

**T.C.**  
**ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**POLİKRİSTAL TÜR BİR FOTOVOLTAİK PANELİN I-V  
KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİTİK MODELLENMESİ VE  
DENEYSEL VALİDASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FATİH KOÇ**

**BOLU, AĞUSTOS - 2018**

**T.C.**  
**ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**POLİKRİSTAL TÜR BİR FOTOVOLTAİK PANELİN I-V  
KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİTİK MODELLENMESİ VE  
DENEYSEL VALİDASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FATİH KOÇ**

**BOLU, AĞUSTOS - 2018**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

FATİH KOÇ tarafından hazırlanan "POLİKİKRİSTAL TÜR BİR FOTOVOLTAİK PANELİN I-V KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİTİK MODELLENMESİ VE DENEYSEL VALİDASYONU" adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 09/08/2018 tarihinde ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

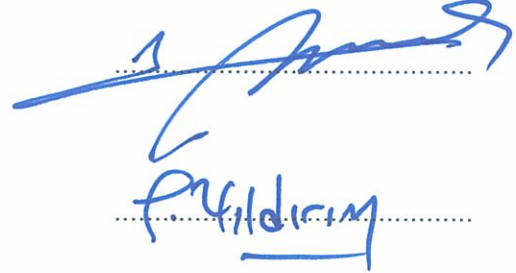
### Jüri Üyeleri

Danışman  
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK  
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye  
Prof. Dr. Vahdet UÇAR  
Sakarya Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Gürcan YILDIRIM  
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

### İmza



Mezuniyet Tarihi :

Doç. Dr. Ömer ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



**Aileme,**

## ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

FATİH KOÇ



## ÖZET

### POLİKRIŞTAL TÜR BİR FOTOVOLTAİK PANELİN I-V KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİTİK MODELLENMESİ VE DENEYSEL VALİDASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATİH KOÇ

ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ NACİ ÇELİK)

BOLU, AĞUSTOS - 2018

Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren enerji dönüşüm sistemleridir. Bu çalışmada 40°42'52.2''K, 31°31'29.8''D koordinatlarında kurulu bulunan 36 hücreli polikristal tür bir güneş paneli, çeşitli sensörler ve veri kaydedici cihazlar kullanılarak hazırlanan deney düzeneği temelinde; i) Güneş ışınım şiddetinin fotovoltaik panel üzerindeki etkisinin incelenmesi, ii) fotovoltaik panelin akım-voltaj karakteristiğinin incelenmesi, iii) fotovoltaik panelden elde edilen akım-voltaj eğrilerinin literatürdeki modeller ile karşılaştırılması ve validasyonu amaçlanmıştır.

Söz konusu fotovoltaik panel için farklı güneş ışınım şiddetinde ve farklı sıcaklıklarda ölçülen akım-voltaj karakteristikleri; 4-değişkenli, 5-değişkenli, geliştirilmiş 4-değişkenli ve 2-diyotlu model olmak üzere toplam 4 farklı analitik model kullanılarak modellenmiş ve doğrulanmıştır. Akım-voltaj ilişkisini tanımlayan analitik denklemler Visual Basic programlama dili kullanılarak çözümlenmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar ile ölçülen değerler arasındaki karşılaştırma  $R^2$  ve  $RMSE$  olmak üzere 2 istatistiksel parametre üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların istatistiksel analizi; bu tez kapsamında kullanılan 4 farklı model içerisinde, geliştirilmiş 4-değişkenli modelin diğer modellere göre daha başarılı tahmin sonuçlarına yol açtığını göstermektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Fotovoltaik Hücre, Fotovoltaik Modelleme, I-V Eğrisi, 4-Değişkenli Model, 5-Değişkenli Model, 2-Diyotlu Model, Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model

## **ABSTRACT**

### **ANALYTICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE I-V CHARACTERISTICS OF A POLYCRISTALLINE TYPE OF PHOTOVOLTAIC PANEL**

**MSC THESIS**

**FATİH KOÇ**

**ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF  
NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ NACİ ÇELİK)**

**BOLU, AUGUST 2018**

Photovoltaic cells are energy conversion systems that convert the electromagnetic energy coming from the sun to electrical energy. In this study, based on an experimental facility, incorporating a polycrystalline photovoltaic panel made up of 36 cells, various sensors and a data logger device, located at the coordinates of 40°42'52.2"N, 31°31'29.8"E, the followings are aimed; i) investigation of the effect of solar radiation intensity on the photovoltaic panel, ii) investigation of the current-voltage characteristics of the photovoltaic panel, and iii) comparison of the current-voltage curves measured from the photovoltaic panel with those obtained from the models available in the literature and thus validation.

The current-voltage characteristics of the photovoltaic panel measured at different solar radiation and temperature levels have presently been modelled and validated using a total of 4 different analytical models namely, 4-parameter, 5-parameter, improved 4-parameter and 2-diode models. The equations defining the current-voltage relationship have been solved using Visual Basic programming language. The comparison between the results obtained from the solutions of the models and those measured has been made based on the statistical parameters of  $R^2$  and  $RMSE$ . The statistical analysis of the results obtained has shown that amongst the 4 different models used in the present thesis, the improved 4-parameter model leads to better estimation results than the other models used.

**KEYWORDS:** Photovoltaic Cell, Photovoltaic Modelling, I-V curve, 4-Parameter Model, 5-Parameter Model, 2-Diode Model, Improved 4-Parameter Model

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Güneş Sistemi.....	1
1.2 Dünya ve Enerji.....	2
1.3 Türkiye'nin Enerji Yapısı.....	3
1.4 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	7
<b>2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER</b> .....	<b>9</b>
2.1 Fotovoltaik Sistemin Tarihi.....	9
2.2 Fotovoltaik Hücre Nedir? .....	10
2.3 Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensipleri .....	10
2.4 Fotovoltaik Hücrelerin Çeşitleri .....	12
2.4.1 Birinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler .....	12
2.4.2 İkinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler .....	13
2.4.3 Üçüncü Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler.....	14
2.5 Fotovoltaik Hücrelerin Gelişim Süreçleri ve Verimlilikleri.....	14
<b>3. FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN MODELLENMESİ</b> .....	<b>17</b>
3.1 Literatür Taraması .....	17
3.2 Işınım Şiddetinin I-V Eğrisi Üzerindeki Etkisi .....	20
3.3 Hücre Sıcaklığının I-V Eğrisi Üzerindeki Etkisi.....	21
3.4 Mevcutta Kullanılan Modeller .....	23
3.4.1 4-Değişkenli Model .....	23
3.4.2 5-Değişkenli Model .....	25
3.4.3 Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model .....	27
3.4.4 2-Diyotlu Model .....	30
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>32</b>
4.1 4-Değişkenli Modelin İncelenmesi .....	36
4.2 5-Değişkenli Modelin İncelenmesi .....	37
4.3 Geliştirilmiş 4-Değişkenli Modelin İncelenmesi .....	38
4.4 2-Diyotlu Modelin İncelenmesi.....	39
4.5 Modellerin doğrulanması .....	39



<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>59</b>
5.1 Işınım Şiddetinin Etkisi .....	60
5.2 Sıcaklığın Etkisi .....	61
5.2.1 Öneriler .....	61
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>63</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>68</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1. Güneş Sistemi .....	1
Şekil 1.2. Enerji Kaynakları (Koç and Şenel, 2013).....	2
Şekil 1.3. Türkiye’de Kurulu Gücün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ,2017)..	4
Şekil 1.4. 2017 Yılı Türkiye’nin Kurulu Gücü (TEİAŞ,2017) .....	4
Şekil 1.5. Türkiye’nin Elektrik Üretimi (TEİAŞ, 2017).....	5
Şekil 1.6. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretiminin Yıllara Göre Değişimi (TEİAŞ,2017).....	6
Şekil 1.7. Dünya Birincil Enerji Tüketim Sıralaması (Factbook).....	6
Şekil 1.8. Türkiye Üzerine Düşen Küresel Işınım Şiddeti (SOLARGIST) .....	8
Şekil 2.1. Vanguard 1 (National Air and Space Museum) .....	9
Şekil 2.2. Fotovoltaik Hücre .....	10
Şekil 2.3. Fotovoltaik Hücre Yapısı.....	11
Şekil 2.4. Fotovoltaik Hücrelerin Bağlanması.....	11
Şekil 2.5. Fotovoltaik Hücrelerin Devrede Kullanılması .....	12
Şekil 2.6. Monokristal Fotovoltaik Hücre (solda), Polikristal Fotovoltaik Hücre (sağda) .....	13
Şekil 2.7. İnce Film Fotovoltaik Hücre.....	13
Şekil 2.8. Organik Fotovoltaik Hücre .....	14
Şekil 2.9. Willoughby Smith’in Çizdiği Basit Fotovoltaik Düzenek .....	14
Şekil 2.10. Bell Labaratuvarında Fotovoltaik Hücre Çalışması .....	15
Şekil 2.11. Fotovoltaik Hücrelerin Yıllara Göre Verimliliği (NREL, 2013)....	16
Şekil 3.1. Basitleştirilmiş Eşdeğer Fotovoltaik Hücre Devresi.....	17
Şekil 3.2. Işınım Şiddetinin Fotovoltaik Hücre Üzerinde Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi.....	20
Şekil 3.3. Işınım Şiddetinin Fotovoltaik Hücrenin Güç Değerlerine Etkisi .....	21
Şekil 3.4. Sıcaklığın Fotovoltaik Hücre Üzerinde Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi.....	22
Şekil 3.5. Sıcaklığın Fotovoltaik Hücrenin Güç Değerlerine Etkisi .....	22
Şekil 3.6. 4-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Devresi.....	23
Şekil 3.7. 5-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Devresi.....	25
Şekil 3.8. Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.....	27
Şekil 3.9. 2-Diyotlu Model İçin Eşdeğer Elektrik Devresi .....	30
Şekil 4.1. Fotovoltaik Deney Düzenegi .....	33
Şekil 4.2. Fotovoltaik Panel .....	34
Şekil 4.3. Piranometreler.....	34
Şekil 4.4. Ingenieurbüro Mini-KLA I-V Eğrisi Analiz Cihazı .....	35
Şekil 4.5. 396 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 24°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	41
Şekil 4.6. 396 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 24°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	42
Şekil 4.7. 402 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	42
Şekil 4.8. 402 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	43
Şekil 4.9. 670 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 40°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	44
Şekil 4.10. 670 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 40°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	45

<b>Şekil 4.11.</b> 694 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 37°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	45
<b>Şekil 4.12.</b> 694 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 37°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	46
<b>Şekil 4.13.</b> 786 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 42°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	47
<b>Şekil 4.14.</b> 786 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 42°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	48
<b>Şekil 4.15.</b> 806 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 35°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	49
<b>Şekil 4.16.</b> 806 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 35°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	50
<b>Şekil 4.17.</b> 897 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	51
<b>Şekil 4.18.</b> 897 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	51
<b>Şekil 4.19.</b> 906 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 43°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	52
<b>Şekil 4.20.</b> 906 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 43°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	53
<b>Şekil 4.21.</b> 1066 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 46°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	54
<b>Şekil 4.22.</b> 1066 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 46°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	55
<b>Şekil 4.23.</b> 1095 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 34°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.....	56
<b>Şekil 4.24.</b> 1095 W/m <sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 34°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.....	57
<b>Şekil 5.1.</b> Işınım Şiddeti Etkisinin I-V Grafiği Üzerinde Gösterimi.....	60
<b>Şekil 5.2.</b> Sıcaklığın Etkisinin I-V Grafiği Üzerinde Gösterimi.....	61

# ÇİZELGE LİSTESİ

## Sayfa

<b>Tablo 1.1.</b> Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı .....	7
<b>Tablo 3.1.</b> $\beta_1$ , $\beta_2$ , $\gamma^1$ ve $\gamma^2$ parametrelerinin denk geldiği koşullar .....	29
<b>Tablo 4.1.</b> Modellerde Kabul Edilen Referans Değerler .....	32
<b>Tablo 4.2.</b> Fotovoltaik Panel Üzerinden I-V Eğrisi Analiz Cihazı ile Ölçülen Anlık Değerler .....	35
<b>Tablo 4.3.</b> Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde 4-değişkenli Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri .....	36
<b>Tablo 4.4.</b> Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde 5-değişkenli Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri .....	37
<b>Tablo 4.5.</b> Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde Geliştirilmiş 4-değişkenli Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri....	38
<b>Tablo 4.6.</b> Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde 2-diyotlu Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri .....	39
<b>Tablo 4.7.</b> Fotovoltaik Eşdeğer Elektrik Devresi Modellemeleri ile Ölçümler Arasındaki $R^2$ Değerleri .....	57
<b>Tablo 4.8.</b> Fotovoltaik Eşdeğer Elektrik Devresi Modellemeleri ile Ölçümler Arasındaki $RMSE$ Değerleri .....	58
<b>Tablo 5.1.</b> Hesaplanan Modellerin İstatistiksel Değerlerinin Ortalaması .....	59

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

$\alpha$	: Modifiye Edilmiş Diyot İdealite Faktörü; $\alpha=mV_t$
$G$	: Işınım Şiddeti
$I$	: Akım
$I_L$	: Işık Akımı
$I_0$	: Ters Doyma Akımı
$I_{sc}$	: Kısa Devre Akımı
$I_m$	: Maksimum Güç Noktasındaki Akım
$k$	: Boltzmann Sabiti ( $1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
$m$	: İdealite Faktörü; $m=N_s n_1$
$\mu_{Isc}$	: Kısa Devre Akımı Sıcaklık Katsayısı
$\mu_{Voc}$	: Açık Devre Gerilimi Sıcaklık Katsayısı
$N_s$	: Seri Bağlı Fotovoltaik Hücre Sayısı
$n_1$	: Diyot İdealite Faktörü
$n_2$	: Diyot İdealite Faktörü
$\eta$	: Verim
$P$	: Güç
$q$	: Elektron Yüğü ( $1,602 \times 10^{-19}$ C)
$R_s$	: Seri Direnç
$R_{so}$	: Kısa Devre Akım Noktasının Eğiminin Karşılığı
$R_{sh}$	: Paralel Direnç
$R_{sho}$	: Açık Devre Gerilim Noktasının Eğiminin Karşılığı
$T$	: Sıcaklık
$V$	: Gerilim
$V_{oc}$	: Açık Devre Gerilimi
$V_m$	: Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim
$V_t$	: Termal Gerilim
$C$	: Coloumb
$^{\circ}C$	: Celcius Derece
$FF$	: Fill Faktör
$GW$	: Giga-watt
$GWh$	: Giga-watt saat

<b>J</b>	: Joule
<b>K</b>	: Kelvin Derece
<b>kW</b>	: Kilo-watt
<b>kWh</b>	: Kilo-watt saat
<b>MW</b>	: Mega-watt
<b>MWh</b>	: Mega-watt saat
<b>W</b>	: Watt



## TEŞEKKÜR

Bu tez ile ilgili yaptığım çalışmalarım tamamı boyunca desteğini esirgemeyen, hoşgörölü ve mütevazi yaklaşımı, bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK'e teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında karşılaştığım zorluklarda yardımcı olan Prof. Dr. Fatih EVRENDİLEK ve Doç. Dr. Bahadır ALTINTAŐ'a teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımda, hem deney sisteminin kurulumu hem de deneyler sürecinde yardımcı olan çalışma arkadaşım Ersal GEZER'e teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında arkadaşlarımın birçoğu bu konuda bana yardımcı oldu. Hepinize minnettarım. Ayrıca bu aşamada her zaman yanımda olan Erhan ÇİMEN'e desteklerinden ve yardımlarından dolayı minnettarım.

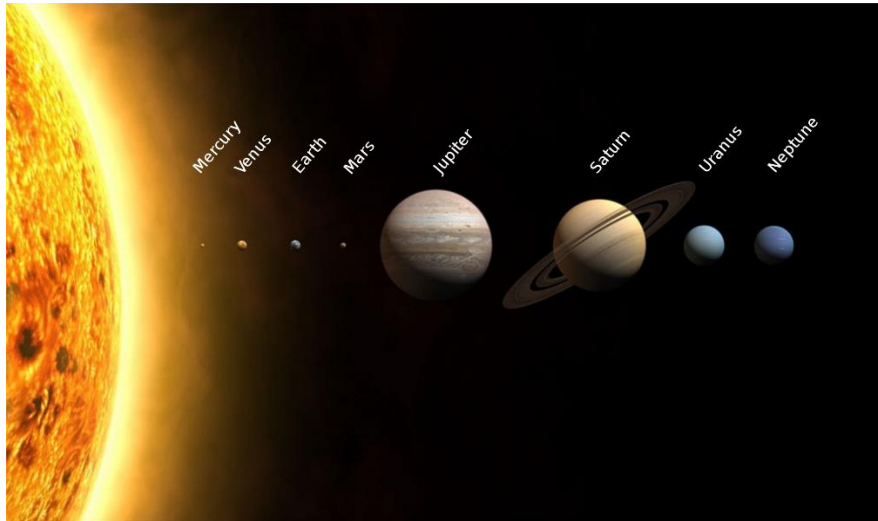
Son olarak, tez çalışmam esnasında her zaman arkamda durarak desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen aileme minnettarım. Bu çalışmalarım onlar olmadan mümkün olamazdı.

# 1. GİRİŞ

Enerji, direkt olarak ölçülemeyen ama dolaylı olarak konuma bağlı olarak hesaplanabilen sistemin korunmuş ve yaygın bir özelliğidir. Kısaca anlatmak gerekirse, sistemin iş yapabilme kapasitesidir (Lehrman, 1973). Enerji, potansiyel ve kinetik enerji olarak iki ana kategoride sınıflandırılır ve sistem içerisinde bulunan bu enerjiler birbirlerine dönüşebilir. Evrende enerji; kimyasal enerji, ışık enerjisi, ses enerjisi, nükleer enerji, mekanik enerji, manyetik enerji gibi enerjinin türevleri olan birçok farklı formda bulunabilir.

## 1.1 Güneş Sistemi

Güneş sistemi, merkezinde G2 tipinde bir sarı cüce yıldızın (Godier and Rozelot, 2000) bulunduğu ve yörüngesinde sekiz gezegen ve onların yüzlerce uydusuyla ve milyarlarca küçük gök cisiminden oluşan sistemin bütünüdür (Mars and Saturn, 1981). Güneş, sistemin enerji kaynağı olarak görülmekte ve sistemin ihtiyacı olan enerjiyi sağlamaktadır. Yayıdığı bu enerji Güneş'in yapısının yaklaşık %75'ini oluşturan hidrojen çekirdeklerinin füzyon reaksiyonu ile helyuma dönüşmesinden kaynaklanır (Bahcall, 1989; Thoul vd., 1993).



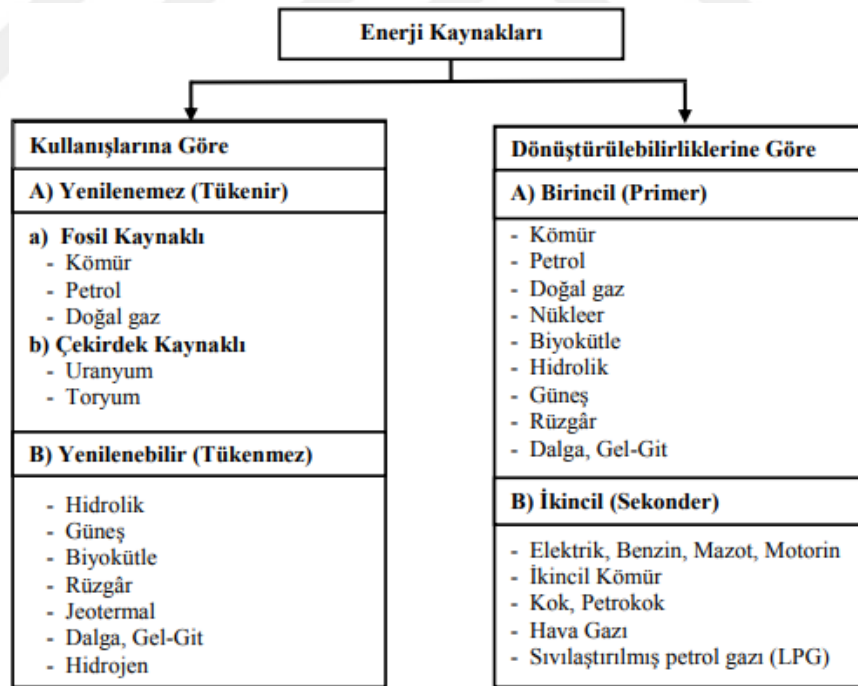
**Şekil 1.1.** Güneş Sistemi.



## 1.2 Dünya ve Enerji

Güneş sisteminde, merkezden yaklaşık 149.000.000 kilometre uzaklıkta Güneş'e en yakın üçüncü gezegen olan Dünya'nın bundan yaklaşık 4,5 milyar yıl önce oluşmaya başladığı düşünülmektedir. Geçen zaman içerisinde Dünya, yoğun göktaşı bombardımanı, diğer gezegen ve yıldızların kütle çekimleri, kendi içyapısında oluşan karasal hareketler, buzullar gibi çeşitli etkenlere maruz kalarak günümüzdeki halini almıştır. Dünya, temel olarak su küre, hava küre, taş küre, ateş küre ve çekirdek olmak üzere beş farklı katmandan oluşur (Jordan, 1979).

Dünya üzerinde geçen zamanla birlikte canlılar gelişmeye başlamış ve uygun ortam şartlarına sahip türlerin popülasyonlarında hızlı bir artış olmuştur. Dünya üzerinde ilk modern insanlarda bundan yaklaşık 90.000 yıl önce ortaya çıkmışlardır (Henshilwood vd., 2003). Dünya üzerindeki enerji başlangıçta insanlar için yeterli olurken nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, yeni icatlar gibi sebepler insanları yeni enerji kaynakları bulmaya zorlamıştır (Doğanay, 1998).



Şekil 1.2. Enerji Kaynakları (Koç and Şenel, 2013).

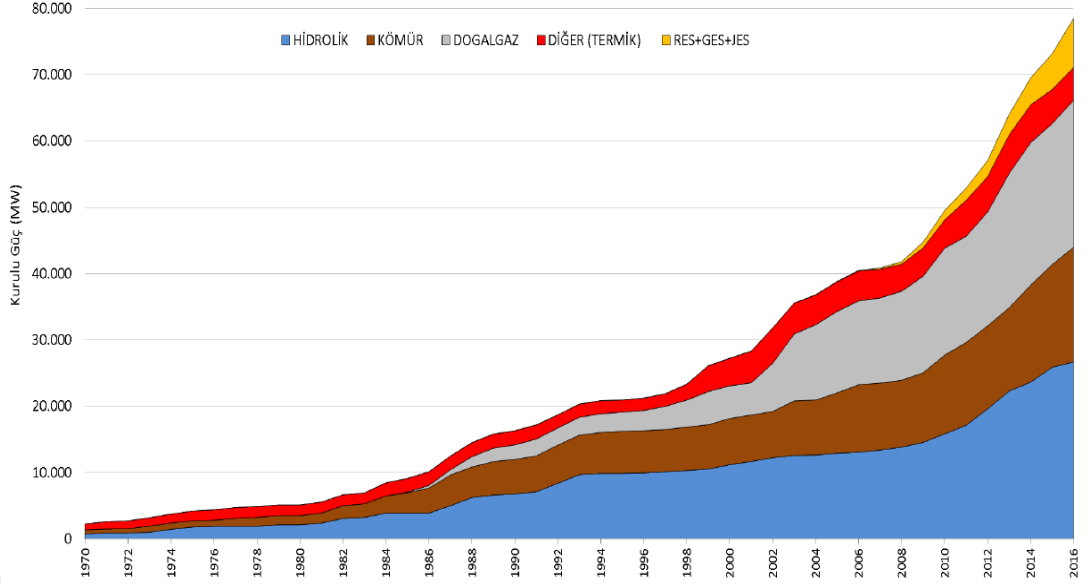
Dünya üzerindeki kaynaklar farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Kullanışlarına göre sınıflandırılan enerji kaynakları; yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları

olarak ikiye ayrılır (Şekil 1.2). Bunlardan yenilenemez olan enerji kaynakları zamanla tükenirken yenilenebilir enerji kaynaklarında ise böyle bir durum söz konusu değildir. Dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırdığımız enerji kaynakları; birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak ikiye ayrılır. Birincil enerji kaynakları doğada saf olarak bulunurken ikincil enerji kaynakları ise daha çok fosil enerji kaynaklarından elde edilen enerji kaynağı türevleridir (Koç and Şenel, 2013).

