

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



**FOTOVOLTAİK BİR MODÜLÜN FARKLI MODELLER
KULLANARAK ELEKTRİKSEL MODELLENMESİ VE
DENEYSEL DOĞRULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERSAL GEZER

BOLU, MAYIS - 2019

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



**FOTOVOLTAİK BİR MODÜLÜN FARKLI MODELLER
KULLANARAK ELEKTRİKSEL MODELLENMESİ VE
DENEYSEL DOĞRULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERSAL GEZER

BOLU, MAYIS - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ersal GEZER tarafından hazırlanan “FOTOVOLTAİK BİR MODÜLÜN FARKLI MODELLER KULLANARAK ELEKTRİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI” adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 30/05/2019 tarihinde BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

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

Üye
Doç. Dr. Ali Etem GÜREL
Düzce Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Gürcan YILDIRIM
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

İmza



Prof. Dr. Ömer ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



XXK

Eşime ve Kızıma,

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Ersal GEZER

ÖZET

FOTOVOLTAİK BİR MODÜLÜN FARKLI MODELLER KULLANARAK ELEKTRİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERSAL GEZER

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

BOLU, MAYIS - 2019

Güneş enerjisinin kaynağı, güneş sistemimizin merkezinde bulunan yıldızın çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan elektromanyetik ve ısı enerjisidir. Güneşten gelen bu enerjinin atmosfer dışı değeri yaklaşık olarak 1367 W/m^2 'dir ve bu değer "güneş sabiti" olarak adlandırılır. Dünyamıza gelen bu enerjinin belli bir miktarı atmosfer tarafından uzaya geri yansıtılır. Atmosfer içerisinde ise yansıma, dağılma, soğrulma ve diğer engeller sonucunda deniz seviyesinde $0-1100 \text{ W/m}^2$ aralığında değerler alabilmektedir. Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilen yarı iletken yapılardan oluşan enerji dönüşüm cihazlarıdır. Bu çalışmada, 36 adet fotovoltaik hücreden oluşan polikristal bir panel kullanarak Bolu ilinde Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde prototip bir deney sistemi kurulmuştur. Bu deneysel sistem, fotovoltaik modülün yanı sıra, sistem karakteristiklerini ölçmek için sensörler, veri kayıt cihazı ve elektronik kontrol ünitesi içermektedir.

Bu deney sistemi vasıtasıyla 6 ayrı gün için her 10 dakikada bir ışınım şiddeti (G), sıcaklık (T), gerilim (V) ve akım (A) değerleri ölçülerek model benzetimlerinden elde edilen akım ve voltaj değerleri ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu günler için zamana bağlı olarak 4 değişkenli model, geliştirilmiş 4 değişkenli model, 5 değişkenli model ve 2 diyot model olmak üzere toplam 4 farklı analitik I-V eğri modeli ile akım ve gerilim çözümlemesi yapılarak elde edilen değerler, ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Modellerden hesaplanan ve ölçülen gerçek veriler, RMSE ve R^2 istatistiksel yaklaşım yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Söz konusu istatistiksel parametrelere göre fotovoltaik deney düzeneğinden toplanan veriler doğrultusunda yapılan model benzetim hesaplamaları içerisinde en yüksek başarıyı gösteren modelin 4 değişkenli model olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Güneş Enerjisi, Fotovoltaik Hücre, PV Modelleme, 4 Değişkenli Model, Geliştirilmiş 4 Değişkenli Model, 5 Değişkenli Model, 2 Diyot Modeli

ABSTRACT

ELECTRICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF A PHOTOVOLTAIC MODULE USING DIFFERENT MODELS

MSC THESIS

ERSAL GEZER

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

BOLU, MAY 2019

The source of solar energy is the electromagnetic and thermal energy released due to the fusion reaction within the core of the star located at the centre of our solar system. The average value of this energy originating from the Sun out of the atmosphere of the earth is approximately 1367 W/m^2 and its called “solar constant”. A certain amount of this energy is reflected back to the space by the atmosphere of the earth. Within the atmosphere of the earth, the value of solar energy is in the range $0-1100 \text{ W/m}^2$ due to the reflection, absorbance, accentuation and other obstructions. Photovoltaic cells are energy conversion devices made of semiconductor structures, converting the electromagnetic energy coming from sun to electrical energy.

In the present study, an experimental system has been set up consisting of a polycrystalline type of photovoltaic panel made up by 36 cells, at the Faculty of Engineering of Bolu Abant İzzet Baysal University, in Bolu province. As well as the photovoltaic panel, the experimental system consists of sensors to measure system characteristics, data logger, battery and an electronic control unit. A validation of the system characteristics obtained by the solution of analytical equations has been made, measuring solar radiation (G), temperature (T), voltage (V) and current (A) at 10 minute intervals on this experimental system, for a total of 6 days. Based on these 6 days, using a total of 4 different analytical I-V curve model namely, 4-parameter, improved 4-parameter, 5-parameter and 2-diode models, the current and voltage values have been determined and compared to the values measured. The results of these solutions have been analysed based on the statistical indicators RMSE and R^2 . Based on these measurements, solutions and the statistical indicators, it has been shown that amongst these 4 different models, the 4-parameter model has proved to be the most accurate model, leading to the most favourable statistical results.

KEYWORDS: Solar energy, Fotovoltaic cell, PV modelling, 4-parameter model, improved 4-parameter model, 5-parameter model, 2-diode model,

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	xii
TEŞEKKÜR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Dünya Üzerindeki Enerji Kaynakları	1
1.1.1 Yenilenmez (Tükenir) Enerji Kaynakları	2
1.1.1.1 Kömür	3
1.1.1.2 Doğalgaz	3
1.1.1.3 Petrol.....	4
1.1.1.4 Uranyum ve Toryum.....	4
1.1.2 Yenilenebilir (Tükenmez) Enerji Kaynakları	5
1.1.2.1 Hidrolik Enerjisi	5
1.1.2.2 Güneş Enerjisi	6
1.1.2.3 Biyokütle Enerjisi	6
1.1.2.4 Rüzgâr Enerjisi	7
1.1.2.5 Jeotermal Enerji.....	7
1.1.2.6 Dalga ve Gel-Git Enerjisi.....	8
1.1.2.7 Hidrojen Enerjisi.....	8
1.1.3 Enerji Kaynaklarının Dünya Üzerindeki Etkileri.....	9
1.2 Türkiye'nin Doğal Enerji Kaynakları	9
1.3 Türkiye'de Güneş Enerjisi	11
2. GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ.....	14
2.1 Güneş Kolektörleri.....	15
2.2 Parabolik Kolektörler.....	15
2.3 Güneş Kuleleri.....	16
2.4 Fotovoltaik Sistemler	17
2.4.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihi ve Gelişimi	17
2.4.2 Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı ve Çalışma Prensipleri.....	19
2.4.3 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri.....	22
2.4.3.1 Birinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler	22
2.4.3.2 İkinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler	23
2.4.3.3 Üçüncü Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler	24
2.5 Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Diğer Cihazlar	25
2.5.1.1 Şarj Regülatörü.....	25
2.5.1.2 Akü.....	26
2.5.1.3 İnvörtör.....	26

2.6	Fotovoltaik Panellerin Kullanımı	27
2.6.1	Şebekeden Ayrık (Off-Grid) Sistemler.....	27
2.6.2	Şebekeye Bağlı (On-Grid) Sistemler.....	28
3.	FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ.....	29
3.1	Model Benzetimlerine Etki Eden Faktörler	33
3.1.1	Güneş Işınım Şiddetinin Etkisi	33
3.1.2	Sıcaklığın Etkisi	35
3.2	Deneylerde Kullanılan Model Benzetimleri	35
3.2.1	4-Değişkenli Model Benzetimi	36
3.2.2	5-Değişkenli Model Benzetimi	38
3.2.3	Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model Benzetimi.....	40
3.2.4	2-diyotlu Model Benzetimi	43
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
4.1	Model Benzetim Yöntemlerinin Analizi.....	77
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	82
5.1	Işınım Şiddetinin Model Benzetimleri Üzerindeki Etkisi.....	84
5.2	Sıcaklığın Model Benzetim Yöntemleri Üzerindeki Etkisi	85
5.3	Öneriler	86
6.	KAYNAKÇA	87
7.	EKLER	94
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	106

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Enerji Kaynakları	2
Şekil 1.2. Hidrolik Enerji	5
Şekil 1.3. Güneş Enerjisi	6
Şekil 1.4. Biyokütle Enerjisi	6
Şekil 1.5. Rüzgar Enerjisi	7
Şekil 1.6. Jeotermal Enerji	7
Şekil 1.7. Dalga, Gel-Git Enerjisi	8
Şekil 1.8. Türkiye Elektrik Enerjisi Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi	10
Şekil 1.9. 2018 Yılında Türkiye’de Kurulu Gücün Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı	11
Şekil 1.10. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)	12
Şekil 1.11. Bolu İli Güneş Enerjisi Atlası (GEPA)	12
Şekil 1.12. Türkiye 1990-2017 Yılları Arası Elektrik Tüketimi Değerlerine Uygun Fonksiyonun Eğilimine Göre 2018-2030 Yılları Elektrik Talep Tahminleri (TWh)	13
Şekil 2.1. Güneş Ocağı	14
Şekil 2.2. Düzlemsel Güneş Kollektörü (solda), Vakumlu Güneş Kollektörü (sağda)	15
Şekil 2.3. Parabolik Güneş Kollektörü	16
Şekil 2.4. Güneş Kulesi	16
Şekil 2.5. Vanguard 1	18
Şekil 2.6. Fotovoltaik Hücrelerin Yıllara Göre Verimliliği (NREL)	19
Şekil 2.7. Fotovoltaik Hücrede Elektron Akışı (Koç, 2018)	21
Şekil 2.8. Fotovoltaik Hücrelerin Seri ve Paralel Bağlanması	22
Şekil 2.9. Monokristalin Hücre (Solda), Polikristalin Hücre (Sağda)	23
Şekil 2.10. İnce Film Fotovoltaik Hücre	24
Şekil 2.11. Organik Fotovoltaik Hücre	24
Şekil 2.12. Fotovoltaik Sistem	25
Şekil 2.13. Şarj Regülatörü	25
Şekil 2.14. Akü	26
Şekil 2.15. İnvörtör	26
Şekil 2.16. Off-grid Fotovoltaik Sistem Şeması (Koç, 2018)	27
Şekil 2.17. On-Grid Fotovoltaik Sistem Şeması (Koç, 2018)	28
Şekil 3.1. Basitleştirilmiş Eşdeğer Fotovoltaik Hücre Devresi	30
Şekil 3.2. Işınım Şiddeti Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi	34
Şekil 3.3. Sıcaklık Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi	35
Şekil 3.4. 4 Değişkenli Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi	36
Şekil 3.5. 5 Değişkenli Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi	38
Şekil 3.6. Geliştirilmiş 4 Değişkenli Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi	40
Şekil 3.7. 2-Diyotlu Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi	43
Şekil 4.1. Ölçümlerde Kullanılan Fotovoltaik Deney Düzeneği	46

Şekil 4.2. Deneyleerde Kullanılan Fotovoltaik Panel ve Panel Etiketii.	47
Şekil 4.3. Deneyleerde Kullanılan Şarj Regülatörü.	47
Şekil 4.4. Denei Düzeneginde Kullanılan Piranometreler.	48
Şekil 4.5. Denei Düzeneginde Kullanılan Veri Kayıt Cihazı (Data Logger)...	48
Şekil 4.6. 16 Mayıs 2018 Akım – Zaman Grafiğı.	49
Şekil 4.7. 16 Mayıs 2018 Gerilim – Zaman Grafiğı.	50
Şekil 4.8.. 16 Mayıs 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiğı.	51
Şekil 4.9. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	51
Şekil 4.10. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiğı.	52
Şekil 4.11. 03 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiğı.	53
Şekil 4.12. 03 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiğı.	54
Şekil 4.13. 03 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiğı.	55
Şekil 4.14. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	55
Şekil 4.15. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiğı.	56
Şekil 4.16. 04 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiğı.	57
Şekil 4.17. 04 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiğı.	58
Şekil 4.18. 04 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiğı.	59
Şekil 4.19. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	60
Şekil 4.20. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiğı.	61
Şekil 4.21. 05 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiğı.	62
Şekil 4.22. 05 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiğı.	63
Şekil 4.23. 05 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiğı.	64
Şekil 4.24. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	65
Şekil 4.25. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiğı.	66
Şekil 4.26. 06 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiğı.	67
Şekil 4.27. 06 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiğı.	68
Şekil 4.28. 06 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiğı.	69
Şekil 4.29. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	70
Şekil 4.30. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiğı.	71
Şekil 4.31. 07 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiğı.	72
Şekil 4.32. 07 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiğı.	73
Şekil 4.33. 07 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiğı.	74
Şekil 4.34. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	75
Şekil 4.35. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiğı.	76
Şekil 5.1. Veri Toplanan Günlerdeki Zamana Göre Işınım Şiddetindeki Değişimler	84
Şekil 5.2. Veri Toplanan Günlerdeki Zamana Göre Sıcaklık Değerlerindeki Değişimler	85

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. 2018 Yılı Türkiye'nin Enerji Üretimini Kaynaklar Bazında Dağılımı (ETKB).....	10
Tablo 3.1. $\beta_1, \beta_2, \gamma_1$ ve γ_2 parametreleri için kullanılan değerler	42
Tablo 4.1. Model Benzetimleri Uygulanırken Kabul Edilen Değerler	45
Tablo 4.2. 16 Mayıs 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler	93
Tablo 4.3. 03 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler	95
Tablo 4.4. 04 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler	97
Tablo 4.5. 05 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler	99
Tablo 4.6. 06 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler	101
Tablo 4.7. 07 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler	103
Tablo 4.8. Modeller Sonucunda Elde Edilen <i>RMSE</i> Değerleri	78
Tablo 4.9. Modeller Sonucunda Elde Edilen R^2 Değerleri.....	79
Tablo 4.10. Modeller Sonucunda Elde Edilen <i>MBE</i> Değerleri	81
Tablo 5.1. İstatiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar	82

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

α	: Modifiye Edilmiş Diyot İdealite Faktörü; $\alpha=mV_t$
G	: Işınım Şiddeti (W/m^2)
I	: Akım (A)
I_L	: Işık Akımı (A)
I_0	: Ters Doyma Akımı (A)
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı (A)
I_m	: Maksimum Güç Noktasındaki Akım (A)
k	: Boltzmann Sabiti ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
m	: İdealite Faktörü; $m=N_s n_1$
μ_{Isc}	: Kısa Devre Akımı Sıcaklık Katsayısı
μ_{Voc}	: Açık Devre Gerilimi Sıcaklık Katsayısı
N_s	: Seri Bağlı Fotovoltaik Hücre Sayısı
n_1	: Diyot İdealite Faktörü
n_2	: Diyot İdealite Faktörü
η	: Verim
P	: Güç (W)
q	: Elektron Yüğü ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
R_s	: Seri Direnç (Ω)
R_{so}	: Kısa Devre Akım Noktasının Eğiminin Karşılığı (Ω)
R_{sh}	: Paralel Direnç (Ω)
R_{sho}	: Açık Devre Gerilim Noktasının Eğiminin Karşılığı (Ω)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
V	: Gerilim (V)
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi (V)
V_m	: Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim (V)
V_t	: Termal Gerilim (V)
C	: Coloumb
$^{\circ}C$: Celcius Derece

TEŞEKKÜR

Bu tezi yazmak için yaptığım bütün çalışmalarda desteğini esirgemeyen, bana karşı daima sabırlı ve hoşgörülu davranan, tecrübesini paylaşmaktan çekinmeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK'e teőekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince yaşadığım bütün zorluklarda hep yanımda olan ve beni motive eden sevgili eşim Gökşin GEZER'e minnettarım.

Yaptığımız çalışmalarda; deney düzeneğinin kurulumu, entegrasyonu ve veri toplanması vb. hususlarda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Fatih KOÇ'a teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışmamın en başından beri desteğini esirgemeyen aileme minnettarım.

1. GİRİŞ

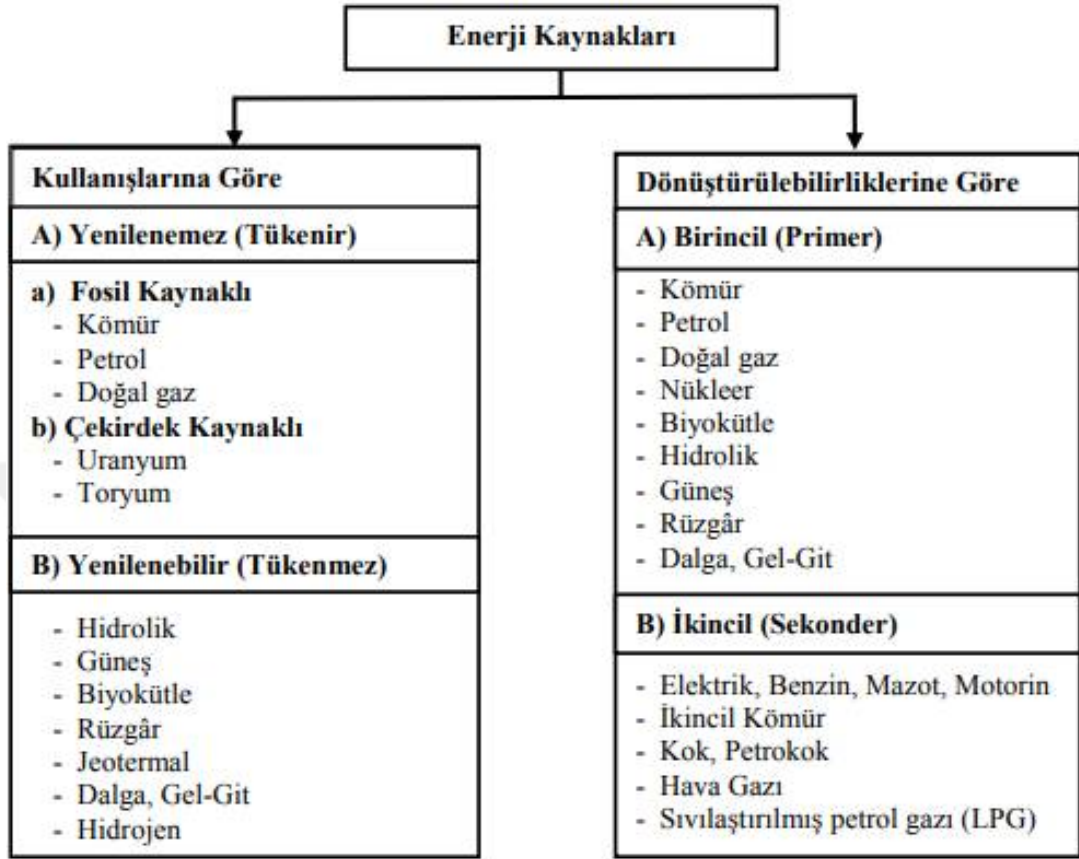
Enerji, Dünya'nın her yerinde ekonomik ve sosyal gelişmenin bir gereği ve yaşam kalitesinin göstergesi olarak kabul edilmektedir. Skaler bir büyüklük olan enerji kısaca maddenin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Birçok farklı formda bulunabilen enerji en basit şekilde potansiyel enerji ve kinetik enerji olarak iki ana grup altında sınıflandırılabilir. Doğada enerji; kimyasal enerji, mekanik enerji, ısı enerjisi, ışık enerjisi, elektrik enerjisi, manyetik enerji, nükleer enerji vb. gibi birçok şekilde bulunabilir. Doğada bulunan enerjinin miktarı termodinamik yasalarına göre değişmez yalnızca belirli şartlar çerçevesinde enerji türevleri arasında form değiştirir.

1.1 Dünya Üzerindeki Enerji Kaynakları

Dünya üzerinde hareketin ve canlılığın devam edebilmesi için enerji mutlaka olması gereken bir unsurdur. Geçmiş zamanlardan günümüze kadar geçen sürede artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte ülkelerin enerji ihtiyaçları da giderek artmıştır (Koç ve Kaplan, 2008).

Dünya üzerindeki enerji kaynakları farklı şekillerde sınıflandırılmıştır fakat en basit olarak doğada bulunabilme şekline ve dönüştürülebilirliklerine göre 2 farklı şekilde sınıflandırılabilir (Şekil 1.1). Doğada bulunma şekline göre enerji kaynakları, kendi içerisinde yenilenemez (tükenir) ve yenilenebilir (tükenmez) enerji kaynakları olarak iki alt ana başlık şeklinde gösterilmektedir. Yenilenemez enerji kaynakları kullanım oranına göre farklı enerji türevlerine dönüşmekte ve zamanla azalmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında ise zamanla azalma gibi bir durum söz konusu olmamaktadır. Dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılan enerji kaynakları ise birincil (primer) ve ikincil (sekonder) enerji kaynakları olarak iki alt ana başlık altında toplanabilir. Birincil enerji kaynakları doğadan elde edildiği formda kullanılabilen enerji kaynaklarıdır. İkincil enerji kaynakları ise birincil enerji

kaynaklarının kullanımının veya işlenmesinin ardından elde edilen enerji kaynaklarıdır.



Şekil 1.1. Enerji Kaynakları.

1.1.1 Yenilenmez (Tükenir) Enerji Kaynakları

Çekirdek kaynaklı ve fosil kaynaklı olarak iki gruba ayrılan yenilenemez enerji kaynaklarının yakın zamanda tükenebileceği tahmin edilmektedir. Dünya rezervlerine bakıldığında, kömürde 860,94 milyar ton, petrolde 225,4 milyar ton, doğalgazda 208,4 trilyon m³ olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervler baz alındığında petrolde 54 yıl, doğalgazda 64 yıl, kömürde 112 yıl yetecek kaynak olduğu tahmin edilmektedir (Koç ve Şenel, 2013).

1.1.1.1 Kömür

Katı, koyu renkli, karbon ve yanıcı gazlar bakımından zengin bir kayaç türü olan kömür bataklık bölgelerinde uygun nem ve sıcaklıkla birlikte çürüyen bitkilerin suyun altına inmesi ve zamanla üzerinin örtülmesi gibi olaylar sonucunda oluşmaktadır (Van Krevelen, 1993). Jeolojik devirde bilinen karbonifer (345-280 milyon yıl önce) ve permiyen (280-225) olmak üzere iki büyük kömür oluşum çağı vardır.

Kömür, içeriğinde yüksek karbon miktarına sahip olan ve düşük nem içeren bir yakıt türüdür. İçeriğindeki karbon miktarı kömürün kalitesini ve enerji üretim miktarını belirlemektedir. Kömür cinsleri karbon miktarlarına göre, %60 ve daha az ise “turba”, %70 civarı ise “linyit”, %80-90 arası ise “taş kömürü” ve %90’dan fazla ise “antrasit” olarak sınıflandırılmaktadır.

Kömür, çevre ve insan sağlığına olumsuz birtakım sonuçlara yol açmasına rağmen dünya genelinde rezerv büyüklüğü sayesinde vazgeçilemeyen bir enerji kaynağıdır. Üretim maliyetlerinin diğer fosil yakıtlara oranla düşük olması ve başta elektrik üretimi olmak üzere birçok alanda kullanımının kolaylığı sayesinde yıllardır tercih edilen bir yakıt türü olmuştur. Fakat kömür tüketiminin fazlalığı neticesinde karbon emisyonlarının iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya sebep olduğu da açıkça bilinmektedir.

Kömür, Türkiye’nin enerji üretimi altyapısını oluşturan en önemli kaynaklardandır. Türkiye’nin toplam elektrik üretiminde doğalgazdan sonra en çok kullanılan yakıt türüdür. Son yıllarda ithal kaynaklara olan bağımlılığı azaltmak için kömür arama çalışmaları, yerli kömür kullanımının artırılması ve ithal kömür düzenlemeleri gibi alanlara yönelik politikalar öne çıkmaktadır.

1.1.1.2 Doğalgaz

Bir petrol türevi olan doğalgaz yapısı içerisinde %70 ile %90 arasında metan gazı (CH_4) adı verilen hidrokarbon barındıran yanıcı bir gaz türüdür (Katz, 1959). Geçmişte petrol üretimi esnasında ortaya çıkan doğalgaz gereksiz bir yan ürün olarak

görölmüş ve yakılarak tesisten uzaklaştırılırken zamanla değeri kazanarak enerji kaynakları arasında önemli bir noktaya ulaşmıştır (Hotel, 2007). Doğalgaz, organik maddelerin yeryüzünün alt katmanlarında milyonlarca yıldır süregelen doğal dönüşümü sonucunda oluşan bir gaz türüdür. Renksiz, kokusuz ve havadan hafif bir gazdır, karbonmonoksit içermediğinden zehirleyici değildir. Havayı kirletmeyen, diğer yakıtlarla kıyaslandığında çevre dostu bir enerji kaynağı olan doğalgaz, yüksek yanma verimi, kolayca depolanabilmesi, atık madde bırakmaması, kontrol edilebilir olması ve fiyatının ucuz olması gibi avantajlarıyla başta ısınma olmak üzere elektrik üretimi ve sanayide birçok alanda kullanılmaktadır.

Türkiye doğalgaz temini konusunda tamamen dışa bağımlı bir politika izlemektedir. Doğalgaz ihtiyacının büyük bölümü boru hatlarıyla Rusya, İran ve Azerbaycan'dan karşılanmaktadır.

1.1.1.3 Petrol

Farklı uzunluklardaki hidrokarbon zincirlerinden oluşan petrol denizlerde bulunan bitki ve hayvanların çürüdükten sonraki kalıntılarından oluşmaktadır. Endüstride önemli bir yere sahip olan petrol işlenerek benzin, jet yakıtı, fuel-oil gibi yakıtların elde edilmesinin yanı sıra ilaç, pestisit ve plastik gibi birçok kimyasal ürün için de hammadde kaynağı olmaktadır (Philp, 1985).

Petrol günümüzde birincil enerji tüketimi içinde en fazla kullanılan enerji kaynağıdır. Geçmiş zamandan bu yana kullanılan petrol günümüzde ekonomi, siyaset ve teknolojide oldukça önemli hale gelmiştir.

1.1.1.4 Uranyum ve Toryum

Nükleer enerji hammaddesi olarak kullanılan uranyum ve toryum nükleer reaktörlerde elektrik enerjisi için yakıt olarak kullanılmaktadır (Yıldırım ve Örnek, 2007). Ancak toryumu hammadde olarak kullanan nükleer santrallerin ekonomik açıdan yüksek maliyetli olması nedeniyle toryum günümüzde sırasını bekleyen bir

nükleer enerji hammaddesidir (Alan, 2010). Doğada serbest halde bulunmayan bu elementler belirli işlemlerden geçtikten sonra nükleer reaktörlerde kullanılabilirler.

1.1.2 Yenilenebilir (Tükenmez) Enerji Kaynakları

Dünya üzerinde sürekli devam eden enerji akışlarından elde edilen enerjiye yenilenebilir enerji denilmektedir (Boyle, 2004). Fosil veya çekirdek kaynaklı enerji kaynaklarından farklı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarında tükenme süresi gibi bir durum söz konusu olmayıp, sürdürülebilirliği mümkün olan enerji kaynaklarıdır (Johansson vd., 1993). Hidrolik enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, dalga (gel-git) enerjisi, hidrojen enerjisi gibi kaynaklar yenilenebilir enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Genellikle elektrik üretim sistemlerinde kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları, ısıtma sistemlerinde de kullanılmaktadır.

1.1.2.1 Hidrolik Enerjisi

Suyun sahip olduğu potansiyel enerjiyi kullanarak makineleri çalıştırmak veya elektrik elde etme süreci hidrolik enerji olarak adlandırılmaktadır (Carman, 1975). Bu yolla, yoğunluğunun fazla olması dolayısıyla düşük debilerde akan sudan bile önemli miktarda enerji elde edilebilir. 2015 verileri baz alındığında, dünyada toplam elektrik enerjisinin %16,6'sı hidrolik enerji kaynaklarından elde edilirken, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin %70'i hidrolik enerji kaynaklarından elde edilmektedir (Adib vd., 2015).



Şekil 1.2. Hidrolik Enerji.

1.1.2.2 Güneş Enerjisi

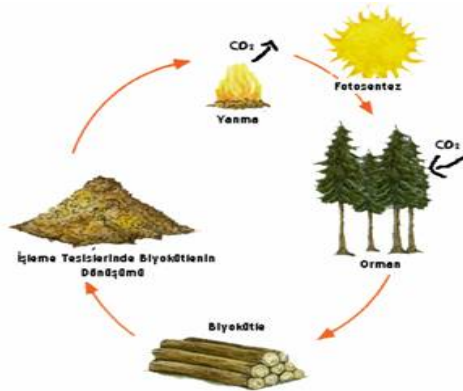
Kaynağı güneş olan ve bu yıldızın çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonu ile ortaya çıkan enerji sonucunda dünyaya ulaşan elektromanyetik enerji güneş enerjisi olarak adlandırılmaktadır (Duffie ve Beckman, 2013). Dünya üzerine gelen bu enerji direkt olarak elektrik üretiminde kullanılabilirken, alternatif olarak ısıtma ve soğutma sistemlerinde de kullanılmaktadır.



Şekil 1.3. Güneş Enerjisi.

1.1.2.3 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle; canlılardan veya canlı kalıntılarından elde edilen fosilleşmemiş biyolojik maddelere verilen genel bir addır (Topal ve Arslan, 2008). Bir enerji kaynağı olan biyokütleden ısı ve kimyasal enerji elde etmek mümkündür. Bu amaçla hayvansal ve bitkisel ürünler yaygın olarak biyoyakıt üretiminde kullanılmaktadır. Bu enerji türü, göreceli olarak daha çevre dostu olması ve sürdürülebilir olmasından dolayı tercih edilmektedir.



Şekil 1.4. Biyokütle Enerjisi.

1.1.2.4 Rüzgâr Enerjisi

Sıcak hava ile soğuk havanın yer değiştirmesi sonucu gerçekleşen doğa olayı neticesinde oluşan kinetik enerjiden elde edilen enerji, rüzgâr enerjisi olarak tanımlanmaktadır (Özgener, 2002). Rüzgâr enerjisini kullanabilmek için rüzgâr türbinleri denilen sistemler kullanılmaktadır. Yatay ve dikey eksenli olarak iki çeşit rüzgâr türbini bulunsa da dünya üzerinde yatay eksenli rüzgâr türbinleri daha çok tercih edilmektedir.



şekil 1.5. Rüzgâr Enerjisi.

1.1.2.5 Jeotermal Enerji

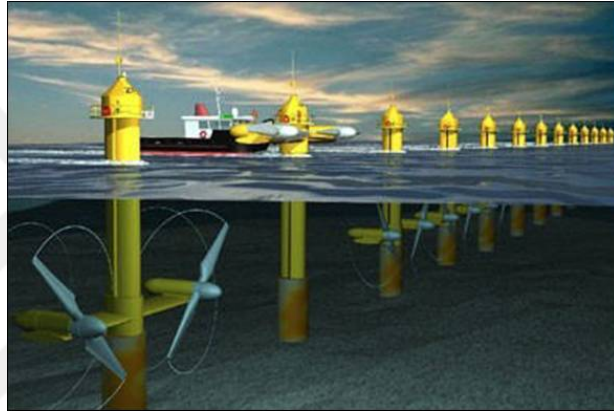
Yeraltının farklı derinliklerinde ortaya çıkan ısının daha üst katmanlarda bulunan su, buhar ve gazlara geçmesi ile oluşan enerji kaynağıdır (Külekçi, 2009). Elektrik enerjisi üretimi, merkezi ısıtma-soğutma vb. uygulama alanları, endüstride kurutma amaçlı, termal turizmde kaplıca, hamam ve benzeri gibi birçok alanda kullanılması mümkün olan jeotermal enerjinin yenilenebilir ve sürdürülebilir olması dolayısıyla enerji kaynakları arasında önemi büyüktür.



şekil 1.6. Jeotermal Enerji.

1.1.2.6 Dalga ve Gel-Git Enerjisi

Deniz veya okyanus yüzeylerindeki dalgalanma hareketleri veya suyun içerisinde sıcaklık farkından oluşan akıntılarda bulunan enerji potansiyeli dalga, ayın yeryüzüne uyguladığı çekim nedeniyle oluşan potansiyel enerji de gel-git enerjisi olarak tanımlanabilir (Sağlam vd., 2005). Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen dalga ve gel-git enerjisinin dünya üzerinde kullanımı çok yaygın değildir. Bunun sebeplerinden biri, dünya üzerinde uygun dalga ve gel-git potansiyeli olan yerlerin kısıtlı olmasıdır. Bir diğer sebebi ise şiddetli fırtınalarda ağır hasarlar alarak kullanılamaz hale gelmesi nedeniyle tercih edilmemesidir.



Şekil 1.7. Dalga Enerjisi.

1.1.2.7 Hidrojen Enerjisi

Evrenin temel enerji kaynağı olan hidrojen bilinen yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip enerji kaynaklarından birisidir. Renksiz, kokusuz ve zehirsiz bir gaz olan hidrojen yakıt olarak kullanıldığında atılan ürün sadece su veya su buharı olmaktadır. Hidrojen yanma özelliği ile de motorlarda, buhar türbinlerinde ve ocaklarda kullanılabilir. Temiz ve yenilenebilir bir enerji olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı ve kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjine dönüştüğü sistemlere yakıt hücresi adı verilmektedir.

1.1.3 Enerji Kaynaklarının Dünya Üzerindeki Etkileri

20. ve 21. yüzyıllarda teknolojideki ilerlemeler ve artan nüfusla birlikte ortaya çıkan büyük enerji ihtiyacı sonucunda insanlar dünyada yaygın bir şekilde bulunması, kolay ulaşılabilir olması ve yüksek kaloriye sahip olmaları nedeni ile fosil yakıtları yoğun olarak kullandı ve halen de kullanmaya devam etmektedir. Ancak, bu enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda atık ürün olarak ortaya çıkan zararlı gazlar doğanın ekolojik sistemini bozmaktadır. Petrol gibi enerji kaynaklarının taşınması esnasında meydana gelen kazalar sonucunda etrafa yayılan petrol, canlılar için önemli tehditler oluşturabilmektedir. Fosil kaynakların kullanımı sonucunda atmosferde biriken karbondioksit gazı küresel ısınmayı tetikleyen ve hızlandıran en önemli unsurlardandır. Asit yağmurları da bu yakıtların kullanımı sonucu oluşmakta ve geniş çaplı çevre sorunlarına sebep olarak canlı yaşantısını tehdit etmektedir. Çekirdek kaynaklı enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda ise atık ürün olarak ortaya çıkan radyoaktif maddelerin bertaraf edilmesi zor veya imkânsız olmakta olası sızıntılar veya kazalar da mutasyon gibi ciddi sağlık sorunları oluşturabilmektedir.

Yenilenemez enerji kaynaklarının oluşum sürelerinin çok uzun zaman alması, artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte de hızlı bir şekilde tükenmesi ve küresel ısınmanın etkilerinin ciddi bir şekilde fark edilmeye başlanması sonucunda insanlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye başlamışlardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çevresel açıdan temiz bir enerji elde etme yöntemidir. Sürekliliği olan doğa olaylarından enerji elde edilmesinden dolayı bu tür enerji kaynaklarının tükenmesi gibi bir durum söz konusu değildir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olmasına rağmen uzun vadede bakıldığında ekonomik bir enerji elde yöntemidir. Birçok yenilenebilir enerji kaynağının verimleri günümüzde düşüktür.

