan güneşlenme süresi ile sahip olduğu güneş potansiyeliyle birçok Avrupa ülkesinin önüne geçmiştir. Genel olarak optimum açı ile kurulmuş bir fotovoltaik santrale yıllık ortalama 2.000 $kWh/m^2$ ışınım düşmektedir. Türkiye'de büyük güçle fotovoltaik santralleri bulunmamakla beraber, 2019 yılı Mayıs ayına kadar kurulmuş sistemlerin toplam kapasitesi 5.374,6 MW'tır ve bu sistemlerin büyük kısmı şebekeden bağımsız sistemlerdir. (Koç ve Şenel 2013, TEİAŞ 2019)

Şekil 1.2'de Türkiye'nin güneş haritasında görüldüğü üzere ışınım dağılımının güneyden kuzeye enlem derecesine göre azalmakla birlikte, ışınım miktarı da iklim ve yeryüzü şekline göre nasıl değişmektedir. (Yılmaz 2012)



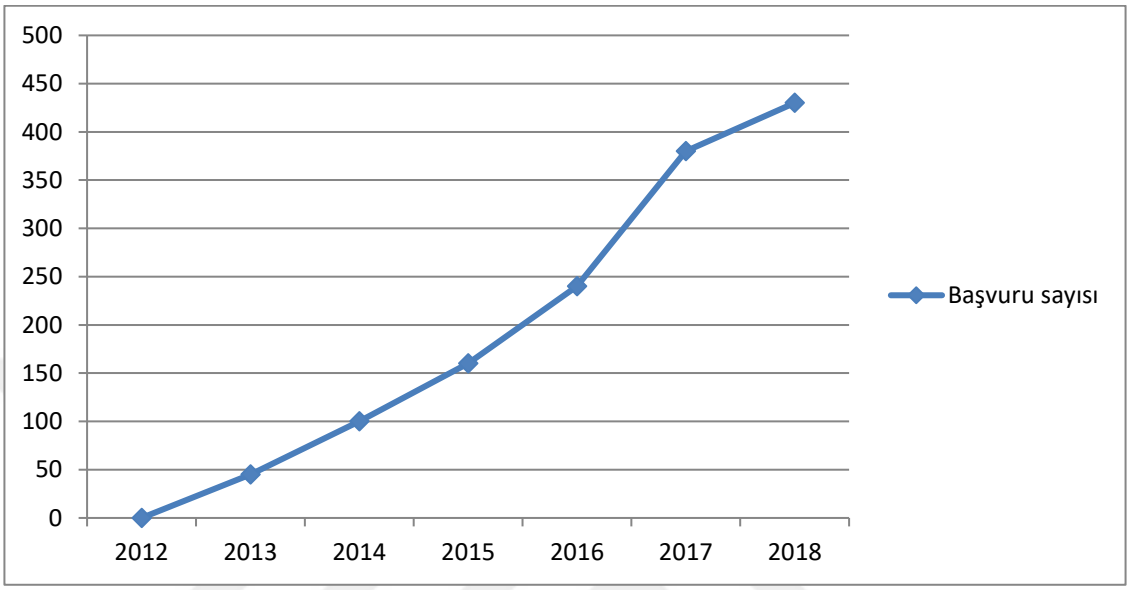

**Şekil 1.2.** Türkiye'nin Güneş Haritası

2017 yılının sonunda Türkiye'nin en büyük fotovoltaik güneş enerjisi santrali Konya'nın Karapınar ilçesinde kurulmuştur. İlk fazı 18,5 MW olan kurulmuş santral, yılda 1,7 milyar kWh elektrik enerjisi üretecek ve 600 bin evin ihtiyacını karşılayacaktır. 2019 yılı mayıs ayı itibariyle farklı enerji kaynaklarına göre Türkiye'deki kurulmuş santrallerin güçleri ve dağılımı Çizelge 1.2'de gösterilmiştir. Çizelgeye bakıldığında Türkiye'deki kurulan güneş santrallerin gücü 2019 yılı itibariyle 5.374,6 MW civarındadır. Aynı çizelgeden, güneş santrallerin, toplam kurulu güç kaynakların içerisindeki oranının %6 olduğu görülmektedir. Bu oranın gelecek yıllarda daha fazla olması beklenmektedir. (Teiaş 2019)

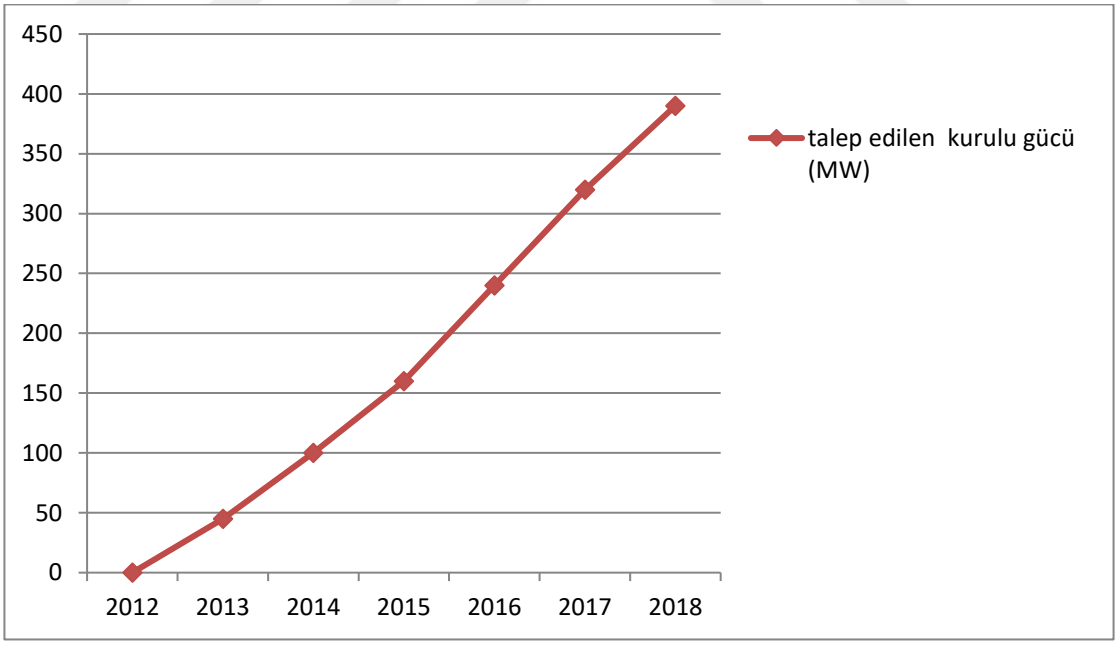
**Çizelge 1.2.** 2019 Mayıs Sonu İtibarı ile Türkiye'deki Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Dağılımı

| Yakıt | Kurulu Gücü [MW] | Yüzdesi |
|---|---|---|
| İthal Kömür | 8.938,9 | %10 |
| Taş Kömürü, Linyit, Asfaltit | 11.057,8 | %12,3 |
| Fuel Oil, Nafta, Motorin | 492,9 | %0,5 |
| Hidrolik Akarsu | 7.848,7 | %8,8 |
| Hidrolik Barajlı | 20.554,2 | %22,9 |
| Biyokütle, Atık Isı | 997,5 | %1,1 |
| Rüzgâr | 7.085,4 | %7,9 |
| Jeotermal | 1.302,5 | %1,5 |
| Güneş | 5.374,6 | %6 |
| **Toplam** | **89.680,5** | %100 |

Başkent EDAŞ verilerine göre 2012'den 2018 sonuna kadar Başkent EDAŞ'da fotovoltaik santrali başvurularının sayısı ve talep edilen toplam santral kapasitesi Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te gösterilmiştir. (Edaş 2018)




**Şekil 1.3.** Başkent EDAŞ'a Yapılan Fotovoltaik Santral Başvuru Sayısının Yıllara Göre Değişimi




**Şekil 1.4.** Başkent EDAŞ'tan Talep Edilen Fotovoltaik Santral Güçlerinin Yıllara Göre Değişimi

### 1.3. Diyarbakır İlinin Güneş Enerjisi Potansiyelinin Kullanımı

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından yapılan güneş haritalama çalışmalarında, güneş enerjisi açısından Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin son derece

büyük potansiyele sahip olduğu görülebilir. Bu çalışmalara göre, Diyarbakır'ın bulunduğu Güneydoğu Anadolu Bölgesi ortalama 2993 saat/yıllık güneşlenme süresi ve 1460 kWh/$m^2$-yıl'lık güneş ışınımı ile bu bölge güneş enerjisi açısından zengin bir bölge sayılmaktadır.

Şekil 1.5 Diyarbakır ilinin toplam güneş ışınımı bakımından çok büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. (Haydaroğlu, 2019)




**Şekil 1.5.** Diyarbakır'ın Güneş Işıma Haritası

Diyarbakır ili günlük ortalama 8,5 saat güneş aldığı için, Diyarbakır'da güneş enerji santralleri özellikle lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinin düzenlemelerinden sonra kurulmaya başlanmıştır (Haydaroğlu, 2017). Güneş enerjisi açısından büyük potansiyele sahip olduğu için şebekeye bağımlı ya da bağımsız birkaç güneş enerji santrali Diyarbakır'da kurulmuştur. Bunlara örnek olarak, Dimer Grubu 2015 yılında Diyarbakır'da 1 MW'lık bir güneş enerji santralı verilebilir. Bu santralın öngörülen yıllık üretimi 1.800.000 kWh'tır. Yine Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi tarafından kurulan ve 0,461 MW gücü sahip olan Sümer Park güneş enerji santrali 214 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek kadar elektrik enerjisi üretimi yapmaktadır.

Diyarbakır Su ve Kanalizasyon İdaresi (DİSKİ) Genel Müdürlüğü Güneş Enerji Santrali'ndeki çalışmalar da tamamlanmıştır. 2 bin 400 güneş panelinin takıldığı PV santrali, yılda 985 MWh elektrik enerjisi üretmektedir. Dicle Üniversitesi'nde kurulan ve TEDAŞ tarafından onaylanan Güneş Enerji Santralinde 1000 adet 250 W gücünde fotovoltaik panel bulunmaktadır. Toplam 250kW güce sahip olan güneş enerji santrali

yapılan hesaplamalara göre yılda 380-400 MWh elektrik enerjisi üretmektedir. (Haydaroğlu ,2018)

### 1.4. Güç Kalitesini Etkileyen Parametreler

Elektrik şebekesinde müşterilere verilen enerjinin tedarik sürekliliği ve bu enerjinin kalitesi büyük bir önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji üreten ülkelerde, kalite ile ilgili olarak yasal mevzuatlarda araştırmalar ve düzenlemeler başlamıştır. Türkiye'de de iletim ve dağıtım şirketlerini, çıkarmış olduğu yönetmelikler çerçevesinde Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), denetlemektedir.

2001 yılında 4628 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu çıkmış ve bu kanun ile; enerjinin kaliteli, maliyeti düşük, sürekli olması gerektiği ifade edilmektedir. Elektrik enerjisinin yeterli ve çevreyle uygun bir şekilde tüketicilerine iletmek için rekabet ortamında büyük performans gösterebilecek, mali açıdan kararlı, güçlü ve temiz bir enerjisi piyasasının oluşturulması ve piyasada bir denetim ve düzenlemenin sağlanması da amaçlamaktadır.

Elektrik güç sistemine bağlı cihazların ve son kullanıcı olan yüklerin zarar görmesine, arızalanmasına veya istenmeyen bir çalışma karakteristiğine neden olan; gerilimin veya akımın genliğindeki, frekansındaki ve dalga formundaki değişimler, elektrik güç kalitesi problemleri olarak tanımlanmaktadır. 1980 yılından beri güç kalitesi kelimesi elektrik üretiminde en çok kullanılan terimlerden biridir. Hem şebeke işletmecileri hem de kullanıcılar için önemi artarak devam etmektedir. (Hong ve Zuercher Martinson, 2010)

#### 1.4.1. Güneş santrallerinin Güç kalitesi Sorunları

Güneş enerjisi santrallerinde güç kalitesi sorunları aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir:

- **Geçici rejim gerilimi**
- **Sürekli gerilim değişimleri**

  Yenilenebilir enerji kaynaklarında, çıkış gücü gerilim seviyesinde genel anlamda artış veya düşüşler gözlenebilmektedir. Uluslararası standartlara göre yüksek gerilim sistemlerinde bu değişim- / +%10 Vrms toleransını sağlamalıdır.
- **Gerilim dengesizliği**

  Güç kalitesini etkileyen diğer bir önemli etken de gerilim dengesizliğidir. Gerilim dengesizliği, dengeli ve eşit olması gereken üç fazlı sistemlerde, fazlar arasındaki

gerilim farklarından kaynaklanır. Fotovoltaik sistemde buna benzer meydana gelen faz farkları, dağıtım şebekesinin fazlarını da etkiler.

- **Dalga bozulumu- harmonikler**

  Harmonik dalgalar, şebeke frekansının birkaç katı şeklinde ortaya çıkan frekans salınımlarıdır. Fotovoltaik sistemde buna neden olan durum, bu sistemlerde kullanılan ve non-lineer karaktere sahip yarı iletken esaslı anahtarlardır. Anahtarlamada kullanılan yöntem harmonikleri çok etkiler.

- **Gerilim dalgalanmaları ve gerilim titremeleri**

  Sağlıklı bir şebekede, gerilimin 50 Hz frekansında ve saf bir sinüs dalgası şeklinde olması gerekir. Fakat her zaman bu durum geçerli değildir. Şebeke gerilimi bazen daha düşük frekanslarda salınımlar yapabilir. Gerilim titremeleri, sürekli yükteki gerilim dalgalanmalarından kaynaklı aydınlatma armatürlerinde titremelere neden olan 50 Hz'den düşük gerilim salınımlarıdır. Titreme şiddeti, gerilim dalgalanmalarının genlik, şekil ve tekrarlanma sıklığı gibi faktörlerine bağlı olup birtakım yaklaştırmalar ile tahminleri mümkündür.

- **Güç frekans değişimleri**

  Frekans, güç kalitesi hususunda en önemli etkenlerden bir tanesidir. Güç arzında ve talebindeki dengesizlikler, frekans salınımlarına neden olurlar. Bundan ötürü şebeke bağlantılı sistemlerde, şebeke frekansı ile sistem frekansı senkronize edilmelidir.

Güç kalitesi standartları, IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) ve IEC (International Electrotechnical Commission) konsorsiyumuyla hazırlanmaktadır. Güç kalitesini etkileyen ve güç kalitesini zorunlu kılan sebepler;

- Yarı iletken teknolojisiyle üretilmiş ekipmanların güç elektroniği ekipmanlarına göre daha hassas olması durumunun, güç kalitesinin düşümüne neden olabilmesi,
- Şebekelerde kullanılan kondansatör ve verimi yüksek motor sürücüleri gibi ekipmanların harmonik bozunumları arttırması,
- Birbiriyle enterkonnekte olan şebeke elemanlarından birinde yaşanan sıkıntının diğer noktaları da etkilemesi,

olarak sıralanabilir. (Moazzenzadeh ve Şekerci,2015). Bu bozucu etkilerin sınırlandırılması ve azaltılması yönünde bir takım tedbirlerin alınması

gerekmektedir. Bu tedbirlerin alınmasından önce de bozucu etkilerin tespit edilmesi ve bunlara etki eden parametrelerinde bilinmesi önemlidir.

### 1.5. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasındaki temel amaç, şebekeye bağlı güneş enerjisi santrallerinin şebeke üzerindeki harmonik etkilerinin ve bu harmoniklerin bağlı olduğu parametrelerin araştırılmasıdır.



**Şekil 1.6.** Dicle Üniversitesinde Kurulmuş 250 kW'lık Güneş Santrali

Bu amaçla şebekeye bağlı bir fotovoltaik güneş santrali MATLAB/Simulik yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen model yardımıyla benzetim yapılmış ve güneş enerjisi santralinin şebekede oluşturduğu harmonikler FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen harmonikler Diyarbakır bölgesinde şebekeye bağlı olarak çalışan 1 MW'lık bir santralin güç analizöründe kaydedilen harmonik verileri ile karşılaştırılmıştır. Modelin doğruluğu kabul edilebilir bir hata sınırı ile kanıtlandıktan sonra, harmonik etkileri ve harmoniklere etki eden parametreler incelenmiştir. Şebekeye bağlı güneş santrallerinde oluşan harmonikler üzerinde sıcaklık ve ışıma etkisi araştırılması amacıyla benzetimler yapılmıştır. İlk incelemede ışıma değeri sabit tutulup sıcaklık değeri değiştirilmiş ve böylelikle harmoniklere sıcaklık etkisi incelenmiştir. İkinci incelemede ise sıcaklık değeri sabit tutulup güneş ışıma değerleri değiştirilmiş ve bu durumda harmoniklere ışımanın etkisi araştırılmıştır.

Diğer bir inceleme de ise fotovoltaik güneş paneli sayısının harmoniklere nasıl etki ettiğine bakılmıştır. Bunun yanında 250 kW gücündeki Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santrali de modellenerek benzetimi yapılmış ve bu santralin harmonik etkilerine bakılmıştır.

### 1.6. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır; Giriş, Kaynak Özetleri, Materyal ve Metot, Bulgular ve Tartışma, Sonuç ve Öneriler ve Kaynaklardır.

Birinci bölüm olan girişte genel bilgi, güç kalitesine etki eden faktörler ve Türkiye'de ve özellikle Diyarbakır'da bulunan güneş enerji santralleri hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölüm olan kaynak özetleri (literatür taraması)'nde güneş santrallerinin harmonik etkileri ve bu harmoniklerin azaltılabilmesi amacı ile yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

Üçüncü bölüm materyal ve metot bölümünde güneş enerjisi ile elektrik üretim elemanları, güneş santrallerinin çalışma prensibi ve performansı, güç kalitesi ve harmonikler, Dicle Üniversitesinde bulunan güneş enerji santrali, kullanılan benzetim programı ve benzetim modeli hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölüm bulgular ve tartışmada benzetim sonuçları ile gerçek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim modeli yardımıyla güneş ışımasın ve sıcaklığın akım ve gerilim harmoniklerine nasıl etkileyeceği incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Sonuçlar ve öneriler adlı beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılıp önerilerde bulunulmuştur.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Son günlerde Şebekeye Bağlı Güneş santrallerin, en önemli parametrelerden biri güç kalitesidir. Bu tez çalışmasında, güneş santrallerinin şebekeye bağlandığında oluşan harmoniklerin nedenleri ve bu harmoniklere etki eden parametreler de incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle, MATLAB programının Simulink ortamı ile 1 MW'lık bir güneş enerjisi santrali modellenerek benzetimi yapılmıştır. Harmonik üzerindeki sıcaklık ve ışıma etkisi araştırılması amacıyla iki inceleme yapılmıştır. İlk incelemede ışıma değeri sabit tutup sıcaklık değeri değiştirilmiştir ve bu durumda harmoniklere sıcaklık etkisi araştırılmıştır. İkinci incelemede Sıcaklığın değeri sabit tutup ışıma değiştirilmiştir ve bu durumda harmonikler üzerinde ışıma etkisi de analiz edilmiştir. Bu konu ile ilgili literatür özeti verilecek ve yapılan çalışmalara değinilecektir.

Keçecioğlu ve Tekin 2015 yılında yaptıkları çalışma ile, bir güneş enerji santralini şebekeye bağlandığı noktanın yüksek gerilim (YG) tarafına bağlanan bir güç analizörü cihazı ile toplam harmonik bozulma faktörü açısından incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda şebeke tarafından var olan harmoniklerin sınır değerlerin altında kaldığını görülmüştür. Akıma ait toplam harmonik bozulma faktörünün belli saatlerde kısa süre ile kabul edilen sınır değer olan %5'i aştığını ve gerilime ait toplam harmonik bozulma faktörünün bu belli saatlerde sınırı aştığı görülmüştür. Sınır değerin aşıldığı zaman sabah saatlerinde güneş enerji santralin ilk ışıma almaya başladığı zaman olduğu enerji santralindeki eviricilerin bu duruma sebep olabileceğini düşünülmektedir. (Keçecioğlu 2015)

Özkan Tanrıverdi 2015 yılında yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında 202 kWp gücünde fotovoltaik santralinin şebekeye bağlandığı noktada güç kalitesini ölçerek güç kalitesinin parametreleri nasıl etkileyeceğini tartışmıştır. 202 kWp'lık güneş santralinin şebekeye bağlandığı noktalarda birkaç gün için yük farklı olduğunda harmonikler ve sinyale bozucu etki eden parametrelerin ölçümleri yapılmıştır. ölçümlerde güç kalitesi parametreleri harmonikler, gerilim dengesizliği, kırpışma ve etkin gerilim üzerinden incelenmiştir. Gerilimdeki toplam harmonik bozulma (THD) açısından yapılan incelemede, THD'nin güneş enerjisi santralinden kaynaklı olarak kabul edilen sınır değeri aşmadığı görülmüştür. Şebekeye bağlantı noktalarındaki toplam harmonik bozulma faktörünü ana şebeke ve güneş enerji santralı birlikte etkilediğinden, güneş enerji santrali devreye girdiğinde yükselen gerilim için toplam harmonik bozulma değerinin sadece

güneş enerji santralinden kaynaklı olduğu söylenemeyeceğini ifade etmiştir. (Özkan TANRIVERDİ 2015)

Ahmad Samarreh 2012 yılında ‘’Ürdün Ulusal Elektrik Şebekesinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi’’ adlı yüksek lisans tez çalışmasında Ürdün ulusal elektrik şebekesinin kuruluşundan günümüze kadar nasıl geliştiğini anlatmıştır. Ürdün ulusal elektrik şebekesinde harmonik açısından ölçümler yapılmıştır. Harmonik sorunlarında lineer olmayan yüklerin (darbeli doğrultucular ve dönüştürücüler) neticesinde oluştuğu tespit edilmiştir. Transformatör non-lineer yük ile yüklendiğinde gerilim ve akım sinyalinin dalgalanması bozulup şebekeden gelen gerilim ve akım dalgasını da bozmaktadır.