Dünya üzerinde bilinen fosil enerji rezervlerine bakıldığında; petrolde 54 yıl, doğalgazda 64 yıl, kömürde 112 yıl yetecek düzeyde enerji rezervleri mevcuttur (Petroleum, 2012). Tüketimde ise, 2011 yılı verilerine bakıldığında dünya üzerinde birincil enerji kullanım miktarının 12276,6 milyon ton petrol eşdeğeri enerji olduğu görülmektedir. Bu tüketimde en büyük paya sahip olan birincil enerji kaynağı %33,1 ile petroldür. Petrol ile birlikte %30,3 ile kömür ve %23,7 oran ile doğalgaz Dünya üzerinde tüketilen enerji kaynakları içerisinde büyük bir paya sahiptir. %6,4 oranında hidrolik, %4,9 oranında nükleer ve %1,6 oranında yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgâr, güneş, biyoyakıt ve jeotermal) Dünya üzerinde tüketilen enerji kaynaklarıdır. Dünya üzerindeki kurulu güce bakıldığında ise elektrik enerjisinin %41'inin kömür, %21'inin doğalgaz, %16'sının hidroelektrik, %14'ünün nükleer, %6'sının petrol ve %2'sinin de yenilenebilir esaslı santrallerden üretildiği görülmektedir (Koç and Şenel, 2013).

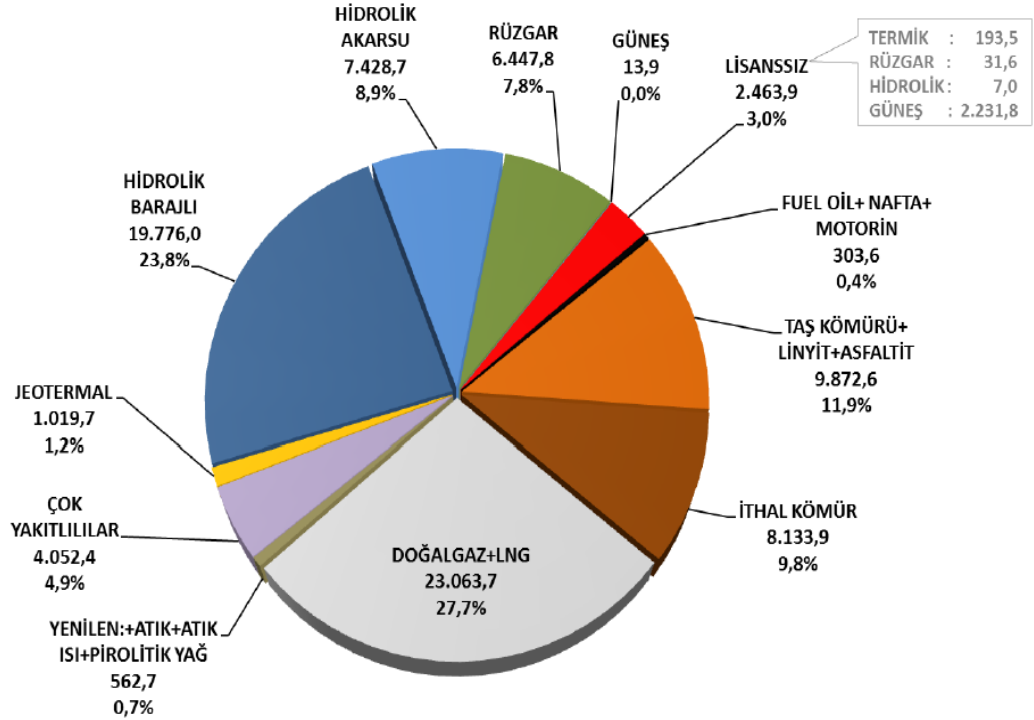
### **1.3 Türkiye'nin Enerji Yapısı**

Gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye'de artan nüfus ve gelişen teknolojiler ile enerji ihtiyacı da zamanla artmaktadır. Türkiye, ihtiyacı olan bu enerjiyi düşük kaliteli olmasına rağmen linyit, taşkömürü, petrol, doğalgaz gibi fosil kaynaklardan ve hidroelektrik, biyomas, jeotermal, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlamaktadır (Yılmaz, 2012).



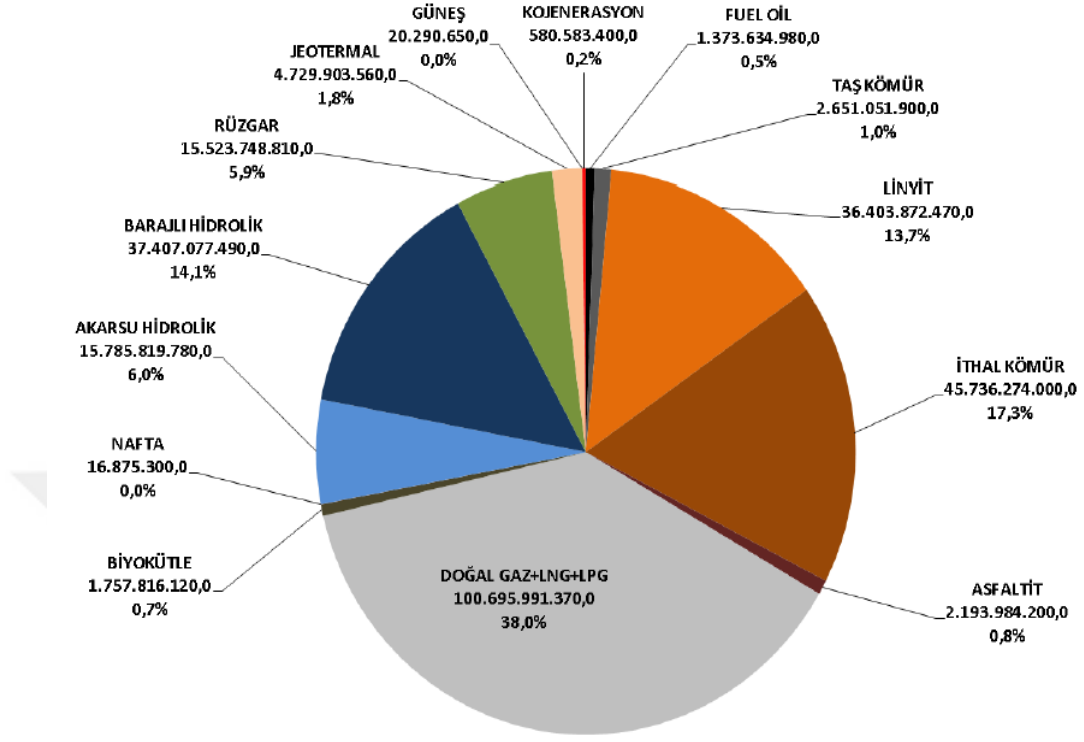
**Şekil 1.3.** Türkiye’de Kurulu Gücün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ,2017).

Gelişen sanayi ve ilerleyen teknolojiyle birlikte Türkiye, enerji ihtiyacını karşılamak için çeşitli enerji kaynakları arayışlarına girmiş ve yatırımlar yaparak kurulu gücünü hızlı bir şekilde arttırmıştır (Şekil 1.3). 2016 yılı Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerine göre Türkiye’nin kurulu gücü yaklaşık olarak 78,500 MW kapasiteye ulaşmıştır.



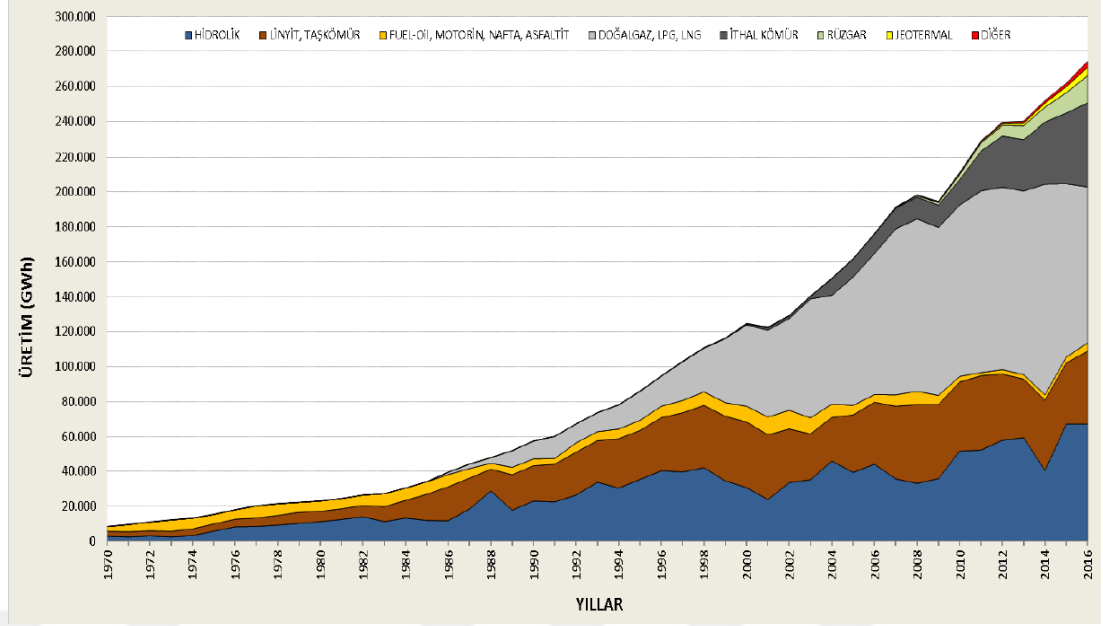
**Şekil 1.4.** 2017 Yılı Türkiye’nin Kurulu Gücü (TEİAŞ,2017).

2017 yılı TEİAŞ verilerine göre Türkiye'nin kurulu gücü 83,138 MW'a ulaşmıştır (Şekil 1.4). Bu verilere lisanssız üreticiler dahil edilmemiştir.



Şekil 1.5. Türkiye'nin Elektrik Üretimi (TEİAŞ, 2017).

2017 yılı TEİAŞ verilerine göre, tüketilen elektrik enerjisi miktarı 264,38 milyar kWh olarak hesaplanmış ve buna karşılık lisanssız üretimler hariç 264,88 milyar kWh elektrik enerjisi üretilmiştir (Şekil 1.5).



Şekil 1.6. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretiminin Yıllara Göre Değişimi (TEİAŞ,2017).

ÜLKE	2013	2014	2015	Dünya Toplamındaki Payı (%)	Sıra
Çin	2.903,9	2.970,3	3014,0	22,9%	1
ABD	2.271,7	2.300,5	2.280,6	17,3%	2
Hindistan	626,0	666,2	700,5	5,3%	3
Rusya	688,0	689,8	666,8	5,1%	4
Japonya	465,8	453,9	448,5	3,4%	5
Kanada	335,0	335,5	329,9	2,5%	6
Almanya	325,8	311,9	320,6	2,4%	7
Brezilya	290,0	297,6	292,8	2,2%	8
Güney Kore	270,9	273,1	276,9	2,1%	9
İran	247,6	260,8	267,2	2,0%	10
Suudi Arabistan	237,4	252,4	264,0	2,0%	11
Fransa	247,4	237,5	239,0	1,8%	12
Endonezya	175,0	188,3	195,6	1,5%	13
Birleşik Krallık	201,4	188,9	191,2	1,5%	14
Meksika	188,9	190,0	185,0	1,4%	15
İtalya	155,7	146,8	151,7	1,2%	16
İspanya	134,2	132,1	134,4	1,0%	17
Avustralya	130,7	129,9	131,4	1,0%	18
<b>Türkiye</b>	<b>120,3</b>	<b>123,9</b>	<b>129,3</b>	<b>1,0%</b>	<b>19</b>
Tayland	120,3	123,4	124,9	0,9%	20
Güney Afrika	124,6	128,0	124,2	0,9%	21
Tayvan	109,9	111,4	110,7	0,8%	22
BAE	97,2	99,0	103,9	0,8%	23
Polonya	96,0	92,4	95,0	0,7%	24
Ukrayna	114,7	101,0	85,1	0,6%	25
<b>TOPLAM</b>	<b>12.873,1</b>	<b>13.020,6</b>	<b>13.147,3</b>	<b>100,0%</b>	

Şekil 1.7. Dünya Birincil Enerji Tüketim Sıralaması (Factbook).

Dünya üzerindeki toplam enerji tüketimine bakıldığında zaman, toplam tüketimin %1’lik bir kısmının Türkiye’de gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer Türkiye’yi ülkeler bazında enerji tüketiminde 19. sıraya yerleştirmektedir (MMO, 2012).

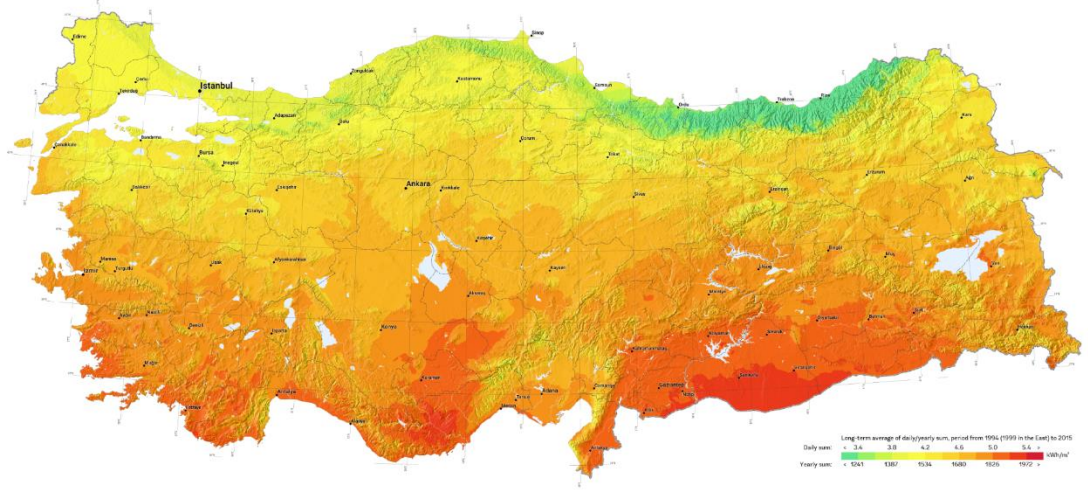
#### 1.4 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Dünya üzerinde 36°-42° kuzey enlemleri ile 26°-45° doğu boylamları arasında yer alan Türkiye, birçok ülkeye göre güneş enerjisi potansiyeli açısından şanslı bir konumda yer almaktadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün 1966 ve 1982 yılları arasında yaptığı çalışmalardan yola çıkılarak, Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin yaptığı çalışmalar Türkiye'de ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2640 saat olduğunu göstermektedir (Varınca and Gönüllü, 2006).

**Tablo 1.1.** Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı

Bölge	Toplam ortalama güneş enerjisi	En çok güneş enerjisi (Haziran)	En Az güneş enerjisi (Aralık)	Ortalama güneşlenme süresi	En çok güneşlenme süresi (Haziran)	En az güneşlenme süresi (Aralık)
	kWh/m <sup>2</sup> -yıl	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	saat/yıl	saat	saat
Güneydoğu Anadolu	1.460	1.980	729	2.993	407	126
Akdeniz	1.390	1.869	476	2.956	360	101
Doğu Anadolu	1.365	1.863	431	2.664	371	96
İç Anadolu	1.314	1.855	412	2.628	381	98
Ege	1.304	1.723	420	2.738	373	165
Marmara	1.168	1.529	345	2.409	351	87
Karadeniz	1.120	1.315	409	1.971	273	82

Tablo 1.1'de görüldüğü üzere, Türkiye'nin coğrafi bölgelerine bakıldığında, en uzun güneşlenme süresinin Güneydoğu Anadolu ile Akdeniz Bölgeleri'nde olduğu görülmektedir (Kurtçu vd., 2009). Türkiye üzerine düşen ortalama toplam yıllık güneş enerjisi ise 1303 kWh/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 1.8.** Türkiye Üzerine Düşen Küresel Işınım Şiddeti (SOLARGIST).

Şekil 1.8 dikkate alındığında, Türkiye üzerine düşen yıllık toplam güneş enerjisinin Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Akdeniz Bölgesi ve Ege Bölgesinin güney kesimlerinde oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye'nin kuzey kesimlerine düşen ışınım miktarının düşük olması nedeniyle, Karadeniz Bölgesi'nin potansiyelinin göreceli olarak düşük olduğu değerlendirilebilir. Onun dışında kalan bölgelere baktığımızda yıllık ortalama güneş enerjisi potansiyelinin en az 1100 kWh/m<sup>2</sup> olduğu görülmektedir.

## 2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik sözcüğü, Yunanca'da ışık anlamında kullanılan phos kelimesinin ve elektrik denildiğinde akla ilk gelen bilim insanlarından olan Alessandro Volta'nın icat ettiği ve voltaik pili olarak adlandırdığı kelimelerin birleşmesiyle ortaya çıkmıştır.

### 2.1 Fotovoltaik Sistemin Tarihi

Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel 1839 yılında ışığın elektrolit içerisindeki elektronlar arasındaki gerilime etkisini fark etti ve ilk fotovoltaik olayını gözlemlemiş oldu. 1876 yılında silisyum kristallerinin bulunmasıyla birlikte, William G. Adams ve Richard E. Day katı cisimlerde de fotovoltaik etkisinin olduğunu gözlemledi. Ancak, fotovoltaik etkinin tam olarak açıklanması ilk kez 1905 yılında Albert Einstein tarafından yapıldı ve bu çalışmaları ona 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü getirdi. 1954 yıllarına gelindiğinde ise teknolojinin gelişmesiyle birlikte Darly Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson tarafından silisyumdan yapılan fotovoltaik modülün verimi %6 olarak ölçülmüş ve bu gelişme fotovoltaik hücreler için dönüm noktası olarak kabul edilmiştir. İlk fotovoltaik sistem, o dönemde hızla gelişmekte olan uzay teknolojisinde kullanılmış ve ilk teknik uygulama da "Vanguard 1" uydusunda yer almıştır (Şekil 2.1). 1973 yılında ortaya çıkan petrol kriziyle birlikte fotovoltaik piller üzerinde büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Geçen zamanla birlikte, çevre bilincinin artması ile fotovoltaik pillere olan ilgi de giderek artmıştır.



Şekil 2.1. Vanguard 1 (National Air and Space Museum).



## 2.2 Fotovoltaik Hücre Nedir?

Yarı iletken bir diyot olarak çalışan fotovoltaik hücreler, üzerlerine düşen ışığın taşıdığı enerjiyi doğrudan elektrik akımına dönüştüren araçlardır (Green, 1982). Fotovoltaik hücreler, yarı iletken olan silisyumun üzerine, iletken çubukların ve onlardan daha ince olan parmakların plakaya basılmasıyla elde edilir (Şekil 2.2).

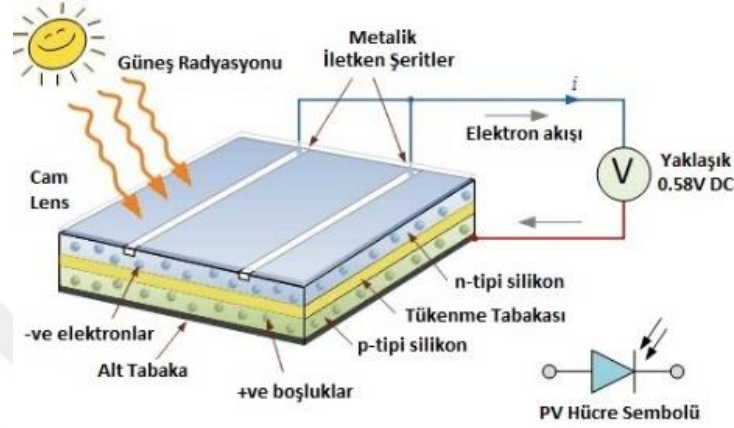


Şekil 2.2. Fotovoltaik Hücre.

## 2.3 Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensibi

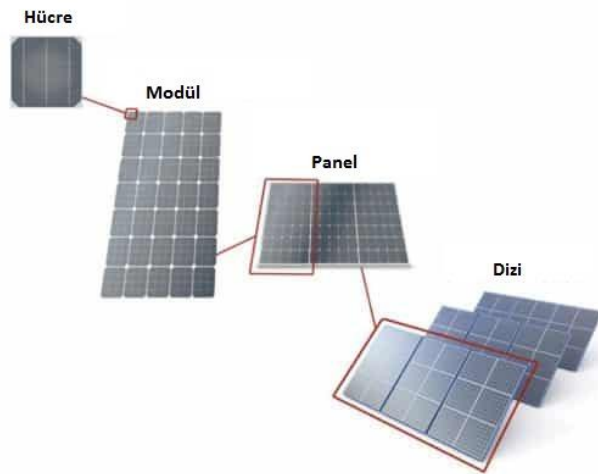
Fotovoltaik hücrelerin çalışmasının temelinde yarı iletken malzemeler bulunur. Bu malzemeler arasında en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir. Bu yarı iletken malzemelerden elektrik akımı elde etmek için döküm kristalin içerisine başka malzemenin atomları eklenerek p-tipi veya n-tipi yarı iletken yapılar elde edilir (Altaş, 1998). Örnek olarak, silisyumun atom numarası 14'tür ve valans bandındaki değerlik elektron sayısı 4'tür. Eriyik haldeki silisyum içerisine kontrollü bir şekilde periyodik tablonun 5A grubu elementlerinden bir tanesini eklediğimizde değerliklik elektron sayısı 5 olduğundan, atomun dışarda kalan 1 elektronu yapıya verilir. Bu şekilde, n-tipi bir yarı iletken malzeme elde edilmiş olur. Benzer bir şekilde, eriyik haldeki silisyum içerisine 3A grubu elementlerinden birini eklediğimizde, değerliklik elektron sayısı 3 olduğu için silisyumla reaksiyona girdiğinde 1 elektron eksik kalmaktadır. Bu eksik kalan elektron yerlerine de boşluk adı verilmektedir. Bu şekilde, p-tipi bir yarı iletken

malzeme elde edilmiş olur (Rauschenbach, 2012). Elde edilen bu n-tipi ve p-tipi plakalar bir araya getirilmek suretiyle fotovoltaik hücreler elde edilir (Şekil 2.3). N-tipi plakanın üzerine düşen güneş ışığı, plakada fazladan bulunan 1 elektrona gereken enerjiyi verdiği için elektron p-tipi plakaya sıçrama yapar. Bunu yaparken de devrede doğru akım meydana gelir.



**Şekil 2.3.** Fotovoltaik Hücre Yapısı.

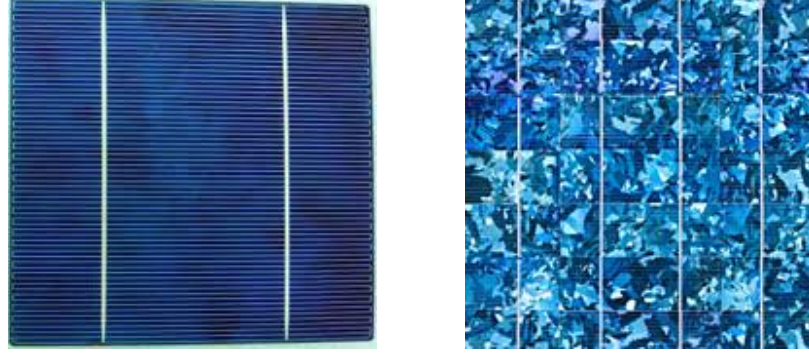
Üretilen bu hücrelerin gücü devreden geçen akımla orantılı olarak değişmektedir. Bu akımı arttırabilmek için fotovoltaik yapıdaki elektron ve boşluk sayılarını arttırmak gerekir. Bu da yüzey alanının arttırılmasıyla gerçekleşmektedir. Üretilen hücreler birbirlerine lehimlerle bağlanarak fotovoltaik modüller, modüller birbirlerine bağlanarak paneller, panellerde birbirlerine bağlanarak fotovoltaik diziler elde edilir (Şekil 2.4). Böylece, elde edilen güç arttırılmış olur.



**Şekil 2.4.** Fotovoltaik Hücrelerin Bağlanması.



miktar düşmesine sebep olmaktadır (Şekil 2.6). Ancak monokristal fotovoltaik hücrelere kıyasla üretimindeki kolaylık ve maliyetinin düşük olması tasarımlarda bu tip hücrelere yönelimin artmasına neden olmaktadır.