1.2 Türkiye'nin Doğal Enerji Kaynakları

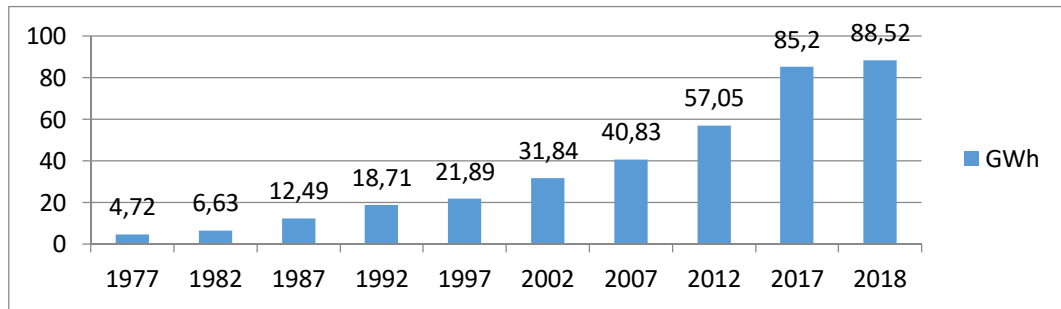
Türkiye, enerji talebinin düzenli olarak arttığı ülkeler arasında bulunmaktadır. Türkiye'nin enerji yapısı incelendiğinde, dünyada bulunan mevcut enerji kaynaklarının birçoğunun enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılarak, farklı türlerde enerji elde edildiği görülmektedir. Taşkömürü, linyit, asfaltit, ham petrol, doğalgaz

gibi birincil enerji kaynaklarından enerji üretimi yapılırken, hidroelektrik, jeotermal, güneş, biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları da ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. 2018 yılında Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimi toplam olarak 303,9 TWh olmuştur. Bu enerji üretilirken kullanılan kaynak oranlarına bakıldığında en büyük payın %37,3 ile kömür olduğu görülmekte, geçmiş yıllara göre kömür 2018 yılı içerisinde elektrik enerjisi üretiminde ilk sırada yer almaktadır. Kömürü sırasıyla %29,8 oranı ile doğalgaz, %19,80 ile hidrolik enerji, %6,6 ile rüzgâr enerjisi, %2,6 ile güneş enerjisi takip etmektedir.

Tablo 1.1. 2018 Yılı Türkiye'nin Enerji Üretiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı (ETKB)

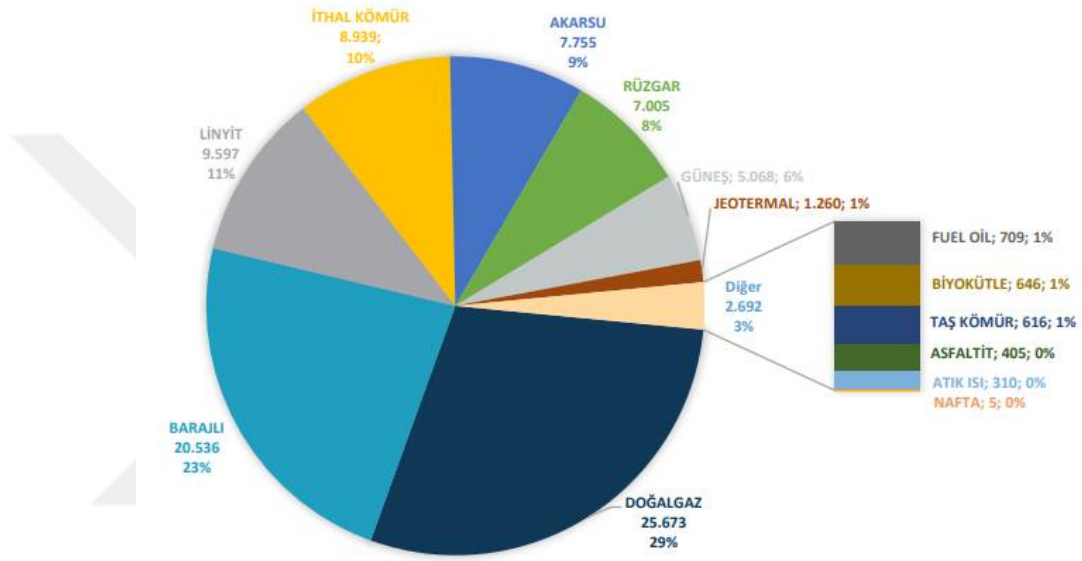
KAYNAK	ÜRETİM (TWh))	KATKISI (%)
KÖMÜR	113,35	37,3
DOĞALGAZ	90,56	29,8
HİDROLİK ENERJİ	60,17	19,8
RÜZGAR	20,05	6,6
GÜNEŞ	7,9	2,6
JEOTERMAL	7,59	2,5
DİĞER	4,28	1,4

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)'nden alınan verilere göre Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücün gelişimi aşağıda Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Türkiye Elektrik Enerjisi Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi.

Termik santraller içerisinde en büyük payı doğalgazla üretim yapan termik santraller oluşturmaktadır. 1930’lu yıllardan 1985’li yıllara kadar termik ve hidrolik santrallere dayalı üretim yapılırken 1985’li yıllara gelindiğinde ülkeler gelişen teknoloji ve alternatif enerji kaynakları arayışları sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişler ve bu doğrultuda rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjileri kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi’nden (TEİAŞ) alınan verilere göre Türkiye’nin 2018 yılına ait kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 1.9’da gösterilmektedir.

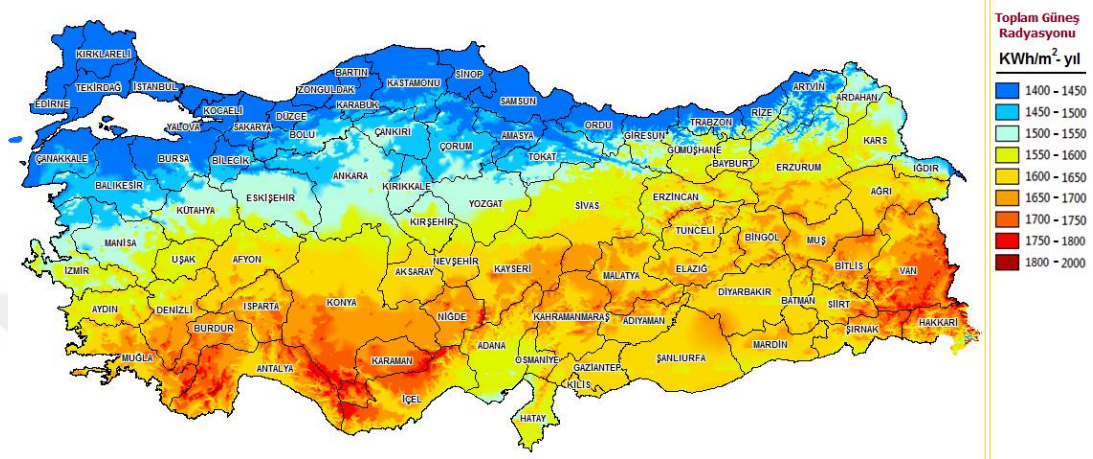


Şekil 1.9. 2018 Yılında Türkiye’de Kurulu Gücün Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı (TEİAŞ).

1.3 Türkiye’de Güneş Enerjisi

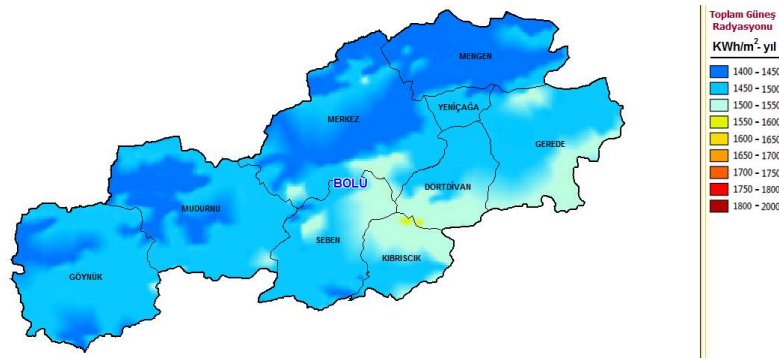
Türkiye coğrafi konum olarak Kuzey Yarım Küre’de yer almaktadır ve 36-42° kuzey enlemleri ile 26-45° doğu boylamları arasında bulunur. Türkiye’nin bu ideal konumu sayesinde sahip olduğu güneş enerji potansiyeli, Türkiye’nin birçok ülkeye göre daha avantajlı hale getirmektedir. Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli olmasına rağmen kullanımı öngörülenden azdır. Bu yüzden yakın gelecekte yenilenebilir enerjilerden olan güneş enerjisinin ülkemiz için önemli bir çözüm alternatifi olarak hayata geçirilmesi gerekmektedir.

Güneş enerjisini etkin ve verimli kullanabilmek için “GEPA (Türkiye Güneş Enerji Potansiyeli Atlası)” Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmıştır. Şekil 1.10’da gösterilen Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2737 saat ile yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1527 kWh/m².yıl değerlerinde belirlenmiştir (Canka Kılıç, 2015).



Şekil 1.10. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA).

Güneş ışınım değerlerine göre Türkiye’ 4 kuşağa ayrılmaktadır. Türkiye’nin en az güneş alanla en fazla güneş alan bölgeleri arasındaki farkın az olduğu ve verimli güneşlenme sürelerinin uzun olduğu gözlenmiştir. Bolu ili ışınım olarak en düşük güneş alan 4. kuşakta yer almaktadır (Aksungur vd., 2013). Ayrıca Doğu Marmara TR42 bölgesinde yer alan Bolu ili ortalama 1.168 kWh/m².yıl ışınım değeriyle, ülke ortalamasının altında olsa da Avrupa ile karşılaştırıldığında yüksek bir orana sahiptir (Ayrancı, 2011). Şekil 1.11’de Bolu ili güneş enerji potansiyeli atlasında ilçeleri de gösteren güneş enerji ışınım değerleri verilmektedir.



Şekil 1.11. Bolu İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA).

Günümüzde enerji sektöründeki tüketim değerlerinin tahmini çok önemli bir değer kazanmıştır. Kurulacak olan enerji tesislerinin maliyetleri, karlılığı, kapasiteleri ve ithal edilen enerjinin miktarı ancak talep tahminleri sayesinde, öngörülen sapmaların sınırlanmasıyla doğru biçimde yapılmaktadır. Türkiye’de toplam elektrik tüketiminin yıllara göre dağılımı incelendiğinde, geçmiş yıllardaki enerji tüketimleri referans alınarak ortaya çıkan eğri doğrultusunda makul düzeyde sapmaları kabul ederek elektrik talep tahminleri yapılmıştır (TMM Odası, 2018). 2030 yılına kadar olan elektrik tüketim tahminleri Şekil 1.12’de gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Türkiye 1990-2017 Yılları Arası Elektrik Tüketimi Değerlerine Uygun Fonksiyonun Eğilimine Göre 2018-2030 Yılları Elektrik Talep Tahminleri (TWh).

2. GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ

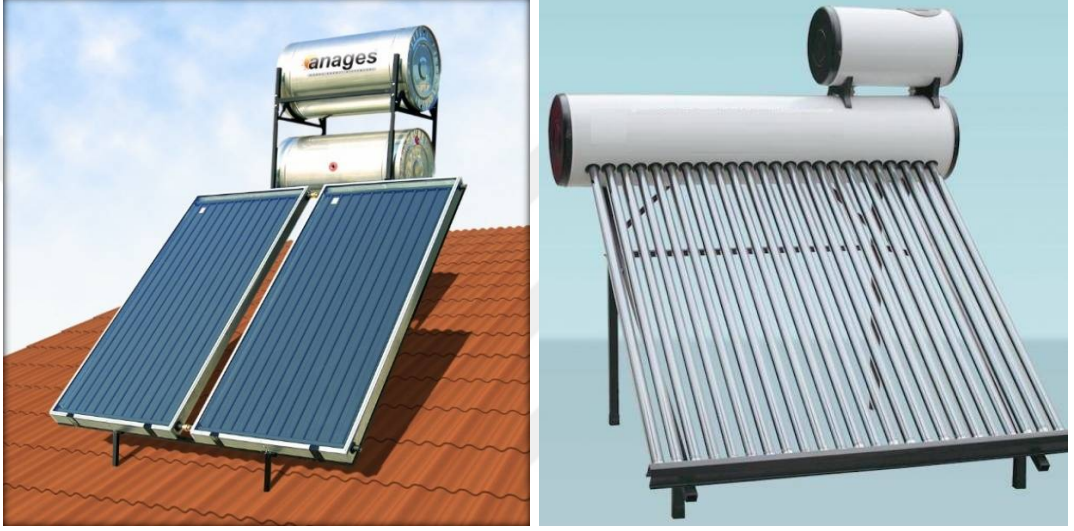
Güneş sisteminin en uzak ve en büyük yıldızı olan Güneş, Dünya'ya 150 milyon km uzaklıkta olup yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 °C'dir. Güneşin yapısının yaklaşık %75'ini oluşturan hidrojen çekirdeklerinin helyuma dönüşmesiyle açığa çıkan enerji güneş enerjisi olarak adlandırılmaktadır. Bu enerji Dünya atmosferinin dışında yaklaşık 1367 W/m² değerindedir (Spectra, 2006). Dünyaya gelen bu enerji atmosfer içerisindeki yansıma, yutulma, dağılma ve engellerden dolayı deniz seviyesinde 0-1100 W/m² aralığında olmaktadır (Stephens vd., 1981; Wilcox ve Myers, 2008). Gezegenimize gelen bu enerjiden faydalanmak amacıyla birçok teknolojik sistem geliştirilmiştir. Sistemlerin bir kısmı güneşten gelen ısı veya elektromanyetik enerjiyi doğrudan kullanırken bir kısmı da güneş enerjisinden elektrik elde etmek suretiyle faydalanmaktadır. Yaygın kullanılan bazı güneş enerjisi sistemleri düzlemsel güneş kolektörleri, vakum tüplü güneş enerjisi sistemleri, ürün kurutma sistemleri, güneş ocakları, trombe duvarı, geçişli hava panelleri, konsantre güneş enerji santralleri şeklinde örneklendirilebilir. Araştırmalara konu olmuş fakat yaygınlaşmayan sistemler için güneş havuzları, güneş bacaları, su arıtma sistemleri gibi örnekler mevcuttur.



Şekil 2.1. Güneş Ocağı.

2.1 Güneş Kolektörleri

Güneşten gelen enerjiyi yüzeylerinde muhafaza eden bu sistemler yapısında bulunan dağıtıcıların içerisinde dolaşan sıvıya bu enerjiyi ısı olarak aktarmaktadır. Elde edilen bu ısı enerjisi evlerde sıcak su karşılamak amacıyla kullanılarak ayrıca binalarda yerden ısıtma, duvardan ısıtma, fan-coil, radyatör gibi ısıtma sistemlerinde kullanılabilir. Güneş kolektörleri düzlemsel güneş kolektörleri ve vakum tüplü güneş kolektörleri olmak üzere iki farklı tipte üretilmektedir.



Şekil 2.2. Düzlemsel Güneş Kolektörü (solda), Vakum Tüplü Güneş Kolektörü (sağda).

2.2 Parabolik Kolektörler

Parabolik güneş kolektörleri, güneşten gelen enerjiyi ünitelerde bulunan yansıtıcı aynalar vasıtasıyla sistemin odağında bulunan boru üzerine yansıtırlar. Böylelikle boru içerisinde geçiren akışkanın sıcaklığının artırılması amaçlanmaktadır. Parabolik çanağın odağındaki borular içerisindeki termal yağ, güneş enerjisi ile 300 °C sıcaklığın üzerine çıkarılmaktadır. Bu sistemlerde güneşin tek boyutlu olarak izlenmesini sağlayan sensörler ve otomasyon sistemleri kullanılarak verimlilik artırılmaktadır.



Şekil 2.3. Parabolik Güneş Kollektörü.

2.3 Güneş Kuleleri

Güneş kulelerinde, güneşten gelen enerji, kule etrafına kurulan heliostat adı verilen aynalar yardımı ile kule üzerindeki bir odakta toplanır. Bu sayede, kule içerisinden geçen suyun ısıtılması ve ortaya çıkan buhar ile bir türbininin çalıştırılması amaçlanmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kullanılan suyun yerini sodyum almaya başlamıştır. Sodyum kullanılmasıdaki temel neden bu elementin yüksek ısıl enerji depolama özelliğidir. Geliştirilen bu yöntemle güneş ışınımının az olduğu zamanda bile enerji üretilebilmektedir.



Şekil 2.4. Güneş Kulesi.

2.4 Fotovoltaik Sistemler

Güneş pili olarak da adlandırılan bu sistemler güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Yarı iletken bir diyot olarak bu sistem güneş ışığından gelen ışık enerjisini kullanarak fotoelektrik reaksiyonlar sonucu elektrik üretir. Üretilen elektrik enerjisi doğru akım olarak kullanılabilir, bataryada depolanabilir veya invertör yardımı ile alternatif akıma dönüştürülerek kullanılabilir.

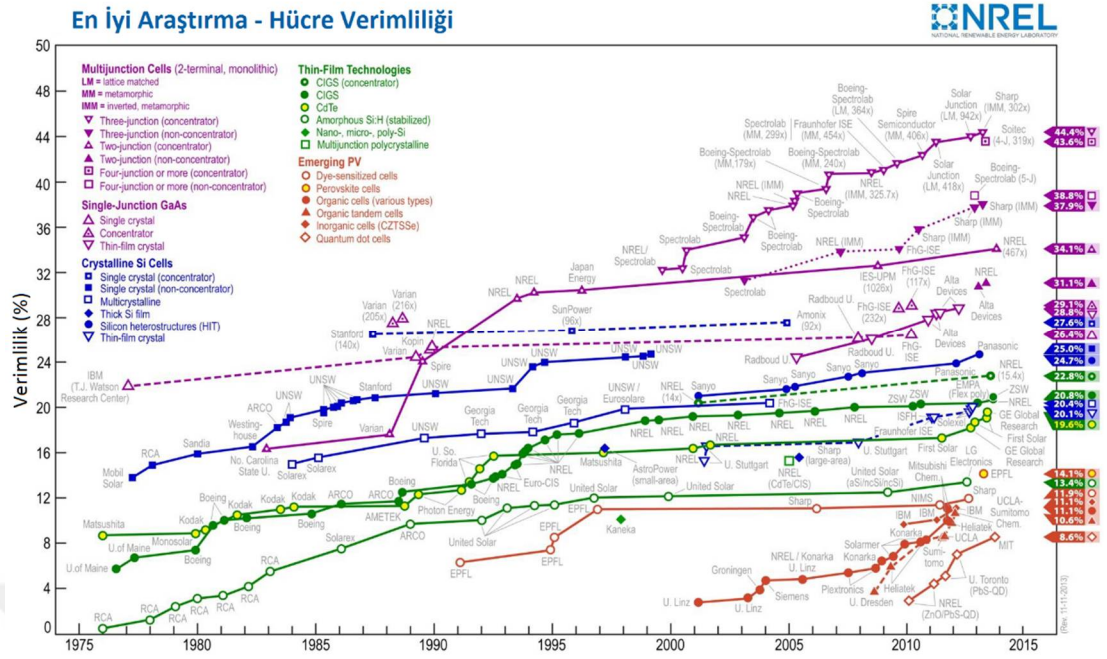
2.4.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihi ve Gelişimi

1839 yılında Becquerel elektrolit içerisine daldırılmış elektronlar arasındaki gerilim değerine elektrolit üzerine düşen ışığın etki ettiğini gözlemleyerek fotovoltaik olayı bulmuştur. 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day selenyum üzerinde çalışırken katı cisimlerde de benzer bir olayın olduğunu gözlemlemiştir. 1883 yılında Charles Fritts 1876 yılında keşfedilen selenyumu kullanarak %1 verimlilik ile çalışan fotovoltaik hücreyi geliştirdi. 1905 yılında Albert Einstein tarafından fotovoltaik etkinin bilimsel mekanizması açıklanmış, Einstein yaptığı bu çalışma sayesinde 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. 1946 yılında Russell Ohl modern fotovoltaik hücrelerinin patentini aldı. 1954 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Bell Laboratuvarı'nda yapılan çalışmalar sonucunda silisyum kullanılarak %6 verimlilikte fotovoltaik hücreler üretildi. Bu tarih fotovoltaik hücreler için dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Bu tarihten itibaren hızlanmaya başlayan fotovoltaik hücre araştırmaları sonucunda 1957 yılında Hoffman Elektronik %8 verimle çalışan silisyum esaslı hücre üretmeyi başardı. Yine aynı şirket 1958 ve 1960 yıllarında sırasıyla %9 ve %14 verimlilikte çalışan hücreler üretmeyi başardı. 1958 yılında gelişen uzay teknolojisi ile birlikte uzaya gönderilen Vanguard 1 isimli uzay aracında fotovoltaik hücre kullanıldı (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Vanguard 1.

1970 yılında ünlü fizikçi Zhores Alferov yaptığı çalışmalar sonucunda GaAs heteroeklem tipinde fotovoltaik hücreler oluşturdu. 1970'li yılların sonuna doğru ortaya çıkan petrol krizi sonucu ülkeler alternatif enerji kaynakları arayışı içerisine girmişler bu olay da fotovoltaik hücreler üzerindeki AR-GE çalışmalarını arttırmıştır. 1985 yılında New South Wales Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar sonucunda %20 verimliliğe ulaşan silisyum fotovoltaik hücreler geliştirildi. 1988 yılında da Applied Solar Energy Corp. %17 verimlilikte iki eklemlili fotovoltaik hücrelerin seri üretimine başladı. Aynı firma 1989 yılında ürettiği iki eklemlili fotovoltaik hücrelerdeki verimi %19 civarına çıkarmayı başardı. 2000 yılında artan çalışmalar sonucu %20 verimliliğe ulaşan üç eklemlili fotovoltaik hücreler geliştirildi. 2002 yılında ise %26 verimlilikte üç eklemlili hücreler geliştirildi. 2005 yılında ise bu hücrelerin verimlilikleri %28 civarına yükseltildi. 2006 yılında Spectrolab'da yapılan çalışmalar sonucu %40 verimlilikte üç eklemlili fotovoltaik hücreler geliştirildi. 2008 yılında NREL (National Renewable Energy Laboratory) de yapılan çalışmalar sonucunda %40,8 verimlilikte fotovoltaik hücreler üretilerek bir dünya rekoruna imza atılmış oldu. 2009 yılında ise Spectrolab %41,6 verimliliğinde üç eklemlili hücre geliştirerek yeni dünya rekorunu eline geçirmiş oldu (Bernede, 2008; Goetzberger vd., 2003; Green, 2005; Kazmerski, 2011; Koç, 2018).



Şekil 2.6. Fotovoltaik Hücrelerin Yıllara Göre Verimliliği (NREL).

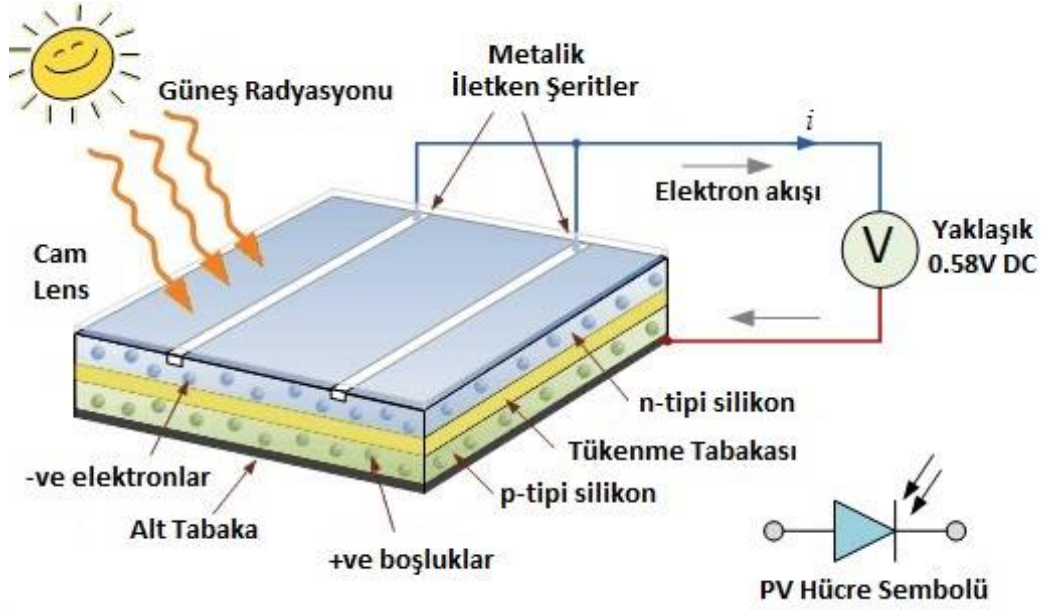
Şekil 2.6’da yapılan araştırma ve çalışmalar sonucunda çok eklemlili ve tek eklemlili fotovoltaik hücrelerin, silisyum kristal fotovoltaik hücrelerin, ince film fotovoltaik hücrelerin ve geliştirmekte olan organik fotovoltaik hücrelerin verimliliklerinin yıllara göre değişimi gösterilmektedir (Green vd., 2017). Grafik incelendiğinde çok eklemlili hücrelerin verimliliklerinin 2015 yılında %44,4 seviyesine ulaştığı görülmektedir. Aynı yıl için kristal fotovoltaik hücrelerde maksimum %26,7 verimlilik ölçülmüşken bu değer ince film fotovoltaik hücrelerde %22,8, organik fotovoltaik hücrelerde %14,1 olarak gerçekleşmiştir.

2.4.2 Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Fotoelektrik prensibiyle çalışan fotovoltaik hücreler -diyotlarda olduğu gibi- yarı iletken malzemelerin birleşmesi ile oluşturulmaktadır. Güneşten gelen enerji, fotovoltaik hücrenin yüzeyine çarpar ve bunun sonucunda atom içerisindeki elektronlar harekete geçerek serbest kalırlar (Yerli, 2009). Serbest kalan bu elektron, fotovoltaik yapı içerisinde bir akım meydana getirir. Güneş spektrumunda her dalga boyu farklı miktarda enerji içermektedir. Bu nedenden dolayı fotovoltaik malzeme üretimi yapılırken kullanacak yarı iletken ve katkılanacak malzeme önemlidir.

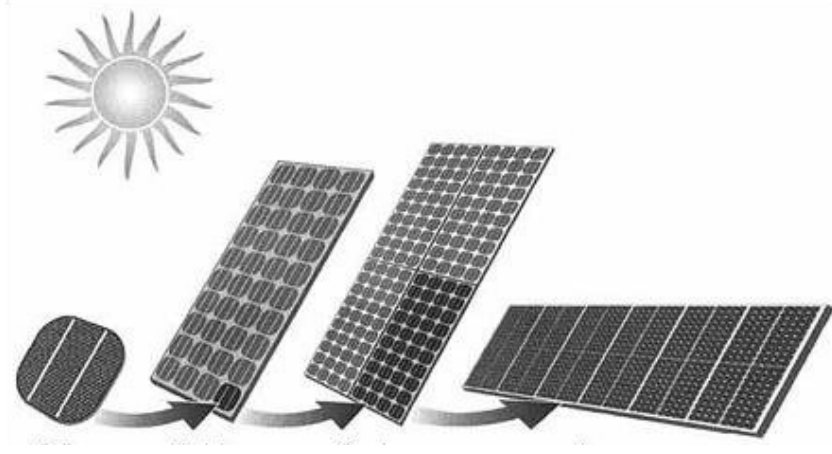
Fotovoltaik hücre üretimi yapılırken yarı iletken özellik gösteren birçok malzeme içerisinde genellikle silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin kullanılmasının başlıca nedenlerinden birisi kolay ulaşılabilir olması ve maliyet açısından ucuz olmasıdır (Altaş, 1998).

Bu yarı iletken malzemelerin fotovoltaik hücre olarak kullanılabilmesi için p-tipi ve n-tipi olarak katkılanması gerekmektedir. Katkılama eriyik haldeki yarı iletken içerisine kontrollü olarak katkı maddesinin eklenmesiyle yapılmaktadır (Rauschenbach, 2012). N-tipi bir yarı iletken elde etmek için 4A grubundan seçilen yarı iletken element içerisine 5A grubundan bir element eklenir. 4A grubu elementinin son yörüngesinde bulunan 4 elektron ile 5A grubundan eklenen elementin son yörüngesinde bulunan 5 elektronun 4 tanesi ile kovalent bağ oluşturur. Fazla olan 1 elektron ise kristal yapıya verilir. Bu tarz elementlere n-tipi katkı maddesi adı verilir, elde edilen malzemeye ise n-tipi yarı iletken denilir. Benzer bir yöntemle p-tipi yarı iletken elde etmek için 4A grubundan seçilen yarı iletken element içerisine 3A grubunda yer alan elementler içerisinden bir tanesi kontrollü bir şekilde eklenir. 4A grubundan seçilen elementin son yörüngesinde bulunan 4 elektronun 3 tanesi 3A grubundan seçilen elementin son yörüngesinde bulunan 3 elektron ile kovalent bağ oluşturur. Eksik olan 1 elektronun oluşturduğu bölgeye hole veya boşluk adı verilir. Bu tarz elementlere p-tipi katkı maddesi adı verilirken elde edilen kristal yapıya da p-tipi yarı iletken adı verilir (Durgut, 2015). P-tipi ve n-tipi yarı iletken kristaller birbirleri üzerine yerleştirilerek fotovoltaik hücre elde edilmektedir. Elde edilen fotovoltaik hücre kullanılan elementlere göre güneş ışınım spektrumundaki her dalga boyu için belirli bir alanı kullanabilir. Güneşten gelen ışık enerjisinin yarı iletken fotovoltaik hücre üzerine düşmesi sonucu n-tipi yarı iletkende fazla bulunan elektronlar enerji kazanarak p-tipi yarı iletkenine hareket eder (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Fotovoltaik Hücrede Elektron Akışı (Koç, 2018).

Bu serbest elektronların hareketi sonucu bir elektrik akımı meydana gelir. Güneşten gelen yüksek enerjiye sahip mor ötesi ışınlar, düşük enerjiye sahip kızılötesi ışınlar ve arada kalan görülebilir ışıklardan herhangi biri fotovoltaik hücrenin kendine özgün bant genişliğine bağlı olarak hücre içinde elektron akışı meydana getirmektedir. Atoma bağlı olan elektronların valans bandından, iletkenlik bandına doğru iletimi esnasında bir elektronun gönderimi için gerekli enerji miktarına bant genişliği adı verilmektedir. Birimi ise elektron volt olup “eV” şeklinde gösterilmektedir. Bant genişliğinden daha düşük enerji seviyesinde gelen ışınlar elektronlar üzerinde herhangi bir etki oluşturmazken, bant seviyesinde veya daha yüksek seviyedeki enerji ile gelen ışınlar elektronları harekete geçirerek elektron akışını sağlar. Devredeki elektron akışı hücreden üretilen gücü de etkilemektedir. Serbest elektron sayısını ve boşluk sayısını arttırmak fotovoltaik hücrelerin yüzey alanının artırılmasıyla mümkün olmaktadır. Artırılan yüzey alanı sayesinde hücreler üzerine daha fazla güneş ışınımı düşmekte bu da daha fazla elektronu tetikleyerek sistemdeki elektron akışını arttırmaktadır. Artan elektron akışı, sistemden elde edilen güç miktarını da doğru oranda değiştirmektedir (Koç, 2018).



Şekil 2.8. Fotovoltaik Hücrelerin Seri ve Paralel Bağlanması.

Yüzey alanını arttırmak için Şekil 2.8’de gösterildiği gibi fotovoltaik hücrelerin seri veya paralel bağlanması gerekmektedir. Bir fotovoltaik hücrenin gücü üretim yöntemine göre 0,3 W ile 2 W arası değişiklik gösterirken, hücrelerin birbirlerine uygun şekilde bağlanması ile elde edilen fotovoltaik panelin gücü 10 W ile 300 W arasında değişmektedir. Elde edilen paneller de uygun biçimde bağlandığında elde edilen dizilerin gücü 5 MW değerinin üzerine ulaşmaktadır.

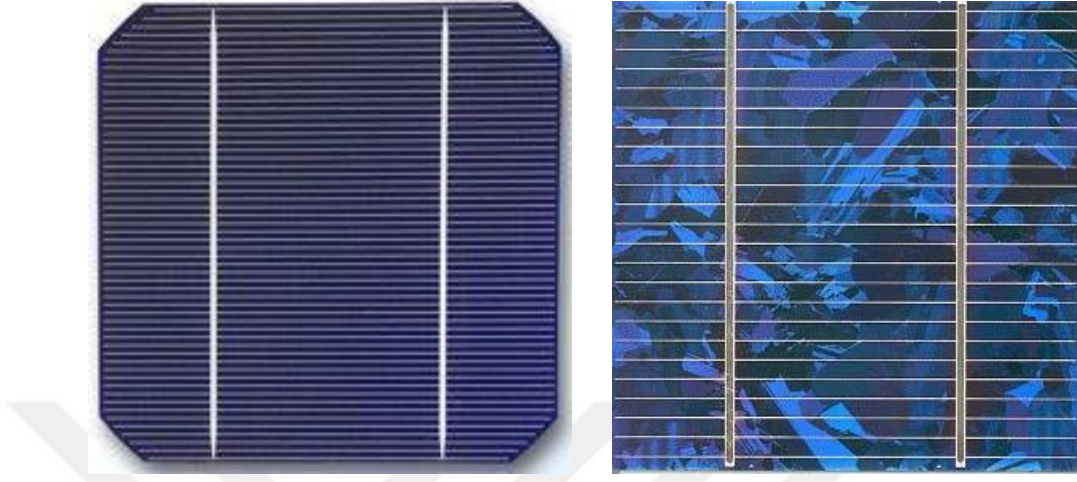
2.4.3 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Fotovoltaik hücre üretimi yapılırken genellikle doğada bol miktarda bulunan silisyum kullanılmaktadır. Fakat silisyumun doğada genellikle saf halde olmayıp silisyum dioksit (SiO_2) halde bulunması sebebi ile saflaştırma işlemine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum fotovoltaik hücre üretim maliyetini ciddi miktarda yükseltmektedir. Gelişen teknoloji, güneşten gelen ışınımın farklı dalga boylarından yararlanılmak istenmesi, farklılık gösteren kullanım alanları dolayısıyla farklı türlerde fotovoltaik hücreler üretilmiştir. Fotovoltaik hücreler genel olarak 3 ana başlık altında sınıflandırılmaktadır.

2.4.3.1 Birinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler

Kristal fotovoltaik hücreler olarak da adlandırılan birinci jenerasyon fotovoltaik hücreler diğer jenerasyonlara göre maliyetinin düşük ve verimlerinin

yüksek olması sebebiyle en çok tercih edilen hücrelerdir. Üretim aşamasında silisyumun kristal yapısına ve saflığına göre monokristal ve polikristal olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır (Şekil 2.9).