Sydney Olimpik köyünde, 2000 yılında yapılan bir çalışma ile, toplam 629 evin çatısına 1 kWp gücünde Güneş paneli takılmıştır, bu paneller eviriciler vasıtasıyla şebekeye bağlanmıştır. Çalışma sonucunda eviricilerindeki, gerilim için toplam harmonik faktörü arttıkça eviricilerden kaynaklanan harmonik miktarının da arttığını gözlenmiştir. Yapılan incelemelerin sonucunda, bütün fotovoltaik paneller ile bağlı olan Evirici sistemleri çalıştırıldığında bile gerilimdeki toplam harmonik bozulma faktörünün IEEE 519-1992 standartlarının sınır değerlerinin altında (%1,9) kaldığı görülmüştür. (Vasanasong ve Spooner,2000)

Jürgen Schlabbach; Andreas Gross 2007 yılında yaptıkları “Fotovoltaik eviricilerden oluşan akım harmonikleri” adlı çalışmada farklı tipte iki FV evirici test etmişlerdir. Belirtilen sonuçlara göre oluşan akım harmoniklerinin, AC gerilim harmonikleri ile büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiş ve transformatörsüz FV eviricileri, transformatör ile bağlı olan eviricilerden daha düşük akım harmonikleri gösterdiği söylenmiştir.

P. Jyothi Bhaskara Rao ve B. Srikanth 2016 yılında yaptıkları çalışma ile transformatörde galvanik izolasyonun bulunmamasının, PV sistemlerde daha az fotovoltaik sistem ile yük arasında kapasitif kaçak akım oluşmasına neden olduğu bulmuşlardır. PV'de kaçak akım sorunu, sistemde akım bozulmaları ve harmonikler ile sonuçlanacaktır. Ayrıca bir dağıtım sistemindeki doğrusal olmayan yüklerin varlığı sisteme harmonikleri enjekte edecektir ve oluşan bu harmoniklerin azalması için kullanılan Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu (SVPWM) ile Toplam Harmonik

Bozulma (THD) açısından karşılaştırılmaları yapılmıştır. (P. Jyothi Bhaskara Rao ve B. Srikanth 2016)

Mozhgan Moazzenzadeh ve Hacer Şekerci 2016 yılında Ege Üniversitesinde yaptıkları çalışma ile güneş enerji santralinin harmonik etkilerini araştırmak için iki farklı frekansta çalışan iki farklı güneş santralini ele almışlardır. Bunlardan ilk santral Türkiye, İzmir'de bulunmaktadır ve bu santral (240V/50Hz) değerlerinde çalışmaktadır. Diğer santral Kanada Edmonton'da bulunmaktadır ve bu santral (120V/60Hz) değerlerinde çalışmaktadır. Santralin eviricilerinde oluşan harmonik ve ara harmonikleri incelenmiştir. Akıma ait toplam harmonik bozulma faktörünün ($THD_A$) değeri birinci santralde belli saatlerde kısa süre ile sınır değeri (%5) geçtiğini gözlemlenmiştir. Bunun sebebi santralin bu saatlerde çalışmaya başlaması olarak düşünülmektedir. Diğer santralde ise THD akım sınır değerleri içinde kalmıştır. Farklı frekanslara rağmen genellikle harmonik ve ara harmoniklerin sınır değerleri aşmadığını gözlemlenmiştir.

Mutlu BOZTEPE 2017 yılında yaptığı makalede güneş santrallerinin verimliliğine etkileyen faktörleri incelenmiştir. Bir fotovoltaik sistemin şebekeye bağlandığında performansı ve güneş panelleri ile elektrik üretiminde etkili parametreler incelenmiştir. Sistemin performansı ve verimini yüksek tutmak için gerekli önlemler sunulmuştur. Yüksek performanslı güneş paneli ve DC-AC evirici kullanmak gerektiğini belirtmiştir. Güneş santrallerinde üretilen enerjinin hesaplamasının pek çok parametreye bağlı olduğu gözlemlenmiştir. FV sistemler karmaşık mühendislik sistemleri olduğu belirtilmiş en iyi verim elde etmek için tasarım yapılmasına dair öneriler de sunulmuştur.

Cem Haydaroğlu, Bilal Gümüş, Hüseyin Erdoğan ve Hüseyin ACAR 2016 yılında yaptıkları çalışma ile fotovoltaik panellerden elektrik enerjisi üretimine kirlenme etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma kirlenme etkisinin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Kısa dönem analizi için kirlenmeden dolayı meydana gelen enerji kaybının %4,86 olduğu görülmüştür. Kirletici etkinin şiddetli olmasının enerji kaybını artırabileceği görülmüştür.

Mustafa Alçı ve Taner Çarkıt 2017 yılında yaptıkları çalışmada bir fotovoltaik panelin çalışma prensibini incelenmiştir ve sonucunda "genellikle sıcak yerlerde güneş santrallerin performansı ve verimi daha yüksek olur" düşüncesinin yanlış olduğu gösterilmiştir.

Abdulvahid Çelebi ve Metin Çolak 2016 yılında yaptıkları çalışmada Danimarka'da harmoniklerin şebekeye etkilerini incelemek için 29 evde kurulu olan 60 adet Güneş panelinden oluşan bir sistem kullanmışlardır. Bu bölge, 10/0,4 kV 200 kVA transformatör ile şebekeye bağlanmıştır ve toplam güneş panel gücü transformatör gücünün %30'una tekabül etmektedir. Yapılan deneylerin sonucunda, ışıma yüksek olduğunda gerilimde oluşan harmoniklerin değerinin 0,26% ile 0,65 % arasında değiştiği görülmüştür. Bu durumda fotovoltaik santrallerin çalıştığında gerilim için toplam harmonik bozulma faktörünün gündüz saatlerinde, kabul edilen sınır değer olan %5'i aşmadığı görülmüştür.

2007'de yapılan çalışmada, Yunan, Arki ve Antikythera adalarında bulunan Güneş enerji santrallerinin şebekeye bağlandığında verdiği gerilim ve akım harmoniklerin ölçümü yapılmıştır. Bu çalışmada kurulan Güneş Santrallerin ve buna bağlı olan eviricilerin şebekeye verdiği harmonikler incelenmiştir. Antikythera adasında gerilim için ölçülen THD değeri %1.25- %1,99 arasında bulunmuştur. Arki adasında ise gerilim için ölçülen THD değeri %1,85- %5,30 arasında değişim göstermiş olup, bazı durumlarda bozulmanın sınırları aştığı görülmüştür. Genellikle birkaç durum dışında güneş santralları şebekeyi olumsuz etkilememiştir.

Emre Akarslan ve Fatih Onur Hocaoğlu 2018 yılında yaptıkları çalışma ile Pasif harmonik azaltma teknikleri, güç dönüştürücülerinde hala çekici çözümler sunduğunu söylemektedir. Bununla birlikte, bu çözümler, çok sayıda dönüştürücü ünitesinin ortak bağlantı noktasında paralel olarak bağlandığı sistem düzeyinde farklı harmonik performansları verir. Bunun nedeni, paralel dönüştürücü ile harmonik giderilmesinin birçok farklı faktöre bağlı olmasıdır. Bir şebekenin harmonik performansı, farklı şebekeler ve güç elektroniği parametrelerine göre analiz edilmiştir. Aynı zamanda bir şebekenin güç kalitesini analiz etmek için akım harmoniklerin faz açısı değerlerinin önemini belirtmiştir. Çalışmada farklı üç fazlı güç dönüştürücü topolojilerinin harmonik performansları ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Önerilen analizi doğrulamak için MATLAB / Simulink'te kapsamlı bir modelleme ve benzetim yapılmıştır.

Cristaldi ve arkadaşları 2012 yılında PV paneli bir direnç, bir diyot ve bir gerilim kaynağı ile basit bir şekilde modellemiştir ve ölçüm değerleri yerine, santralden alınan değerler ile yapılan benzetimde, sonuçlar kolay bir şekilde maksimum güç noktasının civarında çalışma imkânı olabileceğini göstermiştir (Cristaldi ve diğ ,2012).

Shriram ve arkadaşları (2013) Fotovoltaik santrali gün boyunca inceleyerek oluşan hat kayıplarını yok etmek için deney yapmışlardır. Bu çalışmada bir kompanzasyon sistemi ve gerçek üretici alarak bir gün esasına göre Güneş santralinin şebekeye bağlanmak için yeni bir yöntem sunarak, hat kayıplarını yok etmeyi amaçlamışlardır.

Cem Haydaroğlu 2017 Yılında Dicle Üniversitesinde yaptığı yüksek lisans çalışması ile Dicle Üniversitesinde eğitim yapmak amacıyla kurulan 250 kW'lık PV santralinin benzetimi yapmış ve bu benzetim ile PV santralin performansının değerlendirilmesinde IEC 61724 standardını kullanmıştır. Buna göre tanımlanmış performans standartları ve üretilen enerji değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, Güneşten elektrik üretiminde etkili olan, kurulum parametrelerinin üretilen enerji miktarını ne kadar etkileyeceğini görülmüştür. Ayrıca santralin bir yıllık gerçek üretim sonuçları PVsyst ile yapılan benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

# 3. MATERYAL VE METOT

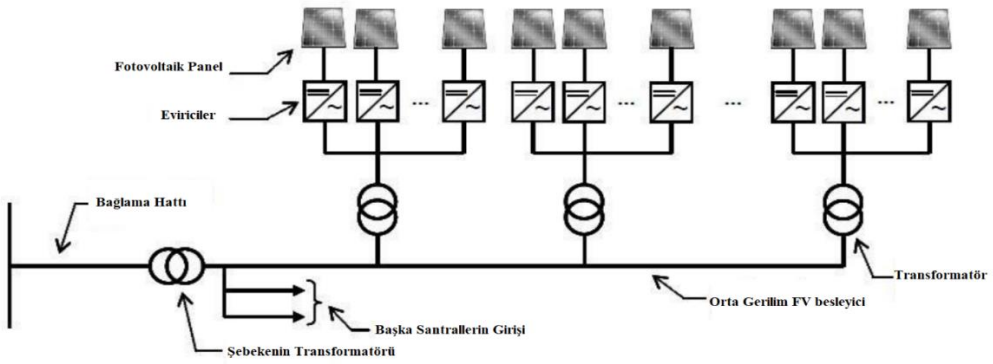
## 3.1. Fotovoltaik Güneş Santrallerine Genel Bakış

### 3.1.1. Fotovoltaik Panel

Şekil 3.1. de bir güneş santralin şebekeye bağlanmasının genel modeli gösterilmiştir. Fotovoltaik (PV) güneş panelleri, güneş enerjisini doğru akım (DC) elektriğe dönüştürür. Paneller eviricilerin girişine yeterince DC akımı vermek için seri bağlanmaktadır. Eviriciler PV dizisi üzerinden elde edilen DC gerilimi üç fazlı alçak gerilim AC'ye dönüştürür. Eviricilerin AC çıkış gerilimi, transformatörler vasıtasıyla yüksek gerilime yükseltilir ve güç, YG besleme kabloları veya hatları aracılığıyla merkezi bir güneş enerjisi santrali istasyonuna iletilir. Güneş enerjisi santral istasyonunun transformatörü genellikle tek bir YG besleme hattının ucuna yerleştirilir. Ring ana ünite hücreleri (RMU) ile, genel olarak tek tek evirici transformatörlerini ve transformatörlarla bağlı olan eviricilerin korumasını ve izole edilmesi sağlanır.

Doğrudan paralel çalışmaya uygun olmayan ancak galvanik izolasyon gerektiren eviriciler için üç sargılı YG / AG / AG evirici transformatörleri genellikle her bir AG sarımına bağlı bir evirici ile kullanılır. Büyük tesisler için, toplayıcı besleyiciler ile YG gücü, daha sonra dağıtım veya iletim sistemine bağlanmak için gerekli gerilim seviyesine transformatörler ile dönüştürülür.

En yaygın üç PV teknolojisi türü kristalimsi silisyum, ince film teknolojisi ve konsantre PV'dir. İzleme sistemleri, panelleri maksimum güneş ışığını alacak şekilde panelleri hizalayarak verimliliği en üst düzeye çıkarmak için de kullanılabilir. Tek eksenli izleme en yaygın izleme sistemi türüdür, ancak çift eksenli izleme de mümkündür.




**Şekil 3.1.** Güneş Santralin Şebekeye Bağlandığında Genel Modeli

### 3.1.2. Eviriciler:

Şebekeye bağlı PV sistemlerinde, solar PV dizisi tarafından sağlanan DC gücünü AC gücüne dönüştürmek için eviricilere ihtiyaç duyulur, böylece üretilen enerji elektrik şebekesini besleyebilir. Yüksek bir kısa devre oranı varsayarak, şebekenin gerilimi eviricilerden büyük ölçüde etkilenmeyecek ve eviricilerin AC akımı DC gücüyle orantılı olacaktır. Bu nedenle eviriciler akım kaynağı özelliğine sahiptir. Üç tip gerilim kaynaklı PWM evirici topolojisi yaygın olarak kullanılır: transformatörsüz topoloji, düşük frekanslı transformatör topolojisi ve yüksek frekanslı transformatör topolojisi. Transformatörsüz eviriciler, büyük ölçekli PV sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Düşük kayıplarla basit, ekonomik bir çözüm sunarlar ancak gerekli eviricilerin çıkış geriliminde (genellikle 220 ila 690 Vac) sinüzoidal bir çıkış üretmek için yüksek bir DC gerilimi (230 V AC çıkış için 325 V'den daha büyük) gerektirir. Bu gerilimin üstesinden gelinebilmek için eviricilerin girişinde DC-DC Boost çevirici kullanarak DC gerilimi yükselir ancak bununla birlikte bu durum verimliliği %1 ila 2 oranına azaltır. DC gerilim barası daha sonra AC'ye dönüşüm için merkezi eviricilere bağlanır. Bununla birlikte, çoğu yüksek güçlü ticari kullanımlarda, yüksek DC dizi gerilimi olan ve DC-DC dönüştürme aşamaları olmayan tek kademeli eviriciler kullanılır. (Overett, 2017).

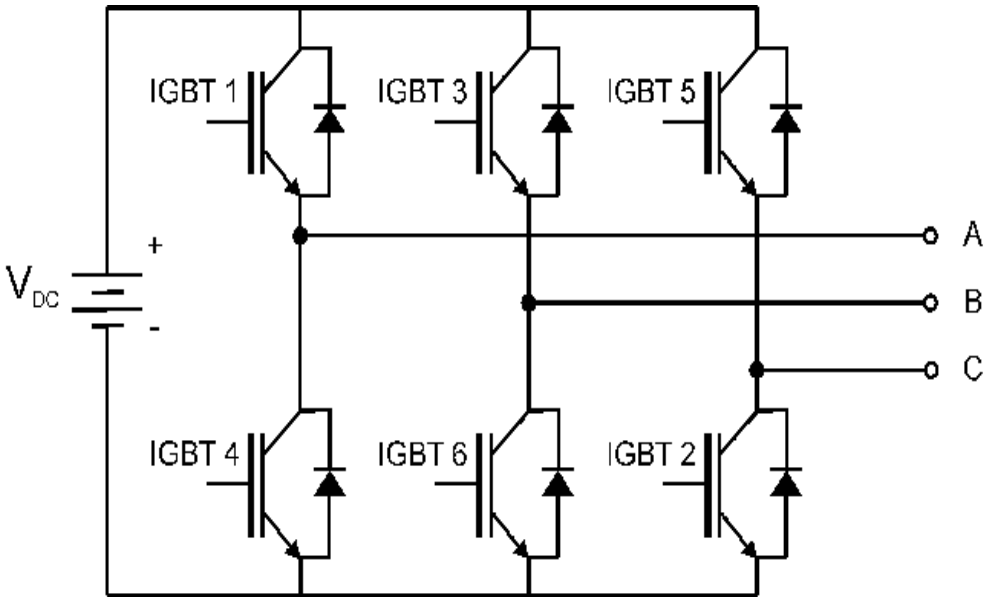
### 3.1.3. Gerilim Kaynaklı Eviriciler

Eviriciler, PWM kontrolü sebebiyle PV santralinde birincil harmonik kaynaklarıdır. Tarihsel olarak yüksek anahtarlama kayıpları nedeniyle 1980'lerde üç seviyeli eviriciler geliştirilmiştir. Bununla birlikte, modern güç elektroniği cihazları, yüksek verimlilikle daha yüksek anahtarlama frekanslarında basitleştirilmiş iki seviyeli bir topoloji ile çalışmaktadır. Halen çoğu ticari yüksek-güç uygulamasında (> 100 kW) fotovoltaik eviriciler, iki seviyeli, tek kademeli, üç fazlı tam köprü topolojisine sahip gerilim kaynaklı eviricilerdir. (Overett, 2017).

Şekil 3.2'de üç fazlı tam köprü eviricinin konfigürasyonu gösterilmektedir.

Eviriciler, pratikte DC çalışma gerilimine bağlı olarak seri olarak iki veya daha fazla anahtarlama cihazından oluşan altı anahtara sahiptir. Üç fazlı eviricilerde bu anahtarlar her bacakta iki anahtar olmak üzere üç paralel bacaktan oluşur. Yalıtımlı kapı bipolar transistorları (IGBT), modern eviriciler için anahtarlama cihazları olarak yaygın şekilde kullanılır ve her bir IGBT, bir diyotla paralel olarak bağlanır. Diyotunun amacı, endüktif yük akımının kesilmesinden kaynaklanan büyük gerilimlerin geçişlerini ortadan

kaldırmaktır. Bu diyot IGBT anahtarı iletime geçtiğinde yük akımı için alternatif bir yol sağlayarak, IGBT'lerin hasar görmesini veya imha edilmesini önler. IGBT'ler, kapısına pozitif gerilim darbe uygulanarak iletime geçen ve kapısına sıfır veya negatif gerilim uygulandığında kesime geçen, sağlam, gerilim kontrollü cihazlardır. O yüzden IGBT'li eviriciler PWM tekniği uygulanarak DC-AC dönüşümünde yaygın olarak kullanılır. (Overett, 2017)




**Şekil 3.2.** Üç Fazlı Tam Köprü Eviricinin Konfigürasyonunu

### 3.1.4. Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM)

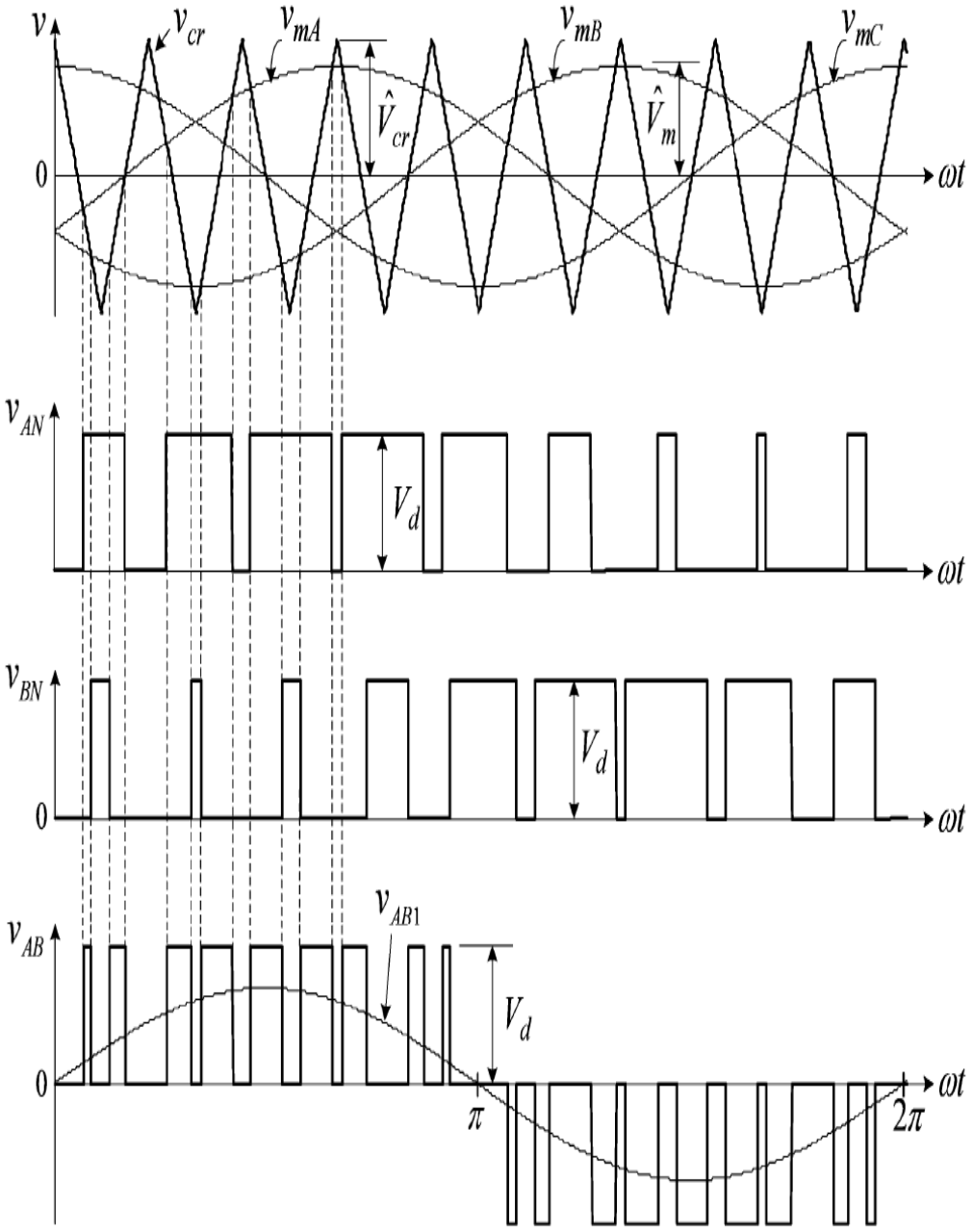
Son yıllarda eviricilerde ve çeviricilerde kullanılan darbe genişlik modülasyonu (PWM, Pulse Width Modulation) yöntemi, eviricinin akım harmonikleri tanımlanmasında esastır. Darbe genişliği modülasyonunun birkaç metodu vardır.