**Şekil 2.6.** Monokristal Fotovoltaik Hücre (solda), Polikristal Fotovoltaik Hücre (sağda).

#### **2.4.2 İkinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler**

İnce film güneş hücreleri diye adlandırılan bu fotovoltaik hücreler daha çok çatı uygulamaları için imal edilmiştir. Esnek yapıda üretildikleri için bazı tasarımlar bükülebilirler. Diğer hücrelere göre üstünlüğü, kolay taşınabilir ve kurulabilir olmasıdır. Ancak verimleri düşüktür (Şekil 2.7). İnce film fotovoltaik hücrelerde, ışığın daha geniş bant aralığında faydalandığı için kapalı havalarda birinci jenerasyonlara göre verimleri bir miktar daha yüksektir. Bu tip bazı hücreler kızıl ötesi ışık altında bile elektrik akımı verebilmektedir.



**Şekil 2.7.** İnce Film Fotovoltaik Hücre.

### 2.4.3 Üçüncü Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler

Organik fotovoltaik hücre olarak adlandırılan üçüncü jenerasyon fotovoltaik hücrelerde amaç hücrenin üst yüzeyini aktif polimer tabaka ile kaplayarak, güneşten gelen ışığın hücre üzerindeki katmanda mümkün olduğunca fazla absorbe edilmesini amaçlamaktır (Waldauf vd., 2004). Birkaç katman kullanılarak üretilen bu hücrelerde optik geçirgenlik ve maksimum verimin sağlanabilmesi için bütün katmanların kristal yapıları birbiriyle uyumlu olmalıdır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Organik Fotovoltaik Hücre.

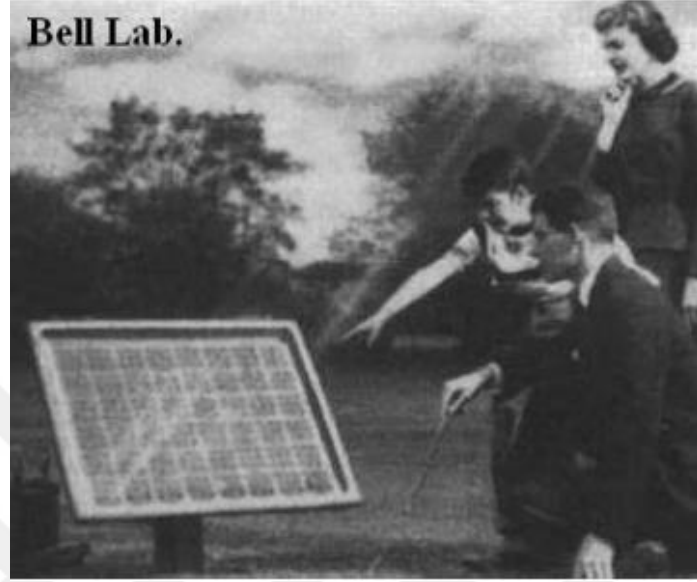
### 2.5 Fotovoltaik Hücrelerin Gelişim Süreçleri ve Verimlilikleri

1836 yılında Alexander Edmond Becquerel'in platin tabakalar üzerinde deneyler sırasında fotovoltaik etkiyi gözlemlemesinin ardından 1873 yılında Willoughby Smith selenyum içerisindeki fotoiletkenliği keşfederek ilk düzeneği oluşturdu (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Willoughby Smith'in Çizdiği Basit Fotovoltaik Düzenek.

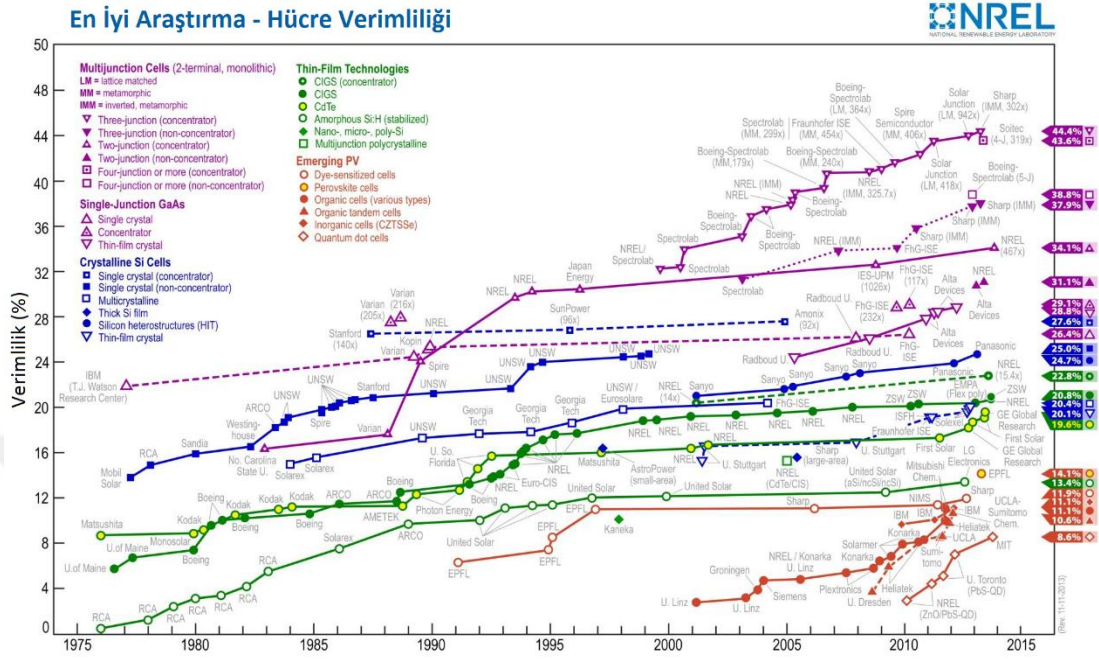
1883 yılına ise Charles Fritts'in selenyum kullanarak geliştirdiği fotovoltaik hücrelerin verimleri %1 olarak hesaplandı. 1954 yılında ise gelişen teknoloji ile birlikte Bell Laboratuvarında üretilen silisyum fotovoltaik hücrelerin verimleri %6 seviyesine ulaştı (Şekil 2.10).



**Şekil 2.10.** Bell Laboratuvarında Fotovoltaik Hücre Çalışması.

1957 yılında, Hoffman Elektronik isimli firma silisyum fotovoltaik hücreleri geliştirerek verimlerini %8 değerine çıkarmayı başardı. Aynı firma, bir sene sonra hücreleri daha da geliştirerek verimi %9 seviyesine taşıdı. Fotovoltaik hücrelerdeki bu gelişim hücrelerin güvenilir bir enerji kaynağı olarak görülmesini sağladı ve aynı yıl uzay biliminde ilerleyen birkaç yıl içinde de havacılık biliminde kullanılmaya başlandı. 1960 yılında aynı firma, %14 verimde silisyum fotovoltaik hücre geliştirdi. 1970'li yılların sonuna doğru dünyada ortaya çıkan enerji krizi fotovoltaik hücreler üzerinde yapılan araştırma ve geliştirmelerin artmasını sağladı. 1985 yılında New South Wales Üniversitesinde yapılan araştırmalarda verimliliği %20 olan silisyum fotovoltaik hücreler üretildi. 2000, 2002 ve 2005 yıllarında sırasıyla %20, %26 ve %28 verimliliğinde üç eklemlili hücreler üretildi. 2006 yılında Spectrolab isimli şirket üç eklemlili hücreler üzerinde yaptığı geliştirmelerle verimliliği %40 düzeyine çıkarmayı başardı. 2008 yılında ise Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarında (NREL) yapılan çalışmalar sonucunda üretilen üç eklemlili hücrelerin verimliliğinin %40,8 olarak açıklamasıyla, fotovoltaik hücrelerin verimliliği alanında yeni bir dünya rekoru kırılmış oldu. Ancak, bu çok fazla sürmedi. 2009 yılında Spectrolab

şirketinin çalışmaları sonucunda üç eklemli fotovoltaik hücrelerde verim %41,6 seviyesine yükseldi ve bu alandaki rekorun yeniden sahibi oldu.



**Şekil 2.11.** Fotovoltaik Hücrelerin Yıllara Göre Verimliliği (NREL, 2013).

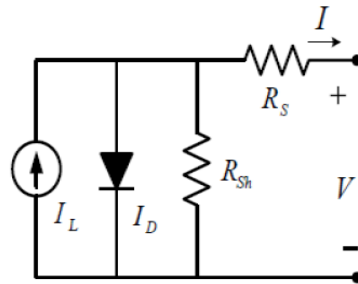
Şekil 2.11’de verilen grafikte çeşitli yapıdaki fotovoltaik hücrelerin gelişim süreçleri görülmektedir. Günümüzde gelişen teknoloji, yeni hammadde kaynaklarının bulunması, dünya üzerinde hızla tükenen fosil enerji kaynakları nedeniyle yeni enerji kaynakları arayışı, insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmekte ve bunların en bilinenlerinden bir tanesi olan fotovoltaik hücreler üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmalarının artmasını sağlamaktadır. Fotovoltaik hücrelerin verimlerinin giderek artması ve seri üretime geçilmesi ile maliyetlerinin azalmasıyla birlikte de kullanım alanları genişlemektedir.

### 3. FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN MODELLENMESİ

#### 3.1 Literatür Taraması

Fotovoltaik sistemlerin performans ve verimliliklerinin tahmin edilmesi ve güç dönüştürücü ile fotovoltaik diziler arasındaki etkileşimin incelenmesi için hızlı ve güvenilir bir simülasyon fotovoltaik sistem tasarımı için vazgeçilmez bir unsurdur (Chin vd., 2015). Bu doğrultuda, fotovoltaik sistemler için kullanılan simülasyonların en önemli bileşenlerini ise fotovoltaik hücrenin çalışma koşullarında ölçülen I-V eğrisine uyum sağlayan fotovoltaik hücre modeli oluşturmaktadır. Fotovoltaik modelleme ve parametre tahminlerine ilişkin bilimsel yayınlar oldukça fazladır ve dergi, konferans, sınıflandırılmış ve sınıflandırılmamış birçok belgede görmek mümkündür. Yıllar boyunca temel diyot modelinden başlayarak,  $R_s$  modelleme,  $R_{sh}$  modelleme ve iki ve üç diyotlu modellemeye kadar birçok farklı model önerilmiştir (Khanna vd., 2015; Brano vd., 2010).

Günümüzde en çok kullanılan, doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenlerden oluşan modelleme yaklaşımı olan eşdeğer elektrik devresi ve onun matematiksel modeli sırası ile Şekil 3.1 ve Denklem 3.1'de verilmektedir (Rahim vd., 2013). Eşdeğer elektrik devresi modelinin kullanılmasının başlıca avantajı, Matlab, PSpice, Visual Basic, C gibi programlama dillerinde kullanılabilirliğidir. Eşdeğer elektrik devresini kullanmayan farklı fotovoltaik modelleme teknikleri de vardır (Marion vd., 2004; Hishikawa vd., 2000). Ancak, bu modelleme yöntemleri fotovoltaik simülasyonları tarafından benimsenmemiştir.



**Şekil 3.1.** Basitleştirilmiş Eşdeğer Fotovoltaik Hücre Devresi.



Şekil 3.1’de gösterilen devre şemasında eşdeğer fotovoltaiik hücre devresi, bir akım kaynağı, akım kaynağına paralel olarak bağlanmış bir diyot ve seri olarak bağlanmış bir direnç olarak sembolize edilmiştir. Güneş ışımınınin yokluğunda, hücre basit bir p-n bağlantılı diyot gibi davranır. Diyot akımı, literatürde iyi bilinen ve diyot akımını ifade eden Shockley denklemleriyle tanımlanmaktadır (Ramos Hernanz vd., 2010). Bu eşdeğer fotovoltaiik hücre devresi matematiksel olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir (Toprak vd., 2016).

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3.1.)$$

$I$  = Yük Akımı (A)

$I_L$  = Işık Akımı (A)

$I_0$  = Ters Doyma Akımı (A)

$V$  = Gerilim (V)

$R_s$  = Seri Direnç ( $\Omega$ )

$R_{sh}$  = Paralel Direnç ( $\Omega$ )

$\alpha$  = Modifiye Edilmiş Diyot İdealite Faktörü (V)

Fotovoltaiik hücrelerde, yukarıdaki denklemde belirtilen diyot ters doyma akımı ( $I_0$ ), diyotun mutlak sıcaklığı, diyotun gerilimi ve yük tarafından çekilen akımın fonksiyonu olarak değişkenlik gösterir (Ozcalık vd., 2013). Yukarıdaki denklem içerisinde yer alan modifiye edilmiş diyot idealite faktörü ( $\alpha$ ) ise, mutlak sıcaklık ve diyot idealite faktörüne göre değişkenlik göstermektedir.

$$\alpha = \frac{nkTN_s}{q} \quad (3.2.)$$

Yukarıdaki denklemde belirtilen modifiye edilmiş diyot idealite faktörünü hesaplariken,  $n$  diyot idealite faktörünü sembolize etmektedir. Bu parametre ideal diyotlarda 1 olarak kabul edilirken gerçek tipik diyotlarda ise 1 ve 2 arasında kabul edilir.  $k$  ile sembolize edilen Boltzmann sabitidir ve değeri  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K’dir.  $T$  mutlak sıcaklığı ifade eder ve birimi kelvin’dir.  $N_s$  panel üzerinde bulunan seri bağlı hücre sayısını ifade eder.  $q$  ise elektron yükünü sembolize etmektedir ve değeri  $1,602 \times 10^{-19}$  coloumb’dur.

En genel ifadesi ile fotovoltaik hücrelerin matematiksel modelleri, hücrenin akım ve gerilim değerleri arasındaki ilişkiyi hücre üzerine düşen ışınım şiddeti ve hücrenin yüzey sıcaklığı ile ilişkilendirmektedir.

Fotovoltaik modelleri kullanmak için devre parametrelerinin değerleri belirlenmelidir. Bunun için kullanılan en pratik yaklaşım panel üreticilerinin sunmuş olduğu veri sayfalarındaki bilgileri kullanarak bu değerleri tahmin etmektir. Denklemler, kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç noktasındaki akım ve gerilim değeri gibi temel noktalardan türetilerek oluşturulmuştur. Bununla birlikte seri ve paralel dirençleri hesaplamak için açık devre ve kısa devre koşullarında eğimlerin karşılıklı olarak kullanılması ve maksimum güç noktasındaki eğimin sıfıra eşit olduğu bilgisi doğrultusunda yeni denklemlerin türetilmesi için türev fonksiyonları da kullanılabilir (Xiao vd., 2004; Ulapane vd., 2011). Bazı durumlarda parametrelerin anlık olarak hesaplanması için açık devre sıcaklık katsayısı ve kısa devre sıcaklık katsayısı için analitik ifadeler kullanılır (Chenni vd., 2007; Kou vd., 1998). Literatürde sıkça kullanılan yaklaşımlardan biriside sabit parametre kabulü ile yapılan modellemedir. Bu yöntemde, ışık akımı ve ters doyma akımı çevre koşullarından etkilenirken, seri ve paralel dirençler belirlenmiş bir durum için sabit olarak kabul edilir. Bununla birlikte, fotovoltaik sistem fiziksel olarak ışınım şiddeti ve sıcaklık değişikliklerine oldukça duyarlıdır.

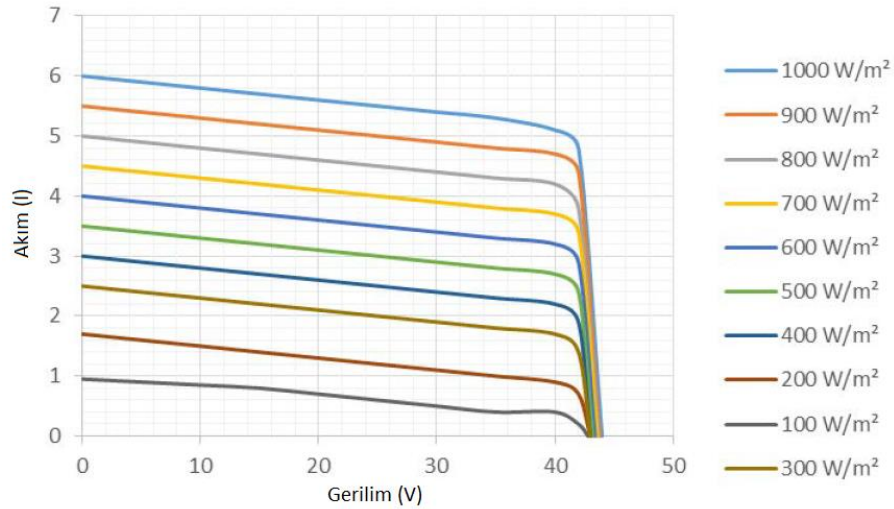
Model parametrelerini elde etmek için alternatif bir yaklaşım da doğrusal olmayan optimizasyon teknikleri kullanarak I-V eğri uydurma yoluyla parametrelerin tespitidir. Fotovoltaik modellemede, model parametreleri ile ilgili kapsamlı bilgi gerektiğinde optimizasyon yaklaşımı kullanılır. Buradan elde edilen parametre değerlerinin doğruluğu algoritma tipine, amaç fonksiyonuna ve başlangıç koşullarına bağlıdır (Easwarakhanthan vd., 1986; Ortiz-Conde vd., 1999). İlk parametre değerinin uygun olmayan seçiminin uyumsuzluğa neden olabileceği kabul edilmektedir. Ayrıca parametre sayısı arttıkça yaklaşım doğru sonuçlar üretme yeteneğini kaybeder (Saha vd., 2015; El-Naggar vd., 2012).

Son yıllarda kayda değer potansiyellerinden dolayı, fotovoltaik modellemede kullanılan yaklaşımlardan birisi de yumuşak hesaplama yöntemleridir. Bunlardan bazıları genetik algoritma (Sellami and Bouaïcha, 2011; Moldovan vd., 2009), diferansiyel evrim (da Costa vd., 2010; Gong and Cai, 2013), parçacık sürüsü

optimizasyonu (Ye vd., 2009; Sandrolini vd., 2010), benzetimli tavlama (El-Naggar vd., 2012), guguk kuşu araştırması (Ma vd., 2013), bakteri yiyecek arama algoritması (Rajasekar vd., 2013), armoni araması (Askarzadeh and Rezazadeh, 2012), desen arama optimizasyonu (AlHajri vd., 2012; AlRashidi vd., 2011), yapay arı sürüsü optimizasyonu (Askarzadeh and Rezazadeh, 2013a) ve kuş çiftleşme düzenleyicisi (Askarzadeh and Rezazadeh, 2013b) şeklinde gösterilebilir. Bu yaklaşımlar, küresel arama kabiliyetleri ve eğim bilgisi olmayan lineer olmayan fonksiyonların kullanımındaki etkinliği nedeniyle özellikle ilgi çekicidirler. Bu avantajlara rağmen, sayısal ve yakınsama hızında tutarlılığı garanti edemeyen, olasılıksal doğası nedeniyle fotovoltaik simülatörlerinde yumuşak hesaplama kullanımı genellikle tercih edilmemektedir.

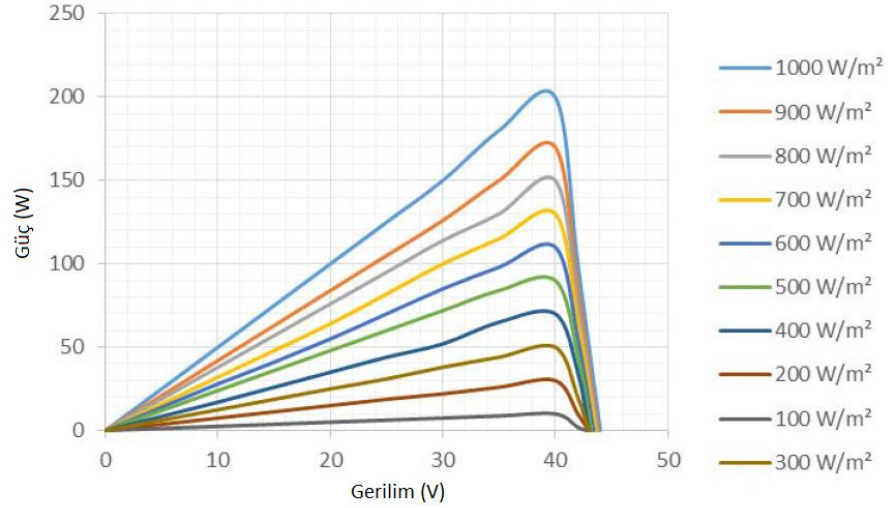
### 3.2 Işınım Şiddetinin I-V Eğrisi Üzerindeki Etkisi

Güneş ışınım şiddetinin artması fotovoltaik hücre üzerinde bulunan n-tipi yarı iletken malzemeden daha fazla elektron koparabilme olasılığını arttıracığı için akım değerini arttırmaktadır (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2.** Işınım Şiddetinin Fotovoltaik Hücre Üzerinde Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi.

Fotovoltaik hücrelerin akımının değişmesi fotovoltaik hücrelerin gücünü de değiştirmektedir (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3.** Işınım Şiddetinin Fotovoltaik Hücrenin Güç Değerlerine Etkisi.

Fotovoltaik hücreler üzerinde oluşan akım ( $I_L$ ), ışınım şiddetinin değerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu da aşağıdaki denklem ile açıklanabilir:

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} [I_{L,ref} + \mu_{Isc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.3.)$$

$I_{L,ref}$  = Işık akımı referans değeri (A)

$G$  = Işınım şiddeti ( $W/m^2$ )

$G_{ref}$  = Işınım şiddeti referans değeri ( $W/m^2$ )

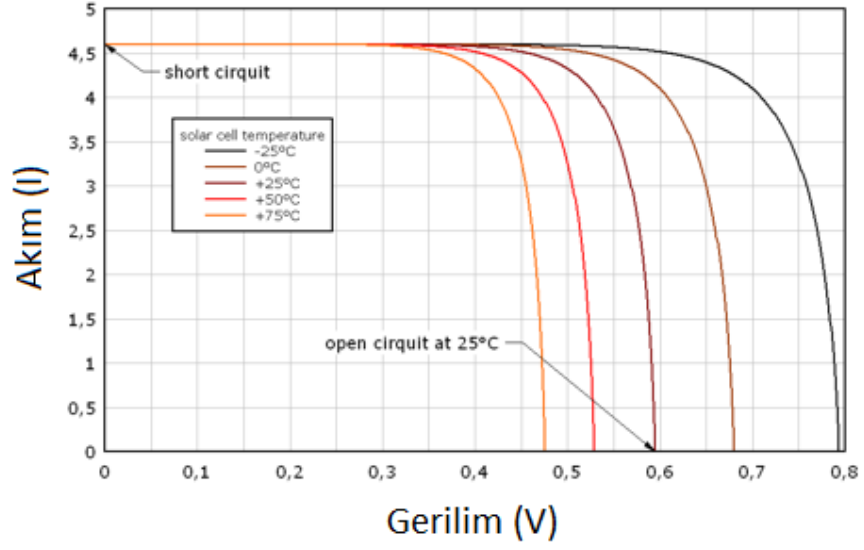
$\mu_{Isc}$  = Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (A/K)

$T_c$  = Fotovoltaik hücre sıcaklığı (K)

$T_{c,ref}$  = Fotovoltaik hücre referans sıcaklığı (K)

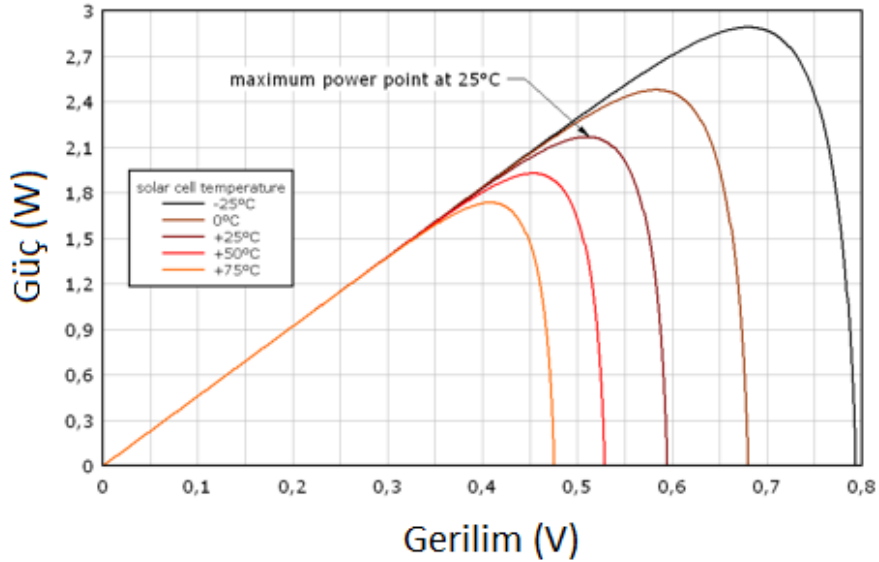
### 3.3 Hücre Sıcaklığının I-V Eğrisi Üzerindeki Etkisi

Fotovoltaik hücreler üzerine düşen güneş ışınımı fotovoltaik hücrenin sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmektedir (Duffie and Beckman, 2013). Hücrelerin bu değişen sıcaklığı da hücrede bulunan yarı iletkenlerin yapısını etkileyerek akım ve gerilim değerlerinin değişmesine neden olmaktadır (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4.** Sıcaklığın Fotovoltaik Hücre Üzerinde Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi.