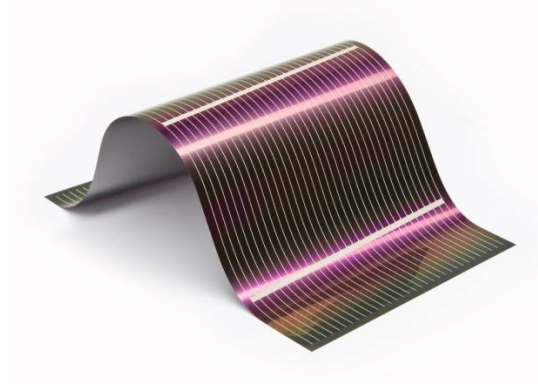


Şekil 2.9. Monokristal hücre (Solda), Polikristal hücre (Sağda).

Monokristal fotovoltaik hücrelerin üretimi aşamasında yüksek saflıkta silisyum kullanılmaktadır. Kristal yapıdaki atom dizilişleri düzgün ve homojendir. Bu tür hücrelerin verimleri %20 civarındadır. Polikristal fotovoltaik hücrelerin üretim sırasında kristal yapılarında oluşan bozukluklardan dolayı verimleri monokristal fotovoltaik hücrelere göre daha düşüktür. Bu tür hücrelerin verimleri %15 civarındadır. Polikristal hücreler, monokristal hücrelere göre düşük verime sahip olmalarına karşın, üretim maliyetlerinin az olması nedeniyle en fazla üretilen hücre yapısıdır.

2.4.3.2 İkinci Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler

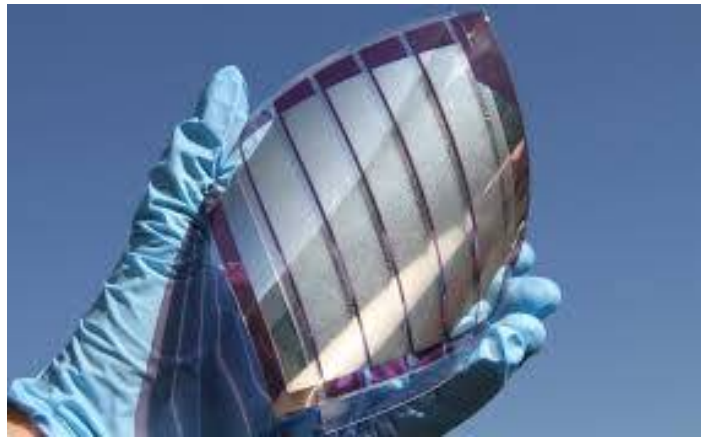
İnce film fotovoltaik hücreler olarak adlandırılan bu hücreler esnek yapıda olmalarından dolayı daha çok çatı ve cephe uygulamalarında tercih edilmektedir. Amorf silisyum, Kadmiyum Tellür, Bakır İndiyum Galyum diselenyum gibi farklı türleri mevcuttur. Bu tür hücrelerin verimleri %8 - %12 aralığında olmaktadır. Taşınabilirliği ve kurulumu kolay olmasına rağmen düşük verimlerinden dolayı çok fazla tercih edilmemektedirler. Bazı türleri güneş ışınım spektrumunun, kristal hücrelere göre daha geniş dalga boyu aralığında reaksiyon göstermesinden dolayı kapalı havalarda verimleri kristal hücrelere göre daha yüksektir.



Şekil 2.10. İnce Film Fotovoltaik Hücre.

2.4.3.3 Üçüncü Jenerasyon Fotovoltaik Hücreler

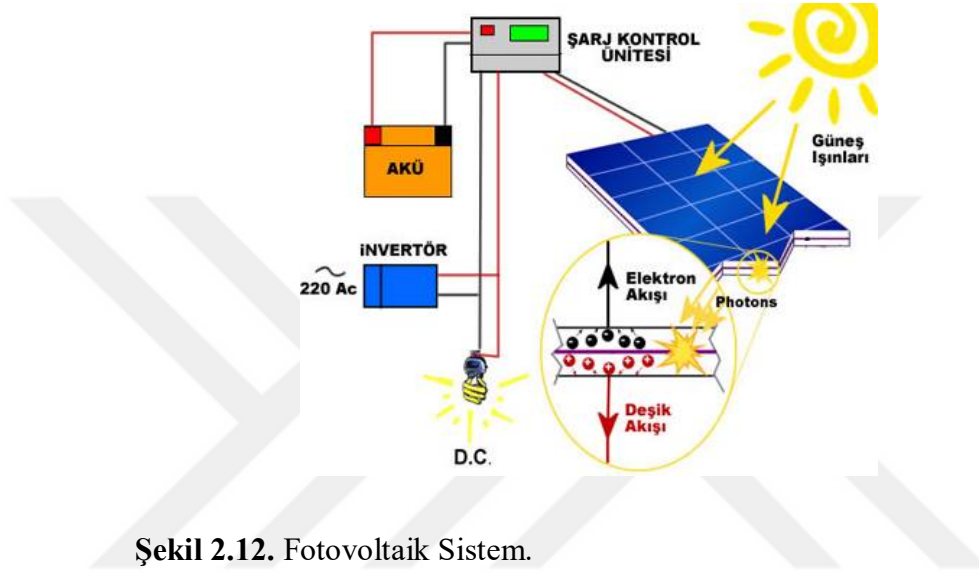
Organik fotovoltaik hücre olarak da adlandırılan bu hücreler üzerinde araştırmalar hala devam etmektedir. Çok eklemlili fotovoltaik hücreler, kuantum parçacık fotovoltaik hücreler, iletken polimer ve iki katmanlı organik fotovoltaik hücreler, üzerinde araştırma yapılan organik fotovoltaik hücrelere örnek olarak gösterilebilir. Bu tür fotovoltaik hücrelerin üst yüzeyleri aktif polimer tabakasıyla kaplanarak veya çok katmanlı üretilerek güneş ışınımı ile gelen enerjinin mümkün olduğunca hücreler üzerindeki katmanlarda absorbe edilmesi amaçlanmaktadır. Üretilen çok katmanlı fotovoltaik hücrelerin optik geçirgenliğinin ve maksimum verimin sağlanabilmesi için bütün katmanların birbirleri ile uyumlu olması gerekmektedir (Waldauf vd., 2004).



Şekil 2.11. Organik Fotovoltaik Hücre.

2.5 Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Diğer Cihazlar

Güneş ışınımından gelen enerji fotovoltaik hücreler tarafından elektrik enerjisine dönüştürülürken fotovoltaik sistem içerisinde uygulamaya bağlı olarak şarj regülatörü, akü, invertör gibi çeşitli devre elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsur elemanların birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalışmasıdır. Bu sağlanmazsa sistem verimsiz çalışır.



2.5.1.1 Şarj Regülatörü

Akülerin verimli bir şekilde şarj olabilmesi için doğru akım kaynağından gelen gerilimin stabil olması önemlidir. Şarj regülatörü, fotovoltaik panel üzerinden elde edilen akım ve gerilim sabit olmadığından elde edilen elektrik enerjisini düzenleyerek sabit bir şekilde akülerin şarj olmasını sağlar. Aynı zamanda şarj regülatörü akülerden enerji kaynağına ters akım akmasını önler. Aküyü aşırı şarjdan koruyarak akü dolduğu zaman fotovoltaik panellerden aküye gelen elektrik akımını keser.



Şekil 2.13. Şarj Regülatörü.

2.5.1.2 Akü

Fotovoltaik panelden üretilen enerjiyi depolamaya yarayan aküler özellikle off-grid sistemlerin en önemli sistem elemanlarından. Şarj-deşarj verimliliğinin yüksek, ömrünün ise uzun olması gerekir. Jel aküler bu beklentileri yüksek oranda karşıladığı için fotovoltaik sistemlerde genellikle tercih edilmektedirler. Jel aküler içerisinde jöle kıvamında elektrolit bulunan akülerdir. Sıcaklık ve titreşime dayanıklı olup bakım gerektirmeyen ağır çevre koşullarında çalışabilen yapıları vardır.



Şekil 2.14. Akü.

2.5.1.3 İnvörtör

Fotovoltaik panellerden üretilen doğru akım enerjisini alternatif akım enerjisine dönüştüren elektronik devre elemanıdır. İnvörtör çıkışında üretilen güç, kullanılan transformatörlere ve kontrol devrelerine göre herhangi bir gerilimde ve frekansta olabilir. Şebekeye bağlı sistemler için “on-grid invörtör” ve şebekeden ayırık sistemler için de “off-grid invörtör” seçilmelidir. İnvörtör seçiminde dikkat edilecek bir başka önemli nokta da; invörtör gücünün, sistemde aynı anda çalışan tüm cihazların gücünden fazla olması gerektiğidir.



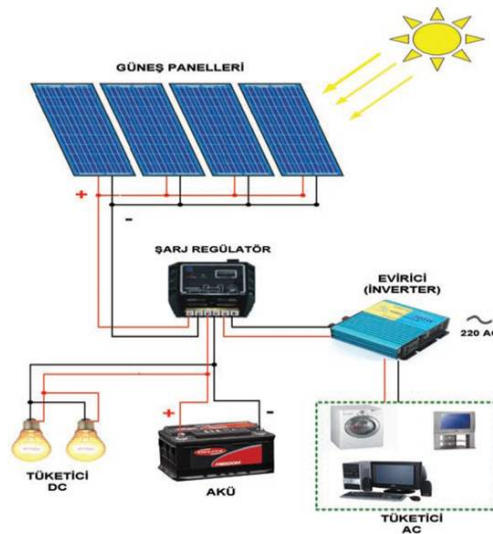
Şekil 2.15. İnvörtör.

2.6 Fotovoltaik Panellerin Kullanımı

Elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan her alanda fotovoltaiklerden yararlanılabilir. Genel olarak atmosferden gelen güneş ışınlarının fotovoltaik panel üzerine düşmesi ile DC elektrik enerjisi üretilmesi sonucunda bu enerjinin gündüzleri direkt olarak şehir şebekesine aktarıldığı şebekeye bağlı (on-grid) sistemler ile üretilen bu enerjinin sonradan kullanılması istenildiğinde bataryalarda depolayabilen şebekeden ayırık (off-grid) sistemler olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

2.6.1 Şebekeden Ayırık (Off-Grid) Sistemler

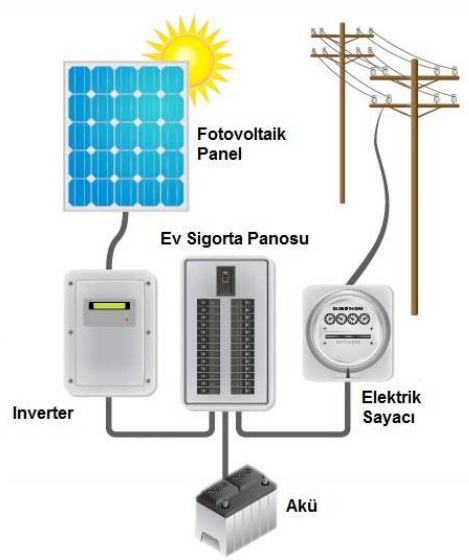
Elektrik şebekesinden bağımsız olarak kurulan off-grid sistemler fotovoltaik panellerden üretilen elektrik enerjisini akülerde depo ederek ihtiyaç duyulan zamanlarda doğru akım olarak direkt kullanıma veya invertör aracılığı ile alternatif akıma dönüştürülerek kullanıma olanak veren sistemlere verilen isimdir (Vannini ve Taggart, 2014). Off-grid sistemler fotovoltaik panel, şarj regülatörü, akü ve genellikle invertör olmak üzere 4 ana parçadan oluşmaktadır. Elektrik şebekesinin olmaması veya şebeke bağlantısının tesis maliyetinin yüksek olması gibi durumlarda alternatif bir çözüm olarak görülmektedir. Off-grid fotovoltaik sistemin şeması aşağıda Şekil 2.16'de gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Off-grid Fotovoltaik Sistem Şeması (Koç, 2018).

2.6.2 Şebekeye Bağlı (On-Grid) Sistemler

Şebeke bağlantılı bu sistemler, fotovoltaik panellerden üretilen elektrik enerjinin akülerde depo edilmesinden ziyade üretim yerinde tüketilmesine dayalı çalışmaktadır (Teodorescu vd., 2011). Üretilen elektrik enerjisi yüksek çevrim gücüne sahip merkezi şebekeye bağlanabilen invertörler kullanılarak en yakın merkezi şehir şebekesine bağlanır. Bu bağlantı sayesinde fotovoltaik panellerden elde edilen elektrik enerjisi doğrudan şehir şebeke sistemine aktarılmaktadır. On-grid sistemlerin fotovoltaik panel, invertör ve çift yönlü sayaç olmak üzere 3 temel birleşimi vardır. Bu sistem kurulduğu yerin enerji ihtiyacını karşılarken, üretilen fazla enerji şehir şebekesine verilir. Yeterli enerjinin olmadığı durumlarda ise şehir şebekesinden enerji alınır. Sistemde akü kullanılmadığı için depolama için ayrı bir maliyet gerekmez. Aynı zamanda elektrik enerjisinde yaşanan kayıplar önemli ölçüde azalmış olmaktadır. On-grid fotovoltaik sistemin şematik gösterimi aşağıda Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17. On-Grid Fotovoltaik Sistem Şeması (Koç, 2018).

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ

Dünya üzerindeki enerji ihtiyacı arttıkça fotovoltaik hücreler üzerindeki araştırmaların artması ve giderek önem kazanmasıyla birlikte benzetim modelleri ile ilgili çalışmalar da zamanla artmaktadır (Ş. Yılmaz vd., 2012). Alternatif akım ve doğru akım kaynaklarından farklı karakteristiklere sahip olmaları, kısmi gölgelenme, ışınım değeri ve sıcaklık değişiminden hızlı bir şekilde etkilenmeleri fotovoltaik hücrelerin model benzetimlerini zorlaştıran başlıca unsurlardandır (Şimsek, 2010). Fotovoltaik hücrelerin modellenmesinde, çalışma koşullarında ölçülen I-V eğrisi ile uyum gösteren model benzetimi oluşturmak temel amaçtır. Fotovoltaik hücrelerin model benzetimleri ve parametrelerinin tahminleri üzerinde yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Güneşten gelen ışınım şiddetinin olmadığı durumlarda p-n bağlantılı bir diyot gibi davranan fotovoltaik hücre literatürde diyot akımı olarak bilinen ve bu akımı en iyi şekilde ifade eden Shockley denklemleriyle tanımlanmaktadır (Ramos Hernanz vd., 2010).

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.1.)$$

Burada;

I_0 = Ters Doyma Akımı (A)

q = Elektron Yüğü (C)

n = Diyot İdealite Faktörü

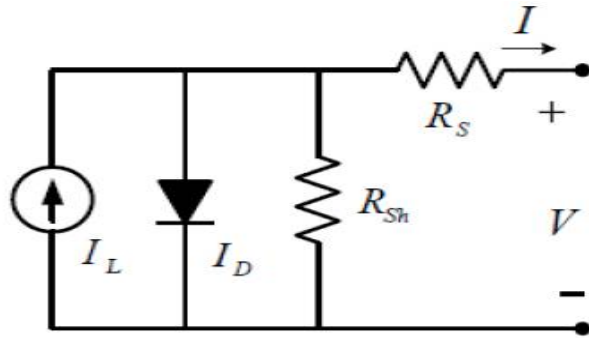
k = Boltzmann Sabiti (J/K)

T = Mutlak Sıcaklık (K)

Denklem 3.1 içerisinde k , T ve q ile sembolize edilen değerler için ayrıca kT/q oranı literatürde termal voltaj olarak bilinmekte ve V_t ile sembolize edilmektedir.

Günümüzde fotovoltaik hücrelerin I-V eğrilerini tahmin edebilmek için en çok kullanılan model benzetimi eşdeğer elektrik devresi ve onun matematiksel

ifadesidir. Yıllar boyunca temel diyot modelinden başlayarak, R_s modelleme, R_{sh} modelleme, 2-diyot ve 3-diyot modeline kadar eşdeğer elektrik devresi üzerinde birçok model benzetim yöntemi önerilmiştir (Brano vd., 2010; Khanna vd., 2015). Basitleştirilmiş eşdeğer elektrik devresinin şematik olarak gösterimi Şekil 3.1, matematiksel denklemi ise Denklem 3.2 ile verilmiştir (Rahim vd., 2013). Lineer ve lineer olmayan bileşenlerden oluşan eşdeğer elektrik devresinin kullanılmasının en büyük avantajı, visual basic, fortran veya matlab gibi programlama dillerinde basit bir şekilde uygulanabilirliğidir.



Şekil 3.1. Basitleştirilmiş Eşdeğer Fotovoltaik Hücre Devresi.

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3.2.)$$

Burada; I = Yük Akımı (A)

I_L = Işık Akımı (A)

I_0 = Ters Doyma Akımı (A)

V = Gerilim (V)

R_s = Seri Direnç (Ω)

R_{sh} = Paralel Direnç (Ω)

α = Modifiye Edilmiş Diyot İdealite Faktörü

Şekil 3.1'de gösterilen basitleştirilmiş eşdeğer fotovoltaik hücre devre şemasında fotovoltaik hücre devresi, bir akım kaynağı, akım kaynağına paralel olarak bağlı bir diyot ve paralel ve seri bağlı devre dirençleri ile sembolize edilerek modelleme benzetimi oluşturulmuştur. Yukarıda verilen Denklem 3.2'deki matematiksel modellemede belirtilen diyot ters doyma akımı (I_0), diyotun mutlak

sıcaklığı, diyotun gerilimi ve yük tarafından çekilen akımın fonksiyonu olarak değişkenlik gösterir (Ozcalık vd., 2013). Denklem içerisinde yer alan R_s ve R_{sh} fotovoltaik hücre verimini etkileyen seri ve paralel devre dirençlerini göstermektedir. Paralel devre dirençleri fotovoltaik hücrelerin üretimi esnasında oluşan kristal kusurları ile değişiklik gösterirken seri devre dirençleri ise fotovoltaik hücreler üzerinde yapılan metalik kontaklar ve kullanılan malzemelerin iç dirençleri ile değişiklik göstermektedir. Denklemde yer alan modifiye edilmiş diyot idealite faktörü (α) ise, hücre sayısına, diyot idealite faktörüne ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Karataş ve Altındal, 2004).

$$\alpha = \frac{nkTN_s}{q} \quad (3.3.)$$

Denklem 3.3'de belirtilen modifiye edilmiş diyot idealite faktörünü hesaplarken n ile sembolize edilen diyot idealite faktörüdür ve hesaplama yapılırken ideal diyotlar için bu değer 1 olarak kabul edilirken gerçek tipik diyotlarda ise 1 ile 2 arasında kabul edilmektedir. k Boltzmann sabiti olup değeri $1,381 \times 10^{-23}$ J/K'dir. Denklem içerisinde T ile sembolize edilen değer mutlak sıcaklıktır ve birimi Kelvin'dir. N_s ile ifade edilen değer fotovoltaik panel üzerinde bulunan seri bağlı hücre sayısını ifade etmektedir. q ile sembolize edilen değer ise elektron yükünü ifade eder ve değeri $1,602 \times 10^{-19}$ coloumb'dur.

Yukarıda verilen eşdeğer fotovoltaik hücre devresinin matematiksel modelini kullanabilmek için bazı denklem parametrelerinin değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Denklem parametrelerini belirleyebilmek içinse en basit yöntem fotovoltaik hücre üreticilerin söz konusu hücre için sağladığı bilgileri kullanmaktır. Bunun yanı sıra, denklemler oluşturulurken fotovoltaik hücre üzerinden elde edilen I-V eğrisi üzerindeki kritik noktalar kullanılmaktadır. Bu noktalar kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve fotovoltaik hücrenin veriminin en yüksek olduğu nokta olan maksimum güç noktasıdır. Bu önemli noktaların yanı sıra, yeni denklemlerin türetilmesi için türev fonksiyonlarından yararlanılabilir. Güç eğrisi grafiğinde maksimum güç noktasındaki eğimin sıfıra eşit olduğu bilgisi de çeşitli parametrelerin değerlerini ayarlamak için referans görevi görmektedir (Ulapane vd., 2011; Xiao vd., 2004). Belirli durumlarda anlık hesaplamalar yapılırken açık devre gerilim sıcaklık katsayısı ($\mu_{V_{oc}}$) ve kısa devre akımı sıcaklık katsayısı ($\mu_{I_{sc}}$)

parametre değerlerinin belirlenmesi için analitik yöntemlerden yararlanılmaktadır (Chenni vd., 2007; Kou vd., 1998). En basit yöntem ise sabit parametre yöntemidir (Xiao vd., 2004). Bu yöntem kullanılırken fotovoltaik üzerinden elde edilen ışık akımı (I_L) ve diyot ters doyma akımı (I_0) sıcaklık ve ışınım şiddeti gibi koşullarda değişiklik gösterirken seri devre dirençleri (R_s) ve paralel devre dirençleri (R_{sh}) belirlenmiş bir durum için hesaplanarak bütün durumlar için aynı kabul edilir. Bunun yanı sıra fotovoltaik hücreler ışınım şiddeti (G) ve sıcaklık (T) değişimleri için oldukça duyarlı sistemler olduğu için model parametrelerinin bir kısmını sabit kabul etmek uygun bir yaklaşım olacaktır (Ghani vd., 2015; Ishaque ve Salam, 2011). Hesaplama yapılan her bir parametrenin fotovoltaik hücreden elde edilen I-V eğrisi üzerinde önemli etkisi vardır. Örneğin; kısa devre akımı sıcaklık katsayısının değişimi kısa devre akımı değerine etki ederken, açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı açık devre gerilimini değiştirmektedir. Bunun yanı sıra seri devre direnci değerinin artması maksimum güç noktası ve açık devre gerilimi arasındaki I-V eğrisinin eğiminin azalmasına sebep olurken, paralel devre dirençlerinin artması ise kısa devre akımı ile maksimum güç noktası arasındaki I-V eğrisinin eğiminin azalmasına neden olmaktadır (Suthar vd., 2013). Fotovoltaik hücreler üzerinde daha gerçekçi ve doğru sonuçlar elde etmek için farklı çevresel koşullar altında çalışacağı da dikkate alınmalıdır. Üreticilerin hazırladıkları veri sayfalarında genellikle standart test koşulları (STC) altında elde edilen bilgiler verilmektedir. Fakat fotovoltaik hücreler çalışırken ideallikten uzak, genellikle değişken çevre koşullarında sürekli değişen ışınım şiddeti ve sıcaklık altında çalışmaktadır.

Model parametrelerini tahmin etmek için farklı bir yaklaşım da doğrusal olmayan optimizasyon tekniklerini kullanarak I-V eğrisi uydurma yoluyla parametre değerlerine ulaşmaktır. Elde edilen parametrenin doğruluğu, algoritmanın tipine, fonksiyonuna ve başlangıç koşullarına bağlıdır (Easwarakhanthan vd., 1986; Ortiz-Conde vd., 1999). Parametre sayısının artması optimizasyon yaparken doğru sonuçlar elde edilmesini zorlaştırmaktadır (El-Naggar vd., 2012; Saha vd., 2015). Son yıllarda eğri uydurma yöntemlerinden elde edilen sonuçlardan dolayı genetik algoritma (Moldovan vd., 2009; Sellami ve Bouaïcha, 2011), bakteri toplayıcı algoritması (Rajasekar vd., 2013), diferansiyel evrim (da Costa vd., 2010; Gong ve Cai, 2013), guguk araştırması (Ma vd., 2013), parçacık sürüsü optimizasyonu (Sandrolini vd., 2010; Ye vd., 2009), tavlama benzetimi (El-Naggar vd., 2012),

harmoni araştırması (Askarzadeh ve Rezazadeh, 2012), desen arama optimizasyonu (AlHajri vd., 2012; AlRashidi vd., 2011), yapay arı sürüsü optimizasyonu (Askarzadeh ve Rezazadeh, 2013a), kuş eşleştirme optimizatörü (Askarzadeh ve Rezazadeh, 2013b) eğitim bilgisi gerektirmeyen lineer olmayan fonksiyonların kullanımındaki etkinliği nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Fotovoltaik hücrelerde modelleme yapılırken parametreler hakkında kapsamlı bilgi gerektiğinde optimizasyon yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu bilgiler hücre üretim sürecini optimize etmek veya yaşlanma ve çevresel bozulma nedeniyle hücre performansının araştırılması için önemlidir (Chegaar vd., 2004; Ikegami vd., 2001; Kennerud, 1969; Sellami ve Bouaïcha, 2011).

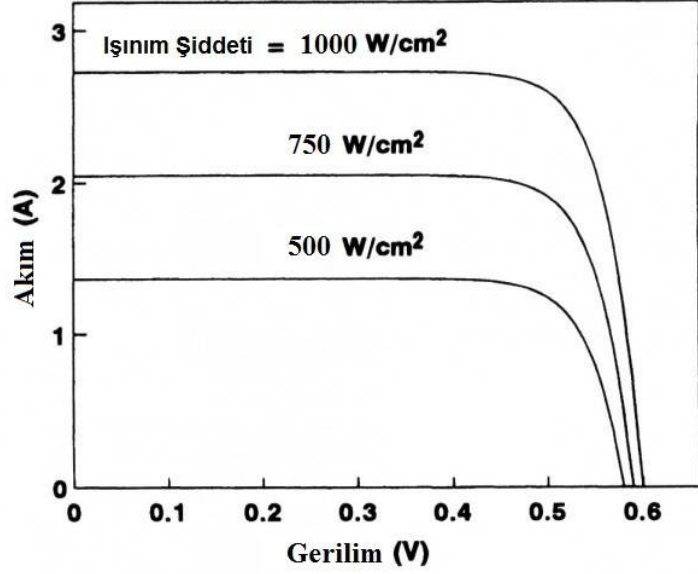
Çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konulan fotovoltaik hücre modelleme yöntemleri arasında çok az bir bütünlük olduğu kabul edilmektedir. Fotovoltaik hücre modellemelerin yeteneklerini tek bir performans endeksine göre sıralamak zordur.

3.1 Model Benzetimlerine Etki Eden Faktörler

Fotovoltaik hücreler için model benzetimleri yapılırken çalışma koşulları sırasında karakteristik özelliklerinin yanı sıra, gün içinde sürekli değişkenlik gösteren ışınım şiddeti ve sıcaklık parametreleri fotovoltaik panel üzerinden elde edilen akım değerini önemli ölçüde değiştirmektedir.

3.1.1 Güneş Işınım Şiddetinin Etkisi

Güneşten gelen ışınım şiddetinin değerinin artması sonucu fotovoltaik panel üzerine düşen foton sayısının artması panel üzerinde bulunan n-tipi yarıiletken malzemeden elektron koparma olasılığını arttıracığı için panelin ürettiği akım miktarını da arttırmaktadır. Aynı zamanda açık devre gerilimi de ışınım şiddetinin etkisiyle bir miktar yükselmektedir. Her iki değer artması dolayısıyla ışınım şiddetinin artışı fotovoltaik panel üzerinden elde edilen güç değerini arttırmaktadır.



Şekil 3.2. Işınım Şiddeti Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi (Ozcalık vd., 2013).

Şekil 3.2’de gösterilen grafikte fotovoltaik hücrenin, ışınım şiddetinin değişmesi sonucunda akım ve gerilim değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Işınım şiddetinin değişmesi sonucu fotovoltaik hücreden elde edilen ışık akımı (I_L) önemli oranda değişmektedir. Belirli ışınım şiddetinde Fotovoltaik hücreden elde edilen ışık akımı (I_L) değerini hesaplayabilmek için aşağıda belirtilen denklem 3.4’den faydalanılmaktadır.

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} [I_{L,ref} + \mu_{I_{sc}} (T_c - T_{c,ref})] \quad (3.4.)$$

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

G = Işınım şiddeti (W/m^2)

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

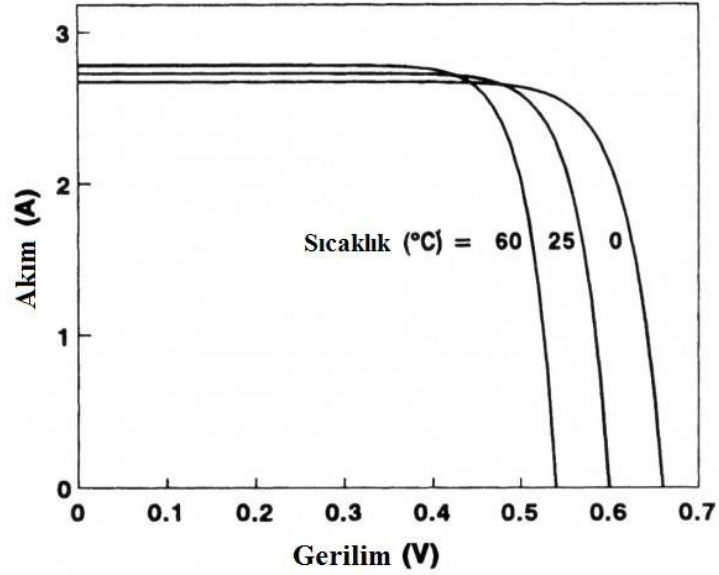
$\mu_{I_{sc}}$ = Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (A/K)

T_c = Fotovoltaik hücre sıcaklığı (K)

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

3.1.2 Sıcaklığın Etkisi

Güneşten gelen ışık enerjisi fotovoltaik hücreler üzerine düştüğünde fotovoltaik hücrenin sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmektedir. Değişen sıcaklık değeriyle birlikte fotovoltaik hücrenin akım ve gerilim değerleri önemli miktarda değişmekte, bu da fotovoltaik hücreden elde edilecek güç miktarını değiştirmektedir. Sıcaklık değerinin artması, fotovoltaik hücrenin ürettiği akım değerinin artmasını sağlarken, gerilim değerinin önemli ölçüde düşmesine neden olmaktadır. Sıcaklık etkisi sonucunda meydana gelen bu değişim maksimum güç noktası değerinin daha düşük seviyelere inmesine neden olmaktadır. Bu durum sonucunda da fotovoltaik hücreden elde edilecek verim düşmektedir. Sıcaklık değişimi ile fotovoltaik hücrede meydana gelen akım ve gerilim değerinin değişimi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



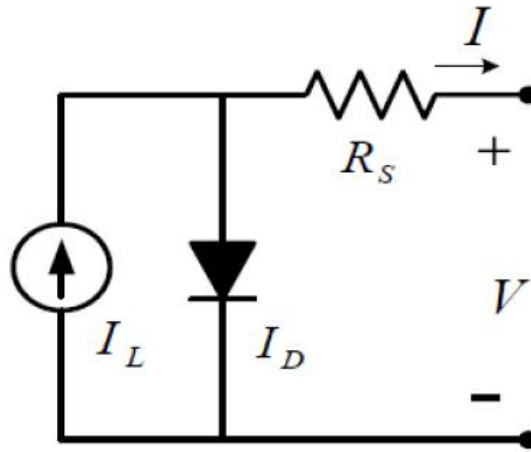
Şekil 3.3. Sıcaklık Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi (Ozcalık vd., 2013).

3.2 Deneylerde Kullanılan Model Benzetimleri

Yukarıda anlatılan fotovoltaik hücre modelleri teknolojinin ilerlemesi ve yeni fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesiyle birlikte benzer oranda değişim göstermektedir. Fotovoltaik hücrelerin I-V eğri karakteristiğini ulaşmak için çeşitli analitik, nümerik ve yapay zekâ gibi yöntemler kullanılabilir. Bir fotovoltaik

hücreye ait I-V eğri karakteristiğinin yukarıda ifade edildiği üzere çeşitli parametre ve değişkenlere bağlı olarak ölçüm değerlerine yakın olarak elde edilmesi, bu tür enerji sistemlerinden elde edilen güç ve enerji verilerinin düşük bir hata oranı ile hesaplanmasını sağlayacaktır. Bu da, söz konusu enerji sistemlerinin güvenilirliği ve sistemden elde edilen enerjinin maliyeti gibi çok önemli parametrelerin yüksek bir doğruluk oranı ile belirlenmesini temin edecektir. Bu bağlamda, literatürde en çok kullanılan I-V modellerinin başında yukarıda da değinilen “Analitik” çözüm yaklaşımları gelmektedir. Konunun tarihsel gelişimi incelendiğinde de “Analitik” yaklaşımların çok önemli bir yer tuttuğu gözlenmektedir. Analitik yöntemlere alternatif olan “Nümerik” ve “Yapay Zekâ” yaklaşımlarının daha çok son yıllarda geliştiği gözlenmektedir. Bu tez kapsamında literatürde en çok kullanılan analitik modellerden olan 4-değişkenli model benzetimi, 5-değişkenli model benzetimi, geliştirilmiş 4-değişkenli model benzetimi ve 2-diyotlu model benzetimi tercih edilmiştir.

3.2.1 4-Değişkenli Model Benzetimi



Şekil 3.4. 4 Değişkenli Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.

Şekil 3.4’de 4 değişkenli fotovoltajik eşdeğer elektrik devresi verilen model benzetimini kullanarak I-V eğrisini elde edilebilmesi için kullanılan matematiksel model aşağıda denklem 3.5’te verilmiştir (Celik ve Acikgoz, 2007).

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_S}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

Yukarıda verilen denklemdeki değişkenler I_L , I_0 , R_S ve α 'dır. Denklem üzerinden I-V grafiğinin elde edilebilmesi için öncelikle değişkenlerin ışıyım şiddeti ve sıcaklık değerlerine göre nasıl değiştiği incelenmelidir. Bu değişkenlerin denklemleri aşağıda verilmiştir.

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

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

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

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

Yukarıda verilen denklemler incelendiğinde ışıyım şiddeti ve sıcaklık değerlerine göre değişkenlik gösteren değişkenlerin hesaplanabilmesi için ilk olarak referans koşullarındaki değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Değişkenlerin referans koşullarındaki değerlerini bulabilmek için aşağıda verilen denklemlerin hesaplanması gerekmektedir.

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

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

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

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

Yukarıda verilen denklemleri hesaplarken kısa devre akımı sıcaklık katsayısı ($\mu_{I_{sc}}$) ve açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı ($\mu_{V_{oc}}$) değerlerinin deneysel olarak tespit edilmesinin zorluğundan dolayı literatürdeki benzer hücreler için verilen değerlerden yararlanılmıştır. Bunlar sırası ile 0,001325 A/K ve -0,0775 V/K olarak kabul edilmiştir (Duffie ve Beckman, 2013). Değişkenler yukarıda verilen

denklemler ile hesaplandıktan sonra Denklem 3.5 çözümlenerek her gerilim değeri için akım değeri hesaplanarak fotovoltaik panelin I-V eğrisi elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda her gerilim değeri için fotovoltaik panelden elde edilen akım değeri denklem 3.14 kullanılarak panelden elde edilebilecek güç değeri bulunur. Güç değerlerine bakılarak maksimum güç noktası belirlenerek fotovoltaik panelin hangi gerilimde çalıştırılması gerektiği belirlenir.

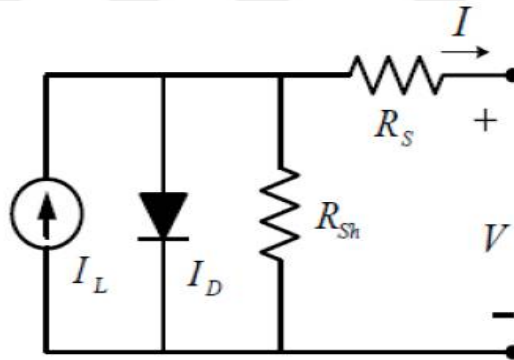
$$P = IV \quad (3.14.)$$

Fotovoltaik panelin verimini hesaplamak için;

$$\eta = \frac{P}{G \times A} \times 100 \quad (3.15.)$$

denklemini kullanılır.