#### 3.1.4.1. Sinüzoidal PWM (SPWM)

Şekil 3.3.'de sinüzoidal PWM çalışma prensibi gösterilmektedir. Sinüzoidal üç fazlı modüle edici dalgalar ($V_{mA}$, $V_{mB}$, $V_{mC}$), daha yüksek frekanslı, üçgen bir taşıyıcı dalga ($V_{cr}$) ile kullanılır. Bir fazın modüle edici dalgasının değeri, taşıyıcı dalganın değerinden daha büyük olduğunda, bu fazın eviricinin bacağındaki üst anahtarı iletime geçmektedir. Örnek: $V_{ma} \geq V_{cr}$ için, bacak A'nın üst anahtarı iletimdedir. Fazın modüle edici dalgasının değeri, taşıyıcı dalganın değerinden düşük olduğunda, karşılık gelen evirici bacağındaki üst anahtar kesime gider. Örnek: $V_{ma} < V_{cr}$ için, bacak A'nın üst anahtarı kesimdedir.

Alt bacaktaki anahtar daima üst bacaktaki anahtarın tersi durumda çalışır. Aynı bacaktaki üst ve alt anahtarın anahtarlaması sırasında DC kaynağının kısa devre olmasını önlemek için, her iki anahtar anahtarlandığında ölü zaman adı da verilen bir boşluk süresi eklenir.

Eviricilerin hat gerilimi ($V_{AB}$), faz gerilimlerin arasındaki fark olarak, şekilde gösterildiği gibi ($V_{AB} = V_{AN} – V_{BN}$) hesaplanır. (Rashid 2017)

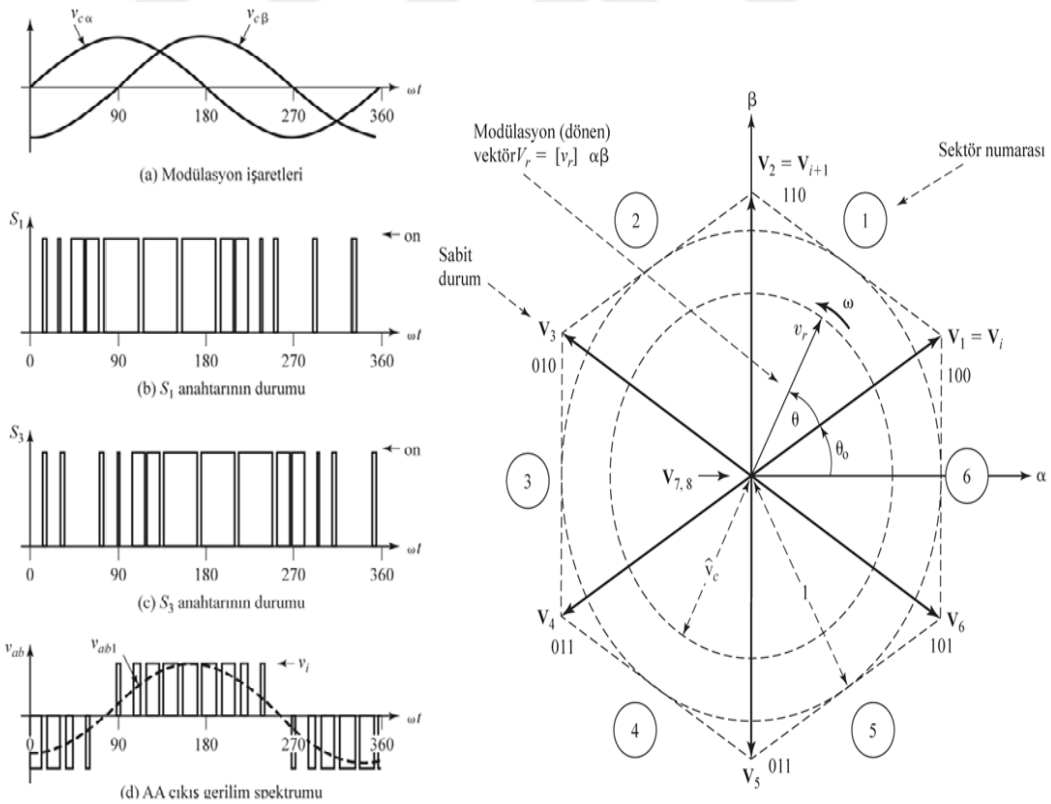



**Şekil 3.3.** Sinüzoidal PWM Çalışma Prensibi

### 3.1.4.2. Uzay Vektör Modülasyonu (SVM):

Uzay vektör PWM (SVM), gerilim kaynağı eviricilerin kontrolü için yaygın olarak kullanılan bir dijital modülasyon tekniğidir. SVM, eviricinin çıkış gerilimi maksimize eder ve anahtarlama frekansını en aza indirir. SVM ayrıca sinüzoidal PWM'den daha düşük akım harmonik bozulma üretir.

Şekil 3.4. uzay vektör modülasyon çalışma prensibi gösterilmektedir. Belli bir sektör içindeki $V_r$ referans vektörü, verilen bir genlik ve konumu üretmek için üç komşu sabit uzay vektörlerinden sentezlenebilir. Her sektördeki anahtarlama elemanlarının anahtarlama işaretleri de üretilebilir. Uzay vektör anahtarlamanın amacı, sekiz uzay vektörlerü ile sinüzoidal hat modülasyon işareti $V_r$'ye yaklaşmaktır. Bununla birlikte, eğer $V_r$ modülasyon işareti, keyfi vektörler $V_n$ ve $V_{n+1}$ arasında bulunuyorsa, o zaman iki sıfır olmayan vektör ($V_n$ ve $V_{n+1}$) ve bir sıfır uzay vektörü ($V_z$= $V_0$ veya $V_1$) maksimum yük hat gerilimini elde etmek ve anahtarlama frekansını minimize etmek için kullanılmalıdır. (Rashid 2017)




**Şekil 3.4.** Uzay Vektör Modülasyonu

### 3.2. Güneş Santrallerinde Güç Kalitesi:

Fotovoltaik güneş santral kurulumları şebeke gerilimini, özellikle gerilim dalgalanmalarını, kırpışmayı, harmonik bozulmayı ve yüksek frekans bozukluklarını önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir. Gerilimin dalgalanmaları ve kırpışma bulutların hareketinden kaynaklanan güneş ışınımındaki değişikliklerden kaynaklanan güç değişimlerinden kaynaklanır ve rüzgâr hızı, bulutların türü ve büyüklüğü ile kaplanan alan ve güneş paneli dizisinin düzeni gibi faktörlerden etkilenebilir.

PV santralleri, eviricilerin oluşturduğu akım harmoniklerini şebekeye enjekte ederek ve tesis içindeki kapasitif elemanlar nedeniyle şebekede harmonik empedans rezonanslarına neden olarak şebekenin harmonik performansını etkiler.
Yüksek frekanslı bozulmalara, evirici gücündeki elektronik cihazların yüksek frekansta anahtarlaması neden olabilir.

Eviricilerden gelen harmonikler, PWM (pulse width modulation) modülasyon şeması, kontrol tekniği ve benimsenen anahtarlama sırasına bağlıdır. Uygulamalarda, evirici emisyonları, evirici üreticisi tarafından, düşük harmonik içerikli bir kaynağa bağlı evirici ile yapılan ölçümlere dayanarak, tüm aktif güç çıkış seviyeleri aralığında kote edilir.

AC akımlarının harmonik bozulması, bir PWM şemasındaki anahtarlama frekansının artmasıyla doğrusal olarak azalır. Bununla birlikte, yüksek güç dönüştürücülerinin anahtarlama frekansı, yarı iletken cihazların anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik uyumluluk hususları nedeniyle genellikle birkaç kilohertz ile sınırlıdır. Serbest çalışan PWM olarak da bilinen Asenkron PWM, modüle edici frekans değişse bile taşıyıcı dalganın frekansının sabit olduğu durumdur. Asenkron SPWM, analog devrelerle kolayca uygulanabilir, ancak karakteristik olmayan harmonikler ve harmonikler arası sürekli bir harmonik yoğunluk spektrumu oluşturur. Üretilen harmonik spektrum ayrıktır ve yalnızca tamsayı harmoniklerini içerir. (Overett ,2017)

Taşıyıcı dalganın frekansını, taşıyıcı SVM denilen bir teknik kullanarak veya taşıyıcı frekansı değişen bir sinyal vasıtasıyla kontrol ederek modüle etmek de mümkündür. Bu, harmonik spektrumunda, taşıyıcı frekansın katları etrafında geniş genliğe sahip olan harmonikleri sunmak yerine, daha geniş bir frekans aralığında dağıtılmakta olan bir harmonik üretir. Senkron SPWM durumunda, dalga şekli modülasyonu, taşıyıcı frekansın integral katları ve taşıyıcı frekansın, ($f_s$) etrafında

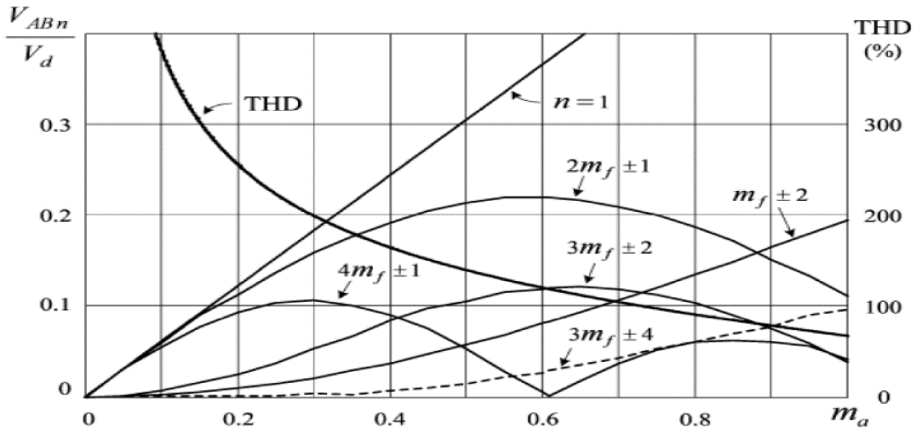
merkezlenen harmonikler, frekans spektrumunda yansıtılmaktadır.

Karakteristik olmayan harmoniklerin oluşmasını önlemek için, frekans modülasyon indeksi 3'ün katlarından oluşan tek bir tamsayı olarak seçilmelidir (yani $m_f$ = 3.n, n = 1,3, 5, …). SVM için, anahtarlama işlemlerinin sayısını en aza indirmeyi amaçlayan çeşitli anahtarlama dizileri mevcuttur. Bununla birlikte bu diziler harmonik seviyeleri ve özellikle çift seviyeli harmonikler, kabul edilen harmonik sınırlarına azaltmayı amaçlamaktadır (Overett , 2017).

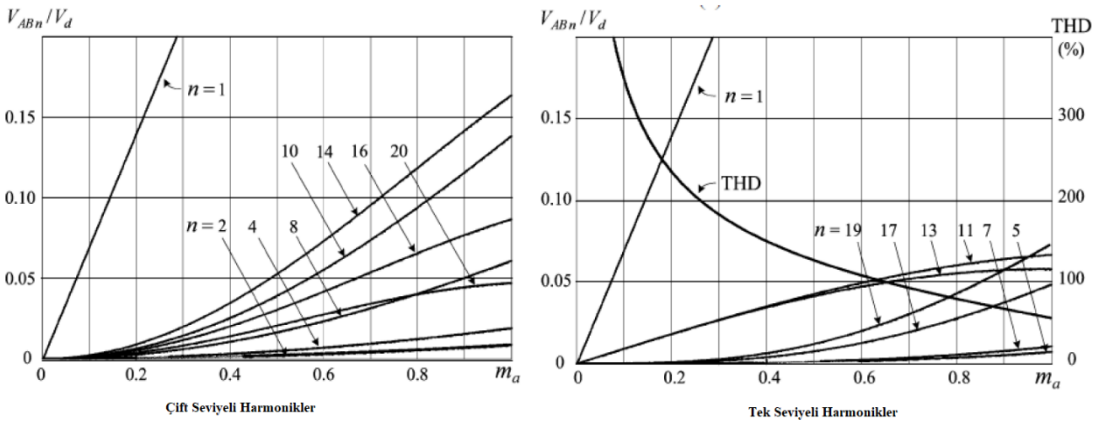
SPWM ve SVM çıkış dalga biçimlerinin gerilim ve akım THD'si artan genlik modülasyon endeksi ile azalır. $m_a$=1 olduğunda THD minimum değerine ulaşır.

Şekil 3.5 ve şekil 3.6. de SPWM ve SVM şemaları için genlik modülasyon indeksi ve normalize harmonik gerilim bozulma değişimiyle THD'nin değişimi gösterilmektedir

.




**Şekil 3.5.** Bir SPWM Evirici İçin Genlik Modülasyon İndeksi ve Gerilim Harmoniği




**Şekil3.6.** Bir SVM Evirici İçin Genlik Modülasyon İndeksi ve Gerilim Harmoniği.

### 3.2.1. Güç Kalitesinin parametreleri

Güç kalitesini kısaca gerilim, akım ve frekanstaki herhangi bir değişimin, kullanıcının sisteminde bir arıza oluşturması nedeniyle veya istenmeyen bir çalışma şekli oluşturması olarak tanımlayabiliriz. Güç kalitesi için bir işletmede çeşitli şartlar aranır. Bu şartları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Elektrik enerjisi kaynağı kullanmaya hazır olmalı.
- Gerilim ve frekans değerleri istenen şartlara uygun olmalı.
- Sabit ve sinüzoidal uç gerilimine sahip olmalı.
- Sistem gürültüsüz bir şekilde çalışmalı.

Bu şartların sağlandığı bir çalışmada kaliteli bir güç sistemi elde edildiği sonucuna varılabilir. Beslenen yükteki kesintileri engelleme ve üniteden istenen verimlilikte sonuçlar elde edebilmek için güç bu kriterler göz önünde bulundurularak sağlanmalıdır. Bu durumun tersi olarak sistemde meydana gelen gerilim genliği değişmesi, kesintiler, gerilim darbeleri, gerilimin doğru bileşen içermesi, dalga şeklinin sinüzoidal şeklinden uzaklaşması, frekans değişimleri ve üç faz dengesizlikleri enerji kalitesi açısından istenmeyen durumlardır. Bunlar bozucu etkilere sebep olur ve dünyadaki güç kalitesi standardına uygun değildir. Tüm bu sayılanlar özetle güç parametreleri adı altında toplanabilir. Bu parametreleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Harmonikler
- Akım ve gerilim değerlerindeki darbeler
- Kırpışma(Fliker)
- Değer değişiklikli dalgalanmalar.

Güç kalitesini bozan en önemli unsurlardan biri de harmoniklerdir.

### 3.2.2. Harmonikler

Harmonik, gerilim ve akım dalga biçiminin ideal sinüs şeklinden uzaklaşmasıdır. Bunun sebebi; anahtarlamaya sahip olan güç elektroniği devreleri, elektromekanik makinelerde ark ve doyma prensibi ile şebekeye bağlanan cihazlardır. Harmoniklerin güç kalitesine dönük olumsuz etkilerini ve yarattığı sorunları, transformatörden başlayarak tüm yüklerde verimsiz çalışmaya ve aktif güç kaybına yol açmaktadır. Optimum harmonik çözüm yöntemleri, pasif filtreli kompanzasyon, statik anahtarlamalı pasif filtreli kompanzasyon ve aktif filtre uygulamaları olabildiği gibi, işletmeden işletmeye fark gösterir. Aynı zamanda hat reaktörleri ve giriş bobinleri de cihaz ve makine

girişlerinde lokal olarak uygulanabilmektedir. Harmonikleri standartların tavsiye ettiği seviyelerde tutmak, tesis için ekonomik bir çözüm olmaktadır. En doğru çözüm, elektriksel projeleri oluşturulurken, sistemin harmonik bozulma oranları hesaplanmalı ve uygun filtreler hesaplanıp projelere eklenmelidir.

Bu alanda yapılan çalışmalar, güneş santralleri şebekeye bağlandığında oluşan harmonik etkileri ile harmoniklere etki eden parametrelerin araştırılması ve harmonik giderilmesi ile enerjinin en ideal nasıl elde edilebileceğine dair birtakım sorunların çözümüne yönelik çabalar olarak görülebilir. İşte bu çalışma alanlarından biri de harmonikler ile ilgili olan kısımdır.

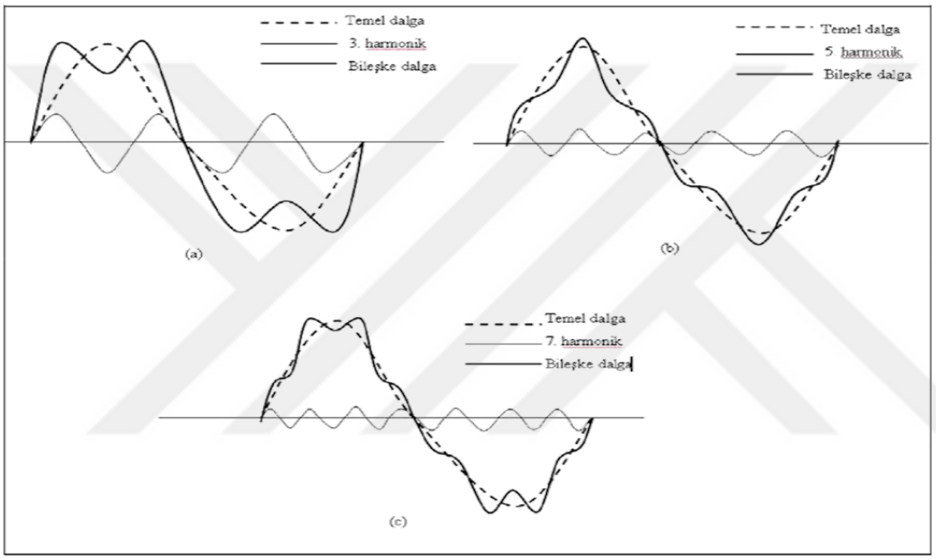
Elektrik enerji sisteminin ve bu sisteme bağlanan yüklerin, arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için o sistemin dalga şeklinin sinüzoidal olması ve frekansının 50 Hz' lik tek frekansa sahip olması istenir. Çeşitli non-lineer yükler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta sinüzoidal dalgalar görülebilir. Ancak sisteme bağlanan bazı elemanlar ve bazı olaylar sonucunda akım ve gerilim büyüklükleri sinüzoidal özelliklerini kaybederek sistemde istenmeyen harmonikler oluşturmaktadır.

Akım ve gerilim sinyallerinde oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve tüketicilere zarar vermekte ve bazı cihazları tamamen işlemez hale getirmektedir.

Elektrik enerji sistemlerinde manyetik ve elektrik devre lineersizlikleri, harmoniklerin ortaya çıkmasında en önemli etkenlerdir. Harmoniklerin meydana gelmesi ile de sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşılacak yani dalga şeklinde bir bozulma görülecektir.