Sıcaklığın artması fotovoltaik hücre üzerindeki akım değerini sınırlı bir miktar artırırken gerilim değerini ise göreceli olarak önemli ölçüde düşürmektedir. Bu değişim, fotovoltaik hücreden elde edilen güç değerine direkt olarak olumsuz yönde yansımaktadır (Şekil 3.5).



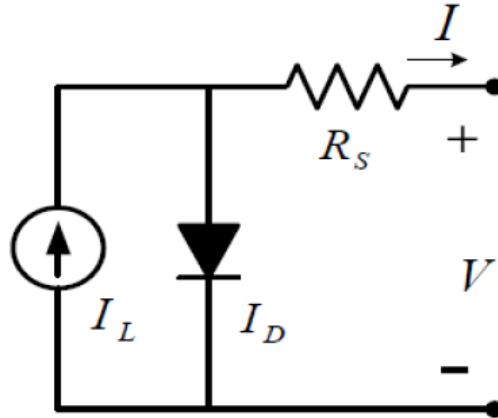
**Şekil 3.5.** Sıcaklığın Fotovoltaik Hücrenin Güç Değerlerine Etkisi.

### 3.4 Mevcutta Kullanılan Modeller

Yukarıda ifade edildiği gibi fotovoltaik hücre teknolojileri ve bunların kullanım alanları hızlı bir gelişim göstermektedir. Bu gelişmelere paralel olarak fotovoltaik hücrelerin matematiksel modelleri üzerinde yapılan araştırmalar da hızla artmaktadır. Fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristiği analitik ve nümerik yöntemler gibi farklı yaklaşımlar kullanılarak hesaplanabilir.

Bu tezde, yukarıda literatür özeti verilen yaklaşımlardan analitik yöntemler arasından seçilen 4 farklı model kullanılarak bir PV panelin I-V eğrisi hesaplanmış ve deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu farklı modeller, analitik yöntemler arasında, içerisinde farklı sayıda parametre bulundurması bakımından potansiyel olarak literatürdeki mevcut modelleri yeterince temsil etmektedir. Bu bağlamda, bu tez çalışması kapsamında 4-değişkenli, 5-değişkenli, geliştirilmiş 4-değişkenli ve 2-diyotlu modeller olmak üzere toplam 4 farklı model kullanılarak bir fotovoltaik panelin elektriksel karakteristiği üzerine bir araştırma çalışması gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.1 4-Değişkenli Model



Şekil 3.6. 4-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Devresi.

Şekil 3.6’da verilen basit eşdeğer elektrik devresi benzetimi kullanılan bu modelin I-V eğri denklemi aşağıda verildiği gibidir (Celik and Acikgoz, 2007):

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+IR_S}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.4.)$$

Bu fotovoltaik panelden elde edilen güç ise şu şekilde hesaplanabilir:

$$P = IV \quad (3.5.)$$

Yukarıdaki I-V denkleminin çözülmesi için öncelikle 4 değişkenin farklı ışınım ve sıcaklık değerlerinde nasıl değiştiği bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu 4 değişken  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$  ve  $\alpha$ 'dır. Bu değişkenlerin denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) [I_{L,ref} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.6.)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left[\left(\frac{qN_S}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)\right] \quad (3.7.)$$

$$R_S = R_{S,ref} \quad (3.8.)$$

$$\alpha = \alpha_{ref} \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (3.9.)$$

Yukarıda verilen denklemlerde görüldüğü üzere, farklı koşullar ile birlikte değişiklik gösteren parametrelerin değerlerini hesaplamak için öncelikle söz konusu parametrenin referans koşullarına karşılık gelen değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu referans değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (3.10.)$$

$$\alpha_{ref} = \frac{\mu_{V,oc} T_{c,ref} - V_{oc,ref} + qN_S}{\frac{T_{c,ref} \mu_{I,sc}}{I_{L,ref}} - 3} \quad (3.11.)$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{L,ref}}{\exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{\alpha_{ref}}\right) - 1} \quad (3.12.)$$

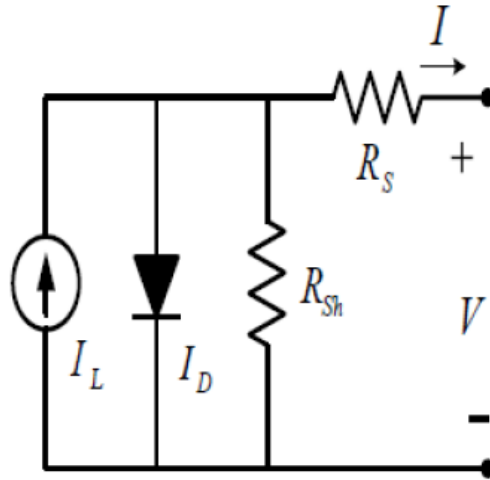
$$R_{S,ref} = \frac{\alpha_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{L,ref}}\right) - V_{mp,ref} + V_{oc,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (3.13.)$$

Parametrelerin referans değerleri hesaplanırken gerekli olan  $\mu_{I,sc}$  ve  $\mu_{V,oc}$  katsayıları kullanılan fotovoltatik panel için sırasıyla 0,001325 A/K ve  $-0,0775$  V/K olarak kabul edilmiştir. İhtiyaç duyulan değişkenler bu şekilde belirlendikten sonra fotovoltatik modülün I-V eğrisi Denklem (3.4)'de verildiği üzere hesaplanır. Bu şekilde elde edilen I-V eğrisi ile bu eğri üzerinde istenilen her noktaya karşılık gelen güç değeri Denklem (3.5) kullanılarak hesaplanabilir. Bununla birlikte, fotovoltatik hücrenin verebileceği maksimum güç değeri de hesaplanabilir. Belirlenen bu güç değeri yardımıyla fotovoltatik hücrenin verimini hesaplamak için:

$$\eta = \frac{P}{G \times A} \times 100 \quad (3.14.)$$

denklemini kullanılır.

### 3.4.2 5-Değişkenli Model



**Şekil 3.7.** 5-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Devresi.

Şekil 3.7'de 5-değişkenli bir fotovoltatik hücre için eşdeğer elektrik devresi verilmiştir. Görüldüğü üzere, 4-değişkenli modelden farklı olarak, 5-değişkenli eşdeğer elektrik devrede hücre içerisinde oluşan paralel devre dirençlerinin ( $R_{Sh}$ ) fotovoltatik hücrenin I-V karakteristiği üzerindeki etkisi de dikkate alınmaktadır. Ayrıca modifiye edilmiş diyot idealite faktörünün de ( $\alpha$ ) sıcaklığa bağlı olarak değiştirdiği bilinmektedir (Celik and Acikgoz, 2007). Bu model aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:



$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3.15.)$$

Denklem (3.15)'de gözükten modifiye edilmiş diyot idealite faktörü:

$$\alpha = mV_t \quad (3.16.)$$

$m$  = idealite faktörü

$V_t$  = termal gerilim (V)

Yukarıda belirtilen idealite faktörü ve termal gerilimi hesaplamak için aşağıda belirtilen denklemlerden yararlanabiliriz:

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (3.17.)$$

$$m = n_t N_s \quad (3.18.)$$

veya

$$m = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_{so} - V_{oc}}{V_t \left[ \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{sh}} - I_{mp}\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) + \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}\right) \right]} \quad (3.19.)$$

Fotovoltaik hücre üzerinde oluşan ışık akımı ( $I_L$ ) ve ters doyma akımını ( $I_0$ ) hesaplamak için:

$$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + I_0 \left[ \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{mV_t}\right) - 1 \right] \quad (3.20.)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) \exp\left(-\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) \quad (3.21.)$$

Fotovoltaik hücre üzerindeki dirençleri hesaplamak için:

$$R_s = R_{so} - \left[ \frac{mV_t}{I_0} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) \right] \quad (3.22.)$$

$$R_{sh} = R_{sho} \quad (3.23.)$$

Hesaplanması gereken bu direnç değerleri üzerine tartışmalar devam etmektedir (De Blas vd., 2002). Konu ile ilgili yapılan literatür çalışması  $R_{so}$  değerinin  $0.30\Omega$  ile  $0.33\Omega$  arasında  $R_{sho}$  değerinin ise  $50\Omega$  ile  $170\Omega$  arasında değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır (Celik and Acikgoz, 2007). Diğer

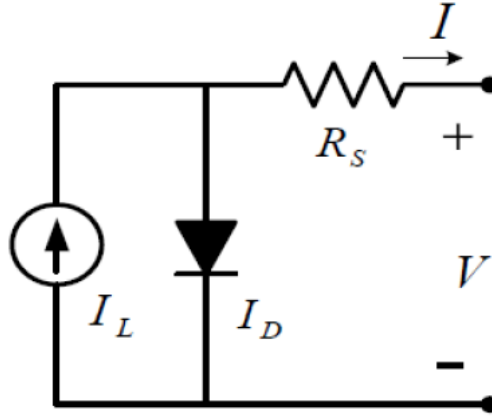
tarafından, fotovoltaik hücrelerin ışınım şiddeti ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösteren kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) şu denklemler ile hesaplanmaktadır;

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.24.)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + mV_t \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{V,oc}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.25.)$$

Hesaplanan sonuçlardan sonra Denklem (3.15)'de 4-değişkenli modelde olduğu gibi her gerilim değeri için o gerilim değerine karşılık gelen akım değerinin hesaplanması gerekir. Hesaplanan gerilim ve akım değerleri yardımıyla fotovoltaik hücrenin seçilen değerdeki gücü hesaplanır ve fotovoltaik hücrenin çalışması gereken en verimli akım ve gerilim noktası tespit edilir. Fotovoltaik hücrenin verimini hesaplamak için Denklem (3.14) kullanılır.

### 3.4.3 Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model



**Şekil 3.8.** Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.

Şekil 3.8'de fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi verilen geliştirilmiş 4-değişkenli modelin amacı 4 parametrelili modelde verilen referans değerlerini iyileştirerek hesaplanmak istenen sıcaklık ve ışınım şiddetlerinde gerçeğe daha yakın sonuçlara ulaşmaktır (Khezzar vd., 2014). Bu model için geçerli olan Denklem (3.26)'da belirtilmiştir.

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.26.)$$

Modelde kullanılacak olan hesaplanması gereken değişkenler olan  $I_L, I_0, R_s$  ve  $\alpha$  değerlerini bulabilmek için aşağıdaki denklemler çözülmelidir:

$$I_L = I_{sc} \quad (3.27.)$$

$$I_0 = I_{sc} \left[ \exp\left(-\frac{q}{N_s n k T_c} V_{oc}\right) \right] \quad (3.28.)$$

$$I_m = I_{sc} \left[ 1 - \exp\left(q \frac{V_m - V_{oc} + I_m R_s}{N_s n k T_c}\right) \right] \quad (3.29.)$$

$$R_s = \frac{\frac{N_s n k T_c}{q} \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) + V_{oc} - V_m}{I_m} \quad (3.30.)$$

$$\alpha = \frac{q(2V_m - V_{oc})}{N_s k T \left[ \frac{I_m}{I_{sc} - I_m} + \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \right]} \quad (3.31.)$$

Yukarıdaki (3.31) denklemini ile verilen modifiye edilmiş diyot idealite faktörü ( $\alpha$ ) ilk başta Nominal Operasyonel Hücre Sıcaklığı (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT) olarak adlandırılan referans koşullarındaki değerler kullanılarak hesaplanır. Bu koşullar genellikle panel üreticileri tarafından veri sayfasında tüketicilere sunulmaktadır. Bu şekilde referans koşulları için hesaplanan parametreler aşağıda verilen denklemler ile referans koşullarından farklı sıcaklık ve ışınım şiddeti altındaki değerlerinin hesaplanması için kullanılır (De Soto vd., 2006; Zhou vd., 2007):

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I_{sc}}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.32.)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + \frac{N_s n k T_c}{q} \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{V_{oc}}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.33.)$$

$$I_m = I_{m,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I_m}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.34.)$$

$$V_m = V_{m,ref} + \frac{N_s n k T_c}{q} \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{V_m}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.35.)$$

Denklem (3.33) ve (3.35)'deki açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve maksimum güç noktasındaki gerilim ( $V_m$ ) değerleri modellemenin gücünü geliştirebilmek için aşağıda verilen Denklem (3.36) ve (3.37) ile yeniden hesaplanır:

$$V_{oc} = \frac{V_{oc,ref}}{1+\beta_1 \ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)} \left(\frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)^{\gamma_1} \quad (3.36.)$$

$$V_m = \frac{V_{m,ref}}{1+\beta_2 \ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)} \left(\frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)^{\gamma_2} \quad (3.37.)$$

$$\beta_1 = \frac{\frac{V_{oc,ref}}{V_{oc}^1} - 1}{\ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)}, \quad \gamma_1 = \frac{\ln\left(\frac{V_{oc,ref}}{V_{oc}^2}\right)}{\ln\left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)} \quad (3.38.)$$

$$\beta_2 = \frac{\frac{V_{m,ref}}{V_m^1} - 1}{\ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)}, \quad \gamma_2 = \frac{\ln\left(\frac{V_{m,ref}}{V_m^2}\right)}{\ln\left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)} \quad (3.39.)$$

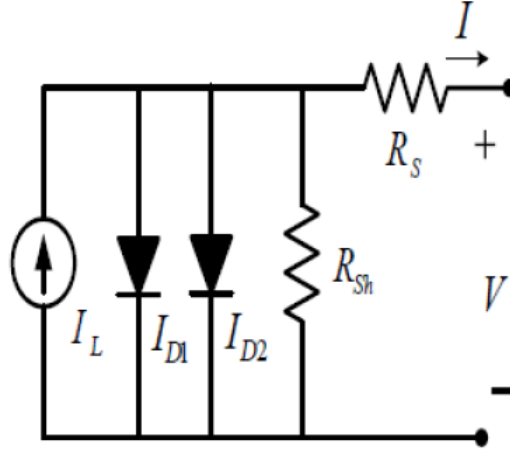
Denklem (3.36) ve (3.37)  $\beta_1, \beta_2, \gamma_1$  ve  $\gamma_2$  fonksiyonlarını içermektedir. Bu denklemler içerisinde yer alan parametrelerin hangi koşullara denk geldiği Tablo (3.1)'de açıklanmaktadır.

**Tablo 3.1.**  $\beta_1, \beta_2, \gamma_1$  ve  $\gamma_2$  parametrelerinin denk geldiği koşullar

	$G_{ref}$	$G$
$T_{c,ref}$	$V_{oc,ref}, V_{m,ref}$	$V_{oc}^1, V_m^1$
$T_c$	$V_{oc}^2, V_m^2$	

Tablo (3.1)'de belirtilen açık devre gerilim noktaları ( $V_{oc,ref}, V_{oc}^1, V_{oc}^2$ ) ve maksimum güç noktasındaki gerilim değerleri ( $V_m, V_m^1, V_m^2$ ) için tabloda bu değerlere karşılık gelen ışınım şiddeti ve sıcaklık değerleri ile birlikte Denklem (3.33.) ve Denklem (3.35) kullanılarak ayrı ayrı hesaplama yapılır. Yeni hesaplanan açık devre gerilimi ve maksimum güç noktasındaki gerilim değerleri kullanılarak; (3.28)'de belirtilen ters doyma akımı ( $I_0$ ), (3.29)'da maksimum güç noktasındaki akım ( $I_m$ ), (3.30)'da seri devre direnci ( $R_s$ ) ve (3.31)'de modifiye edilmiş diyot idealite faktörü ( $\alpha$ ) yeniden hesaplanır. Bu hesaplanan değerler Denklem (3.26)'da kullanılarak söz konusu koşullarda I-V eğrisi elde edilir. Gerilim ve o gerilime karşılık gelen akım değerleri bulunduktan sonra Denklem (3.5) kullanılarak fotovoltaiik hücrenin çalışması gereken maksimum güç değeri hesaplanır. Maksimum verimde çalışan fotovoltaiik hücrenin verimi Denklem (3.14.) ile hesaplanır.

### 3.4.4 2-Diyotlu Model



Şekil 3.9. 2-Diyotlu Model İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.

2-diyotlu model için kullanılacak fotovoltaik eşdeğer devresi Şekil 3.9'da gösterilmiştir (Ishaque vd., 2011). Önceki modellerde yapılan hesaplamalar, tükenme bölgesinde meydana gelen kayıpların ihmal edilebilir olduğu varsayımına dayanmaktadır. Ancak, gerçekte bu bölgede de ihmal edilemeyecek seviyede kayıplar yaşanmaktadır. 2-diyotlu model yaklaşımı, bu kayıpların da hesaplanması gerektiği düşüncesini içermektedir. Model için kullanılan Denklem (3.40)'da verilmektedir:

$$I = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( q \frac{V+IR_S}{n_1 k T_c N_s} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( q \frac{V+IR_S}{n_2 k T_c N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{Sh}} \quad (3.40)$$

Denklem (3.38)'de kullanılan diyot faktörleri  $n_1$  ve  $n_2$  farklı şekilde türetilerek hesaplama yapılabilir. Ancak bu değerler belirlenirken söz konusu sınır koşulları şunlardır:  $n_1 \geq 1$ ,  $n_2 \geq 1$  ve  $p \geq 2,2$ . Bu değerleri belirlemek için kullanılması gereken Denklem (3.41) ile verilmiştir.

$$\frac{n_1+n_2}{p} \geq 1 \quad (3.41.)$$

Denklem (3.40)'da ki diğer parametreler aşağıda verilen denklemler ile hesaplanır:

$$I_L = [I_{L,ref} + \mu_{Isc}(T_c - T_{c,ref})] \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3.42.)$$

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (3.43.)$$

$$I_{01} = I_{02} = \frac{I_{sc,ref} + \mu_{Isc}(T_c - T_{c,ref})}{\exp\left[\frac{q(V_{oc,ref} + \mu_{Voc}(T_c - T_{c,ref}))}{N_s k T_c \left(\frac{n_1 + n_2}{p}\right)}\right] - 1} \quad (3.44.)$$

$$R_s = \frac{\frac{N_s n k T_c}{q} \ln\left(1 - \frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref}}\right) + V_{oc,ref} - V_{m,ref}}{I_{m,ref}} \quad (3.45.)$$

$$n = \frac{q(2V_{m,ref} - V_{oc,ref})}{N_s k T_{c,ref} \left[ \frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref} - I_{m,ref}} + \ln\left(1 - \frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref}}\right) \right]} \quad (3.46.)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_s}{I_{L,ref} - I_{01} \left[ \exp\left(q \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_s}{N_s k T_c}\right) + \exp\left(q \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_s}{N_s k T_c (p-1)}\right) + 2 \right] - \frac{P_{max,ref}}{V_{m,ref}}} \quad (3.47.)$$

Yukarıdaki denklemler hesaplandıktan sonra Denklem (3.40)'da kullanılarak her fotovoltaik hücre gerilimi için bu gerilim değerine karşılık gelen akım değeri hesaplanarak I-V eğrisi elde edilir. Hesaplanan akım ve gerilim değerleri Denklem (3.5)'de kullanılarak fotovoltaik hücrenin ürettiği maksimum güç değeri hesaplanır. Bulunan değerler doğrultusunda Denklem (3.14) kullanılarak fotovoltaik hücrenin hesaplanmak istenilen ışınım şiddeti ve sıcaklık değerindeki verimi bulunur.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Bölüm 3’de verilen fotovoltaik eşdeğer elektrik devre modelleri çözümlenerek, kurulan deneysel sistemden elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Fotovoltaik eşdeğer elektrik devre modelleri hesaplanırken kullanılan referans değerler Tablo 4.1’de verilmiştir. Model hesaplamaları yapılırken Microsoft Visual Basic programlama dili tercih edilmiştir.

**Tablo 4.1.** Modellerde Kabul Edilen Referans Değerler

	Kabul Edilen Değerler	Kaynak
$G_{ref}$	1000 W/m <sup>2</sup>	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$T_{c,ref}$	273,15 K	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$I_{sc,ref}$	8,75 A	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$V_{oc,ref}$	20,09 V	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$I_{mp,ref}$	8,18 A	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$V_{mp,ref}$	15,92 A	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$P_{mp,ref}$	130,18 W	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$N_s$	36	Kullanılan Güneş Paneli
$\mu_{Voc}$	-0,0775 V/K	(Duffie and Beckman, 2013)
$\mu_{Isc}$	0,001325 A/K	(Duffie and Beckman, 2013)
$E_q$	1,124 eV	(Streetman and Banerjee, 2016)
$k$	$1,38065 \times 10^{-23}$ J/K	(Beckwith, 2016)
$q$	$1,60222 \times 10^{-19}$ C	(Taylor vd., 2007)

Deneysel analizler Bolu (40°42’52.2’’K, 31°31’29.8’’D) ilinde Abant İzzet Baysal Üniversitesi Gölköy Kampüsü Mühendislik Mimarlık Fakültesinde yapılmıştır. Hazırlanan deney düzeneğinde fotovoltaik panelin yönü, mekanik ve elektronik pusula ile belirlenerek yüzey azimut açısı minimum olacak şekilde konumlandırılmıştır. Fotovoltaik panelin eğim açısı Bolu’nun matematiksel konumu ve dünyanın yıl içerisinde değişen eksen eğikliği göz önünde bulundurularak 34°







**Şekil 4.2.** Fotovoltaik Panel.



**Şekil 4.3.** Piranometreler.

Kurulan deney düzeneğinde cihazlar 7 gün 24 saat aktif olarak çalışmakta ve dakikada bir ölçüm alınmaktadır. Sistemde birisi yatay diğeri panel ile aynı eğime sahip yüzeyde olmak üzere iki adet anlık güneş ışınım şiddeti, atmosfer sıcaklığı ve PV panel sıcaklığı olmak üzere 2 adet sıcaklık, sistem gerilimi ve panelin ürettiği akım olmak üzere toplam 6 adet veri ölçülmekte ve kaydedilmektedir. Bunun yanı sıra, fotovoltaik panelin I-V eğrisi ile birlikte anlık güneş ışınım şiddeti, atmosfer sıcaklığı, PV panel sıcaklığı, açık devre gerilimini ve kısa devre akımını ölçebilen Ingenieurbüro Mini-KLA (Şekil 4.4) marka bir I-V eğrisi analiz cihazı kullanılmıştır.



**Şekil 4.4.** Ingenieurbüro Mini-KLA I-V Eğrisi Analiz Cihazı.

I-V eğrisi analiz cihazı ile farklı günlerde ve günün farklı saatlerinde anlık ölçümler alınarak mümkün olduğunca değişik ışınım şiddeti ve sıcaklık değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen bu veriler bilgisayarda kontrol edilerek deney düzeneğinde aktif durumda olan veri kaydedici ile karşılaştırılarak verilerin hassasiyetleri teyit edilmiştir. Elde edilen bu ölçümler Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.2.** Fotovoltaik Panel Üzerinden I-V Eğrisi Analiz Cihazı ile Ölçülen Anlık Değerler

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$P_m$ (W)	FF (%)
1095,88	34	9,6021	19,1306	13,9572	8,9245	124,5619	67,8
1066,22	46	9,3573	18,4831	13,7382	8,4405	115,9578	67
906,05	43	7,9518	18,5284	14,1178	7,2084	101,7675	69,1
897,36	29	7,8572	19,47	15,0011	7,2204	108,3145	70,8
806,94	35	7,074	18,5627	14,4171	6,2795	90,5321	68,9
786,39	42	6,9035	18,4816	14,0156	6,3884	89,5374	70,2
694,49	37	6,0927	18,6495	14,5996	5,5745	81,3856	71,6
670,43	40	5,8862	18,1663	13,8696	5,4933	76,1902	71,3
402,04	29	3,5232	18,5692	15,5705	3,1863	49,6119	75,8
396,71	24	3,4699	19,1109	15,5924	3,2417	50,5463	76,2

#### 4.1 4-Değişkenli Modelin İncelenmesi

Bu bölümde, I-V eğrisi analiz cihazından elde edilen veriler Bölüm 3.4.1’de detaylı olarak açıklanan 4-değişkenli modelden elde edilen I-V eğrisi ile karşılaştırılmak suretiyle analiz edilmiştir. Genel yaklaşım olarak her bir model 5 farklı ışınım şiddeti ve her bir ışınım şiddeti için de 2 farklı panel yüzey sıcaklığında ölçümler ve modellemeler gerçekleştirilmiştir. Ancak, aynı ışınım şiddeti olarak ifade edilen değerlerin tam olarak aynı olmadığı, gerçek koşullarda ölçüm yapıldığı için aralarında küçük miktarlarda farklılıklar olduğu not edilmelidir. Söz konusu model için denklemlerden ve modelden elde edilen değerler Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.3.** Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde 4-değişkenli Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$P_m$ (W)	FF (%)
1095,88	34	9,602	19,5901	15,096	9,02	136,1659	72,4
1066,22	46	9,359	18,7799	14,5266	8,618	125,1902	71,2
906,05	43	7,95	18,8062	14,4535	7,508	108,5176	72,6
897,36	29	7,857	19,7627	15,5851	7,406	115,4232	74,3
806,94	35	7,071	19,2282	15,1033	6,683	100,9353	74,2
786,39	42	6,899	18,7317	15,023	6,324	95,0054	73,5
694,49	37	6,088	18,9453	15,0668	5,728	86,3026	74,8
670,43	40	5,88	18,7077	15,2128	5,386	81,9361	74,5
402,04	29	3,52	19,01	15,5705	3,336	51,9431	77,6
396,71	24	3,471	19,3946	15,9209	3,305	52,6185	78,2

## 4.2 5-Değişkenli Modelin İncelenmesi

I-V eğrisi analiz cihazından alınan ölçüm değerleri Bölüm 3.4.2’de açıklanan 5-değişkenli model üzerinde uygulanarak modelleme gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerler Tablo 4.4’de gösterilmiştir. Elde edilen değerler dikkate alındığında 5 değişkenli modelin 4-değişkenli modele göre farklı olmasındaki en önemli unsur 4-değişkenli modelde ihmal edilen paralel devre direncinin ( $R_{sh}$ ) fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi hesaplamalarında etkili olduğunu göstermektedir.

**Tablo 4.4.** Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde 5-değişkenli Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$P_m$ (W)	FF (%)
1095,88	34	9,601	19,4614	15,096	8,949	135,0941	72,3
1066,22	46	9,357	18,5123	13,928	8,88	123,6806	71,4
906,05	43	7,952	18,6364	14,4536	7,206	108,9945	73,5
897,36	29	7,857	19,7015	15,5851	7,434	115,8596	74,8
806,94	35	7,074	19,1581	15,4975	6,601	102,2989	75,5
786,39	42	6,903	18,6145	15,023	6,427	96,5528	75,1
694,49	37	6,093	18,8924	15,4902	5,689	88,1237	76,6
670,43	40	5,886	18,6338	15,2128	5,522	84,0050	76,6
402,04	29	3,523	19,1085	16,483	3,244	53,4708	79,4
396,71	24	3,47	19,4865	16,4903	3,256	53,6924	79,4

### 4.3 Geliştirilmiş 4-Değişkenli Modelin İncelenmesi

I-V eğrisi analiz cihazı ile ölçülen değerler Bölüm 3.4.3’de verilen geliştirilmiş 4-parametrelili modelde kullanılarak modellenme gerçekleştirilmiştir. Geliştirilmiş model, ilgili bölümde açıklandığı üzere, modellenmenin geliştirilerek daha hassas sonuçlar elde etmek için, açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve maksimum güç noktasındaki gerilim ( $V_m$ ) parametrelerinin, farklı bir yöntemle hesaplanmasını öngörmektedir. Bu şekilde yeniden hesaplanan açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve maksimum güç noktasındaki gerilim ( $V_m$ ) değişkenleri I-V eğrisinin yeniden oluşturulması için kullanılmıştır. Bu yeni eğri üzerinden elde edilen parametreler Tablo 4.5’de verilmektedir.

**Tablo 4.5.** Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde Geliştirilmiş 4-değişkenli Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$P_m$ (W)	FF (%)
1095,88	34	9,601	19,4816	15,4464	8,898	137,4420	73,5
1066,22	46	9,357	18,5707	14,5266	8,652	125,6841	72,3
906,05	43	7,952	18,6364	14,4536	7,425	107,3179	72,4
897,36	29	7,857	19,6722	15,5851	7,306	113,8647	73,7
806,94	35	7,074	19,1065	15,1033	6,541	98,7906	73,1
786,39	42	6,903	18,6145	14,5339	6,389	92,8570	72,3
694,49	37	6,093	18,808	14,5996	5,71	83,3637	72,7
670,43	40	5,886	18,5465	14,5193	5,453	79,1737	72,5
402,04	29	3,523	18,872	14,9573	3,236	48,4018	72,8
396,71	24	3,47	19,0087	15,5924	3,108	48,8260	74

#### 4.4 2-Diyotlu Modelin İncelenmesi

Bu kısımda, I-V eğrisi analiz cihazı ile yapılan ölçümler ile Bölüm 3.4.4'de verilen 2-diyotlu modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Mevcut 2-diyotlu model, fotovoltaiik hücrelerin yapısını oluşturan p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin diyot idealite faktörlerinin fotovoltaiik panellerin ürettiği akım ve gerilim değerleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu doğrultuda, bu yöntem ile hesaplanarak elde edilen değerler Tablo 4.6'da verilmektedir.

**Tablo 4.6.** Ölçülen Işınım Şiddeti ve Sıcaklık Değerlerinde 2-diyotlu Model ile Hesaplanan Akım ve Gerilim Değerleri

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$P_m$ (W)	FF (%)
1095,88	34	9,569	19,4087	15,4464	8,772	132,4221	71,3
1066,22	46	9,351	18,5123	14,5266	8,504	123,5342	71,4
906,05	43	7,945	18,5269	14,4536	7,435	107,4625	73
897,36	29	7,823	19,5895	15,5851	7,054	109,9372	71,7
806,94	35	7,049	19,0259	15,1033	6,407	96,7668	72,2
786,39	42	6,891	18,6145	14,5339	6,422	93,3367	72,8
694,49	37	6,071	18,724	15,0668	5,48	82,5660	72,6
670,43	40	5,869	18,4665	14,5193	5,452	79,0761	73
402,04	29	3,505	18,7593	15,5705	2,939	45,7616	69,6
396,71	24	3,454	19,2423	15,9209	2,852	45,4064	68,3

#### 4.5 Modellerin Doğrulanması

Bu kısımda, I-V eğrisi analiz cihazı ile elde edilen eğriler Bölüm 3'de anlatılan ve bir önceki kısımda verilen 4 farklı fotovoltaiik eşdeğer elektrik devre modelinden elde edilen eğriler ile karşılaştırılmaktadır. Söz konusu modeller farklı ışınım şiddeti ve sıcaklık koşullarında çözümlenerek ve hem ölçülen veriler ve hem de kendi aralarında olmak üzere karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Modellerden elde edilen sonuçlar istatistiksel bir yöntem olan regresyon analizi kullanılarak ölçüm

sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Regresyon katsayısı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir (Gujarati vd., 2012):

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Toplam Hataların Karesi}}{\text{Tüm Değerlerin Karesi}}$$

Regresyon katsayısı 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Regresyon katsayısının 1'e yaklaşması modelden elde edilen sonuçların ölçülen değerlere yaklaştığını bunun tam tersi olarak 0'a yaklaşması ise modelden elde edilen sonuçların ölçülen değerlerden uzaklaştığı anlamına gelmektedir.

Regresyon katsayısı değerlerinin yanı sıra, I-V eğrisi ölçümleri ile fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi modelleri üzerinden elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla farklı bir istatistiksel yöntem olan kök kareler karesi (Root Mean Squared Error, *RMSE*) metodu da hesaplanmış ve doğrulama amacıyla kullanılmıştır. *RMSE*, hata ortalama büyüklüğünü ölçen, ikinci dereceden bir puanlama kuralıdır (Willmott and Matsuura, 2005). Bu metot uygulanırken eşdeğer elektrik devresi modellemesinden elde edilen sonuç ile I-V eğrisi analiz cihazından elde edilen sonucun farkının karesi alınır. Bu işlem her bir gerilim değeri için yapılarak sonuçların ortalaması alınır. Sonunda ise ortalanmış bu değerlerin karekökü alınır. Bu anlatılan ifade matematiksel olarak altta gösterilmiştir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

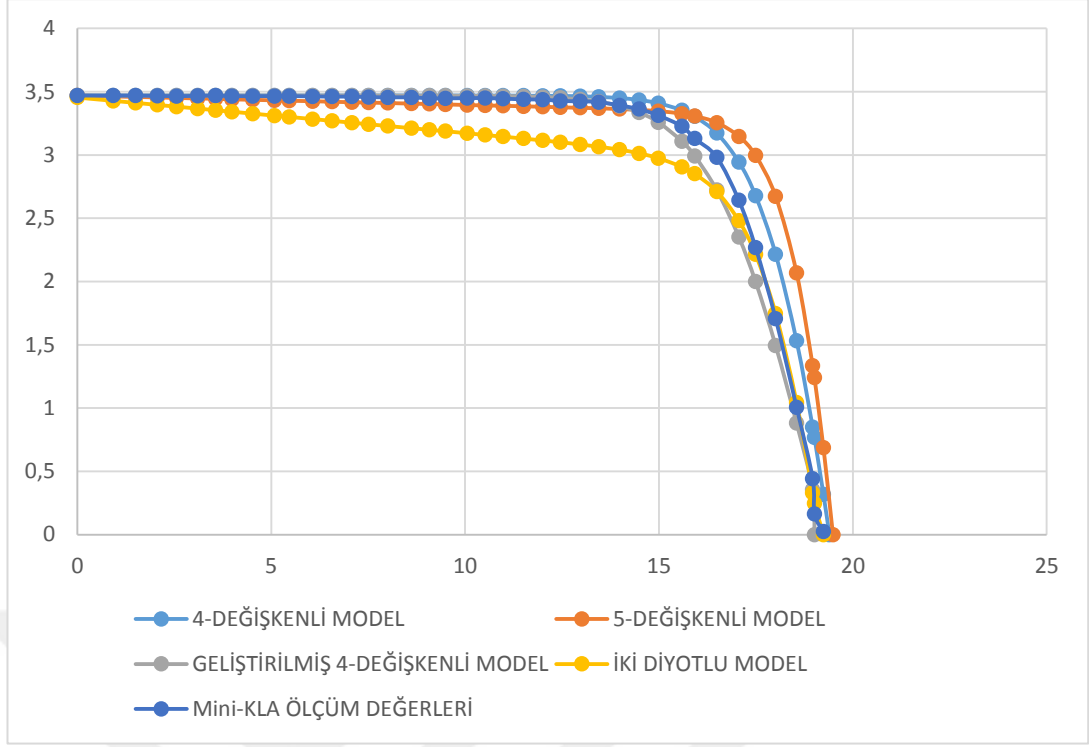
Yukarıda belirtilen matematiksel ifadede:

$X_i$  = Modelden Elde Edilen Sonuç

$Y_i$  = I-V Eğrisi Analiz Cihazından Elde Edilen Sonuç

değerlerini ifade etmektedir.

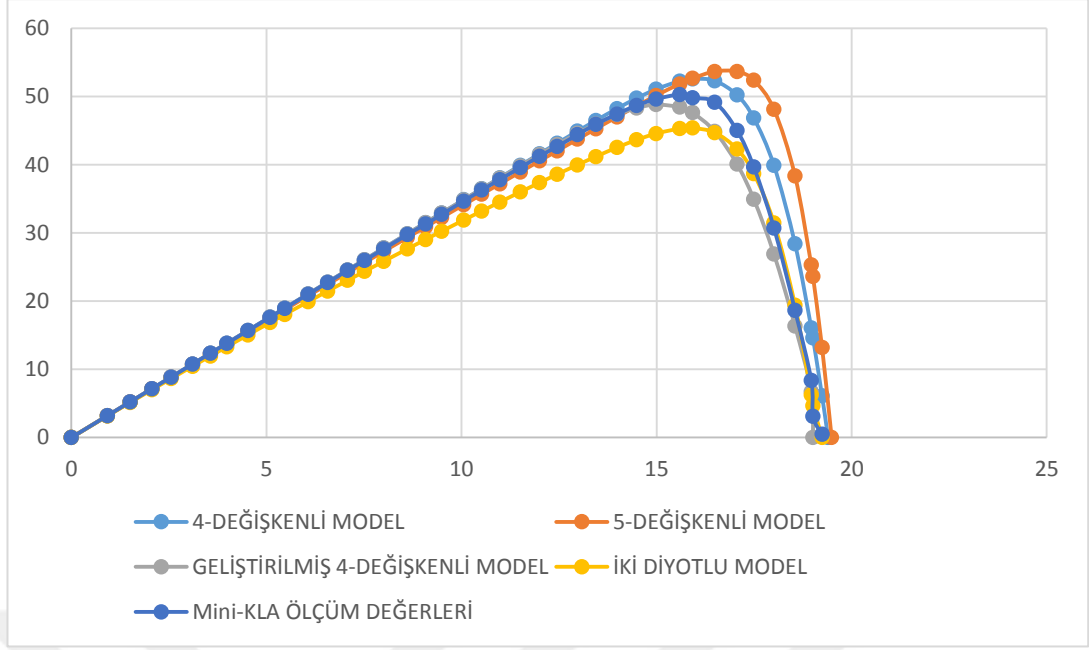
*RMSE* hesaplanırken bulunan sonuçlar 0'dan  $\infty$ 'a kadar değişkenlik gösterebilir. Bulunan sonuçların değerlerinin 0'a yakın olması hesaplanan değerler ile istenen değerler arasındaki hata seviyesinin minimum olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.5.** 396 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 24°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

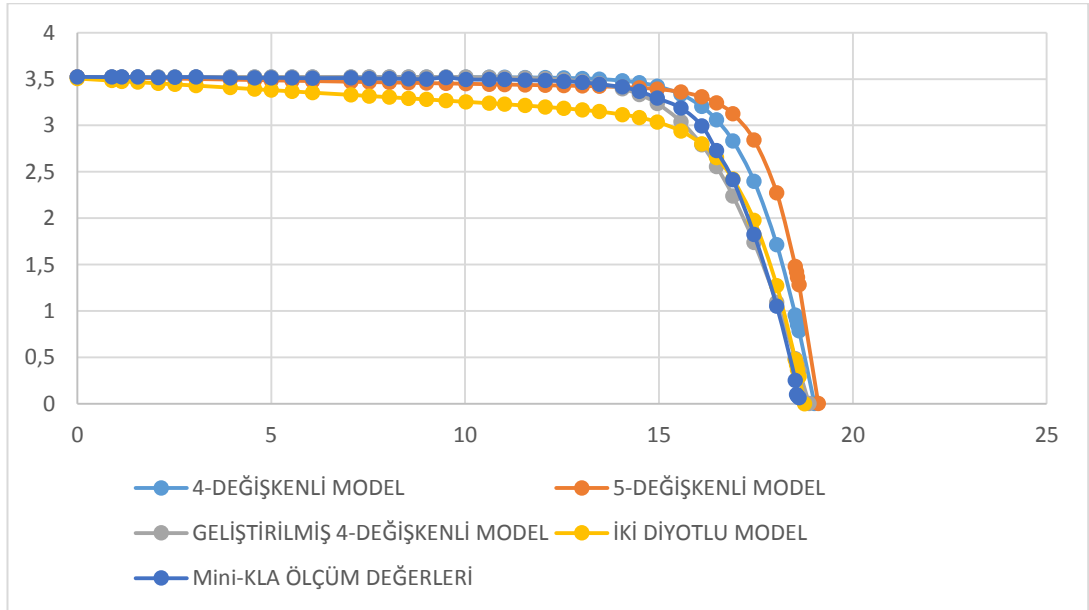
Bu kısımda 10 farklı güneş ışınımı/sıcaklık koşulunda çözümlenen modellerden elde edilen veriler ölçülen veriler ile karşılaştırılmaktadır. Bunlardan ilki, 396 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 24°C sıcaklıkta ölçülen ve modellemelerden elde edilen eğrilerin karşılaştırıldığı Şekil 4.5 ile verilmektedir. Söz konusu ışınım şiddeti ve sıcaklık değeri için ölçülen eğri ile 4-değişkenli model çözümlenerek elde edilen eğri arasındaki  $R^2$  değeri %99,10 olarak hesaplanmıştır. Bu parametre 5-değişkenli model için %95,86, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %99,35 ve 2-diyotlu model için %98,69 olarak hesaplanmıştır. 396 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 24°C sıcaklıkta ölçülen değerlere en yakın sonucu veren modelin geliştirilmiş 4-değişkenli model olduğu görülmektedir. Aynı koşullardaki  $RMSE$  değerleri incelendiğinde 4-değişkenli model için 0,192, 5-değişkenli model için 0,363, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,093 ve 2-diyotlu model için 0,220 olduğu görülmektedir. 396 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 24°C sıcaklıkta ölçülen değerlere göre hatanın minimum olduğu modelin geliştirilmiş 4-değişkenli model olduğu görülmektedir. 396 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 24°C sıcaklıkta elde edilen güç grafiği Şekil 4.6'da verilmektedir.





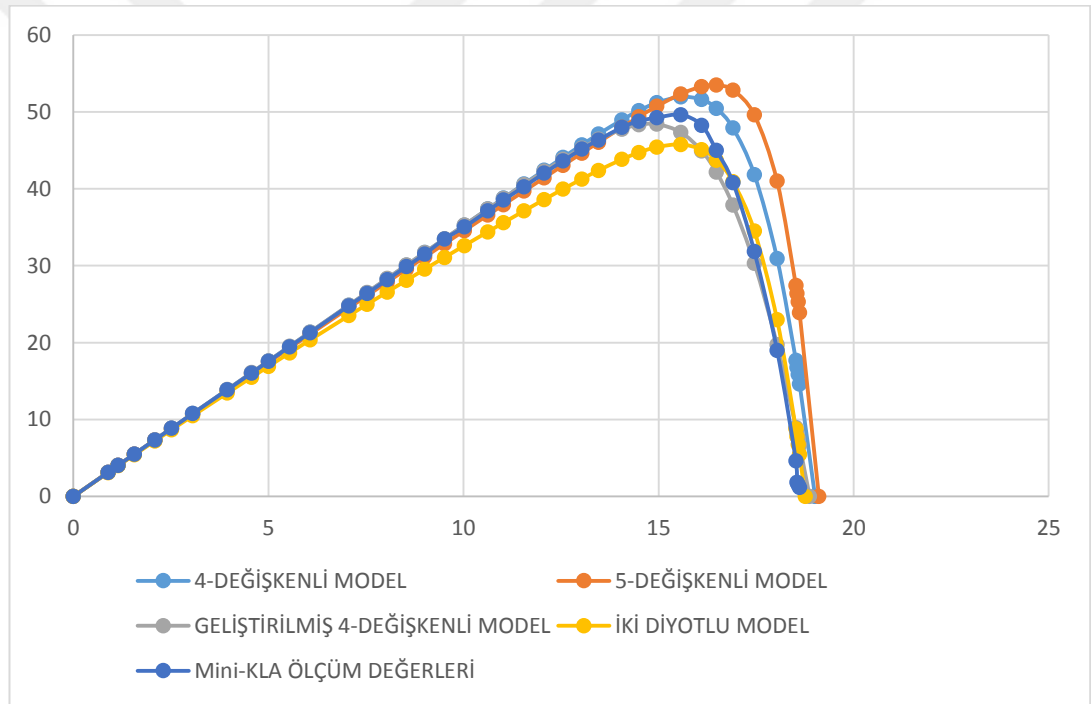
**Şekil 4.6.** 396 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 24°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

396 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 24°C sıcaklıkta ölçülen değerlere en yakın ışınım şiddeti olarak 402 W/m<sup>2</sup> değerinde ancak bu kez 29°C sıcaklıkta ölçülen değerler ayrı yeten karşılaştırılmış ve böylece birbirine yakın, göreceli olarak düşük ışınım şiddetinde, sıcaklığın ölçümler ile modeller üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.7’de 402 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 29°C sıcaklıkta ölçülen ve model çözümlerinden elde edilen eğriler gösterilmektedir.



**Şekil 4.7.** 402 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

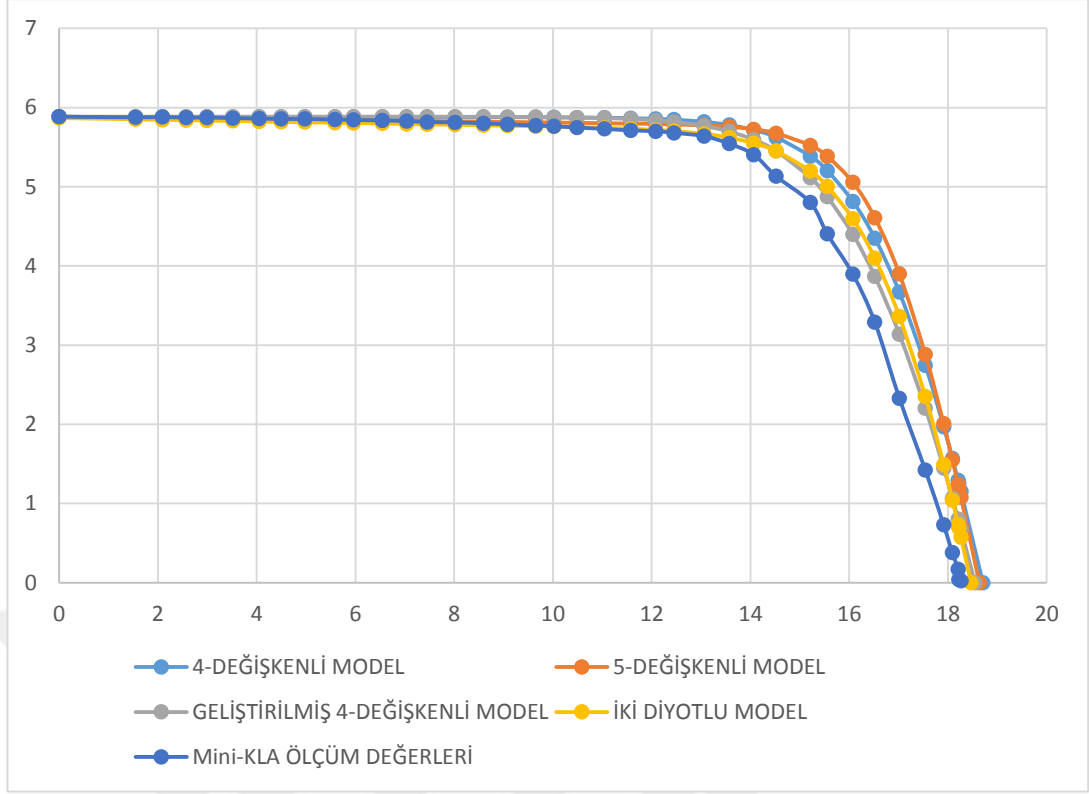
Bu koşullarda, modellerden elde edilen sonuçlar ölçümler ile karşılaştırılarak hesaplanan  $R^2$  değerleri: 4-değişkenli model için %99,63, 5-değişkenli model için %97,64, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %99,30 ve 2-diyotlu model için %99,11 olarak belirlenmiştir. 402 W/m<sup>2</sup> işınım şiddeti ve 29°C sıcaklık koşullarında modellerden elde edilen sonuçlara bakıldığında 4-değişkenli modelin diğer modellere kıyasla ölçüm değerlerine daha yakın değerler verdiği grlmştir. Aynı şartlardaki *RMSE* değerleri incelendiğinde 4-değişkenli model için 0,289, 5-değişkenli model için 0,490, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,111 ve 2-diyotlu model için 0,202 olduğu gözlenmektedir. 402 W/m<sup>2</sup> işınım şiddetinde ve 29°C sıcaklıkta ölçülen değerler için hatanın minimum olduğu modelin geliştirilmiş 4-değişkenli model olduğu görülmektedir.



**şekil 4.8.** 402 W/m<sup>2</sup> Işınım şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

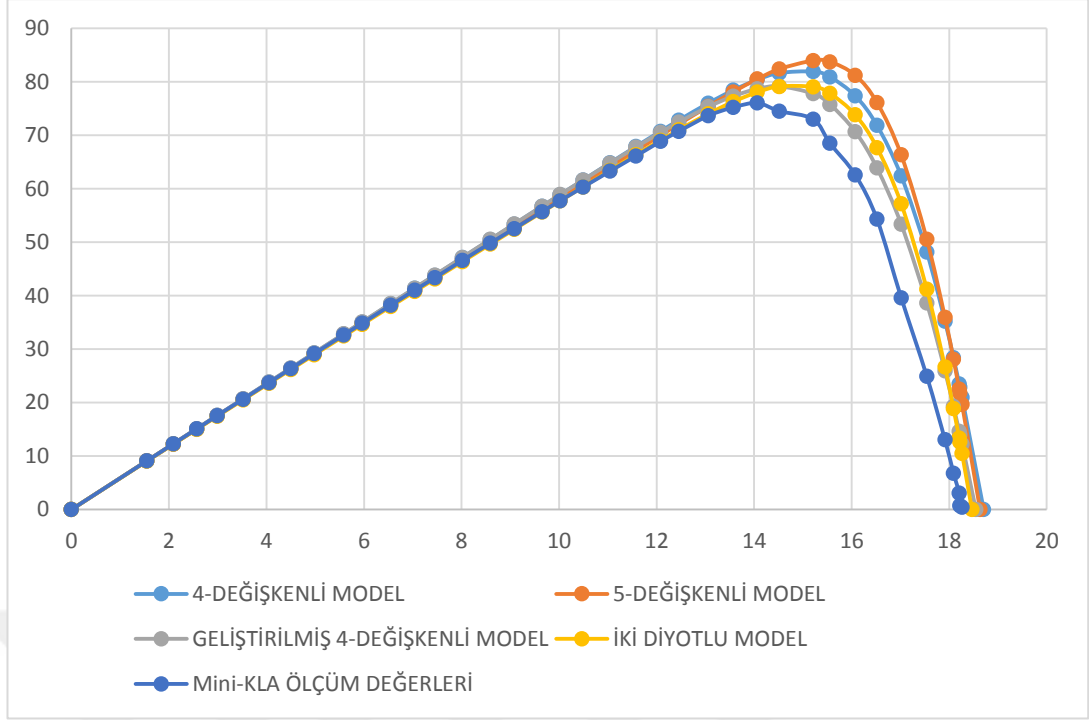
Düşük işınım şiddetinde modeller incelendiğinde geliştirilmiş 4-değişkenli modelin seri devre direncinin diğer modellere kıyasla hassasiyetinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.

670 W/m<sup>2</sup> işınım şiddeti ve 40°C sıcaklıkta I-V eğrisi analiz cihazı ile yapılan ölçümler ile hesaplanan değerler karşılaştırıldığında beklendiği gibi kısa devre akım değeri ( $I_{sc}$ ) artmaktadır. Bu koşullarda modellerin üzümünden elde edilen eğriler ile ölçülen eğriler şekil 4.9'da grafik üzerinde gösterilmiştir.



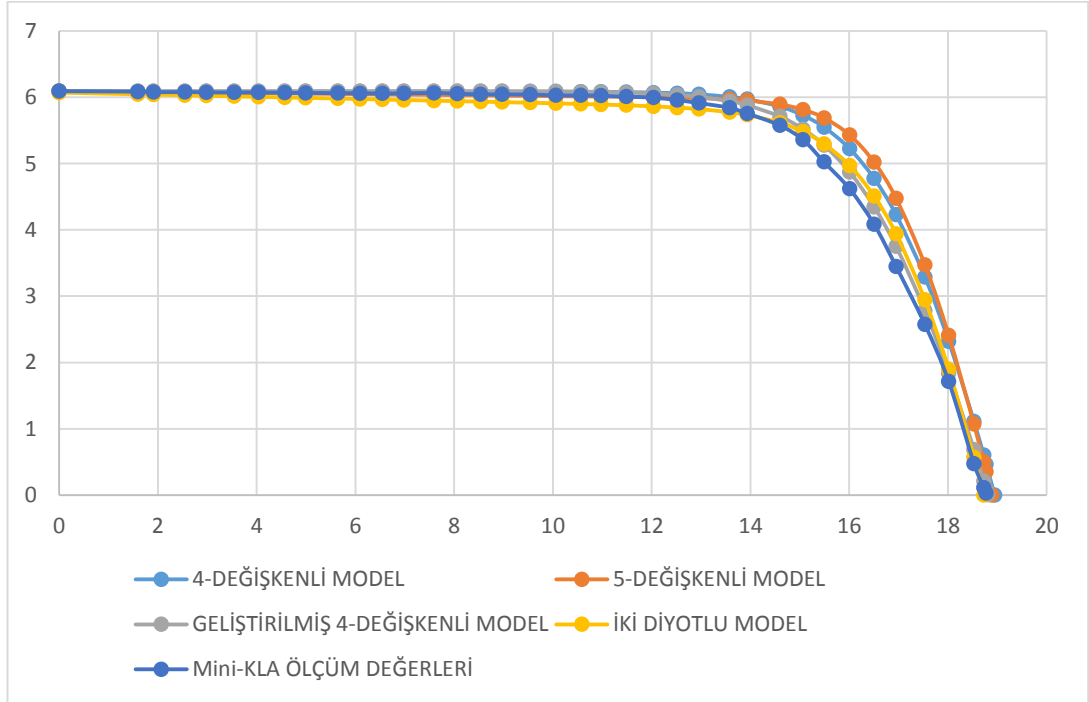
**Şekil 4.9.** 670 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 40°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

670 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 40°C sıcaklıkta I-V eğrisi analiz cihazı ile modellerin çözümlenmesi sonucunda elde edilen verilerin  $R^2$  değerleri 4-değişkenli model için %98,79, 5-değişkenli model için %97,30, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %99,69 ve 2-diyotlu model için %98,93 olarak elde edilmiştir. 670 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 40°C sıcaklıkta fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi modellemelerinden geliştirilmiş 4-değişkenli modelin diğer modellere kıyasla ölçülen değerlere daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Aynı koşullardaki *RMSE* değerleri 4-değişkenli model için 0,585, 5-değişkenli model için 0,630, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,343 ve 2-diyotlu model için 0,376 olarak hesaplanmıştır. 670 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 40°C sıcaklıkta ölçülen değerler dikkate alındığında minimum hata oranının geliştirilmiş 4-değişkenli modele ait olduğu görülmektedir. 670 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 40°C sıcaklık koşullarında Mini-KLA I-V eğrisi analiz cihazından elde edilen değerler ile modeller üzerinden elde edilen güç değerleri Şekil 4.10'da grafik olarak gösterilmiştir.



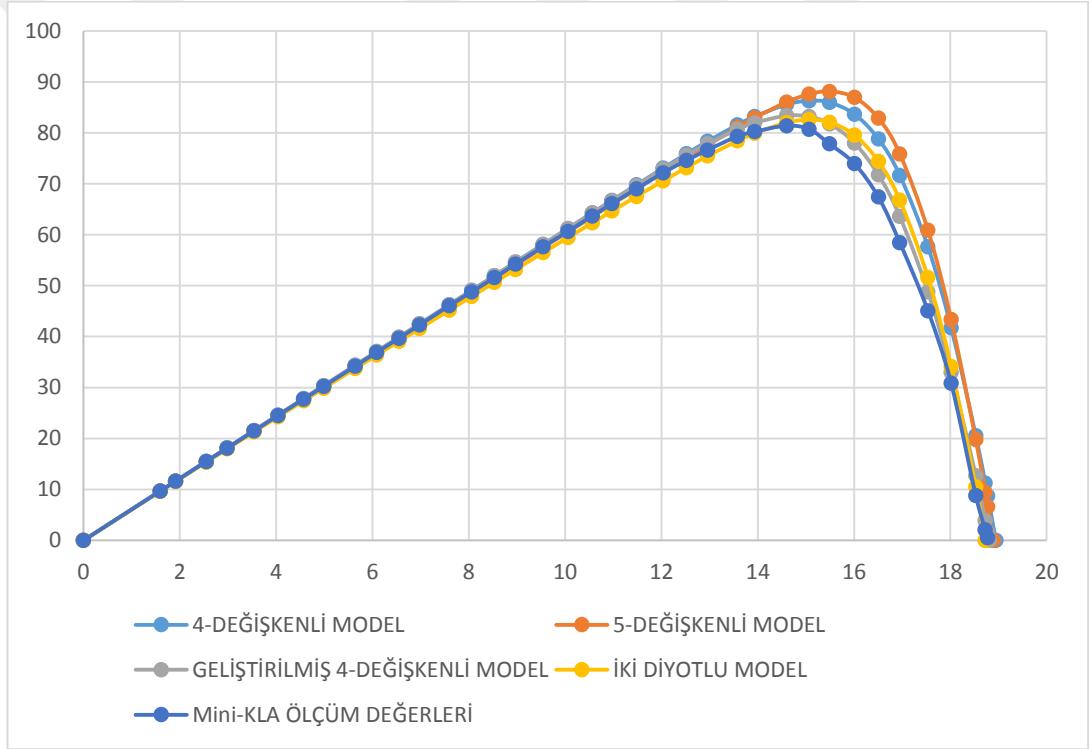
**Şekil 4.10.** 670 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 40°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

670 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 40°C sıcaklıkta ölçülen değerlere en yakın ışınım şiddeti olarak 694 W/m<sup>2</sup> ve 37°C sıcaklıkta yapılan ölçümlere ait değerler Şekil 4.11’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



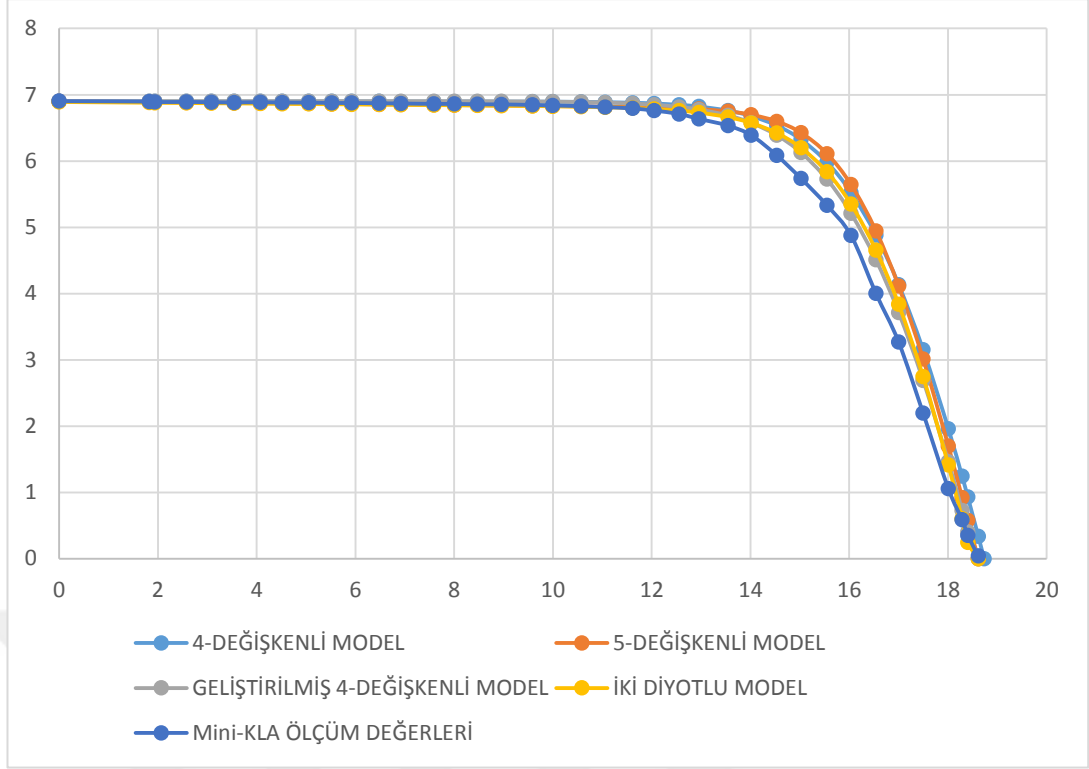
**Şekil 4.11.** 694 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 37°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

694 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 37°C sıcaklık koşullarında modeller üzerinden elde edilen eğriler ile ölçülen eğriler için  $R^2$  değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler 4-değişkenli model için %99,01, 5-değişkenli model için %97,61, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %99,83 ve 2-diyotlu model için %99,03'dür. Bu değerlere bakıldığında %99,83 ile geliştirilmiş 4-değişkenli modelin 694 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 37°C sıcaklıkta en doğru sonucu verdiği görülmektedir. *RMSE* değerleri incelendiğinde ise 4-değişkenli model için 0,304, 5-değişkenli model için 0,360, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,113 ve 2-diyotlu model için 0,161 olarak hesaplanmıştır. 694 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 37°C sıcaklıkta ölçülen değerler için hatanın minimum olduğu modelin geliştirilmiş 4-değişkenli model olduğu görülmektedir.



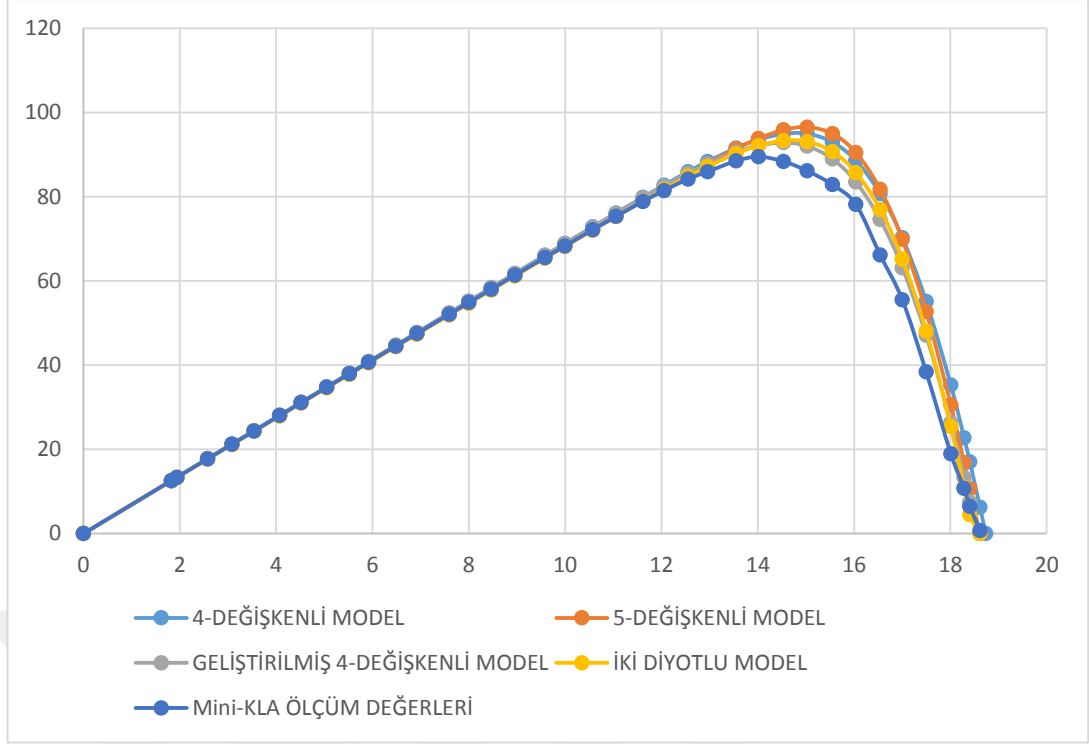
**Şekil 4.12.** 694 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 37°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

694 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 37°C sıcaklıkta elde edilen ölçüm değerleri ile modellerden elde edilen güç grafikleri Şekil 4.12'de verilmiştir.



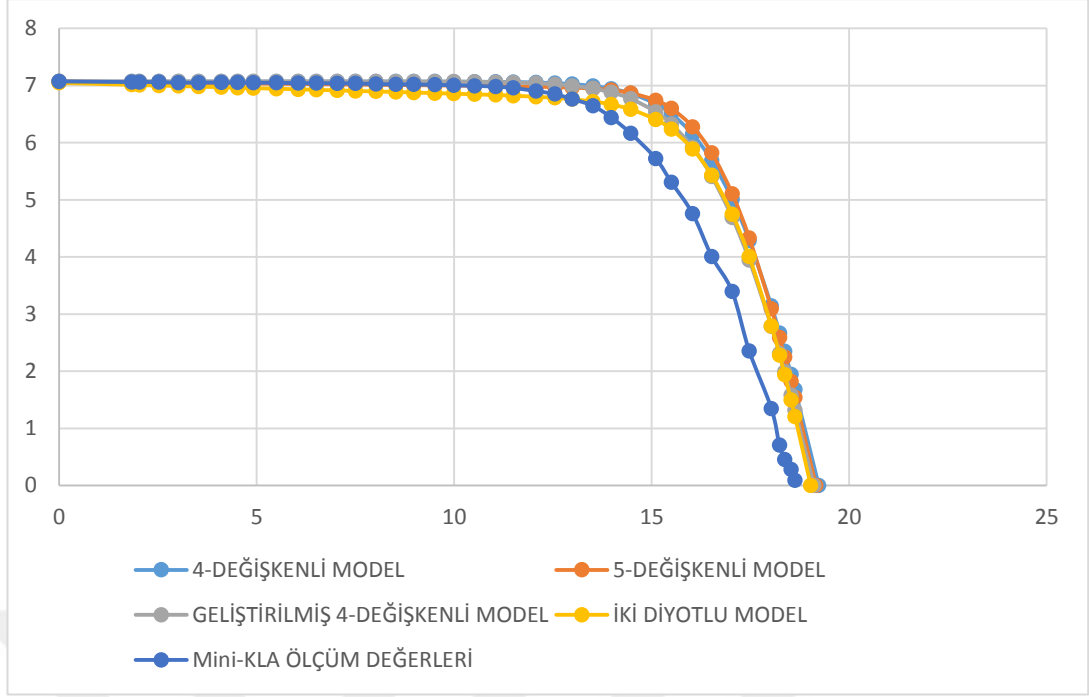
**Şekil 4.13.** 786 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 42°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

786 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 42°C sıcaklıkta elde edilen ölçümler ile model çözümlerinden elde edilen eğriler Şekil 4.13’de görülmektedir. Modellerden elde edilen sonuçlar ile ölçüm değerleri arasında  $R^2$  değerleri hesaplandığında 4-değişkenli model için %98,87, 5-değişkenli model için %98,14, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %99,51 ve 2-diyotlu model için %99,05 sonuçları elde edilmiştir. Bu değerlere göre 786 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 42°C sıcaklıkta ölçümlere en yakın sonuç geliştirilmiş 4-değişkenli model tarafından sağlanmaktadır. Yine aynı koşullarda *RMSE* değerleri 4-değişkenli model için 0,374, 5-değişkenli model için 0,348, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,193 ve 2-diyotlu model için 0,224 olarak hesaplanmıştır. 786 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 42°C sıcaklık koşulları için 4-değişkenli modelin minimum hata oranına sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.14.** 786 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 42°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

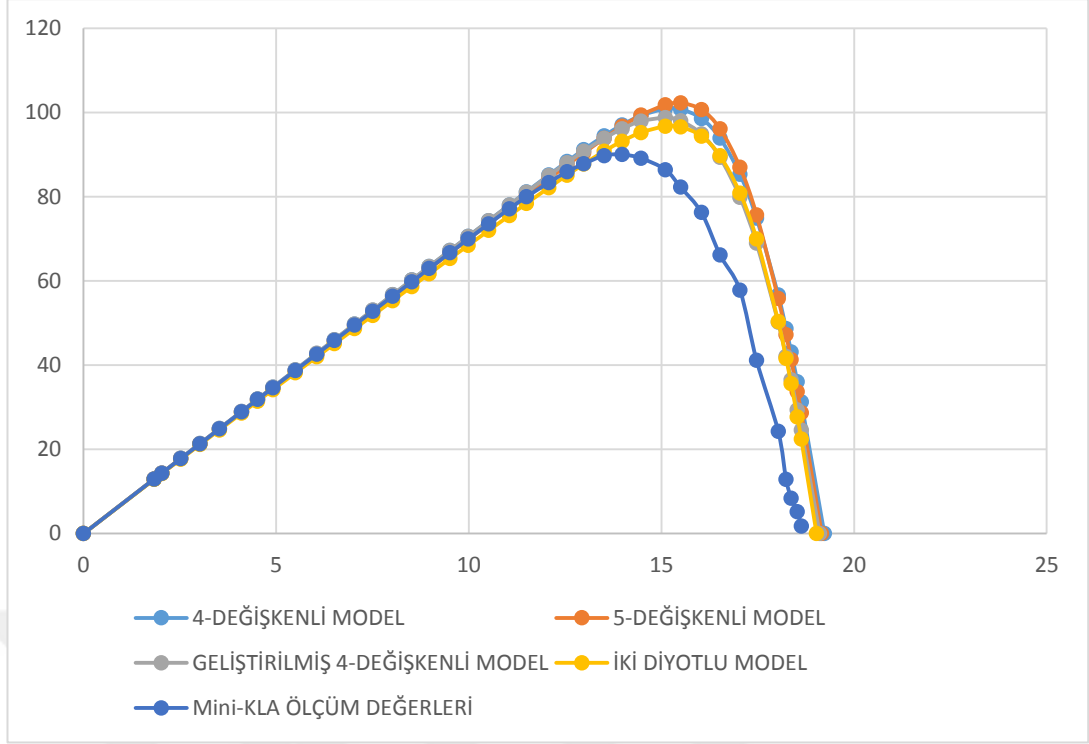
786 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 42°C sıcaklıkta alınan ölçümler ile model benzetim yöntemleri üzerinden elde edilen değerler sonucunda güç değerleri hesaplandığında Şekil 4.14'de belirtilen güç eğrisi grafiği elde edilmiştir. Belirtilen ışınım şiddetine en yakın ışınım şiddeti 806 W/m<sup>2</sup> ve sıcaklıkla olan değişimleri incelemek için ise 35°C sıcaklıkta yapılan ölçümler ve doğrultusunda fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi modelleri üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda ulaşılan grafik Şekil 4.15'de gösterilmektedir.



**Şekil 4.15.** 806 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 35°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

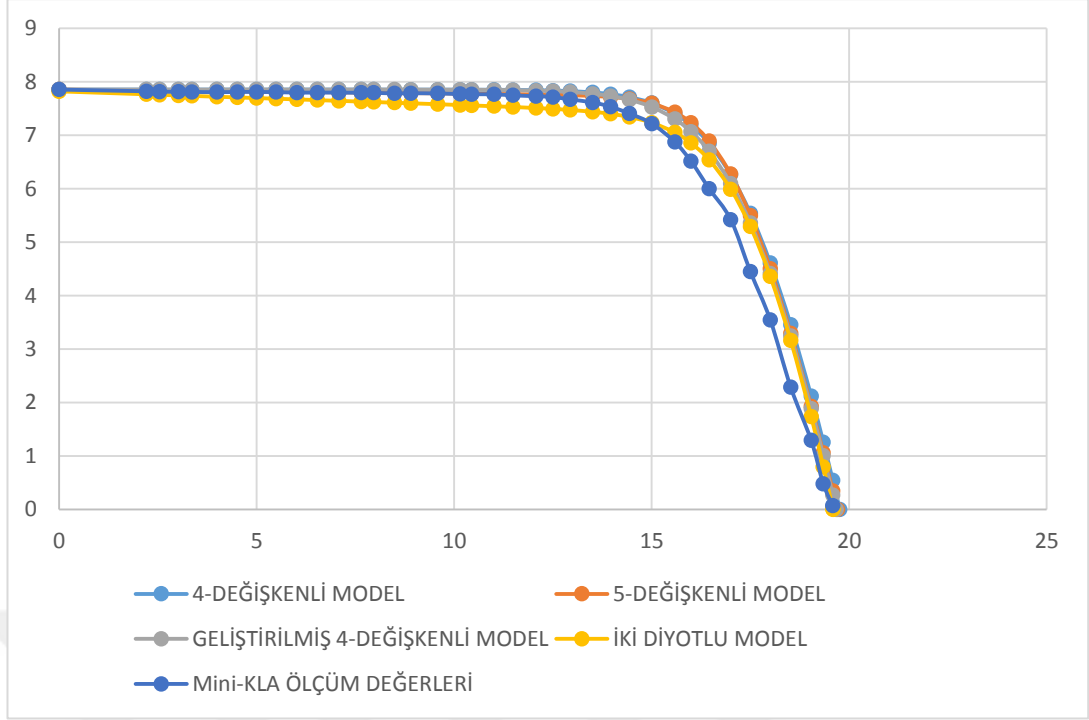
Modellerden elde edilen sonuçlar ile ölçüm değerleri arasında  $R^2$  değerleri; 4-değişkenli model için %97,45, 5-değişkenli model için %96,29, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %98,34 ve 2-diyotlu model için %97,72 olarak elde edilmektedir. 806 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 35°C sıcaklıkta  $R^2$  değerlerinden yola çıkarak 4-değişkenli model benzetiminden elde edilen sonuçların ölçüm değerlerini daha iyi tanımladığı görülmektedir.  $RMSE$  değerleri ise 4-değişkenli model için 0,861, 5-değişkenli model için 0,860, geliştirilmiş 4- değişkenli model için 0,702 ve 2-diyotlu model için 0,684 olarak hesaplanmıştır. 806 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 35°C sıcaklıkta ölçülen değerlere göre hatanın minimum olduğu modelin 2-diyotlu model olduğu görülmektedir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen güç değerleri Şekil 4.15’de grafik şeklinde gösterilmiştir.





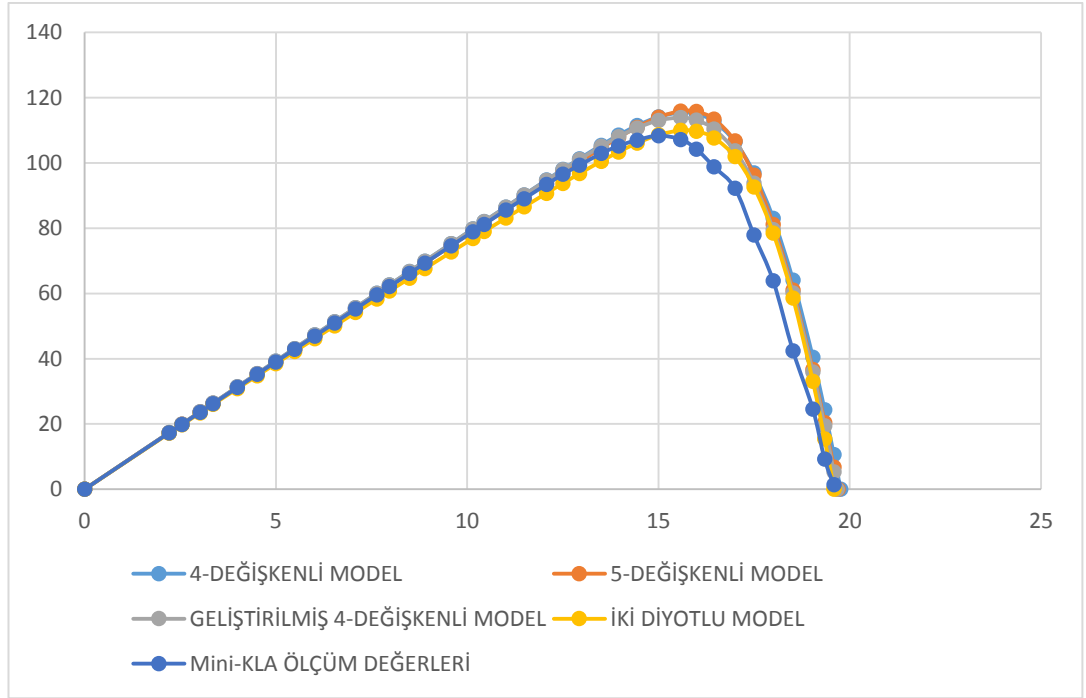
**Şekil 4.16.** 806 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 35°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

897 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 29°C sıcaklıkta yapılan ölçümler ile model benzetimlerinin çözümlenmesi ile ulaşılan değerler Şekil 4.16'da verilmektedir. Modellerin hesaplanmasıyla elde edilen sonuçlar ölçüm değerleriyle karşılaştırılarak  $R^2$  değerleri bulunmuştur. 897 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 29°C sıcaklıktaki  $R^2$  değerleri, 4-değişkenli model için %98,67, 5-değişkenli model için %98,38, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %99,00 ve 2-diyotlu model için %98,57 olarak belirlenmiştir. Bu ışınım şiddeti ve sıcaklık için en yakın model benzetiminin geliştirilmiş 4-parametrelili model olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında ölçüm değerleri ve model benzetim yöntemleri arasındaki  $RMSE$  değerleri: 4-değişkenli model için 0,436, 5-değişkenli model için 0,396, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,347 ve 2-diyotlu model için 0,306 olarak hesaplanmıştır. 897 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 29°C sıcaklıkta ölçülen değerlere göre hatanın minimum olduğu modelin 2-diyotlu model olduğu görülmektedir.



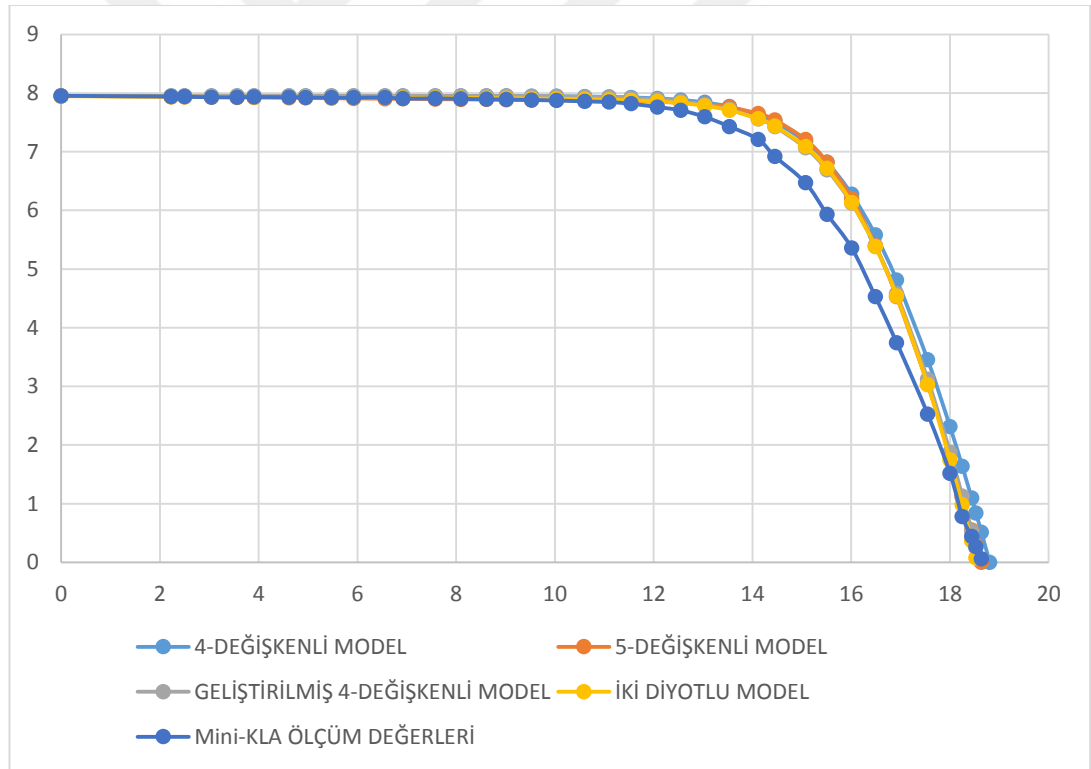
**Şekil 4.17.** 897 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

897 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 29°C sıcaklıkta yapılan ölçümler doğrultusunda, modeller üzerinden hesaplanan akım ve gerilim değerleri ile güç değerleri hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen güç eğrisi Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



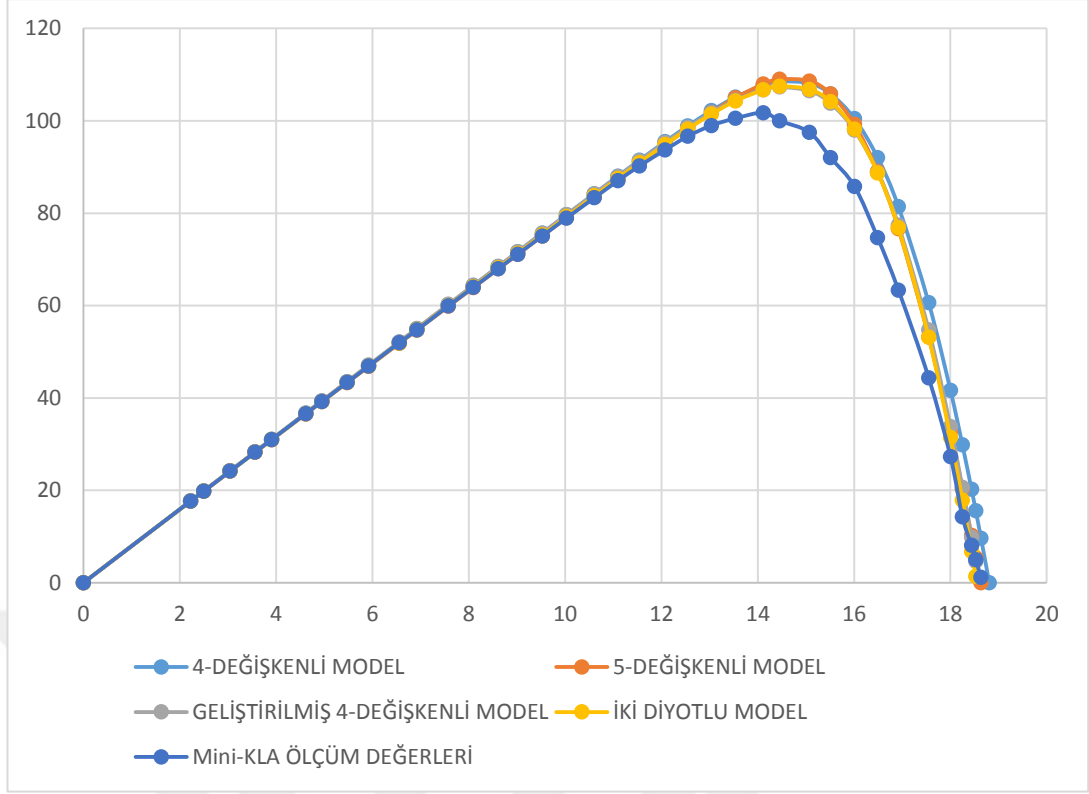
**Şekil 4.18.** 897 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 29°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

906 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 43°C sıcaklıkta I-V eğrisi analiz cihazı ile ölçülen referans koşulları için model benzetimleri çözümlenmiştir. Yapılan çözümlenmeler sonucunda, Şekil 4.18’de verilen grafiğe ulaşılmıştır. Çözümleme sonucunda bulunan değerler ölçüm değerleri ile karşılaştırılarak  $R^2$  değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler, modeller ile ölçümler arasında; 4-değişkenli model için %98,92, 5-değişkenli model için %98,73, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %98,91 ve 2-diyotlu model için ise %98,69 oranında benzerlik sonuçlarına yol açmaktadır. Söz konusu ışınım şiddeti ve sıcaklık değeri için model benzetimlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında *RMSE* değerleri; 4-değişkenli model için 0,451, 5-değişkenli model için 0,336, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,318 ve 2-diyotlu model için 0,307 olarak hesaplanmıştır. 906 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde ve 43°C sıcaklıkta ölçülen değerlere göre hatanın minimum olduğu modelin 2-diyotlu model olduğu görülmektedir.



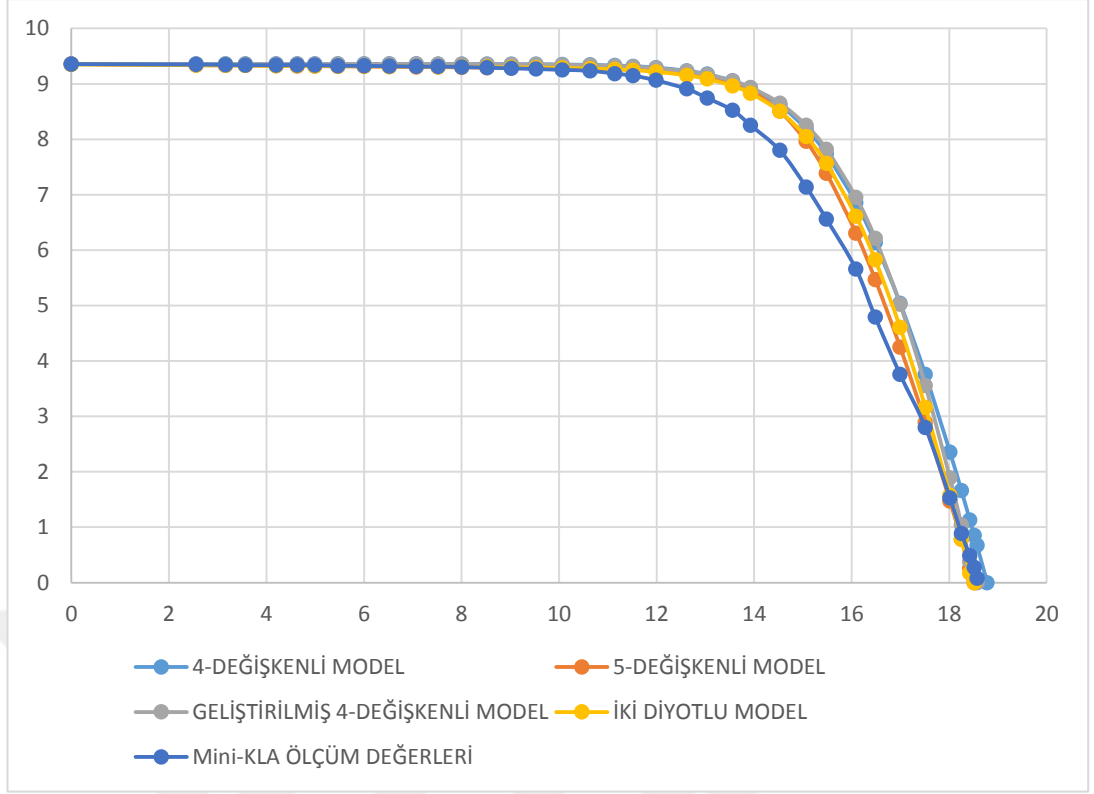
**Şekil 4.19.** 906 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 43°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

906 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 43°C sıcaklıkta yapılan ölçümler ve model benzetim yöntemleri ile elde edilen sonuçlar kullanılarak bulunan güç eğrisi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



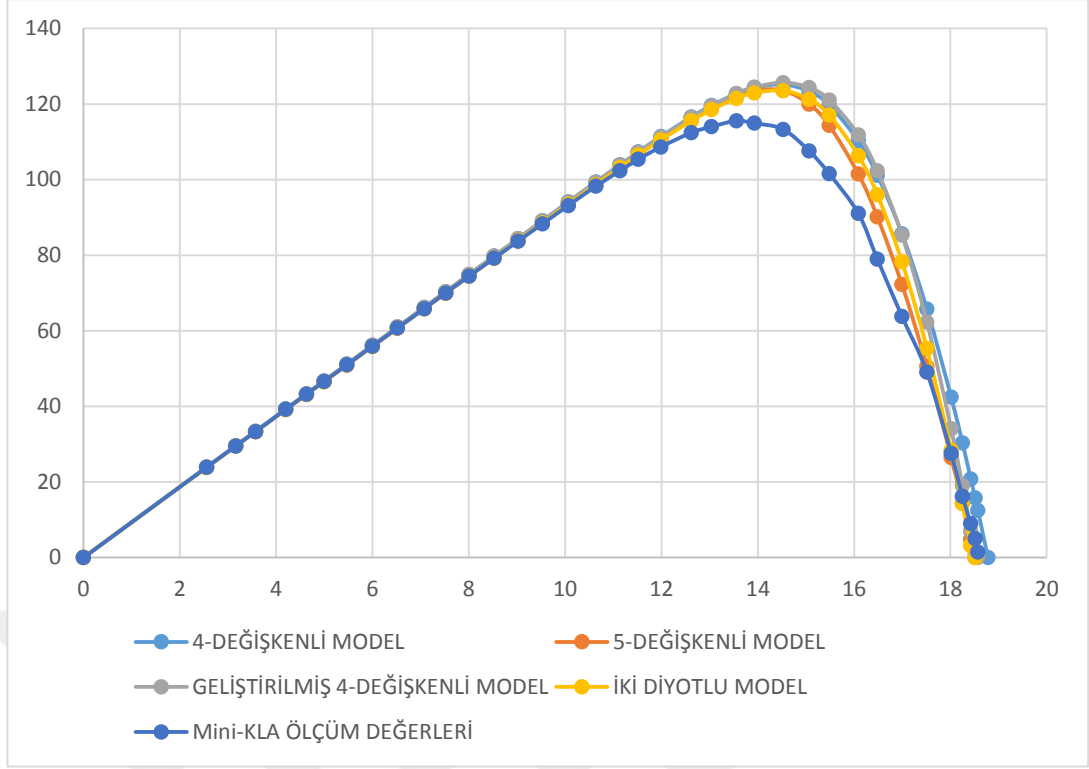
**Şekil 4.20.** 906 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 43°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

1066 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 46°C sıcaklıkta elde edilen ölçüm değerleri kullanılarak model çözümlenmeleri yapılmıştır. Bu çözümlenmeler sonucunda elde edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması sonucunda şu  $R^2$  değerleri elde edilmiştir: 4-değişkenli model için %98,77, 5-değişkenli model için %98,97, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %97,92 ve 2-diyotlu model için %98,44. Aynı ışınım şiddeti ve sıcaklık değeri için  $RMSE$  değerleri; 4-değişkenli model için 0,552, 5-değişkenli model için 0,314, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,513 ve 2-diyotlu model için 0,385 olarak hesaplanmıştır. 1066 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 46°C sıcaklık koşulları için  $RMSE$  değerine göre hatanın minimum olduğu ve  $R^2$  değerine göre benzetimin en yüksek olduğu modelin 5-değişkenli model olduğu görülmektedir.



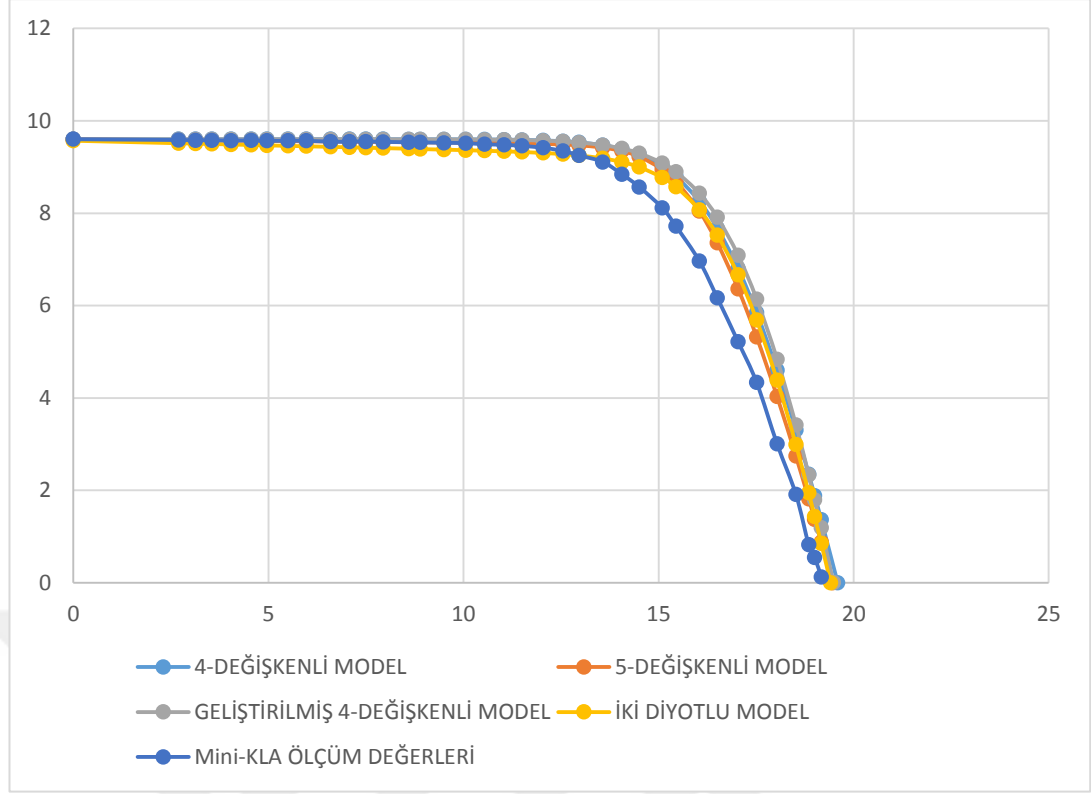
**Şekil 4.21.** 1066 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 46°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

1066 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 46°C sıcaklık için ölçülen ve model benzetimleri üzerinden yapılan çözümler sonucunda elde edilen I-V eğrileri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Model benzetimlerinden elde edilen akım ve gerilim değerleri kullanılarak elde edilen güç değerleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



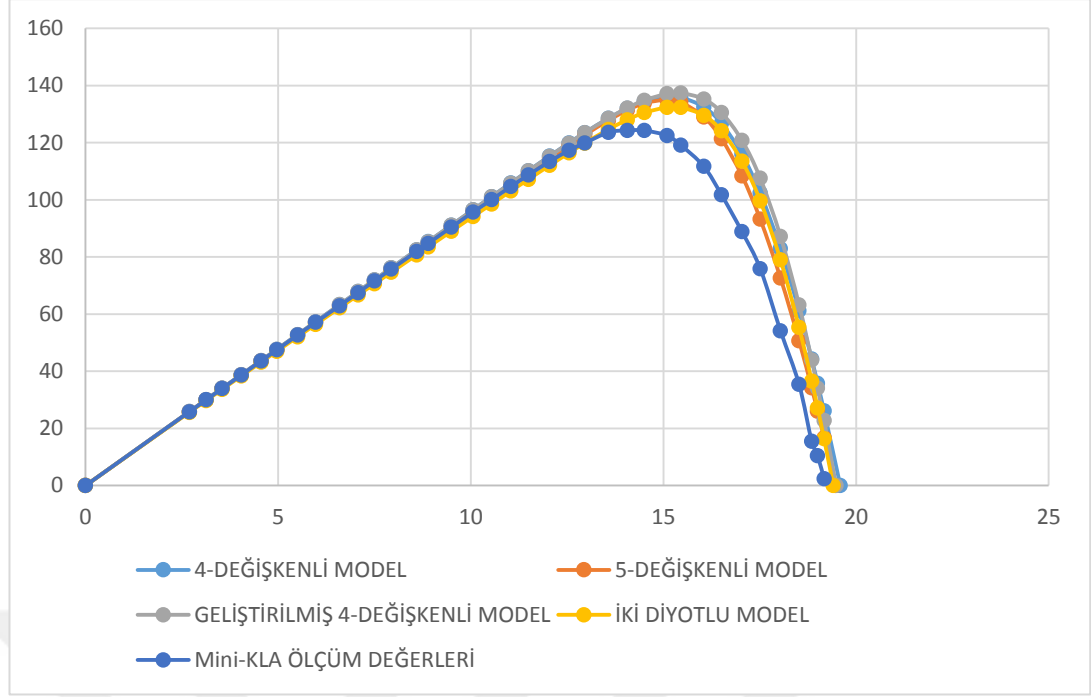
**Şekil 4.22.** 1066 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 46°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

1066 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti ve 46°C sıcaklıkta yapılan ölçüm değerlerini karşılaştırmak için bir diğer yüksek ışınım şiddeti değeri olan 1095 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddetinde fakat bu defa sıcaklık 34°C’de ölçüm yapılmıştır. Bunun amacı, yüksek ışınım şiddetinde sıcaklığın fotovoltaik panel üzerinden ölçülen ve model benzetim yöntemlerinden hesaplanan akım ve gerilim değerlerine olan etkilerini incelemektir. Yapılan ölçüm sonucunda elde edilen değerler ve model benzetim yöntemleri çözümlenerek ulaşılan akım ve gerilim değerleri Şekil 4.23’de verilmektedir.



**Şekil 4.23.** 1095 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 34°C Sıcaklıkta Akım ve Gerilim Değerleri.

Ölçülen ve model benzetimlerinden elde edilen değerleri kıyaslamak için hesaplanan  $R^2$  değerleri; 4-değişkenli model için %98,45, 5-değişkenli model için %98,82, geliştirilmiş 4-değişkenli model için %97,47 ve 2-diyotlu model için %98,22 olarak elde edilmiştir. Bu ışınım şiddeti ve sıcaklıkta ölçüm değerlerine en yakın benzetim gösteren modelin 5-değişkenli model olduğu görülmektedir. Aynı koşullarda model benzetimlerindeki hatayı analiz etmek için  $RMSE$  değerleri incelendiğinde ise 4-değişkenli model için 0,733, 5-değişkenli model için 0,525, geliştirilmiş 4-değişkenli model için 0,797 ve 2-diyotlu model için 0,591 değerleri elde edilmiştir.  $RMSE$  değerlerine bakıldığında ise hatanın minimum olduğu benzetim yönteminin 5-değişkenli model olduğu görülmektedir. Söz konusu ışınım şiddeti ve sıcaklıkta hesaplaması ve ölçümü yapılan akım ve gerilim değerinden elde edilen güç eğrisi Şekil 4.24’de verilmektedir.



**Şekil 4.24.** 1095 W/m<sup>2</sup> Işınım Şiddeti ve 34°C Sıcaklıkta Güç Değerleri.

Buraya kadar elde edilen ve incelenen  $R^2$  değerleri toplu olarak Tablo 4.7’de verilmiştir.

**Tablo 4.7.** Fotovoltaik Eşdeğer Elektrik Devresi Modellemeleri ile Ölçümler Arasındaki  $R^2$  Değerleri

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	4-Değişkenli Model (%)	5-Değişkenli Model (%)	Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model (%)	2-Diyotlu Model (%)
396	24	99,10	95,86	99,35	99,86
402	29	99,63	97,64	99,30	99,11
670	40	98,79	97,30	99,69	98,93
694	37	99,01	97,61	99,83	99,03
786	42	98,87	98,14	99,51	99,05
806	35	97,45	96,29	98,34	97,72
897	29	98,67	98,38	99,00	98,57
906	43	98,92	98,73	98,91	98,69
1066	46	98,72	98,71	97,92	98,44
1095	34	98,45	98,82	97,47	98,22



Tablo 4.7 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, düşük ışınım seviyelerinde 4-değişkenli, geliştirilmiş 4-değişkenli ve 2-diyotlu model benzetiminin  $R^2$  değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Düşük ışınım seviyelerinde, 5-değişkenli modelin diğer model benzetimlerine oranla daha düşük  $R^2$  değerine sahip olduğu görülmektedir. Orta seviyelerdeki ışınım şiddetlerine bakıldığında, geliştirilmiş 4-değişkenli model benzetiminin  $R^2$  değerlerinin 1'e daha yakın olduğu görülmektedir. Yüksek ışınım şiddetlerinde ise 5-değişkenli model benzetiminin diğer model benzetimlerine oranla ölçümlere daha yakınsak değerler verdiği gözlemlenmektedir.

Hesaplamalar sonucunda ulaşılan *RMSE* değerleri toplu olarak Tablo 4.8'de görülmektedir. *RMSE* metoduyla hata analizine bakıldığı zaman, düşük ışınım şiddetinde model benzetimlerinin ölçüm değerleri ile farkının çok fazla olmadığı görülmektedir. Işınım şiddetinin yükselmesiyle birlikte özellikle 2-diyotlu ve 5-değişkenli model benzetimlerinin göreceli olarak daha düşük hata oranlarına yol açtığı görülmektedir.

**Tablo 4.8.** Fotovoltaik Eşdeğer Elektrik Devresi Modellemeleri ile Ölçümler Arasındaki *RMSE* Değerleri

G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	4-Değişkenli Model	5-Değişkenli Model	Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model	2-Diyotlu Model
396	24	0,192	0,363	0,093	0,220
402	29	0,289	0,490	0,111	0,202
670	40	0,585	0,630	0,343	0,376
694	37	0,304	0,360	0,113	0,161
786	42	0,374	0,348	0,193	0,224
806	35	0,861	0,860	0,702	0,684
897	29	0,436	0,396	0,347	0,306
906	43	0,451	0,336	0,318	0,307
1066	46	0,552	0,314	0,513	0,385
1095	34	0,733	0,525	0,797	0,591

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı ışınım şiddeti ve sıcaklıklarda I-V eğrisi analiz cihazı ile ölçülen değerler ve bu ölçümlerin yapıldığı referans koşullarında model çözümlerinden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Yakın ışınım seviyesinde farklı sıcaklık değerlerinde alınan ölçümlere bakılarak, sıcaklığın ve farklı ışınım seviyelerinde yakın sıcaklık değerlerinde alınan ölçümler ile de ışınım şiddetinin fotovoltaik karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bolu ilinde yapılan deneyler ile fotovoltaik modelden elde edilebilecek maksimum güç değerleri hesaplanmış ve en uygun fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi belirlenmeye çalışılmıştır.

**Tablo 5.1.** Hesaplanan Modellerin İstatistiksel Değerlerinin Ortalaması

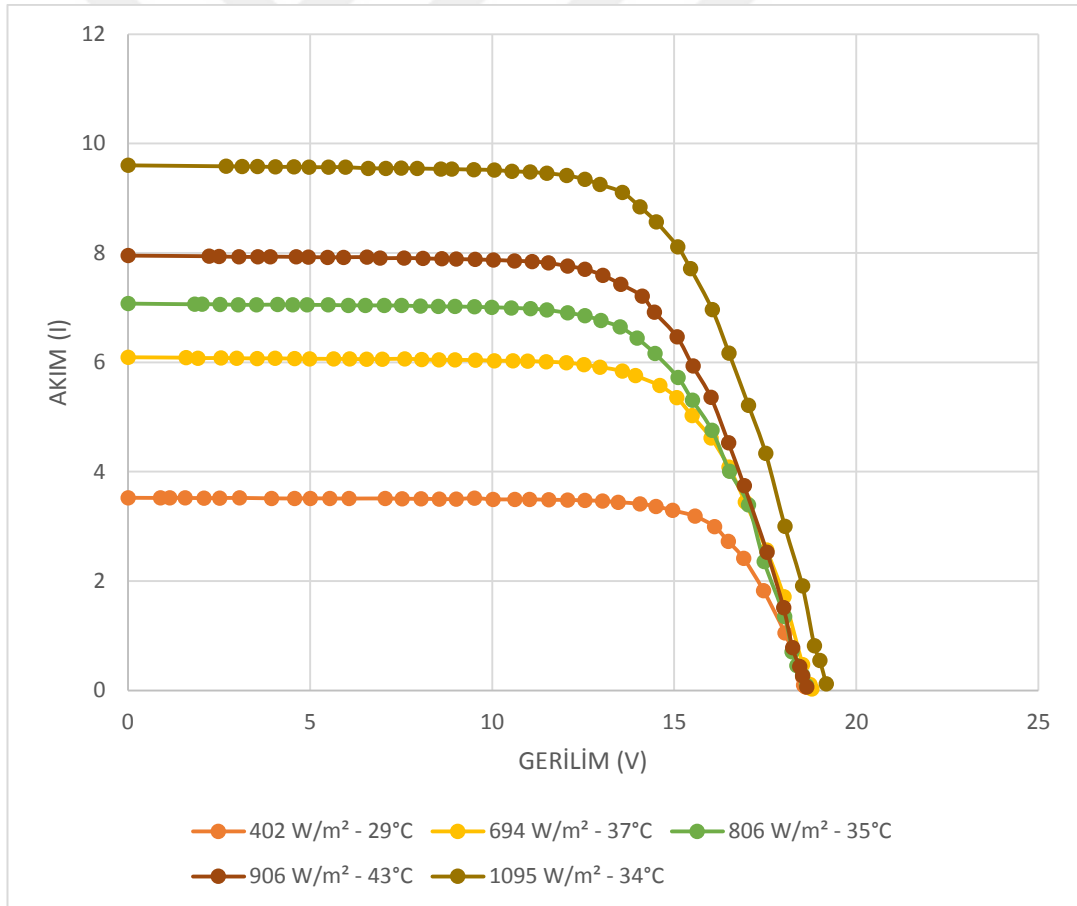
İstatiksel Yöntem	4-Değişkenli Model	5-Değişkenli Model	Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model	2-Diyotlu Model
$R^2$	%98,76	%97,78	%98,93	%98,65
$RMSE$	0,477	0,462	0,353	0,345

Ölçümler ve model çözümlerinden elde edilen değerler,  $R^2$  ve  $RMSE$  olmak üzere iki farklı istatistiksel yöntemle karşılaştırılmışlardır. Elde edilen  $R^2$  ve  $RMSE$  değerlerinin ortalamaları Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu çerçevede, 4 değişkenli model için  $R^2$  değerlerine bakıldığı zaman ortalama %98,76 sonucu elde edilmiştir. Söz konusu model için ortalama  $RMSE$  değeri 0,477 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde, I-V eğrisi analiz cihazı ile yapılan ölçümler ile 5-değişkenli modelden elde edilen akım değerlerinin ortalama %97,78  $R^2$  sonucuna yol açtığı hesaplanmıştır. Aynı model için ortalama  $RMSE$  değerinin 0,462 olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilmiş 4-değişkenli model için  $R^2$  değerlerinin ortalaması hesaplandığında %98,93 oranında bir benzerlik sonucu elde edilmiştir.  $RMSE$  metodu ile yapılan hesaplamaların ortalamasında ise 0,353 sonucu bulunmuştur. 2-diyotlu modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında %98,65 oranında bir  $R^2$  değerine ulaşılmıştır. Aynı model benzetimi için  $RMSE$  yöntemiyle bulunan hata oranının ortalaması alındığında

0,345 sonucu elde edilmiştir. Genel olarak bu oranlar incelendiğinde I-V eğrisi analiz cihazı ile alınan ölçümlere en yakın model benzetiminin geliştirilmiş 4-değişkenli model olduğu görülmektedir.

## 5.1 Işınım Şiddetinin Etkisi

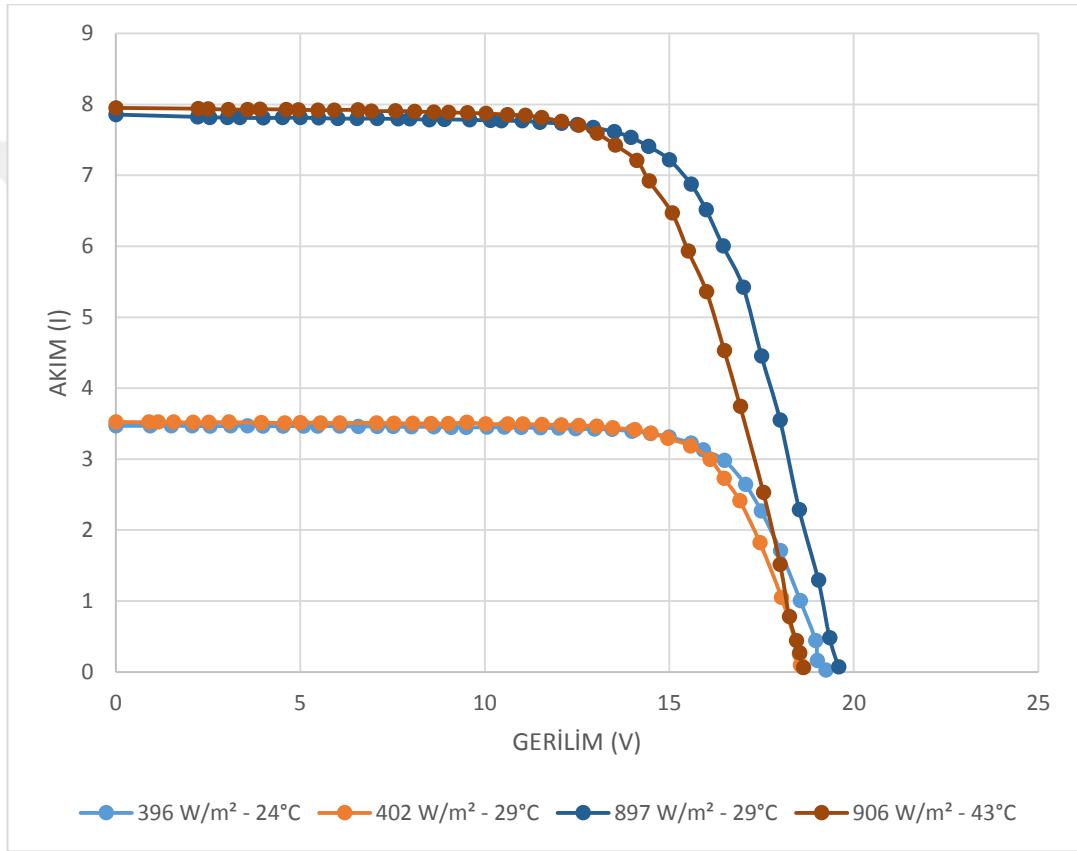
Işınım şiddetinin fotovoltaik panel üzerindeki etkisini incelemek için I-V eğrisi analiz cihazı ile alınan ölçümlere bakıldığında; ışınım şiddetinin artmasının kısa devre akım ( $I_{sc}$ ) değerini önemli derecede artırdığı, bununla birlikte açık devre gerilim ( $V_{oc}$ ) değerini de bir miktar artırdığı görülmektedir (Şekil 5.1). Bunun sonucunda, fotovoltaik panelden elde edilen güç artmaktadır. Fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi modellerine bakıldığı zaman da benzer sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.1. Işınım Şiddeti Etkisinin I-V Grafiği Üzerinde Gösterimi.

## 5.2 Sıcaklığın Etkisi

I-V eğrisi analiz cihazı ile yapılan ölçümlerden yola çıkarak, sıcaklığın fotovoltaik panel üzerindeki etkilerine bakıldığında, sıcaklığın kısa devre akım ( $I_{sc}$ ) değerini bir miktar yükselttiği, fakat açık devre gerilim ( $V_{oc}$ ) değerinin önemli ölçüde düşmesine sebep olduğu görülmektedir (Şekil 5.2). Bu değişikliklerin toplam etkisi, fotovoltaik panelden elde edilebilecek güç değerinin önemli ölçüde düşmesi şeklinde tezahür etmektedir.



Şekil 5.2. Sıcaklığın Etkisinin I-V Grafiği Üzerinde Gösterimi.

### 5.2.1 Öneriler

Fotovoltaik paneller üzerinde önemli ölçüde etkili olan ışınım şiddeti ve sıcaklığın yanı sıra, seri devre direnci ( $R_s$ ), paralel devre direnci ( $R_{sh}$ ), kısa devre akımı sıcaklık katsayısı ( $\mu_{I_{sc}}$ ) ile açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı ( $\mu_{V_{oc}}$ ) gibi parametrelerin fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi model benzetimleri üzerinde

önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışmada literatürden alınan ve sabit olarak kabul edilen paralel devre ( $R_{sh}$ ) ve seri devre direnç ( $R_s$ ) değerlerinin mevcut fotovoltaik panel için daha doğru bir şekilde hesaplanmasının elde edilen sonuçların doğruluk derecesini geliştireceği tahmin edilmektedir. Model benzetimleri ile ölçümler arasında görülen açık devre gerilimindeki farklar bize ( $\mu_{Voc}$ ) değerinin gerçek değerden bir miktar uzak olabileceğini göstermektedir. Aynı şekilde, kısa devre akımında görülen farkların ise ( $\mu_{Isc}$ ) değerindeki farklılıktan kaynaklanabileceği göz önüne alınmalıdır. Fotovoltaik hücrelerin karaktersitikleri üzerinde önemli etkiye sahip olan bu parametrelerin söz konusu panel için gerçeğe daha yakın değerlerinin tespit edilmesinin, matematiksel modellerin tahmin gücünü önemli ölçüde geliştirebileceği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- AlHajri M, El-Naggar K, AlRashidi M and Al-Othman A (2012) “Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search”, *Renewable energy*, 44: 238-245.
- AlRashidi M, AlHajri M, El-Naggar K and Al-Othman A (2011) “A new estimation approach for determining the I–V characteristics of solar cells”, *Solar Energy*, 85(7): 1543-1550.
- Altaş İ (1998) “Fotovoltaaj güneş pilleri: yapısal özellikleri ve karakteristikleri”, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47: 66-71.
- Askarzadeh A and Rezazadeh A (2012) “Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms”, *Solar Energy*, 86(11): 3241-3249.
- Askarzadeh A and Rezazadeh A (2013a) “Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models”, *Applied energy*, 102: 943-949.
- Askarzadeh A and Rezazadeh A (2013b) “Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach”, *Solar Energy*, 90: 123-133.
- Bahcall JN (1989) *Neutrino astrophysics*, Cambridge University Press.
- Beckwith A (2016) “Non-Linear Electrodynamics Gedanken Experiment for Modified Zero Point Energy and Planck’s “Constant”,  $h$  Bar, in the Beginning of Cosmological Expansion, So  $h$  (Today)=  $h$  (Initial). Also How to Link Gravity, Quantum Mechanics, and E and M through Initial Entropy Production in the Early Universe”, *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 2(02): 168.
- Brano VL, Orioli A, Ciulla G and Di Gangi A (2010) “An improved five-parameter model for photovoltaic modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(8): 1358-1370.
- Celik AN and Acikgoz N (2007) “Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models”, *Applied energy*, 84(1): 1-15.
- Chenni R, Makhlof M, Kerbache T and Bouzid A (2007) “A detailed modeling method for photovoltaic cells”, *Energy*, 32(9): 1724-1730.

- Chin VJ, Salam Z and Ishaque K (2015) "Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review", *Applied energy*, 154: 500-519.
- da Costa WT, Fardin JF, Simonetti DS and de VBM Neto L (2010) "Identification of photovoltaic model parameters by differential evolution", *Industrial Technology (ICIT)*, 2010 IEEE International Conference on.
- De Blas M, Torres J, Prieto E and Garcia A (2002) "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices", *Renewable energy*, 25(3): 371-380.
- De Soto W, Klein S and Beckman W (2006) "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", *Solar Energy*, 80(1): 78-88.
- Doğanay H (1998) "Enerji Kaynakları, Şafak Yayınevi, Genişletilmiş 2", Baskı, Erzurum.
- Duffie JA and Beckman WA (2013) *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons.
- Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I and Boutrif C (1986) "Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers", *International Journal of Solar Energy*, 4(1): 1-12.
- El-Naggar K, AlRashidi M, AlHajri M and Al-Othman A (2012) "Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification", *Solar Energy*, 86(1): 266-274.
- Factbook O "Factbook 2015–2016: Economic, Environmental and Social Statistics [Electronic resource]", Mode of access: <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/3015041e.pdf>.
- Godier S and Rozelot J-P (2000) "The solar oblateness and its relationship with the structure of the tachocline and of the Sun's subsurface", *Astronomy and Astrophysics*, 355: 365-374.
- Gong W and Cai Z (2013) "Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution", *Solar Energy*, 94: 209-220.
- Green MA (1982) "Solar cells: operating principles, technology, and system applications".
- Gujarati DN, Porter DC, Şenesen Ü and Günlük-Şenesen G (2012) *Temel ekonometri, Literatür Yayıncılık*.
- Henshilwood CS, Marean CW, Chase P, Davidson I, Gamble C, Holliday TW, Klein RG, Mc Brearty S, Zilhão J and Henshilwood CS (2003) "The origin of modern human behavior: critique of the models and their test implications", *Current anthropology*, 44(5): 627-651.

- Hishikawa Y, Imura Y and Oshiro T (2000) "Irradiance-dependence and translation of the IV characteristics of crystalline silicon solar cells", Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE.
- Ishaque K, Salam Z and Taheri H (2011) "Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model", Simulation Modelling Practice and Theory, 19(7): 1613-1626.
- Jordan TH (1979) "Structural geology of the Earth's interior", Proceedings of the National Academy of Sciences, 76(9): 4192-4200.
- Khanna V, Das B, Bisht D and Singh P (2015) "A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm", Renewable energy, 78: 105-113.
- Khezzar R, Zereg M and Khezzar A (2014) "Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules", Solar Energy, 110: 452-462.
- Koç E and Şenel MC (2013) "Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme", Mühendis ve Makina, 54(639): 32-44.
- Kou Q, Klein S and Beckman W (1998) "A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems", Solar Energy, 64(1-3): 33-40.
- Kurtçu A, Dinçer H, Dinçer D and Uzunkaya AT (2009) "Güneş Işınımlı Şebeke Uyumlu Elektrik Enerjisi Üretim Sistemi".
- Lehrman RL (1973) "Energy is Not the Ability to do Work", Physics Teacher, 11(1): 15-18.
- Ma J, Ting T, Man KL, Zhang N, Guan S-U and Wong PW (2013) "Parameter estimation of photovoltaic models via cuckoo search", Journal of Applied Mathematics, 2013.
- Marion B, Rummel S and Anderberg A (2004) "Current-voltage curve translation by bilinear interpolation", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 12(8): 593-607.
- Mars J and Saturn U (1981) "Solar system".
- MMO. (2012). Makine Mühendisleri Odası - Oda Raporu - Dünyada ve Türkiye'de Enerji Verimliliği.
- Moldovan N, Picos R and Garcia-Moreno E (2009) "Parameter extraction of a solar cell compact model usign genetic algorithms", Electron Devices, 2009. CDE 2009. Spanish Conference on.



- Ortiz-Conde A, Ma Y, Thomson J, Santos E, Liou J, Sánchez FGa, Lei M, Finol J and Layman P (1999) "Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method", *Solid-State Electronics*, 43(4): 845-848.
- Ozcalık HR, Yılmaz S and Kılıç E (2013) "Güneş Pili Bir Diyotlu Eşdeğer Devre Yardımıyla Matematiksel Modelinin Çıkartılması ve Parametrelerinin İncelenmesi", *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 16(1).
- Petroleum B. (2012). *BP statistical review of world energy*: London: British Petroleum.
- Rahim NA, Ping HW and Selvaraj J (2013) "Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab", *Procedia Environmental Sciences*, 17: 537-546.
- Rajasekar N, Kumar NK and Venugopalan R (2013) "Bacterial foraging algorithm based solar PV parameter estimation", *Solar Energy*, 97: 255-265.
- Ramos Hernanz J, Martín C and Belver JZ (2010) "I., Larrañaga Lesaka, J., Zulueta Guerrero, E. Puelles Pérez, E.," Modeling of Photovoltaic Module", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada (Spain), 23th to 25th March*.
- Rauschenbach HS (2012) *Solar cell array design handbook: the principles and technology of photovoltaic energy conversion*, Springer Science & Business Media.
- Saha P, Kumar S, Nayak SK and Sahu HS (2015) "Parameter estimation of double diode photo-voltaic module", *Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), 2015 1st Conference on*.
- Sandrolini L, Artioli M and Reggiani U (2010) "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis", *Applied energy*, 87(2): 442-451.
- Sellami A and Bouaïcha M (2011) Application of the genetic algorithms for identifying the electrical parameters of PV solar generators *Solar cells-silicon wafer-based technologies*: InTech.
- Streetman BG and Banerjee SK (2016) *Solid State Electronic Devices: Global Edition*, Pearson Education.
- Taylor BN, Mohr PJ and Douma M (2007) "The NIST Reference on constants, units, and uncertainty", available online from: [physics.nist.gov/cuu/index](http://physics.nist.gov/cuu/index).
- Thoul AA, Bahcall JN and Loeb A (1993) "Element diffusion in the solar interior", *arXiv preprint astro-ph/9304005*.

- Toprak A, Kılıç HŞ, Toprak A and Kepçeoğlu A (2016) “Güneş Pilinin Tek Diyot Rs Model Parametrelerinin Hesaplanması ve I-V İle PV Karakteristiklerinin İncelenmesi”, Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi(12): 13-22.
- Ulapane NN, Dhanapala CH, Wickramasinghe SM, Abeyratne SG, Rathnayake N and Binduhewa PJ (2011) “Extraction of parameters for simulating photovoltaic panels”, Industrial and Information Systems (ICIIS), 2011 6th IEEE International Conference on.
- Varınca KB and Gönüllü MT (2006) “Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma”, I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi: 270-275.
- Waldauf C, Schilinsky P, Hauch J and Brabec CJ (2004) “Material and device concepts for organic photovoltaics: towards competitive efficiencies”, Thin Solid Films, 451: 503-507.
- Willmott CJ and Matsuura K (2005) “Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance”, Climate research, 30(1): 79-82.
- Xiao W, Dunford WG and Capel A (2004) “A novel modeling method for photovoltaic cells”, Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual.
- Ye M, Wang X and Xu Y (2009) “Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization”, Journal of Applied Physics, 105(9): 094502.
- Yılmaz M (2012) “Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi”, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 4(2): 33-54.
- Zhou W, Yang H and Fang Z (2007) “A novel model for photovoltaic array performance prediction”, Applied energy, 84(12): 1187-1198.

## 7. ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Fatih KOÇ

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Bolu - 1990

**Lisans Üniversite** : Abant İzzet Baysal Üniversitesi

**Elektronik posta** : fatihkoc14@yandex.com

**İletişim Adresi** : Abant İzzet Baysal Üniversitesi