3.2.2 5-Değişkenli Model Benzetimi



Şekil 3.5. 5 Değişkenli Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.

Şekil 3.5’de 5 değişkenli fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi verilen model benzetimini kullanarak I-V eğrisinin elde edilebilmesi için kullanılan matematiksel model aşağıda Denklem 3.16’da verilmiştir (Celik ve Acikgoz, 2007). 4 değişkenli model benzetiminden farklı olarak, bu model benzetiminde paralel devre dirençlerinin de fotovoltaik panel üzerinden elde edilecek I-V eğrisi üzerindeki etkisi de dikkate alınmaktadır.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_S}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{Sh}} \quad (3.16.)$$

Denklem 3.16'ta α ile sembolize edilen ifade modifiye edilmiş diyet faktörüdür ve denklem 3.17 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\alpha = mV_t \quad (3.17.)$$

m = idealite faktörü

V_t = termal gerilim (V)

Denklem 3.17'de kullanılan idealite faktörü ve termal gerilim değerlerinin bulunması için aşağıda verilen denklemlerin hesaplanması gerekmektedir.

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (3.18.)$$

$$m = n_i N_s \quad (3.19.)$$

veya

$$m = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_{so} - V_{oc}}{V_t \left[\ln \left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{sh}} - I_{mp} \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \right) \right]} \quad (3.20.)$$

Güneşten gelen enerji sonucu fotovoltaik hücre üzerinde oluşan ışık akımı (I_L) ve ters doyma akımını (I_0) hesaplamak için:

$$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc}R_s}{mV_t} \right) - 1 \right] \quad (3.21.)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(- \frac{V_{oc}}{mV_t} \right) \quad (3.22.)$$

Fotovoltaik hücre üzerinde akım ve gerilim değerlerine etki eden seri devre ve paralel devre dirençlerini hesaplamak için;

$$R_s = R_{s_0} - \left[\frac{mV_t}{I_0} \exp \left(- \frac{V_{oc}}{mV_t} \right) \right] \quad (3.23.)$$

$$R_{sh} = R_{sh_0} \quad (3.24.)$$

denklemleri kullanılmaktadır. Yapılan literatür araştırması sonucunda R_{s_0} değerinin 0,30 Ω ile 0,33 Ω arasında değişkenlik gösterdiği, R_{sh_0} değerinin ise 50 Ω ile 170 Ω arasında değiştiği görülmüştür (Çelik ve Acikgoz, 2007). Hesaplanması gereken seri devre dirençleri (R_s) ve paralel devre dirençleri (R_{sh}) üzerine tartışmalar devam

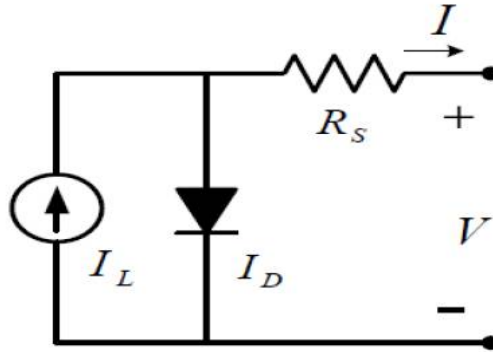
etmektedir (De Blas vd., 2002). Bunun yanı sıra güneşten gelen ışınım şiddetine ve fotovoltaik hücrenin sıcaklığına bağlı olarak değişiklik gösteren kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) sırasıyla aşağıda verilen Denklem 3.25 ve Denklem 3.26 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.25.)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + mV_t \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{V,oc}(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.26.)$$

Hesaplar sonucu elde edilen bu değerler denklem 3.16'da yerine yazılarak her gerilim değeri için o gerilim değerinde fotovoltaik panelden elde edilecek akım değeri bulunur. Ulaşılan akım ve gerilim değerleri için belirlenen ışınım şiddeti ve sıcaklık değeri için fotovoltaik panelin I-V eğrisi elde edilir. Fotovoltaik modelin maksimum güç noktasını belirlemek amacıyla denklem 3.14 kullanılarak panelin güç grafiği elde edilir. Son olarak fotovoltaik panelin verimliliği denklem 3.15 kullanılarak hesaplanır.

3.2.3 Geliştirilmiş 4-Değişkenli Model Benzetimi



Şekil 3.6. Geliştirilmiş 4 Değişkenli Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.

Şekil 3.6'da geliştirilmiş 4 değişkenli fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi verilen model benzetimini kullanarak I-V eğrisini elde edebilmek için önerilen matematiksel model aşağıda denklem 3.27'de gösterilmektedir (Khezzar vd., 2014).

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_S}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.27.)$$

Model benzetimi uygulanırken denklem içerisinde hesaplanması gereken değişkenler I_L, I_0, R_s ve α değerleridir. Bu değişkenlerin hesaplanabilmesi için aşağıda belirtilen denklemlerin çözümlenmesi gerekmektedir.

$$I_L = I_{sc} \quad (3.28.)$$

$$I_0 = I_{sc} \left[\exp \left(-\frac{q}{N_s n k T_c} V_{oc} \right) \right] \quad (3.29.)$$

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

$$R_s = \frac{\frac{N_s n k T_c}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) + V_{oc} - V_m}{I_m} \quad (3.31.)$$

$$\alpha = \frac{q(2V_m - V_{oc})}{N_s k T \left[\frac{I_m}{I_{sc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]} \quad (3.32.)$$

Denklem 3.32’de verilen modifiye edilmiş diyot idealite faktörü (α) hesaplanırken öncelikle Nominal Operasyonel Hücre Sıcaklığı (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT) olarak isimlendirilen ve fotovoltaik hücrelerin referans koşullar (ortam sıcaklığı 20 °C, ışınım 800 W/m², rüzgar hızı 1 m/sn) altında çalışırken elde edilen değerler kullanılarak hesaplama yapılır. Aynı zamanda verilen referans değerlerini kullanarak referans koşullarından farklı ışınım şiddeti ve sıcaklık değeri için kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum güç noktasındaki akım (I_m) ve maksimum güç noktasındaki gerilim (V_m) değerleri aşağıdaki denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır (De Soto vd., 2006; Zhou vd., 2007).

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I_{sc}} (T_c - T_{c,ref}) \quad (3.33.)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + \frac{N_s n k T_c}{q} \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \mu_{V_{oc}} (T_c - T_{c,ref}) \quad (3.34.)$$

$$I_m = I_{m,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I_m} (T_c - T_{c,ref}) \quad (3.35.)$$

$$V_m = V_{m,ref} + \frac{N_s n k T_c}{q} \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \mu_{V_m} (T_c - T_{c,ref}) \quad (3.36.)$$

Denklem 3.34 ve denklem 3.36'dan elde edilen açık devre gerilimi (V_{oc}) ve maksimum güç noktasındaki gerilim (V_m) değerlerinin hesaplaması yapılan ışıyım şiddeti ve sıcaklık değeriyle benzetiminin daha yakın olması için aşağıda verilen denklemleri kullanarak yeniden hesaplaması yapılır.

$$V_{oc} = \frac{V_{oc,ref}}{1+\beta_1 \ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)} \left(\frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)^{\gamma_1} \quad (3.37.)$$

$$V_m = \frac{V_{m,ref}}{1+\beta_2 \ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)} \left(\frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)^{\gamma_2} \quad (3.38.)$$

$$\beta_1 = \frac{\frac{V_{oc,ref}}{V_{oc}^1} - 1}{\ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)}, \quad \gamma_1 = \frac{\ln\left(\frac{V_{oc,ref}}{V_{oc}^2}\right)}{\ln\left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)} \quad (3.39.)$$

$$\beta_2 = \frac{\frac{V_{m,ref}}{V_m^1} - 1}{\ln\left(\frac{G_{ref}}{G}\right)}, \quad \gamma_2 = \frac{\ln\left(\frac{V_{m,ref}}{V_m^2}\right)}{\ln\left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)} \quad (3.40.)$$

Yukarıda açık devre gerilimi (V_{oc}) ve maksimum güç noktasındaki gerilim (V_m) değerlerini hesaplamak için verilen denklem 3.37 ve denklem 3.38, β_1 , β_2 , γ_1 ve γ_2 fonksiyonlarını içermektedir. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için gerekli değerler aşağıda tablo 3.1'de gösterilmektedir.

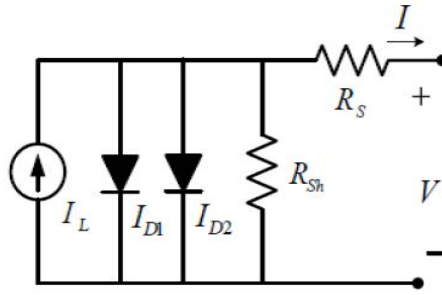
Tablo 3.1. β_1 , β_2 , γ_1 ve γ_2 parametreleri için kullanılan değerler

	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	

Yukarıda Tablo 3.1'de belirtilen açık devre gerilim değerleri ($V_{oc,ref}, V_{oc}^1, V_{oc}^2$) ve maksimum güç noktasındaki gerilim değerleri (V_m, V_m^1, V_m^2) için bunlara karşılık gelen ışıyım şiddeti ve sıcaklık değerleri kullanılarak denklem 3.39 ve denklem 3.40 çözümlenerek β_1 , β_2 , γ_1 ve γ_2 değerleri hesaplanır. Hesaplanan değerler doğrultusunda denklem 3.37 ve denklem 3.38 kullanılarak açık devre gerilimi (V_{oc}) ve maksimum güç noktasındaki gerilim (V_m) değerleri daha doğru bir şekilde hesaplanır. En son hesaplanan açık devre gerilimi (V_{oc}) ve maksimum güç

noktasındaki gerilim (V_m) doğrultusunda denklem 3.32 kullanılarak modifiye edilmiş diyot idealite faktörü (α), denklem 3.31 kullanılarak seri devre dirençleri (R_s) ve denklem 3.29 kullanılarak ters doyma akımı (I_0) yeniden hesaplanır. Elde edilen bu değerler kullanılarak denklem 3.27 çözümlenerek söz konusu koşullarda fotovoltaik panelin I-V eğrisi elde edilir. Gerilim değerlerine karşılık bulunan akım değerleri denklem 3.14 kullanılarak panelin maksimum güç noktası belirlenir ve sonra söz konusu ışınım ve sıcaklık değerleri için denklem 3.15 kullanılarak panelin verimliliği bulunabilir.

3.2.4 2-diyotlu Model Benzetimi



Şekil 3.7. 2-Diyotlu Model Benzetimi İçin Eşdeğer Elektrik Devresi.

Önceki model benzetimlerinde ihmal edilen tükenme bölgesindeki kayıpların 2-diyotlu model benzetimi için ihmal edilemeyecek derecede olduğu kabul edilmektedir (Khezzar vd., 2014). Şekil 3.7’de eşdeğer elektrik devresi verilen 2-diyotlu model benzetiminin matematiksel modellemesi aşağıda denklem 3.41’de gösterilmiştir.

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{n_1 k T_c N_s} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{n_2 k T_c N_s} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.41)$$

Denklem 3.41 içerisinde yer alan diyot idealite faktörü n_1 ve n_2 şeklinde gösterilmektedir. 2-diyotlu model benzetimi için diyot idealite faktörünü belirlerken bazı sınır koşulları vardır. Bunlar $n_1 \geq 1$, $n_2 \geq 1$ ve $p \geq 2,2$ şeklindedir. Bu değerleri belirleyebilmek için kullanılması gereken yöntem aşağıda denklem 3.42’de gösterilmiştir.

$$\frac{n_1+n_2}{p} \geq 1 \quad (3.42.)$$

Denklem 3.41 içerisinde yer alan diğer değişken parametrelerin hesaplanması için kullanılması gereken denklemler aşağıda verilmektedir.

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

$$I_L = [I_{L,ref} + \mu_{I_{sc}}(T_c - T_{c,ref})] \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3.44.)$$

$$I_{01} = I_{02} = \frac{I_{sc,ref} + \mu_{I_{sc}}(T_c - T_{c,ref})}{\exp\left[\frac{q(V_{oc,ref} + \mu_{V_{oc}}(T_c - T_{c,ref}))}{N_s k T_c \left(\frac{n_1+n_2}{p}\right)}\right] - 1} \quad (3.45.)$$

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

$$n = \frac{q(2V_{m,ref} - V_{oc,ref})}{N_s k T_{c,ref} \left[\frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref} - I_{m,ref}} + \ln\left(1 - \frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref}}\right)\right]} \quad (3.47.)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_s}{I_{L,ref} - I_{01} \left[\exp\left(q \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_s}{N_s k T_c}\right) + \exp\left(q \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_s}{N_s k T_c (p-1)}\right) + 2 \right] - \frac{P_{max,ref}}{V_{m,ref}}} \quad (3.48.)$$

Yukarıdaki denklemleri verilen parametreler hesaplandıktan sonra denklem 3.41'de kullanılarak fotovoltaik panelin söz konusu ışınım şiddeti ve sıcaklık değerindeki I-V eğrisi elde edilir. Fotovoltaik panelin gerilim değerlerine karşılık hesaplanan fotovoltaik hücreden elde edilecek akım değerleri ile denklem 3.14 yardımı ile söz konusu ışınım şiddeti ve sıcaklık değeri için panelden elde edilecek maksimum güç noktası bulunur. Bulunan bu değer doğrultusunda denklem 3.15 yardımıyla fotovoltaik panelin verimi bulunabilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

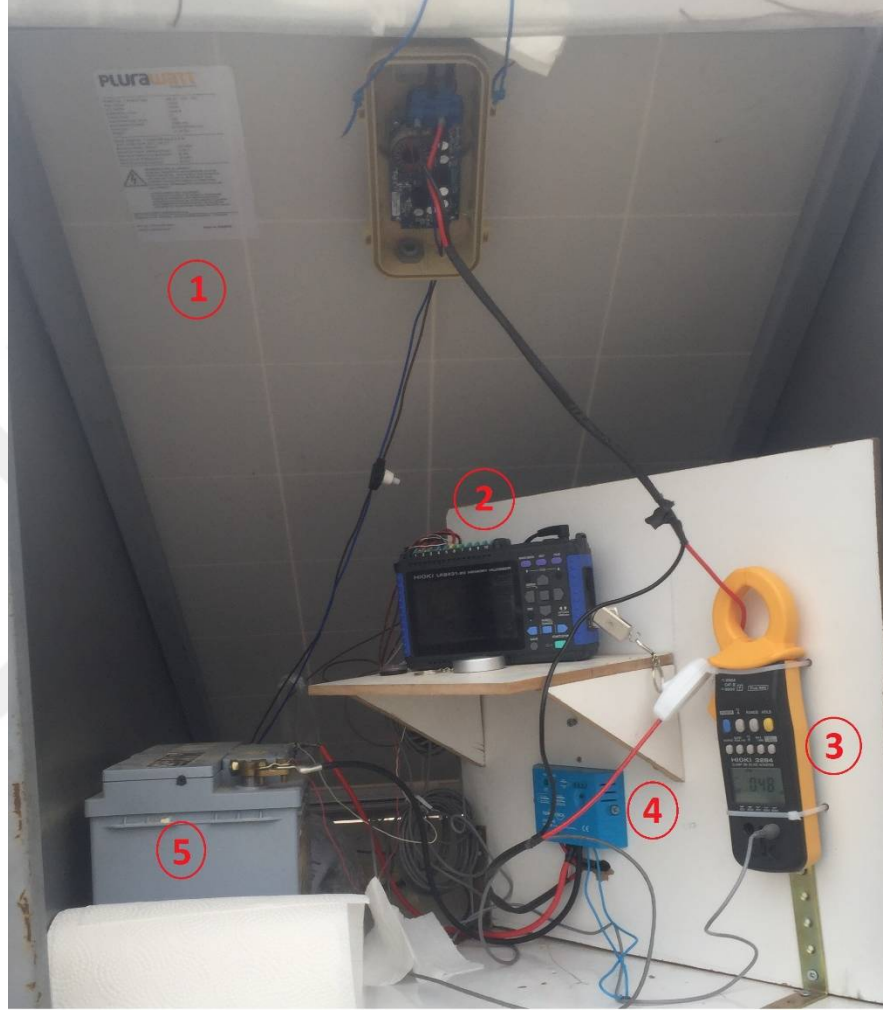
Bu bölümde önceki bölümde literatür taraması içinde anlatılan model benzetim yöntemleri arasından seçilen 4 değişkenli model, 5 değişkenli model, geliştirilmiş 4 değişkenli model ve 2-diyotlu model benzetim yöntemlerini kullanarak deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar üzerine bir araştırma yapılmıştır.

Fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi model benzetimleri ve matematiksel model benzetimleri uygulanırken Visual Basic programlama dili hesaplamalar yapılırken tercih edilmiştir. Parametrelere ilişkin değerlerin bir kısmı literatürden alınarak kullanılmış bir kısmı da söz konusu fotovoltaik panel üreticisinin sağladığı değerlerden alınarak kullanılmıştır. Parametre seçimlerine ilişkin bilgiler aşağıda Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Model Benzetimleri Uygulanırken Kabul Edilen Değerler

Parametre	Kabul Edilen Değerler	Kaynak
G_{ref}	1000 W/m ²	Fotovoltaik Panel Etiketi
$T_{c,ref}$	298,15 K	Fotovoltaik Panel Etiketi
$I_{sc,ref}$	8,75 A	Fotovoltaik Panel Etiketi
$V_{oc,ref}$	20,09 V	Fotovoltaik Panel Etiketi
$I_{mp,ref}$	8,18 A	Fotovoltaik Panel Etiketi
$V_{mp,ref}$	15,92 A	Fotovoltaik Panel Etiketi
$P_{mp,ref}$	130,18 W	Fotovoltaik Panel Etiketi
N_s	36	Fotovoltaik Panel Hücre Sayısı
μ_{Voc}	-0,0775 V/K	(Duffie ve Beckman, 2013)
μ_{Isc}	0,001325 A/K	(Duffie ve Beckman, 2013)
E_q	1,124 eV	(Streetman ve Banerjee, 2016)
k	$1,38065 \times 10^{-23}$ J/K	(Beckwith, 2016)
q	$1,60222 \times 10^{-19}$ C	(Taylor vd., 2007)

Yapılan ölçümler Bolu ili Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Gölköy Kampüsü Mühendislik Fakültesi'nde (40°42'52.2''K, 31°31'29.8''D) kurulan deney düzeneği üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Kurulan deney düzeneği Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Ölçümlerde Kullanılan Fotovoltaik Deney Düzeneği.

Deney düzeneğinde bulunan cihazlar;

- 1- Plurawatt PW DC 130 P32 Fotovoltaik Panel
- 2- Hioki LR2731-20 Veri Kayıt Cihazı (Data Logger)
- 3- Hioki 3284 Pens Ampermetre
- 4- Provista ISC3020 Şarj Regülatörü
- 5- Derby 12V 60Ah Jel Akü

Kurulan deney düzeneğinde kullanılan fotovoltaik panelin eğim açısı Bolu ilinin matematiksel konumu ve dünyanın eksen eğikliğinin yıl içerisinde değişeceği de göz önünde bulundurularak 34° olacak şekilde kurularak güneş azimut açısının minimum olması amaçlanmıştır. Fotovoltaik panelin yönü belirlenirken mekanik ve elektronik pusulalardan yararlanarak tam güneşe bakacak şekilde konumlandırılmış ve yüzey azimut açısının minimum olması amaçlanmıştır.



Şekil 4.2. Deneylerde Kullanılan Fotovoltaik Panel ve Panel Etiketleri.

Deney düzeneğinde fotovoltaik üzerinden üretilen akımın kontrollü bir şekilde depo edilebilmesi ve ters akımın oluşmaması için kullanılan şarj regülatörü Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Deneylerde Kullanılan Şarj Regülatörü.

Fotovoltaik panel üzerine düşen ışınım şiddetini ölçebilmek ve aynı zamanda yatay düzlem üzerine düşen ışınım şiddeti ile arasındaki farkı tespit edebilmek amacıyla deney düzeneği üzerine biri panel yüzeyi ile aynı açıda diğeri yatay düzlemde olacak şekilde 2 adet piranometre yerleştirilmiş ve anlık ölçümler alınmıştır.



Şekil 4.4. Deney Düzeneğinde Kullanılan Piranometreler (Eko ML-01).

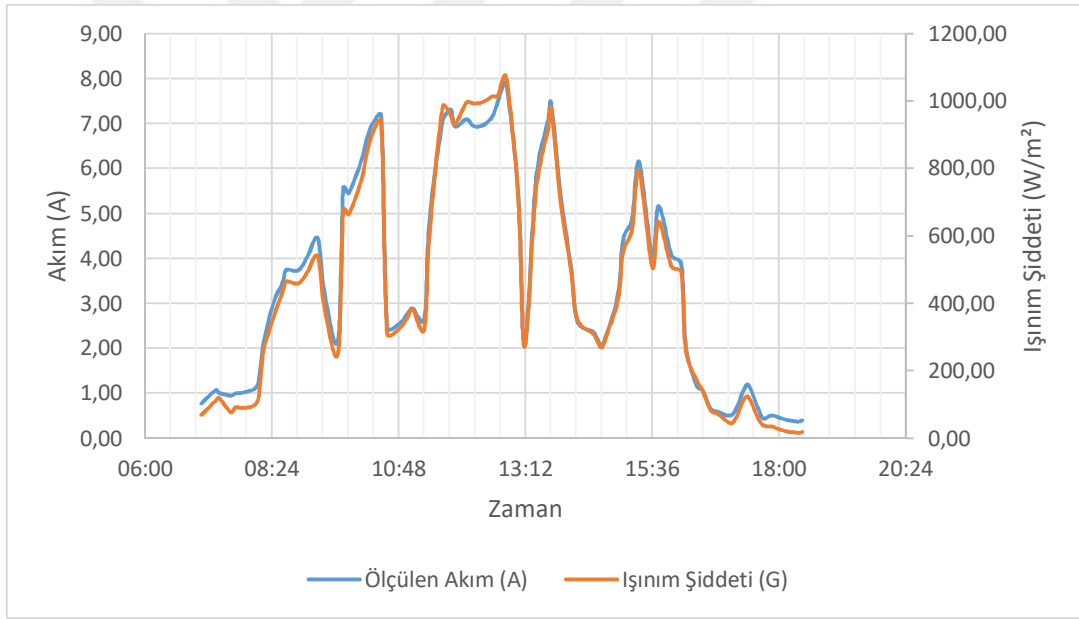
Fotovoltaik panel üzerinden elde edilen elektrik enerjisini depo etmek ve sistemin sürekli olarak çalışmasını sağlamak amacı ile 1 adet Derby marka 12V 60 Ah jel akü kullanılmıştır. Bunun yanı sıra çevre sıcaklığının ve panelin sıcaklığının takip edilebilmesi için 2 adet termokupl ile anlık ölçümler alınmıştır. Anlık olarak takip edilen yatay ve eğimli yüzeye düşen ışınım şiddeti, çevre ve panel yüzeyi sıcaklık değerleri, panelin çalışması sırasında oluşan akım ve gerim değerleri olmak üzere bu 6 farklı parametre birer dakika aralıklarla Hioki LR2731-20 veri kayıt cihazı yardımı ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.5. Deney Düzeneğinde Kullanılan Veri Kayıt Cihazı (Data Logger).

Fotovoltaik panelin çalışması sırasında veri kayıt cihazına aktarılan veriler arasından seçilen günler 16 Mayıs 2018, 03 Temmuz 2018, 04 Temmuz 2018, 05 Temmuz 2018, 06 Temmuz 2018, 07 Temmuz 2018 şeklindedir. Ölçüm yapılan bu günler için, fotovoltaik hücre model benzetimleri üzerinde çözümlenmeler yapılarak, fotovoltaik sistemin elektrik üretimi belirlenmiştir. Model benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, ölçülen gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde kullanılan her bir modelin değerlendirilmesi ile birlikte birbirleri ile de karşılaştırılması ve sonuçların yorumlanması amaçlanmıştır. 16 Mayıs 2018 tarihinde ölçülen değerler aşağıda Tablo 4.2’de verilmiştir.

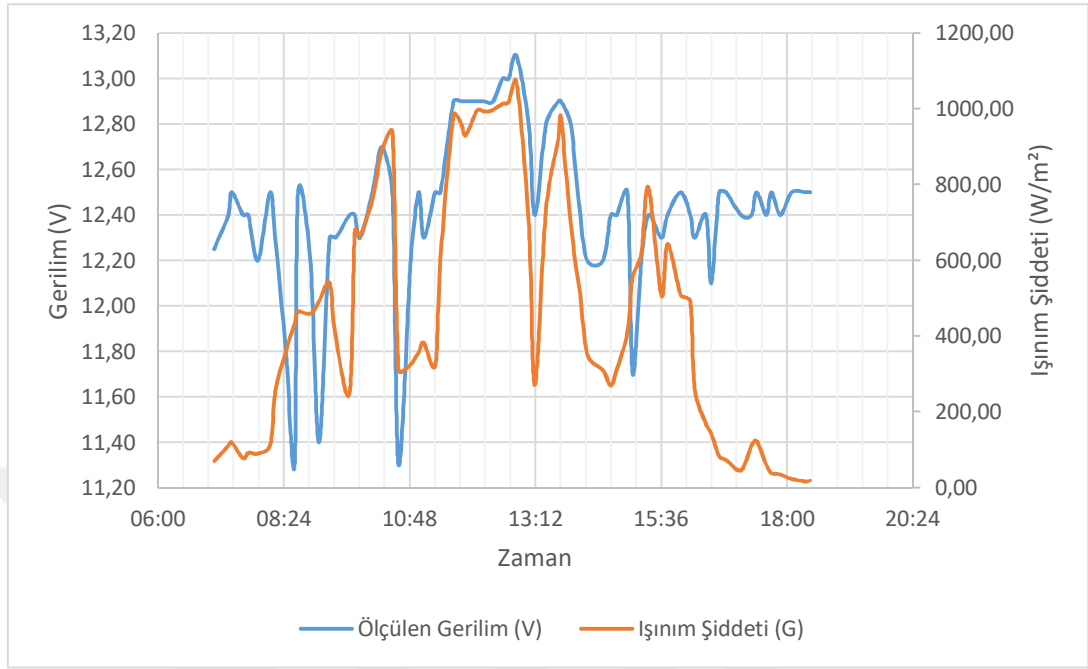
16 Mayıs 2018 tarihinde ölçülen değerler doğrultusunda zamana bağlı değişen ışınım şiddetinin akım değerleri üzerindeki etkileri ve aralarındaki korelasyon şekil 4.6’da verilen grafik üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.6. 16 Mayıs 2018 Akım – Zaman Grafiği.

Ölçülen akım değerlerinin, ışınım şiddetiyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Grafikte görülen iniş ve çıkışların sıklığı, ışınım şiddeti ile doğrudan ilintili olan bulutların söz konusu gün içerisinde sistemi yoğun bir şekilde etkilediğinin göstergesidir. Akım ve ışınım değerlerinin örtüşmediği anlar ise özellikle öğlen saatlerinde sıcaklığın panelin verimi üzerindeki olumsuz etkisinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

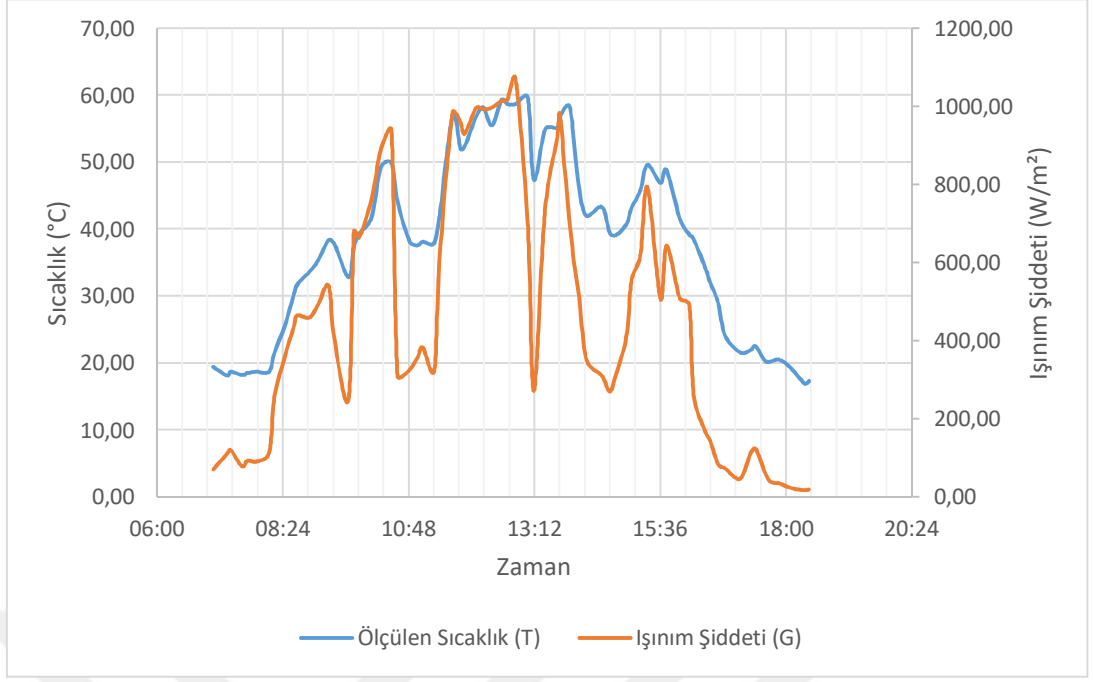
Yine Tablo 4.2 üzerindeki verileri kullanarak ışınım şiddetinin panel gerilimine üzerindeki etkisi Şekil 4.7’deki grafik ile verilmektedir.



Şekil 4.7. 16 Mayıs 2018 Gerilim – Zaman Grafığı.

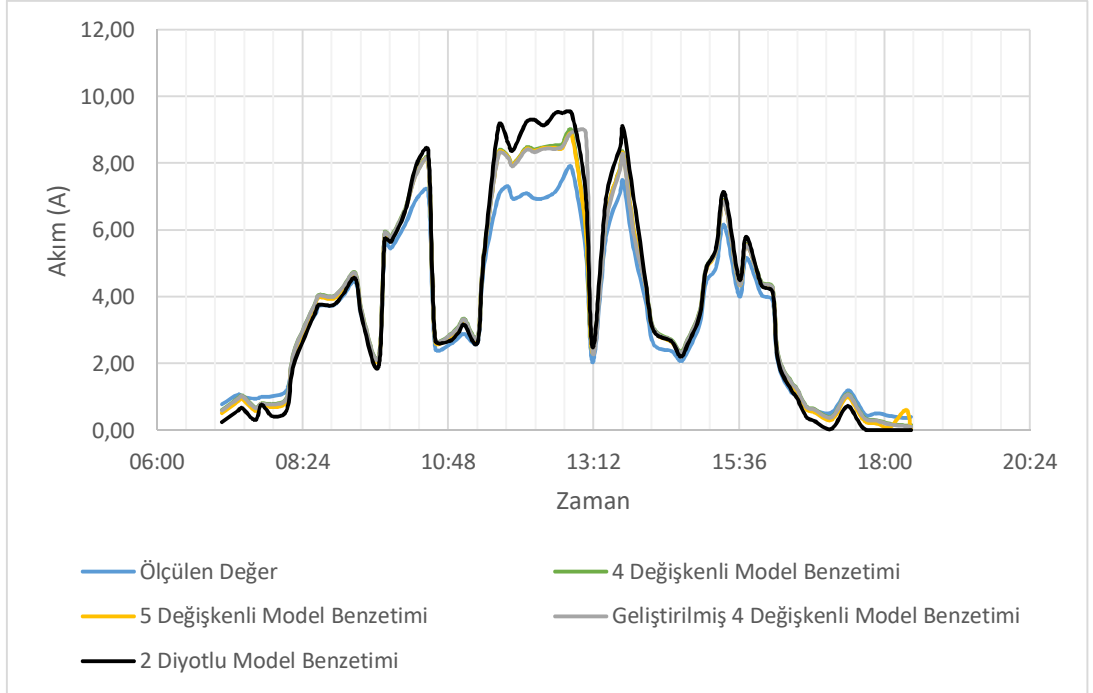
Öçülen gerilim değerlerinin ölçme aralığı ışınım şiddetine oranla çok daha küçüktür. Akünün verdiği çıkıştan dolayı gerilimin belli bir seviyede başlama ve bitişi söz konusudur. Işınım şiddetiyle doğru orantıda hareket etmeye çalışan gerilimin sıcaklık değerlerinden dolayı ışınımına oranla sapmalar gösterdiğini görülebilmektedir.

Panel üzerinde oluşan akım ve gerilim değerlerinin hücre/panel sıcaklığına bağlı değişimlerini ve ışınım şiddetinin panelin yüzey sıcaklığına nasıl etki ettiğini incelemek amacıyla Tablo 4.2 kullanılarak aşağıda Şekil 4.8’de verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.8. 16 Mayıs 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiği.

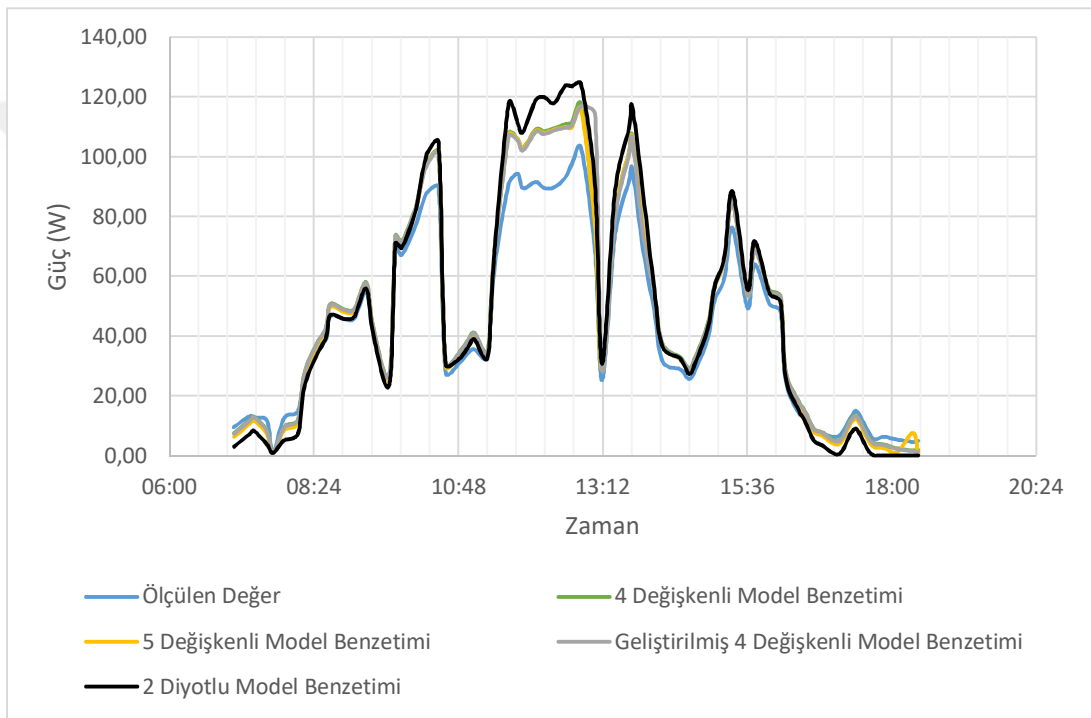
16 Mayıs 2018 tarihinde alınan ölçümler doğrultusunda elde edilen veriler ve referans değerleri kullanılarak 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli, 2-diyotlu model benzetim yöntemleri ile çözümlenmeler yapılmış ve aşağıda Şekil 4.9'da verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

Grafikte ölçülen akım değerlerinin yüksek sıcaklıklarda model benzetimlerine göre daha düşük kaldığı görülmektedir. Bulutlu anlarda yüzey sıcaklığının düşmesi sonucu ölçülen akım değerleriyle benzetim değerleri daha yakın sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni, özellikle yüksek sıcaklık değerlerinde denklem içerisindeki R_S ve R_{Sh} parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediği şeklinde yorumlanabilir.