Manyetik devre lineersizliği, demir çekirdekli bobin, transformatör, jeneratör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana getirmesidir. Elektrik devre lineersizliği ise, akımı ile gerilimi arasında ilişkisi doğrusal olmayan bir elemanda, arkla çalışan işletme araçlarında, yarı iletken elemanlar kullanılarak sinüzoidal dalganın bazı kısımlarının kırpılması sonucunda meydana gelir. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidallikten uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Bu tür elemanlara örnek olarak şunlar verilebilir. DC çevirici, motor kontrol devreleri, statik VAR cihazları, anahtarlamalı güç kaynakları gibi güç elektroniği elemanlı devreler, flüoresan, cıva arkı, cıva buharı, neon, xenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, akü şarj devreleri, fotovoltaik sistemler ve elektrikli ulaşım sistemleri vb. Harmonikler genel olarak devredeki elemanın özelliğine ve kaynağın durumuna göre ortaya çıkarlar. Eğer devrede

non-lineer elemanlar veya non-sinüzoidal kaynaklar kullanılacak olursa veya bunların her ikisinin de olması durumunda meydana gelirler. Bu şekilde çeşitli lineer olmayan elemanlar veya tahmin edilmeyen olaylar sonucunda enerji sistemindeki sinüzoidal şekli olan dalganın biçimi bozulur ve bu bozuk dalgalar "nonsinüzoidal dalga" olarak adlandırılır. Sinüzoidal olmayan dalga biçimleri, sinüzoidal dalga ile genlik ve frekansı farklı sinüzoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalgaya olumsuz etki eden sinüzoidal dalgalara "harmonik" adı verilir. Güç sisteminde sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı genelde 3., 5., 7.,9., 11,.... gibi tek harmonik bileşenler bulunur.




**Şekil 3.7.** Temel Dalga, 3., 5., ve 7. Harmonikler ile Bunların Bileşkesi Olan Bileşke Dalga a) 3. Harmonik b) 5.harmonik c) 7. Harmonik

Güç sistemlerindeki harmonikler, sistemi zamanla artan bir oranda etkilemekte, tesislerde enerji kaybına ve güç kesintilerine sebep olmaktadır. Alıcı anma çalışması esnasında uygulanan gerilimin sinüzoidal olmamasından dolayı harmonik meydana getirecek akım çekebilmektedir. . Alternatif akımın üretilmesi sırasında alternatörlerde yapılan gerekli iyileştirici önlemler (filtreleme) ile elektrik enerjisi sinüzoidal şekline yaklaştırılmaktadır.

### 3.2.3. Harmonik büyüklüklerinin tanımı

Harmonik büyüklüklerin değerleri ne kadar küçük olursa, enerji tesislerindeki akım ve gerilimin değeri sinüs eğrisine daha yakın olur. Saf sinüs eğrisi durumunda harmonik bulunmayacağından, harmoniklerin değeri matematiksel olarak sıfır olacaktır.

### 3.2.3.1. Toplam Harmonik bozulma (THD)

Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüm harmonik bozulma denilen kavramdır. Sinüzoidal şekli dalgadan uzaklaşmayı, bozulmayı diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Hem akım hem de gerilim için verilebilir. Toplam harmonik bozulma faktörü kısaltılarak THD ile belirtilir.

Toplam harmonik bozulma gerilim veya akım için harmoniklerin etkin değerlerin, ana harmonik etkin değerine bölünmesiyle çıkan orandır. Toplam harmonik bozulma faktörü bütün harmoniklere ait olan etkilerin toplamını nitelemektedir. Harmonik seviyelerin (üçüncü, beşinci, yedinci., ..... harmonikler) temel harmonik seviyesine göre belirlemede gözden kaçırılmayan en önemli ölçümlerden biridir. Akım ve gerilim için verilebilir. Gerilim için THD:

$$[\mathrm{THD}]_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} v_h^2}}{v_1} \qquad (3\text{-}1)$$

ile hesaplanır.

Burada $V_h$ Harmonik bileşen gerilimi, $V_1$: gerilimin temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

$THD_I$, akım için Toplam Harmonik Bozulma'yı ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$[\mathrm{THD}]_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}}{i_1} \qquad (3\text{-}2)$$

Burada $I_h$ Harmonik bileşen yük akımı, $i_1$ ana bileşen akımıdır.

### 3.2.3.2. Bozulma Faktörü

Her bir harmonik bozulmanın bileşenini bulmak için bozulma faktörü kullanılır. Akım ve gerilim için bozulma faktörü, ayrı ayrı hesaplanır akımın bozulma faktörü aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mathrm{DF_i} = \frac{1}{I}\left(\sum_{n=2}^{\infty} {I_n}^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3\text{-}3)$$

Burada $I_n$ per unit olarak yük akım bileşeninin ifadesidir.

Gerilim için, bozulma faktörü:

$$\mathrm{DF_v} = \frac{1}{V}\left(\sum_{n=2}^{\infty} v_n^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3\text{-}4)$$

ile hesaplanabilir. Burada $V_n$ per unit olarak gerilim bileşeninin ifadesidir.

### 3.2.3.3. Tepe Faktörü

Sinüzoidal olmayan dalgalar için; her bir harmonik dalganın tepe noktasının sapmasının ölçüsü tepe faktörüdür.

$$CF = \frac{Dalganın\ tepe\ Değeri}{Dalganın\ etkin\ değeri} \qquad (3\text{-}5)$$

### 3.2.3.4. K- Faktörü

Kuru tip trafoların K faktörü, nonlineer yüklenen ve genellikle 500 KVA'nın altındaki trafolarda yüklenme kapasitesinin bir ölçütüdür. Bu faktör trafo imalatı sırasında belirlenir,

$$K_{\text{faktörü}} = \sum_{n=1}^{\infty} In^2\ (p.u).n^2 \qquad (3\text{-}6)$$

olarak ifade edilir. Burada $I_n$ per unit olarak transformatörün akım bileşeninin ifadesidir.

### 3.2.3.5. Harmonik Faktörü

Her bir harmonik seviyesini belirletmede kullanılan faktördür. Gerilim için,

$$H_{Fn} = \frac{Vn}{Vi} \qquad (3\text{-}7)$$

İle hesaplanabilir.

$V_n$: n. harmonik gerilimine ait etkin değeri, $V_i$ gerilimin efektif değerini göstermektedir.

### 3.2.4. Harmonik Etkileri

Bu bölümde harmoniklerin çeşitli sistemlere olan etkileri ile ilgili durumlar incelenmiştir. Elektrik enerjisi, yasal bir kalite standardı yayınlanmamış birkaç tüketim ürününden biridir. Gelişmiş güç elektroniği sistemlerinin hızla artan uygulama alanları sebebiyle, elektrik sistemlerinde harmonik kirlenmeleri arttığında enerji kalitesi de düşmektedir. Bu kirlenmeler sistemdeki cihazlara zarar vermekte, ayrıca sistemde kesici şalter gibi devre açıcı elemanlarda gereksiz açma kumandalarına ve bilgisayarların hatalı çalışmasına neden olabilmektedir. Sistemde harmoniklerin bulunması durumunda, kendileri harmonik yaratmayan tüketiciler kullanmadıkları enerji için fazladan para ödemek zorunda kalabilmektedirler.

Harmonikler genellikle nonlineer elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli

gerilim ve akımın güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması (Distorsiyon) anlamına gelir. Bozulan dalgalara Nonsinüzoidal dalga söylenir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, ek kayıplar, güç faktörünün değişmesi v.b. gibi problemlere sebep olur.

### 3.3. Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Güneş enerji santralleri

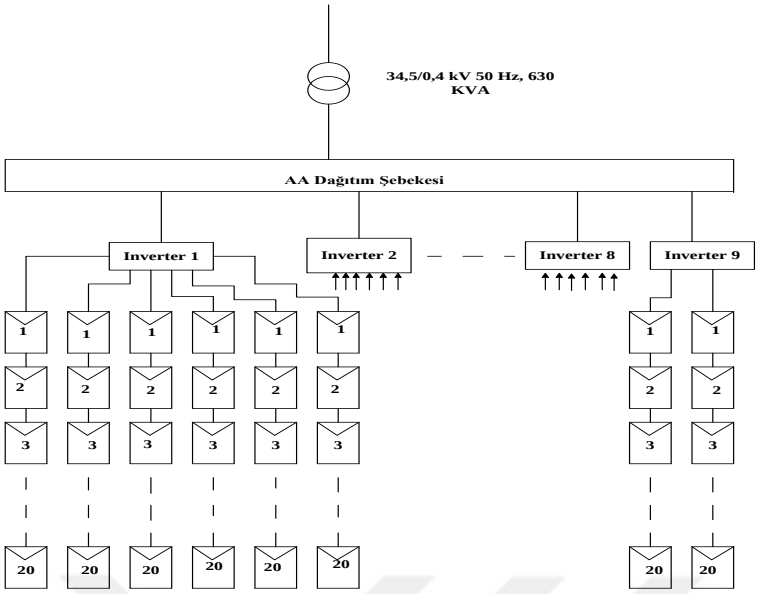
Şebekeye bağlı fotovoltaik güneş enerji santrallerinde uygun sayıda fotovoltaik panelin seri bağlanması ile dizeler oluşturulmakta ve bu dizelerin paralel bağlanmasıyla diziler meydana getirilmektedir. Dizilerde üretilen DC gerilimi dizi eviricileri veya merkezi eviriciler yardımıyla AC'ye dönüştürülmektedir. AC'ye dönüştürülen gerilim uygun bir transformatör yardımıyla YG'e dönüştürülerek şebekeye bağlanmaktadır. Bu tez kapsamında 250 kWp ve 1000 kWp gücünde iki santralin benzetimi yapılmıştır.

#### 3.3.1. Dicle üniversitesi güneş santrali

Yapılan benzetim şebekeye bağlayan 250 kWp maksimum güce sahip olan ve Dicle Üniversitesinde bulunan Güneş santralini temsil etmektedir. Bu santral, bin tane Viessmann Vitovolt 300 P250 polikristal 250 Wp gücünde Güneş paneli, sekiz tane 30 kW ABB TRIO-27.6 TL-OUTD DC/AC harici tip evirici ve bir adet 10 kW'lik ABB PVI-10-TL-OUTD bir eviriciden oluşmaktadır.

Eviricilerin iki tane ayrı MPPT girişi mevcuttur. 30 kW'lik eviricideki dizilerde 6 adet dize bulunmaktadır. Her üç dize 30 kW'lık eviricilerin bir MPPT girişine bağlanmaktadır. 10 kW'lık dizi de ise 2 adet dize bulunur. Bu dizelerin her biri 10 kW'lık eviricilerin farklı MPPT kontrolör girişine bağlıdır. Her dizede 20 tane PV modül seri bağlanmıştır. Dicle Üniversitesinde bulunan Güneş enerji santrali 34.5 kV bir hat ile şebekeye bağlanılmaktadır. Evirici çıkışlarındaki alçak gerilim, üç fazlı 400V/34,5 kV 50 Hz, 630 KVA'lık bir kuru tip transformatör yardımıyla yüksek gerilime dönüştürülmesiyle şebekeye bağlanma sağlanmaktadır.

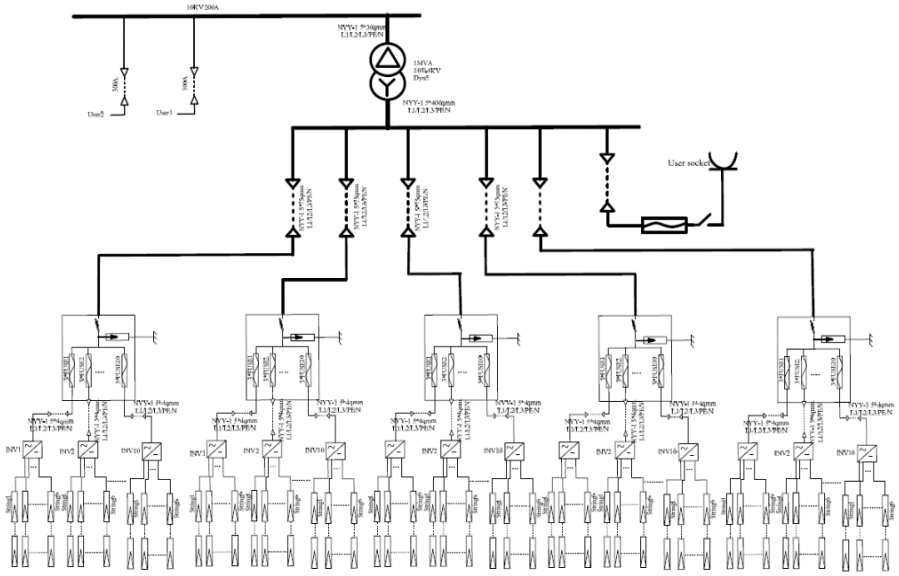
Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin genel bağlantı modeli Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.




**Şekil 3.8.** Dicle Üniversitesinde Bulunan Santralin Genel Modeli

### 3.3.2. 1 MW'lık Güneş Santrali

Yapılan benzetim şebekeye bağlayan 1MW anma gücü sahip olan ve Diyarbakır'da bulunan Güneş santrali temsil etmektedir. FV santralda 4000 adet 250Wp Fotovoltaik Modül bulunmaktadır. Fotovoltaik modüller %15 verimliliğe sahiptir. Fotovoltaik üretici firma uluslararası standartlara göre üretmiştir. Bu Santralinin genel bağlantı modeli Şekil 3.9.'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.9.** 1MW'lık Güneş Santralin Genel Modeli

### 3.4. Benzetim Programı

Yapılan bir sistem test etmek için ve çalıştırmadan önce üretim raporlarını hazırlanmak amacıyla benzetim programları kullanılır. Hazırlanan raporlar, projelerin nasıl çalışacağını ve ekonomik statüsünü belirlediği için çok büyük önem kazanmıştır. Bu nedenle sistemin benzetim programına sisteme ilişkin verilerin doğru bir şekilde girilmesi gerekmektedir. Raporların doğruluk oranı programın özelliklerinin yanı sıra mühendislik tecrübesiyle ilişkilidir.

Benzetim programları ile hazırlanan raporların sonuçlarının gerçek değerler ile karşılaştırılması, raporların doğruluk oranı çalışmalarda her zaman önemli bir yer almıştır.

Bu çalışmada MATLAB programıyla Şebekeye bağlı 1000 kWp ‘lık ve 250 kWp’lik Güneş santrallerinin benzetimi yapılmıştır ve sonuçlar gerçek veriler ile karşılaştırılmıştır.

# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde öncelikle, Diyarbakır bölgesinde bulunan 1MW'lık güneş Enerjisi Santralinin MATLAB programı ile benzetimi yapılacaktır. Yapılan benzetim güneş santralinden belli gün ve belli saatte güç analizörü ile alınan harmonik verileriyle karşılaştırılacaktır. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla güneş santrallerinde oluşan harmonikler üzerinde ışımanın ve sıcaklığın etkisi incelenecektir. İdeal sıcaklık ve ışıma değerleri verip elde edilen benzetim sonuçları sunulacaktır. Ardından harmonik üzere sıcaklık ve ışıma etkisi araştırmak amacıyla iki inceleme yapılacaktır. İlk incelemede ışıma değeri sabit tutup sıcaklık değeri değiştirilecektir ve bu durumdaki harmoniklere sıcaklık etkisi incelenecektir. İkinci incelemede Sıcaklığın değeri sabit tutup ışıma değiştirilecektir ve bu durumdaki harmoniklere ışıma etkisi de incelenecektir.

## 4.1. 1 MW'lık Güneş Santralin Benzetimi:

1MW'lık güneş enerjisi santralı benzetiminde, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için PV paneller kullanılmıştır. Güneş enerjisi santrali 200 paralel dizeden oluşur. Her dize seri bağlanmış 20 SuntechPower SPT-250W modülüne sahiptir. FV panel çıkışındaki güç DC olduğu için AC'ye dönüştürmesi gerekmektedir. O yüzden DC-AC evirici kullanılmıştır. Evirici üç seviyeli IGBT köprüsü ve darbe genişlik modülasyon (PWM) kontrollü olarak modellenmiştir. Harmoniklere sebep olan eviricinin çıkışında oluşan harmonik azaltmak amacıyla RC alçak geçiren filtresi kullanılmıştır. Eviriciyi şebeke dağıtım sistemine bağlamak için 1000 kVA 380 V / 34,5 kV üç fazlı bir transformatör kullanılır. Kontrol sistemi beş alt sistem içermektedir:

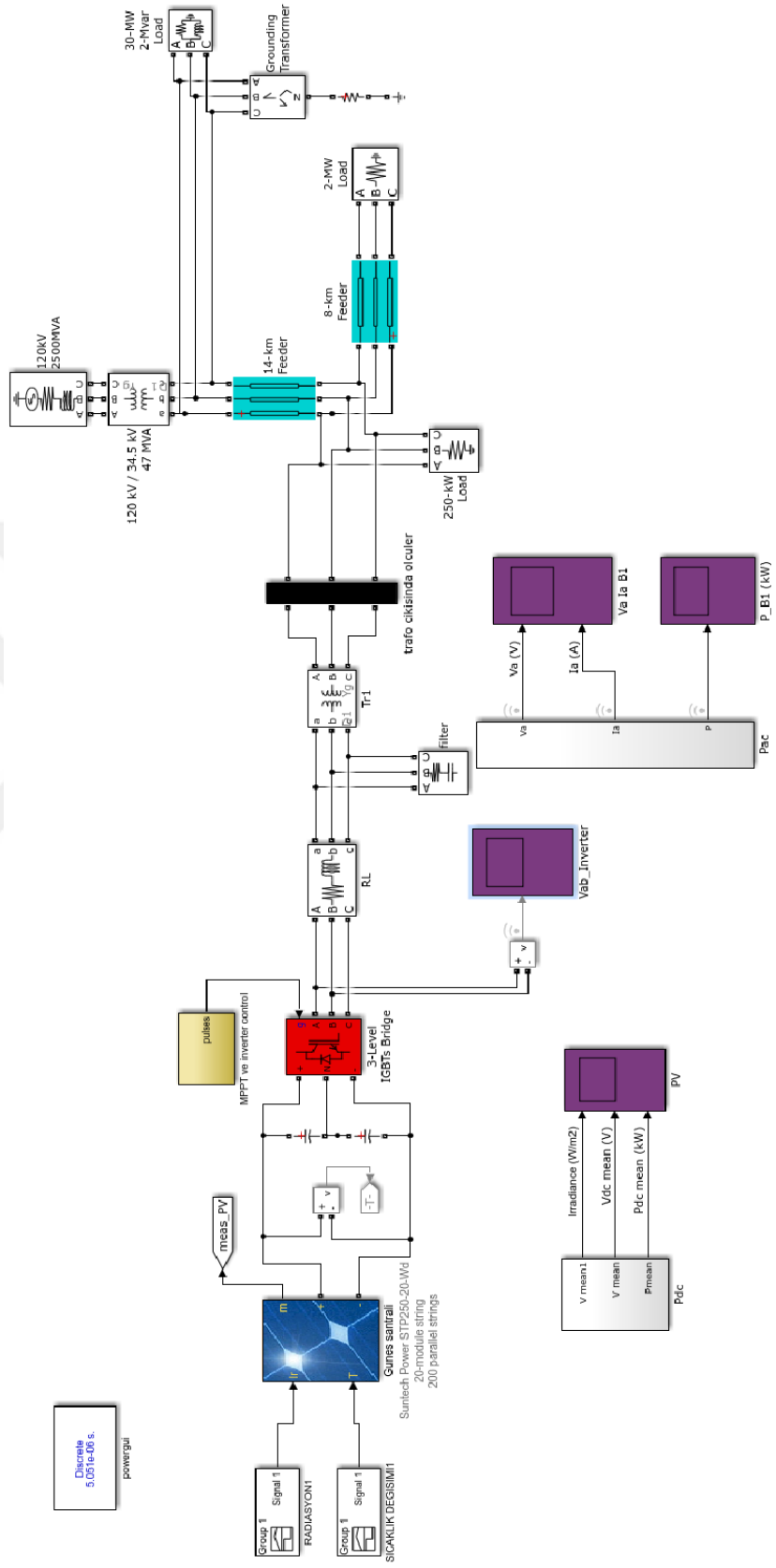
- MPPT Kontrol Cihazı: Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) kontrol cihazı 'Perturb ve Obspect' tekniğine dayanır. Bu MPPT sistemi, PV dizisinden maksimum güç çekecek bir DC gerilimi elde etmek için eviricinin $V_{DC}$ regülatörünün $V_{DC}$ referans sinyalini otomatik olarak değiştirir.
- $V_{DC}$ regülatör
- Akım Düzenleyici: Mevcut $I_d$ ve $I_q$ akım referanslarına dayanarak, regülatör evirici için gerekli referans gerilimlerini belirler. Yaptığımız benzetimde $I_q$ referans akımı sıfıra ayarlanmıştır.
- Ölçümler: Senkronizasyon ve gerilim / akım ölçümleri için kullanılmıştır.

- PWM Jeneratör: Gerekli referans gerilimlerine bağlı olarak IGBT'lere ateşleme sinyalleri oluşturmaktadır.

Şebeke, tipik dağıtım şebekesi olarak modellenmiştir. İki adet besleyici, yükler, transformatörler ve eşdeğer bir iletim sistemini içermektedir.
Benzetim çalıştırmadan önce PV panellere her inceleme için sinyal oluşturucu yardımıyla uygun ışıma ve sıcaklık değeri uygulanmıştır. THD Faktörü Simulink'in güç grafik özellikli arayüzü (powergui) yardımıyla hızlı forier dönüşümü kullanılarak elde edilmektedir.

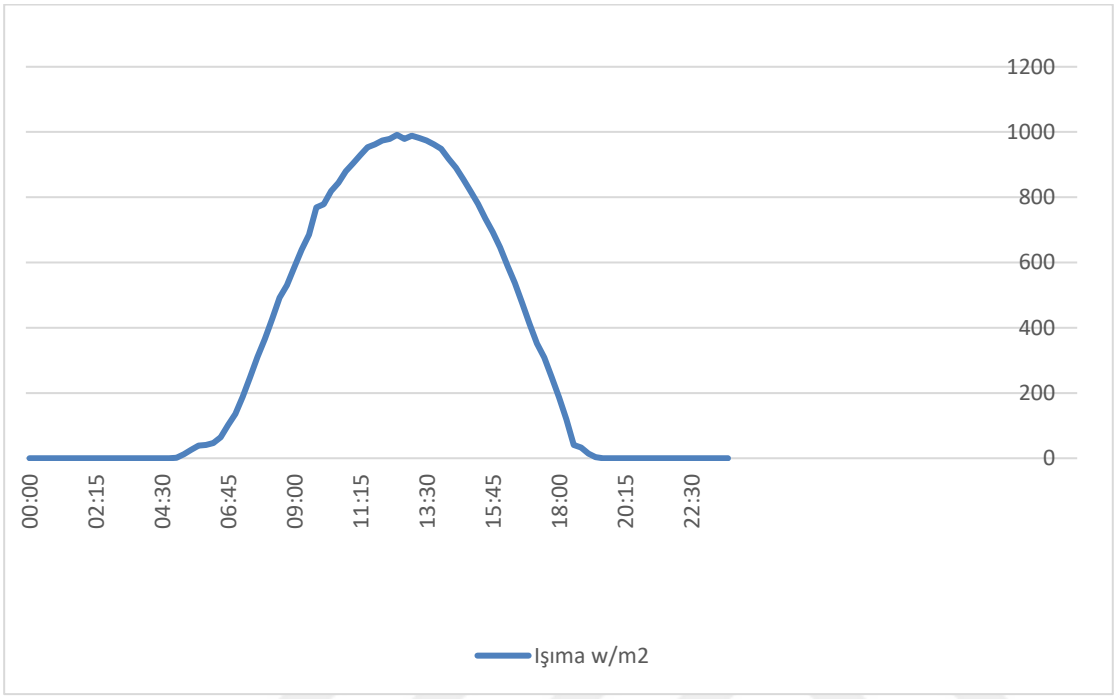
Diyarbakır bölgesinde bulunan 1 MW'lık Güneş Enerji Santrali ve şebekeye bağlandığında kullanılan tüm ögelere bağlı kalınarak, MATLAB programında modellenmiş ve benzetimi Şekil 4-1 'deki gibi yapılmıştır. Benzetim sonucunda transformatör çıkışında akım, gerilim ve ürettiği güç değerleri ölçülmüş ve bu santral şebekeye bağlandığında oluşan harmoniklerin seviyeleri elde edilmiştir.

Benzetim sonuçları ile gerçek sonuçları karşılaştırmak amacıyla 2019 yılın mayıs ayının farklı günlerde belli saatlerde tahmin edilen ışıma ve sıcaklık değerleri benzetimdeki panelin girişine uygulanmıştır. Elde edilen harmoniklerinin seviyeleri, aynı gün ve aynı saatlerde Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralinden alınan harmonik seviyeleri ile karşılaştırılmıştır.

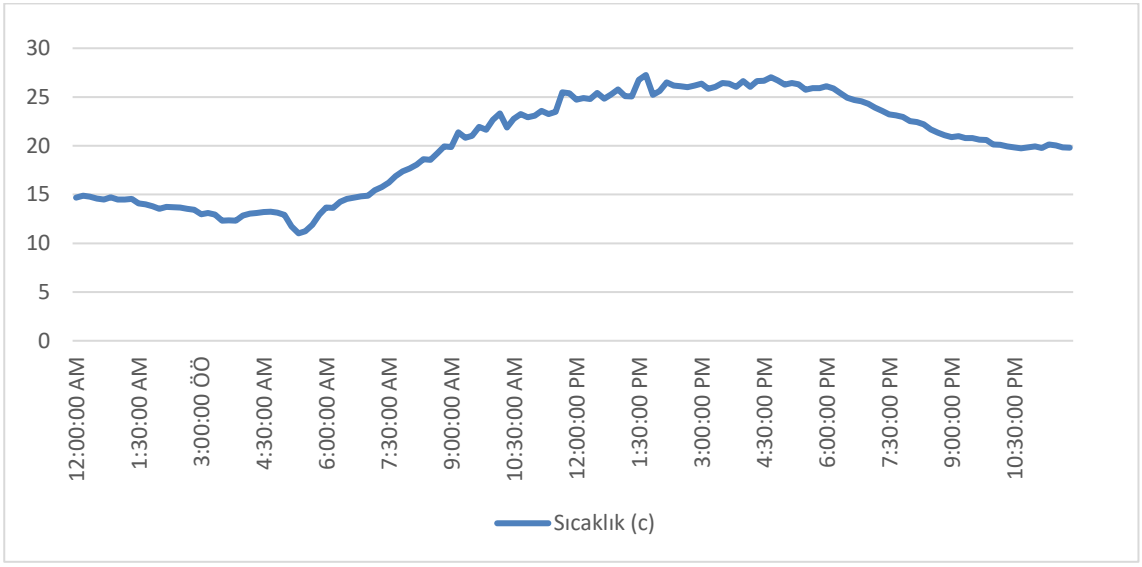



**Şekil 4.1**. Güneş Santralinin MATLAB Benzetimi

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te 30 Mayıs 2019 Perşembe gününde ışıma ($W/m^2$) ve sıcaklık ($^0C$) değerlerinin gün boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir.




**Şekil 4.2.** 30 Mayıs 2019 Perşembe Günü Gün Boyunca Ortalama Işıma Değişimi




**Şekil 4.3.** 30 Mayıs 2019 Perşembe Günü Gün Boyunca Ortalama Sıcaklık Değişimi

Grafik incelendiğinde ele alınan günde ışınımın normal Gauss eğrisi formunda dağıldığı ve maksimum değerinin 1000 $W/m^2$'ye yaklaştığı görülmektedir. Ele alınan

günde sıcaklığında öğleden sonra 25 $^{0}$C civarında değiştiği gözlenmektedir.

Çizelge 4.1'de Diyarbakır bölgesinde 1MW'lık güneş santralinden 30 Mayıs 2019 Perşembe günü sabah saat 10:00 ile öğleden sonra saat 14:00 arasındaki güç analizörü ile alınan akım harmonik seviyeleri gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 30 Mayıs Saat 10:00 ile Saat 14:00Arası Güç Analizörü ile Alınan Akım Harmonik Seviyeleri

| | H3 | H5 | H7 | H9 | H11 | H13 | H15 | H17 | THD% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **30.5.2019 10:00:00** | 0.05 | 0.331 | 0.908 | 0.042 | 0.433 | 0.047 | 0.064 | 0.04 | 1.093 |
| **30.5.2019 10:10:00** | 0.046 | 0.36 | 0.867 | 0.047 | 0.484 | 0.055 | 0.063 | 0.048 | 1.088 |
| **30.5.2019 10:20:00** | 0.057 | 0.431 | 0.891 | 0.047 | 0.479 | 0.084 | 0.059 | 0.07 | 1.135 |
| **30.5.2019 10:30:00** | 0.062 | 0.465 | 0.876 | 0.041 | 0.428 | 0.104 | 0.055 | 0.055 | 1.117 |
| **30.5.2019 10:40:00** | 0.061 | 0.45 | 0.76 | 0.022 | 0.31 | 0.24 | 0.056 | 0.057 | 1.002 |
| **30.5.2019 10:50:00** | 0.073 | 0.496 | 0.843 | 0.032 | 0.401 | 0.143 | 0.057 | 0.075 | 1.098 |
| **30.5.2019 11:00:00** | 0.084 | 0.785 | 1.319 | 0.041 | 0.37 | 0.137 | 0.046 | 0.073 | 1.598 |
| **30.5.2019 11:10:00** | 0.096 | 0.918 | 1.438 | 0.045 | 0.4 | 0.158 | 0.048 | 0.066 | 1.786 |
| **30.5.2019 11:20:00** | 0.108 | 0.91 | 1.342 | 0.048 | 0.338 | 0.275 | 0.046 | 0.066 | 1.712 |
| **30.5.2019 11:30:00** | 0.144 | 1.015 | 1.35 | 0.097 | 0.417 | 0.257 | 0.06 | 0.058 | 1.794 |
| **30.5.2019 11:40:00** | 0.265 | 1.278 | 1.406 | 0.212 | 0.577 | 0.16 | 0.108 | 0.045 | 2.068 |
| **30.5.2019 11:50:00** | 0.277 | 1.324 | 1.377 | 0.218 | 0.57 | 0.124 | 0.097 | 0.07 | 2.067 |
| **30.5.2019 12:00:00** | 0.127 | 1.316 | 1.356 | 0.115 | 0.556 | 0.172 | 0.057 | 0.147 | 1.982 |
| **30.5.2019 12:10:00** | 0.198 | 1.357 | 1.396 | 0.145 | 0.5 | 0.245 | 0.067 | 0.12 | 2.07 |
| **30.5.2019 12:20:00** | 0.168 | 1.34 | 1.557 | 0.13 | 0.474 | 0.149 | 0.079 | 0.094 | 2.158 |
| **30.5.2019 12:30:00** | 0.162 | 1.396 | 1.553 | 0.125 | 0.465 | 0.109 | 0.083 | 0.11 | 2.181 |
| **30.5.2019 12:40:00** | 0.057 | 1.396 | 1.626 | 0.048 | 0.468 | 0.161 | 0.027 | 0.074 | 2.222 |
| **30.5.2019 12:50:00** | 0.034 | 1.182 | 1.374 | 0.054 | 0.3 | 0.274 | 0.026 | 0.098 | 1.894 |
| **30.5.2019 13:00:00** | 0.055 | 0.889 | 1.523 | 0.029 | 0.195 | 0.397 | 0.051 | 0.091 | 2.001 |
| **30.5.2019 13:10:00** | 0.048 | 0.829 | 1.43 | 0.043 | 0.344 | 0.293 | 0.041 | 0.106 | 1.789 |
| **30.5.2019 13:20:00** | 0.062 | 1.099 | 1.53 | 0.068 | 0.384 | 0.123 | 0.047 | 0.115 | 1.949 |
| **30.5.2019 13:30:00** | 0.066 | 1.156 | 1.647 | 0.073 | 0.377 | 0.119 | 0.042 | 0.143 | 2.083 |
| **30.5.2019 13:40:00** | 0.047 | 0.457 | 0.697 | 0.033 | 0.153 | 0.057 | 0.025 | 0.04 | 0.372 |
| **30.5.2019 13:50:00** | 0.111 | 0.166 | 0.245 | 0.013 | 0.081 | 0.077 | 0.007 | 0.027 | 0.354 |
| **30.5.2019 14:00:00** | 0.077 | 1.029 | 1.369 | 0.062 | 0.533 | 0.207 | 0.036 | 0.153 | 1.838 |

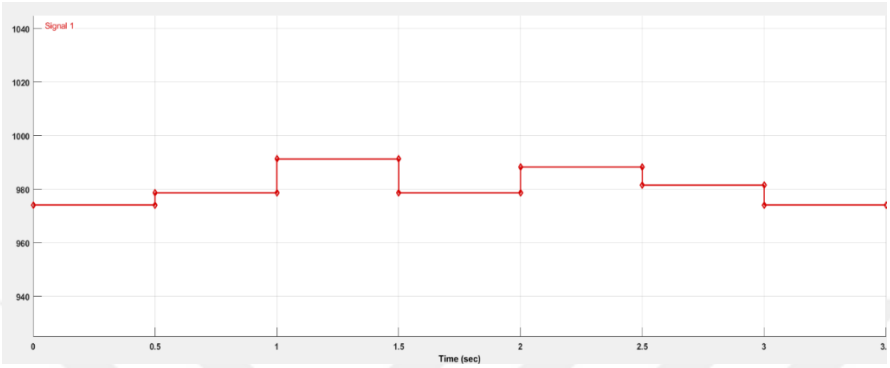
Ölçüm verileri incelendiğinde güneş enerjisi santralinin ilgili güne ait akım THD'sinin %0,354 ile %2,222 arasında değiştiği gözlenmektedir. Akım THD'nin en düşük değerine ışımanın maksimum olduğu 13:30-13:40 saatinde ulaştığı belirlenmiştir. Işımadaki dalgalanmaların akım harmonik değerleri üzerinde etkisini gösterdiği de tespit edilmiştir. Çizelge 4.2'de 30 Diyarbakır bölgesinde 1MW'lık güneş santralinden 30 Mayıs 2019 Perşembe günü sabah saat 10:00 ile öğleden sonra saat 14:00 arasındaki güç analizörü ile alınan gerilim harmonik seviyeleri gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilim harmonik değerlerinin minimum değerinin %1,109 maksimum değerinin ise 1,396 olduğu görülmektedir. Gerilim THD değerinin çok fazla değişmediği ışımanın maksimum olduğu saatlerde en yüksek değerine ulaştığı aynı zamanda sıcaklığın da bu saat dilimlerinde maksimum olduğu gözlenmektedir.

**Çizelge 4.2.** 30 Mayıs Saat 10:00 ile Saat 14:00Arası Güç Analizör ile Alınan Gerilim Harmonik Seviyeleri

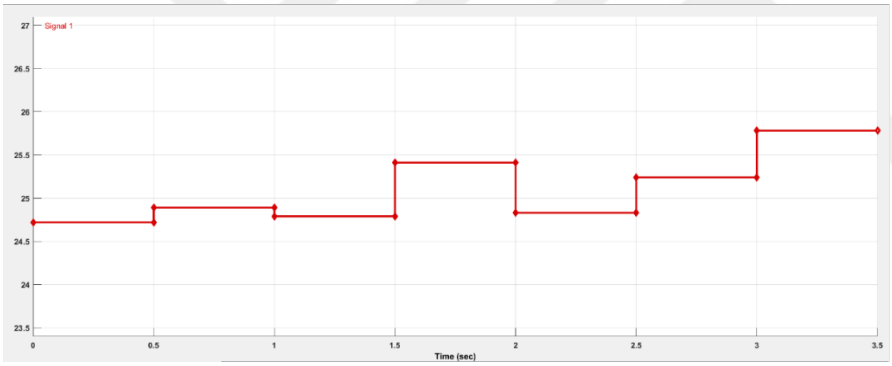
| | H3 | H5 | H7 | H9 | H11 | H13 | THD% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **30.5.2019 10:00:00** | 0,061 | 0,342 | 1,083 | 0,044 | 0,406 | 0,235 | 1,294 |
| **30.5.2019 10:10:00** | 0,061 | 0,316 | 1,094 | 0,043 | 0,488 | 0,218 | 1,294 |
| **30.5.2019 10:20:00** | 0,087 | 0,087 | 1,126 | 0,044 | 0,513 | 0,213 | 1,294 |
| **30.5.2019 10:30:00** | 0,097 | 0,062 | 1,084 | 0,004 | 0,481 | 0,218 | 1,294 |
| **30.5.2019 10:40:00** | 0,097 | 0,189 | 0,906 | 0 | 0,345 | 0,235 | 1,294 |
| **30.5.2019 10:50:00** | 0,123 | 0,087 | 1,023 | 0 | 0,449 | 0,254 | 1,294 |
| **30.5.2019 11:00:00** | 0,13 | 0,115 | 1,056 | 0 | 0,427 | 0,268 | 1,212 |
| **30.5.2019 11:10:00** | 0,144 | 0,168 | 1,04 | 0,043 | 0,453 | 0,268 | 1,212 |
| **30.5.2019 11:20:00** | 0,162 | 0,277 | 0,917 | 0,043 | 0,385 | 0,256 | 1,212 |
| **30.5.2019 11:30:00** | 0,167 | 0,277 | 0,976 | 0,043 | 0,456 | 0,267 | 1,212 |
| **30.5.2019 11:40:00** | 0,178 | 0,35 | 1,161 | 0,061 | 0,584 | 0,277 | 1,212 |
| **30.5.2019 11:50:00** | 0,188 | 0,366 | 1,159 | 0,086 | 0,58 | 0,305 | 1,212 |
| **30.5.2019 12:00:00** | 0,143 | 0,376 | 1,135 | 0,043 | 0,566 | 0,29 | 1,292 |
| **30.5.2019 12:10:00** | 0,183 | 0,416 | 1,078 | 0,097 | 0,449 | 0,303 | 1,292 |
| **30.5.2019 12:20:00** | 0,168 | 0,39 | 1,23 | 0,061 | 0,524 | 0,288 | 1,292 |
| **30.5.2019 12:30:00** | 0,173 | 0,422 | 1,231 | 0,061 | 0,54 | 0,291 | 1,292 |
| **30.5.2019 12:40:00** | 0,137 | 0,472 | 1,23 | 0 | 0,509 | 0,279 | 1,292 |
| **30.5.2019 12:50:00** | 0,138 | 0,622 | 1,03 | 0 | 0,332 | 0,19 | 1,292 |
| **30.5.2019 13:00:00** | 0,139 | 0,615 | 1,078 | 0 | 0,099 | 0,238 | 1,396 |
| **30.5.2019 13:10:00** | 0,116 | 0,531 | 1,064 | 0 | 0,316 | 0,224 | 1,396 |
| **30.5.2019 13:20:00** | 0,107 | 0,292 | 0,259 | 0,044 | 0,471 | 0,258 | 1,396 |
| **30.5.2019 13:30:00** | 0,087 | 0,258 | 1,341 | 0,044 | 0,505 | 0,255 | 1,396 |
| **30.5.2019 13:40:00** | 0,163 | 0,258 | 1,252 | 0 | 0,452 | 0,241 | 1,396 |
| **30.5.2019 13:50:00** | 0,186 | 0,725 | 0,906 | 0 | 0,349 | 0,357 | 1,396 |
| **30.5.2019 14:00:00** | 0,144 | 0,43 | 1, | 0 | 0,452 | 0,268 | 1,109 |

Diyarbakır'da 1 MW'lık Güneş santralinden her 10 dakikada alınan transformatör çıkışındaki harmonik seviyelerinin bilgileri ve aynı tarihte ölçülen ortalama ışıma ve sıcaklık değerlerini kullanılarak incelenmiştir. Saat 12:00 ve 13:00 arasında Şekil 4.4'de

gösterildiği gibi ışıma miktarı 970-995 W/m$^2$ arasında, Şekil 4.5'de gösterdiği gibi de sıcaklık 24,7- 25,78 $^0$C arasında değişmektedir. Bu değerlere göre yapılan benzetimde güneş santralinin şebekeye bağlandığı transformatör çıkışında akım dalgasının toplam harmonik bozulma faktörü çizelge 4.3.'de gösterildiği gibi olmuştur.




**Şekil 4.4.** Saat 12:00 – 13:00 Arası Işıma Değişimi



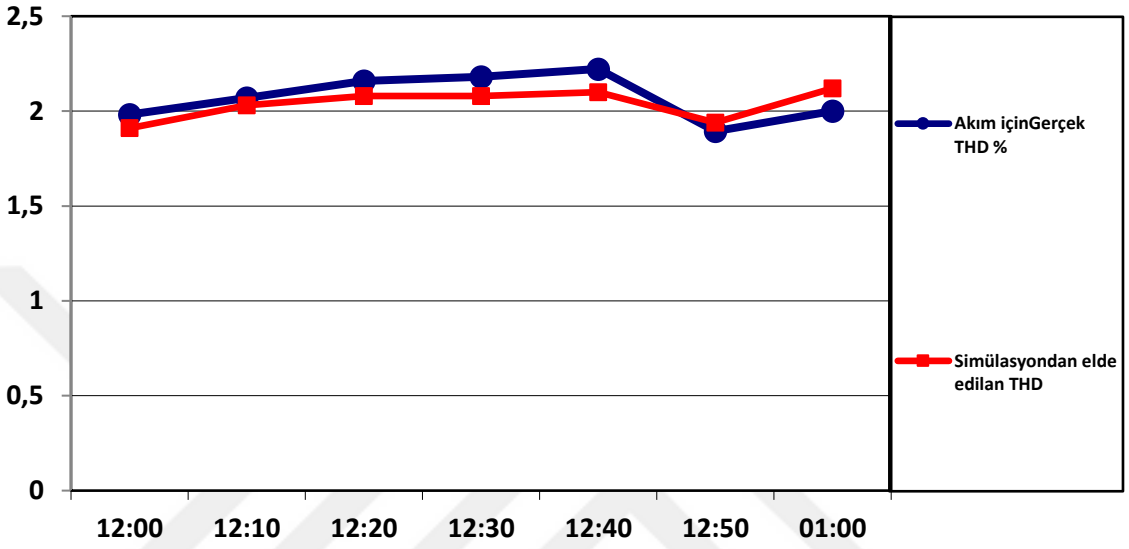

**Şekil 4.5.** Saat 12:00 – 13:00 Arası Sıcaklık Değişimi

**Çizelge 4.3.** Benzetimden 12:00 – 13:00 saatleri arasında elde edilen Akım İçin THD Faktörü

| Zaman | Akım için THD% |
|---|---|
| 12:00 | 2.13 |
| 12:10 | 1.86 |
| 12:20 | 1.77 |
| 12:30 | 1.83 |
| 12:40 | 1.79 |
| 12:50 | 2.00 |
| 1:00 | 2.12 |

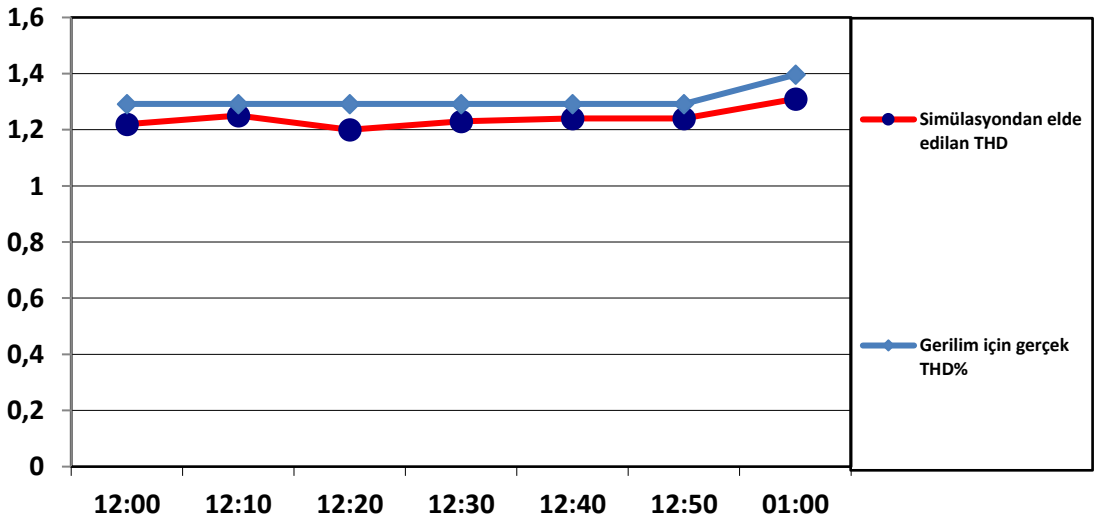
Çizelge 4.3. incelendiğinde ele alınan saat diliminde akım için maksimum THD %2.13, minimum THD ise %1,77 olmuştur.