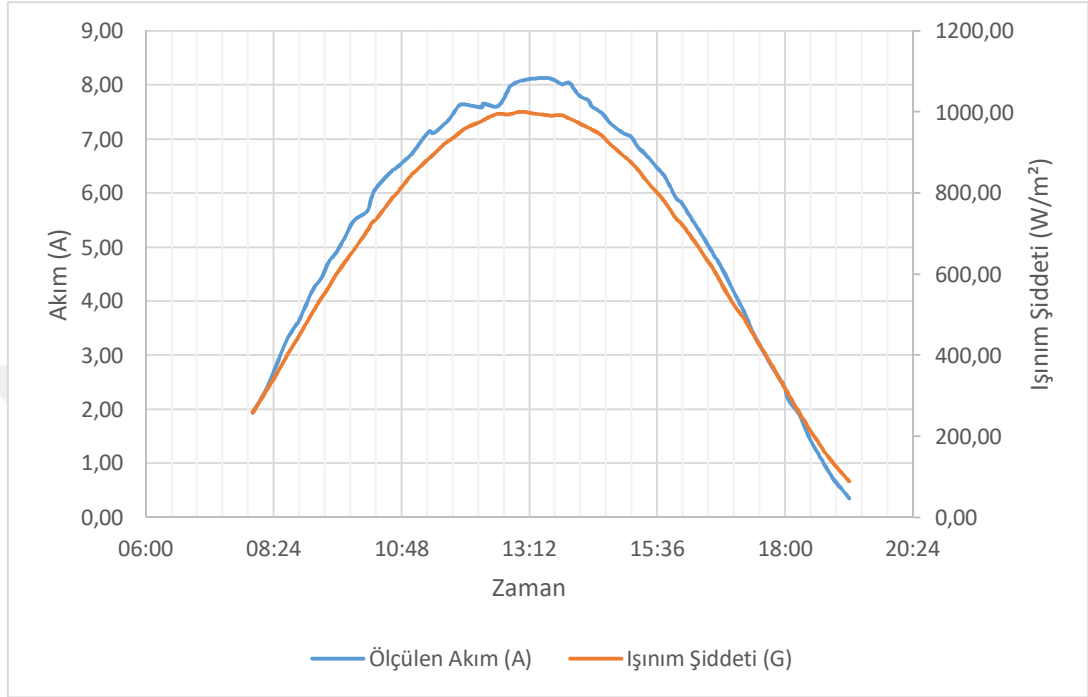
Model benzetimlerinden elde edilen akım değerlerini kullanarak hesaplanan panel üzerinden elde edilen güç grafiği şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiği.

Şekilde görüldüğü üzere, benzetimlerden elde edilen güç değerlerinin ölçülen değerlerden daha yüksek kaldığı, verilerin daha ziyade panel yüzey sıcaklığının yüksek olduğu anlarda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yukarıda açıklandığı üzere, bunun nedeni, özellikle yüksek sıcaklık değerlerinde diyot idealite faktörü içerisindeki R_S ve R_{Sh} parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediği şeklinde yorumlanmaktadır.

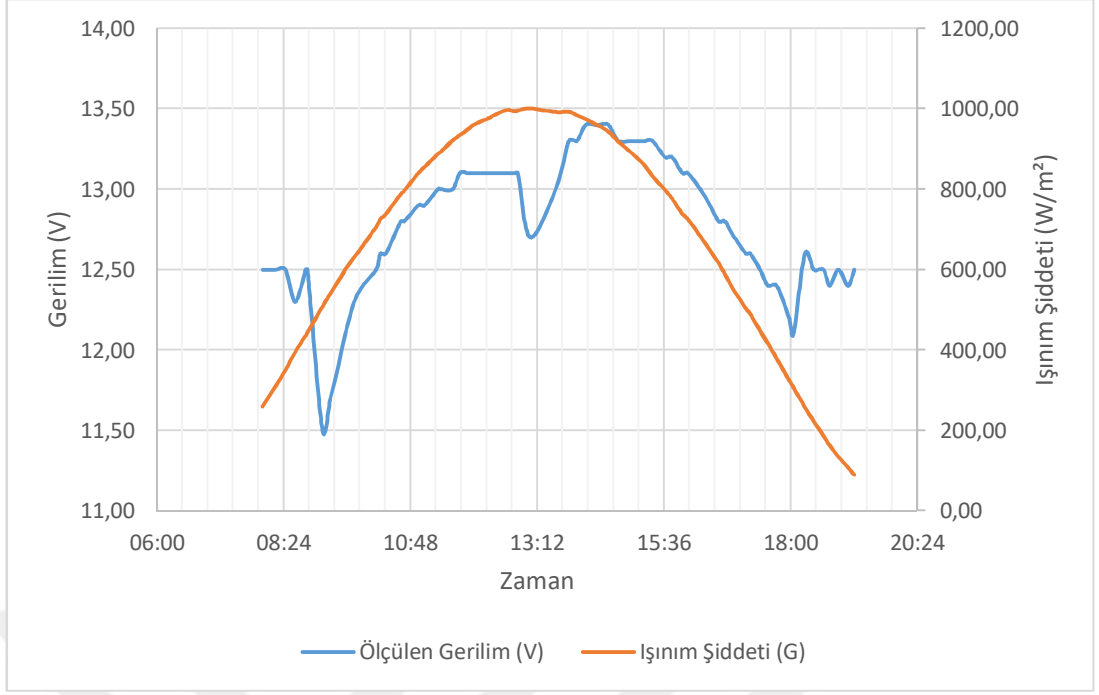
03 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinden alınan ölçümler Tablo 4.3’de verilmektedir. Güneşten gelen ışınımın şiddetinin gün içerisinde fotovoltaik panelden elde edilen akım değerlerine etkisi Şekil 4.11’de grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 03 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.11’de verilen grafikte, ölçülen akım değerlerinin büyük oranda ışınım şiddetiyle doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere havanın açık olduğunu görülmektedir. Öğle saatlerinde sıcaklık ve ışınım şiddetinin artması sonucu korelasyonun düşük olduğunu söylenebilir. Akıma etki eden çevresel faktörlerin de yüksek sıcaklıkta etkilerinin arttığı görülmektedir.

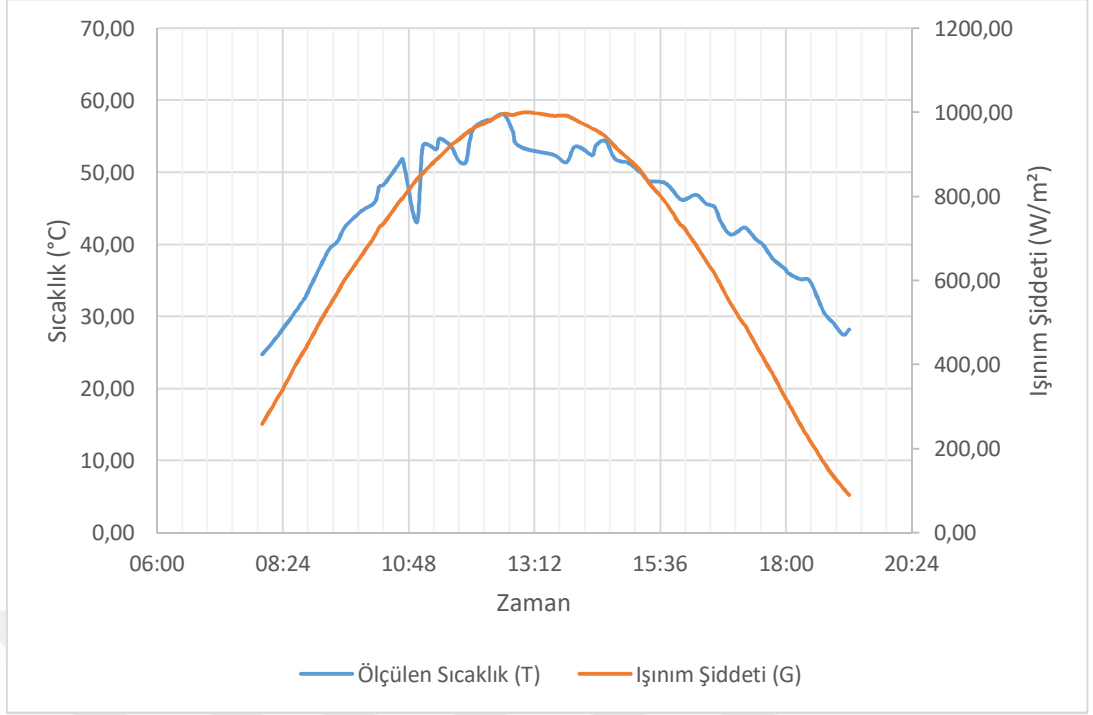
Tablo 4.3 referans alınarak fotovoltaik sistemin çalışması sırasında sistemin gerilim değerinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.12’de grafik şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.12. 03 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiği.

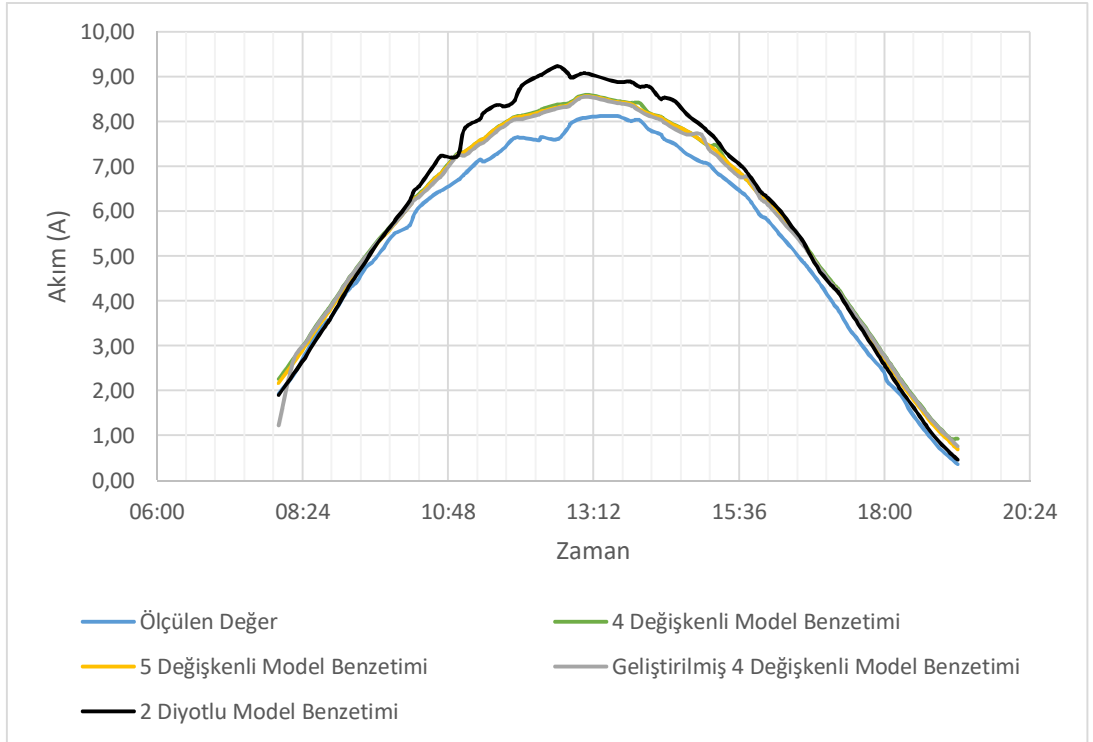
Ölçülen gerilim değerlerinin ölçme aralığı ışınım şiddetine oranla çok daha küçüktür. Akünün verdiği çıkıştan dolayı gerilimin belli bir seviyede başlama ve bitiş söz konusudur. Işınım şiddetiyle doğru orantıda hareket etmeye çalışan gerilimin, sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda akünün düzensiz çalıştığı görülmektedir.

03 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistemin çalışması sırasında sistem üzerindeki gerilim ve panelin ürettiği akımı etkileyen panel yüzeyindeki sıcaklığın zamana ve ışınım şiddetine bağlı değişimi aşağıda Şekil 4.13’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.13. 03 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiği.

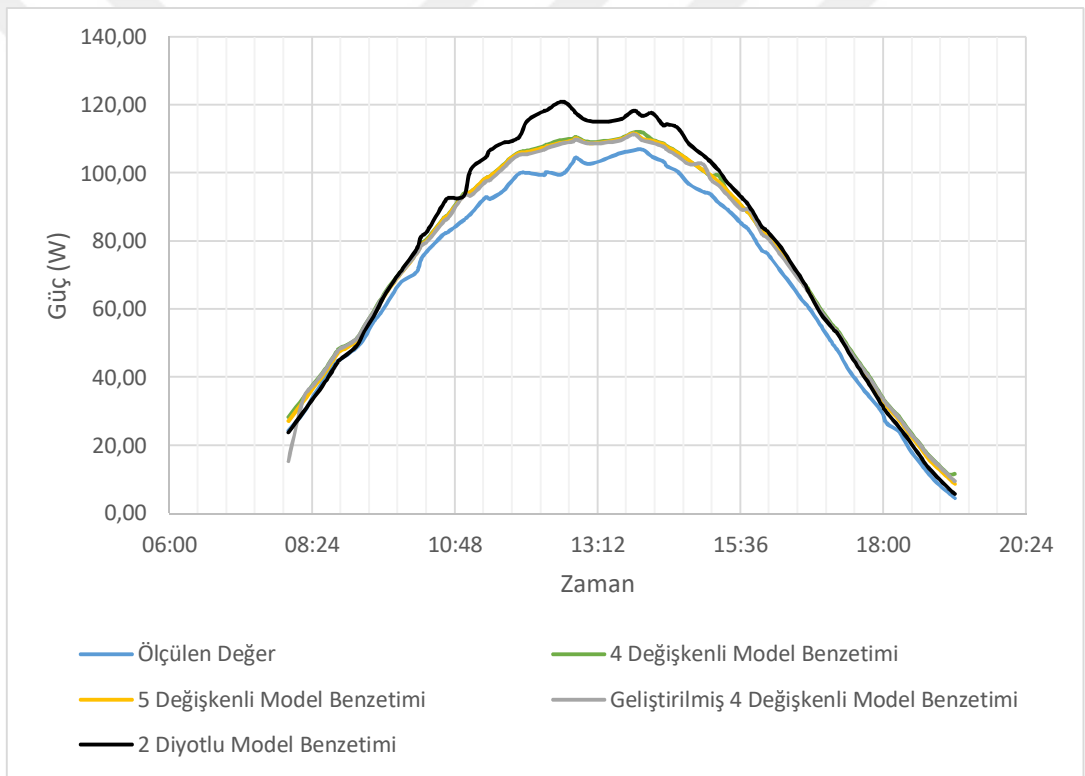
Söz konusu 4 farklı model benzetim yöntemi verilen referans değerleri yardımı ile 03 Temmuz 2018 tarihi için çözümlenmiş ve elde edilen akım değerleri aşağıda Şekil 4.14’de verilen grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.14’de görüldüğü üzere 4 değişkenli model benzetimi, 5 değişkenli model benzetimi ve geliştirilmiş 4 değişkenli model benzetimleri birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. 2 diyotlu model benzetiminin diğerlerinden yüksek çıkmasının nedeni diyot idealite faktörü olarak değerlendirilmektedir. Diyot idealite faktöründe bulunan $\mu_{I_{sc}}$ ve $\mu_{V_{oc}}$ değerlerinin sıcaklıkla doğrudan değiştiğinden ve deneysel olarak tespit edilmesinin zorluğundan dolayı sabit kabul edildiğinden, ölçülen ve model benzetimlerinden elde edilen değerler arasında fark meydana gelmektedir.

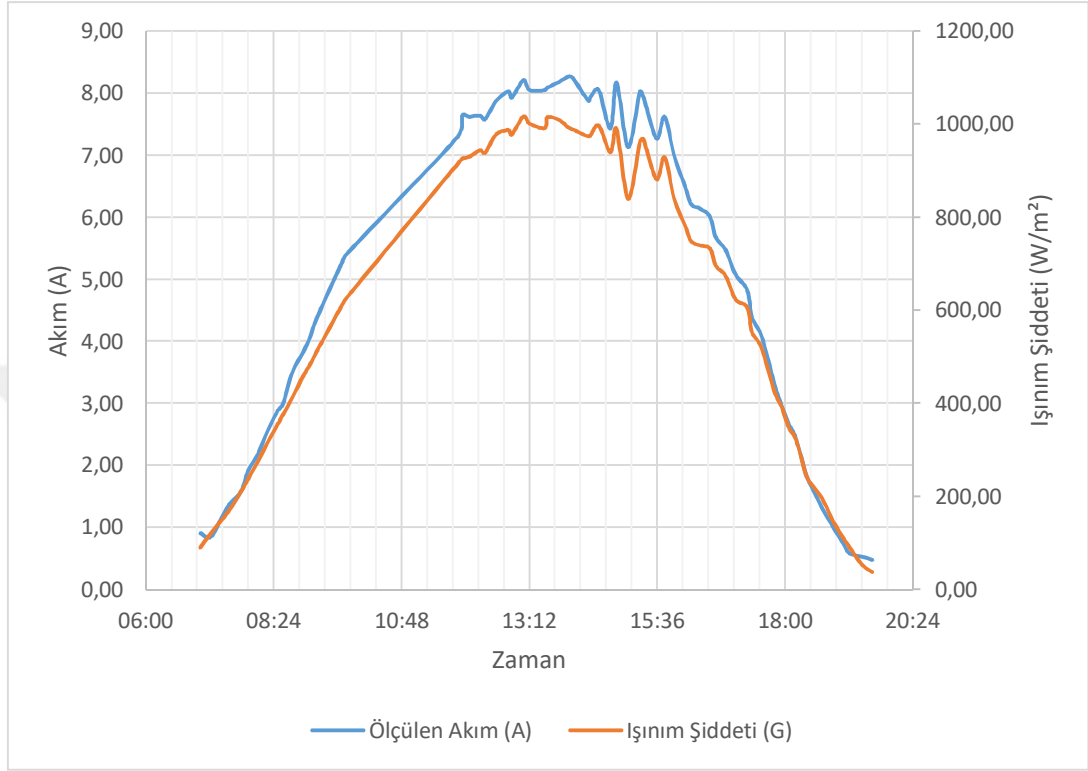
Modellerden elde edilen akım değerleri kullanılarak, Şekil 4.15’te verildiği üzere zamana bağlı güç grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiği.

Şekil 4.15’de görüldüğü üzere, benzetimlerden elde edilen güç değerlerinin ölçülen değerlerden daha yüksek kaldığı verilerin daha ziyade panel sıcaklığının yüksek olduğu anlarda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yukarıda açıklandığı üzere, bunun nedeni, özellikle yüksek sıcaklık değerlerinde diyot idealite faktöründeki parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediğinden dolayı olmaktadır.

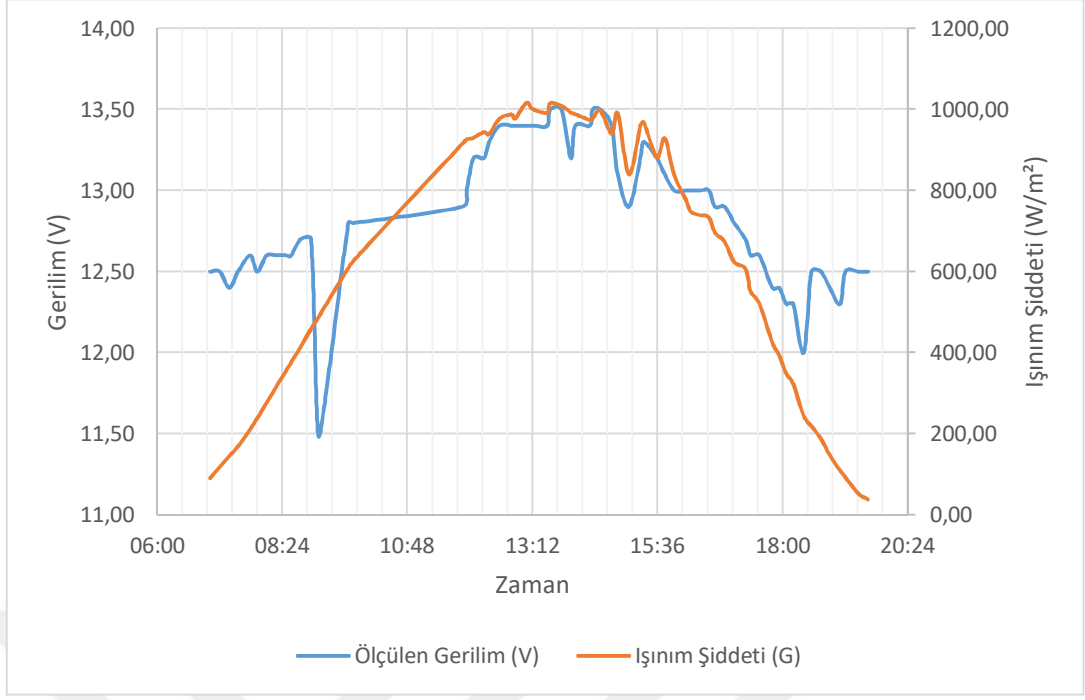
Söz konusu analizlerin yapıldığı bir diğer veri seti olan 04 Temmuz 2018 tarihine ait ölçülen değerler Tablo 4.4’de verilmektedir. Tablo 4.4 ile verilen 04 Temmuz 2018 tarihinde ölçülen değerlerden ışınım şiddeti ve fotovoltaik panelden elde edilen akımın zamana göre değişimi Şekil 4.16’da verilmektedir.



Şekil 4.16. 04 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.16 incelendiğinde, ölçülen akım değerlerinin ışınım şiddetiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Her ne kadar akım ve ışınım şiddeti zaman içerisinde aynı doğrultuda hareket etse bile artan ışınım değerleriyle birlikte akımı etkileyen etmenlerden dolayı paralel hareketin bozulduğu görülmektedir.

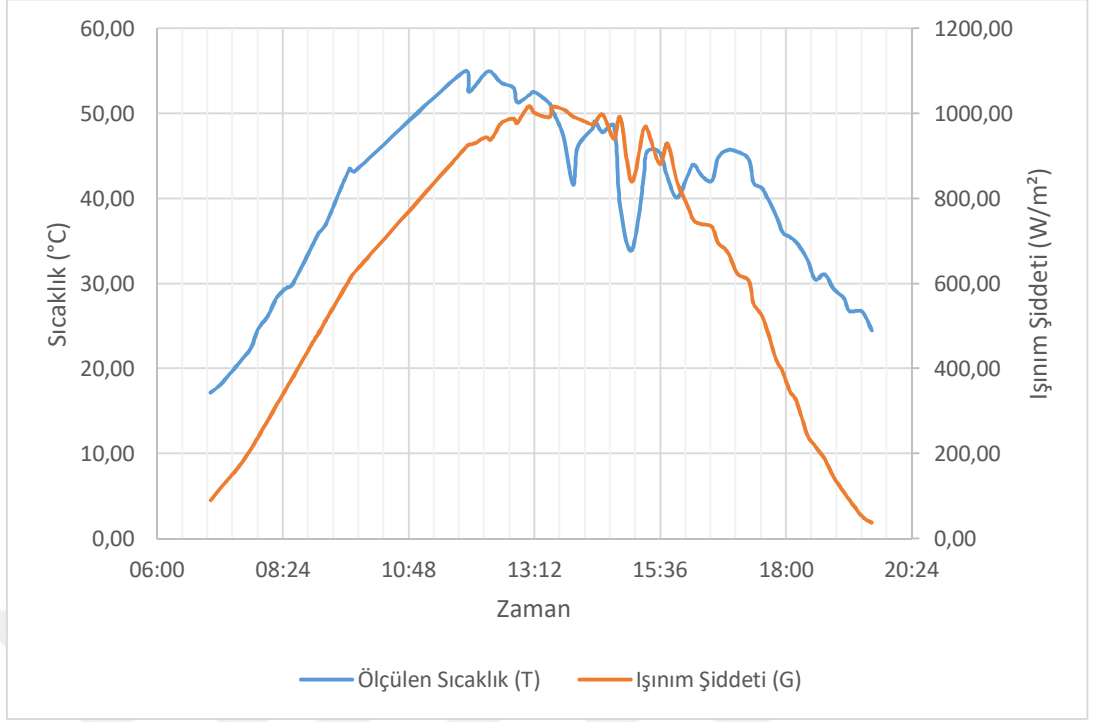
Işınım şiddetinin aktif fotovoltaik sistemdeki gerilim değerleri üzerindeki etkisi 04 Temmuz 2018 tarihi için aşağıda Şekil 4.17’de verilen grafik üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.17. 04 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiği.

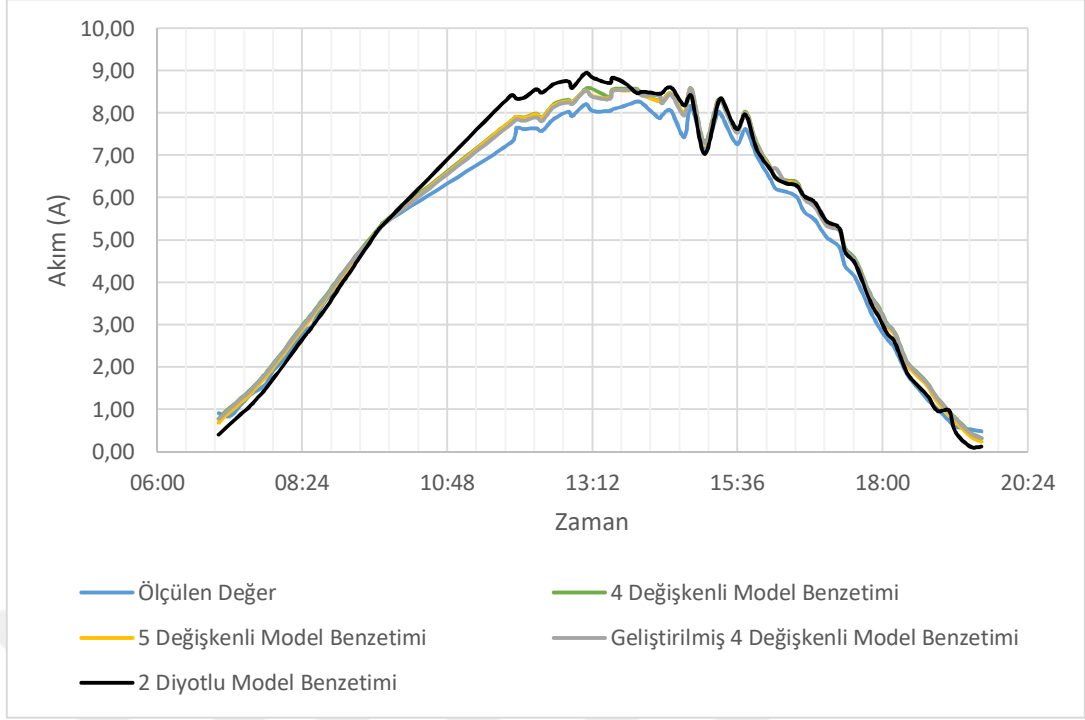
Işınım şiddetinin yüksek olduğu saatlerde gerilimin de potansiyel çalışma aralığında göreceli olarak yüksek değer aldığı görülmektedir. Akünün gündüz saatlerinde doluma geçmesiyle ışınımın en yüksek olduğu zamanlarda akümüz de maksimum seviyede yüke gerilim iletmektedir. Akşam ve sabah saatlerinde sadece yükü çalıştıran akünün daha sabit bir çıkış verdiği görülmektedir.

04 Temmuz 2018 tarihi için, gün içerisinde değişen ışınım şiddetine bağlı olarak değişen fotovoltaik panel sıcaklık değerleri aşağıda Şekil 4.18’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.18. 04 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiği.

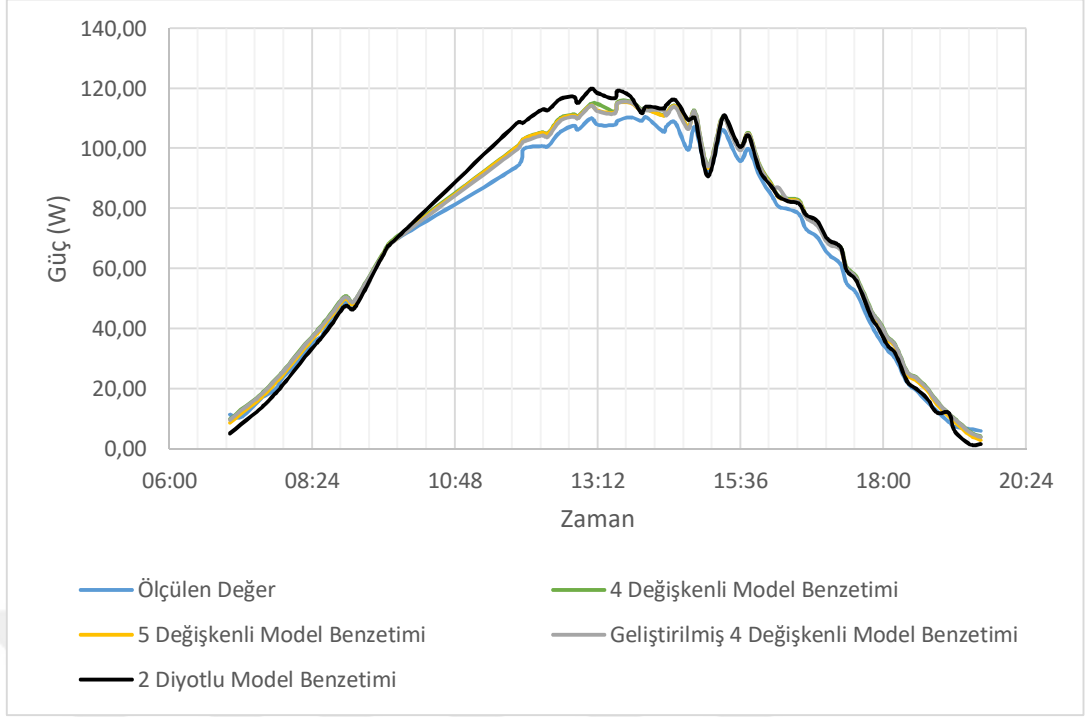
04 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik panel üzerine gelen ışınımın şiddeti, yüzey sıcaklığı, çalışma gerilimi değerleri ve belirlenen referans koşulları değerlerinden faydalanılarak, önceki bölümde anlatılan 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemleri ile fotovoltaik modülden çalışma koşulları altında elde edilecek akım değerleri çözümlenmiştir. Model benzetim yöntemlerinden elde edilen akım–zaman değerleri aşağıda Şekil 4.19’da grafik halinde karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.19 ile verilen grafikte görüldüğü üzere; 4 değişkenli model benzetimi, 5 değişkenli model benzetimi ve geliştirilmiş 4 değişkenli model benzetimleri yaklaşık olarak benzer sonuçları vermiştir. 2 diyotlu model benzetiminin yüksek çıkması diyot idealite faktöründen olduğu tahmin edilmektedir. Öğle saatlerinde bulutların etkisiyle oluşan ışınım dalgalanmasında anlık sıcaklık düşmelerinden dolayı ölçülen akım değerleri ile model benzetim değerleri birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir.

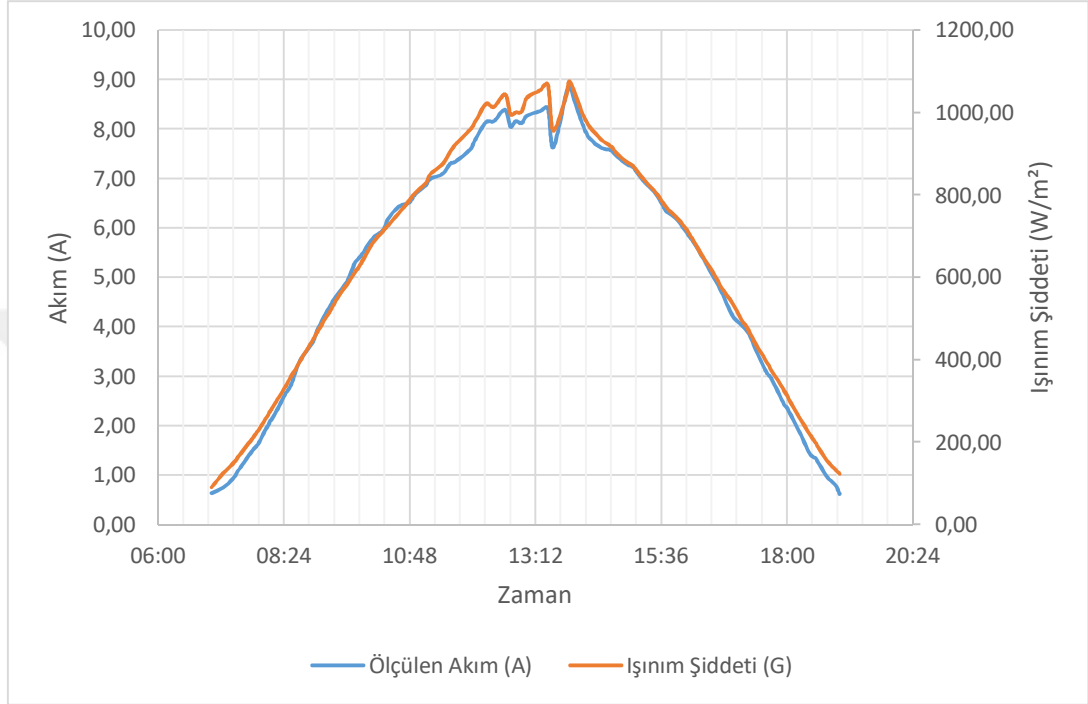
Model benzetimlerinden elde edilen akım değerlerini kullanarak fotovoltaik sistemin çalışma esnasında elde edilebilecek güç değerleri de şekil 4.20’de grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiği.

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere, benzetimlerden elde edilen güç değerlerinin ölçülen değerlerden daha yüksekte kaldığı, verilerin daha ziyade panel sıcaklığının yüksek olduğu anlarda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Öğle saatlerinde akım değerlerinde meydana gelen farklılıklardan dolayı ve akünün sıcakta kayıplarının olduğu için elde edilen güç değerlerimizde de farklılıklar oluşmaktadır. 2-diyot modelinin diğer modellerden yüksek çıkması ise özellikle yüksek sıcaklık değerlerinde denklem içerisindeki R_S ve R_{Sh} parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediği şeklinde yorumlanmaktadır.