Şekil 4.6' da saat 12:00 ve 13:00 arasında benzetimle elde edilen akım içim toplam harmonik bozulma faktörünün Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralin gerçek toplam harmonik bozulma faktörü ile karşılaştırmasını gösterilmiştir.




**Şekil 4.6.** 1MW'lık Güneş Santralin Akım için Gerçek THD'si ve Benzetimden Elde Edilen THD

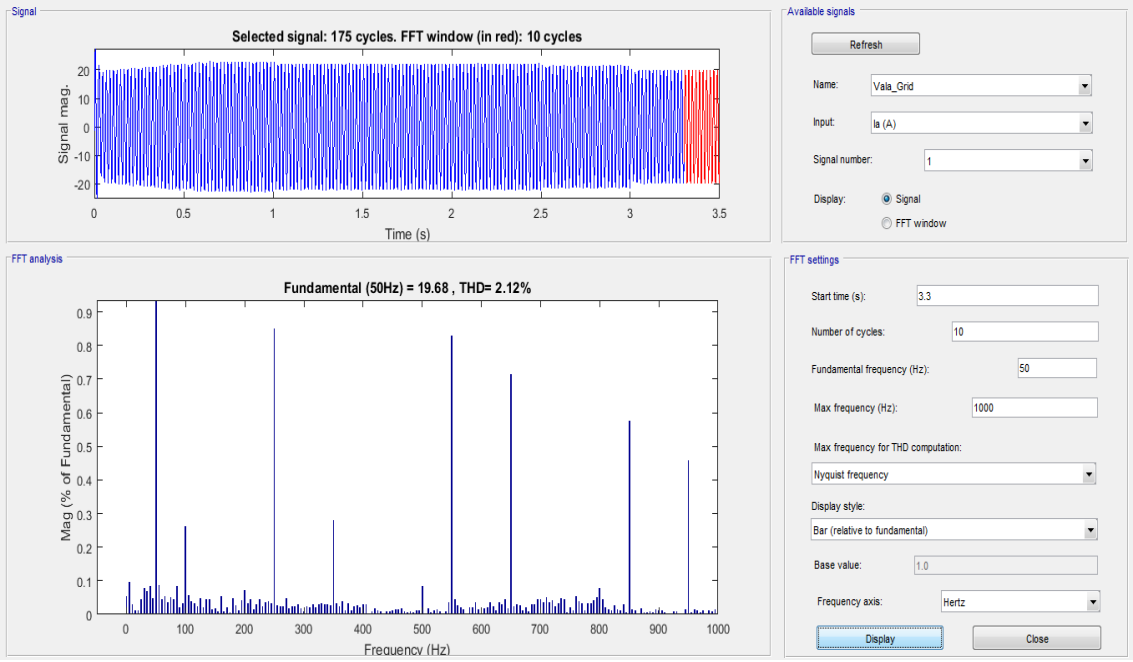
Şekil 4.7' da saat 12:00 ve 13:00 arasında benzetimle elde edilen gerilim içim toplam harmonik bozulma faktörünün Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralinin gerilmi içim gerçek toplam harmonik bozulma faktörü ile karşılaştırması gösterilmiştir




**Şekil 4.7.** 1MW'lık Güneş Santralin Gerilim için Gerçek THD'si ve Benzetimden Elde Edilen THD

Sonuçların incelenmesinden benzetim ile elde edilen sonuçlar ile gerçek sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu, akım için maksimum hatanın %5,4; gerilim için makismum hatanın %7,5 olduğu tespit edilmiştir. Akım için ortalama hatanın %4,2; gerilim için ortalama hatanın ise %5,3 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar benzetim modelinin oldukça doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Böylelikle benzetim modeli araştırmalar için güvenirlikle kullanılabilecektir.

Saat 13:00 'te benzetim modelinden elde edilen toplam harmonik bozulma faktörü Şekil 4.8'de görüldüğü gibi olmuştur.




**Şekil 4.8.** FFT İle Saat 13:00'te Alınan akım Harmonik Seviyeleri

Çizelge 4.4'de saat13:00'te akım ve gerilim için harmonik seviyeleri ve hem gerçek ölçümlerden hem benzetimden elde edilen gerilim ve akım için toplam harmonik bozulma faktörü gösterilmiştir. Çizelgedeki sonuçlardan akım için THD'nin benzetim modelinde %5,4'lük hatayla, gerilim için THD'nin ise %6,1'lik hatayla tespit edildiği görülmektedir.

**Çizelge 4.4.** Saat 13:00' te Akım ve Gerilimin Harmonik Seviyeleri

| **Harmonik derecesi (n)** | **Benzetimde % In/ $I_1$** | **Gerçekte % In/ $I_1$** | **Benzetimde % Vn/ $V_1$** | **Gerçekte % Vn/ $V_1$** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 0.02 | 0.55 | 0,23 | 0,139 |
| 5 | 0.85 | 0.88 | 0,57 | 0,615 |
| 7 | 0.28 | 1.5 | 0,98 | 1,078 |
| 9 | 0.01 | 0.02 | 0,09 | 0 |
| 11 | 0.83 | 0.20 | 0,11 | 0,099 |
| 13 | 0.71 | 0.39 | 0,21 | 0,238 |
| THD% | 2.12 | 2.001 | 1,31 | 1,396 |

## 4.2. İdeal Koşullarda Benzetim

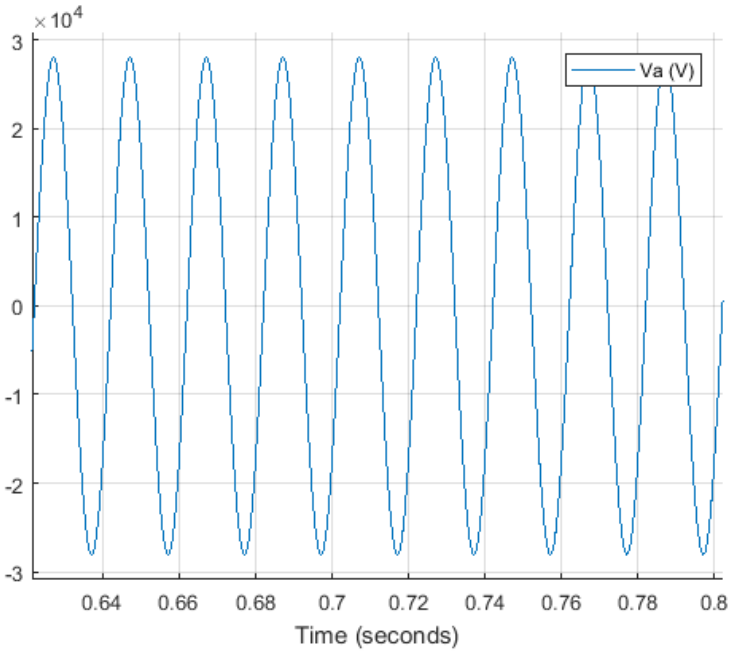
Yapılan ilk incelemede 250 kW'lık güneş enerji santralı benzetiminde varsayılan ideal ışıma (1000W/$m^2$) ve sıcaklık (25 $^0$C) değerinin her ikisi de sabit tutulup transformatör çıkışında şebekenin akım ve geriliminin dalgaları incelenmiştir. Bu dalgalarda harmoniklerin toplam harmonik bozulma faktörü (THD), FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) vasıtasıyla hesaplanmıştır. Akım ve gerilim harmonikleri incelediğimiz zaman sonuçları Çizelge 4.5'de gösterildiği gibi olmuştur.

Çizelge 4.5'in incelenmesinde görüleceği gibi, akım için en büyük harmoniklerin 5. Ve 13. harmonikler olduğu, gerilim için ise en büyük harmonik bileşenin 5. ve 7. harmonikler olduğu görülmektedir. Ele alınan saat diliminde akım THD'si %1,84, gerilim THD'si %1,29 olmuştur.

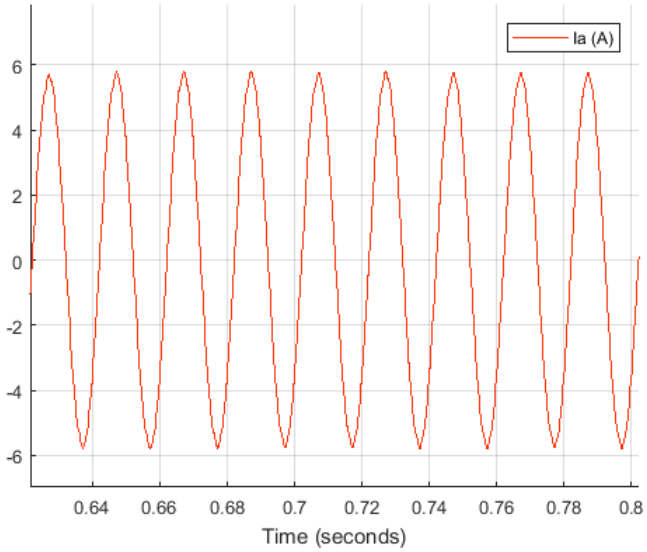
**Çizelge 4.5.** İdeal Işıma ve Sıcaklık Koşullarında Akım ve Gerilim Harmonikleri

| Harmonik Derecesi (n) | % In/ $I_1$ | % Vn/ $V_1$ |
|---|---|---|
| 1 | 100 | 100 |
| 3 | 0.05 | 0,138 |
| 5 | 0.70 | 0,622 |
| 7 | 0.40 | 0,872 |
| 9 | 0.05 | 0,01 |
| 11 | 0.40 | 0,3 |
| 13 | 0.85 | 0,23 |
| THD% | 1.84 | 1,29 |

Şebeke tarafından A fazının akım ve gerilim sinyali Şekil 4.9 ve 4.10'da görüldüğü gibi olmuştur.




**Şekil 4.9.** İdeal Koşullarda Şebeke Tarafındaki Gerilim Sinyali

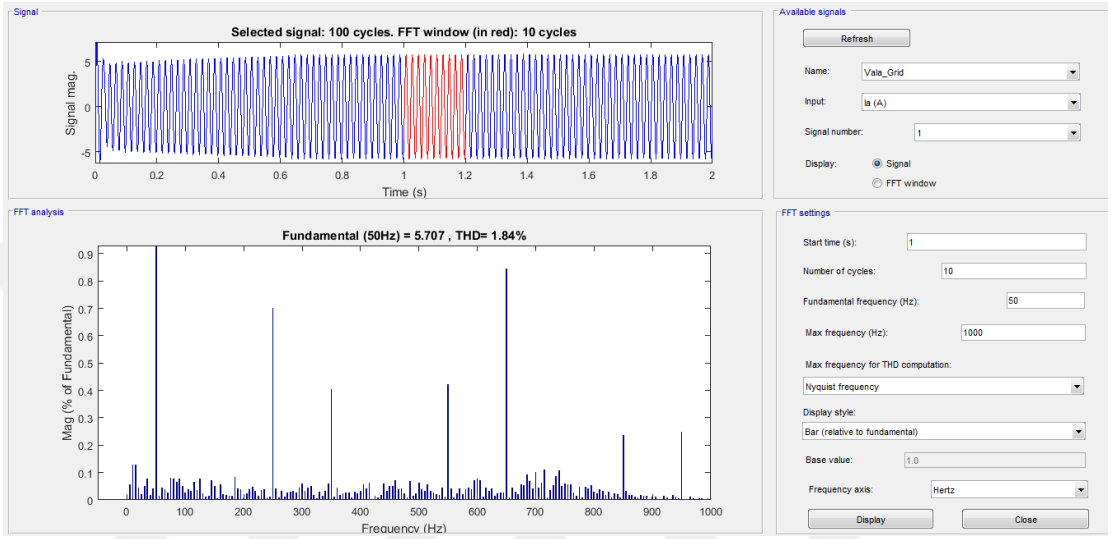



**Şekil 4.10.** İdeal Koşullarda Şebeke Tarafındaki Akım Sinyali

Bu durumda akım için toplam harmonik bozulma faktörü hesaplamak için Hızlı Fourier Dönüşümü FFT kullanılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.11'de görüldüğü gibi olmuştur.

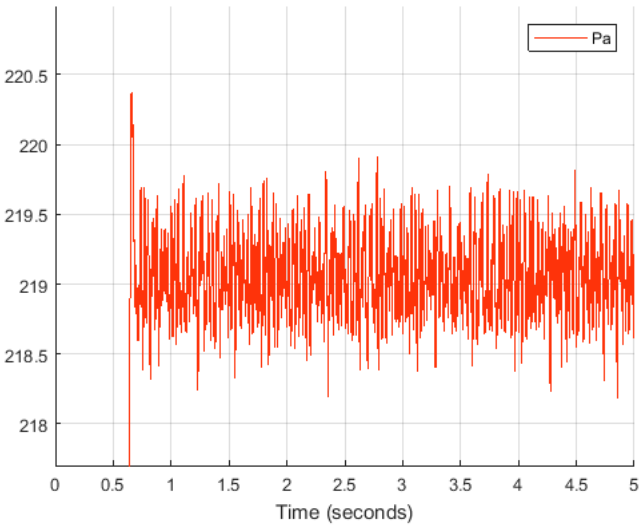
Gerilim sinyalinin harmonik seviyesi çok düşüktür ve Toplam Harmonik bozulma faktörüne bakıldığında kabul edilen en genel şart olan %5 THD sınırını aşmaktan uzaktır.

Ayrıca akım harmonikleri devreye bağlanan akım kaynağı şeklinde gösterilen eviriciler sebebiyle, genellikle bir artış göstermekte, fakat, harmonik bozulma sınırının altında kalmaktadır (%1,84).




**Şekil 4.11.** İdeal Koşullarda FFT ile Akım Harmoniklerin Analizi

Bu durumda Güneş santralinin çıkış gücü ve performansına bakıldığında, sistemin istikrarlı olarak şebekeye verdiği güç şekil 4.12. görüldüğü gibi yaklaşık 219 kW olarak ölçülmüştür.

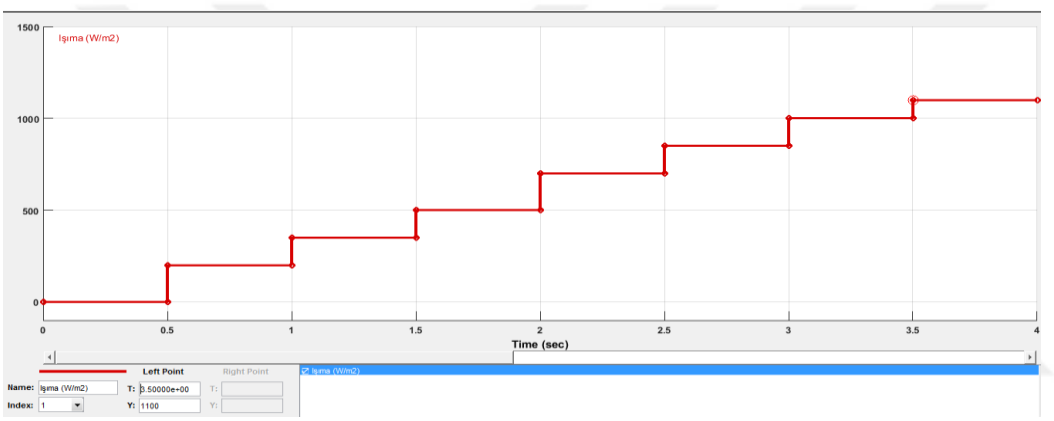



**Şekil 4.12.** İdeal Koşullarda Sistemin Çıkış Gücü

Santralin DC nominal gücü 250 kWp olurken Santralin ideal koşullarda performans oranına, %87,6 değeri ile ulaştığı tespit edilmiştir. Santralin şebekeye verdiği güç sabit olmalıdır. Fakat harmoniklere sebep olan eviriciler nedeniyle, Şekil 4.5'de gösterildiği gibi şebekeye verilen güç 218 ile 220 kW aralığında sürekli değişmektedir ve bu güç aralığı, akım ve gerilim toplam harmonik bozulma faktörüne göre değişmektedir.

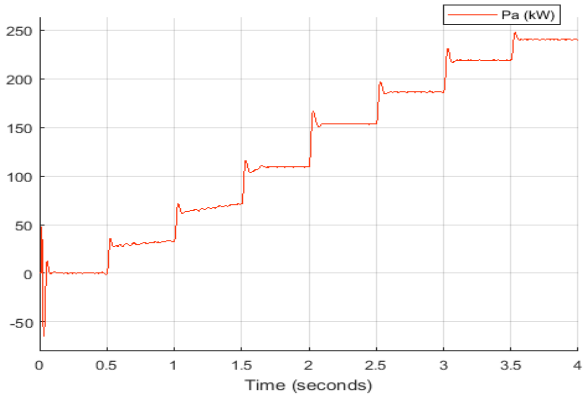
### 4.3. Harmoniklere ışıma etkisi

Harmoniklere ışıma etkisinin belirlenmesi için santral benzetiminde sıcaklık değeri 25 $^0$C sabit tutulup ışıma değeri Şekil 4.13'de gösterildiği gibi her 0,5 saniyede bir değiştirilmiştir.




**Şekil 4.13.** Işımanın 0-1100 w/m2 Arasında Değişimi

Işıma arttığında trafo çıkışındaki akım değeri de artar ve buna göre sistemin performansı da artar. Şekil 4.14.'de 25 $^0$C ortalama sıcaklıkta, etkin ışıma değeri değiştirildiğinde sistemden elde edilen güç ile şebekeye verilen güç miktarı gösterilmiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde ışıma ve üretilen güç miktarı doğru orantılıdır.