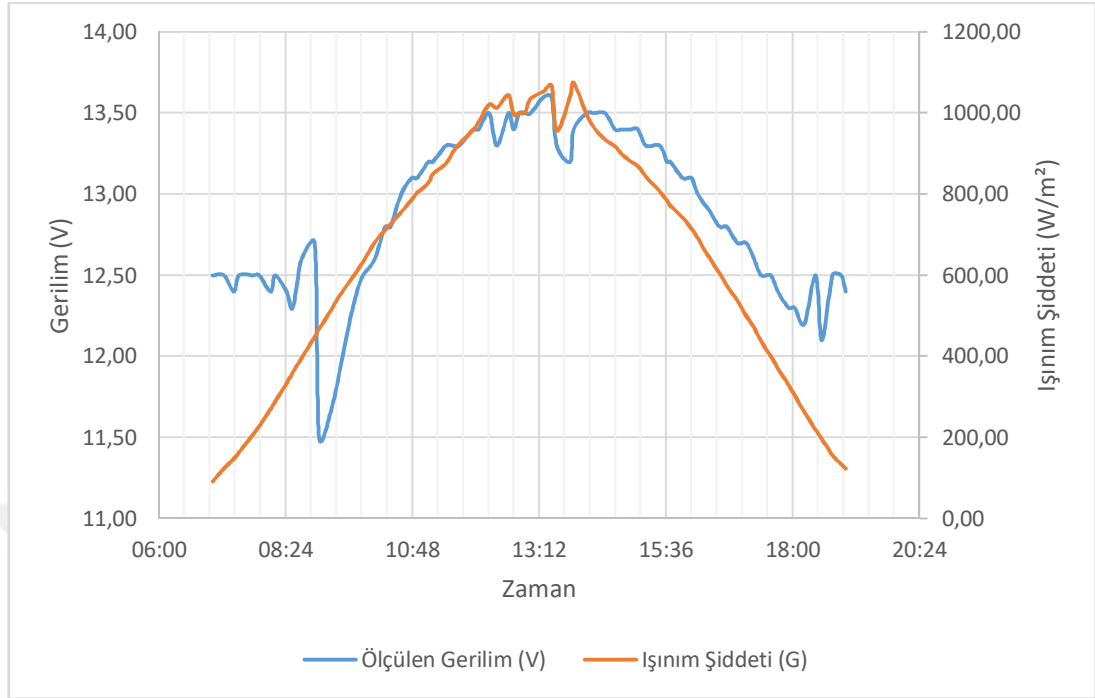
Alınan ölçüm değerleri arasında farkların incelenmesi ve model benzetim yöntemlerinin ölçüm değerleri arasındaki farkların görülebilmesi için 05 Temmuz 2018 tarihinde alınan ölçüm değerleri aşağıda tablo 4.5’de verilmiştir. 05 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen ışınım şiddetine bağlı akım – zaman grafiği şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. 05 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere 05 Temmuz 2018 tarihindeki akım ve ışınım şiddeti verilerinin doğrultularının birbirine çok yakın olduğunu söyleyebiliriz. Öğle saatlerinde artan sıcaklıklarda sapmalar meydana gelmiştir. Bu gün için akımdaki kayıpların daha az olduğu görülmektedir. Anlık sıcaklık düşüşlerinde, bulutlanma yaşandığında yine birbirleriyle yakın sonuçlar vermektedirler.

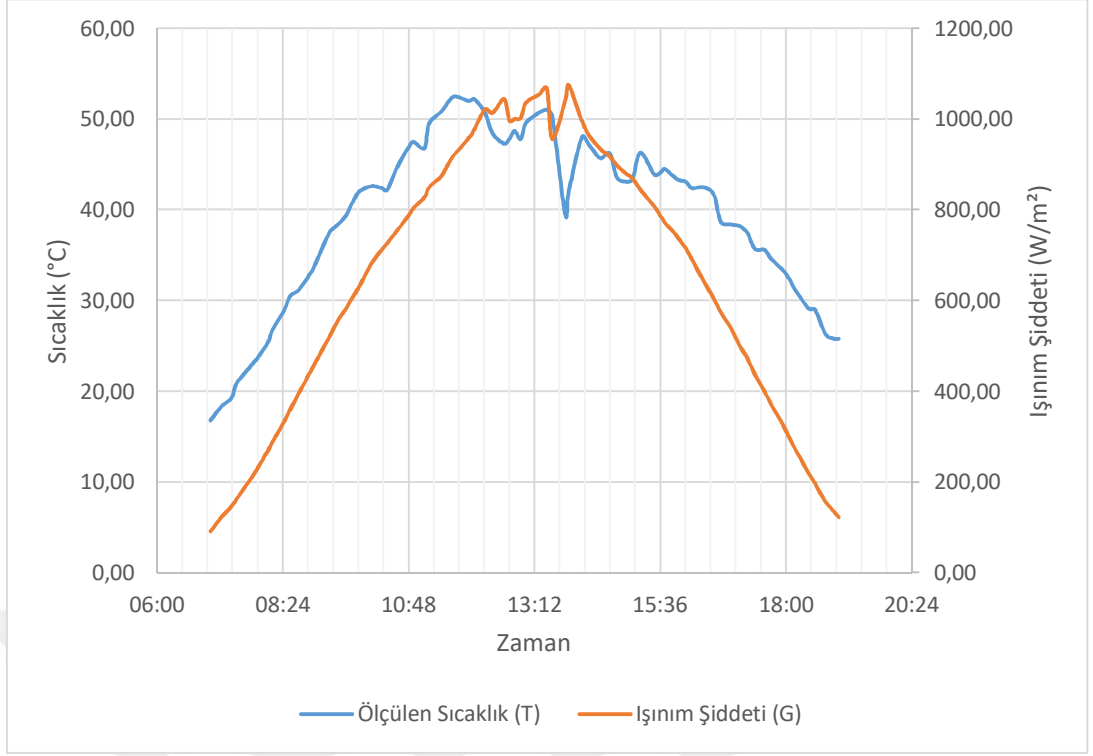
Tablo 4.5 üzerinde gösterilen fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen ışınım şiddetine bağlı gerilim – zaman grafiği Şekil 4.22’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.22. 05 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiği.

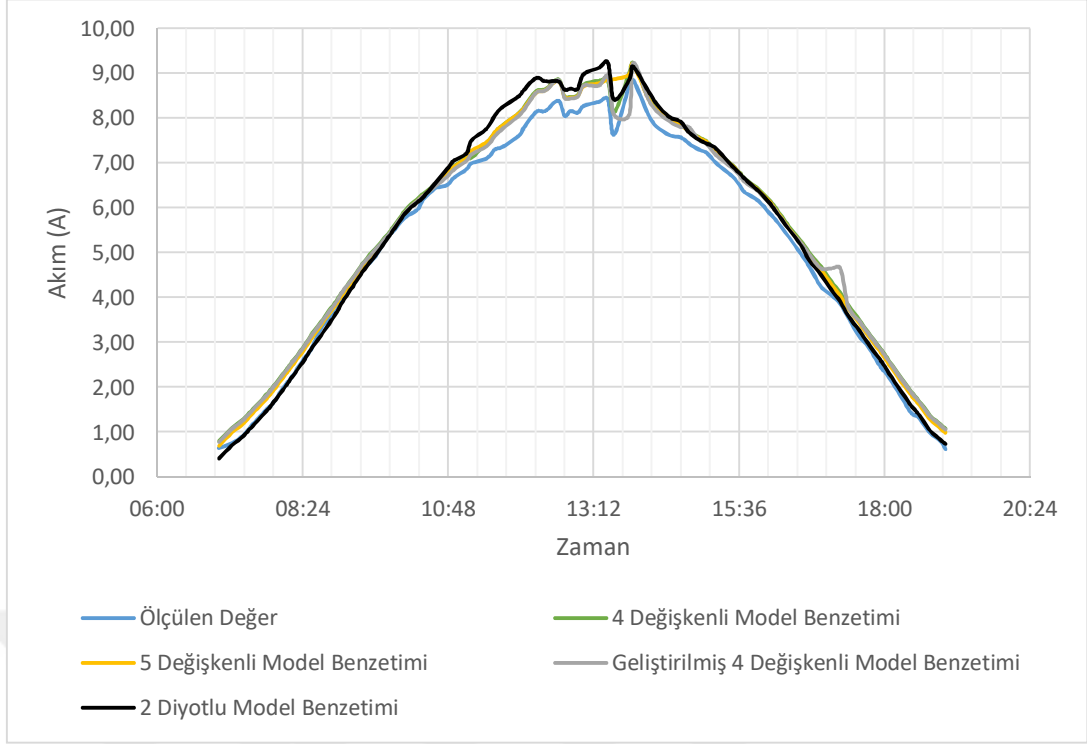
Işınım şiddetinin yüksek olduğu saatlerde gerilimin de potansiyel çalışma aralığında göreceli olarak yüksek değerler aldığı görülmektedir. Işınım şiddetinin sabit artıp azaldığı anlarda akünün verdiği gerilim de daha uyumlu bir şekilde artıp azalmaktadır. Bulutlanma olduğu anlarda anlık sıcaklık değişimlerinde akünün çıkışında dengesizlikler meydana gelmektedir.

Fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen akım ve gerilim değerlerini etkileyen bir faktör olan yüzey sıcaklığının ışınım şiddetine ve çevre sıcaklığına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. 05 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik panel yüzeyinde ışınım şiddetine bağlı olarak değişen sıcaklık – zaman grafiği Şekil 4.23’de gösterilmektedir.



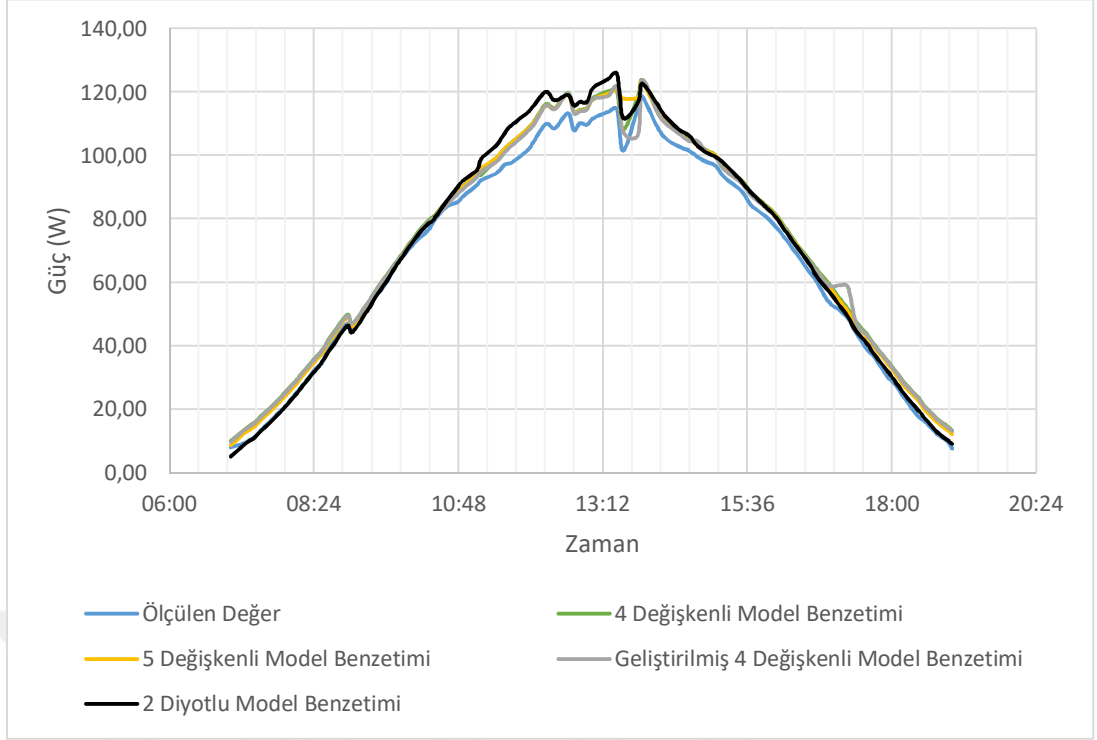
Şekil 4.23. 05 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiği.

05 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen değerler incelenerek yukarıda belirtilen grafikler elde edilmiştir. Sistemin çalışması sırasında elde edilen bazı değerler doğrultusunda ve referans parametre değerlerini kullanarak 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemleri üzerinde hesaplamalar yapılmıştır elde edilen akım – zaman değerleri aşağıda şekil 4.24 üzerinde grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.24. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

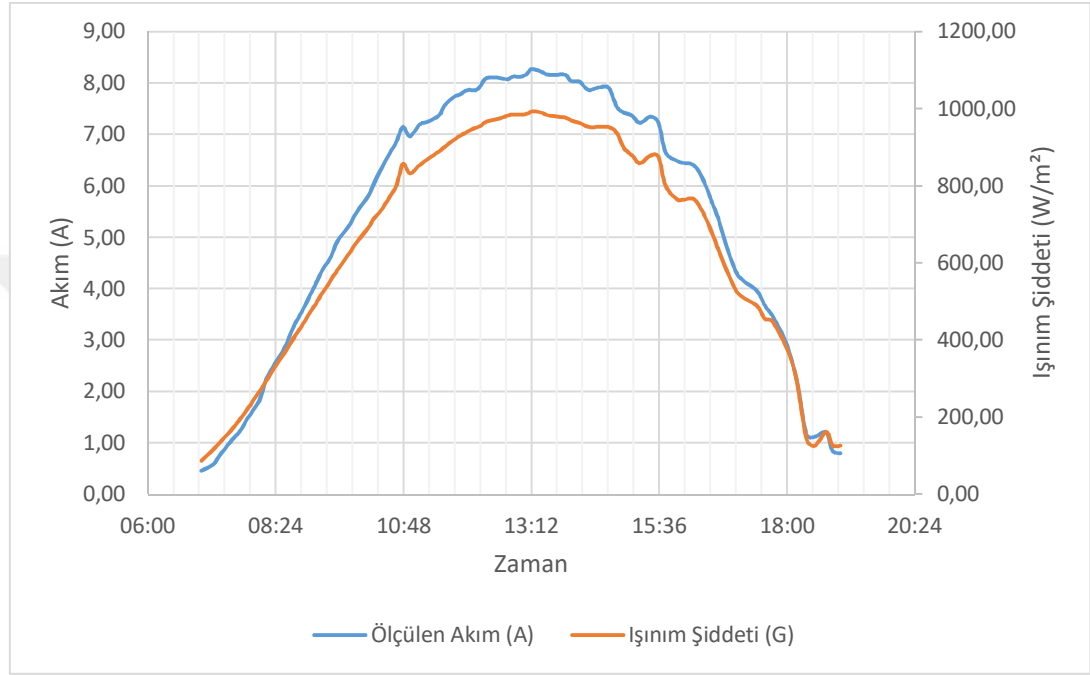
Şekil 4.24 ile verilen grafikte görüldüğü üzere; Öğle saatlerinde panel yüzey sıcaklığının en yüksek olduğu zamanlarda ölçülen akım değerimizin çevre etkenlerden dolayı (kablo kayıpları, akünün fazla ısınması gibi) düşük kaldığı gözlemlenmiştir. 4 değişkenli model benzetimi, 5 değişkenli model benzetimi ve geliştirilmiş 4 değişkenli model benzetimleri yaklaşık olarak benzer sonuçları vermiştir. 2 diyotlu model benzetiminin yüksek çıkması da diyot idealite faktöründen olduğu R_S ve R_{Sh} parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediği şeklinde yorumlanabilir. Fotovoltaik panelin çalışma gerilimi yardımıyla oluşturulan güç değerleri aşağıda Şekil 4.25 üzerinde grafik şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 4.25. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiği.

Şekilde görüldüğü üzere, benzetimlerden elde edilen güç değerlerinin ölçülen değerlerden daha yüksek kaldığı verilerin daha ziyade panel sıcaklığının yüksek olduğu anlarda, akım değerlerinde meydana gelen farka paralel olarak güç değerlerinde de meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, diyot idealite faktöründe bulunan, özellikle yüksek sıcaklık değerlerinde denklem içerisindeki $\mu_{V_{oc}}$ ve $\mu_{I_{sc}}$ parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediği şeklinde yorumlanmaktadır.

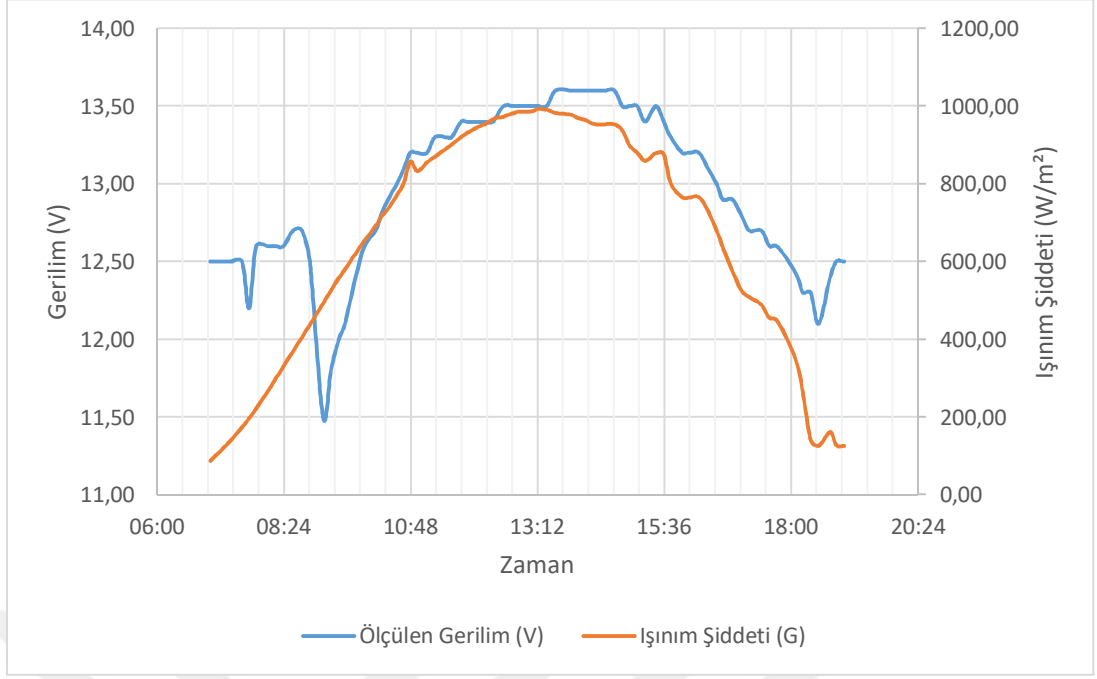
06 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistemin sürekliliğini takip edebilmek amaçlı ve diğer günlerle arasındaki farklılıkların karşılaştırılması için ölçümler yapılmıştır. Elde edilen ölçüm değerleri aşağıda Tablo 4.6’da verilmiştir. 06 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistemden elde edilen ölçüm değerleri incelenerek ışınım şiddetine bağlı olarak değişen akım – zaman grafiği oluşturulmuştur. Ulaşılan bu grafik Şekil 4.26’da gösterilmektedir.



Şekil 4.26. 06 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiği.

Söz konusu şekilden, ölçülen akım değerlerinin ışınım şiddetiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Işınım şiddeti arttıkça akım şiddetinin de artması öngörülen bir olaydır. Fakat öğle saatlerinde doğrultularında değişiklik olmasının sebebi akımı etkileyen çevresel unsurlardır.

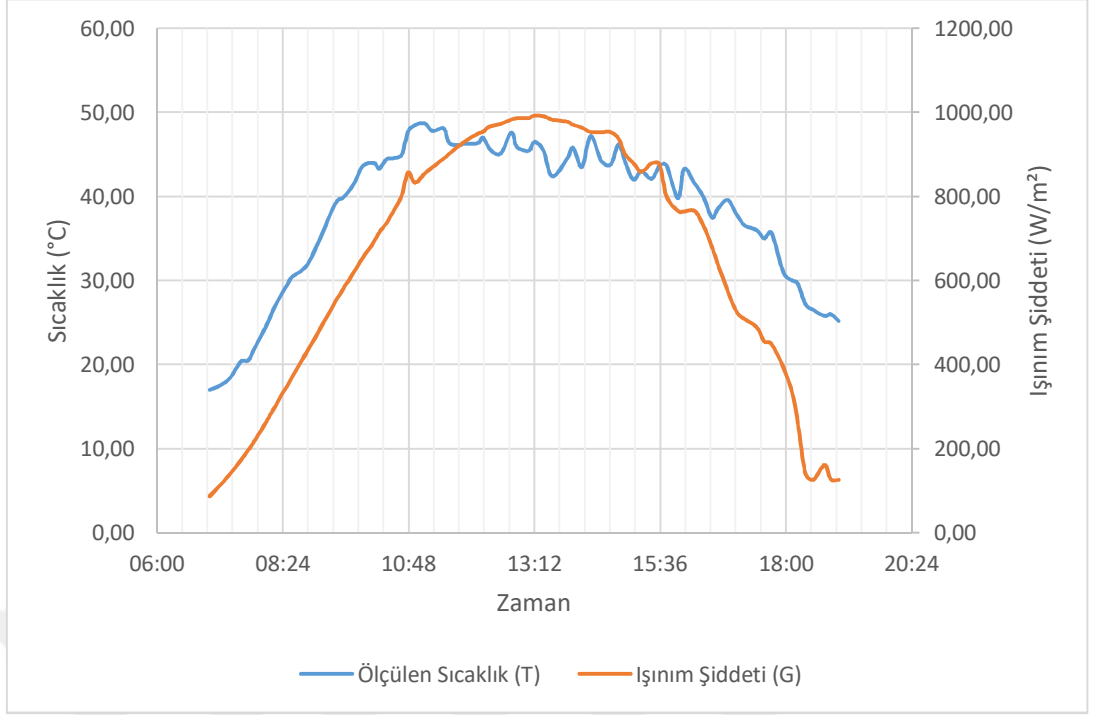
Benzer bir şekilde fotovoltaik sistemin çalışması esnasında ışınım şiddetine bağlı olarak değişen, panelin gerilim – zaman grafiği şekil 4.27’de gösterilmektedir.



Şekil 4.27. 06 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiği.

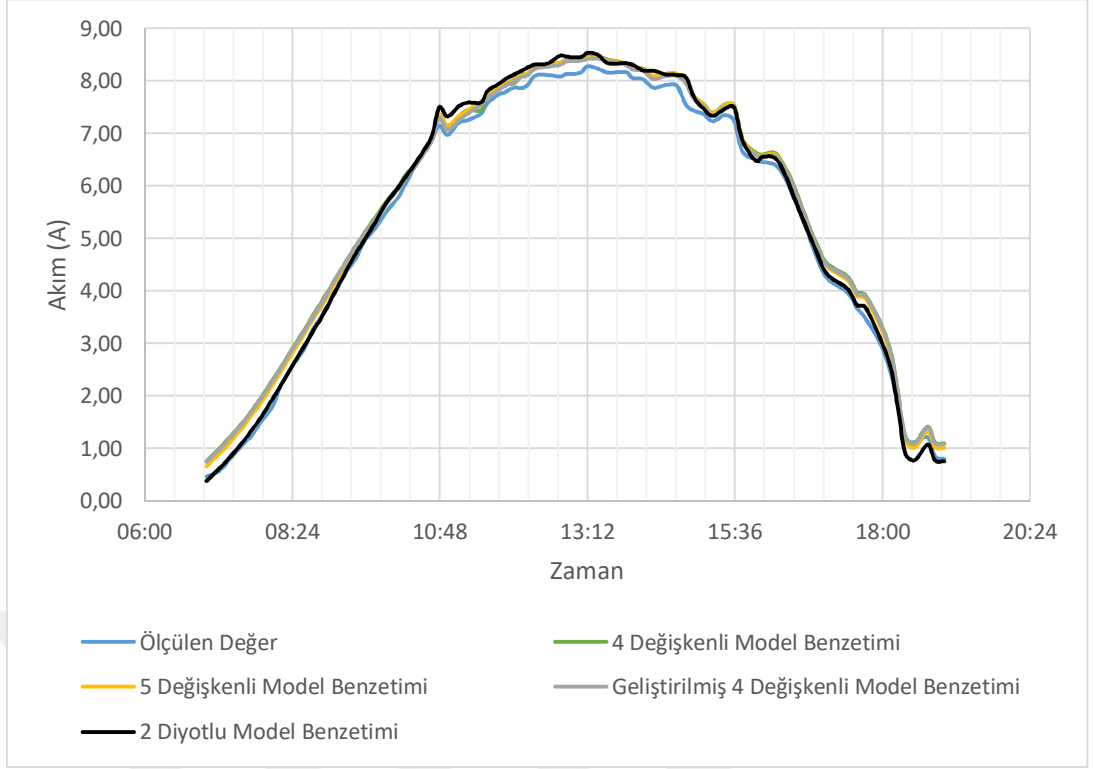
Şekil 4.27’de görüldüğü üzere gerilim değerlerimizin aralığının düşük olması başlangıç ve bitiş değerlerinin akümüzün çıkış değerleri olup yükümüz devrede iken görülen aralıkta çalışmaktadır. Işınım şiddetinin yüksek olduğu saatlerde gerilimin de potansiyel çalışma aralığında göreceli olarak yüksek değerler aldığı görülmektedir. Sabah saatlerinde aküden alınan verinin bir anda düşüp tekrar yükselmesi ise gece boyu açık olan yüke enerji sağlayan akünün bitmiş olması ve güneş ışınımı ile dolmaya başlayıp tekrar yükü enerji sağladığı anı göstermektedir.

Fotovoltaik sistemin akım ve gerilim değerlerini önemli ölçüde etkileyen ve ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığıyla birlikte sürekli değişen fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığının değişim grafiği alınan ölçümler doğrultusunda çıkarılmıştır. Elde edilen bu grafik Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. 06 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiği.

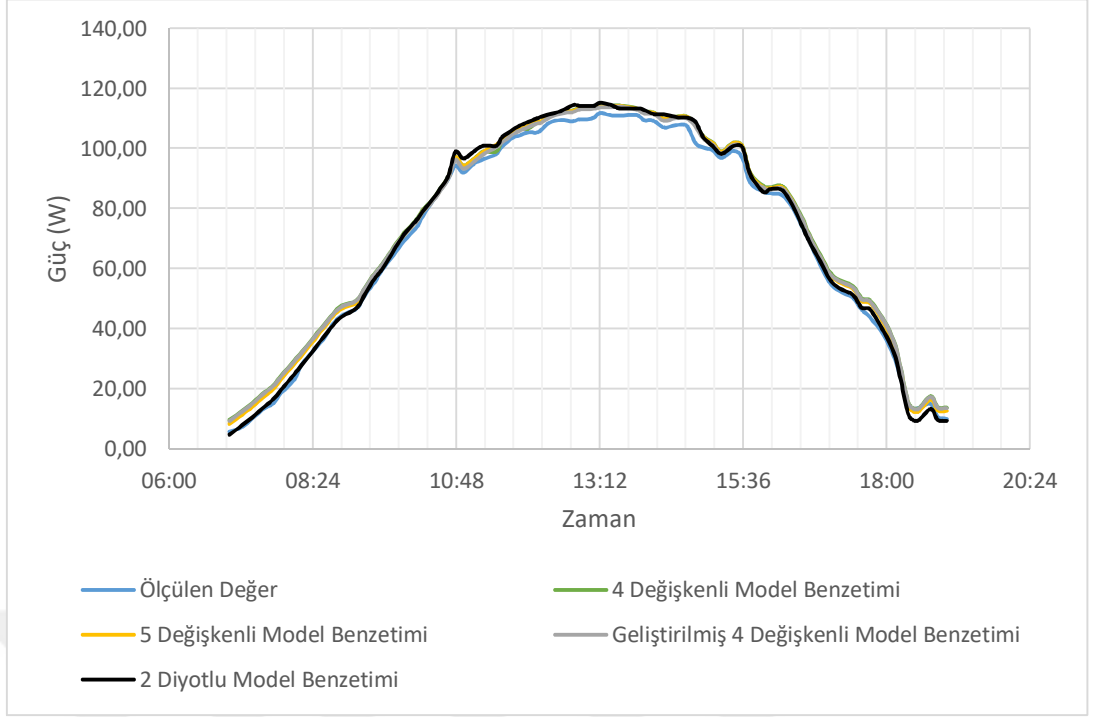
06 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen bu değerler sistemin akım ve güç değerlerinin tahmin edilebilmesi için fotovoltaik eşdeğer elektrik devresi model benzetim yöntemleri uygulanmıştır. Ölçülen akım değerlerimizle birlikte 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemlerinden alınan veriler Şekil 4.29’da grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.29 ile verilen grafikte görüldüğü üzere ölçülen akım değerlerinin model benzetimlerine diğer günlere göre çok daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 6 Temmuz 2018 günü için ölçülen akım değerleri ile model benzetimlerinden elde edilen değerler arasındaki farkın daha az olduğu görülmektedir. Denklemlerde kullanılan ışınım ve sıcaklık değerlerinin orantılarının benzetim yöntemlerinde çok yakın sonuçlar çıkmasına neden olmaktadır.

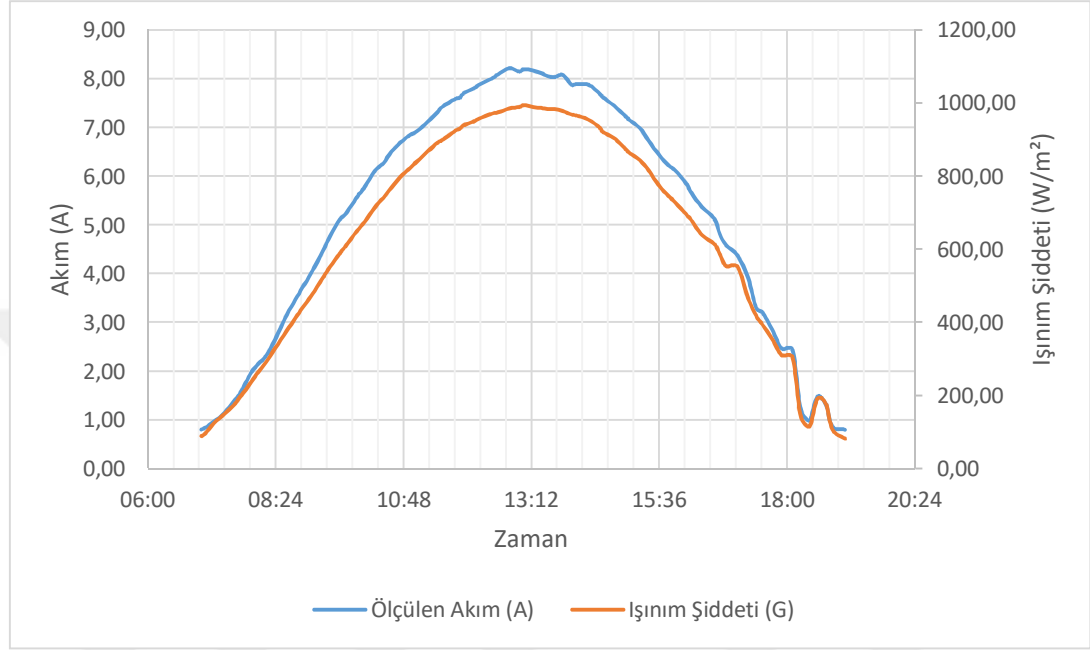
Model benzetimlerinden elde edilen akım değerleri kullanılarak fotovoltaik sistemden elde edilebilecek güç değerleri hesaplanmış ve bulunan değerler Şekil 4.30'da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Güç – Zaman Grafiği.

Şekil 4.30'da görüldüğü üzere akım ve gerilim değerlerine bağlı olarak ölçülen güç değerleri ile model benzetim değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ölçülen değerler ve modeller arasındaki farkın, öğle saatlerinde yüksek sıcaklık nedeniyle arttığını söyleyebiliriz. Bunun nedeni, diyot idealite faktöründe bulunan, özellikle yüksek sıcaklık değerlerinde denklem içerisindeki $\mu_{V_{oc}}$ ve $\mu_{I_{sc}}$ parametrelerinin deneysel olarak bulunmasının zorluğu ve sabit kabul edilmesinden dolayı olmaktadır.

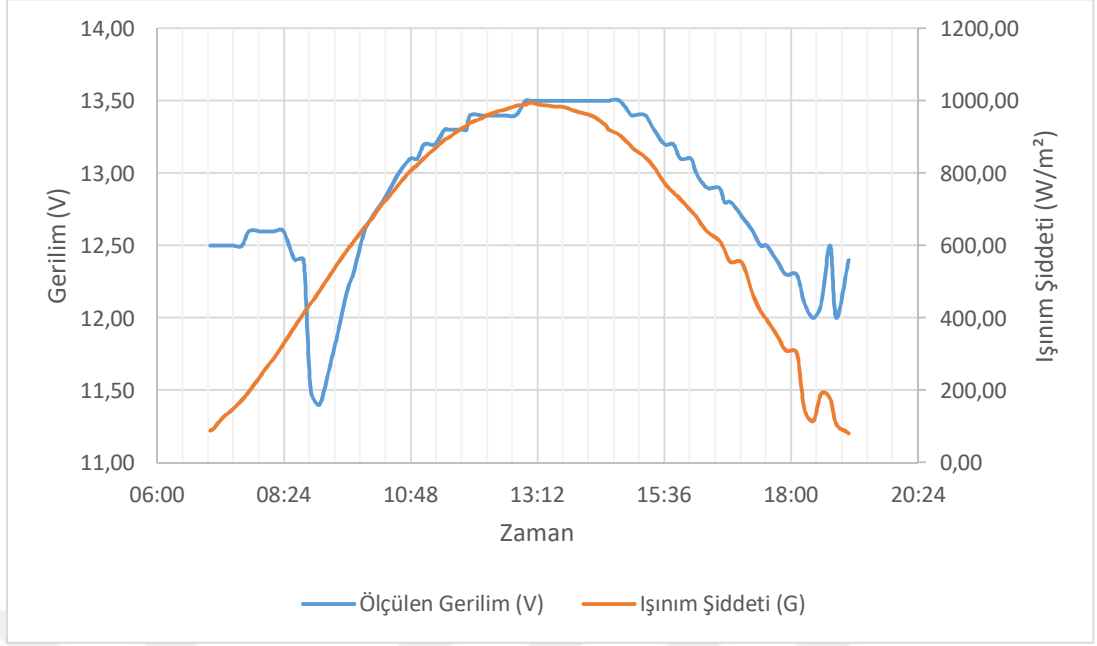
Son olarak 07 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinden ölçümler yapılmış ve elde edilen veriler Tablo 4.7’de gösterilmiştir. 07 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen veriler incelendiğinde ışınım şiddetinin değişimine bağlı olarak elde edilen akım – zaman grafiği Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. 07 Temmuz 2018 Akım – Zaman Grafiği.