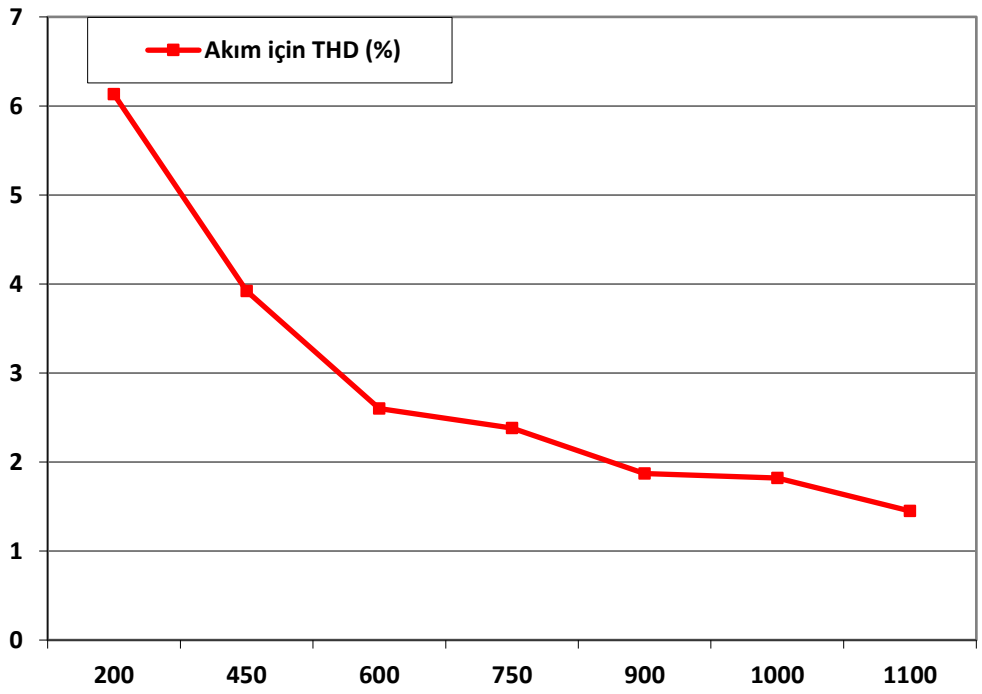



**Şekil 4.14.** Işıma Değiştirildiğinde Sistem Performansı

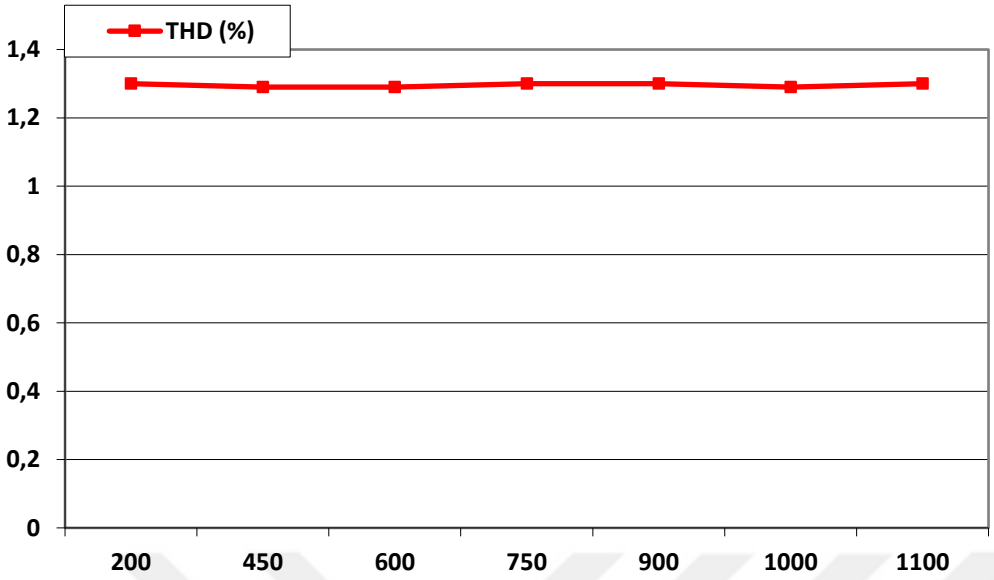
Şebeke tarafında gerilim ve akım dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörüne bakıldığında, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.15'de gösterildiği gibi etkin ışıma arttığı zaman akımın toplam harmonik faktörü de azalmış ve akımın dalga şekli sinüzoidal şekline daha fazla yaklaşmıştır. . Çizelgedeki değerler incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %6,16; gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Işıma değeri 1000 W/m$^2$'ye ulaştığında akım THD %1,82'ye düşmektedir. Gerilim THD'lerinin ise ışıma ile nerdeyse değişmediği gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 4.16.'da ışıma değiştirildiğinde gerilimin toplam harmonik bozulma faktörünün fazla etkilemeyeceğini belirlenmiştir.

**Çizelge 4.6.** Işıma-THD İlişkisi

| Işıma W/m$^2$ | Akım için THD (%) | Gerilim için THD(%) |
|---|---|---|
| 200 | 6.16 | 1.3 |
| 450 | 3.92 | 1.29 |
| 600 | 2.60 | 1.29 |
| 750 | 2.38 | 1.30 |
| 900 | 1.87 | 1.30 |
| 1000 | 1.82 | 1.29 |
| 1100 | 1.45 | 1.30 |




**Şekil 4.15.** Işıma – Akım için THD İlişkisi



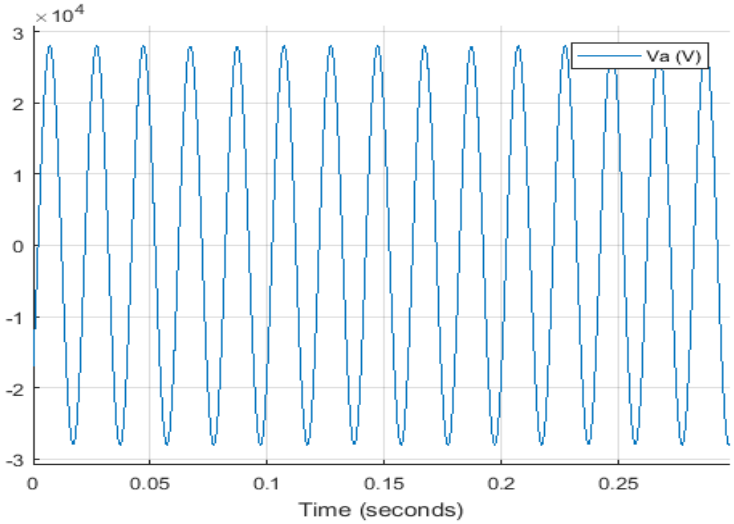

**Şekil 4.16.** Işıma – Gerilim için THD İlişkisi

Işıma değiştirildiğinde transformatör çıkışında FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ile alınan akım harmoniklerin seviyelerine bakıldığında sonuçlar Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi olmuştur. Genel olarak ışıma arttığında bütün harmonik seviyeleri azalmaya başlamaktadır. Çizelge 4.7'in incelemesinde görüleceği gibi ışıma 200 W/m$^2$ olduğunda akım için en büyük harmoniklerin 5. ve 7. Harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca ışıma 1000 W/m$^2$ olduğunda en büyük harmoniklerin 5. ve 13. Harmonikler olduğu görülmüştür.

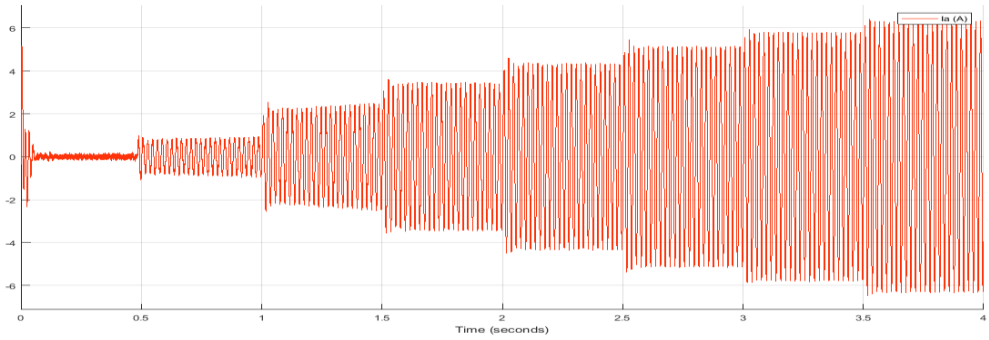
**Çizelge 4.7.** FFT ile Akım Harmoniklerinin Seviyeleri

| | **Harmonik** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Işıma** | 1. | 3. | 5. | 7. | 9. | 11. | 13. | 15. |
| 200 | 100 | 0.55 | 2.10 | 1.71 | 0.06 | 0,65 | 0,40 | 0,24 |
| 450 | 100 | 0.32 | 0.58 | 0.64 | 0.10 | 0.90 | 1.14 | 0.33 |
| 600 | 100 | 0.03 | 0.74 | 0.27 | 0.05 | 0.14 | 0.70 | 0.18 |
| 750 | 100 | 0.09 | 1 | 0.12 | 0.6 | 0.58 | 0.82 | 0.04 |
| 900 | 100 | 0.03 | 0.69 | 0.26 | 0.04 | 0.28 | 0.86 | 0.05 |
| 1000 | 100 | 0.07 | 0.65 | 0.44 | 0.03 | 0.44 | 0.88 | 0.05 |
| 1100 | 100 | 0.07 | 0.41 | 0.20 | 0.02 | 0.35 | 0.54 | 0.03 |

Şekil 4.17 ve 4.18' de sıcaklığı 25 $^0$C'de sabit olduğunda ve ışıma değiştirildiğinde trafo tarafında ölçülen akım ve gerilim sinyalleri gösterilmiştir. Gerilim ve akım harmonikleri kabul edilen %5'lik sınırı aşmadığı için akım ve gerilim dalga şekli sinüs olarak kabul edilir.



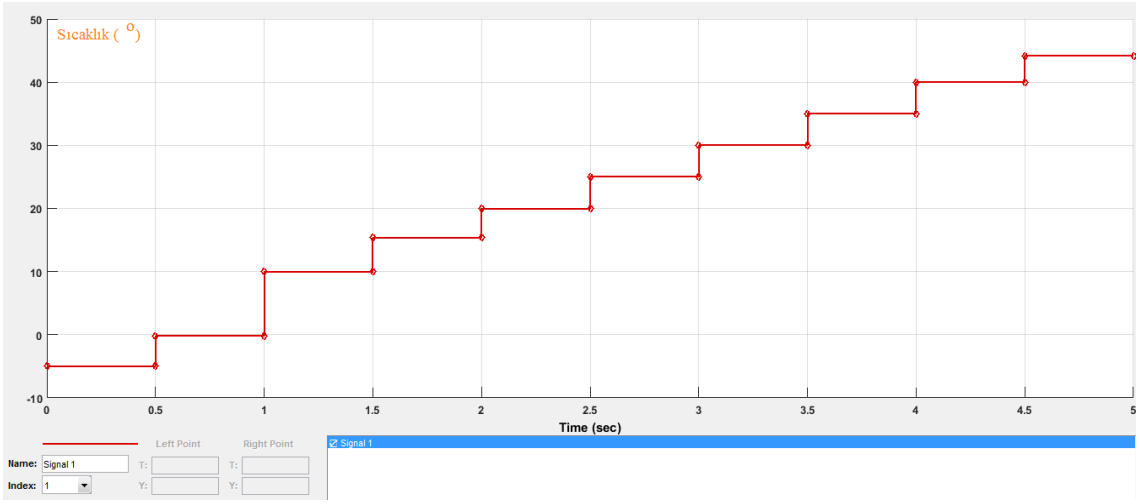

**Şekil 4.17.** Işıma Arttığında Şebeke Tarafında Gerilim Sinyali




**Şekil 4.18.** Işıma Arttığında Şebeke Tarafında Akım Sinyali

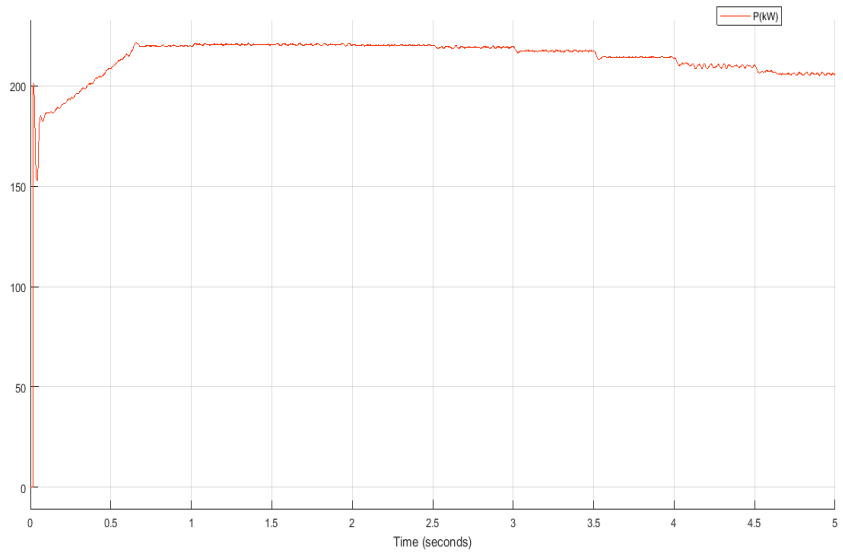
### 4.4. Harmoniklere Sıcaklık Etkisi:

Harmoniklere sıcaklık değişiminin etkisini incelemek üzere santral benzetiminde sabit ışıma değeri 1000 W/m$^2$ olarak alınmış sıcaklık değeri -5 – 45 $^0$C arasında Şekil 4.19'daki gibi her 0.5 saniyede bir değiştirilmiştir.




**Şekil 4.19.** Sıcaklığın -5 İle 45 Arasında Değişimi

Şekil 4.20.'de ortalama ışıma miktarı 1000 W/m$^2$'de sabit tutularak sıcaklık değeri değiştirildiğinde sistemden elde edilen güç ile şebekeye verilen güç miktarı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde yüksek sıcaklıkta üretilen güç miktarı azalmış ve sistemin performansı da azalmıştır.




**Şekil 4.20.** Sıcaklık Değiştirildiğinde Sistemin Ürettiği Güç

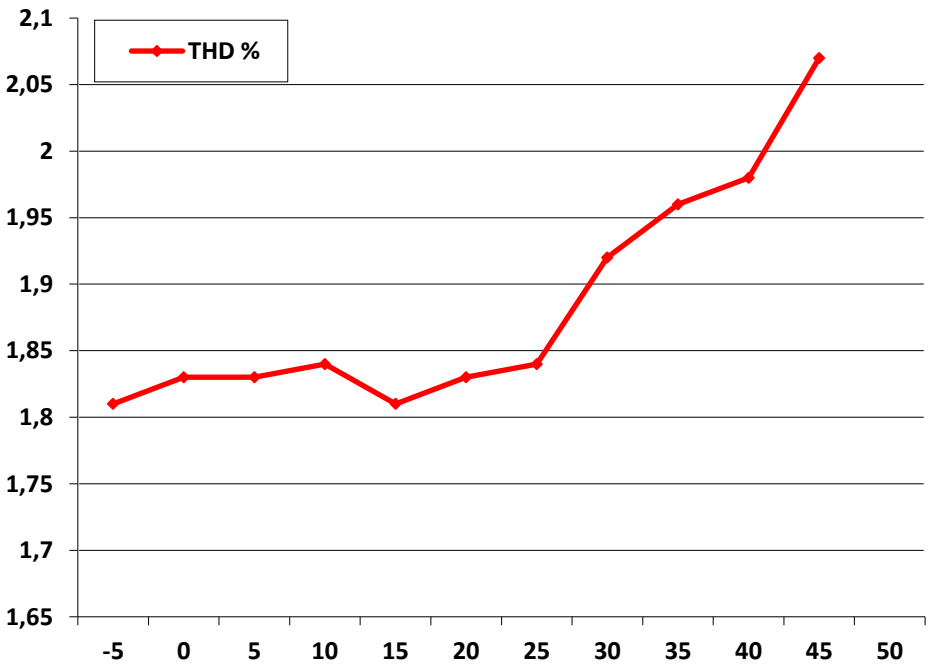
Şebeke tarafında gerilim ve akım dalgaların toplam harmonik bozulma faktörüne bakıldığında, Çizelge 4.5. ve Şekil 4.21'de gösterildiği gibi sıcaklık 25 $^0$C'ye kadar akımın toplam harmonik faktörü kabul edilen sınırlarda sabit kalmaktadır. 25 $^0$C'den daha fazla sıcaklıklarda akımın toplam harmonik bozulma faktörü hafif bir şekilde

artmaya başlamıştır. Ayrıca Şekil 4.22'de gerilim için toplam harmonik bozulma faktörünün sıcaklık değiştirildiğinde fazla etkilenmeyeceğini gösterilmiştir.

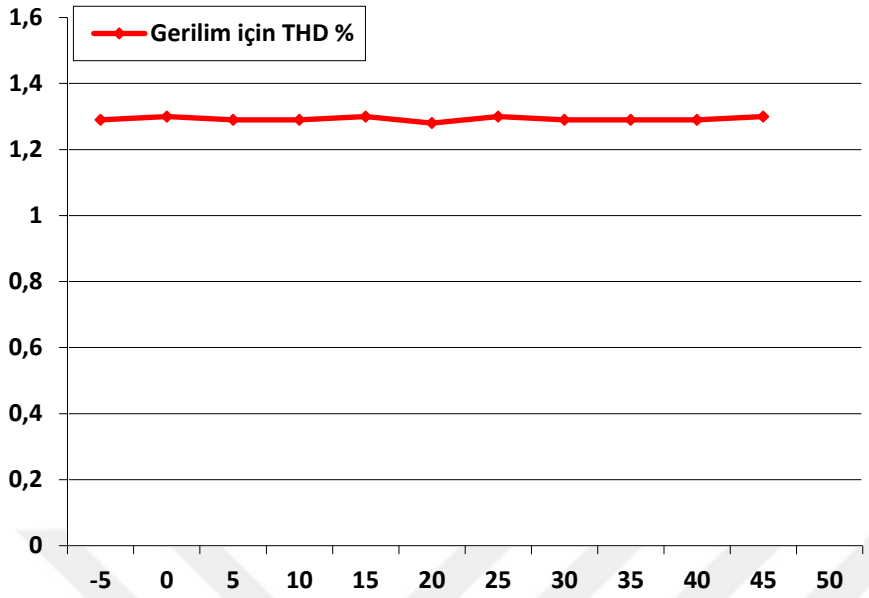
Çizelgedeki değerler incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %2.07, gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Sıcaklık değeri 25 $^0$C ulaştığında Akım THD %1,84 'ye ulaşmıştır. Sıcaklığın 35 $^0$C olması halinde ise akım için THD %1,96'ya çıkmaktadır. Gerilim THD'lerinin ise sıcaklık ile nerdeyse değişmediği gözlenmektedir.

**Çizelge 4.8.** Sıcaklık –THD İlişkisi

| Sıcaklık ( º) | Akım içim THD % | Gerilim için THD% |
|---|---|---|
| -5 | 1.81 | 1.29 |
| 0 | 1.83 | 1.30 |
| 5 | 1.83 | 1.29 |
| 10 | 1.84 | 1.29 |
| 15 | 1.81 | 1.3 |
| 20 | 1.83 | 1.28 |
| 25 | 1.84 | 1.3 |
| 30 | 1.92 | 1.29 |
| 35 | 1.96 | 1.29 |
| 40 | 1.98 | 1.29 |
| 45 | 2.07 | 1.3 |




**Şekil 4.21.** Sıcaklık – Akım için THD İlişkisi

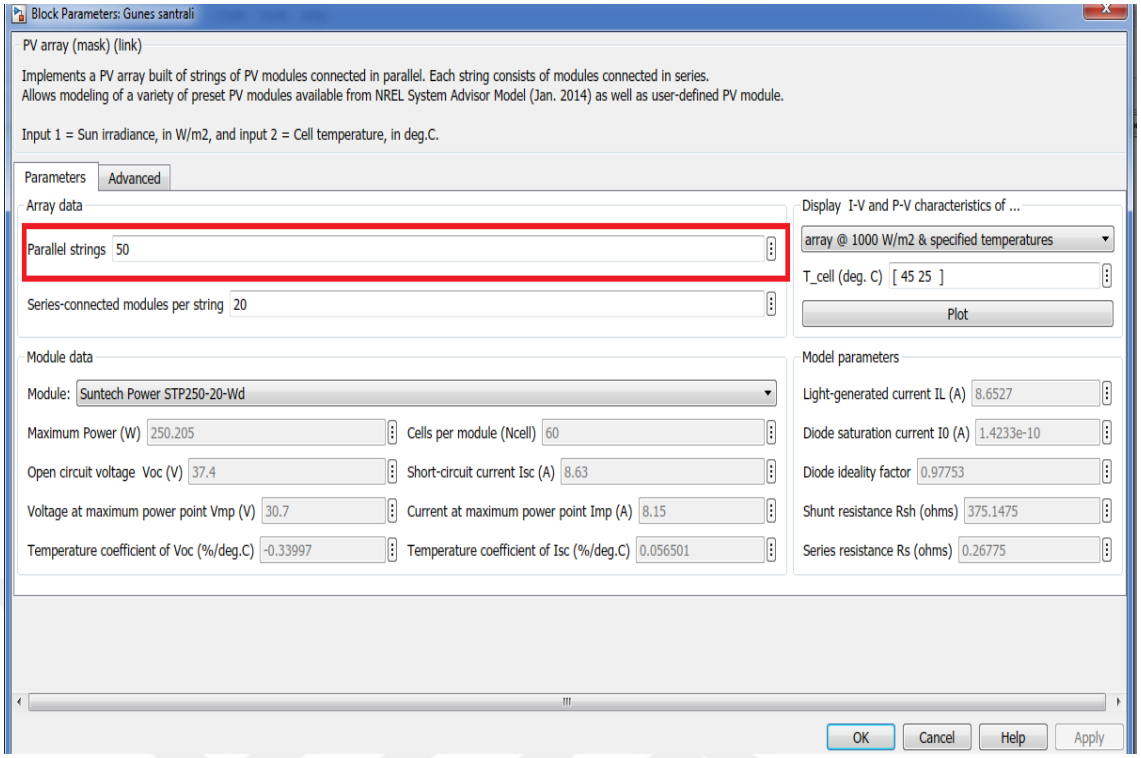



**Şekil 4.22.** Sıcaklık – Gerilim için THD İlişkisi

### 4.5. İdeal Koşullarda Harmoniklere PV Panel Sayısının Etkisi

Güneş enerji santrallerinde nominal güç fotovoltaik hücre sayısına bağlıdır. Fotovoltaik hücrelerin sayısı arttıkça sistemin nominal gücü de artar. Bu deneyde ideal koşullarda sıcaklık (25 $^0$C) ve ışıma (1000 W/m$^2$) değerleri sabit tutup benzetimde Fotovoltaik hücrelerin sayısı değiştirilmiştir ve bunun harmoniklere etkisi araştırılmıştır.

Benzetimde panel sayısını değiştirmek için ya paralel dizi ya da seri dizi sayısının değiştirilmesi gerekmektedir. Buna göre anma gücünün değeri de panel sayısı ile değişmektedir. Şekil 4.23'te ve Çizelge 4.9'da MATLAB benzetiminde panel sayısının nasıl değiştirileceği ve buna göre sistemin anma gücünün nasıl değiştiği gösterilmiştir.




**Şekil 4.23.** MATLAB Benzetimde Hücre Sayısının Değişimi

**Çizelge 4.9.** Dizi Sayısı Değiştirildiğinde Nominal Güç

| Paralel Dizi Sayısı | Seri Dizi Sayısı | PV santralin anma Gücü |
|---|---|---|
| 30 | 20 | 150 kW |
| 50 | 20 | 250 kW |
| 80 | 20 | 400 kW |
| 100 | 20 | 500 kW |
| 110 | 20 | 550 kW |
| 120 | 20 | 600 kW |
| 130 | 20 | 650 kW |

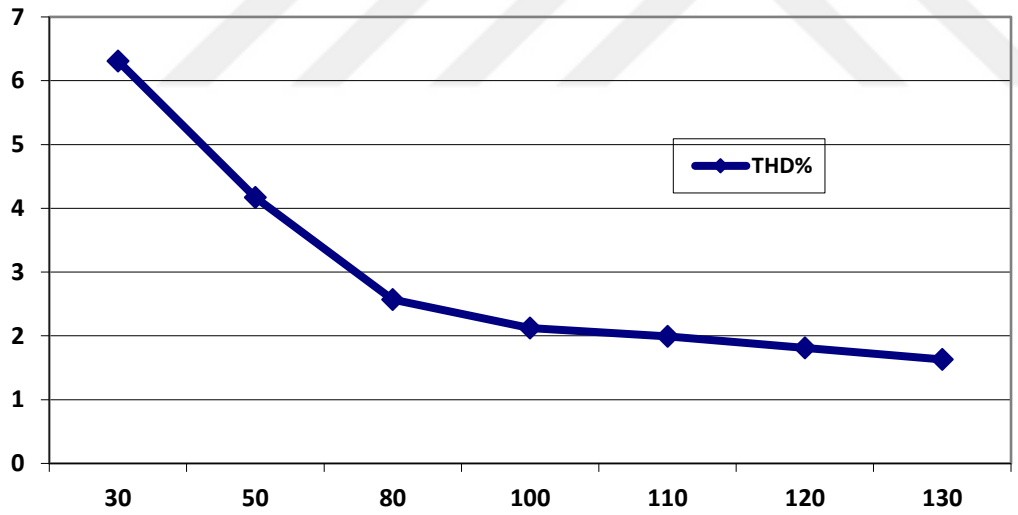
Benzetim sonucunda PV panel sayısı değiştirildiğinde akımın toplam harmonik faktörü Şekil 4.24. ve Çizelge 4.10 ‘daki gibi olmuştur. Çizelge 4.10 incelemesinde paralel dizi sayısı 30 olduğunda Akım için THD %7,25 değerine ulaşmıştır ve %5 kabul edilen sınırı aştığını görülmüştür. Ayrıca paralel dizi sayısı 130 olduğunda akım için THD %1,63’e inmiştir.

PV panel sayısı arttığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü azalmaya başlamıştır. Bunun nedeni transformatörünün anma gücünde çalışmadığı zaman

transformatörden gelen harmoniklerin artması ve toplam harmonik bozulma faktörünün buna bağlı olarak artmasıdır. Transformatör anma gücünde çalışmaya yaklaştığında transformatörün manyetik lineersizliğinden kaynaklanan harmonik etkiler azalmış ve bununla birlikte toplam harmonik bozulma faktörü de azalmaya başlamıştır.

**Çizelge 4.10.** PV Panel Sayısı – THD İlişkisi

| Paralel Dizi | PV Panelin Nominal Gücü | Akım için THD% |
|---|---|---|
| 30 | 150 kW | 7.25 |
| 50 | 250 kW | 4.17 |
| 80 | 400 kW | 2.57 |
| 100 | 500 kW | 2.12 |
| 110 | 550 kW | 1.99 |
| 120 | 600 kW | 1.98 |
| 130 | 650 kW | 1.63 |




**Şekil 4.24.** PV Hücre Sayısı – Akım THD İlişkisi

### 4.6. Filtre kullanılmaması halinde toplam harmonik bozulma faktörünün değişimi:

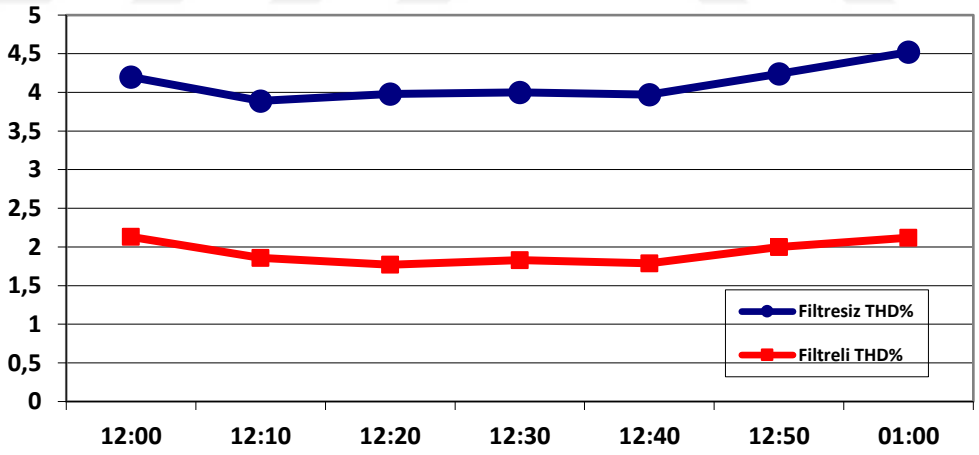
Saat 12:00 – 13:00 arası her 10 dakikada ölçülen ışıma ve sıcaklık ortalama değerlerinin benzetim modelinde kullanmasıyla, filtre kullanılması ve kullanılmaması durumlarında transformatör çıkışında akımın toplam harmonik bozulma faktörü incelenmiştir. Benzetim modelinde filtre olarak RC tipi alçak geçiren bir filtre kullanılmıştır. Filtre

parametreleri olarak aktif güç 2 kW ve reaktif güç 100kVAR olarak seçilmiştir. Şekil 4.25 ve Çizelge 4.11'de, saat 12:00 – 13:00 arasında filtre kullanıldığında ve filtre olmadığında toplam harmonik bozulma faktörünün nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.11'in incelemesinde filtre uygulanmadığı zaman akım için THD faktörünün değerleri % 3,97 ve %4,52 arasında değiştiği görülmüştür. Filtre kullandığında akım için THD faktörünün değerleri %1,77 ve % 2,13 arasında değişmiştir.

**Çizelge 4.11.** Saat 12:00 – 13:00 Arasında Filtreli ve Filtresiz Toplam Harmonik Bozulma Faktörü

| ZAMAN | FİLTRESİZ THD% | FİLTRELİ THD% | DEĞİŞİM % |
|---|---|---|---|
| 12:00 – 12:10 | 4.20 | 2.13 | 2.07 |
| 12:10 – 12:20 | 3.89 | 1.86 | 2.03 |
| 12:20 – 12:30 | 3.98 | 1.77 | 2.21 |
| 12:30 – 12:40 | 4.00 | 1.83 | 2.17 |
| 12:40 – 12:50 | 3.97 | 1.79 | 2.18 |
| 12:50 – 1:00 | 4.24 | 2.00 | 2.24 |
| 13:00 – 13:10 | 4.52 | 2.12 | 2.30 |




**Şekil 4.25.** Filtresiz ve Filtreli Sistemde Toplam Harmonik Bozulma Faktörünün Değişimi

Filtre kullanılmadığı zaman toplam harmonik bozulma faktörü kabul edilen %5 sınırına yaklaşmıştır. Buna karşılık filtre kullanıldığında toplam harmonik bozulma faktörü bu sınırından uzak kalmıştır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk olarak 1MW'lık fotovoltaik güneş enerji santrali MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetimi yapılarak harmonik etkiler elde edilmiştir. Yapılan benzetimden elde edilen sonuçlar, Diyarbakır'da bulunan 1MWp gücüne sahip olan gerçek bir güneş santralinden alınan harmonik verileriyle karşılaştırıldığında hata oranının akım THD için ortalama %4,2; gerilim THD için se ortalama %5,3 olduğu görülmüştür. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla harmoniklere etki eden parametreler araştırılmıştır.

İlk incelemede Güneş santralinin güç kalitesine ışıma etkisi ele alınmıştır. Işıma arttığı zaman sistemin ürettiği güç de artar ve çıkış gücü santralin nominal gücüne yaklaşır. Işıma değeri ideal ışıma değerine yaklaşınca güç kalitesi de iyileşmekte ve harmonik etkisi daha az olmaktadır.. Gerilim için toplam harmonik dağılımı ışıma değişimi ile birlikte çok değişmemekle birlikte akım için toplam harmonik dağılımı değişmektedir. Işıma değeri arttıkça santralin gücü anma gücüne yaklaşmakta ve akım için toplam harmonik bozulma faktörü de azalmaktadır. Bu incelemenin sonucunda THD-Işıma değişimi elde edilmiştir. Işıma 200 $W/m^2$ olduğunda akım için en büyük harmoniklerin 5. ve 7. Harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca ışıma 1000 $W/m^2$ olduğunda en büyük harmoniklerin 5. ve 13. Harmonikler olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %6,16; gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Işıma değeri 1000 $W/m^2$'ye ulaştığında akım için THD %1,82'ye düşmektedir. Elde edilen verilere bakıldığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü ışıma miktarı ve ile ters orantılıdır. Işıma miktarı arttığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü azalır ve akımın dalga şekli sinüzoidal şekline yaklaşır.

İkinci incelemede Güneş santralinde görülen harmoniklere sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, en büyük THD'nin akım için %2.07, gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Sıcaklık değeri 25 $^0C$ ulaştığında Akım THD %1,84 'ye ulaşmıştır. Sıcaklığın 35 $^0C$ olması halinde ise akım için THD %1,96'ya çıkmaktadır. Gerilim THD'lerinin ise sıcaklık ile neredeyse değişmediği gözlenmektedir. Toplam harmonik bozulma faktörü THD yaklaşık 25 $^0C$'ye kadar %1,83 değeri ile sabit kalmıştır ayrıca Sıcaklık 25 $^0C$'den daha fazla arttıkça toplam harmonik faktörünün değerleri hafif bir şekilde artmaya başlamıştır. 45 $^0C$ sıcaklıkta THD faktörü %2,07'ye kadar ulaşmıştır.

# 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan incelemede yüksek sıcaklıkta üretilen güç miktarı azalmış ve sistemin performansının da azaldığı görülmüştür. Normal sıcaklık değerlerinde harmonikler sıcaklıktan etkilenmemiştir. Ancak, belli sıcaklık değerinden sonra sıcaklık etkisi akım dalgasında görülmeye başlamıştır. Bu incelemenin Sonucu olarak; benzetimi yapılan bu sistemde Fotovoltaik güç kaynaklarının bağlanmasının harmonikler açısından, standart dışı bir bozucu etkisinin olmadığı söylenebilir.

Üçüncü incelemede sıcaklık ve ışıma değerleri ideal koşullarında sabit tutulup transformatör gücü değiştirilmeden güneş panellerinin sayısı değiştirilmiştir. PV panel sayısı arttığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü azalmaya başlamıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde paralel dizi sayısı 30 olduğunda akım için THD %7,25 değerine ulaşmıştır ve %5 kabul edilen sınırı aştığı görülmüştür. Ayrıca paralel dizi sayısı 130 olduğunda akım için THD %1,63'e inmiştir. Sonuçlar PV panel sayısı arttığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü azalmaya başladığını göstermektedir. Bunun nedeni transformatörünün anma gücünde çalışmadığı zaman transformatörden gelen harmoniklerin artması ve toplam harmonik bozulma faktörünün buna bağlı olarak artmasıdır. Transformatör anma gücünde çalışmaya yaklaştığında transformatörün manyetik lineersizliğinden kaynaklanan harmonik etkiler azalmış ve bununla birlikte toplam harmonik bozulma faktörü de azalmaya başlamıştır.

Son olarak harmonikleri azaltmak amacıyla kullanılan filtrelerin önemini ortaya çıkarmak için dördüncü bir inceleme yapılmıştır. İncelemenin sonucunda filtre kullanmadığımız zaman akım için toplam harmonik bozulma faktörü %4'e kadar artmıştır ve kabul edilen %5 sınırına çok yaklaşmıştır. Ancak filtre kullanıldığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü değeri %2 civarındadır ve kabul edilen sınırdan uzak kalmıştır.

Tüm bu incelemeler, güneş enerjisi santrallerinde eviricilerin kullanılması ve fotovoltaik panellerin karakteristikleri nedeniyle özellikle akım için toplam harmonik dağılımının ışıma ve sıcaklık değerlerine göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Düşük ışıma değerlerinde akım için toplam harmonik değerlerin arttığı ve izin verilen %5'lik sınır değerlere yaklaştığı görülmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerinin de akım için toplam harmonik değerlerinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan filtrelerin harmonikleri azaltmada etkin olduğu ve sınır değerlerden uzak kalmak için gerekli olduğu da ortaya çıkmıştır.

İleriki çalışmalarda ışıma, sıcaklık, harmonik ölçümlerinin yapıldığı bir tesiste farklı zaman dilimleri ve mevsimsel koşullarda daha detaylı bir inceleme yapılması mümkündür. Benzetim sonuçları ile karşılaştırılan gerçek ölçümler yardımıyla benzetim modelinin geliştirilmesi ve güvenirliği artırılmış bir model ile çok farklı koşullar için çalışmanın tekrarlanması da olasıdır. Bunun yanında farklı evirici modellerinin ve farklı evirici kontrol metotlarının harmonikler üzerindeki etkisi de ayrıntılı olarak incelenebilir. Yapılabilecek çalışmalardan birisi de farklı filtre türlerinin harmonikler üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması olabilecektir.

# 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

## 6. KAYNAKLAR

Ajder, A. 2011. Fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri için optimum eğim açısının hesaplanması. DoktoraTezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Istanbul.

Akdeniz, E. 2006. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin şebekenin enerji kalitesi ve kararlılığına etkilerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Anto, R., Jose, J. 2014. Performance analysis of a 100kw solar photovoltaic power plant. In 2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD) (pp. 1-4). IEEE.

Bellini, A., Bifaretti, S., Iacovone, V., Cornaro, C. 2009. Simplified model of a photovoltaic module. In 2009 Applied Electronics (pp. 47-51). IEEE.

Bouzguenda, M., Al Omair, A., Al Naeem, A., Al-Muthaffar, M., Wazir, O. B. 2014. Design of an off-grid 2 kW solar PV system. In 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) (pp. 1-6). IEEE.

Çelebi, A., Çolak, M. 2005. Şebekeye Bağlı Fotovoltaik sistemlerde oluşan harmoniklerin şebekeye etkileri.

ÇELİKKAYA, A. 2018. Dünyada Yenilenebilir Enerji Yatırımlarına Sağlanan Vergi Teşviklerinin Değerlendirilmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 20(1), 357-384.

Dinçer, F. 2011. Türkiye'de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli-Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme. Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 14(1).

Du, Y., Lu, D. D. C. 2018. Harmonic Distortion Caused by Single-Phase Grid-Connected PV Inverter. In Power System Harmonics-Analysis, Effects and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement. IntechOpen.

Enerji Atlası .Erişim: [https://www.enerjiatlasi.com/gunes-enerjisi-haritasi/diyarbakir]. Erişim tarihi 15 haziran 2019 .

## 6. KAYNAKLAR


Eylem, Ö. N. A. L., Yarbay, R. Z. 2010. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli ve geleceği. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(18), 77-60.

Fıratoğlu, Z. A., Yeşilata, B. 2003. Lineer Elektriksel Yüke Bağlı Pv Panellerin Optimizasyonu ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Journal of Aeronautics and Space Technologies, 1(1), 65-72.

Haydaroglu, C., Gumus, B. , Kılıç, H., 2017. Investigation and Comparison of Solar Power Plant Simulation Programs.International Conference "Fundamental and Applied Problems of Physics, 2017. Özbekistan

Haydaroglu, C., Gumus, B., Kaçmaz, C , Yıldız, E., 2016. The Sımulation Of Photovoltaic Solar Power Plants Through Thebluesol Software And An Investigation On The Accuracy Ofsimulation Results.INESEC 2016, International Engineering, Science and Education Conference,2016, Diyarbakır, pp.186-192.

Haydaroğlu, C., Gümüş, B. 2017. Investigation of the effect of short term environmental contamination on energy production in photovoltaic panels: Dicle University solar power plant example. Applied Solar Energy, 53(1), 31-34.

Hong, S., Zuercher-Martinson, M. 2010. Harmonics and noise in photovoltaic (pv) inverter and the mitigation strategies. Solaria Renewables.

İbrahim, S. E. F. A., Altın, N. 2009. Güneş Pili ile Beslenen Şebeke Etkileşimli Eviriciler—Genel Bir Bakış. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(3).

Kandemir, Ç., Bayrak, M. 2015. Fotovoltaik Sistemler Şebekeye Bağlı Olduğunda Oluşan Sorunlar.

Koç, E., Şenel, M. C. 2013. Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme. Mühendis ve Makina, 54(639), 32-44.

Kumara, S., Ariastina, G., Sukerayasa, W., Giriantari. D.,2013.1 MWp Grid Connected PV Systems in the Village of Kayubihi Bali; Review on Location ' s Characteristics and Its Technical Specifications.

Moazzenzadeh, M., Şekerci, H. 2015. Güneş Enerji Sistemlerinin Elektrik Şebekesi Güç Kalitesine Harmonik ve Ara-Harmonik Açısından Etkisinin İncelenmesi.

Overett, J. S. 2017. Assessment of the harmonic behaviour of a utility-scale photovoltaic plant (Doctoral dissertation).

Rao, P. J. B., Srikanth, B. 2016. Harmonic Reduction in Grid Connected Solar PV System By Using SVPWM Technique. International Journal of Applied Engineering Research, 11(6), 3853-3858.

Rashid, M. H. (Ed.). 2017. Power electronics handbook. Butterworth-Heinemann.

Samarreh, A. 2012. Ürdün ulusal elektrik şebekesinin güç kalitesi açısından incelemesi.

Schlabbach, J., Gross, A. 2007. Harmonic current emission of photovoltaic inverters. In 19th Int. Conf. On Electricity Distribution (CIRED 2007), Vienna, Austria.

Simsek, B., Bizkevelci, E. Fotovoltaik güneş elektrik santrallerinin alçak gerilim şebekesine bağlantı esasları. In Proc. 3rd The National Electrical Installation of Congress And Exhibition 2013 (pp. 1-24).

Turhan, S., Çetiner, İ. 2012. Fotovoltaik sistemlerde performans değerlendirmesi. Ulusal Çatı, Cephe Sempozyumu, 12-13.

Vasanasong, E., Spooner, E. D. 2000. The effect of net harmonic currents produced by numbers of the Sydney Olympic Village's PV systems on the power quality of local electrical network. In PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 00EX409) (Vol. 2, pp. 1001-1006). IEEE.

YILMAZ, M. 2012. Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi, 4(2), 33-54.

# 6. KAYNAKLAR

## ÖZGEÇMİŞ:

**Kimlik Bilgileri**

Adı Soyadı : Emre NEDİMOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi : ŞAM 1989

Medeni Hali : Evli

E posta : wesamshagory66@hotmail.com

Adresi : Hirka-I Şerif Mah. Öztan Sk. No:4

**Eğitim**

Lisans : Şam Üniversitesi Elektrik Mühendisliği 2012

Yüksek Lisans : Dicle Üniversitesi

**Yabancı Dil Düzeyi**

Arapça – Ana dil, İngilizce - İleri Düzey

**İş Deneyimi**

- 2012-2013 Şam'daki Elektrik Dağıtım Şirketi – Süriye.
- 2013-2014 Plaza Metal Endüstrisi – Mısır.

# DİCLE ÜNİVERSİTESİ
# FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
# TEZ İNTİHAL FORMU

| ÖĞRENCİ BİLGİLERİ | |
|---|---|
| **ADI VE SOYADI** | Emre Nedimoğlu |
| **ÖĞRENCİ NO** | 15805004 |
| **EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI** | 2018-2019 |
| **YARIYIL** | ☐ Güz ☒ Bahar |
| **ANABİLİM DALI** | Elektrik Elektronik Mühendisliği |
| **PROGRAM** | Yüksek Lisans / |
| **TEZ KONUSU** | Şebekeye Bağlı Güneş Enerjisi Santrallerinin Harmonik Etkilerinin Araştırılması |
| **İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ** | |
| **RAPOR TÜRÜ** | Tez Savunma Sınavı Sonrası |
| **SAYFA SAYISI** | 77 |
| **BENZERLİK ORANI** | %14 |
| **RAPORLAMA TARİHİ** | 26/07/ 2019 |

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 77 sayfalık kısmına ilişkin, 26/07/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin*.adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %14 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

**Emre NEDİMOĞLU**

26/07/2019

| | |
|---|---|
| Doç.Dr. Bilal GÜMÜŞ<br>**Tez Danışmanı**<br>26/07/2019 | Doç.Dr. Bilal GÜMÜŞ<br>**Anabilim Dalı Başkanı**<br>26/07/2019 |

**Formdaki bilgiler bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersiz sayılmaktadır.**