Söz konusu şekilden, ölçülen akım değerlerinin ışınım şiddetiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Artan ışınım değerleriyle yükselen sıcaklıkta ölçülen akım değerlerinin ölçme aletlerinde, kablolarda ve diğer ekipmanlardaki kayıpların artması, kalibrasyonlarında değişiklikler olması nedeniyle aynı doğrultuda olmayan bir grafik görülmektedir.

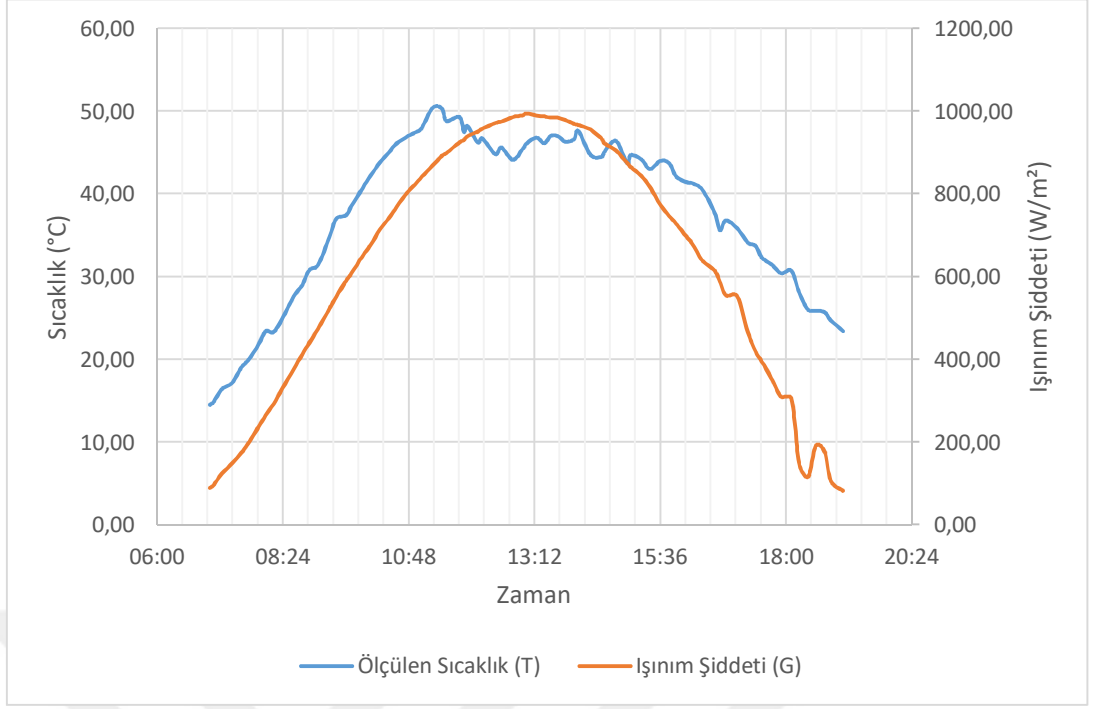
Aynı şekilde 07 Temmuz 2018 tarihinde elde edilen verilerden yola çıkarak gün içerisindeki değişen ışınım şiddeti ile birlikte fotovoltaik panel üzerinde zamana bağlı değişen gerilim değerinin grafiği Şekil 4.32’de gösterilmektedir.



Şekil 4.32. 07 Temmuz 2018 Gerilim – Zaman Grafiği.

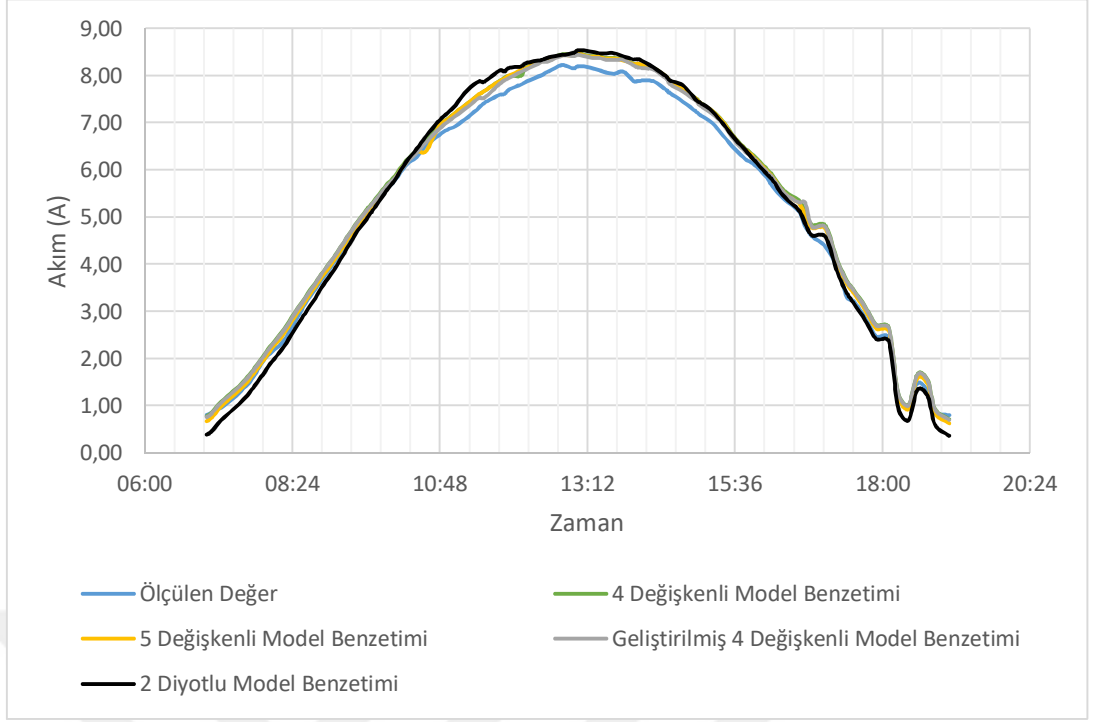
Işınım şiddetinin yüksek olduğu saatlerde gerilimin de potansiyel çalışma aralığında göreceli olarak yüksek değerler aldığı görülmektedir.

Fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen akım ve gerilim değerlerine etki eden bir faktörde fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığı olduğundan 07 Temmuz 2018 tarihinde atmosfer sıcaklığı ve ışınım şiddeti değerine bağlı olarak değişen fotovoltaik panel yüzey sıcaklığı incelenmiştir. Zamana göre elde edilen panel yüzey sıcaklığı Şekil 4.33’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.33. 07 Temmuz 2018 Sıcaklık – Zaman Grafiği.

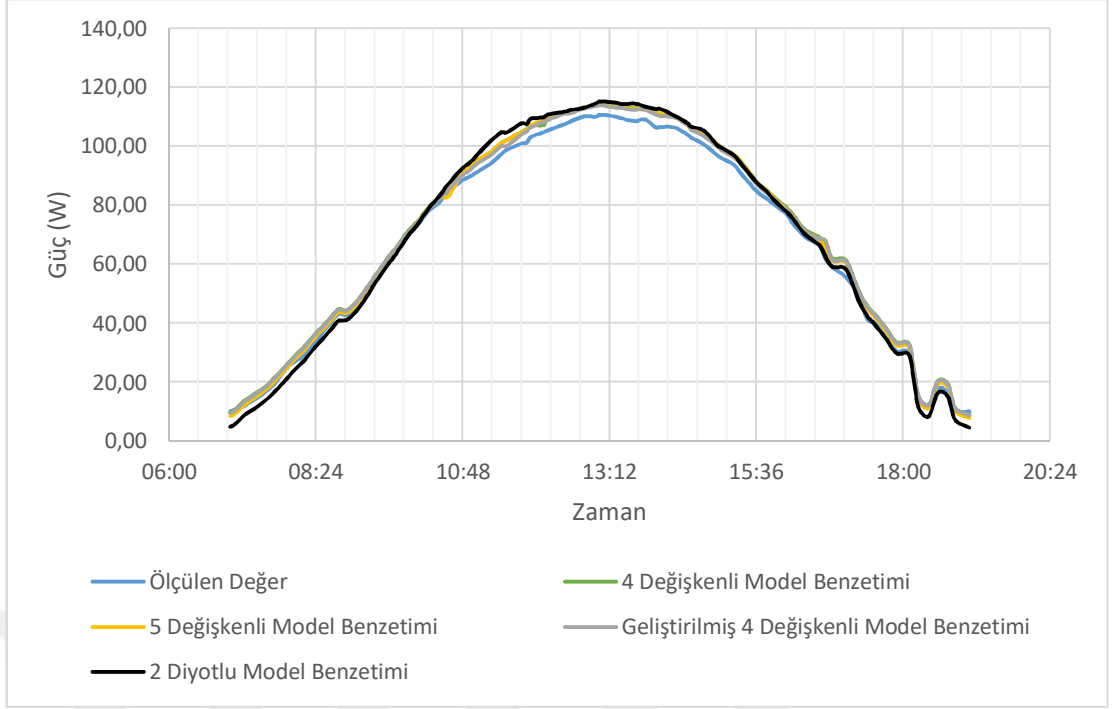
07 Temmuz 2018 tarihinde fotovoltaik sistem üzerinden data logger ile elde edilen bu değerlerin bir kısmı ve verilen referans değerler kullanılarak model benzetim yöntemleri hesaplanmıştır. Ölçülen akım değerleri ile 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemleri üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen akım grafiği Şekil 4.34'de gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.34 ile verilen grafikte görüldüğü üzere, ölçülen ve model benzetimlerinden elde edilen değerler sabah ve akşam saatlerinde birbirlerine çok yakın sonuçlar vermektedirler. Öğle saatlerinde sıcaklığın yükselmesiyle diyot idealite faktörünün içerisindeki $\mu_{V_{oc}}$ ve $\mu_{I_{sc}}$ parametrelerinin gerçek değerlere göre yeterli derecede korele edilemediğinden, sabit değerler kabul edildiğinden farklı sonuçlar alındığını söyleyebiliriz.

Model benzetim yöntemlerinden elde edilen akım sonuçları kullanılarak fotovoltaik sistemden elde edilebilecek tahmini güç değerleri hesaplanmıştır. Model benzetim yöntemlerinden elde edilen güç değerleri grafik üzerinde Şekil 4.35'de gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Model Benzetimlerinden Elde Edilen Akım – Zaman Grafiği.

Şekil 4.35’de görüldüğü üzere akım ve gerilim değerlerine bağlı olarak ölçülen güç değerleri ile model benzetim değerlerinin birbirine yakın olduğunu görülmektedir. Ölçülen değerlerimizin öğle saatlerinde yüksek sıcaklıkta akımdaki sapmalar ve akünün verdiği gerilimdeki sapmalardan dolayı azaldığını söyleyebiliriz. Bunun nedeni akımı ölçen aletlerdeki sıcaklıkla değişen kalibrasyon farklılıkları, kablolardaki kayıplar, panel yüzey sıcaklığını ölçen termokuplun yüzey sıcaklığını hassas ölçemeyecek bir alanda bulunması ile akünün sıcaktan etkilenmesi ile gerilim değerinin hassas ölçülememesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

4.1 Model Benzetim Yöntemlerinin Analizi

Bu bölümde fotovoltaik sistem üzerinden yapılan 6 farklı gün için ölçüm değerleri doğrultusunda 4 farklı fotovoltaik sistem model benzetim yöntemleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarla yapılan ölçümlerin farklarının bulunması için istatistiksel bir yöntem olan Kök Kareler Karesi (Root Mean Squared Error, *RMSE*) metodu kullanılmıştır. *RMSE*, istatistiksel yöntemi hata ortalama büyüklüğünü ölçmeye yarayan ikinci dereceden bir puanlama kuralıdır ve matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibidir (Willmott ve Matsuura, 2005);

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4.1.)$$

Bu denklemde:

X_i = Ölçümlerden Elde Edilen Sonuç

Y_i = Model Benzetim Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuç

n = yapılan ölçüm sayısıdır.

Bu yöntem ile fotovoltaik sistem üzerinden ölçüm yapılan akım ile benzetim modelinin çözümü ile elde edilen akım değerlerinin farkının karesi alınır. Daha sonrasında bulunan bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen sonucun karekökü alınır. Bulunan bu değer yapılan ölçüm sonuçları ile fotovoltaik model benzetim yöntemi arasındaki hata payını göstermektedir. Elde edilen *RMSE* değerleri 0 ile ∞ arasında değerler alabilmektedir. Elde edilen bu sonuçların 0'a yakın olması yapılan ölçüm değerleri ile model benzetim yönteminden bulunan sonuçların hata seviyesinin minimum olduğunu göstermektedir. Büyük *RMSE* değerleri ise ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farkın yüksek olduğunu göstermektedir.

Fotovoltaik sistem üzerinden alınan sonuçlar ile 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetimlerinden elde edilen sonuçların hata analizinin tespit edilmesi amacıyla hesaplanan *RMSE* değerleri aşağıda tablo 4.8'da gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Modeller Sonucunda Elde Edilen *RMSE* Değerleri

	4 Değişkenli Model	5 Değişkenli Model	Geliştirilmiş 4 Değişkenli Model	2-Diyotlu Model
16.05.2018	0,5797	0,5550	0,6920	0,9041
03.07.2018	0,4405	0,3990	0,3975	0,6816
04.07.2018	0,3183	0,2804	0,2892	0,4379
05.07.2018	0,3321	0,3220	0,3283	0,3740
06.07.2018	0,2613	0,2202	0,2333	0,1972
07.07.2018	0,2289	0,2063	0,2003	0,2841

Tablo 4.8’da her gün için hesaplaması yapılmış *RMSE* değerleri incelendiğinde 16 Mayıs 2018 tarihinde 5 değişkenli model benzetiminin hata oranının düşük olduğu yapılan hesaplamalar sonucunda bulunmuştur. 03 Temmuz 2018 tarihinde alınan ölçüm değerleri ve bu değerler doğrultusunda yapılan model benzetim yöntemleri üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda geliştirilmiş 4 değişkenli model benzetiminin hata oranının diğer model benzetim yöntemlerine göre daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 04 Temmuz 2018 tarihindeki *RMSE* değerlerine bakıldığında 5 değişkenli modelin hata değerlerinin diğer modellere göre daha küçük olduğu görülmektedir. 05 Temmuz 2018 tarihinde yapılan ölçüm ve model benzetim yöntemleri karşılaştırıldığında en az hatanın olduğu model benzetim yönteminin 5 değişkenli model olduğu görülmektedir. 06 Temmuz 2018 tarihinde hesaplanan *RMSE* değerleri doğrultusunda en az hatanın 2-diyotlu model sonuçlarından elde edildiği bulunmuştur. 07 Temmuz 2018 tarihinde ölçüm sonuçları ile model benzetim yöntemi sonuçları karşılaştırıldığında *RMSE* değeri en düşük geliştirilmiş 4 değişkenli model benzetim yönteminde yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir.

RMSE istatistiksel yönteminin yanı sıra fotovoltaik sistemden elde edilen sonuçlar ile model benzetim yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla farklı bir istatistiksel yöntem olan regresyon analizi (R^2) kullanılmıştır. Regresyon katsayısı hesaplanırken kullanılan matematiksel model aşağıda denklem 4.2 ile verilmektedir (Gujarati vd., 2012);

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Toplam Hataların Karesi}}{\text{Tüm Değerlerin Karesi}} \quad (4.2.)$$

Regresyon katsayısından elde edilen değerler 0 ile 1 arasında değişkenlik göstermektedir. Regresyon katsayı değerinin 1'e yakın olması model benzetim yönteminden hesaplanan sonuçların fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen ölçüm değeri verilerine yakın olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde regresyon katsayı değerinin 0'a yakın olması model benzetim yönteminden elde edilen sonuçların ölçüm sonuçlarından uzak olduğunu göstermektedir.

Fotovoltaik sistem üzerinden alınan ölçüm verileri ile 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemleri üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin R^2 değerleri incelendiğinde aşağıda Tablo 4.9'de gösterilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.9. Modeller Sonucunda Elde Edilen R^2 Değerleri

	4 Değişkenli Model	5 Değişkenli Model	Geliştirilmiş 4 Değişkenli Model	2-Diyotlu Model
16.05.2018	0,9951	0,9946	0,9797	0,9856
03.07.2018	0,9981	0,9981	0,9951	0,9930
04.07.2018	0,9981	0,9980	0,9979	0,9943
05.07.2018	0,9980	0,9961	0,9945	0,9949
06.07.2018	0,9989	0,9989	0,9988	0,9986
07.07.2018	0,9989	0,9986	0,9986	0,9982

Tablo 4.9 incelendiğinde 16 Mayıs 2018 tarihinde model benzetimleri arasında hesaplanan sonuçlara göre en yüksek benzetim oranının 4 değişkenli model benzetim yöntemi olduğu görülmektedir. 03 Temmuz 2018 tarihinde elde edilen regresyon katsayı sonuçlarına göre 4 değişkenli ve 5 değişkenli model benzetim yönteminin ölçüm değeri ile yüksek oranda benzerlik gösterdiği hesaplanmıştır. 04 Temmuz 2018 tarihinde bulunan R^2 değerlerine göre en yüksek benzetimin 4 değişkenli model benzetimi olduğu hesaplanmıştır. 05 Temmuz 2018 tarihinde model benzetim yöntemleri ile ölçüm değerleri arasındaki regresyon katsayı değerine

bakılırsa 4 değişkenli modelin oranının yüksek olduğu görölmektedir. 06 Temmuz 2018 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları üzerinden yapılan model benzetim yöntemlerinin regresyon katsayı değerlerine göre 4 değişkenli, 5 değişkenli ve geliştirilmiş 4 değişkenli model benzetiminin ölçüm değerlerine yakın olduğu görölmektedir. 07 Temmuz 2018 tarihinde elde edilen regresyon katsayı değerine göre 4 değişkenli modelin ölçüm değerlerine benzerliğinin diğer model benzetimlerine göre fazla olduğu görölmektedir.

Ortalama Tahmin Hatası (Mean Bias Error, *MBE*) modellerin uzun vadeli performansı hakkında bilgi veren istatistiksel bir parametredir. Modellerden elde edilen değerler ile ölçülen değerler arasındaki ortalama hatayı vermektedir. *MBE*'nin matematiksel yöntemi aşağıda denklem 4.3'de verilmektedir.

$$MBE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y_i - x_i) \quad (4.3.)$$

Bu denklemde:

x_i = Ölçümlerden Elde Edilen Sonuç

y_i = Model Benzetim Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuç

k = yapılan ölçüm sayısıdır.

MBE'nin 0'a yakın olması hatalar arasındaki farkın küçük olduğunu, eksi olması tahminlerin sistematik olarak ölçülen değerlerden daha küçük olduğunu, artı olmasının ise tahminlerin ölçülen değerlerden daha büyük olduğunu göstermektedir. Fotovoltaik sistem üzerinden alınan ölçüm verileri ile 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemleri üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen *MBE* değerleri Tablo 4.10'da verilmektedir.

Tablo 4.10. Modeller Sonucunda Elde Edilen *MBE* Değerleri

	4 Değişkenli Model	5 Değişkenli Model	Geliştirilmiş 4 Değişkenli Model	2-Diyotlu Model
16.05.2018	0,3698	0,3131	0,3786	0,3826
03.07.2018	0,4277	0,3820	0,3614	0,5512
04.07.2018	0,2850	0,2323	0,2529	0,2443
05.07.2018	0,3133	0,2796	0,2801	0,2480
06.07.2018	0,2389	0,2004	0,2051	0,1316
07.07.2018	0,2060	0,1596	0,1735	0,0972

Tablo 4.10’da model benzetimlerinden alınan sonuçların ölçülen değerler ile kıyaslandığında, ortalama hata oranının en düşük olduğu değerin 0,0972 ile 7 Temmuz 2018 gününde 2-Diyotlu modelden elde edildiği görülmektedir. Ortalama hata oranının en yüksek olduğu değerin ise 0,5512 ile 3 Temmuz 2018 gününde 2-Diyotlu modelden kaynaklandığı görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı günlerde fotovoltaik sistem üzerinden ölçümü yapılan ışınım şiddeti, sıcaklık, akım ve gerilim değerleri doğrultusunda ve referans değerlerini kullanarak literatürde kullanılan 4 değişkenli, 5 değişkenli, geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2 diyotlu model benzetim yöntemlerini kullanarak fotovoltaik sistemden gün içerisinde elde edilebilecek akım değerlerinin ve üretilebilecek güç değerlerinin tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Toplam 6 farklı gün için yapılan ölçümler baz alınarak, en uygun model benzetim yöntemi tespit edilmeye çalışılmıştır. Model benzetim yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile alınan ölçüm değerleri karşılaştırılarak 2 farklı istatistiksel yöntem ile analiz edilmiştir. Hesaplanan istatistiksel parametreler Tablo 5.1’de görülmektedir.

Tablo 5.1. İstatistiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar ve Ortalamaları

		16.05.2018	03.07.2018	04.07.2018	05.07.2018	06.07.2018	07.07.2018	Ortalama
1	R ²	0,9951	0,9981	0,9981	0,998	0,9989	0,9989	0,9978
	RMSE	0,5797	0,4405	0,3183	0,3321	0,2613	0,2289	0,3601
	MBE	0,3698	0,4277	0,2850	0,3133	0,2389	0,2060	0,3068
2	R ²	0,9946	0,9981	0,9980	0,9961	0,9989	0,9986	0,9974
	RMSE	0,555	0,399	0,2804	0,322	0,2202	0,2063	0,3305
	MBE	0,3131	0,3820	0,2323	0,2796	0,2004	0,1596	0,2611
3	R ²	0,9797	0,9951	0,9979	0,9945	0,9988	0,9986	0,9941
	RMSE	0,692	0,3975	0,2892	0,3283	0,2333	0,2003	0,3568
	MBE	0,3786	0,3614	0,2529	0,2801	0,2051	0,1735	0,2753
4	R ²	0,9856	0,993	0,9943	0,9949	0,9986	0,9982	0,9941
	RMSE	0,9041	0,6816	0,4379	0,374	0,1972	0,2841	0,4798
	MBE	0,3826	0,5512	0,2443	0,2480	0,1316	0,0972	0,2758

1= 4 Değişkenli Benzetim Modeli

2= 5 Değişkenli Benzetim Modeli

3= Geliştirilmiş 4 Değişkenli Benzetim Modeli

4= 2-Diyot Benzetim Modeli.

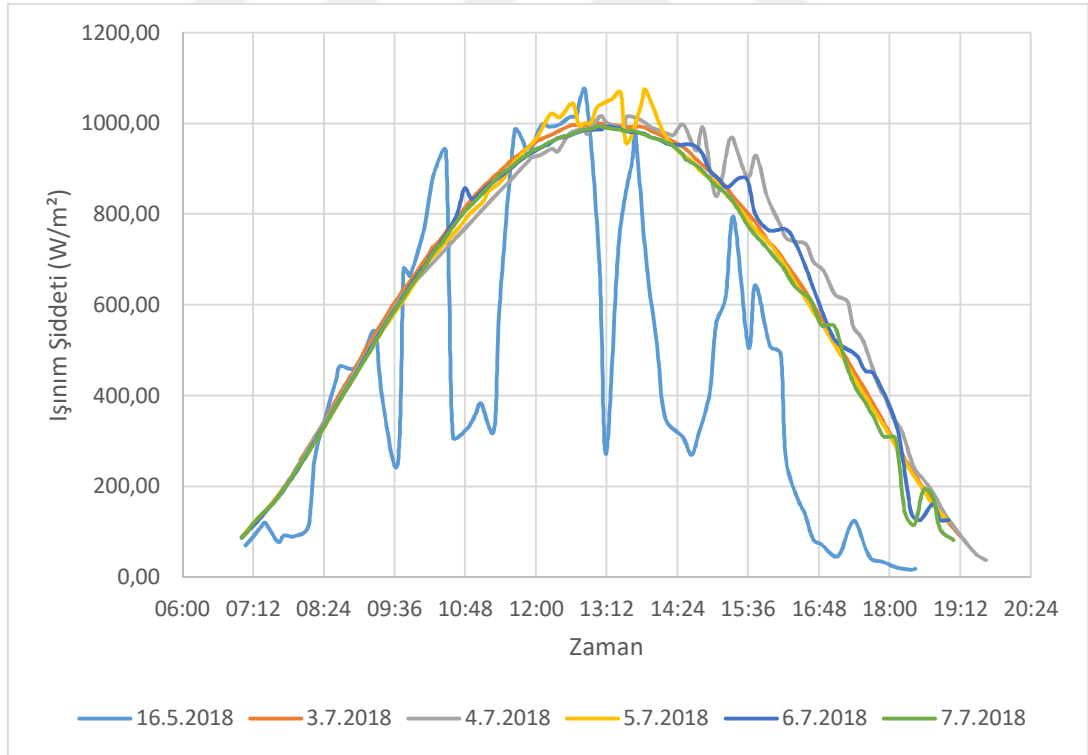
16.05.2018 tarihinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde gün içerisinde sürekli değişen ışınım şiddeti ve sıcaklık değerleri dolayısıyla model benzetim yöntemlerinden elde edilen sonuçların hata analizi sonuçlarının daha stabil günlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş 4 değişkenli ve 2-diyotlu model benzetim yöntemleri uygulanırken gün içerisinde ışınım şiddeti ve sıcaklığın sürekli değişmesi sonucunda model benzetim yöntemlerindeki değişken sayısının diğer modellere göre fazla olmasından dolayı R^2 değerlerinin diğer model benzetim yöntemlerine göre daha düşük olduğu düşünülmektedir. Söz konusu gün için en yakın benzetim yönteminin 4 değişkenli model olduğu görülmektedir. 03.07.2018 tarihinde ulaşılan istatistiksel sonuçlar incelendiğinde R^2 , $RMSE$, MBE değerlerine göre en uygun benzetim yönteminin 5 değişkenli model benzetimi olduğu görülmektedir. 04.07.2018 tarihinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde $RMSE$ değeri en düşük olan modelin 5 değişkenli model benzetim yöntemi, R^2 değeri içinse 4 değişkenli model benzetim yöntemi, MBE içinse 2-Diyot benzetim modelinin en yakın benzetim gösterdiği görülmektedir. 05.07.2018 tarihinde ulaşılan sonuçlara bakıldığında modellerin $RMSE$ sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu görülmekte fakat R^2 değerleri incelendiğinde 4 değişkenli model benzetim yönteminin ölçümlere en yakın sonuçlar verdiği, MBE incelendiğinde 2-diyot model benzetiminin en yakın sonuç verdiği görülmektedir. 06.07.2018 tarihinde elde edilen istatistiksel yöntemlere göre gün içerisinde model benzetim yöntemlerini etkileyen ışınım şiddeti ve sıcaklık değerinin diğer günlere göre daha stabil olmasından dolayı hata analizinden elde edilen sonuçların düşük olmasının kaynağı olduğu düşünülmektedir. Bahsi geçen gün için istatistiksel yöntemler incelendiğinde 5 değişkenli model benzetim yönteminden daha doğru sonuçlar alındığı, MBE yönteminde 2-diyotlu modelin daha yakın sonuç verdiği görülmektedir. 07.07.2018 tarihinde yapılan analizler doğrultusunda elde edilen istatistiksel sonuçlar incelendiğinde 4 değişkenli model benzetim yönteminin gerçek değerlere daha yakın olduğu ve MBE yönteminde 2-diyotlu modelin daha yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Altı farklı gün içerisinde Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde kurulu bulunan fotovoltaik sistem deney düzeneğinden alınan sonuçlar ve doğrultusunda yapılan model benzetim yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanan istatistiksel verilere bakıldığında ölçüm değerleriyle en yüksek benzetimi gösteren modelin R^2 dikkate alındığında 0,9978 değeriyle 4 değişkenli

model benzetimi olduğu, RMSE dikkate alındığında 0,3305 değeriyle 5 değişkenli model, MBE dikkate alındığında ise 0,2611 değeriyle 5 değişkenli modelin olduğu görülmektedir. Ancak, genel olarak, 4 değişkenli modelin parametre sayısının daha az olması nedeniyle, fotovoltaik modülün I-V karakteristiğinin çözümlenmesinin daha hızlı gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir.

5.1 Işınım Şiddetinin Model Benzetimleri Üzerindeki Etkisi

Kurulan deney düzeneği üzerinden alınan ışınım şiddeti, akım, voltaj ve sıcaklık değerleri model benzetimleri üzerinde uygulanarak fotovoltaik sistemin gün içerisinde ürettiği akım ve güç değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Gün içerisinde değişen ışınım şiddeti fotovoltaik sistemden elde edilen güç değerlerini de önemli ölçüde etkilemektedir. Aşağıdaki şekil 5.1’de grafik üzerinde fotovoltaik sistem üzerinde veri alınan günlerin ışınım şiddeti değeri toplu bir şekilde gösterilmiştir.



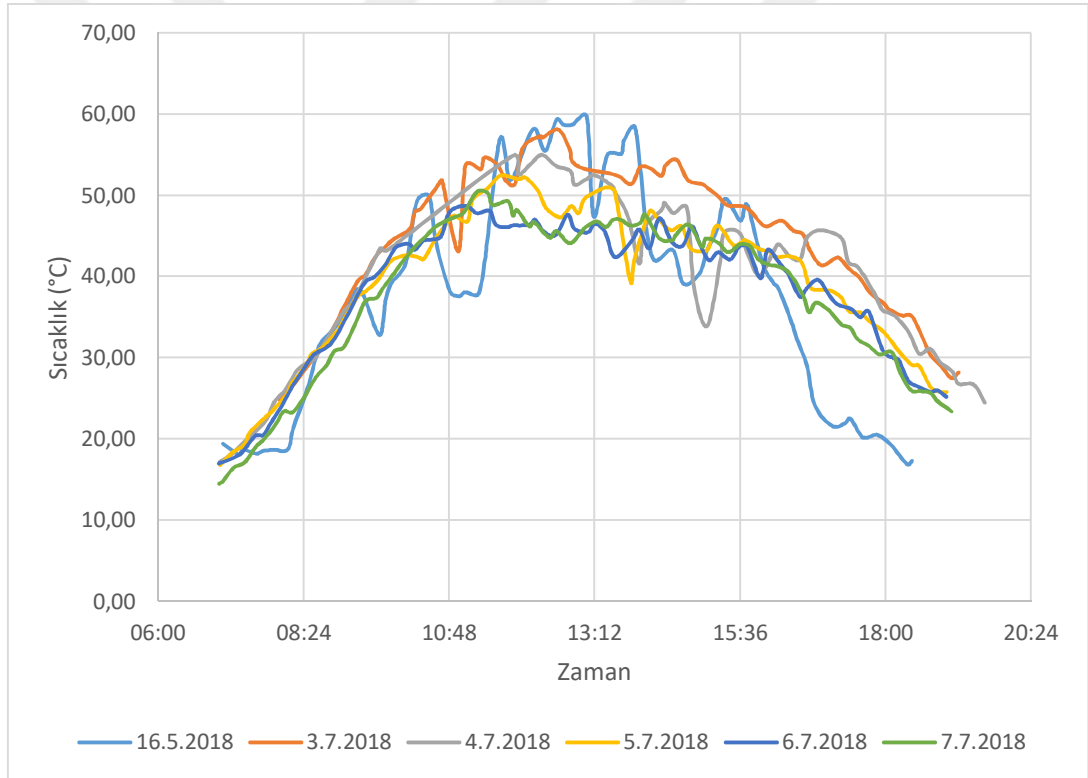
Şekil 5.1. Veri Toplanan Günlerdeki Zamana Göre Işınım Şiddetindeki Değişimler.

Işınım şiddetinin gün içerisinde değişim göstermesi model benzetim yöntemleri uygulanırken model içerisindeki değişkenlerden bir kaçının özellikle R_s

değerinin hesaplanmasını güçleştirerek model benzetim yöntemleri üzerinden elde edilen sonuçların ölçüm değerlerinden uzaklaşmasına neden olmaktadır.

5.2 Sıcaklığın Model Benzetim Yöntemleri Üzerindeki Etkisi

Işınım şiddetinin gün içerisinde değişmesi fotovoltaik sistemde kullanılan panelin yüzey sıcaklığını etkileyerek fotovoltaik sistemden elde edilen akım ve güç miktarlarını etkilemektedir. Fotovoltaik sistem üzerinden belirtilen günlerde toplanan sıcaklık değerleri model benzetim yöntemlerinde kullanılmıştır. Şekil 5.2’de veri toplanan günlerde fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığının gün içerisindeki değişimleri grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Veri Toplanan Günlerdeki Zamana Göre Sıcaklık Değerlerindeki Değişimler.

Fotovoltaik panel yüzeyindeki sıcaklık değerlerinin değişmesi model benzetim yöntemlerinde kullanılan $\mu_{I_{sc}}$, $\mu_{V_{oc}}$, R_s ve R_{sh} gibi hesaplanması güç olan değişkenlerin tam olarak doğru hesaplanamamasına neden olmaktadır. Net bir şekilde hesaplanamayan bu değerler sıcaklık değerinin sürekli değiştiği günler

içerisinde uygulanan model benzetim yöntemlerinin de belirli bir oranda ölçülen değerlerden sapmasına neden olmaktadır.

5.3 Öneriler

Fotovoltaik deney düzeneği kurulurken fotovoltaik panelin yüzey azimut ve güneş azimut açıları optimum olarak hesaplanmalı ve ışınım şiddeti ölçümünde kullanılan piranometreler aynı açı ve düzlemde olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Deney süresi boyunca kullanılan deney cihazları ile alınan ölçüm değerlerinin model benzetim yöntemlerinden elde edilecek sonuçlarla arasında farkı minimuma indirmek amacıyla deney süresince cihazlarda meydana gelebilecek kalibrasyon bozulmalarına dikkat edilmelidir. Deney süresi boyunca açık ortamda bulunan fotovoltaik panel yüzeyinin olumsuz hava koşullarından etkileneceği (toz, kirlilik vb.) durumlar göz önünde bulundurulmalı, belirli aralıklarla ve gerektiğinde temizliği yapılmalıdır. Model benzetim yöntemlerinin hesaplanması sırasında seri devre dirençleri R_s , paralel devre dirençleri R_{sh} , kısa devre akımı sıcaklık katsayısı $\mu_{I_{sc}}$ ve açık devre gerilimi $\mu_{V_{oc}}$ gibi değişkenlerin önemli etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu çalışma sırasında literatürden alınarak kabul edilen bu gibi değişkenlerin değerlerinin daha doğru bir şekilde hesaplanarak kullanılmasının benzetim yöntemlerinden elde edilecek sonuçların doğruluğunu arttıracacağı tahmin edilmektedir. Aynı şekilde gün içerisinde sürekli değişen sıcaklık ve ışınım şiddetine göre literatürden kabul edilen bu tarz değişkenlerin fotovoltaik panelin çalışması esnasında da sürekli değiştiği ve her sıcaklık değeri için tekrar tekrar hesaplanmasının model benzetimlerinden elde edilen sonuçların ölçümlerden alınan veriler ile uyumu arttıracacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKÇA

- Adib R, Murdock H, Appavou F, Brown A, Epp B, Leidreiter A, Lins C, Murdock H, Musolino E ve Petrichenko K (2015) “Renewables 2015 global status report”, Paris: REN21 Secretariat.
- Aksungur KM, Kurban M and Filik Ü (2013) “Türkiye’nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi”, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu.
- Alan H (2010) “Nükleer Enerji Hammaddelerinin Aranması ve Arama Yöntemleri”, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 2(3): 11-26.
- AlHajri M, El-Naggar K, AlRashidi M ve 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 ve 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) “Fotovoltaik güneş pilleri: yapısal özellikleri ve karakteristikleri”, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 47: 66-71.
- Askarzadeh A ve Rezazadeh A (2012) “Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms”, Solar Energy, 86(11): 3241-3249.
- Askarzadeh A ve Rezazadeh A (2013a) “Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models”, Applied energy, 102: 943-949.
- Askarzadeh A ve Rezazadeh A (2013b) “Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach”, Solar Energy, 90: 123-133.
- Ayrancı E (2011) “TR42 Doğu Marmara Bölgesi Yenilenebilir Enerji Raporu”, MARKA Kalkınma Ajansı, Kocaeli.
- Bernede J (2008) “Organic photovoltaic cells: history, principle and techniques”, Journal of the Chilean Chemical Society, 53(3): 1549-1564.
- Boyle G (2004) “Renewable energy”, Renewable Energy, by Edited by Godfrey Boyle, pp. 456. Oxford University Press, May 2004. ISBN-10: 0199261784. ISBN-13: 9780199261789: 456.

- Brano VL, Orioli A, Ciulla G ve Di Gangi A (2010) “An improved five-parameter model for photovoltaic modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(8): 1358-1370.
- Carman VE. (1975). Hydraulic energy storage transmission: Google Patents.
- Canka Kılıç F (2015) “GÜNEŞ ENERJİSİ, TÜRKİYE’DEKİ SON DURUMU VE ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ”, *Engineer & the Machinery Magazine*(671).
- Celik AN ve 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.
- Chegaar M, Ouennoughi Z ve Guechi F (2004) “Extracting dc parameters of solar cells under illumination”, *Vacuum*, 75(4): 367-372.
- Chenni R, Makhlof M, Kerbache T ve Bouzid A (2007) “A detailed modeling method for photovoltaic cells”, *Energy*, 32(9): 1724-1730.
- Da Costa WT, Fardin JF, Simonetti DS ve 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 ve Garcia A (2002) “Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices”, *Renewable energy*, 25(3): 371-380.
- De Soto W, Klein S ve Beckman W (2006) “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, *Solar Energy*, 80(1): 78-88.
- Duffie JA ve Beckman WA (2013) *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons.
- Durgut T (2015) Güneş panel sistemi için farklı bir method geliştirilmesi, Trakya Üniversitesi.
- Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I ve 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 ve Al-Othman A (2012) “Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification”, *Solar Energy*, 86(1): 266-274.
- Ghani F, Rosengarten G, Duke M ve Carson J (2015) “On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters”, *Solar Energy*, 112: 437-445.
- Goetzberger A, Hebling C ve Schock H-W (2003) “Photovoltaic materials, history, status and outlook”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 40(1): 1-46.

- Gong W ve Cai Z (2013) "Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution", *Solar Energy*, 94: 209-220.
- Green MA (2005) "Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(5): 447-455.
- Green MA, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J ve Ho-Baillie AW (2017) "Solar cell efficiency tables (version 50)", *Progress in Photovoltaics*, 25(NREL/JA-5J00-68932).
- Gujarati DN, Porter DC, Şenesen Ü ve Günlük-Şenesen G (2012) *Temel ekonometri, Literatür Yayıncılık*.
- Hotel JW (2007) "Electricity & Natural Gas".
- Ikegami T, Maezono T, Nakanishi F, Yamagata Y ve Ebihara K (2001) "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67(1-4): 389-395.
- Ishaque K ve Salam Z (2011) "An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE)", *Solar Energy*, 85(9): 2349-2359.
- Johansson TB, Reddy AK, Kelly H, Williams RH ve Burnham L (1993) *Renewable energy: sources for fuels and electricity*, Island press.
- Karataş Ş ve Altındal Ş (2004) "İdeal Olmayan Schottky Diyotlarının Temel Parametrelerinin Akım-Voltaj (IV) Karakteristiklerinden Hesaplanması", *Journal of Science and Engineering*, 7(2).
- Katz DLV (1959) *Handbook of natural gas engineering*, McGraw-Hill.
- Kazmerski LL (2011) "Photovoltaic: history, technology, markets, manufacturing, applications, and outlook", 84th International Seminar in Brighton, Renewable Energy Policy, Security, Electricity, Sustainable Transport, Water Resources/Management and Environment, Brighton, UK.
- Kennerud KL (1969) "Analysis of performance degradation in CdS solar cells", *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems*(6): 912-917.
- Khanna V, Das B, Bisht D ve 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 ve Khezzar A (2014) "Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules", *Solar Energy*, 110: 452-462.
- Koç E ve Kaplan E (2008) "Dünyada ve Türkiye de Genel Enerji Durumu", *Termodinamik Dergisi*: 188,106-118.

- Koç E ve Kaya K (2015) “ENERJİ KAYNAKLARI-YENİLENEBİLİR ENERJİ DURUMU”, Engineer & the Machinery Magazine, 56(668).
- Koç E ve Şenel MC (2013) “Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme”, Mühendis ve Makina, 54(639): 32-44.
- Koç Fatih (2018) “Polikristal Tür Bir Fotovoltaik Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Validasyonu”, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- Kou Q, Klein S ve Beckman W (1998) “A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems”, Solar Energy, 64(1-3): 33-40.
- Külekçi ÖC (2009) “Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi”, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 1(2): 83-91.
- Ma J, Ting T, Man KL, Zhang N, Guan S-U ve Wong PW (2013) “Parameter estimation of photovoltaic models via cuckoo search”, Journal of Applied Mathematics, 2013.
- Moldovan N, Picos R ve Garcia-Moreno E (2009) “Parameter extraction of a solar cell compact model usign genetic algorithms”, Electron Devices, 2009. CDE 2009. Spanish Conference on.
- Odası TMM (2012) “Türkiye’nin Enerji Görünümü 2018”, Yayın(691).
- Ortiz-Conde A, Ma Y, Thomson J, Santos E, Liou J, Sánchez FGa, Lei M, Finol J ve Layman P (1999) “Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method”, Solid-State Electronics, 43(4): 845-848.
- Ozcalık HR, Yılmaz S ve Kılıç E (2013) “Güneş Pili Bir Diyotlu Eşdeğer Devre Yardımıyla Matematiksel Modelinin Çıkarılması ve Parametrelerinin İncelenmesi”, Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 16(1).
- Özgener Ö (2002) “Türkiye’de ve Dünya’da rüzgar enerjisi kullanımı”, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(3): 159-173.
- Philp R (1985) “Petroleum formation and occurrence”, Eos, Transactions American Geophysical Union, 66(37): 643-644.
- Rahim NA, Ping HW ve Selvaraj J (2013) “Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab”, Procedia Environmental Sciences, 17: 537-546.
- Rajasekar N, Kumar NK ve Venugopalan R (2013) “Bacterial foraging algorithm based solar PV parameter estimation”, Solar Energy, 97: 255-265.

- Ramos Hernanz J, Martín C ve 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.
- Sağlam M, Uyar TS ve Göztepe İ (2005) "Dalga enerjisi ve Türkiye'nin dalga enerjisi teknik potansiyeli", Elektrik Mühendisleri Odası.
- Saha P, Kumar S, Nayak SK ve 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 ve 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 ve Bouaïcha M (2011) Application of the genetic algorithms for identifying the electrical parameters of PV solar generators *Solar cells-silicon wafer-based technologies*: InTech.
- Spectra S (2006) "Standard Air Mass Zero", NREL Renewable Resource Data Center.
- Stephens G, Campbell G ve Haar TV (1981) "Earth radiation budgets", Journal of Geophysical Research: Oceans, 86(C10): 9739-9760.
- Suthar M, Singh G ve Saini R (2013) "Comparison of mathematical models of photo-voltaic (PV) module and effect of various parameters on its performance", Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on.
- Şimsek KG (2010) "Elektrik Enerjisi Üreten fotovoltaik güneş paneli sistemi fonksiyonel modellenmesi", Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Teodorescu R, Liserre M ve Rodriguez P (2011) Grid converters for photovoltaic and wind power systems, 29, John Wiley & Sons.
- Topal M ve Arslan EI (2008) "Biyokütle enerjisi ve Türkiye", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu: 17-19.
- Ulapane NN, Dhanapala CH, Wickramasinghe SM, Abeyratne SG, Rathnayake N ve Binduhewa PJ (2011) "Extraction of parameters for simulating photovoltaic panels", Industrial and Information Systems (ICIIS), 2011 6th IEEE International Conference on.

- Van Krevelen DW (1993) Coal: typology, physics, chemistry, constitution, Elsevier Amsterdam.
- Vannini P ve Taggart J (2014) Off the grid: re-assembling domestic life, Routledge.
- 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.
- Wilcox S ve Myers DR (2008) Evaluation of Radiometers in Full-Time Use at the National Renewable Energy Laboratory Solar Radiation Research Laboratory, National Renewable Energy Laboratory Golden, CO.
- Willmott CJ ve 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 ve 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 ve Xu Y (2009) “Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization”, Journal of Applied Physics, 105(9): 094502.
- Yerli B (2009) “Fotovoltaik pillerde fizibilite süreci ve örnek uygulama”, İTÜ Meteoroloji Müh. Bölümü, İstanbul.
- Yıldırım M ve Örnek İ (2007) “Enerjide son seçim: Nükleer enerji”, Gaziantep University Journal of Social Sciences, 6(1): 32-44.
- Yılmaz M (2012) “Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi”, Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi, 4(2): 33-54.
- Yılmaz Ş, Aksu M, Özer Z ve Özçalık HR (2012) “Matlab İle Gerçekleştirilen Fotovoltaik (PV) Güneş Pili Modeli İle Güneş Enerjisi Üretimindeki Önemli Etkenlerin Tespit Edilmesi”, ELECO, Bursa.
- Zhou W, Yang H ve Fang Z (2007) “A novel model for photovoltaic array performance prediction”, Applied energy, 84(12): 1187-1198.



EKLER

7. EKLER

Tablo 4.2 16 Mayıs 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
07:04	70,17	19,40	12,25	0,78	9,56
07:20	111,34	18,10	12,40	1,07	13,27
07:24	119,85	18,70	12,50	1,01	12,63
07:37	78,25	18,20	12,40	0,95	11,78
07:43	92,23	18,50	1,24	1,00	1,24
07:54	90,54	18,70	12,20	1,03	12,57
08:08	112,08	18,70	12,50	1,20	15,00
08:14	254,30	21,50	12,30	2,09	25,71
08:26	359,66	25,60	11,80	3,02	35,64
08:36	433,50	30,10	11,30	3,45	38,99
08:40	464,91	31,70	12,50	3,74	46,75
08:54	459,34	33,60	12,20	3,74	45,63
09:04	491,80	35,30	11,40	4,03	45,94
09:16	540,54	38,40	12,30	4,45	54,74
09:23	398,31	37,70	12,30	3,32	40,84
09:39	251,15	32,80	12,40	2,17	26,91
09:45	679,50	37,20	12,40	5,58	69,19
09:51	664,27	39,30	12,30	5,45	67,04
10:05	761,12	41,70	12,50	6,15	76,88
10:16	890,84	49,30	12,70	6,91	87,76
10:28	938,11	49,90	12,50	7,18	89,75
10:35	310,18	44,10	11,30	2,46	27,80
10:49	326,25	38,10	12,20	2,56	31,23
10:58	357,87	37,60	12,50	2,77	34,63
11:04	382,77	38,10	12,30	2,89	35,55
11:17	324,15	37,90	12,50	2,63	32,88
11:23	603,88	41,80	12,50	4,85	60,63
11:38	984,54	56,90	12,90	7,05	90,95
11:47	958,91	52,00	12,90	7,32	94,43
11:52	930,55	52,40	12,90	6,94	89,53
12:05	996,41	56,80	12,90	7,10	91,59
12:13	993,05	58,20	12,90	6,95	89,66
12:23	997,25	55,50	12,90	6,96	89,78
12:34	1013,85	59,30	13,00	7,15	92,95
12:41	1018,26	58,70	13,00	7,51	97,63
12:50	1071,41	58,70	13,10	7,87	103,10
13:04	702,30	59,70	12,80	5,34	68,35
13:11	271,63	47,40	12,40	2,04	25,30
13:24	736,02	54,90	12,80	5,78	73,98

Tablo 4.2. 16 Mayıs 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler (devam)

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
13:38	921,83	55,10	12,90	7,11	91,72
13:41	976,98	56,80	12,90	7,46	96,23
13:52	696,00	58,30	12,80	5,37	68,74
14:03	508,39	45,90	12,40	3,91	48,48
14:11	353,14	42,00	12,20	2,60	31,72
14:29	309,76	43,30	12,20	2,37	28,91
14:38	269,95	39,40	12,40	2,07	25,67
14:45	313,44	39,10	12,40	2,37	29,39
14:57	411,13	40,70	12,50	3,21	40,13
15:03	555,45	43,20	11,70	4,43	51,83
15:13	619,42	45,80	12,20	4,88	59,54
15:21	793,47	49,60	12,40	6,15	76,26
15:36	507,34	46,90	12,30	4,02	49,45
15:43	643,58	48,80	12,40	5,17	64,11
15:58	509,02	41,60	12,50	4,06	50,75
16:09	491,38	39,20	12,40	3,88	48,11
16:14	262,92	38,50	12,30	2,06	25,34
16:27	169,01	34,30	12,40	1,15	14,26
16:33	142,54	32,00	12,10	1,07	12,95
16:42	83,72	29,00	12,50	0,67	8,38
16:50	73,00	24,10	12,50	0,59	7,38
17:07	46,32	21,60	12,40	0,53	6,57
17:19	111,13	21,90	12,40	1,04	12,90
17:25	123,00	22,50	12,50	1,19	14,88
17:36	60,08	20,30	12,40	0,67	8,31
17:42	38,65	20,20	12,50	0,44	5,50
17:52	34,77	20,50	12,40	0,51	6,32
18:05	22,90	19,30	12,50	0,43	5,38
18:21	16,70	16,90	12,50	0,37	4,63
18:26	18,80	17,30	12,50	0,40	5,00

Tablo 4.3. 03 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
08:00	258,92	24,80	12,50	1,94	24,25
08:15	311,34	26,90	12,50	2,36	29,50
08:26	350,31	28,70	12,50	2,79	34,88
08:37	394,11	30,50	12,30	3,24	39,85
08:49	436,65	32,60	12,50	3,57	44,63
08:51	443,58	33,10	12,50	3,60	45,00
09:08	508,60	37,30	11,50	4,22	48,53
09:17	540,22	39,40	11,70	4,42	51,71
09:26	570,68	40,40	11,90	4,74	56,41
09:34	599,78	42,30	12,10	4,90	59,29
09:44	630,87	43,60	12,30	5,19	63,84
09:54	659,97	44,70	12,40	5,49	68,08
10:09	707,02	45,90	12,50	5,67	70,88
10:14	726,25	48,00	12,60	5,93	74,72
10:20	738,54	48,40	12,60	6,12	77,11
10:37	787,59	51,30	12,80	6,42	82,18
10:41	796,62	51,80	12,80	6,46	82,69
10:57	840,43	43,10	12,90	6,69	86,30
11:04	855,76	53,70	12,90	6,83	88,11
11:19	887,17	53,20	13,00	7,15	92,95
11:23	894,31	54,70	13,00	7,11	92,43
11:36	921,73	53,70	13,00	7,28	94,64
11:44	933,91	51,80	13,10	7,43	97,33
11:53	949,04	51,40	13,10	7,63	99,95
12:01	961,75	55,90	13,10	7,64	100,08
12:18	977,82	57,30	13,10	7,59	99,43
12:20	980,55	57,10	13,10	7,66	100,35
12:36	996,20	58,10	13,10	7,61	99,69
12:47	993,99	55,70	13,10	7,88	103,23
12:50	995,36	54,10	13,10	7,98	104,54
13:04	1000,51	53,20	12,70	8,09	102,74
13:33	992,10	52,50	13,00	8,13	105,69
13:48	992,94	51,40	13,30	8,02	106,67
13:57	983,91	53,50	13,30	8,04	106,93
14:07	974,04	53,30	13,40	7,82	104,79
14:18	961,85	52,40	13,40	7,72	103,45
14:22	957,86	53,70	13,40	7,61	101,97
14:33	942,84	54,40	13,40	7,49	100,37
14:44	918,78	51,90	13,30	7,28	96,82

Tablo 4.3. 03 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler (devam)

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
14:58	892,10	51,40	13,30	7,11	94,56
15:06	876,77	50,70	13,30	7,05	93,77
15:14	858,91	49,90	13,30	6,86	91,24
15:23	832,34	48,80	13,30	6,71	89,24
15:37	798,41	48,70	13,20	6,45	85,14
15:45	776,88	48,20	13,20	6,29	83,03
15:57	737,80	46,50	13,10	5,91	77,42
16:03	725,62	46,20	13,10	5,83	76,37
16:17	683,29	46,90	13,00	5,46	70,98
16:28	647,89	45,70	12,90	5,18	66,82
16:38	615,95	45,20	12,80	4,90	62,72
16:45	589,69	43,20	12,80	4,72	60,42
16:56	546,63	41,40	12,70	4,38	55,63
17:09	503,77	42,20	12,60	3,95	49,77
17:14	489,49	42,30	12,60	3,80	47,88
17:25	448,21	40,80	12,50	3,38	42,25
17:34	415,54	39,90	12,40	3,12	38,69
17:44	379,09	38,10	12,40	2,82	34,97
17:58	324,78	36,70	12,20	2,46	30,01
18:03	307,03	36,00	12,10	2,20	26,62
18:16	257,98	35,20	12,60	1,90	23,94
18:26	223,11	35,10	12,50	1,52	19,00
18:37	186,87	32,30	12,50	1,19	14,88
18:44	163,02	30,40	12,40	0,99	12,28
18:54	135,08	29,10	12,50	0,72	9,00
19:05	106,93	27,50	12,40	0,50	6,20
19:12	89,81	28,20	12,50	0,36	4,50

Tablo 4.4. 04 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
07:01	90,75	17,20	12,50	0,91	11,38
07:12	118,80	18,10	12,50	0,84	10,50
07:23	144,75	19,40	12,40	1,10	13,64
07:33	169,01	20,60	12,50	1,36	17,00
07:47	210,71	22,40	12,60	1,58	19,91
07:55	238,02	24,60	12,50	1,92	24,00
08:06	276,47	26,10	12,60	2,19	27,59
08:17	316,80	28,40	12,60	2,56	32,26
08:28	354,72	29,50	12,60	2,88	36,29
08:34	375,41	29,80	12,60	2,99	37,67
08:45	414,28	31,90	12,70	3,51	44,58
08:57	458,92	34,40	12,70	3,83	48,64
09:05	484,97	36,00	11,50	4,08	46,92
09:13	514,49	37,00	11,70	4,40	51,48
09:40	609,23	43,50	12,80	5,25	67,20
09:46	627,19	43,20	12,80	5,41	69,25
11:51	915,11	54,90	12,90	7,30	94,17
11:56	926,14	52,60	13,00	7,64	99,32
12:04	930,13	53,30	13,20	7,62	100,58
12:16	944,52	54,80	13,20	7,64	100,85
12:22	938,85	54,90	13,30	7,58	100,81
12:34	977,50	53,60	13,40	7,87	105,46
12:48	987,59	53,00	13,40	8,03	107,60
12:52	977,82	51,30	13,40	7,93	106,26
13:05	1016,58	52,10	13,40	8,21	110,01
13:12	1001,24	52,50	13,40	8,05	107,87
13:29	991,47	51,20	13,40	8,05	107,87
13:32	1015,11	50,40	13,50	8,09	109,22
13:45	1009,33	47,30	13,50	8,18	110,43
13:56	992,73	41,60	13,20	8,27	109,16
14:01	988,43	46,00	13,40	8,24	110,42
14:18	973,93	48,20	13,40	7,88	105,59
14:21	977,19	49,10	13,50	7,95	107,33
14:30	997,04	47,80	13,50	8,05	108,68
14:43	939,79	48,50	13,40	7,43	99,56
14:50	989,79	38,90	13,10	8,17	107,03
15:03	839,79	33,90	12,90	7,13	91,98
15:16	960,49	41,70	13,20	8,02	105,86
15:20	968,36	45,40	13,30	7,95	105,74

Tablo 4.4. 04 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler (devam)

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
15:35	881,60	45,40	13,20	7,27	95,96
15:44	928,97	42,50	13,10	7,62	99,82
15:55	839,27	40,10	13,00	6,99	90,87
16:08	778,56	42,90	13,00	6,46	83,98
16:14	748,62	44,00	13,00	6,21	80,73
16:24	739,48	42,60	13,00	6,14	79,82
16:35	733,49	42,10	13,00	6,01	78,13
16:42	695,89	44,80	12,90	5,67	73,14
16:53	673,94	45,70	12,90	5,47	70,56
17:04	623,83	45,50	12,80	5,08	65,02
17:17	606,82	44,60	12,70	4,83	61,34
17:23	551,14	41,80	12,60	4,37	55,06
17:33	520,68	41,10	12,60	4,10	51,66
17:48	424,78	38,10	12,40	3,31	41,04
17:56	392,11	36,00	12,40	2,96	36,70
18:04	347,89	35,50	12,30	2,67	32,84
18:12	323,00	34,80	12,30	2,44	30,01
18:24	244,32	32,90	12,00	1,84	22,08
18:33	218,48	30,50	12,50	1,56	19,50
18:44	187,39	31,10	12,50	1,25	15,63
18:54	146,64	29,40	12,40	1,01	12,52
19:06	109,45	28,30	12,30	0,73	8,98
19:12	92,44	26,80	12,50	0,59	7,38
19:27	52,42	26,70	12,50	0,53	6,63
19:38	38,02	24,50	12,50	0,48	6,00

Tablo 4.5. 05 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
07:01	91,28	16,80	12,50	0,64	8,00
07:14	124,26	18,40	12,50	0,75	9,38
07:25	147,06	19,30	12,40	0,92	11,41
07:31	163,55	20,90	12,50	1,08	13,50
07:47	207,35	22,80	12,50	1,48	18,50
07:54	228,25	23,60	12,50	1,63	20,38
08:07	271,32	25,50	12,40	2,06	25,54
08:12	288,65	26,80	12,50	2,19	27,38
08:25	333,29	28,90	12,40	2,63	32,61
08:32	359,87	30,50	12,30	2,83	34,81
08:42	396,00	31,20	12,60	3,31	41,71
08:57	449,36	33,30	12,70	3,70	46,99
09:02	467,64	34,30	11,50	3,94	45,31
09:17	519,95	37,50	11,70	4,44	51,95
09:25	549,88	38,20	11,90	4,65	55,34
09:36	582,97	39,40	12,20	4,92	60,02
09:45	611,33	41,10	12,40	5,29	65,60
09:52	634,13	42,10	12,50	5,44	68,00
10:05	681,39	42,60	12,60	5,78	72,83
10:17	712,28	42,40	12,80	5,95	76,16
10:23	726,14	42,20	12,80	6,18	79,10
10:35	755,24	44,80	13,00	6,43	83,59
10:47	786,01	46,80	13,10	6,51	85,28
10:53	802,72	47,50	13,10	6,66	87,25
11:06	828,14	46,80	13,20	6,86	90,55
11:11	849,56	49,50	13,20	6,99	92,27
11:26	876,24	50,90	13,30	7,10	94,43
11:34	904,81	52,00	13,30	7,30	97,09
11:41	924,04	52,50	13,30	7,35	97,76
11:57	959,33	52,00	13,40	7,59	101,71
12:03	977,71	52,20	13,40	7,79	104,39
12:15	1021,30	50,70	13,50	8,14	109,89
12:24	1013,74	48,40	13,30	8,16	108,53
12:37	1044,41	47,30	13,50	8,39	113,27
12:43	996,72	47,80	13,40	8,05	107,87
12:49	1000,19	48,70	13,50	8,16	110,16
12:56	1002,82	47,80	13,50	8,12	109,62
13:02	1036,01	49,60	13,50	8,27	111,65
13:17	1053,97	50,70	13,60	8,36	113,70
13:26	1067,63	51,00	13,60	8,42	114,51
13:32	955,97	50,40	13,30	7,63	101,48
13:47	1042,31	39,50	13,20	8,73	115,24
13:51	1074,98	42,00	13,40	8,85	118,59
14:06	996,30	48,00	13,50	8,08	109,08
14:14	965,11	47,20	13,50	7,81	105,44

Tablo 4.5. 05 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler (devam)

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
14:27	934,65	45,70	13,50	7,62	102,87
14:38	918,05	46,20	13,40	7,57	101,44
14:46	898,51	43,60	13,40	7,43	99,56
14:56	880,66	43,10	13,40	7,30	97,82
15:04	869,31	43,40	13,40	7,22	96,75
15:13	844,42	46,30	13,30	7,00	93,10
15:29	807,23	43,90	13,30	6,70	89,11
15:37	784,33	44,20	13,20	6,48	85,54
15:41	771,62	44,50	13,20	6,35	83,82
15:55	741,69	43,40	13,10	6,15	80,57
16:05	714,80	43,10	13,10	5,90	77,29
16:12	691,69	42,40	13,00	5,73	74,49
16:25	644,11	42,50	12,90	5,35	69,02
16:37	605,14	41,70	12,80	4,97	63,62
16:45	574,99	38,70	12,80	4,70	60,16
16:57	537,49	38,40	12,70	4,24	53,85
17:07	500,10	38,20	12,70	4,05	51,44
17:16	470,79	37,40	12,60	3,86	48,64
17:24	437,18	35,70	12,50	3,54	44,25
17:35	400,52	35,60	12,50	3,12	39,00
17:43	370,58	34,60	12,40	2,92	36,21
17:55	330,46	33,50	12,30	2,48	30,50
18:02	304,51	32,60	12,30	2,29	28,17
18:13	263,44	30,80	12,20	1,91	23,30
18:26	218,48	29,10	12,50	1,43	17,88
18:33	196,63	29,00	12,10	1,33	16,09
18:45	156,61	26,30	12,50	0,98	12,25
18:55	134,35	25,80	12,50	0,80	10,00
19:00	122,79	25,80	12,40	0,62	7,69

Tablo 4.6. 06 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
07:00	87,39	17,00	12,50	0,46	5,75
07:13	115,96	17,60	12,50	0,58	7,25
07:23	139,91	18,40	12,50	0,81	10,13
07:36	173,53	20,40	12,50	1,09	13,63
07:44	196,69	20,50	12,20	1,24	15,13
07:52	221,42	22,10	12,60	1,48	18,65
08:05	265,65	24,70	12,60	1,82	22,93
08:13	294,11	26,60	12,60	2,24	28,22
08:23	330,56	28,50	12,60	2,55	32,13
08:34	369,32	30,40	12,70	2,86	36,32
08:44	405,77	31,10	12,70	3,27	41,53
08:53	436,76	32,10	12,50	3,55	44,38
09:08	491,69	35,40	11,50	4,07	46,81
09:17	524,88	37,70	11,80	4,38	51,68
09:26	557,24	39,50	12,00	4,63	55,56
09:33	580,66	39,90	12,10	4,92	59,53
09:45	620,37	41,50	12,40	5,20	64,48
09:55	653,98	43,60	12,60	5,49	69,17
10:08	692,00	44,00	12,70	5,81	73,79
10:14	714,80	43,30	12,80	6,04	77,31
10:22	736,11	44,40	12,90	6,32	81,53
10:32	770,99	44,60	13,00	6,63	86,19
10:40	803,66	45,00	13,10	6,87	90,00
10:47	857,34	47,70	13,20	7,15	94,38
10:55	832,97	48,50	13,20	6,97	92,00
11:06	854,61	48,70	13,20	7,20	95,04
11:15	869,94	47,80	13,30	7,25	96,43
11:28	890,63	48,10	13,30	7,38	98,15
11:34	901,24	46,40	13,30	7,57	100,68
11:45	920,57	46,10	13,40	7,74	103,72
11:51	930,13	46,30	13,40	7,78	104,25
12:00	941,26	46,30	13,40	7,87	105,46
12:08	950,51	46,40	13,40	7,86	105,32
12:13	954,50	47,00	13,40	7,92	106,13
12:21	966,79	45,60	13,40	8,10	108,54
12:33	973,09	45,10	13,50	8,11	109,49
12:45	982,65	47,60	13,50	8,08	109,08
12:51	985,91	46,00	13,50	8,13	109,76
12:59	986,01	45,50	13,50	8,13	109,76

Tablo 4.6. 06 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler (devam)

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
13:06	987,06	45,50	13,50	8,17	110,30
13:12	992,94	46,50	13,50	8,28	111,78
13:22	991,26	45,50	13,50	8,23	111,11
13:32	982,75	42,40	13,60	8,16	110,98
13:49	978,13	44,50	13,60	8,17	111,11
13:56	970,88	45,80	13,60	8,05	109,48
14:06	964,06	43,50	13,60	8,03	109,21
14:16	953,55	47,20	13,60	7,87	107,03
14:28	953,45	44,30	13,60	7,92	107,71
14:39	953,24	43,80	13,60	7,91	107,58
14:48	937,69	46,20	13,50	7,54	101,79
14:56	899,14	44,00	13,50	7,43	100,31
15:05	879,82	42,00	13,50	7,37	99,50
15:14	859,23	43,00	13,40	7,23	96,88
15:26	879,18	42,10	13,50	7,35	99,23
15:35	876,03	43,70	13,40	7,23	96,88
15:43	800,61	43,70	13,30	6,66	88,58
15:56	765,64	39,80	13,20	6,49	85,67
16:03	764,38	43,30	13,20	6,45	85,14
16:15	765,95	41,60	13,20	6,40	84,48
16:25	731,71	40,00	13,10	6,14	80,43
16:35	679,61	37,50	13,00	5,69	73,97
16:42	637,49	38,60	12,90	5,38	69,40
16:53	575,41	39,60	12,90	4,76	61,40
17:03	526,67	37,90	12,80	4,31	55,17
17:12	508,60	36,60	12,70	4,14	52,58
17:26	489,17	36,00	12,70	3,96	50,29
17:35	455,03	35,00	12,60	3,67	46,24
17:43	449,78	35,70	12,60	3,48	43,85
17:57	391,90	30,90	12,50	3,03	37,88
18:07	331,82	30,00	12,40	2,48	30,75
18:13	262,92	29,70	12,30	2,00	24,60
18:22	141,17	27,20	12,30	1,15	14,15
18:31	125,84	26,50	12,10	1,12	13,55
18:44	161,76	25,80	12,40	1,21	15,00

Tablo 4.7. 07 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
07:00	89,18	14,50	12,50	0,80	10,00
07:04	95,38	14,80	12,50	0,84	10,50
07:14	124,05	16,40	12,50	0,96	12,00
07:26	149,79	17,20	12,50	1,15	14,38
07:36	173,21	19,00	12,50	1,37	17,13
07:44	196,95	19,90	12,60	1,56	19,66
07:56	237,08	21,80	12,60	1,97	24,82
08:04	264,18	23,40	12,60	2,15	27,09
08:13	291,80	23,30	12,60	2,32	29,23
08:23	328,99	24,90	12,60	2,65	33,39
08:36	376,46	27,60	12,40	3,15	39,06
08:46	412,28	29,00	12,40	3,47	43,03
08:54	439,91	30,80	11,50	3,72	42,78
09:04	473,73	31,40	11,40	4,02	45,83
09:17	522,26	34,80	11,70	4,47	52,30
09:25	552,09	37,00	11,90	4,78	56,88
09:36	589,59	37,40	12,20	5,12	62,46
09:42	608,08	38,50	12,30	5,22	64,21
09:55	649,88	40,70	12,60	5,57	70,18
10:04	675,72	42,20	12,70	5,78	73,41
10:15	714,17	43,80	12,80	6,11	78,21
10:25	741,27	45,00	12,90	6,27	80,88
10:34	769,10	46,10	13,00	6,51	84,63
10:47	805,76	47,00	13,10	6,74	88,29
10:55	822,57	47,40	13,10	6,85	89,74
11:03	841,58	48,00	13,20	6,93	91,48
11:15	868,05	50,40	13,20	7,12	93,98
11:26	892,52	50,30	13,30	7,32	97,36
11:31	898,72	48,80	13,30	7,42	98,69
11:46	924,88	49,30	13,30	7,59	100,95
11:51	930,02	47,50	13,30	7,61	101,21
11:55	938,95	48,20	13,40	7,70	103,18
12:07	950,61	46,20	13,40	7,81	104,65
12:12	957,33	46,70	13,40	7,87	105,46
12:27	971,30	44,80	13,40	8,01	107,33
12:34	974,67	45,60	13,40	8,09	108,41
12:47	985,70	44,10	13,40	8,22	110,15
12:58	989,69	45,40	13,50	8,15	110,03
13:03	994,62	46,10	13,50	8,20	110,70

Tablo 4.7. 07 Temmuz 2018 Tarihinde Ölçülen Değerler (devam)

Zaman	Işınım Şiddeti G (W/m ²)	Yüzey Sıcaklık T (°C)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç P (W)
13:14	989,69	46,80	13,50	8,17	110,30
13:23	987,06	46,10	13,50	8,12	109,62
13:30	984,22	47,00	13,50	8,06	108,81
13:38	984,01	47,00	13,50	8,04	108,54
13:47	978,55	46,30	13,50	8,08	109,08
13:57	969,41	46,60	13,50	7,88	106,38
14:02	966,58	47,60	13,50	7,89	106,52
14:16	955,55	44,70	13,50	7,88	106,38
14:29	932,44	44,50	13,50	7,69	103,82
14:32	921,62	45,10	13,50	7,63	103,01
14:45	904,92	46,40	13,50	7,45	100,58
14:58	874,46	43,70	13,40	7,23	96,88
15:02	864,79	44,70	13,40	7,16	95,94
15:14	843,89	44,20	13,40	6,99	93,67
15:24	816,16	43,00	13,30	6,73	89,51
15:36	772,88	44,00	13,20	6,43	84,88
15:46	746,94	43,70	13,20	6,23	82,24
15:54	728,03	42,10	13,10	6,12	80,17
16:06	696,31	41,40	13,10	5,86	76,77
16:12	680,34	41,30	13,00	5,66	73,58
16:24	639,06	40,50	12,90	5,37	69,27
16:38	614,69	37,70	12,90	5,13	66,18
16:44	587,49	35,60	12,80	4,82	61,70
16:51	554,40	36,80	12,80	4,59	58,75
17:04	552,30	35,80	12,70	4,37	55,50
17:16	466,17	34,10	12,60	3,91	49,27
17:25	418,58	33,70	12,50	3,30	41,25
17:32	394,85	32,30	12,50	3,21	40,13
17:43	354,62	31,50	12,40	2,85	35,34
17:54	309,87	30,40	12,30	2,46	30,26
18:06	304,51	30,70	12,30	2,44	30,01
18:15	144,85	28,00	12,10	1,23	14,88
18:25	115,44	26,00	12,00	0,99	11,88
18:34	191,59	25,90	12,10	1,48	17,91
18:44	176,26	25,70	12,50	1,30	16,25
18:51	106,83	24,70	12,00	0,86	10,32
19:05	82,04	23,40	12,40	0,80	9,92

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ersal GEZER

Doğum Yeri ve Tarihi : BOLU - 1986

Lisans Üniversite : Yıldız Teknik Üniversitesi

Elektronik posta : ersalgezer@hotmail.com

İletişim Adresi : Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi