

**SİLİKON TABANLI POLİKİSTAL BİR GÜNEŞ  
PANELİNİN KARABÜK İKLİM KOŞULLARINDA  
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

**2016  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Mutlucan BAYAT**

**SİLİKON TABANLI POLİKRIŞTAL BİR GÜNEŞ PANELİNİN KARABÜK  
İKLİM KOŞULLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

**Mutlucan BAYAT**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2016**

Mutlucan BAYAT tarafından hazırlanan “SİLİKON TABANLI POLİKRİSTAL BİR GÜNEŞ PANELİNİN KARABÜK İKLİM KOŞULLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ÖZALP

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/ 01/ 2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Mehmet ÖZALP (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)

.....

...../...../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mutlucan BAYAT

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **SİLİKON TABANLI POLİKİRİSTAL BİR GÜNEŞ PANELİNİN KARABÜK İKLİM KOŞULLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

**Mutlucan BAYAT**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Mehmet ÖZALP**

**Ocak 2016, 123 sayfa**

Bu çalışmada, Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nda bulunan ve 130 Watt güç kapasitesine sahip silikon tabanlı Polikristal bir güneş paneli üzerinde deneyler yapılarak elde edilen veriler ışığında enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Kasım ayı boyunca 30 gün süre ile 09.00-17.00 saatleri arasında 30 dakika ara ile gerçekleştirilen deneyde, panelin başlıca elektriksel parametreleri ( $V_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{max}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$ ) olmak üzere panel sıcaklıkları, dış ortam sıcaklıkları, global radyasyon değeri ve panel üzerinden akan rüzgâr hızı ölçülmüştür.

Mevsim geçişlerinin yaşandığı ayda iklimsel şartların ve çevre koşullarının panel verimine olan etkisi incelenmiş, panelin günlük maksimum güç noktaları ( $P_{max}$ ) belirlenerek panelin akım-gerilim eğrisi ile birlikte enerji ve ekserji verim değişimleri gözlenebilmiştir. Kasım ayı boyunca gerçekleştirilen 510 ölçüm

neticesinde ölçülen ve hesaplanan toplam 16.320 veri MATLAB programına aktarılmış ve ölçümlerin yapıldığı ilk gün olan 1 Kasım için 2 boyutlu grafikler, ay genelindeki değişimlerin gözlenebilmesi için ise 3 boyutlu grafikler türetilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre panel enerji verimi  $\eta_{\text{enerji}}$ , ay genelinde %23,8 ile %68,4 arasında değişirken, panel güç dönüşüm verimi  $\eta_{\text{PV}}$  ise %9,4 ile %18,7 arasında değişim göstermiştir. Analiz neticesinde panel ekserji verimi  $\psi_{\text{PV}}$ 'nin ise %9,2 ile %18,3 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmanın gelecekte Karabük ilinde yapılması muhtemel güneş panellerinde enerji ve ekserji analizlerine ilişkin çalışmalara ışık tutacağı ön görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** Güneş pilleri, güneş paneli, Poly-Si, enerji, ekserji analizi, MATLAB.

**Bilim Kodu** : 914.1.233

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A SILICON BASED POLYCRYSTALLINE SOLAR PANEL WITHIN KARABUK CLIMATE CONDITIONS**

**Mutlucan BAYAT**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Mehmet ÖZALP**

**January 2016, 123 pages**

In this study, the energy and exergy analysis was performed in the light of obtained data by doing experimental studies on silicon based a polycrystalline solar panel in which situated the Karabuk University renewable energy laboratory and has 130 watts power capacity. In the conducted experiment per 30 minutes per a day within a period of between 9 am to 17 pm during the month of November; the panel temperature, outdoor temperature, solar radiation values, the wind speed flowing through the panel and ( $V_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{max}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$ ) were measured as the main electrical parameters of the panel.

In the month experiencing the seasonal shifts, the effect of climatic conditions and environmental circumstances on the yield of panel efficiency has been investigated and current-voltage (I-V) curve of the panel as well as changes in energy and exergy

efficiency has been observed by determining the daily maximum power points ( $P_{\max}$ ) in each day.

As a result of 510 measurements carried out during the November, measured and calculated 16.320 data in total has been transferred to MATLAB software and thus, 2- dimensional graphs were made for November 1, which is the first day of the measurements, and so as to observe changes in parameters throughout the month, 3- dimensional graphs were also derived.

According to the obtained results, while the panel energy efficiency  $\eta_{\text{energy}}$  varies between %23,8 and %68,4, the power conversion efficiency of the panel  $\eta_{\text{PV}}$  has ranged from %9,4 to %18,7. As a result of the analysis, the exergy efficiency of panel  $\psi_{\text{pv}}$  was also observed to be in the range of %9.2 and %18.3. The performed this experimental study is seen front to shed light on studies on prospective energy and exergy analysis on solar panels in Karabük province near the future.

**Key Word** : Solar cells, solar panels, Poly-Si, energy, exergy analysis, MATLAB.

**Science Code** : 914.1.233



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Mehmet ÖZALP'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Güneş panelinin elektriksel parametrelerine ilişkin ölçümlerin yapımında yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Mustafa GÖKDAĞ'ına ve her türlü desteği için Arő. Gör. Engin YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Sevgili aileme, her zaman yanımda olan ve hiçbir zaman manevi desteğini esirgemeyen sevgili eőim Sevgül BAYAT'a ve yaşam enerjim, biricik kızım Şaziment Hira'ya tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİ TEKNOLOJİSİ.....	3
2.1. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ VE MEVCUT DURUMU .....	3
2.1.1. Güneş Pilleri .....	3
2.1.2. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....	4
2.1.3. Günümüz Fotovoltaik Pazarı .....	7
2.2. GÜNEŞ PİLİ ÇEŞİTLERİ .....	13
2.2.1. Kristal Güneş Pilleri .....	13
2.2.2. İnce Film Güneş Pilleri.....	16
2.2.3. III-V Yarıiletken Güneş Pilleri .....	20
2.2.4. Organik Güneş Pilleri .....	20
BÖLÜM 3 .....	23
FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNDE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ.....	23
3.1. GÜNEŞ SPEKTRUMU .....	23
3.2. GÜNEŞ PİLLERİNİN YAPISI VE ÇALIŞMA MEKANİZMASI.....	25

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİNİN EŞDEĞER DEVRESİ .....	30
3.4. GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ .....	34
3.5. GÜNEŞ PİLLERİNİN VERİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	38
3.5.1. Yüzey Parametresi Etkisi .....	38
3.5.2. Spektral Etki .....	39
3.5.3. Foto Açısız Etki .....	39
3.5.4. Sıcaklığın Etkisi.....	40
3.5.5. Işınım Şiddetinin Etkisi .....	42
3.5.6. Karakteristik Dirençlerin Etkisi.....	44
3.5.7. Pil Kalınlığının Etkisi .....	45
3.5.8. Diğer Faktörler .....	45
BÖLÜM 4 .....	46
GÜNEŞ PANELLERİNDE ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ .....	46
4.1. ENERJİ VE EKSERJİ.....	46
4.2. ENERJİ, ENTROPİ VE EKSERJİ İLİŞKİSİ.....	51
4.3. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİNE İLİŞKİN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR .....	54
4.4. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİNİN ÖNEMİ .....	55
4.5. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZ DENKLEMLERİ .....	57
4.5.1. Ekserji Bileşenleri .....	57
4.5.2. Ekserjik Hesaplamalar Ve Termodinamik Denklik Bağıntıları .....	62
BÖLÜM 5 .....	69
POLİKİRİSTAL GÜNEŞ PANELİ VE DENEY DÜZENEĞİ .....	69
5.1. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMİ .....	70
5.2. DENEYDE KULLANILAN EKİPMANLAR .....	73
5.2.1. Reosta .....	73
5.2.2. Ampermetre Ve Multimetre .....	74
5.2.3. Anemometre .....	76
5.2.4. Piranometre.....	77
5.2.5. Termokupl .....	78

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 6 .....	80
DENEYSEL VERİ SONUÇLARI.....	80
6.1. 1 KASIM İLE 6 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI.....	90
6.2. 7 KASIM İLE 12 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI.....	97
6.3. 13 KASIM İLE 18 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI.....	102
6.4. 19 KASIM İLE 24 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI.....	105
6.5. 25 KASIM İLE 30 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI.....	109
6.6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	114
KAYNAKLAR .....	117
ÖZGEÇMİŞ .....	123

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1.	Küresel enerji kaynaklarının geçmişten günümüze dönüşüm miktarları .	2
Şekil 2.1.	Fotovoltaik pil, modül ve dizin gösterimi, fotovoltaik sistem gösterimi. ....	4
Şekil 2.2.	Global kümülatif PV kapasite gösterimi.....	8
Şekil 2.3.	1977-2015 yılları arasında c-Si güneş pilinin birim watt başına maliyetindeki düşüş grafiği. ....	9
Şekil 2.4.	1990 ve 2014 yılları arasındaki küresel yıllık c-Si ve ince film güneş pili üretim miktarları şematik gösterimi. ....	10
Şekil 2.5.	İnce film güneş pillerinin küresel pazar payları. ....	10
Şekil 2.6.	1980-2013 Yılları arası dünya geneli güneş enerjisinden üretilen net elektrik miktarı (TW.h) ....	11
Şekil 2.7.	Tüm kaynaklardan üretilen küresel elektrik üretim miktarı (TW.h). ....	12
Şekil 2.8.	Güneş enerjisinin küresel enerji üretimine katkısı (Yüzdelik oran %)...	12
Şekil 2.9.	Mono-Si güneş pili şematik gösterimi. ....	14
Şekil 2.10.	Mono-Si güneş paneli şematik gösterimi. ....	14
Şekil 2.11.	Poly-Si güneş pilinde farklı bir toplayıcı kanal tasarımı. ....	15
Şekil 2.12.	Poly-Si güneş paneli. ....	16
Şekil 2.13.	CdTe İnce film güneş pili şematik yapısı. ....	17
Şekil 2.14.	CIGS ince film güneş pili yapısı.....	18
Şekil 2.15.	a-Si güneş pili yapısı.....	19
Şekil 2.16.	GaAs güneş pili yapısı. ....	20
Şekil 2.17.	Organik güneş pilinin şematik gösterimi. ....	21
Şekil 2.18.	Geçmişten günümüze güneş pillerinin verim değişimi. ....	22
Şekil 3.1.	Atmosfer dışında ve yeryüzünde ortalama güneş enerjisi spektrumu. ....	24
Şekil 3.2.	AM0, AM1.5G (Global), AM 1.5D (Direkt) hava kütleleri için güneş spektrumu . ....	24
Şekil 3.3.	Farklı hava kütlesi (AM) pozisyonları ve zenit açısının gösterimi.....	25
Şekil 3.4.	Güneş pilinde üretilen akımın şematik olarak gösterimi. ....	26
Şekil 3.5.	N tipi yarı iletken yapısı şematik gösterimi. ....	27
Şekil 3.6.	P tipi yarı iletken yapısı şematik gösterimi.....	27

Şekil 3.7. Nötr durumdaki P ve N tipi yarı iletkenlerin gösterimi .....	28
Şekil 3.8. PN eklem geçiş bölgesi ve elektrik alanı.....	29
Şekil 3.9. Elektron-boşluk çiftinin meydana gelmesi .....	29
Şekil 3.10. PN eklem bir güneş pilinde elektron-hol çiftlerinin birbirinden ayrılması. ....	30
Şekil 3.11. Güneş pilinin diyota benzerliği.....	31
Şekil 3.12. Güneş pillerinin eşdeğer devresi.....	31
Şekil 3.13. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristikleri .....	34
Şekil 3.14. Kristal bir güneş pilinin maksimum güç noktası. ....	36
Şekil 3.15. Dolum Faktörü (FF)'nin grafiksel olarak gösterimi (A/B).....	37
Şekil 3.16. Sıcaklığın c-Si PV piline etkisi ve sıcaklığın panel I-V eğrisine olan etkisi.....	41
Şekil 3.17. Sabit ışınımda farklı sıcaklıklardaki PV panelinin gerilim ve güç değişimi .....	42
Şekil 3.18. Güneş pilinin akım-gerilim ve gücünün ışınım şiddeti ile değişimi.....	43
Şekil 3.19. Güneş pilinin maksimum çıkış gücü ve bu güce karşılık gelen gerilim ve akımın; sıcaklıkla ve ışınım şiddetiyle değişimi. ....	43
Şekil 3.20. Karakteristik direnç gösterimi .....	44
Şekil 4 1. Enerji, çevre ve sürdürülebilirliğin ekserji ile ilişkisi.....	48
Şekil 4.2. Enerjinin bileşenleri .....	51
Şekil 4.3. Enerji, entropi ve ekserji arasındaki ilişki .....	53
Şekil 4 4. Bir prosesin ekserji verimi ile tahrip, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları arasındaki ilişki. ....	55
Şekil 4.5. Fotovoltaik performans için akım ve gerilimin nicel gösterimi .....	64
Şekil 5.1. KBÜ Yenilenebilir Enerji Merkezi'nde bulunan PV sistem .....	70
Şekil 5.2. Deneyde üzerinde çalışılan panelin şematik gösterimi.....	72
Şekil 5.3. Panel uçlarına bağlanan elektrik devresi. ....	72
Şekil 5.4. Deneyde kullanılan çevirmeli Reosta. ....	73
Şekil 5.5. Reosta üzerinde alınan ölçüm noktalarının şematik gösterimi. ....	74
Şekil 5.6. Reosta şematik gösterimi. ....	74
Şekil 5.7. Ampermetrenin devreye seri bağlantısı. ....	75
Şekil 5.8. UNI-T UT61B dijital ampermetre. ....	75
Şekil 5.9. MY-68 Dijital Multimetre .....	76
Şekil 5.10. Delta OHM HD2303 kodlu termo-anemometre. ....	77

Şekil 5.11. MS-410 Piranometre.....	77
Şekil 5.12. Lascar EL-USB-TC-LCD Termokupl. ....	78
Şekil 5.13. Termokupl ile panel sıcaklığının alındığı noktanın şematik gösterimi. ..	79
Şekil 6.1. 1 Kasım global radyasyon, hava sıcaklığı ve rüzgar hızı değişim grafiği.....	81
Şekil 6.2. 1 Kasım $P_{max}$ , $I_{max}$ ve $V_{max}$ değişim grafiği.....	82
Şekil 6.3. 1 Kasım $I_{sc}$ ve $V_{oc}$ değişim grafiği. ....	83
Şekil 6.4. 1 Kasım panel ve çevre sıcaklıkları değişim grafiği.....	84
Şekil 6.5. 1 Kasım enerji değişim grafiği. ....	85
Şekil 6.6. 1 Kasım $\eta_{enerji}$ , $\eta_{maksimum}$ elektriksel ve $\eta_{PV}$ değişim grafiği. ....	87
Şekil 6.7. 1 Kasım panel ekserji değişim grafiği. ....	88
Şekil 6.8. 1 Kasım panel sıcaklığına göre enerji ve ekserji verimi değişim grafiği.	90
Şekil 6.9. 1 Kasım ile 6 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.....	91
Şekil 6.10. 1 Kasım ile 6 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği. ....	92
Şekil 6.11. 1 Kasım ile 6 Kasım arası $P_{max}$ ve radyasyon değişim grafiği. ....	93
Şekil 6.12. 1 Kasım ile 6 Kasım arası panel enerji değişim grafiği. ....	94
Şekil 6.13. 1 Kasım ile 6 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği. ....	95
Şekil 6.14. 1 Kasım ile 6 Kasım arası verim değişim grafiği. ....	96
Şekil 6.15. 7 Kasım ile 12 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.....	97
Şekil 6.16. 7 Kasım ile 12 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği. ....	98
Şekil 6.17. 7 Kasım ile 12 Kasım arası $P_{max}$ ve radyasyon değişim grafiği. ....	99
Şekil 6.18. 7 Kasım ile 12 Kasım arası panel enerji değişim grafiği. ....	100
Şekil 6.19. 7 Kasım ile 12 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği. ....	100
Şekil 6.20. 7 Kasım ile 12 Kasım arası panel verim değişim grafiği.....	101
Şekil 6.21. 13 Kasım ile 18 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.....	102
Şekil 6.22. 13 Kasım ile 18 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği. ....	103
Şekil 6.23. 13 Kasım ile 18 Kasım arası $P_{max}$ ve radyasyon değişim grafiği. ....	103
Şekil 6.24. 13 Kasım ile 18 Kasım arası panel enerji değişim grafiği. ....	104
Şekil 6.25. 13 Kasım ile 18 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği. ....	104
Şekil 6.26. 13 Kasım ile 18 Kasım arası panel verim değişim grafiği. ....	105
Şekil 6.27. 19 Kasım ile 24 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.....	106
Şekil 6.28. 19 Kasım ile 24 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği. ....	106

## Sayfa

Şekil 6.29. 19 Kasım ile 24 Kasım arası $P_{max}$ ve radyasyon değişim grafiği. ....	107
Şekil 6.30. 19 Kasım ile 24 Kasım arası panelin enerji değişim grafiği.....	107
Şekil 6.31. 19 Kasım ile 24 Kasım arası panelin ekserji değişim grafiği. ....	108
Şekil 6.32. 19 Kasım ile 24 Kasım arası panelin verim değişim grafiği. ....	109
Şekil 6.33. 25 Kasım ile 30 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.....	110
Şekil 6.34. 25 Kasım ile 30 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği. ....	110
Şekil 6.35. 25 Kasım ile 30 Kasım arası $P_{max}$ ve radyasyon değişim grafiği. ....	111
Şekil 6.36. 25 Kasım ile 30 Kasım arası panel enerji değişim grafiği.....	111
Şekil 6.37. 25 Kasım ile 30 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği. ....	112
Şekil 6.38. 25 Kasım ile 30 Kasım arası panel verim değişim grafiği. ....	113



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Bazı yarıiletken enerji bant aralığının sıcaklıkla değişimi .....	40
Çizelge 3.2. Si güneş pilinin sıcaklığa bağlı parametrelerin değişimi .....	41
Çizelge 4.1. Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması .....	52
Çizelge 4.2. Ekserji ve entropinin karşılaştırılması .....	53
Çizelge 5.1. IBC PolySol 130 GC panel karakteristikleri.....	71

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $V_{\max}$  : Maksimum gerilim (V)  
 $I_{\max}$  : Maksimum akım (A)  
 $P_{\max}$  : Maksimum güç (W)  
 $V_{oc}$  : Açık devre gerilimi (V)  
 $I_{sc}$  : Kısa devre akımı (A)  
FF : Doluluk faktörü  
 $\eta_{Pv}$  : Güç dönüşüm verimi (%)  
 $\eta_{enerji}$  : Enerji verimi (%)  
 $\eta_{\max,elk}$  : Maksimum elektriksel verimi (%)  
 $\psi_{PV}$  : Panel ekserji verimi (%)  
 $T_{panel}$  : Panel sıcaklığı (K)  
 $T_{çevre}$  : Çevre sıcaklığı (K)  
 $S_T$  : Saatlik global güneş ışınım şiddeti ( $W/m^2$ )  
 $\vartheta_{rüzgar}$  : Rüzgar hızı (m/s)  
 $E_{ngiren}$  : Giren enerji (W)  
 $E_{nçıkan}$  : Çıkan enerji (W)  
 $E_{nkayıp}$  : Enerji kaybı (W)  
 $\dot{E}x_{elek}$  : Elektriksel ekserji (W)  
 $\dot{E}x_{termal}$  : Termal ekserji (W)  
 $\dot{E}x_{PV}$  : Panel ekserji çıkışı (W)  
 $\dot{E}x_{güneş}$  : Solar ekserji (W)

## KISALTMALAR

a-Si	: Amorf silikon
c-Si	: Kristal silikon
mono-Si	: Tekli-kristal silikon
multi-Si	: Çoklu kristal silikon
poli-Si	: Polikristal silikon
CH <sub>4</sub>	: Metan
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
CdS	: Kadmiyum sülfür
Cd-Te	: Kadmiyum tellür
CIS	: Bakır indiyum selenür
CIGS	: Bakır indiyum galyum diselenür
GaAs	: Galyum arsenik
GaAlAs	: Galyum alüminyum arsenik
GaInAsP	: Galyum indiyum arsenik fosfat
InAs	: İndiyum arsenik
InSb	: İndiyum antimon
InP	: İndiyum fosfor
ITO	: İndiyum Kalay Oksit
PV	: Fotovoltaik
TCO	: Şeffaf iletken oksit
ZnS	: Çinko sülfür
ASEC	: Applied Solar Energy Corporation (Uygulamalı Güneş Enerjisi Kurumu)
EPIA	: European Photovoltaic Industry Association (Avrupa Fotovoltaik Endüstrisi Derneği)
NREL	: The National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)

## BÖLÜM 1

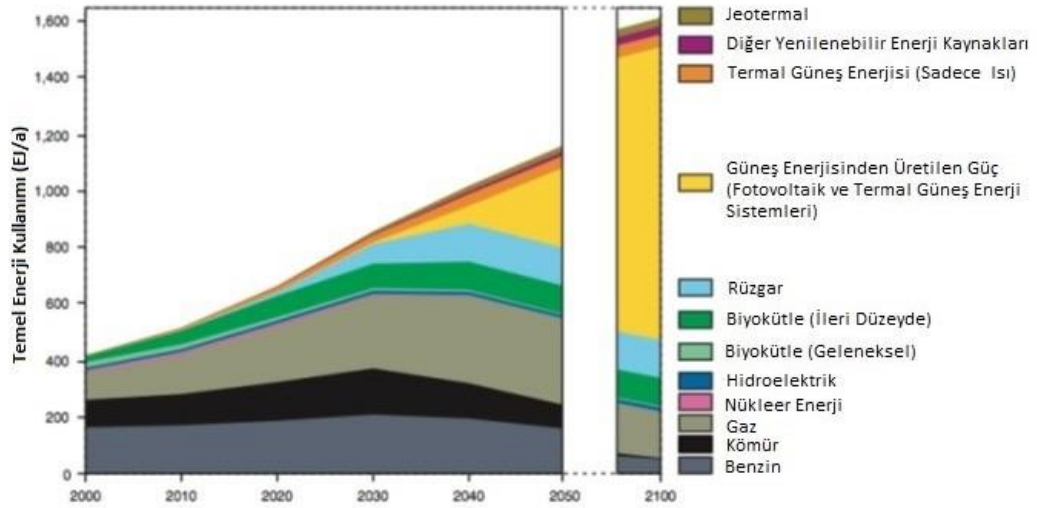
### GİRİŞ

Son yıllarda, küresel ısınma ve kirlilik, dünyadaki yaşamsal faaliyetleri tehdit edecek bir boyuta ulaşmıştır. Artan nüfus ve teknolojiye bağlı olarak, giderek artan küresel enerji talebi neticesinde, geleneksel enerji kaynakları olan petrol, kömür ve doğal gaz rezervleri tükenme riski ile karşı karşıya kalmıştır. Yüksek oranda karbon içeren bu fosil kaynakların enerji üretmek amacıyla yakılmasına bağlı olarak, atmosfere milyarlarca ton karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı gerçekleşmiş ve bu emisyonların yanı sıra metan (CH<sub>4</sub>) gibi diğer gazlarla birlikte sera etkisi ortaya çıkmıştır [1]. Küresel ısınma nedeniyle iklim şartlarının değişmesi ve özellikle de 1997 yılında imzalanan ve 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü gereği, fosil kaynaklı yakıt tüketiminin azaltılması kararlaştırılmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarından en üst düzeyde faydalanılması mecburi hale gelmiştir [2].

Ülkelerin küresel enerji politikaları ve enerji arz-talep dengeleri yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesi konusunu çok mühim kılmaktadır. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik, kullanım alanı en geniş günümüz yenilenebilir enerji kaynaklarından. Yenilenebilir enerjinin şu anki enerji üretimine katkısı kayda değer olmasa bile, yeni gelişen teknolojilerden özellikle rüzgar ve güneşin gelecekteki enerji üretimine önemli ölçüde katkı sağlayacağı Şekil 1.1’de görüleceği üzere tahmin edilmektedir [3].

Güneş enerjisi elektrik üretimi için çok büyük potansiyele sahip temiz ve karbonsuz bir kaynaktır. Güneş tarafından yayılan ve Dünya’ya düşen ışık, en bol enerji kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Günde 15000 egzajoule/EJ (1.5x10<sup>22</sup> J) güneş enerjisinden daha fazlası dünyaya ulaşmaktadır ki insan faaliyetlerinin günde ihtiyaç duyduğu enerji ortalama 1,3 EJ civarındadır [4].

Bu nedenle, bugün, günlük hayatta ve sanayide kullanılması zorunlu elektrik enerjisinin, sınırsız güneş enerjisinden faydalanarak çevreye en az zarar verecek biçimde üretimi, iletimi ve tüketiminin gerçekleştirilmesi konusu çözülmesi gereken en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Güneş enerjisinin bir enerji kaynağı olarak devamlı olması, çevre dostu olması, işletme yönünden masraflarının az olması ve uygulanabilirlik açısından hemen her yerde uygulanabilmesi nedeniyle söz konusu zararların minimize edilmesi konusunda büyük rol oynamaktadır [5]. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen fotovoltaik (PV) güneş pilleri alternatif bir enerji üretim aracı olarak git gide değer kazanmakta ve bu konuya ilişkin araştırmalar hızlı bir şekilde sürmektedir [6].



Şekil 1.1. Küresel enerji kaynaklarının geçmişten günümüze dönüşüm miktarları (adil kullanım altında, 2013) [3].

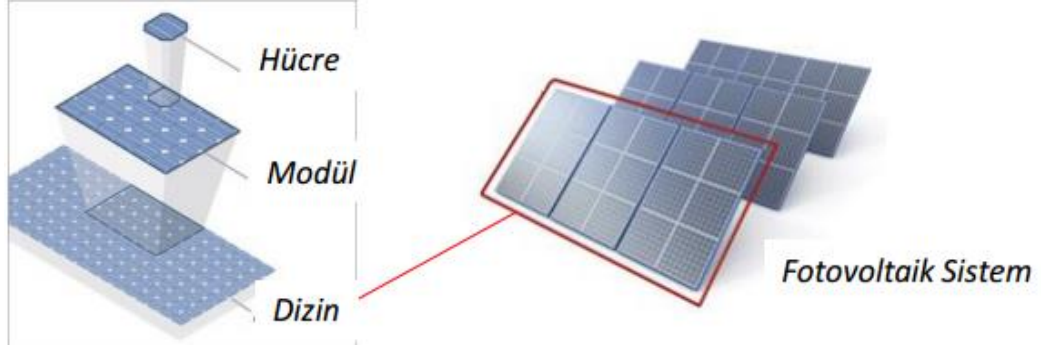
## BÖLÜM 2

### FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİ TEKNOLOJİSİ

#### 2.1. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ VE MEVCUT DURUMU

##### 2.1.1. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, fotovoltaik (PV) ilkeye göre çalışan ve yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen aygıtlardır. PV güneş pili yapımında kullanılan yarı iletken malzemenin bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, pilde, elektron boşluk çiftleri üreterek fotoakımı oluştururlar. Böylece, yarı iletken bir diyot olarak çalışan güneş pili, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmüştür. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisi olması ve güneş pilinde mekanik olarak elektrik üreten cihazların aksine hareketli parçalar olmamasından ötürü teorik ömürleri sonsuzdur. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş pili modülü ya da PV modül (panel) adı verilir. Güç gereksinimine bağlı olarak bu modüller seri veya paralel bağlanarak dizinleri, dizinlerin birleştirilmesi ile de birkaç Watt'dan Mega Watt'lık enerji üretim kapasitelerine sahip PV sistemler oluşturulabilir [7]. Şekil 2.1 sırasıyla PV hücre, modül, dizin ve PV sistemini göstermektedir.



Şekil 2.1. Fotovoltaik pil (hücre), modül ve dizin gösterimi (solda), fotovoltaik sistem gösterimi (sağda).

### 2.1.2. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik güneş pilleri her ne kadar yeni gelişen teknoloji gibi görünse de tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara dayanmaktadır. İlk kez 1839 yılında E. Becquerel aynı elektrolit sıvı içerisinde batırılmış Platin (Pt) ile kaplı gümüş çubukların birinin üzerine (AgCl veya AgBr) ışık düşürerek bu elektrotlar arasında bir potansiyel farkın meydana geldiğini gözlemlemiştir [8].

Katılarda benzer bir olay ilk olarak Selenyum (Se) elektrotunu ışığa tutarak akım oluştuğunu 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir [9]. Bunu izleyen yıllarda ki çalışmalar bakır oksit ve Selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir.

Bir sonraki gelişme 1883 yılında, Fritss tarafından iki farklı metalden yapılmış tabakaların arasına erimiş Se sıkıştırmasıyla meydana gelmiştir. İki tabakadan sadece birine yapışan Se tabanlı ilk ince film güneş pili yapılmış ve bu cihazların çok düşük fiyatta üretilebileceği kanıtlanmıştır [10].

1914 yılında PV diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de, gerçek anlamda ilk modern yarıiletken güneş pilleri 1954 yılında Bell Telephone Laboratuvarı'nda Person, Fuller ve Chapin tarafından yapılmaya başlanmış ve tekli kristal Silisyum (m-Si) tabanlı güneş pillerinin verimi %6 olarak kanıtlanmıştır [11]. Aynı dönemde

Reynolds benzer verimliliği olan Kadmiyum sülfür tabanlı bir CdS/Cu<sub>2</sub>S pil yapmayı başarmış ve malzemenin değişik konfigürasyonlarda kullanıldığı çok farklı güneş pilleri üzerinde çalışmalar başlatmıştır [12].

1939 yılında, silikonun güneş pili yapımında Russel Ohl tarafından ilk kez kullanılmasıyla birlikte [13], düşük pil performansı nedeniyle karasal güç üretimi için yetersiz kalan pil teknolojisi Sovyet bilim adamları tarafından ilk kez bir uzay uydusu Spotnik' de kullanılmıştır [14]. Bununla birlikte, taşınabilir ve temiz bir enerji kaynağını uzayda kullanmış olma fikri ile araştırmacılar, güneş pillerinin performansını artırmak için çalışmalara hız vermişlerdir.

Fotovoltaik güç sistemlerinin uzay çalışmalarında kullanımı ile birlikte yıllar içinde teknolojinin gelişmesine paralel olarak güneş pillerinin veriminde hatırı sayılır bir ilerleme kaydedilmiştir. Örneğin, henüz daha 1960'ların başlarında PV pillerin verimleri %15'e ulaşmıştır [15].

1970' li yılların başlarına kadar güneş pili uygulamaları uzay çalışmaları ile sınırlı kalsa da, özellikle 1973 yılındaki 1. Petrol bunalımından sonra Amerika, Avrupa ve Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir [16]. Bu kapsamda, örneğin, 1970'li yıllarda Sovyet Rusya'da Zhores Alferov tarafından ilk kez Galyum Arsenik (GaAs) katkılı güneş pilleri üretilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri 1988 yılında Uygulamalı Güneş Enerjisi Kurumu (ASEC) tarafından %17 verimle çalışan tek eklemlili GaAs katkılı güneş pili geliştirilmiştir. 1989 yılında ise aynı kurumda %20 verimle çift eklemlili GaAs katkılı güneş pili, GaAs ile birlikte Germanyum (Ge) kullanılarak üretilmiştir. Uzay araçlarında kullanılan güneş pili GaAs tabanlı olmasına rağmen ikinci bir pil olarak Ge katkılı olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda verimde önemli ölçüde bir artış gözlenmiştir.



1995 yılında Almanya’da güneş pillerinin termal ve tasarım ilkeleri araştırılarak %20 verimle çalışan pillerinin veriminin nasıl daha fazla arttırılabileceği üzerinde çalışılmıştır [17]. Aynı yıl içerisinde Avusturalya’da yapılan çalışmada ise; tek ve çift eklemli güneş pillerinin simülasyonu yapılmış, tek eklemli PV güneş pillerinden %23,1 verim elde edilirken, çift eklemli güneş pilleri ile bu değer %29’a çıkabileceği gösterilmiştir [18].

2000’li yılların başlarında ise Avusturalya’da bir grup araştırmacı, kristal silisyum (c-Si) güneş pillerinin veriminin geçen 15 yıl içerisinde %50 civarında iyileştirildiğine değinmiştir. Bunda güneş ışığının geldiği eklem ve temas bölgelerinde ışık yakalama özelliğinin arttırılmasıyla mümkün olduğunu göstermiş ve bu faktörler üzerinde çalışarak %24,7 verimle çalışan güneş pili elde etmişlerdir [19].

2002 yılında Meksika’da bir grup araştırmacı ise “Termal Teknolojiler ile Yüksek Verimli Silikon PV Güneş Pilleri” adlı çalışmalarında; konveyörlü fırınlarda farklı güneş pilleri için belirli süreler belirleyip bunlara hızlı ısı işlem uygulayarak, farklı yapıdaki pillerin verim değişikliklerini incelemişlerdir [20]. Daha sonra Almanya’da 2006 yılında S.W Glunz, yüksek verimliliğin endüstriyel uygulamalarında son faaliyetleri hakkında bilgi verip, lazer ısıtıcı ve ince silikon levha uygulamalarına dikkat çekmiştir.

Farklı ülkelerde yapılan çalışmalar ve uygulamalara her geçen yıl yenisi eklenmiştir. Tayvan’da 2010 yılında “Fotovoltaik Güneş Pillerinin Saf Hidrojen Tavlama Yöntemi ile Işık Dönüşümünün Geliştirilmesi” adlı çalışmada, 15 dk boyunca 350°C’de saf hidrojen tavlama yöntemi ile pil veriminin %1 oranında arttığı gösterilmiştir. Ardından Çin’de kristal silikon güneş pilleri için yeni bir ön metal eklem değerlendirme şeması geliştirilmiş ve buna lazer doping işlemi uygulanmıştır. Bu işlem ile verimin %14,39’dan %23,8’e çıktığı gözlenmiştir [21].

Avusturalya’da bir grup araştırmacı, her geçen yıl güneş pillerine ilgi ve talep arttıkça, maliyetin yükseldiğini araştırmış ve bu sorunun ortadan kalkması için 25 seri üretime geçilmesi ayrıca pil veriminin arttırılması için ince katman, yüzey

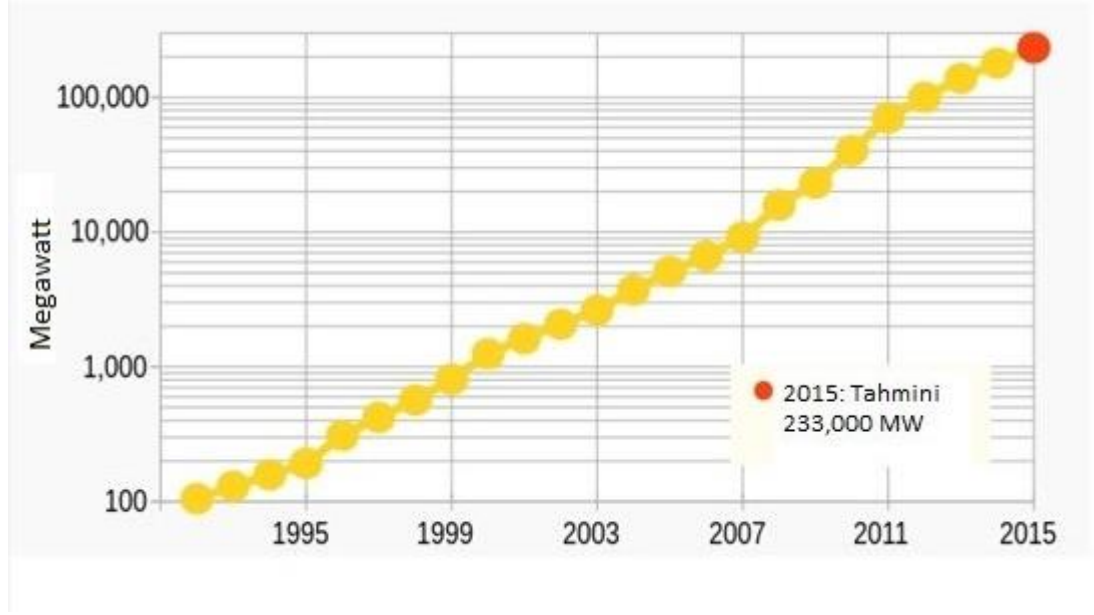
pürüzsüzleştirme ve yansıtma kaplama uygulamalarının yapılmasına değinmiştir. Bu yöntemlerle endüstriyel ortamda yapılan seri üretimle verimi %24 olan güneş pilleri üretmiştir [22].

2014 yılında ise Almanya'da bir grup yaptıkları çalışma ile heteroeklem silikon güneş pillerinin yüzey dokusu özelliklerini iyileştirip sanayi üretimi için cazip, çevresel etkileri ve maliyeti düşük pil üzerinde çalışmışlardır [23]. Aynı yıl Amerika'da nano yapılı silikon p-katmanlı ve radyo frekansı gücüyle elde edilen yüksek verimli amorf silisyum güneş pillerinde ise redüklemeye prosesi üzerinde çalışılmıştır.

### **2.1.3. Günümüz Fotovoltaik Pazarı**

1954 yılında Bell laboratuvarında ilk modern Silikon (Si) tabanlı güneş pilinin üretilmesinin ardından dünya genelinde güneş pillerinin verim performanslarına yönelik çalışmalar artmış ve global PV pazarı ve ülkelerin kurulu güç sistem miktarları artmıştır.

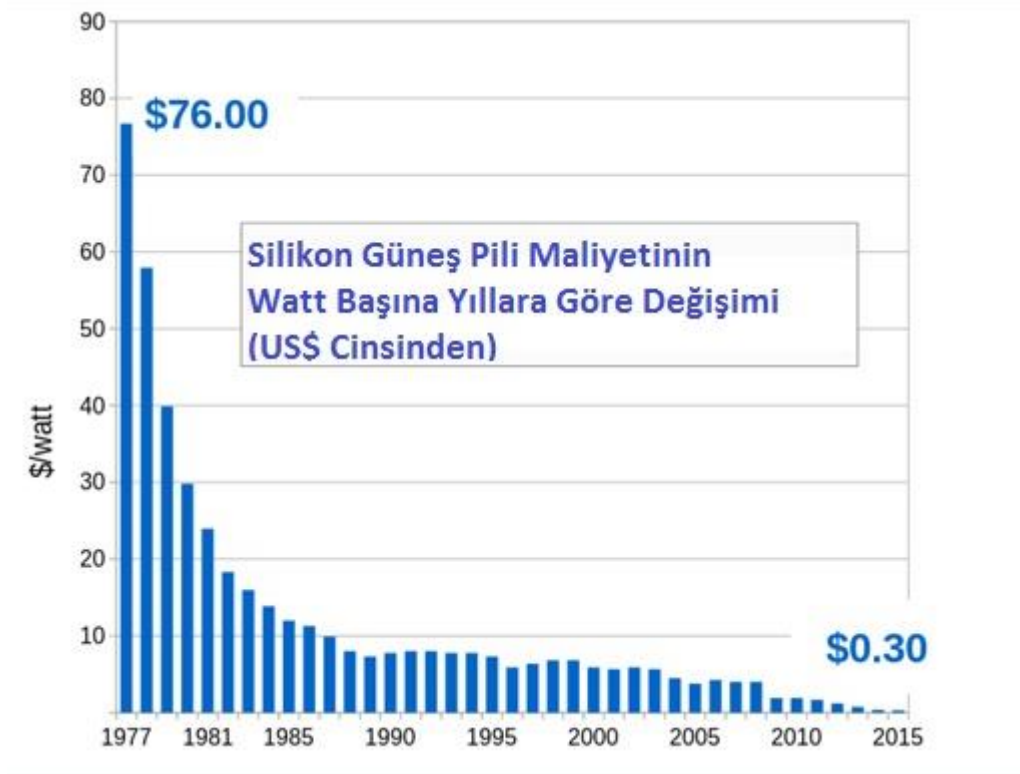
Dünya'da ki fotovoltaik güç sistemlerinin tarihsel değişimine bakıldığında, dünya geneli kümülatif PV kapasitesi, küresel PV pazarının araştırıldığı 1992 yılından bu yana üstel bir grafik sergilemiştir. 1992 yılında toplam kurulu gücün 105 Megawatt (MW) ile sınırlı kaldığı nominal PV pazarı [24], 1996 yılında 309 MW'a çıkmıştır. Fotovoltaik teknolojisinin giderek yaygınlaşması ve özellikle Almanya, Japonya ve Çin'in PV pazarına yaptığı ciddi yatırımlar sayesinde 2000'li yılların başından itibaren kurulu güç kapasitesinde önemli ölçüde artışlar yaşanmıştır. Örneğin, 2000 yılı sonu itibariyle 1,25 Gigawatt (GW) olan toplam kapasite [25], 2005 yılında 5,11 GW'a 2010 yılında ise 40,33 GW'a yükselmiştir [26]. 2014 yılı sonu itibariyle kümülatif kurulu PV kapasitesi 178 GW değerine ulaşmıştır ki bu oran, küresel elektrik ihtiyacının yaklaşık %1'ini karşılamaya yetmiştir. 2015 yılı sonunda ise, yeni kurulacak olan güneş panelleri ve dünya genelindeki kurulu gücün 55 GW'lık büyüme beklentisi ile birlikte, toplam PV kapasitesinin 233 GW'a çıkacağı öngörülmektedir. Şekil 2.2 Global kümülatif PV kapasitesini göstermektedir [27].



Şekil 2.2. Global kümülatif PV kapasite gösterimi [27].

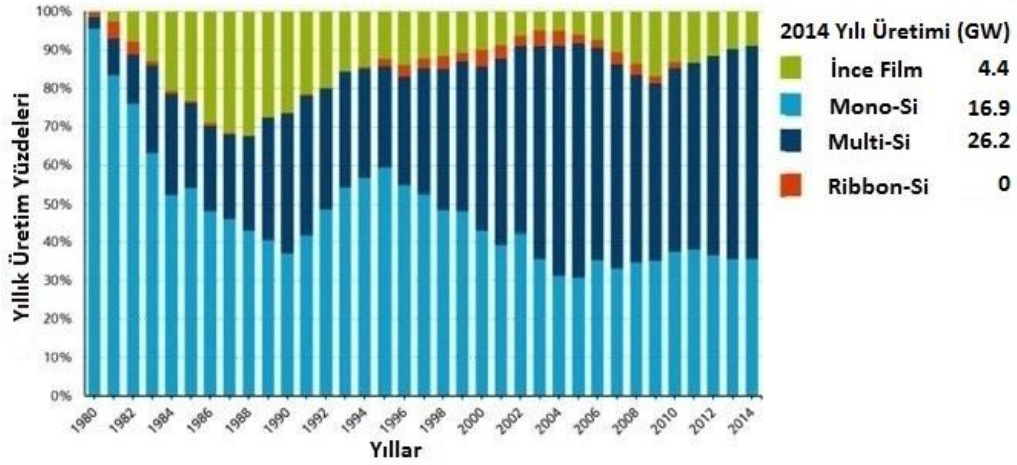
PV pazarının 2015 yılı sonrasında da yine hızlı bir şekilde büyüyeceği beklenmektedir. PV sektöründe öncü gelişmiş ülkelerin yanı sıra gelişen ülkelerde ki öngörülen pazar büyümesinin gerçekleşmesi durumunda, 2019 yılı itibariyle öngörülen küresel büyümenin 396 GW (düşük senaryo) ile 540 GW (yüksek senaryo) arasında, 2020 yılında ise yaklaşık 600 GW olacağı Avrupa Fotovoltaik Endüstrisi Derneği (EPIA) tarafından yayınlanan raporda belirtilmiştir [26].

Küresel PV pazarının hızlı bir şekilde büyümesi ile birlikte güneş pillerinin üretim maliyeti ve birim Watt başına düşen ortalama ücretlerinde son otuz yılda büyük ölçüde düşüşler yaşanmıştır. Örneğin, 1977 yılında kristal silikon (c-Si) güneş pilleri için watt başına düşen ortalama maliyet \$77 iken, Haziran 2014 yılında ortalama spot fiyatları watt başına \$0.36'a kadar gerilemiştir. Bu rakam aynı zamanda maliyetlerin 40 yıl öncesine oranla 200 kez daha düşük olduğunu sergilemektedir. Söz konusu yılda ince film güneş pilleri ve c-Si güneş panelleri için ise watt başına maliyet \$60 idi. 2015 yılında ise, modül ve pil maliyetleri daha da gerileyerek Şekil 2.3'de görüleceği üzere c-si güneş pilleri için birim watt başına maliyeti \$0.30'a kadar düşmüştür [28].



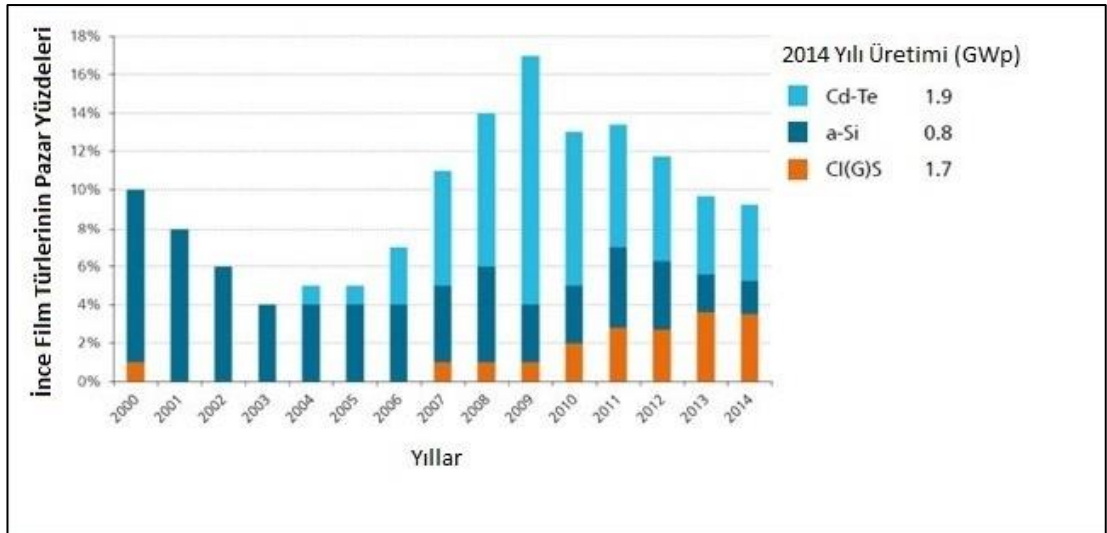
Şekil 2.3. 1977-2015 yılları arasında c-Si güneş pilinin birim watt başına maliyetindeki düşüş grafiği [27].

Geçmişten günümüze geleneksel c-Si teknolojisinin maliyetindeki düşüş ile birlikte yıllık küresel güneş pili üretimindeki payı 1980- 2009 yılları arasında dalgalı olarak seyretmiştir. Ancak, özellikle 2009 yılında baş gösteren polisilikon hammadde temin sıkıntısından sonra, ince film güneş pili üreticileri ciddi baskıya maruz kalmasından ötürü, ince film yerine tekrar c-Si'un üretimi artırmıştır. Şekil 2.4 1990 ve 2014 yılları arasındaki tekli kristal silikon (mono-Si), çoklu kristal silikon (multi-Si veya poli-Si) ve Ribbon silikon (Ribbon-Si) dâhil olmak üzere küresel yıllık c-Si ve ince film güneş pili üretim miktarlarını göstermektedir [29].



Şekil 2.4. 1990 ve 2014 yılları arasındaki küresel yıllık c-Si ve ince film güneş pili üretim miktarları şematik gösterimi [29].

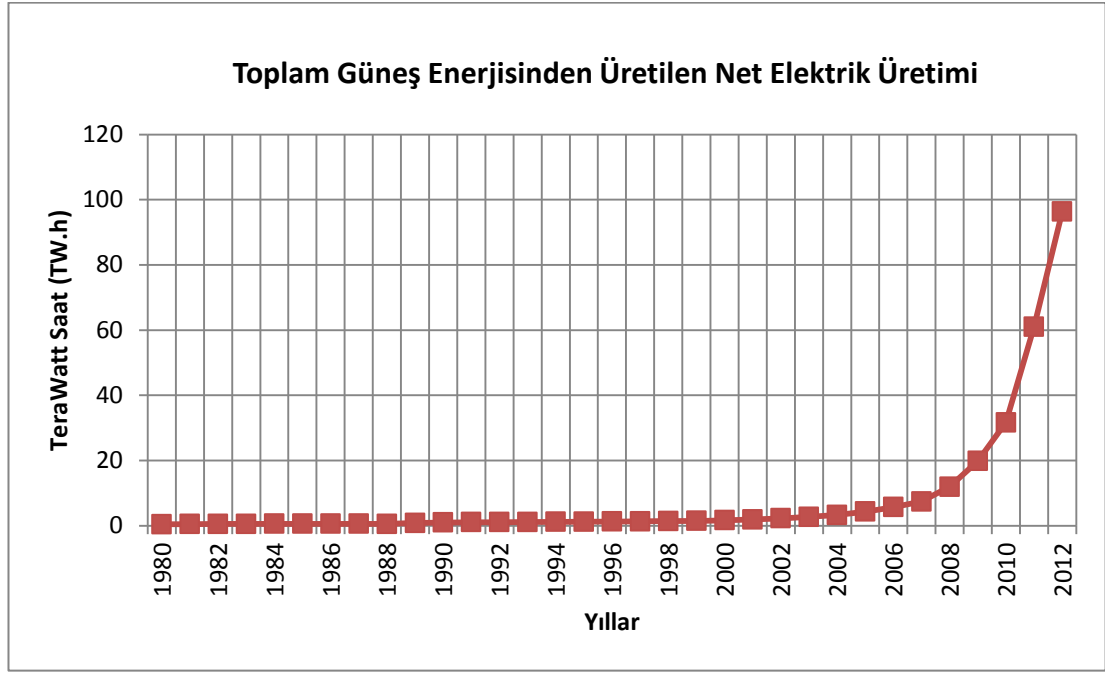
Amorf ince film silisyum (a-Si), kadmiyum tellür (Cd-Te) ve bakır indiyum galyum diselenür (CIGS) gibi film teknolojilerini içinde barındıran ince film güneş pillerinin 2000-2014 yılları arasında kendi içerisindeki küresel pazar payı ise Şekil 2.5'te verilmiştir. Buna göre, 2007 yılından itibaren ince film güneş pili teknolojisinde en çok kullanılan güneş pili Cd-Te olmuştur.



Şekil 2.5. İnce film güneş pillerinin küresel pazar payları [29].

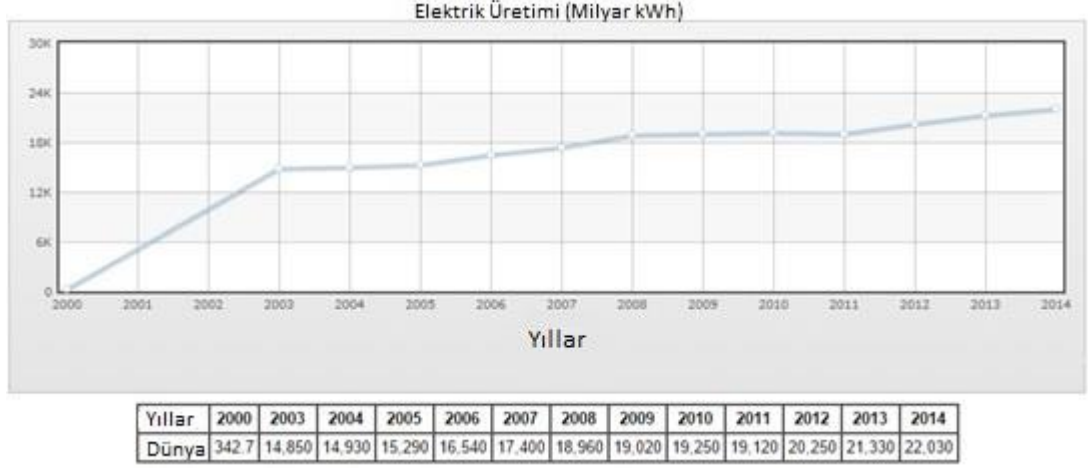
Günümüzde çok sayıda güneş enerjisi teknolojisi bulunması ve PV sektöründe küresel pazar payının son otuz yılda üstel olarak artmasına rağmen, dünya genelinde güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretimi, bu kaynağın potansiyeli ile

karşılaştırıldığında çok küçük kalmaktadır. Örneğin, 1980 yılında dünya genelinde güneş enerjisinden üretilen net elektrik miktarı toplam 0,47 Milyar Kilowatt saat bir başka deyişle 0,47 TeraWatt saat (TW·h) olurken, 1990 ve 2000 yıllarında bu değer sırasıyla 1 TW·h ve 1,68 TW·h değerlerine ulaşmıştır. 2000 yılından sonra ise üretilen net elektrik miktarı Şekil 2.6'da görüleceği üzere ciddi bir artış göstererek 2013 ve 2014 yıllarında sırasıyla 134,5 TW·h ve 185,9 TW.h seviyelerine gelmiştir [30].



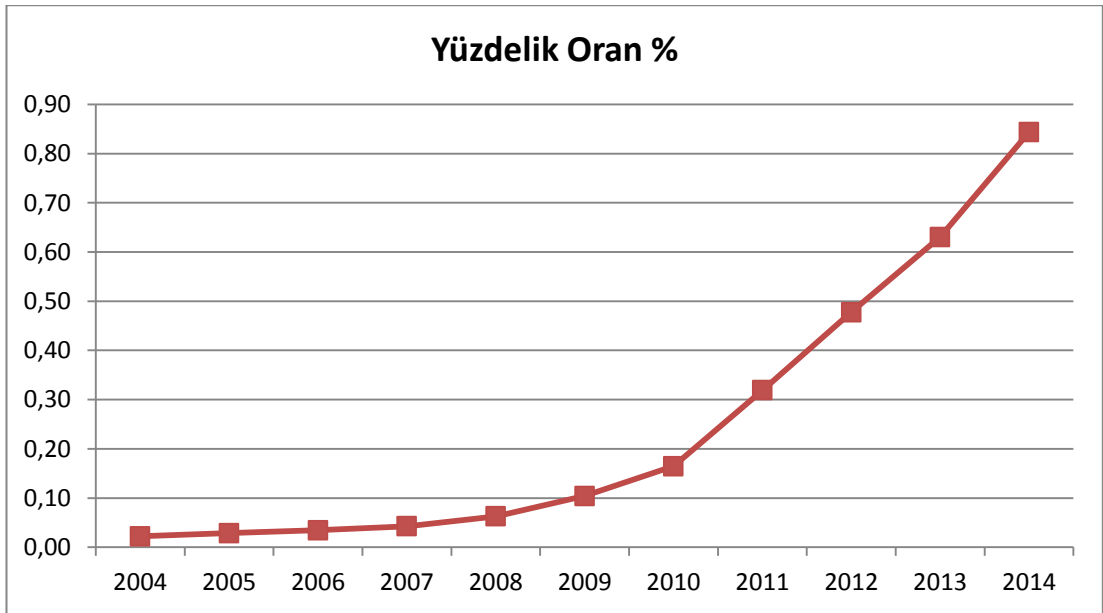
Şekil 2.6. 1980-2013 Yılları arası dünya geneli güneş enerjisinden üretilen net elektrik miktarı (TW.h).

Güneş enerjisinden üretilen elektrik miktarının, elektrik üretiminde kullanılan diğer tüm kaynaklardan (petrol, kömür, doğalgaz, nükleer vs) üretilen miktara oranı, küresel enerji ihtiyacının karşılanmasında güneşten ne kadar istifade ettiğimizi göstermesi açısından önemlidir. Şekil 2.7'de verildiği üzere, 2000 yılından itibaren üretilen küresel net elektrik üretimi 342,7 TW.h olurken, bu değer 2004 yılında 14930 TW.h, 2014 yılında ise 22030 TW.h seviyelerine çıkmıştır [31].



Şekil 2.7. Tüm kaynaklardan üretilen küresel elektrik üretim miktarı (TW.h) [31].

Aynı yıllar arasında, gerek güneş pilleri gerek yoğunlaştırılmış termal güneş enerjisi sitemleri ile güneşten üretilen enerjinin küresel enerji talebini karşılama oranı Şekil 2.6 ve 2.7’de ki veriler ışığında Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Buna göre, 2004-2014 yılları arasında, güneşin küresel enerji üretimine katkısı her geçen yıl artmış ancak yine de 2014 yılı itibariyle bu oran %0,85 seviyelerinde kalmıştır.



Şekil 2.8. Güneş enerjisinin küresel enerji üretimine katkısı (Yüzdelik oran %).

## **2.2. GÜNEŞ PİLİ ÇEŞİTLERİ**

### **2.2.1. Kristal Güneş Pilleri**

Geçmişten günümüze küresel PV pazarında yaklaşık %90'lık payı ile en çok üretilen birinci nesil güneş pilleridir. Kristal güneş pillerinde en önemli materyal Silisyum elementidir. Si, oksijenden sonra doğada en çok bulunan ikinci elementtir. Fakat doğada saf halde bulunmaz, oksijenle bileşik şekilde kuvars ya da kum formunda bulunur. Bu nedenle, PV sektöründe kullanılan silikonun birçok formları benzer olmasına karşın; ana fark, silikonun saflığıdır. Mono-Si, Poly-Si ve Ribbon-Si olmak üzere temelde 3 çeşit kristal güneş pili vardır, ancak Ribbon-Si günümüzde artık kullanılmamaktadır.

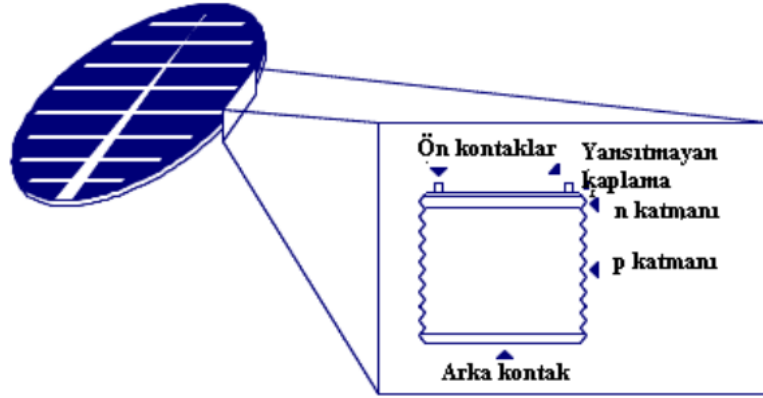
#### **2.2.1.1. Monokristal Silikon Güneş Pilleri (Mono-Si)**

İlk ticari güneş pilleridir. Kristal çekme yöntemi ile büyütülen tek kristal yapıli silisyum kullanılır. Pazarın oldukça büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Ancak üretim maliyetinin yüksek olması diğer pillere yönelimi arttırmıştır. Verimi oldukça yüksektir.

Çekirdekler, çok düşük hızla ergimiş silisyum banyosundan çekilirler. Böylece tek kristalli tabakanın büyümesi sağlanır. Yaklaşık olarak 0,5 mm kalınlığında üretilirler. Renkleri koyu mavi olup yaklaşık olarak ağırlığı 10 gr.dan azdır.

Pilin üst yüzeyine, pil tarafından üretilen akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olacak şekilde ön kontaklar yerleştirilmiştir. Pilin ön yüzeyi, ışığı daha fazla yakalayabilmek için çeşitli (piramit, konik) şekillerdedir. Kaplamanın altında p-n eklemi bulunmaktadır. Şekil 2.9'da mono kristal bir güneş pili, Şekil 2.10'da ise mono kristal bir güneş paneli şematik olarak gösterilmiştir.





Şekil 2.9. Mono-Si güneş pili şematik gösterimi [32].



Şekil 2.10. Mono-Si güneş paneli şematik gösterimi [33].

#### 2.2.1.2. Polikristal Güneş Pilleri (Poly-Si)

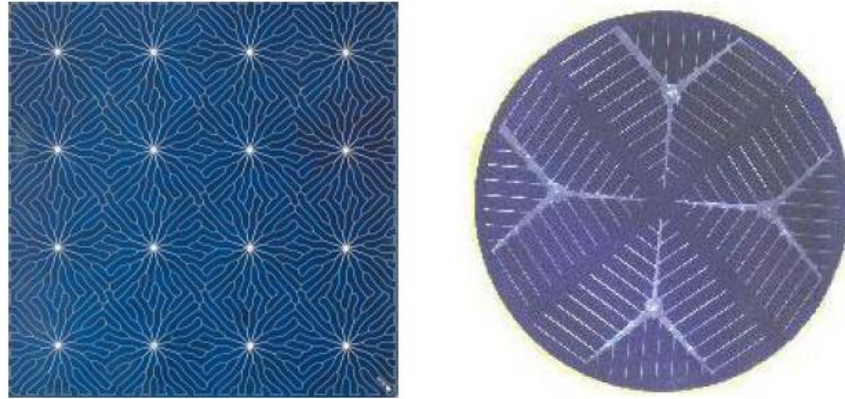
Polikristal silikon, aüssi polisilikon (p-Si) ve multi-kristal silikon (mc-Si) olarak bilinen tüm güneş panelleri, ilk olarak 1981 yılında pazara sunulmuştur. Mono kristal güneş panellerinin aksine, polikristal güneş panelleri yapmak Czochralski işlemi (kristal büyütme) gerektirmez.

Elektriksel, optik ve yapısal özellikleri mono kristal pillerle aynıdır. Damarların büyüklükleri kristallerin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasında süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcıların aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynamaktadır. Çok kristalli malzemenin elektriksel özelliklerinin, küçülen damar büyüklüğü ile orantılı bozulması; elde edilebilecek verimliliğin mono kristalle

karşılaştırıldığında küçük olmasına neden olur. Ancak çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha kolaydır. Maliyeti oldukça düşüktür.

Üretimde en çok kullanılan yöntem dökme yöntemidir. Çok kristalli silisyumda başlangıç malzemesi, tek kristalli silisyumda olduğu gibi hazırlanır. İstenilen saflık derecesi de benzerdir. Erimiş olan yarı iletken kalitesindeki silisyum, kalıplara dökülerek soğumaya bırakılır. Daha sonra elde edilen bloklar kare şeklinde kesilir. Bu teknoloji ile üretilen malzemelerden elde edilen güneş pillerinin maliyeti düşük, verimi ise azdır [34].

Güneş pillerinin üst yüzeyindeki akım toplayıcı kanallar, tek kristal silisyum güneş pillerinde olduğu gibi ızgara şeklinde olabileceği gibi ön yüzeyin daha az gölgelenmesini sağlamak amacıyla Şekil 2.11’ de gösterildiği gibi farklı yapılarda da tasarlanabilirler.



Şekil 2.11. Poly-Si güneş pilinde farklı bir toplayıcı kanal tasarımı [35].

Düzgün bir yüzeye sahip Poly-Si güneş paneli ise Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Poly-Si güneş paneli [36].

### 2.2.2. İnce Film Güneş Pilleri

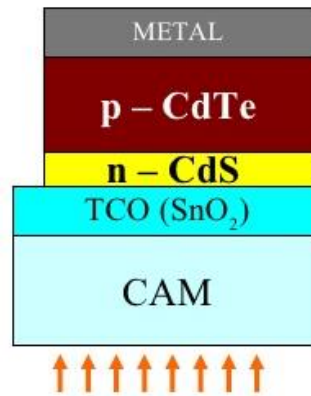
Birinci nesil güneş pili teknolojisi deyimi genellikle kristal silisyum güneş pilleri için kullanılmaktadır. İkinci nesil güneş pilleri denildiğinde ise, amorf silisyum (a-Si), Kadmiyum Tellür (CdTe), Bakır indiyum galyum disellenür (CIGS) ve ince film kristal silisyum gibi ince film güneş pilleri ifade edilmektedir. İnce film güneş pillerinin üretimine başlanmasındaki en büyük sebep, daha düşük üretim maliyetleriydi. Silisyum güneş pili panelleri 100 cm<sup>2</sup> alana sahip bağımsız güneş pillerinden meydana gelirken, ince film güneş pilleri ise çok daha geniş alanlarda üretilebilmekte, böylelikle büyük ölçekli üretimler için maliyet düşürülebilmektedir.

Ayrıca, direk bant aralıklı yarı iletken malzemelerde olduğu gibi, ince film yarı iletken malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. Bu nedenle de 1 µm kalınlığında bir yarı iletken filmi yeterli olmaktadır. Silisyum güneş pillerinde ise bununun 100–1000 katı daha kalın bir filme ihtiyaç vardır. Bu açıdan, pahalı yarıiletken malzeme kullanımı azaltılmış olmaktadır. Ancak söz konusu avantajlarına rağmen, bu piller PV pazarının sadece %9'unu oluştururlar ve %8-%14 arasında verimlilik sunmaktadırlar. CdTe ve CIGS en çok üretilen ince film güneş pillerindedir [37].

### 2.2.2.1. Kadmiyum Tellür Güneş Pili (CdTe)

İnce film güneş pili yapısında soğurucu katman olarak sıkça kullanılan CdTe, sahip olduğu yüksek soğurum katsayısı nedeniyle üzerine düşen güneş ışığının büyük bir bölümünü birkaç mikro metre kalınlığı içinde soğurabilmektedir. Üstelik yaklaşık 1,5 eV düzeyinde olan direkt geçişli yasak enerji bant aralığı güneş spektrumunun etkin biçimde soğurulabilmesi için çok uygun bir değerdir. Bu nedenle, daha az miktarda materyal kullanımına izin veren düşük maliyetli üretim sistemleri kullanılarak CdTe/CdS güneş pillerinin üretilmesi ve çevrim verimlilik değerinin öngörülen teorik değere doğru artırılmasına yönelik araştırma geliştirme çalışmaları hızlı bir şekilde devam etmektedir.

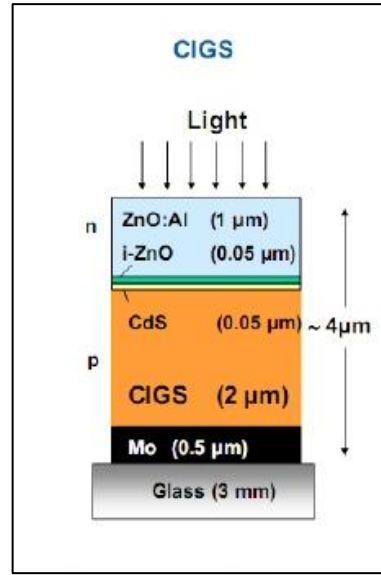
Genel olarak, CdTe tabanlı bir güneş pili yapısında; en üstte yansımaları azaltılmış bir cam, onun altında üst elektriksel omik kontakları sağlayan şeffaf iletken oksit tabaka (TCO) yer alır. Bu katmanların devamında ince bir tabaka halinde pencere materyali olan ve eklem n tarafını oluşturan kadmiyum sülfür (CdS) tabakası ve p tarafını oluşturan CdTe soğurucu tabaka ile en alttaki arka omik kontakları oluşturan metal tabaka bulunur. Bu yapıda pencere materyali olan CdS göreceli olarak yüksek enerjili fotonların yük taşıyıcılarına dönüştürülmesini sağlamanın yanı sıra, geniş dalga boyu aralığı için geçirgen davranır. Esas foton soğurumu CdTe soğurucu tabakada gerçekleşir. Her iki tabaka, meydana getirilen serbest yük taşıyıcılarının dış bir devreye aktarılmasını sağlayan p – n eklem yapısını oluşturur. Şekil 2.13 CdTe güneş pili yapısını göstermektedir.



Şekil 2.13. CdTe İnce film güneş pili şematik yapısı [38].

### 2.2.2.2. Bakır İndiyum Galyum Diselenür Güneş Pili (CIGS)

Periyodik tablonun birinci, üçüncü ve altıncı gruptan elementlerin üçüncünün ya da daha fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan bu bileşik yarı iletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak enerji aralıkları güneşin spektrumunu ile ideal bir şekilde uyuşacak biçimde ayarlanabilir. Bakır indiyum ve Selenyum (Se)'den yapılan üçlü bileşik yarı iletkenle başlayan bu grup (CIS) güneş pilleri olarak anılır. CdTe güneş pillerine en yakın rakip olarak görülmektedir. Bugün CIS ince film güneş pillerinin çoğunluğu, içerisinde Galyum (Ga) elementinin katılması ile daha yüksek verimlilikle elde edilir. Günümüz CIGS ince film güneş pillerinin laboratuvar şartlarında verimi yeni kırılan dünya rekoru ile birlikte %20,8'e, modül verimi ise %14,6'a çıkmıştır. Artmakta olan bir pazar payı vardır ancak, pahalı üretim süreci ile birlikte geniş alan gereksinimi bulunmaktadır. Şekil 2.14 CIGS ince film güneş pili yapısını göstermektedir.



Şekil 2.14. CIGS ince film güneş pili yapısı [38].

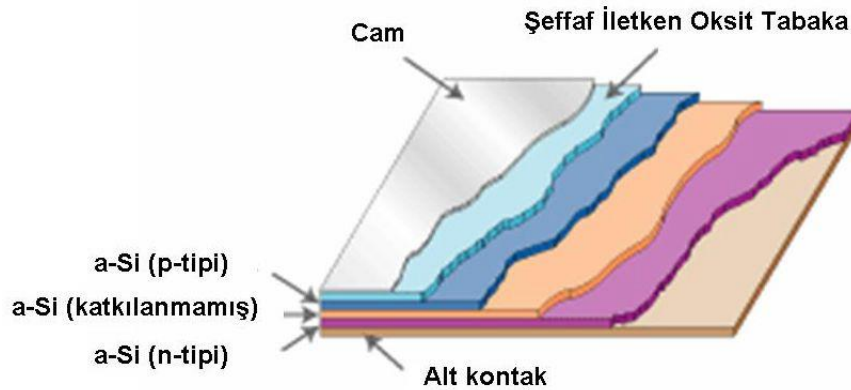
### 2.2.2.3. Amorf Silikon Güneş Pilleri (a-Si)

a-Si güneş pili, c-Si gibi kristal yapı özelliği göstermez. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan pilin bir başka önemli uygulama sahası, görünür bölgedeki soğurma katsayısı yüksek olmasından dolayı, 250 °C

dolayındaki sıcaklıklarda geniş yüzeylere düzgün bir şekilde kaplanabilmesidir. Örneğin, binalara entegre yarısaydam cam yüzeyi ve bina dış koruyucusu olabilir, bu sayede enerji üretebilirler. Yarı iletken malzeme içerisindeki yapı taşlarının gelişigüzel dizilişi ile birlikte yarı iletken içerisine %5-10 oranında hidrojen katılarak (a-Si:H) pilin elektriksel özellikleri pv çevrime uygun bir seviyede tutulabilirler.

a-Si yarı iletken kullanılarak oluşturulan güneş pillerinin yapısı, yaklaşık 300 µm kalınlığında oluşturulan c-Si güneş pillerinde olduğu gibi p-n eklemi şeklinde değildir. a-Si güneş pillerinde 0,5 µm kalınlığında bir katkılanmamış (i-intrinsic) tabakanın altı ve üstü 0,03 µm kalınlığında p-tipi ve n-tipi katkılanarak p-i-n eklem yapısı oluşturulur (Şekil 2.15). a-Si’de fotovoltajik etki kristal silisyumdaki ile benzerdir fakat a-Si’de yasak enerji aralığı biraz daha geniştir.

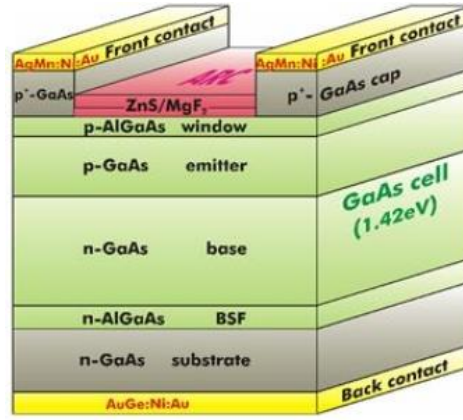
Ekonomik olarak değerlendirildiğinde c-Si’ ye göre, a-Si güneş pilleri daha ucuza üretilebilirler. Aynı zamanda soğurma katsayısı daha yüksek olduğu için çok daha ince tabakalar kullanılır. Özellikle mono-Si üretiminde 800-900 °C sıcaklıklara ihtiyaç duyulmasına rağmen, a-Si 250 °C gibi nispeten daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebildiği için daha az enerji kullanılmaktadır. Sürekli üretime uygun olduğu için çelik, cam ve plastik içeren çeşitli sert ve esnek zeminler üzerine döküm tekniği ile üretilebilir. Diğer taraftan laboratuvarında küçük alanlı güneş pillerinde %12'lere kadar ulaşabilen verimler elde edilmiş olmasına rağmen, ticari modüllerde %6 ile %8 arasında elde edilen verim değerleri mono-Si ve poly-Si güneş pillerine göre daha düşük kalmaktadır.



Şekil 2.15. a-Si güneş pili yapısı [35].

### 2.2.3. III-V Yarıiletken Güneş Pilleri

Galyum Arsenik (GaAs), Galyum Alüminyum Arsenit (GaAlAs), Galyum İndiyum Arsenik Fosfat (GaInAsP), İndiyum Arsenik (InAs), İndiyum Antimon (InSb) ve İndiyum Fosfor (InP) gibi yarıiletkenlerin oluşturduğu bu pil çeşidi, optimuma yakın bant aralığına sahip olmalarından dolayı, güneş pili yapımında caziptirler. Aşırı derecede pahalı olmalarına karşın, performansın maliyetten daha önemli olduğu özel amaçlar için kullanılmaktadır. Örneğin, GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır. Periyodik tablonun III. sütununda bulunan Galyum (Ga) ve V. sütununda bulunan Arsenik (As) elementlerinin bileşiminden oluşan bu grup güneş pili, polikristal bir yapıya sahiptir ve kristal yapıları Çinko Sülfür (ZnS) yapıdadır. Günümüz laboratuvar şartlarında bu pilden %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcı) oranlarında verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemler GaAs pillerde ise verim %30'a ulaşmıştır. Şekil 2.16 GaAs güneş pili yapısını şematik olarak göstermektedir.

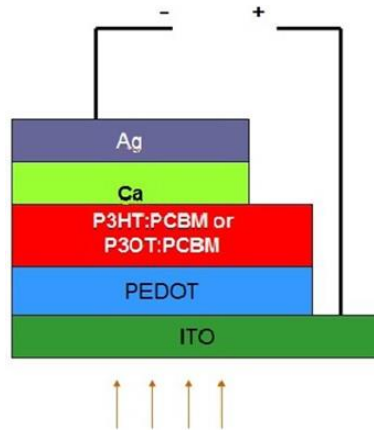


Şekil 2.16. GaAs güneş pili yapısı [39].

### 2.2.4. Organik Güneş Pilleri

Güneşten gelen ışığı aktif polimer tabakası ile absorbe eden ve doğrudan elektrik enerjisine çeviren bir güneş pili çeşididir. Organik molekül içeren yarıiletkenler (düşük molekül ağırlığına sahip konjuge moleküller ve polimerler) ile yapılmasından ötürü organik güneş pilleri adı verilir. Temelde farklı çalışma fonksiyonuna sahip iki metal elektrot arasına, organik katmanların sandviç şeklinde yerleştirilmesiyle

oluşturulur. Organik tabanlı güneş pillerinde anot olarak kullanılacak malzemenin hem elektriksel olarak iletken, hem de optik olarak özellikle görünür bölgedeki ışık için geçirgen olması gerekir. Bu nedenle organik tabanlı güneş pillerinde İndiyum Kalay Oksit (ITO ) en çok kullanılan anot malzemesidir. Katot malzemesi olarak da, Şekil 2.17’de görüldüğü üzere, Kalsiyum (Ca) ve Gümüş (Ag) gibi düşük bant aralığına sahip malzemeler kullanılmaktadır.



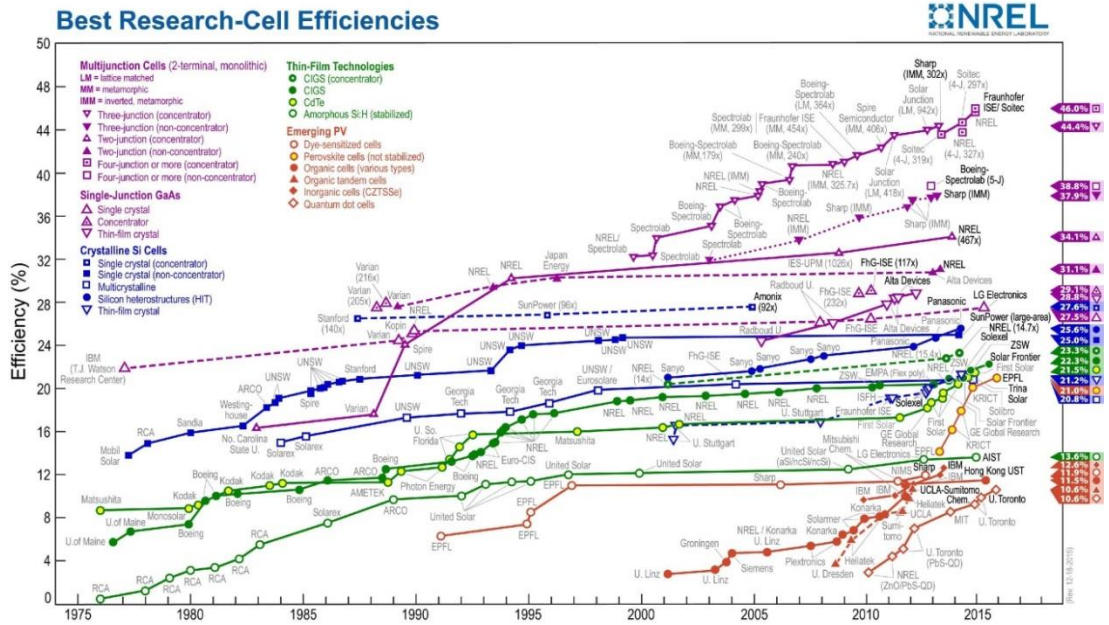
Şekil 2.17. Organik güneş pilinin şematik gösterimi [40].

Organik güneş pili yapımında kullanılan malzemelerin ucuz olması, kolay işlenebilirliği ve görünebilir bölgeye kadar uzanabilen absorpsiyon aralığının olması sebepleri ile bu malzemelerin güneş pillerinde verimli bir şekilde kullanılması umut vaat etmektedir. Organik malzemeler istendiğinde düşük sıcaklıklarda bile birkaç nanometre kalınlığında çeşitli yöntemler ile {sıyırıcı mala (doctor blade) döndürerek kaplama (spin coating), silindir döndürerek boyama (roll to roll printing) ve elektrokimyasal yöntem} kaplanabilmektedir. Bu yöntemler bu malzemenin gelecekte büyük alanlara hızlı ve seri üretim yapılabilmesini sağlayacaktır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda işlenebilme özelliği, bu malzemenin esnek plastik altlıklar üzerine yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla büyük alanlarda kullanıldığı zamanda çok daha hafif olacaktır.

Organik güneş pilleri; boya duyarlı, moleküler ve polimer güneş pilleri olmak üzere sınıflandırılmıştır ve söz konusu pilin veriminde son olarak %12’ye ulaşılmıştır.



Gerek organik, gerek diğer tüm güneş pili sektörüne ilişkin yeni teknolojilerin eklenmesi ve mevcut güneş pillerinin veriminin artırılmasına yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir. Bununla birlikte, pek çok kuruluş güneş pillerinin geçmişten günümüze verim değerleri ve performanslarına ilişkin raporlar yayınlamaktadır. Bunlardan bir tanesi de Şekil 2.18’de gösterildiği gibi, Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, NREL tarafından yayınlanan mevcut güneş pillerinin yıllara göre verim değişimi ve güncel verim değerlerini içeren rapordur Teknolojik gelişmelere bağlı olarak bu değerlerin artacağı beklenmektedir [16].



Şekil 2.18. Geçmişten günümüze güneş pillerinin verim değişimi [16].

## BÖLÜM 3

### FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNDE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

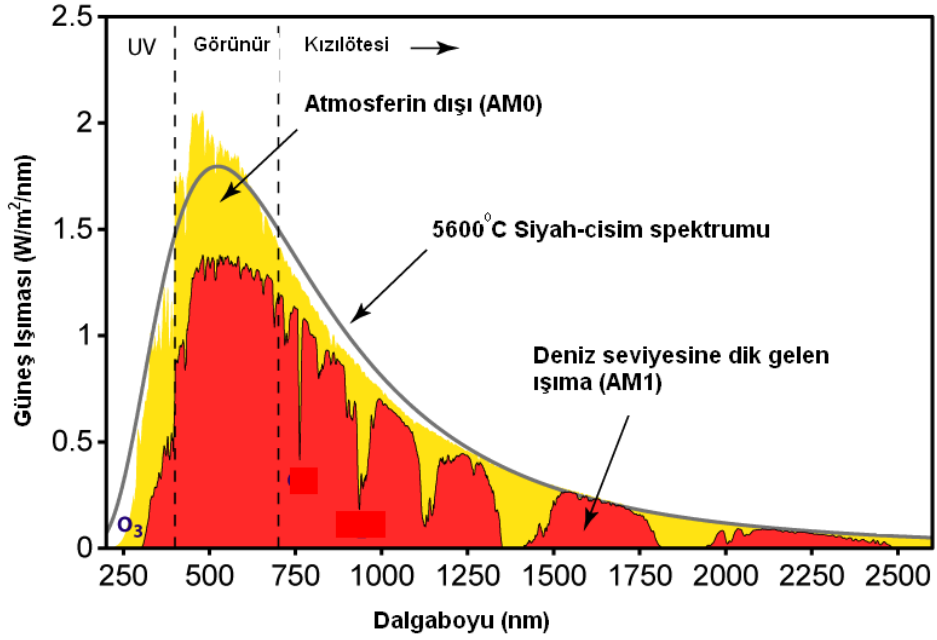
#### 3.1. GÜNEŞ SPEKTRUMU

Güneşe enerjisini veren esas etken, Hidrojenden (H) Helyumun (He) üretildiği nükleer füzyon işlemidir. Bu süreç, güneş çekirdeğinin ve güneş yüzeyinin sırasıyla  $1.57 \times 10^7$  K ve 5578 K olmasını sağlar. Böylesine yüksek sıcaklıklarda güneşten gelen ışınım, kara cisim radyasyonu olarak ele alınabilir. Dünya yüzeyine erişen güneş spektrumu ve karşılık gelen güneş yoğunluğu ile uzaya ulaşan spektrum birbirinden farklıdır. Şöyle ki, dünya atmosferi dışında güneşten gelen ışınım miktarı sabittir ve  $1365 \text{ W/m}^2$  değerindedir. Dünyanın atmosferi güneş spektrumunu soğurmalarla etkiler ve farklı dalga boyları için ışınım değerlerinde azalmalar olur. Atmosferden geçtikten sonra güneş ışınımının maksimum değeri ise yaklaşık  $1000 \text{ W/m}^2$  olur. Yeryüzü için ortalama bir güneş ışınımı spektrumu Şekil 3.1’de verilmiştir.

Güneş spektrumu ve ışınım değerleri uygulamada hava kütlesi (AirMass, AM) ölçeklendirmesi ile verilir. Buna göre, hava kütlesi, güneş tepe noktasındayken ışınların kat edeceği en kısa yola karşılık, atmosferde kat ettiği yol uzunluğunun belirlenmesinde yardımcı olur. Zenit açısında (z) dünya yüzeyine dike yakın olarak inen güneş ışınımı için, hava kütlesi sabiti şu şekilde hesaplanır;

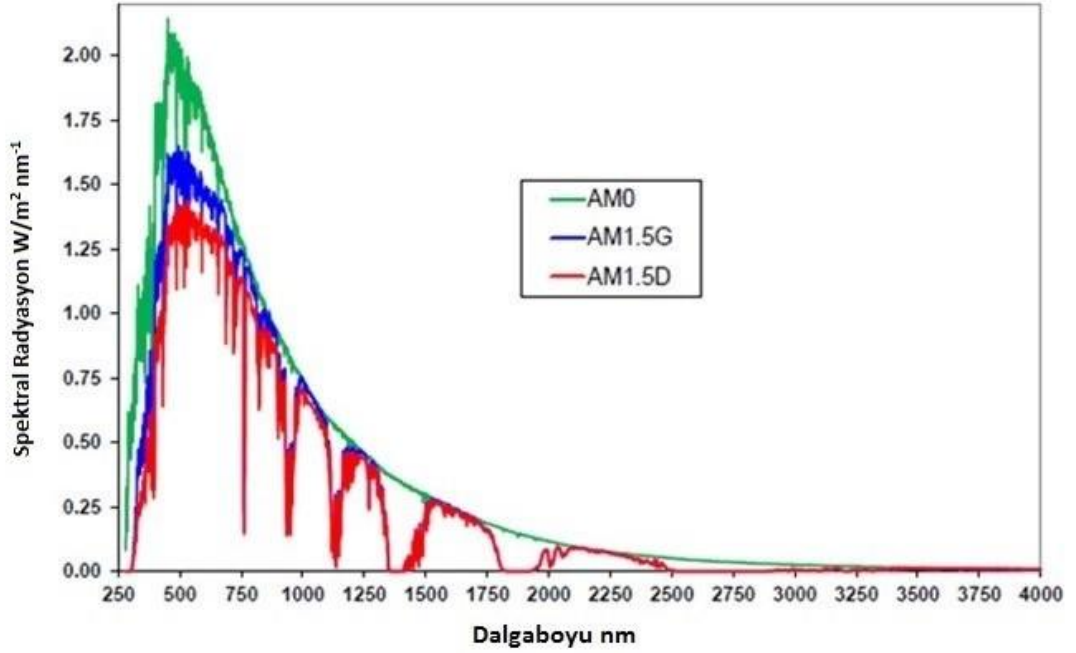
$$AM = \frac{1}{\cos(z)} \quad (3.1)$$

Uzay, yeryüzü ve yoğun güneş ışığı için standart hava kütlesi, sırasıyla AM0, AM1.5G (Global), AM 1.5D (Direkt) olarak belirtilir ki buna ilişkin güneş spektrumları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



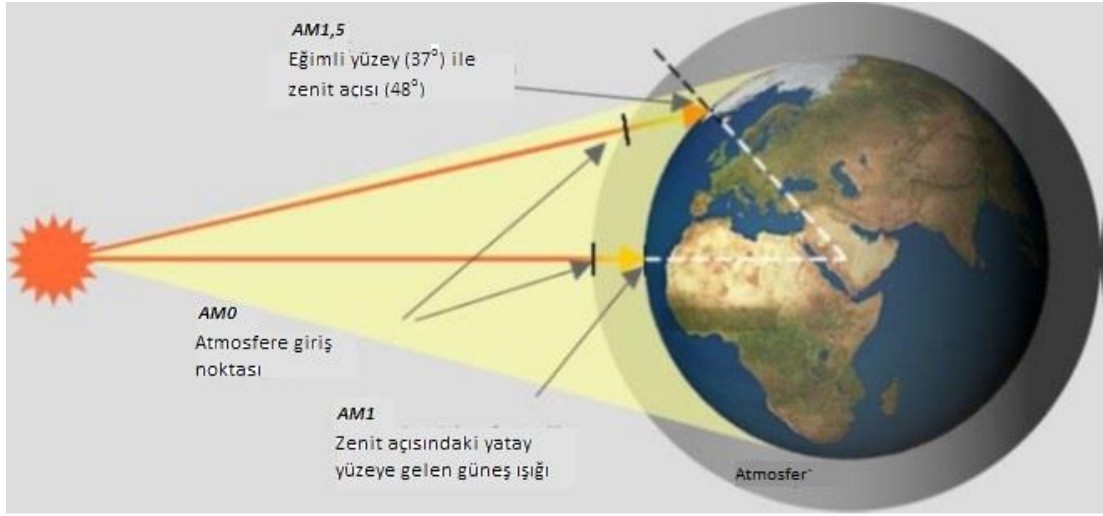
Şekil 3.1. Atmosfer dışında ve yeryüzünde ortalama güneş enerjisi spektrumu [41].

AM0, AM 1.5G ve AM 1.5D hava kütlelerine karşılık gelen ışınım yoğunlukları sırasıyla yaklaşık,  $1365 \text{ W/m}^2$ ,  $1003 \text{ W/m}^2$  ve  $887 \text{ W/m}^2$ 'dir.



Şekil 3.2. AM0, AM1.5G (Global), AM 1.5D (Direkt) hava kütleleri için güneş spektrumu [42].

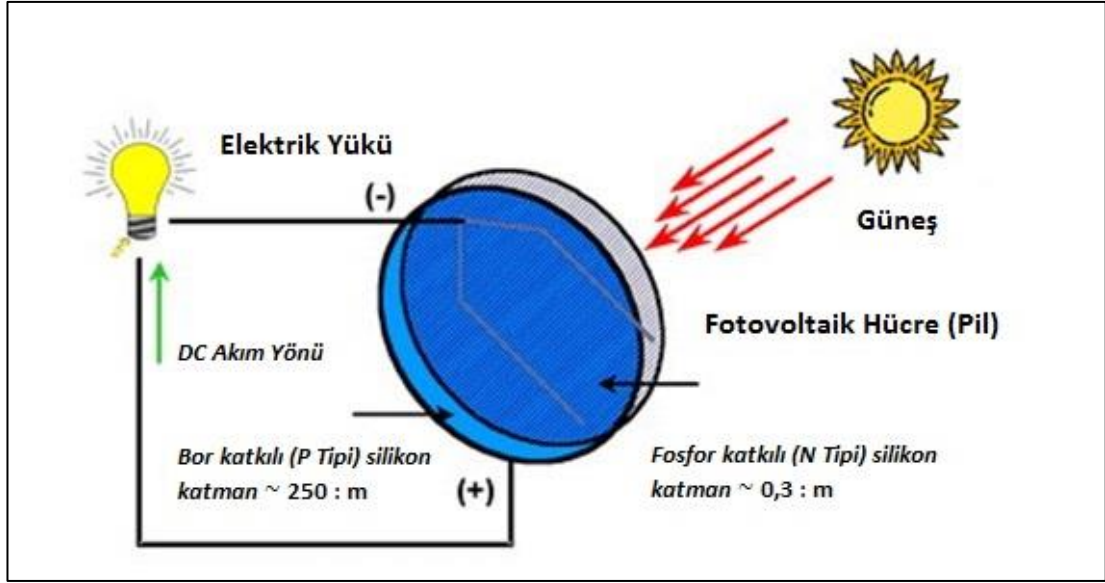
Güneş paneli ya da modüllerinin performansı standart test koşulları altında (25 C sıcaklık, 1.000 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu ve 1,5 AM hava kütlesi ortamında) test edilir ve bu ortama göre panellerin verimleri ve gösterdikleri etkiler hesaplanır. 1,5 AM hava kütlesi için güneş ışınlarının eğik yüzeye geliş açısı 37° ve zenit açısı 48° olarak kabul edilir. Şekil 3.3 farklı hava kütlesindeki güneş spektrumları için zenit açısını göstermektedir.



Şekil 3.3. Farklı hava kütlesi (AM) pozisyonları ve zenit açısının gösterimi [43].

### 3.2. GÜNEŞ PİLLERİNİN YAPISI VE ÇALIŞMA MEKANİZMASI

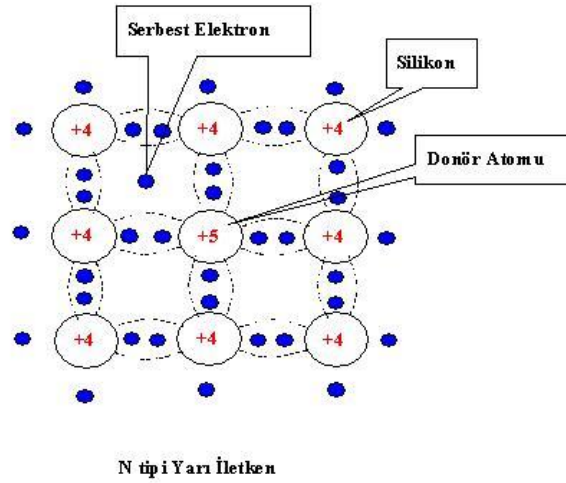
Güneş pillerinin yapıları basitçe bir p ve n eklemden oluşan yarı iletken diyotlara benzer. Fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışan güneş pillerinde, güneş ışığındaki fotonlar, elektronları yarı iletken metalik bir yonga plakasının bir katmanından bir diğer katmanına hareket ettirerek bir elektrik akımı (doğru akım) oluşturur. Böylece, güneş pilleri Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmüştür.



Şekil 3.4. Güneş pilinde üretilen akımın şematik olarak gösterimi [44].

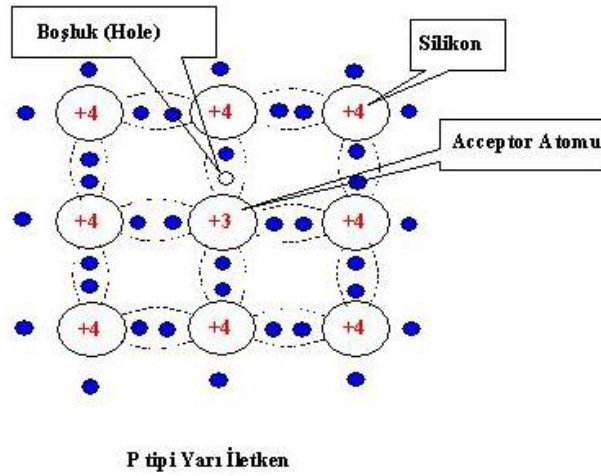
Birçok madde yarı iletken özellik göstermesine rağmen, güneş pili yapımı için en elverişli olanlar, güneş spektrumunun etkin biçimde soğurulabilmesi için uygun bant aralığına sahip Si, GaAs, CdTe gibi bileşiklerdir. Bununla birlikte, yarı iletken malzemelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkıları gerekir. Katkılanma, saf yarı iletken eriyik içerisinde istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır.

En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum' un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir ve fazladan bir elektron verdiği için de bu atomlara verici (Dönör) atom denmektedir. Kristal içindeki fazla elektronlar kristale negatif özellik kazandırdığı için N Tipi yarı iletken denilmektedir. N Tipi yarı iletkenlerde ki fazla olan elektronlar iletkenliği sağlamaktadır ve bu elektronları kopartmak veya hareket ettirmek için çok küçük enerji yeterli olmaktadır. Şekil 3.5 N Tipi yarı iletken yapısını göstermektedir.



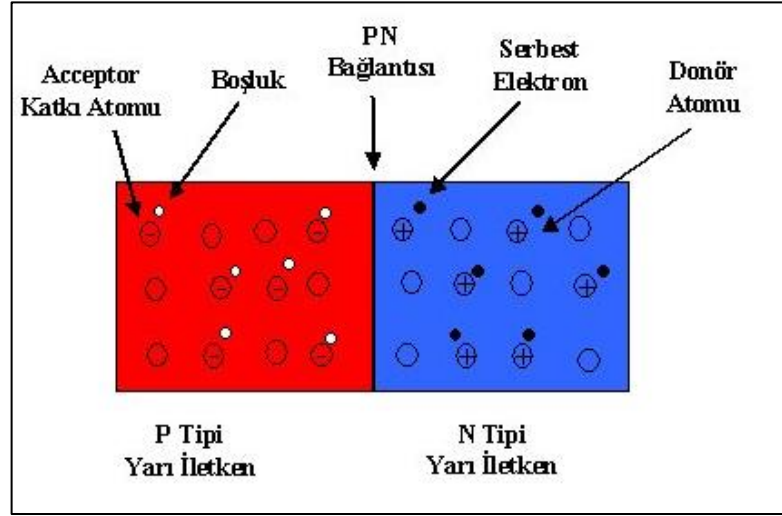
Şekil 3.5. N tipi yarı iletken yapısı şematik gösterimi [45].

P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için, bu atomlara alıcı (acceptor) denmektedir. +3 değerlikli atomların etrafındaki Silisyum atomları ile kovalent bağ oluşturulmalarından ötürü, kristalde bir elektron eksikliği oluşur ve bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir. Kristal yapı içindeki boşluklar pozitif yük taşıdıkları için bu şekildeki kristal yapılara P Tipi yarı iletken denir. P tipi yarı iletkenlerdeki boşluklar dışarıdan elektron alabildiği için iletkenliği boşluklar sağlamaktadır. Şekil 3.6 P tipi yarı iletken yapısını göstermektedir.



Şekil 3.6. P tipi yarı iletken yapısı şematik gösterimi [45].

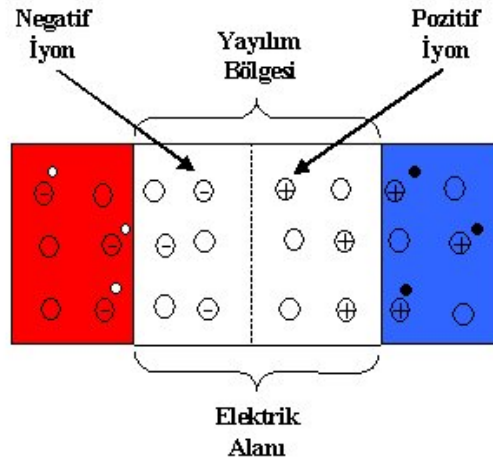
P ya da N tipi ana malzemenin içerisinde gerekli katkı maddelerinin katılması ile yarı iletken eklemler oluşturulur. N tipi yarı iletkende elektronlar, P tipi yarı iletkende ise holler çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve N tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, N tipinde ise pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir.



Şekil 3.7. Nötr durumdaki P ve N tipi yarı iletkenlerin gösterimi [45].

PN eklem oluştuğunda, N tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine geçiş bölgesi ya da yayılım bölgesi denir. Bu bölgede oluşan elektrik alanı ise yapısal elektrik alanı olarak adlandırılır. Şekil 3.8’de yayılım bölgesi ve oluşan elektrik alanı gösterilmiştir.

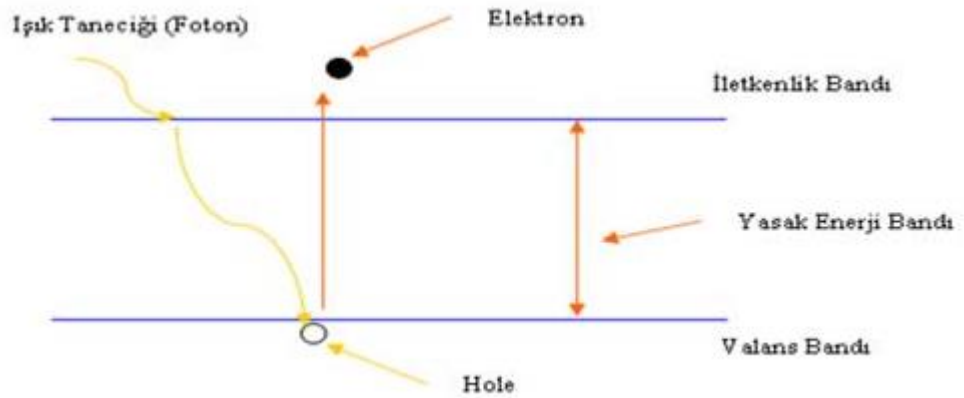




Şekil 3.8. PN eklem geçiş bölgesi ve elektrik alanı [45].

Yarı iletken eklem güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovolttaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur;

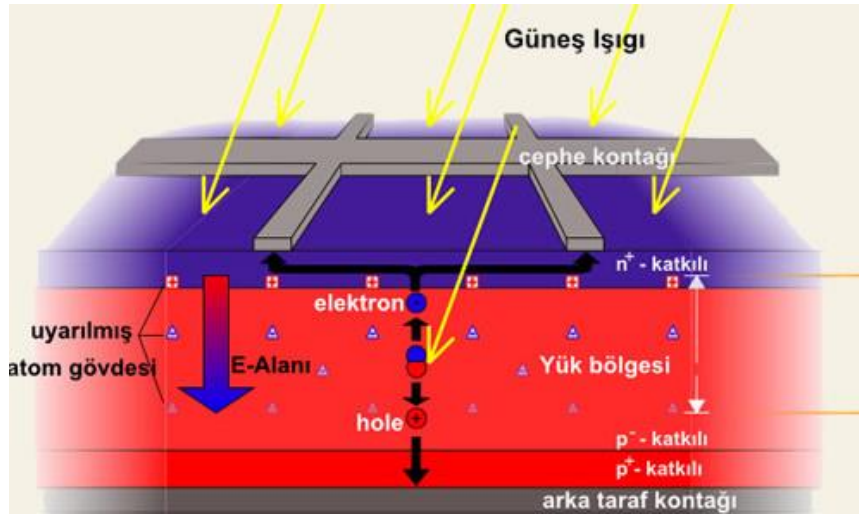
- Elektron-hol çiftlerinin oluşturulması: Bu aşamanın gerçekleştirilebilmesi için, Şekil 3.9'da ki gibi, valans ve iletkenlik bandına sahip bir yarı iletken, yasak enerji band aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarı iletken tarafından soğurulması, ve enerjisini valans bandındaki bir elektrona vererek elektronun iletkenlik bandına çıkması sağlanmalıdır. Böylece, PN eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çifti oluşturulur.



Şekil 3.9. Elektron-boşluk çiftinin meydana gelmesi [46].



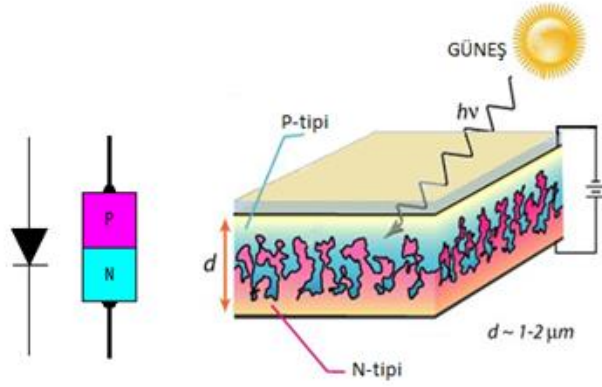
- Oluşan elektron-hol çiftlerinin birbirinden ayrılması: Elektron-hol çiftinin oluşturulması, PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana geldiği zaman bu çiftler buradaki elektriksel alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, Şekil 3.10’da gösterildiği üzere elektronları N bölgesine, holleri de P bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarı iletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alanı olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.



Şekil 3.10. PN eklem bir güneş pilinde elektron-hol çiftlerinin birbirinden ayrılması [47].

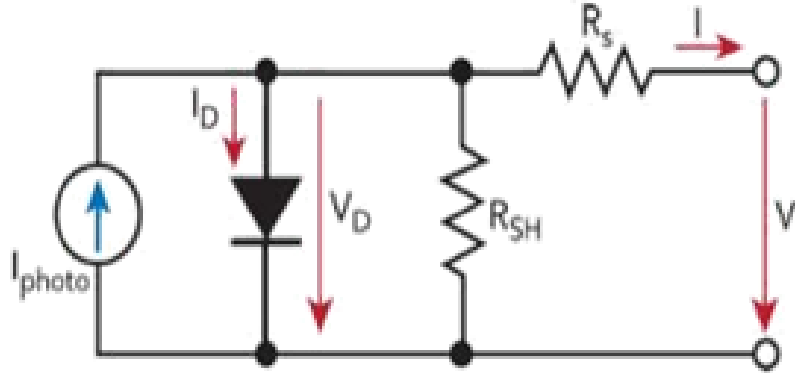
### 3.3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİNİN EŞDEĞER DEVRESİ

Güneş pillerinin yapısının Şekil 3.11’de ki gibi, PN ekleminden oluşan bir diyota benzediği Bölüm 3.2’de dile getirilmiştir.



Şekil 3.11. Güneş pilinin diyota benzerliği [48].

Güneş pili, doğrultucu bir diyota paralel bağlanmış bir akım kaynağı olarak düşünülebilir [49]. Buna göre, güneş pillerinin basitleştirilmiş bir diyotlu eşdeğer devresi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Güneş pillerinin eşdeğer devresi [50].

Burada  $R_s$  ve  $R_{SH}$  güneş pil verimini etkileyen seri ve paralel (şönt) direnç etkilerini göstermektedirler. Paralel direnç etkisini kristal kusurları yaratırken, seri direnç etkisini yarıiletken malzemeye yapılan metal kontaklar, yarıiletken malzeme içindeki tabakaların iç dirençleri ve pilin üst yüzeyindeki metalik parmak kontak dirençleri oluşturur. Şönt direnci pilin açık devre gerilimini ve dolun faktörünü azaltan bir etkendir. Seri direnç etkisi ise pilin kısa devre akımını ve dolun faktörünü azaltan bir etkendir [49].

Devreye Kirsof’un akımlar kanunu uygulanırsa;

$$I_{PIL} = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (3.2)$$

Burada;

$I_{PH}$ = Fotoakım (amper)

$I_D$ = Diyot akımı (amper)

$I_{SH}$ = Şönt direnç akımı (amper)

$I_{PIL}$ = Devrenin çıkış akımı (amper) olmaktadır.

Diyot akımı ( $I_D$ ), PN ekleminden geçen toplam akım olup, matematiksel olarak fotonlar tarafından harekete geçirilen elektronlar ve boşluklar tarafından oluşturulan akımların toplamıdır. İletim bandındaki elektron durumlarının ve valans bandındaki boşluk akımlarının Boltzman dağılımı ile net elektron akımı ve boşluk akımları [51];

$$I_e = I_{e0} \cdot (e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1) \quad (3.3)$$

$$I_h = I_{h0} \cdot (e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1) \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Diyot akımı ise Shockley diyot denklemine göre;

$$I_D = I_e + I_h = I_0 \cdot (e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1) \quad (3.5)$$

halini alınır. Diyot akımı  $I_D$ , diyotun mutlak sıcaklığı, gerilim ve yük tarafından çekilen akımın bir fonksiyonu olarak değişir. Denklem 3.5'te;

$I_0$ : Ters doyma akımı (amper),

$q$ : elektron yükü ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),

$V_D$ : diyotun uçları arasındaki potansiyel farkı,

$n$ : idealite faktörü (ideal bir diyot için 1 alınır),

$k$ : Boltzman sabiti ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$ : Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı temsil etmektedir.

Devrenin diyot ve resistör arasındaki gerilim değeri,

$$V_D = V + IR_S \quad (3.6)$$

Ve Ohm kanuna göre şönt direnci ( $R_{SH}$ ) üzerinden aktarılan akım,

$$I_{SH} = \frac{V_D}{R_{SH}} = \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (3.7)$$

olduğundan bu iki denklem baştaki Shockley denkleminde yerine yazılırsa, çıkış akımı ve gerilimi için pil parametrelerini ilişkilendiren bir güneş pilinin karakteristik denklemi ortaya çıkmış olur.

$$I_{Pil} = I_{PH} - I_o \cdot \left( e^{\frac{q(V + IR_S)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (3.8)$$

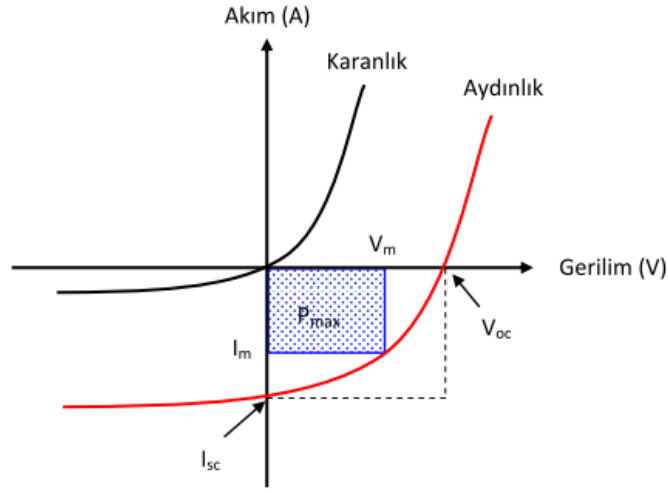
Güneş pil sıcaklığının 25 °C olarak kabul edildiği standart kabuller altında;

$$\frac{kT}{q} \sim 0,0257 \text{ (volt)} \quad (3.9)$$

olması dolayısıyla bu denklem aşağıda ki düzenlenebilir.

$$I_{Pil} = I_{PH} - I_o \left( e^{38,9(V + IR_S)} - 1 \right) - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (3.10)$$

Görüleceği üzere bu denklemin nonlinear yapısı vardır ve denkleminde yer alan parametreler ışığında bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık ortamlardaki Akım-Gerilim (I-V) eğrisi Şekil 3.13'te ki gibi çizilebilir.



Şekil 3.13. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristikleri.

### 3.4. GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ

I-V eğrisinin bilinmesi güneş pillerinin tüm karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde yeterli olmaz, değerleri bilinen birkaç önemli parametre daha kullanılması gerekir. Bu parametreler Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ), Verim ve Dolum Faktörüdür.

#### 3.4.1. Açık Devre Gerilimi ( $V_{oc}$ )

Açık devre gerilimi  $V_{oc}$ , devreden akım geçmezken güneş pilinden alınabilecek maksimum gerilim değeridir. Karanlık ortamdaki eşdeğer devresi sadece bir diyottan oluşan ideal bir güneş pilinde  $R_s = 0$  ve  $R_{sh} = \infty$  olur. Bu durumda açık devre gerilimi için ifade edilebilir bir denklem (3.5)'de tanımlanmıştı. Aydınlatma ile birlikte ışık, diyodun I-V karakteristiğinin üzerine bindirilmiş bir  $I_{PH}$  fotoakımı oluşturacaktır. Bu durumda I akımı,

$$I = I_o \cdot \left( e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1 \right) - I_{PH} \quad (3.11)$$

olacaktır. Bu durumda, elektrotlar arasında elde edilebilecek gerilimin en büyük değeri fotoakımın karanlık akımını yok ettiği durumda elde edilir. Fotoakımın karanlık akımını yok etmesi Denklem (3.11)'de  $I = 0$  alınması olarak düşünülebilir.

Denklem (3.11)'de  $I = 0$  alınarak  $V$  çözümlerse, buradan elde edilecek olan  $V$  değeri bir güneş pilinde elde edilebilecek açık devre gerilimi olacaktır.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{PH}}{I_o} + 1 \right) \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'den açık bir şekilde görülmektedir ki  $I_{PH}/I_o$  oranının açık devre gerilimi üzerindeki etkisi çok küçüktür. Örneğin,  $I_o$  akımının 10 kat düşürülmesi açık devre gerilimi  $V_{oc}$  'yi sadece 25 mV kadar artırır.  $R_{sh}$  direncinin etkisinin de hesaba katılması durumunda açık devre geriliminin ifadesi denklem (3.5)'de çıkış akımının değeri sıfıra eşitlenerek bulunabilir. Uygulandığı takdirde  $V_{oc}$ ,

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{PH} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{I_o} + 1 \right) \quad (3.13)$$

olarak bulunur.  $V_{oc}$  için bulunan bu ifade elde edilebilecek maksimum çıkış gerilimini sadece ışık tarafından oluşturulan  $I_{PH}$  akımı cinsinden değil aynı zamanda doyum akımı ve şönt direnci cinsinden ifade eder.

### 3.4.2. Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )

Güneş pilinin uçları arasında ki gerilim sıfırken, bir başka deyişle uçlar kısa devre edilmişken, güneş pilinden elde edilebilecek maksimum akım değeridir. Kısa devre koşulu elektriksel eşdeğer devrede  $R_L=0$  olması demektir ve denklem (3.5)'de  $V=0$  alınarak bulunur. Bu durumda Şekil 3.13'de verilen elektriksel eşdeğer devrede denklem,

$$I_{sc} = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (3.14)$$

Olarak bulunur ki bu bir güneş pilinden elde edilebilecek en büyük akımın ifadesidir

$I_{PH}$  ile gösterilen fotoakımı aydınlatma şiddeti ile doğrusal olarak artar. Fotonların hangi verimle dış devrede yüklere dönüştüğünü ifade etmek için ise kısa devre akımı

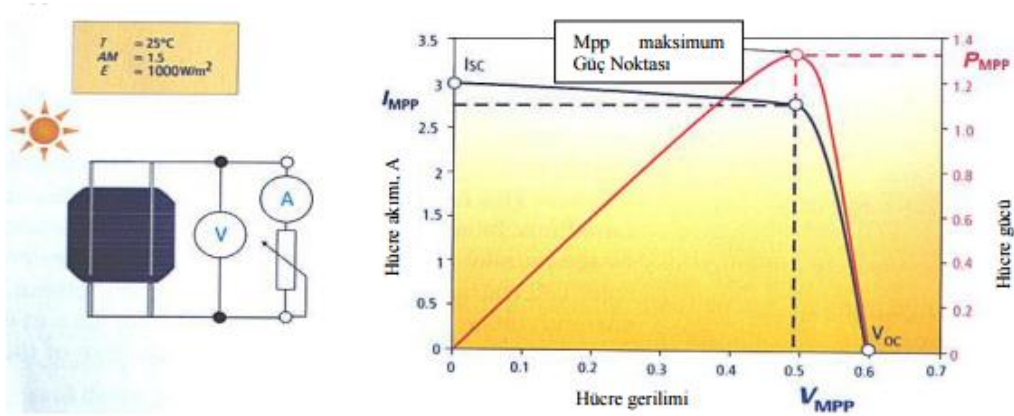
ışık şiddeti cinsinden ifade edilmelidir. Bu, spektral cevap (SR) olarak adlandırılan bir büyüklük tanımlanarak yapılır. Spektral cevap,

$$SR(\lambda) = \frac{J_{sc}}{\Phi(\lambda)} \quad (3.15)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $J_{sc}$  kısa devre durumundaki akım yoğunluğu,  $\Phi$  ise birim alan başına düşen ışık şiddetidir. Spektral cevap, güneş pili üzerine düşen ışığın birim gücü başına dış devrede oluşan akımı ifade eder. Bu parametrelerin dışında kısa devre akımını etkileyen faktörler; optik özellikler, tutma olasılığı ve kuantum etkisidir.

### 3.4.3. Maksimum Güç Noktası ( $P_{max}$ )

Güneş ışınlarının sabit tutularak yapılan ölçümlerde elde edilen akımın değerinin çalışma gerilimi ile değiştiği gözlenir. Şekil 3.14'te kristal bir güneş pilinin maksimum güç (maximum power point) noktası görülmektedir. Bu nokta bir güneş pilinden maksimum gücün alındığı noktadır ve buradaki akım değeri  $I_{mpp}$  veya  $I_{max}$  ve gerilim değeri ise  $V_{mpp}$  veya  $V_{max}$  olarak adlandırılır.



Şekil 3.14. Kristal bir güneş pilinin maksimum güç noktası [52].

$P_{max}$  noktasında  $V_{max}$ ,  $V_{oc}$ 'nin %80'i kadardır,  $I_{max}$  ise  $I_{sc}$ 'nin %95'i kadardır. Şekil 3.14'den de anlaşılacağı gibi çıkış gücü, akım ve gerilimin belirli değerlerinde maksimum olmaktadır ve denklem 3.16'da olduğu gibi formülize edilir.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (3.16)$$

### 3.4.4. Doluluk Faktörü (Fill Factor)

Güneş pilinden elde edilebilecek maksimum akım  $I_{sc}$  ve maksimum gerilim  $V_{oc}$ 'dir fakat, bu noktalarda güneş pilinden elde edilen güç sıfırdır. Doluluk faktörü FF kısaltmasıyla bilinir ve pilin, bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür. Bununla birlikte,  $I_{sc}$  ile  $V_{oc}$  değerlerini birbirine bağlayan bir parametredir.

FF, denklem (3.17)'de ki gibi, bir güneş pilinden alınabilecek maksimum gücün üretilen  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  çarpımına oranı olarak tanımlanır.  $V_{max}$  maksimum güç noktasındaki gerilim değeri ve  $I_{max}$  ise maksimum güç noktasında ki akım değeridir.

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (3.17)$$

Güneş pilinin “iyi” olarak nitelendirilmesi için, doluluk faktörünün (FF)=0,75-0,8 aralığında olması gerekmektedir. Şekil 3.15'te doluluk faktörü FF, (A/B) grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Doluluk Faktörü (FF)'nin grafiksel olarak gösterimi (A/B) [53].



### 3.4.5. Güç Dönüşüm Verimi ( $\eta_{PV}$ )

Pilin verimi  $\eta$ , güneş pilinin performansının ifadesidir ve iki güneş pilinin karşılaştırılmasında en sık kullanılan parametrelerden birisidir. Verim, güneş pilinden elde edilen enerjinin, güneş pilinin güneşten aldığı enerjiye oranıdır. Güneş pilinin maksimum güç çıkışı  $P_{max}$  ve optik giriş gücü (atmosfer dışında pil yüzeyine düşen güneş enerjisi ışınım şiddeti)  $P_{in}$  olmak üzere verim şu şekilde ifade edilir;

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{S_T \times A} \quad (3.18)$$

$S_T$ : Güneş piline gelen ışınım şiddeti miktarını ( $W/m^2$ ),

$A$ : Güneş pilinin alanını ifade etmektedir ( $m^2$ ).

Bir güneş pilinin güç dönüşüm verimi, kullanılan yarıiletkenin band aralığına bağlıdır. Bu sebeple verim spektrum ve gelen ışığın yoğunluğu ve güneş pilinin sıcaklığına bağlı olarak değişir. Dolayısı ile karşılaştırma yapılırken ölçüm koşullarının dikkatlice kontrol edilmesi gerekir.

Dünya genelinde mevcut güneş pillerinin testleri  $1000 W/m^2$  ışınım şiddeti altında, AM1,5 ve  $25^\circ C$  şartlarında yapılır. Verimi etkileyen birçok faktörler vardır.

## 3.5. GÜNEŞ PİLLERİNİN VERİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

### 3.5.1. Yüzey Parametresi Etkisi

Güneş pili üzerine gelen ışınların bir kısmı, yarı iletken içine girmeden üst yüzey tarafından yansıtılır. Güneş pilinin üst yüzeyine gelen ışınları yansıtma miktarı, yapıldığı materyale göre değişir. Yansıtma katsayısı, ortamların kırıcılık indislerine ve yok olma katsayısına bağlı olarak,

$$R = \frac{(n_{k2} - n_{k1})^2 + k^2_{y1}}{(n_{k2} - n_{k1})^2 + k^2_{y2}} \quad (3.19)$$

olarak tanımlanır [54]. Burada,

$n_{k1}$  ve  $n_{k2}$ =Işığın geçtiği ortamın kırıcılık indisleri,  
 $k_{y1}$  ve  $k_{y2}$ =Bu ortamlara ait yok olma katsayıları olmaktadır.

Güneş pillerinde anti yansıtıcı kaplama kullanılması ile yansıma kayıpları azaltılabilir.

### 3.5.2. Spektral etki

Yarı iletken üzerine gelen monokromatik ışık, elektron hol çiftlerinin oluşumuna sebep olmaktadır. Elektron hol çiftlerinin oluşturulma hızının, yarı iletken yüzeyinden içine doğru olan değişimi,

$$G = (1 - R)\alpha N e^{\alpha x} \quad (3.20)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,

$\theta$ =Gelen ışığın foton açısını,

$\alpha$ =Soğurma katsayısını,

$N$ =Yarı iletken üzerine gelen ışığın foton akısı,

$R$ =Yansıtma katsayısı olmaktadır [55].

Kısa dalga boylu ışınım için  $\alpha$  çok büyük olduğundan, yarı iletkene gelen bu ışınım hemen soğurur. Pilde fotonların bütün enerjileri kullanılmaz fakat, kısa dalga boylu ışınım için kuantum verimliliği görünür dalga boylarında en yüksek değere ulaşırken, kızılötesi bölgelerde düşüktür.

### 3.5.3. Foto Açısal Etki

Yarı iletken malzemeden yapılmış olan güneş piline gelen fotonlar, yüzeye çarpınca ışığın bir kısmı yüzey tarafından yansıtılırken, geriye kalan diğer kısmı yarı iletken tarafından soğurur veya malzemeden geçer.

Işık pil yüzeyinin normali ile bir açı yaparak geldiğinde, bir kısmı yüzey tarafından yansıtılır. Yansıtma katsayısı, ortamların kırıcılık indislerine ve yok olma katsayısına bağlıdır.

Fotonların yarıiletken güneş pili tarafından yutulması ve yansıtılmasından sonra ışığın şiddeti zayıflayarak geçer ve geçen bu kısım ise,

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha x}}{(1-R)^2 e^{-2\alpha x}} \quad (3.21)$$

şeklinde verilir.

### 3.5.4. Sıcaklığın Etkisi

Güneş pillerinin çalışmasında sıcaklığın önemli bir etkisi vardır. Güneş pillerinin kısa devre akımı, sıcaklığın düzgün bir şekilde artmasıyla yükselme eğilimi gösterir. Yarıiletken enerji bant aralıkları genellikle sıcaklıkla azaldığından, açık devre voltajı ve dolum faktörü azalır. Enerji bant aralığı oda sıcaklığında lineer olarak değişme gösterirken düşük sıcaklıklarda ise doğrusal olmayan bir değişme gösterir.

Çizelge 3.1. Bazı yarıiletken enerji bant aralığının sıcaklıkla değişimi [56].

Malzeme	T=300°K	T=0°K
Si	1.12 eV	1.17 eV
Ge	0.67 eV	0.75 eV
PbS	0.37 eV	0.29 eV
PbTe	0.29 eV	0.19 eV
InSb	0.16 eV	0.23 eV
GaSb	0.69 eV	0.79 eV

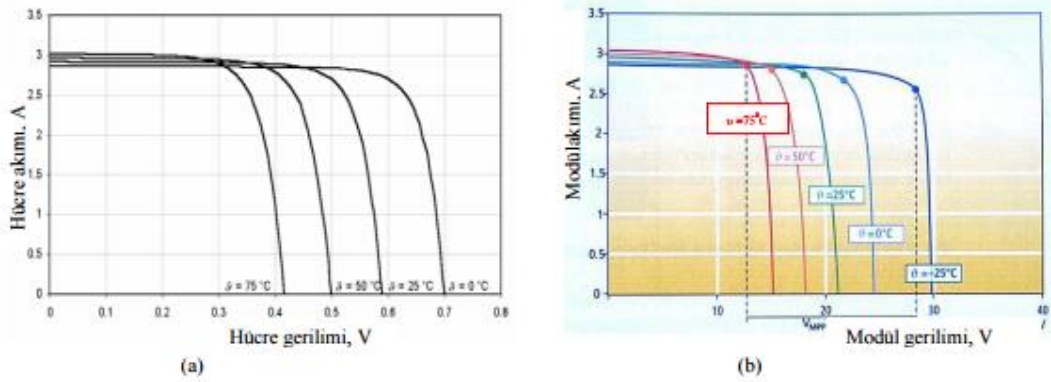
Çizelgeden görüldüğü üzere sıcaklık değişimi ile birlikte güneş pillerinin yapısındaki yarı iletkenlerin bant aralıkları da değişmektedir. Bununla birlikte çalışma sıcaklığının artması güneş pilinin ya da panelin, güneş enerjisinin termik uygulamalarının aksine, çıkış gerilimini olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak sıcaklıktaki değişimin asıl

etkisi pil verimi ve pil ömrü üzerinde görülmektedir. Çizelge 4.2 Si güneş pilinin sıcaklığa bağlı olarak bant aralıklarını, çıkış gerilimlerini ve verim değişimlerini göstermektedir.

Çizelge 3.2. Si güneş pilinin sıcaklığa bağlı parametrelerin değişimi [56].

T (°K)	eV	V	%η
273	1.1312	0.750	26.83
300	1.1245	0.699	24.67
323	1.1185	0.654	22.80
353	1.1104	0.595	20.33
373	1.1048	0.555	18.67

Şekil 3.16'da ise sıcaklığın kristal Si güneş pilinin ve Si güneş panelinin I-V eğrisine olan etkisi görülmektedir.

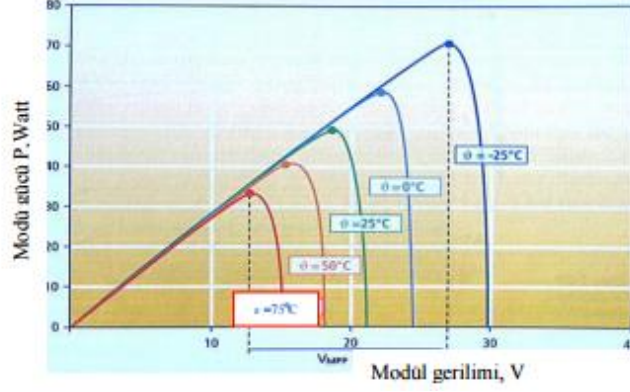


Şekil 3.16. a) Sıcaklığın c-Si PV piline etkisi; b) Sıcaklığın panel I-V eğrisine olan etkisi [57].

Benzer etki (Şekil 3.17) PV panelinin çıkış gücünde de görülmektedir. Gerilimdeki azalma doğrudan doğruya güce yansdığından, çalışma sıcaklığındaki artış çıkış gücünü de olumsuz yönde etkilemektedir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı güneş panelleri güneşli fakat soğuk ortama ihtiyaç duyarlar. Her 10 °C sıcaklık artışı, elde edilen gücü %0,2 - %0,5 oranında

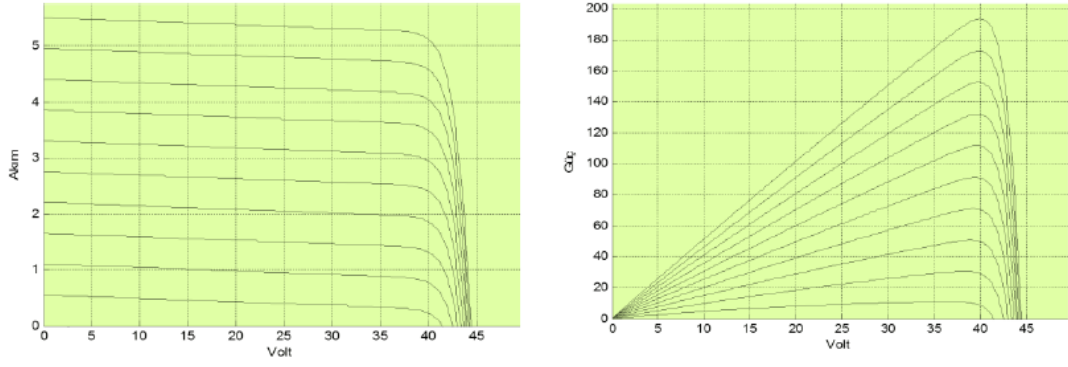
azaltmaktadır. Bir PV modülünün etiketinde veya teknik özellikler kataloğunda bu değerler yazılmaktadır.



Şekil 3.17. Sabit ışınımında farklı sıcaklıklardaki PV panelinin voltaj ve güç değişimi [57].

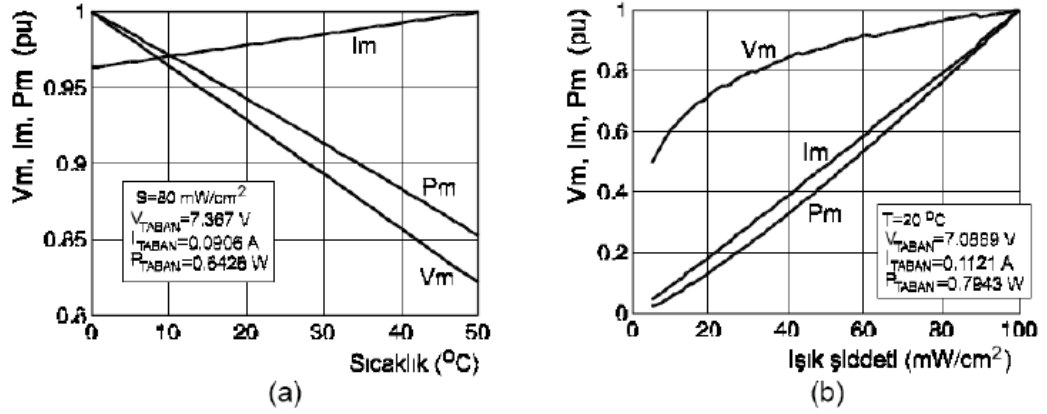
### 3.5.5. Işınım Şiddetinin Etkisi

Güneş pilinin maksimum çıkış gücü, çalışma sıcaklığı ile birlikte üzerine düşen güneş ışınım şiddetine bağlı olarak da değişir. Işınım şiddetinde meydana gelen artışlar, Şekil 3.18 (a)'da verildiği gibi pilin çıkış akımını olumlu yönde etkilemektedir. Işınım şiddetinin akımda meydana getirdiği bu artış, sıcaklığın meydana getirdiği artışa göre oldukça yüksektir. Işınım şiddetindeki artış hem pil çıkış akımında hem de pil çıkış geriliminde bir artışa neden olmaktadır. Şekil 3.18 (b)'den de görüleceği gibi, ışınım şiddeti arttıkça pilin çıkış gücü de doğru orantılı olarak artmaktadır. Yani ışınım şiddeti arttıkça güç de artar. Güçteki bu artışın kaynağı, anlaşılacağı gibi hem akımdaki hem de gerilimdeki artıştan kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.18. a) Güneş pilinin akım-gerilim ve b) gücünün ışınım şiddeti ile değişimi [58].

Güneş pillerinde, çalışma sıcaklığı artıkça maksimum çıkış gücü ve P-V karakteristiğinde bu güce karşılık gelen gerilimin azaldığı bir önceki bölümde belirtilmişti. Bundan dolayı güneş pillerinin performansı, Şekil 3.19'dan de anlaşılacağı üzere, ışınım şiddetinin yüksek, sıcaklığın düşük olduğu ortamlarda daha iyi sonuç verir. Verilen grafik, güneş pili çıkış gücünün farklı çalışma sıcaklığı ve güneş ışınım şiddetleri için elde edilen maksimum değerleri ile bu maksimum güce karşılık gelen akım ve gerilim değerlerini temsil etmektedir.

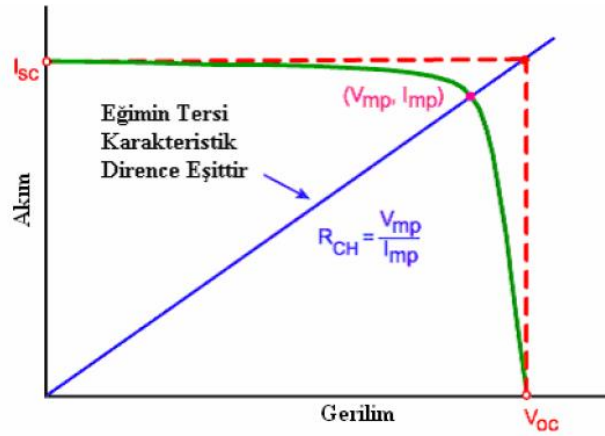


Şekil 3.19. Güneş pilinin maksimum çıkış gücü ve bu güce karşılık gelen gerilim ve akımın; a) Sıcaklıkla, b) Işınım şiddetiyle değişimi [10].

Grafikte sıcaklığın artması ile çıkış gerilimin azalmasının temel sebebi, sıcaklığın pil kayıplarını artırmasıdır. Sıcaklık artıkça PN eklem noktası kayıpları da artar. Bu kayıplar pilde ısıya dönüştürülerek harcanır. Bu nedenle güneş pilleri modellenirken, eşdeğer devrelerine seri-paralel dirençler eklenir.

### 3.5.6. Karakteristik Dirençlerin Etkisi

Karakteristik direnç ( $R_{CH}$ ), güneş pilinin maksimum güç noktasındaki çıkış direncidir. Eğer yük değeri karakteristik direnç değerine eşitse güneş pili maksimum güç noktasında çalışıyordur. Güneş pillerinin parazitik direnç kayıpları analiz edilirken karakteristik direnç faydalı bir parametredir. Şekil 3.20’de karakteristik direnç gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Karakteristik direnç gösterimi.

$$R_{CH} = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (3.22)$$

Karakteristik direnç alternatif olarak şu şekilde de yazılabilir:

$$R_{CH} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.23)$$

**Seri Direnç Kayıpları:** Güneş pillerindeki seri dirençten kaynaklanan verim kayıpları, aygıt boyunca akımı toplamak için p- tipi ve n- tipi bölgelerin üzerine kaplanan metal kontaklardan kaynaklanan kayıplardır. Özellikle ışığın düştüğü yüzey üzerinde, kontak yüzey alanı küçük tutulmalıdır. Bu durumda oluşan akım için yol uzunluğu ve buna bağlı olarak güneş pilinin seri direnci artar. Bundan başka, bir güneş pilinin karakterizasyonu sırasında akım ölçmek için kullanılan bağlantı kabloları veya iletkenler, güneş pili için seri direnç oluştururlar [59].

Seri direnç, farklı tabakalardan geçen akımdan kaynaklanan bir dağılım olduğu kabul edilmektedir. İç seri direncinden dolayı akım gerilim karakteristik eğrisinde sapma meydana gelir ve seri direnç artıkça pil verimi azalır. Seri dirençten ileri gelen kayıplar pil teknolojisinin gelişmesiyle giderilebilir [60].

Paralel Direnç Kayıpları: Güneş pillerinde paralel dirençten ( $R_{SH}$ ) kaynaklanan önemli güç kayıpları olur. Paralel dirençten ötürü meydana gelen kayıpların sebebi dizayndan ziyade üretimdeki hatalardan kaynaklanır. Düşük paralel direnç değeri fotoakım için alternatif yollar oluşturur.

### **3.5.7. Pil Kalınlığının Etkisi**

Güneş pilinin kalınlığı küçüldükçe geçirilmiş ışıklardan dolayı kayıp artar. Verimi azalır. Yaygın olarak kullanılan silisyum güneş pillerin kalınlığı 0,2- 0,4 mm arasındadır.

### **3.5.8. Diğer Faktörler**

Yukarıda sayılan faktörlerin dışında güneş panellerinin yada pillerinin verimliliğini etkileyen bir diğer faktör de modül yüzeyinin kirlenmesidir. Kirlenmeden dolayı pile iletilen güneş ışınımında azalma olur. Işınımında ki bu azalma soğurulma miktarını azaltır ve üretimde kayıplar görülür. Modül yüzeyinde oluşan kirlilik yağışlardan, tozlanmadan vb. çevresel etkenlerden kaynaklanır.

Modüllerin konumlandırılması da verimliliği etkileyen bir diğer önemli konudur. Modüller maksimum verimi güney cephesinde vermektedir. Panellerin hareketli bir konstrüksiyon üzerinde tasarlanmaları durumunda güneş ışığını takip edebilmekte ve günün her saatinde en yüksek verim alabilmektedir.



## BÖLÜM 4

### GÜNEŞ PANELLERİNDE ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

#### 4.1. ENERJİ VE EKSERJİ

Enerji, iş ya da iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Ekserji ise, termodinamik bir sistemin ihtiva ettiği potansiyel enerjisinin, herhangi bir referans haline göre kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. Ekserji tersinir bir süreç sonucunda sistem çevre ile denge sağladığı takdirde, oluşan entropi sonucu kullanılamaz hale gelen enerji düşüldükten sonra, teorik olarak elde edilebilecek maksimum faydalı iş miktarı olarak da tanımlanabilir. Bu tanımdan hareketle, enerji bir proseste daima korunabilirken, ekserji ise sadece tersinir proseslerde korunabilmekte, gerçek proseslerde tersinmezlikler nedeni ile tüketilmektedir [61].

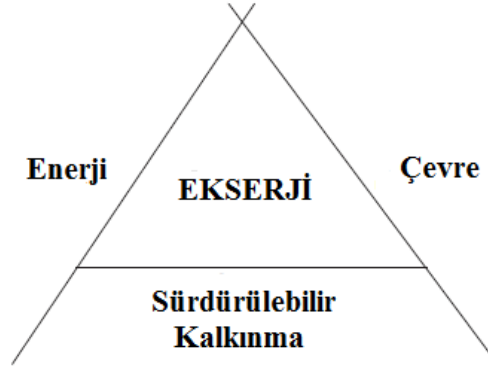
Enerjinin korunumu prensibini ifade eden termodinamiğin birinci kanunu her ne kadar enerji analizlerinde gerekli ise de, bu kanun ile yapılan analizler bir enerji sisteminin çeşitli bileşenlerinin potansiyelleri ile kullanım sınırlamaları hakkında tam bir değerlendirme vermez. Bu durum enerji sistemlerinin tasarım ve imalatında istenen uyumluluğu sağlamaz. Hâlbuki termodinamiğin ikinci kanunu veya ekserji analizi, enerji sistemlerinin tasarımında ve performans analizinde daha iyi sonuçlar verir. Karmaşık sistemlerin optimizasyonunda, termodinamiğin ikinci kanunu çok güçlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır. İkinci kanunun ışığında mühendislik ekipmanlarının performanslarının belirlenebilmesi için; kullanılabilirlik, tersinir iş, tersinmezlik ve ikinci kanun veriminin tanımlamaları ile işe başlanmıştır.

Bir enerji kaynağının enerji miktarını belirlemek, sistem kurulması için yeterli bilgiyi sağlamamaktadır. Asıl bilinmesi gereken, enerji kaynağının iş potansiyeli ya da kaynağın faydalı iş imkânıdır. Kullanılabilirlik, verilen bir durumdaki sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iş miktarıdır. Tersinir iş ise, belirli iki durum arasında bir proses geçiren sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iştir. Ayrıca tersinmezlik, bir proses sırasında kaybedilen iş potansiyelidir ve bu kayıp iş potansiyeli, tersinmezliklerin sonucu olarak meydana gelir.

Ekserji, birçok kaynakta en kısa ifade ile kullanılabilirlik veya kullanılabilir enerji şeklinde tanımlanmaktadır. Ekserji kavramı ilk olarak 1878 yılında J.W. Gibbs tarafından ortaya koyulmuştur. Kullanılabilirlik terimi, 1940'larda ABD'de M.I.T Mühendislik Fakültesi tarafından bilinir duruma getirilmiştir. Ekserjinin kelime karşılığı olarak ise 1953 yılında Avrupa'da Alman bilim adamı Z. Rant tarafından önerilmiştir [62]. Yunanca'da "tersinir" anlamına gelen "ex" kelimesi ile "iş" anlamına gelen "ergon" kelimelerinden türetilen ekserji, küresel bir kabul görererek son yıllardaki çalışmalarda bütün dillerde ortak kullanılabilen bir kavram haline gelmiştir.

Ekserji sadece kullanılabilir enerji kavramından ibaret değil, aynı zamanda geniş resme bakıldığında çevreye zarar veren enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve çevre dostu kaynakların kullanılması konularında mükemmel bir ölçüt ve geniş kapsamlı bir mühendislik yaklaşımı içermektedir [63].

Rosen ve Dinçer (2013) tarafından Şekil 4.1'de geniş kapsamlı olarak ele alındığı gibi, ekserji; enerji, çevre ve sürdürülebilir gelişmenin bir karışımı olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4 1. Enerji, çevre ve sürdürülebilirliğin ekserji ile ilişkisi [64].

Termodinamik bakış açısıyla ekserji; bir referans çevreyle denge haline gelirken, bir sistem, madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda iş olarak tanımlanır. Ekserji, referans çevreye göre tamamen kararlı dengede olmamanın sonucu olarak, değişime neden olan akış ya da sistemin iş yapabilme potansiyelinin bir ölçüsüdür. Ekserjinin, bir iş üreten düzeneğin, gerçekte tesise vereceği iş miktarını temsil etmediğinin farkına varılması önemlidir. Daha doğrusu ekserji, herhangi bir termodinamik yasasına karşı gelmeden bir düzeneğin verebileceği işin miktarındaki üst sınırı temsil etmektedir. Bir sistemde üretilen veya dağıtılan gerçek iş ile ekserji arasında küçük ya da büyük her zaman bir fark olacaktır ve bu fark sistemlerin geliştirilmesi ya da iyileştirilmesi için mühendislerin sahip olduğu olanağı temsil etmektedir.

Ekserji sadece sistemin değil, sistem ile çevre birleşiminin bir özelliğidir. Bir enerji kaynağından alınabilecek kullanılabilir iş, kaynağın bulunduğu çevrenin durumuna bağlıdır. Kaynak ve çevre arasındaki fark ne kadar büyükse sistemden alınacak iş de o kadar büyük olur [65]. Bu yüzden, çevreyi değiştirmek ekserjiyi arttırmanın diğer bir yoludur, ancak kesinlikle kolay bir yolu değildir.

Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) getirilirse elde edilir. Bu nedenle iş potansiyeli belirlenirken tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Bir sistemin ölü halde olması demek, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü haldeki bir sistem çevresinin sıcaklığı ve basıncındadır. Yani

çevreyle ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır (hızı ve bir referans noktasına göre yüksekliği sıfırdır). Sistem ölü halde iken kimyasal olarak korunduğundan çevresi ile tepkimeye giremez. Aynı zamanda sistem ve çevresi arasında dengelenmemiş manyetik, elektrik, ve yüzeysel gerilme etkileri yoktur. Ölü haldeki bir sistemin özellikleri  $P_0$ ,  $T_0$ ,  $h_0$ ,  $u_0$ , ve  $s_0$  özelliklerinde olduğu gibi sıfır alt indisi ile gösterilir. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği yani ekserjisi sıfırdır.

Daha önce bahsedilmiş olan tersinir iş ve tersinmezlik kavramlarını daha açık bir biçimde ifade edersek; tersinir iş, bir sistem belirli bir başlangıç hali ve son hal arasında bir hal değişimi geçirdiğinde, üretilebilen yararlı işin en fazla miktarı (veya sağlanması gereken en az iş) olarak tanımlanır. Son hal ölü hal olduğunda, tersinir iş ekserjiye eşit olur. İş gerektiren hal değişimleri için tersinir iş, bu hal değişimini gerekli işin en az miktarını temsil eder. Tersinir iş ile yararlı iş arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki mevcut tersinmezliklerden kaynaklanır ve bu fark tersinmezlik olarak adlandırılır. Tersinmezlik, harcanmış iş potansiyeli veya iş yapmak için kaybedilmiş fırsat olarak görülebilir. Tersinmez süreçlerde geriye dönüş yoktur. İşe dönüştürülebileceği halde dönüştürülememiş olan enerjiyi temsil eder. Yani tersinmezlik ekserji yok oluşuna diğer bir deyişle ekserji tüketimine eşittir.

Güneş pillerinde ki fotokimyasal enerji dönüşümüne bağlı olarak panel yüzeyinde meydana gelen ısı kaybı, termal ekserji kaybı olarak çevreye atılır. Hem ekserji tüketimi hem de ekserji kaybı, termodinamiğin ikinci kanun analizi de denilen ekserji analizi ile saptanır. Termodinamiğin ikinci kanunu, hem bir enerji taşıyıcının gerçek termodinamik değerini hem de proses yada sistemlerden olan kayıpların ve gerçek termodinamik yetersizliğin hesaplarının yapılabilmesi sonucu ile enerji analizini tamamlar ve geliştirir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında ekserji analizi yapılırken hesaplamalarda kolaylık sağlaması bakımından bazı kabuller ve basitleştirmeler yapılır. Ekserji kavramının bazı önemli boyutları aşağıda maddeler halinde ifade edilmiştir.

- Herhangi bir sistem, bir çevre ortamı içinde çalışır.

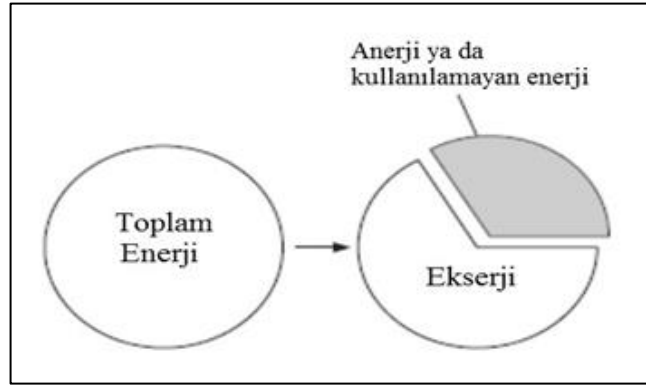
- Buna göre çevre basitçe, sistem içerisinde olmayan diğer her şey olarak tanımlanabilir.
- Ekserji hesaplamalarında, çevrenin öneminin yanında, çevre ile sistem arasındaki sınırın belirlenmesi de büyük önem taşır.
- Ekserji, sistem ve çevrenin bir arada oluşturduğu kombine çevrimden elde edilebilen maksimum teorik iştir. Buradaki sistem, verilen bir durumdan çevre ile denge durumu olan ölü duruma geçer. Ölü durumda kombine sistem enerjiye sahiptir ancak ekserjiye sahip değildir.
- Sistemin tüm durumları için ekserji, sifıra eşit ya da sifırdan büyüktür.
- Değeri sistem durumu ile belirli olduğundan ekserji, yeğın özelliğdir ve burada bahsi geçen çevre daha önceden belirlenmiş olmalıdır. Ekserji, birim kütle ya da birim mol başına göre yazıldığında yeğın özellik olarak temsil edilebilir.
- İncelemeye alınan prosese bağılı olarak tersinmezliklerin nicel olarak hesaplanması önemlidir.
- Ekserji, sistem durumunun çevresel durumdan uzaklaşma ölçüsüdür. Verilen bir durumdaki  $T$  sıcaklığı ile çevrenin  $T_0$  sıcaklığı arasındaki fark büyüdükçe ekserji değeri de buna bağılı olarak büyür.
- Çevreye göre göreceli olarak belirlendiğinden, sistemin kinetik ve potansiyel enerji büyüklüklerinin tamamı ekserji büyüklüğüne katılır.
- Ekserji, kimyasal ve termomekaniksel ekserjilerin toplamı şeklinde ifade edilir. Termomekaniksel ekserji, fiziksel, kinetik ve potansiyel ekserji şeklinde sınıflandırılır.

Ekserji, sistemler arasında transfer edilebilir ve sistemler içindeki tersinmezlikler yüzünden tahrip edilebilir. Bununla beraber ekserji, bir ekserji dengesi ile açıklanabilir [66].

#### 4.2. ENERJİ, ENTROPİ VE EKSERJİ İLİŞKİSİ

Enerji, genellikle iş ya da iş yapabilme yeteneği olarak bilinmektedir. Bu tanım yerine, hareket ya da hareket üretme yeteneği olarak tanımlanması şüphesiz daha doğru olacaktır. Ekserji ise, iş ya da iş üretebilme kabiliyetidir. Hareket, sık sık ve belirli bir yönü olmayan, yani anlamsız iştir [67].

Enerji; anerji ve ekserji olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Anerji, enerjinin işe yaramayan kısmı yani atık enerjidir. Ekserji ise enerjinin iş yapan kısmı yani kullanılabilir enerjidir. Anerji ya da kullanılmayan enerji, enerjinin tersinir bir ısı makinası ile bile işe dönüştürülemeyen bölümüdür. Şekil 4.2 enerjinin bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 4.2. Enerjinin bileşenleri.

Enerjiden farklı olarak, ekserji; ideal veya tersinir prosesler hariç olmak üzere korunum yasasına uymaz. Ekserji daha çok, gerçek proseslerdeki tersinmezlikler nedeniyle, tüketilir ya da tahrip edilir. Bir proses boyunca ekserji tüketimi, prosesle ilişkili tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropi ile orantılıdır. Enerji ve ekserji kavramları, Çizelge 4.1'de açık olarak kıyaslanmaktadır.

Çizelge 4.1. Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması [64].

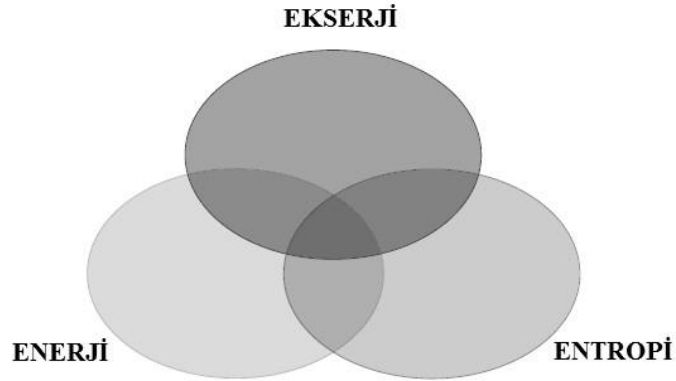
<b>ENERJİ</b>	<b>EKSERJİ</b>
Çevresel değişkenlere değil, sadece madde veya enerji akış değişkenlerine bağlıdır.	Madde ve enerji akımının her ikisine de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değere sahiptir. (Einstein'ın $E=mc^2$ bağıntısına göre).	Sıfıra sahip değeri vardır (Çevre ile dengede olduğu ölü durumda sıfırdır).
Tüm proseslerde Termodinamiğin I. kanunu ile ifade edilir.	Sadece tersinir prosesler için Termodinamiğin I. kanunuyla gösterilir. Tersinmez proseslerde kısmen veya tamamen yok olur.
Tüm prosesler için, tersinir olanlar da dahil olmak üzere Termodinamiğin 2. Yasası ile sınırlıdır.	Termodinamiğin 2. Yasası nedeni tersinir prosesler için sınırlı değildir.
Hareket veya hareketi üretme kabiliyetidir.	İş yada iş üretme kabiliyetidir.
Bir proste her zaman korunur. Yoktan var ya da vardan yok olmaz.	Tersinir proseslerde her zaman korunur. Tersinmez proseslerde ise her zaman tüketilir
Niceliğin (miktarın) bir ölçüsüdür.	Niceliğin ve entropi nedeniyle niteliğin (kalitenin) bir ölçüsüdür.

Ekserji ile entropi arasındaki fark ise, Kay (2002) tarafından yapılan bir çalışma esas alınarak, Çizelge 4.2'de gösterildiği üzere özetlenmiştir [67]. Bu bağlamda, ekserji ve entropi zıt değildir. Ekserji, enerjiyi bir şekilden diğer şekle dönüştürdüğümüzde kazanılan enerji hakkında sahip olduğumuz yararlı bilgidir. Entropi artışı ise, enerjiyi bir şekilden diğer bir şekle dönüştürdüğümüzde, enerji hakkında meydana gelen belirsizliktir. Ekserjideki artış, mevcut enerjiyle daha fazla iş yapabildiğimiz zaman gerçekleşir. Entropi artışı, enerji hakkındaki belirsizlikteki bir artışa karşı gelir. İş ve ısı, birinci yasayla ilgilidir ve bu onları kavramda zıt yapar. Ama, ekserji ve entropi korunmaz, diğeri değişmeden biri değişebilir.

Çizelge 4.2. Ekserji ve entropinin karşılaştırılması.

<b>EKSERJİ</b>	<b>ENTROPİ</b>
Enerjiyle neler yapılabileceğinin teorik olarak limitlerini açıklar.	Enerjinin gerçekte kullanılan şekilde ne kadar tersinmezlik ve belirsizlik üretildiğini açıklar.
Enerjiyle bir şey yapmanın potansiyeli hakkındadır.	Enerjiye gerçekten neyin olduğu hakkında biraz şeyler anlatır.
Durumun, dengenin ne kadar dışında olduğunu, gradyenlerin ne kadar büyük olduğunu ve yararlı bir şey yapma potansiyelini gösterir.	Bir proseste sadece oluşan tersinmezlikleri açıklar.
Ekserji, enerjinin bir şekilden diğer bir şekle dönüştürüldüğünde kazanılan enerji hakkında sahip olunan yararlı	Entropi, enerjinin bir şekilden diğer bir şekle dönüştürüldüğünde enerji hakkında ortaya çıkarılan belirsizliktir.

Şekil 4.3 Enerji, entropi ve ekserji arasındaki ilişkiyi şematik olarak göstermektedir.



Şekil 4.3. Enerji, entropi ve ekserji arasındaki ilişki.

Özetle, entropi ve ekserji (istatistik ve bilgi kuramı gibi) farklı alanlarda kullanılmaktadır ve bu nedenle enerjinin alt kümeleri değildirler. Ayrıca, enerjinin (şaftın çalışması gibi) bazı formları serbest entropilidir ve dolayısıyla entropi enerji alanının sadece bir parçasıdır. Aynı şekilde, hiçbir ekserjisi olmayan sistemler



(atmosferik koşullar altında hava gibi) olduğundan ekserji ancak enerji alanının sadece bir parçası olarak kabul edilebilir.

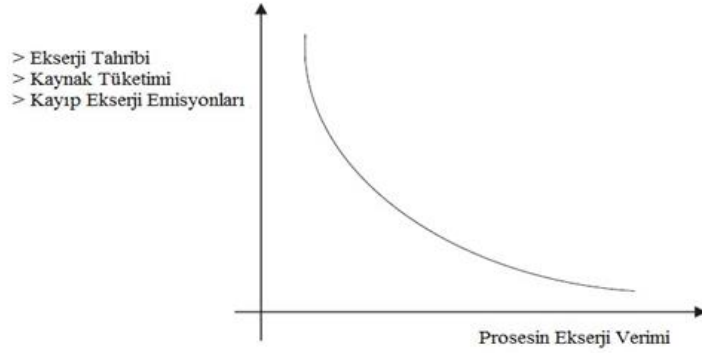
#### **4.3. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİNE İLİŞKİN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR**

Literatürde, güneş pilleri ve güneş panellerinin elektriksel parametrelerinin iyileştirilmesi ve verimlerinin artırılmasına yönelik pek çok çalışma sıklıkla yer alırken, termodinamik analizlerinin yapıldığı ve ekserjik verimlerinin incelediği çalışmalarda mevcuttur. Örneğin, güneş pillerinde fotokimyasal enerji dönüşüm verimlerinin, teorik termodinamik sınırları Ross ve Hsiao tarafından (1977) araştırılmıştır [68]. PV pil teorisindeki Carnot faktörü Landsberg ve Markvart (1998) tarafından çalışılmıştır. Carnot verimi ile çarpılan açık devre voltajının bant boşluğuna eşit olduğu ifadesini elde etmişlerdir [69]. Wurfel'de (2002), entropi kavramına dayalı olarak güneş enerjisi dönüşümündeki termodinamik kısıtlamaları tartışmış ve maksimum yoğunlaştırılmış güneş ışınımında üst verimi 0,86 olarak hesaplamıştır [70]. Petela (2003), güneş ışınımının ekserjisini değerlendirmiş ve çeşitli ekserji bileşenlerini tanımlamıştır [71]. PV enerji dönüşümünün fiziksel ve kimyasal ilkeleri Bisquert ve arkadaşları (2004) tarafından sunulmuştur. PV pilde kimyasal potansiyel ve açık devre voltaj arasındaki ilişkinin Carnot ve istatistiksel faktörlere bağlı olduğunu bulmuşlardır [72].

Dincer ve Rosen (2005), sürdürülebilir gelişmeler için yenilenebilir enerji kaynaklarının termodinamik durumlarını araştırmış, ekserji ve sürdürülebilir gelişmeler arasındaki ilişkiyi açıklamışlardır [73]. Şahin ve arkadaşları (2007) ise bir PV sisteminin termodinamik ve ekserji analizlerini yukarıda adı geçen pilin farklı kimyasal bileşenlerini kullanarak yapmıştır [74]. Bu çalışmada, ekserjinin değerlendirilmesi açısından iki farklı metot göz önüne alınmıştır. Bunlardan biri, Güneş enerjisine termodinamiksel yaklaşımı, ikincisi ise güneşten gelen fotonik enerjiyi (kimyasal potansiyel) temel alan bir çalışma olmuştur. Dinçer ve arkadaşları (2009) ise, ekserji analizlerini kullanarak PV pillerin termodinamik analizlerinde basit bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu metot sayesinde, PV pillerin davranışları çok daha rahat anlaşılabilir, artırılabilir ve ön görülebilir hale gelmiştir [75].

#### 4.4. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİNİN ÖNEMİ

Termodinamik problemlerin çözümünde sadece I. kanun yeterli olmadığından dolayı, ekserji kavramını içeren II. kanun da kullanılmalıdır. Hesaplama kolaylığı, daha sağlıklı sonuçlar verme gibi nedenler, ekserji analizinin tercih edilme sebepleri olarak gösterilebilir. Ancak pratikte ekserji analizi yapmak ısı güç sistemlerindeki enerji kayıplarının belirlenmesinde büyük önem taşır. Ekserji kayıplarının azalması, yani ekserji veriminin artması halinde proseste gerçekleşecek tahrip, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları Şekil 4.4.'te ki gibi ters orantılı olarak azalacaktır.



Şekil 4.4. Bir prosesin ekserji verimi ile tahrip, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları arasındaki ilişki [64].

Enerji ile ekserji ilişkisi incelenerek karşılaştırılması yapıldıktan sonra, ekserji analizinin önemi, faydaları ile beraber aşağıda sıralanmıştır [76].

- Ekserji analizi, enerji kaynakları kullanımının çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesinde ana araçtır.
- Ekserji analizi, enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci yasasıyla birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanan etkin bir yöntemdir.

- Ekserji verimleri, enerji verimlerinin sağlayamadığı ideal noktaya sistemin ne kadar yaklaşabildiğini ölçebilmekte ve sistemlerin değerlendirilmesinde daha anlamlı mesajlar verebilmektedir.
- Ekserji analizi, daha fazla verimli kaynak kullanma amacını destekleyen uygun bir tekniktir. Belirlenmesi gereken atık ve kayıpların yerleri, tipleri ve gerçek büyüklükleri bu teknikle ortaya çıkarılır.
- Farklı ürün veya akışkanların çalıştığı karmaşık sistemlerin analizlerinde, ekserji metodu, farklı karakteristikte olan ürünleri ortak paydada değerlendirmeye imkan tanımakta ve enerji kalitesinin belirlenmesini sağlamaktadır.
- Ekserji analizi, mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemleri tasarlamanın nasıl mümkün olup olamayacağını gösteren etkin bir tekniktir.
- Ekserji analizi yöntemi, termal sistemlerin tasarım ve Ar-Ge faaliyetlerinde sistemlerin uygulanabilirliği, ön tasarımı ve mevcut tasarımların iyileştirilmesi konuları hakkında eksergo-ekonomik, termo-ekonomik ve çevre-ekonomik uygulamaları ile yol gösterici olabilmektedir.
- Ekserji analizi, sürdürülebilir gelişmenin elde edilmesinde anahtar bir bileşendir.
- Ekserji analizi, enerji krizleri hakkındaki problemlere daha tatmin edici cevaplar sağlayabilmekte ve enerji politikalarının oluşturulmasında kullanılabilecek önemli bir araç haline gelmektedir.

Yukarıdaki gibi faydalar sağlaması nedeniyle ekserji analizi, ısı sistemlerinin değerlendirilmesinde ve tasarımında enerji analizinin yanında bir tamamlayıcı olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır.

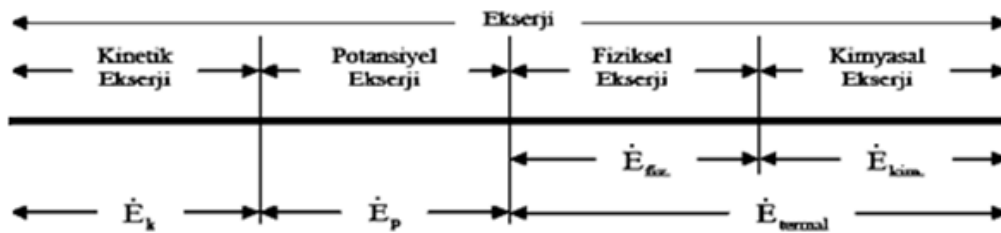
## 4.5. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZ DENKLEMLERİ

Enerji kaynaklarının doğru ve verimli kullanımları Termodinamiğin 1. ve 2. yasaları ile belirlenir. Enerji analizlerinde termodinamiğin 1. yasası esas alınırken, ekserji analizlerinde ise termodinamiğin 2. yasası temel alınmaktadır. Ekserji analizi, kütle korunumu ve enerjinin korunum prensiplerinde termodinamiğin 2. yasası ile birlikte işleyen ve enerji sistemlerinin analiz, tasarım ve gelişimini hedefleyen bir tekniktir [77]. Bu analiz, enerjinin yalnızca nitel analizlerinin yapıldığı enerji analizlerinin aksine, enerjinin yalnızca nitel analizlerini vermekle kalmaz aynı zamanda nicel analizlerini de verir.

Ekserji analizleri için referans çevrenin karakteristiği belirlenmelidir. Bu genellikle referans bölgenin, sıcaklığı, basıncı ve kimyasal içeriği belirtilerek yapılır. Dolayısıyla ekserji analizlerinin sonuçları belirtilen referans çevre ile alakalıdır ki pek çok uygulama gerçek çevre koşullarından sonra örneğe uyarlanır. Bir sistemin ekserji analizini yapabilmek için öncelikle sistemin ekserji bileşenleri (potansiyel ve kinetik ekserjileri, fiziksel ve kimyasal ekserjileri) ve de ölü hal kavramları belirlenmelidir.

### 4.5.1. Ekserji Bileşenleri

Sistem halinin çevre haline uzaklığının bir ölçüsü olarak tarif edilen ekserji, incelenen sistemin verilen şartlardan çevre ile aynı şartlara getirilmesi sonucu sistemden elde edilebilecek maksimum yararlı iş şeklinde tanımlanır. Ekserjinin bileşenleri Şekil 4.5'te ki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.5. Sistem sınırından geçen akış halindeki bir maddenin ekserji bileşenleri.

Nükleer ve manyetik etkiler göz ardı edildiğinde bir sistemin toplam ekserjisi dört bileşenden oluşur:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{kin} + \dot{E}x_{pot} + \dot{E}x_{fiz} + \dot{E}x_{kim} \quad (4.1)$$

Burada;  $\dot{E}x_{kin}$ ,  $\dot{E}x_{pot}$ ,  $\dot{E}x_{fiz}$ ,  $\dot{E}x_{kim}$  sırasıyla, kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjiyi ifade etmektedir.

Spesifik ekserji ise aşağıdaki şekilde tanımlanır [78]:

$$\dot{e}x = \dot{e}x_{kin} + \dot{e}x_{pot} + \dot{e}x_{fiz} + \dot{e}x_{kim} \quad (4.2)$$

#### 4.5.1.1. Kinetik Ve Potansiyel Ekserji

Potansiyel enerji ve kinetik enerji mekanik enerjinin formları olup çevrenin sıcaklık ve basınç değerlerinden bağımsızdır. Bu bağlamda bu enerjilerin tamamının işe dönüşmesi mümkündür. Yani potansiyel ekserji ve kinetik ekserji kendi enerji miktarlarına eşittir ve aşağıdaki bağıntılarla ifade edilirler:

$$\dot{e}x_{pot} = gz \quad (4.3)$$

$$\dot{E}x_{pot} = \dot{m}gz \quad (4.4)$$

$$\dot{e}x_{kin} = \frac{1}{2}V^2 \quad (4.5)$$

$$\dot{E}x_{kin} = \frac{1}{2}\dot{m}V^2 \quad (4.6)$$

Bu bağıntılarda, V hız ve z çevreden olan yükseklik farkıdır. Sistemin çevresiyle aynı referans değerlerde olduğu durumlarda  $\dot{e}x_{kin}$  ve  $\dot{e}x_{pot}$  değerleri “0” olur. Bu durumlarda fiziksel ekserji daha çok ön plana çıkar. Birçok mühendislik

uygulamalarında fiziksel ve kimyasal ekserjinin yanında kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilebilir.

#### 4.5.1.2. Fiziksel Ekserji

Sistem çevre ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş, sistemin fiziksel ekserjisi olarak tanımlanır. Bir PV sistemi için ekserji ifadesi, entalpi, entropi ve ek olarak Denklem 4.7’de verildiği gibi kimyasal ekserji bileşenlerini içerir.

$$\Delta H = C_p(T_{hücre} - T_{çevre}) \quad (4.7)$$

Burada,

$\Delta H$ : Entalpi Değişimi (J/kg),

$C_p$ : Özgül ısı değeri (J/kg.K),

$T_{hücre}$ : Güneş pili (panel) sıcaklığı (K)

$T_{çevre}$ : Çevre sıcaklığı (K)

ifade etmektedir. Sistemin toplam entropisi ise Denklem 4.8’de ki gibi yazılabilir.

$$\Delta S = \Delta S_{sistem} + \Delta S_{çevresi} \quad (4.8)$$

$\Delta S$ : Entropi değişimi (J/kg. K)

Bir başka ifadeyle  $\Delta S$ ,

$$\Delta S = C_p \ln \left( \frac{T_{hücre}}{T_{çevre}} \right) - \frac{Q_{kayıp}}{T_{hücre}} \quad (4.9)$$

olduğundan ve  $Q_{kayıp}$ ,

$$Q_{kayıp} = C_p(T_{hücre} - T_{çevre}) \quad (4.10)$$

yukarıdaki gibi yazılabileceğinden dolayı, bir güneş panelinin toplam fiziksel ekserji ifadesi,

$$\dot{E}x = E_{elk} + C_{p(T_{hücre}-T_{çevre})} + T_{çevre} \left( C_p \ln \left( \frac{T_{hücre}}{T_{çevre}} \right) - \frac{Q_{kayıp}}{T_{hücre}} \right) \quad (4.11)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada,

$E_{elk}$ : Eloktranların en yüksek enerji seviyesinde üretilen elektrik enerjisi,

$Q_{kayıp}$ : PV pilde gerçekleşen ısı kaybı

ifade etmektedir.

#### 4.5.1.3. Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji, göz önüne alınan bir maddenin ısı transferi ve kimyasal reaksiyon sonucu çevrede bulunan maddelere dönüşmesine yol açan bir süreçten geçerken (ölü şartlara gelmesi;  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}=298\text{ K}$  ve  $P_0=1\text{ bar}$ ), elde edilebilecek maksimum işi ifade eder.

Kimyasal ekserjinin hesabında birçok yöntem mevcuttur. Sonuçta kimyasal ekserjisi yapılacak maddenin bileşimine, çevre koşullarına ve hal durumuna göre farklı yöntemler ile kimyasal ekserji değeri ifade edilmeye çalışılmıştır.

Kimyasal ekserji, çevre sıcaklığı ve basıncındaki sistemin kimyasal bileşiminin çevre bileşimi ile dengeye ulaşır iken, procesten elde edilebilecek maksimum yararlı iş olarak tanımlandığına göre, hem sistemin kimyasal bileşimi hem de çevrenin kimyasal bileşim bilgileri çok önemlidir. Bir sistemin kimyasal ekserji hesabı, sistem bileşenlerinin hesaplama yönteminin tanımladığı çevre modelinde olup olmamasına bağlıdır. Eğer sistemdeki bileşenler modelin standart çevre tanımında bulunuyorsa, modelin standart kimyasal ekserji tablosundaki değerler kullanılarak, sistemin kimyasal ekserjisi rahatça hesaplanabilir. Eğer sistemdeki bileşenler modelin çevre tanımında bulunmuyorsa, sistemin kimyasal ekserjisi, çevre bileşenlerini elde edecek şekilde gerçekleşecek standart reaksiyon üzerinden hesaplanır [79]. Buradan

hareketle, bir güneş pilinin kimyasal ekserjisi, ideal bir güneş pilinin pv enerji dönüşüm modeli üzerinde Karnot çevrimi esas alınarak ve pilde gerçekleşen fotokimyasal reaksiyon sonucu oluşan elektriksel parametreler hesaba katılarak Denklem (4.12)'deki gibi tanımlanabilir [77].

$$\dot{E}x_{kim} = \left(1 - \frac{T_{hücre}}{T_{güneş}}\right) [(I_{sc} V_{oc} - I_{max} V_{max})] \cdot t \quad (4.12)$$

Burada,

$T_{güneş}$ : Güneş sıcaklığını ( $\sim 6000$  K),

t: Zamanı (s)

ifade etmektedir.

#### 4.5.1.4. Ölü Hal

Sistem referans çevre ile dengede ise sistem ölü haldedir. Ölü halde, sistem, çevre ile mekanik ve ısı dengededir ve çevre ile kimyasal reaksiyona girmez. Bu durumda sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel ekserjileri de sıfırdır.

#### 4.5.1.5. Ekserji Tüketimi

Düzgün akışlı, kararlı, açık bir sistemin kütle, enerji, ekserji ve entropi dengesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_ç = 0 \quad (4.13)$$

$$\sum_g en_g \dot{m}_g - \sum_ç en_ç \dot{m}_ç + \sum_k Q_k - \sum W = 0 \quad (4.14)$$

$$\sum_g ex_g \dot{m}_g - \sum_ç ex_ç \dot{m}_ç + \sum_k \dot{E}x^Q - \sum Ex^W - I' = 0 \quad (4.15)$$

$$\sum_g s_g \dot{m}_g - \sum_ç s_ç \dot{m}_ç + \sum_k \frac{Q_k}{T_k} - \dot{S}_{üret} = 0 \quad (4.16)$$



Denklemlerde yer alan;

$\dot{m}_g$  : Sisteme giren kütleli debi (kg/s)

$\dot{m}_ç$  : Sistemden çıkan kütleli debi (kg/s)

$ex_g$  : Sisteme giren özgül ekserji (J/kg)

$ex_ç$  : Sistemden çıkan özgül ekserji (J/kg)

$\dot{Q}_k$  : Sistem sınırlarına “k” çevresinden gerçekleşen ısı transferi (W)

$\dot{W}$  : Sistemden elde edilen termodinamik güç (W)

$\dot{Ex}^Q$  :  $\dot{Q}_k$  gücüne bağlı ekserji akışı (W)

$Ex^W$  :  $\dot{W}$  gücüne bağlı ekserji akışı (W)

$I'$  : Sistemin ekserji tüketimini (W)

ifade etmektedir.

Sistemin ekserji tüketimi  $I'$ , tersinir proseslerde sıfır ve tersinmez proseslerde sıfırdan büyük olduğuna göre, (4.14) ve (4.15) numaralı denklemler aşağıdaki gibi sadeleştirilebilirler;

$$\sum_k Q_k - \dot{W} = 0 \quad (4.17)$$

$$\sum_k \dot{Ex}^Q - \dot{Ex}^W - I' = 0 \quad (4.18)$$

Proses boyunca tersinmezliklerden kaynaklanan ekserji tüketimi ise,

$$I' = T_{çevre} S_{üret} \quad (4.19)$$

olarak tanımlanır.

#### 4.5.2. Ekserjik Hesaplamalar ve Termodinamik Denklik Bağlılıkları

Bir PV sisteminin enerjisi elektriksel ve termal olmak üzere iki temel bileşene bağlıdır. Fotovoltaik etki ile elektrik üretimi gerçekleşirken aynı zamanda güneş

pilleri de güneş ışınımı nedeniyle ortaya çıkan termal enerjiden dolayı ısınırlar. PV sistem tarafından üretilen elektrik enerjisi, aynı zamanda yararlı amaçlar için kullanılmaya hazır olan elektrik ekserjisi olarak da adlandırılır. PV yüzeylerde ortaya çıkan termal enerji yaralı bir amaç için kullanılmadığından dolayı, çevreye ısı kaybı olarak geçer. Yukarıda adı geçen bileşenler göz önüne alındığı zaman, bir PV sistemin enerji çıkışı şu şekilde belirtilebilir;

$$\dot{E}n_{çıkış} = \dot{E}n_{elk} + \dot{E}n_{termal} = V_{oc}I_{sc} + Q \quad (4.20)$$

Benzer şekilde fotovoltaik sistemin ekserji çıkışı da;

$$\dot{E}x_{çıkış} = \dot{E}x_{elk} + \dot{E}x_{termal} + \dot{E}x_d = \dot{E}n_{elk} + I' \quad (4.21)$$

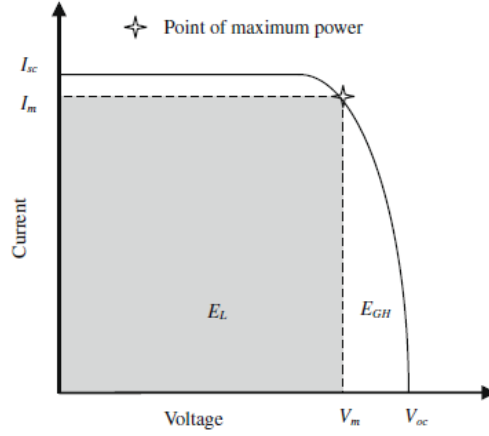
şeklinde olmaktadır. Burada,

$$I' = \sum \dot{E}x_d = \dot{E}x_{d,termal} + \dot{E}x_{d,elek} \quad (4.22)$$

olmaktadır ve hem içsel hem de dışsal kayıpları kapsamaktadır. PV sistemi için iç kayıplar, elektrik enerjisi yıkımıdır ( $\dot{E}x_{d,elektriksel}$ ). Dış kayıplar ise ısı kayıplarıdır ( $\dot{E}x_{d,termal}$ ) ve sayısal olarak  $\dot{E}x_{termal}$ 'e eşittir. Bununla birlikte, bu ısı kayıpları fotovoltaik kollektör (PV/T) sistemi için ısı kazanımı haline gelir ve bu nedenle PV/T sistemleri için ekserji yıkımı denklem (4.23)'de verildiği üzere sadece elektriksel ekserji tüketimi haline gelir.

$$I' = \sum \dot{E}x_d = \dot{E}x_{d,elek} \quad (4.23)$$

PV sisteminin elektriksel ekserjisinin hesaplanırken,  $\dot{E}x_{elek}$ , fotovoltaik yüzey tarafından alınan tüm ekserji içeriğinin maksimum elektriksel ekserjiyi üretmek için tamamıyla kullandığı kabul edilir ( $V_{oc}I_{sc}$ ). Şekil 4.3 referans alınarak bu durum şu şekilde hesaplanabilir;



Şekil 4.5. Fotovoltaik performans için akım ve gerilimin nicel gösterimi.

$$\dot{E}x_{elek} = \dot{E}n_{elek} - I' = V_{oc}I_{sc} - (V_{oc}I_{sc} - V_{max}I_{max}) \quad (4.24)$$

Burada,  $V_{oc}I_{sc}$  elektrik enerjisini temsil etmektedir ve  $(V_{oc}I_{sc} - V_{max}I_{max})$  elektriksel ekserji yıkımını simgelemektedir. Bu iki ifadenin özeti elektriksel ekserjiyi şu şekilde vermektedir;

$$\dot{E}x_{elek} = V_{max}I_{max} \quad (4.25)$$

Sistemin termal ekserjisi fotovoltaik yüzeyinden kaynaklı ısı kaybından meydana gelmektedir ve termodinamik analizlerde şu şekilde gösterilebilir;

$$\dot{E}x_{termal} = \left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{hücre}}}\right) Q \quad (4.26)$$

Burada,  $\dot{Q}$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{Q} = h_{ca}A(T_{\text{hücre}} - T_{\text{çevre}}) \quad (4.27)$$

Denklem (4.27)'de verilen ve güneş pilinden ortama taşınım ve ışınlım ısı transferi katsayısı ( $h_{ca}$ ); rüzgâr hızı, havanın yoğunluğu ve ortam koşulları hesaba katılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [80].

$$h_{ca} = 5,7 + 3,8.v \quad (4.28)$$

(4.21)-(4.27) arasındaki eşitlikler göz önüne alınarak; bir PV sistemin ekserjisi şu şekilde belirlenebilir,

$$\dot{E}x_{PV} = V_{max}I_{max} - \left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{hücre}}}\right) [h_{ca}A(T_{\text{hücre}} - T_{\text{çevre}})] \quad (4.29)$$

PV sistemi için sadece elektrik ekserjisi sistemin ekserjisi olarak hesap edilir. Eşitliğin eksi (-) ifade içermesi, termal enerjinin ısı kaybı olarak ortama verildiğinin ve her halükarda sisteme kayıp olarak yansıtılacağına bir göstergesidir. PV/T sisteminin ekserjisi şu şekilde belirlenebilir;

$$\dot{E}x_{PV/T} = V_{max}I_{max} + \left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{hücre}}}\right) [h_{ca}A(T_{\text{hücre}} - T_{\text{çevre}})] \quad (4.30)$$

Yukarıdaki denklemden de anlaşılacağı gibi PV/T sisteminin ekserjisi, termal ekserji ile elektriksel ekserjinin toplamına eşittir.

Bir PV sistemin enerji verimliliği, sistemden çıkan enerji oranının panel yüzeyinden giren enerji oranına bölünmesi ile aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$\eta_{Enerji} = \frac{\dot{E}n_{out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{V_{oc}I_{sc} + \dot{Q}}{S_T A} \quad (4.31)$$

Güneş pillerinin güç dönüşüm verimi ise, gerçek elektriksel çıkış oranı ile panelin efektif yüzey alanından giren güneş ışınım şiddetine bağlıdır;

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{E}_L}{S_T A} = \frac{V_{max}I_{max}}{S_T A} \quad (4.32)$$

Bu verim aynı zamanda gerçek elektriksel verim olarak da adlandırılır. Güneş pillerinin güç dönüşüm verimi doluluk oranı (FF) ile de aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\eta_{PV} = \frac{FFV_{oc}I_{sc}}{S_T A} \quad (4.33)$$

Maksimum elektriksel verim güneş panelinde üretilen maksimum elektrığe bağlı olarak tanımlanır ve toplam enerji girişi, toplam güneş ışım şiddeti ile ölçülür  $S_T$ .

$$\eta_{m,elek} = \frac{V_{oc}I_{sc}}{S_TA} \quad (4.34)$$

PV pillerin ekserji verimini değerlendirmek için toplam güneş ışınım ekserjisine ihtiyacımız vardır. Güneş pilleri, Karnot kanunun sınırlandırmalarına ve atmosferik etkilere bağlı olan direkt ve difüz güneş ışınım bileşenlerine bağlıdır. Güneş ışınımının ekserjisi  $\dot{E}x_{güneş}$  ( $\dot{E}x_{giren}$  de denir) yaklaşık olarak şu şekilde değerlendirilebilir [81].

$$\dot{E}x_{güneş} = \left(1 - \frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right) S_TA \quad (4.35)$$

Burada, PV sistem yüzeyine güneşin içinden iletilen ısının ekserjisi temsil edilmektedir. Bununla beraber, bazı çalışmalara göre, yukarıdaki denklem, güneş ışınımı ekserji değişimini ve PV yüzeyinden alınan enerjinin, yaklaşık olarak transfer edilen ısının ekserjisinden 0,93 kere daha küçük olduğunu ifade etmektedir [82]. Eğer çevre ve güneş sıcaklıkları sırasıyla 300 ve 5777 K alınırsa, termodinamik verim ifadesi 0,948 olur ki bu da ilk değere oldukça yakındır. Bundan dolayı, bu katsayıyı panel yüzeyinden alınan güneş ışınım ( $S_T$ ) değeri ve panel yüzeyinin efektif alanı (A) ile çarpmak, PV yüzeyi tarafından alınan ekserji değerini verir. Bu formülün sonucu olarak ekserji verimliliği, genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{çıkan}}{\dot{E}x_{giren}} = \frac{\dot{E}x_{giren} - \sum \dot{E}x_d}{\dot{E}x_{giren}} = 1 - \frac{I'}{\dot{E}x_{giren}} \quad (4.36)$$

Son olarak denklem (4.29) ve (4.35)'i denklem (4.36)'nın yerine koyarsak, bir PV sistemi için ekserji verim denklemini elde etmiş oluruz;

$$\psi_{PV} = \frac{V_{max}I_{max} - \left(1 - \frac{T_{çevre}}{T_{hücre}}\right) [h_{ca}A(T_{hücre} - T_{çevre})]}{\left(1 - \frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right) S_TA} \quad (4.37)$$

Benzer olarak PV/T sistemi için ekserji verimi de;

$$\psi_{PV/T} = \frac{V_{max}I_{max} + \left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{hücre}}}\right) [h_{ca}A(T_{\text{hücre}} - T_{\text{çevre}})]}{\left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}}\right) S_{TA}} \quad (4.38)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Ekserji verimi aynı zamanda denklem 4.36'da verildiği gibi tersinmezlikler veya ekserji yıkımı açısından da tanımlanabilir. PV/T sistemleri için ekserji yıkımı, elektriksel ekserji yıkımı olarak düşünülebilir ve PV sistemi için de elektriksel ve termal olarak ki termal ekserji burada daha önce bahsedildiği gibi termal ekserji yıkımı ya da ısı kaybı olarak kabul edilir.

Fujisawa ve Tani (1997) tarafından önerilen elektriksel ekserji verimi ile Sahin ve arkadaşları (2007) tarafından önerilen ekserji verim (elektriksel, termal ve kimyasal) ifadeleri denklem (4.39) ve (4.40)'da sırasıyla karşılaştırılmıştır;

$$\psi_E = \eta_{PV} [1 - 0,0045(T_{\text{hücre}} - 25)] \quad (4.39)$$

$$\psi_S = \frac{\dot{E}x_{fiz} - \left(1 - \frac{T_{\text{hücre}}}{T_{\text{güneş}}}\right) [V_{oc}I_{sc} - V_{max}I_{max}]}{\left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}}\right) S_{TA}} \quad (4.40)$$

Ekserji verimliliği genellikle enerji verimliliğine karşılık gelen bir fonksiyon olarak yazılmaktadır. Fakat ekserjetik verim çoğunlukla enerji veriminden daha anlaşılır bir performansa sahiptir. Pek çok durumda iç tersinmezlikler çok daha önemli ve dış kayıpların giderilmesine kıyasla çok daha zordur.

Panellerdeki temel kayıplar, termalizasyon, bağlanma noktaları, temas şekli ve işlem kombinasyonları gibi pek çok etmene bağlanabilir. Tüm bu iç kayıplar (tersinmezlikler), PV güneş pillerinde elektrik üretimi esnasında oluşur. Pil tarafından emilen ve yayılan ısı akısı ile enerji dengesini göz önüne alacak olursak; öncelikle tersinmez işlemler esnasında indirgenen enerjinin iki nedeni olduğunu

görürüz, Carnot verimi ve emilen ısı akısı tarafından verilen tersinir güç akışı ve dışa verilen güç. Güneş panellerine ilişkin analizlerin bir kısmı termodinamik analiz olduğu için, ısı kayıpları ve Carnot kısıtlamaları temel yüzeysel kayıplar olarak göz önüne alınmalıdır.

Güneş panellerinin ekserjik analizleri, göz önüne alınan çevre şartları ve temel alınan elektriksel parametrelerin yanı sıra, güneşten gelen enerjinin fotonik enerji olarak kabulünden hareketle, panel yüzeyine düşen foton sayısı baz alınarak da gerçekleştirilebilir. Bu durumda, güneş ışınım şiddetine bağlı olarak panelde santimetre kareye düşen foton sayısı ve PV'nin kimyasal enerji potansiyeli ekserjik hesaplamalarda önem kazanır [83].

## BÖLÜM 5

### POLİKRIŞTAL GÜNEŞ PANELİ VE DENEY DÜZENEGİ

Bölüm 3'te güneş pillerinin yapısı ve çalışma mekanizması anlatılmış, güneş pillerinin eşdeğer devresi bir diyot modeli göz önünde bulundurularak pilin elektriksel parametreleri; maksimum gerilim ( $V_{max}$ ), maksimum akım ( $I_{max}$ ), maksimum güç noktası ( $P_{max}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) tanıtılmıştır. Güneş pillerinin verimini ve performansını etkileyen unsurlara değinilmiş, pilin laboratuvar test koşullarındaki performansına ek olarak çevresel faktörlerin (güneş ışınımı, çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı vs) önemi vurgulanmıştır.

Bölüm 4'te ise güneş pillerindeki fotokimyasal enerji dönüşümüne termodinamiksel bir yaklaşımla farklı bir pencereden bakılmış, enerjinin kullanılabilir kısmından hareketle, ekserji kavramına açıklık getirilmiştir. Enerji, ekserji, entropi arasındaki ilişki sistem ve çevresi ile bir bütün olarak ele alınmıştır. Termodinamiğin I. Kanunu ile enerji ve II. Kanunu ile de ekserji analizine girilmiş, ekserji bileşenleri termodinamik denklik bağıntılarına göre förmulize edilmiştir. Güneş ışınımından kaynaklanan ekserji girdisi ve sistemde oluşan elektriksel ekserji bağıntıları elde edilmiş, sistemde tersinmezliklerden kaynaklanan entropi üretimi ile termal ekserji kayıplarına dikkat çekilmiştir. Elde edilen bağıntılar neticesinde enerji ve ekserji verimleri bulunmuş, ekserjik verim hesabında farklı yaklaşımlar da olduğu vurgulanmıştır.

Bu bölümde ise üzerinde deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği silikon tabanlı polikristal bir güneş paneli ele alınmış, kurulan deney düzeneği ve ölçüm yöntemi tanıtılmıştır. Enerji ve ekserji analizlerine temel teşkil eden panelin elektriksel parametreleri ile çevresel unsurlar manuel olarak ölçülmüş, elde edilen veriler ışığında enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır.



## 5.1. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin çatısında yer alan (Şekil 5.1) ve her biri 130 Watt gücündeki toplam 72 adet panelin bir tanesinde ölçümler gerçekleştirilmiş ve veri sonuçları gün gün bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



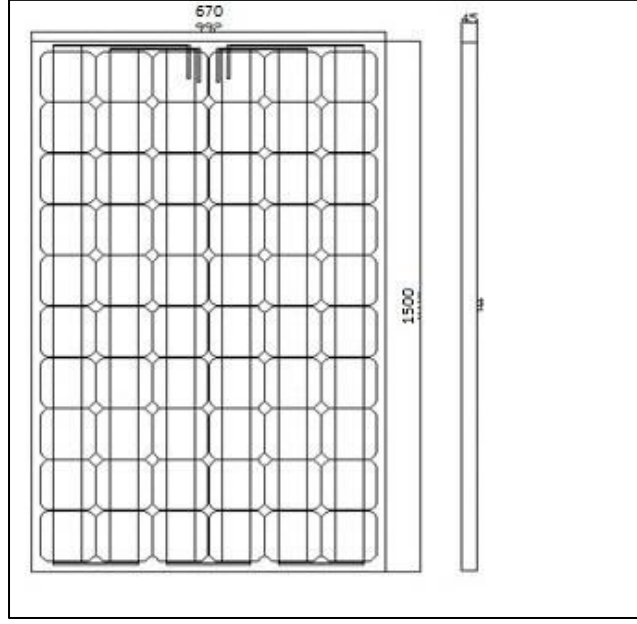
Şekil 5.1. KBÜ Yenilenebilir Enerji Merkezi'nde bulunan PV sistem.

IEC 61215 standartlarına göre laboratuvar şartlarında panel özellikleri 1,5 AM hava kütlesi, 25 °C sıcaklık ve 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım şiddeti altında belirlenmiştir. Buna göre, karakteristik özellikleri Tablo 5.1'de, teknik çizimi ise Şekil 5.2'de gösterilmiş olan IBC PolySol 130 GC kodlu polikristal güneş paneli üzerinde 1 Kasım-30 Kasım 2015 tarihleri arasında, saat 09:00 ile 17:00 arası yarım saatlik periyotlarla 30 gün boyunca ölçümler yapılmıştır. 30 dakika ara ile yapılan ve eş zamanlı 9 farklı parametre okunan deneyde, her gün 17 adet olmak üzere toplam 510 ölçüm gerçekleştirilmiş ve deney süreci boyunca toplam 4590 parametre ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Panelin elektriksel parametreleri;  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ,  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  panel uçlarına bağlanan elektriksel devre sayesinde multimetre ve ampermetreden okunmuştur. Panel sıcaklığı, çevre sıcaklığı, global radyasyon değeri ve rüzgar hızı değerleri ise çeşitli ölçüm cihazları ile ölçülmüştür.

Çizelge 5.1. IBC PolySol 130 GC panel karakteristikleri.

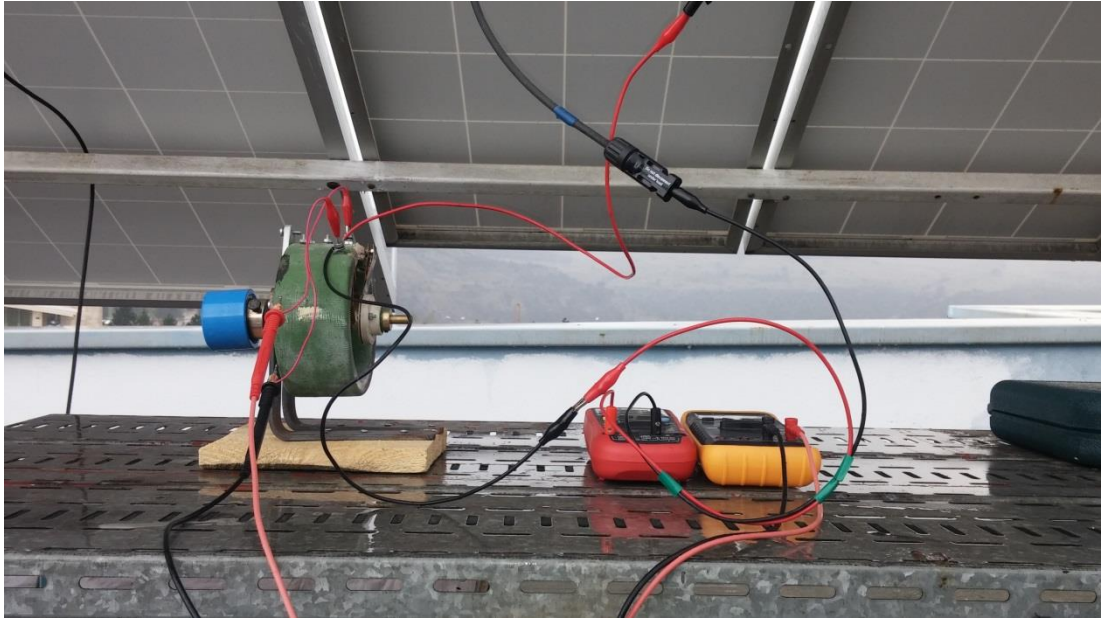
Maksimum Güçteki Gerilim $V_{max}$ (v)	18
Maksimum Güçteki Akım $I_{max}$ (A)	7,23
Maksimum Güç $P_{max}$ (W)	130
Açık Devre Gerilimi $V_{oc}$ (V)	21,9
Kısa Devre Akımı $I_{sc}$ (A)	7,90
Panel Verimi (%)	%12,94
Doluluk Faktörü (FF)	75,22
Güç Toleransı	% $\pm$ 2,5
Panel Tipi	Çoklu Kristal (Poli-Si)
Hücre Sayısı	36
Boyutlar (cm)	150 $\times$ 67 cm <sup>2</sup>
Panel Boyutu (m <sup>2</sup> )	1 m <sup>2</sup>
Aktif Panel Alanı (m <sup>2</sup> )	0,8649 m <sup>2</sup>
Panel Duyarlılığı $S$ ( $\frac{A}{W/m^2}$ )	0,009134

Yukarıda belirtilen özelliklere sahip polikristal güneş panelinin teknik çizimi ise Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Deneyde üzerinde çalışılan panelin şematik gösterimi.

Panel uçlarına bağlanan devrede Şekil 5.3'te görüldüğü üzere Reosta kullanılmış ve bu sayede istenen ölçüde direnç değişimi gerçekleştirilerek akım ve gerilim değerleri ampermetre ve multimetre üzerinden okunabilmektedir.

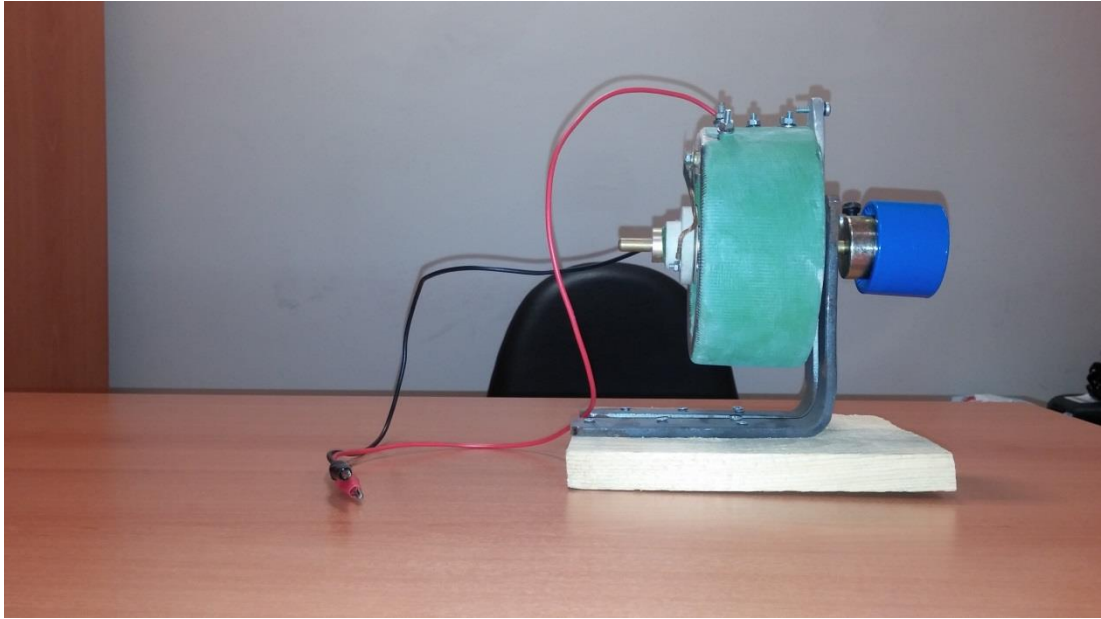


Şekil 5.3. Panel uçlarına bağlanan elektrik devresi.

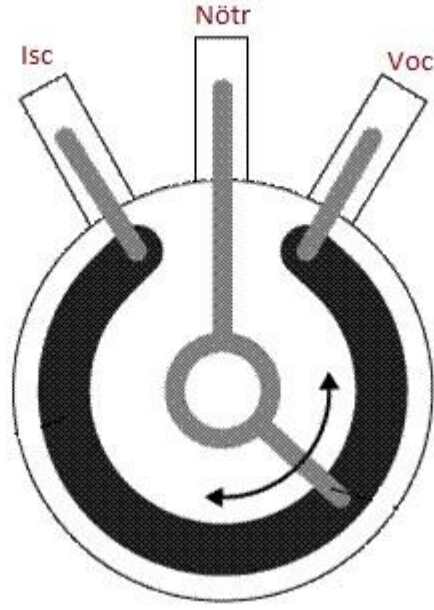
## 5.2. DENEYDE KULLANILAN EKİPMANLAR

### 5.2.1. Reosta

Reosta, iki uçlu ayarlanabilen ve devreden geçen akımı değiştirmeye yarayan dirençlerdir. Bu iki uçtan birbirine bağlı olan kayıcı uç üzerinde gezdirilerek direnç değeri değiştirilir. Panelin elektriksel parametrelerinin ölçümü için öz dirençleri yüksek (Krom-Nikel) tel kullanılarak yapılmış ve  $50\Omega$  direnç kapasitesine sahip çevirmeli reosta kullanılmıştır (Şekil 5.4). Akım ve gerilim değerlerinin doğru ve hassas okunabilmesi için reosta, iki ucu arasında ortasındaki mil yardımıyla yavaş yavaş çevrilmiş ve buna bağlı olarak akım ve gerilim değerlerinin küçük ölçekte değişmesi sağlanmıştır. Reostadaki tellerin sarılı olduğu çemberin üst noktasında belli bir bölge dirençsiz (nötr) alan olduğu için, bu bölgenin sağındaki ilk nokta  $V_{oc}$  değerini vermektedir. Bu noktada direnç değeri en yüksek, üretilen akım değeri en küçük, ve buna paralel olarak gerilim değeri ise en yüksektir. Mil yardımıyla çember üzerinde dairesel hareket yapan ucun, nötr alana gelmeden önceki son noktası ise  $I_{sc}$  değerini vermektedir ki burada okunan düşük direnç değerine karşılık, en yüksek akım değeri okunmaktadır.

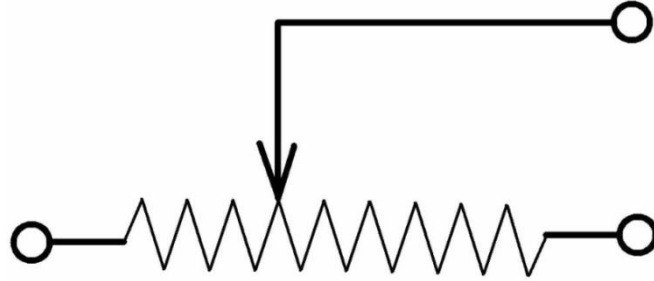


Şekil 5.4. Deneyde kullanılan çevirmeli Reosta.



Şekil 5.5. Reosta üzerinde alınan ölçüm noktalarının şematik gösterimi.

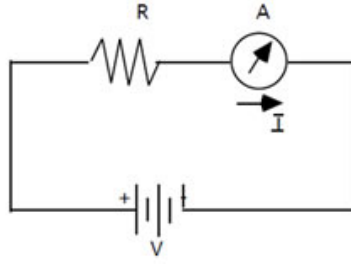
Reosta, üzerinden geçen akımın doğru okunabilmesi için devreye her zaman seri bağlanır ve devrede Şekil 5.6’da ki gibi gösterilir.



Şekil 5.6. Reosta şematik gösterimi.

### 5.2.2. Ampermetre ve Multimetre

Ampermetre, bir elektrik devresinden geçen elektrik akımının şiddetini ölçen cihazlardır. Şekil 5.7’de görüldüğü üzere devreye seri bağlanır. Yapılan deneyde Şekil 5.8’de gösterildiği gibi UNI-T UT61B kodlu dijital ampermetre kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Ampermetrenin devreye seri bağlantısı.



Şekil 5.8. UNI-T UT61B dijital ampermetre.

Multimetreler, ise akım, gerilim ve direnç ölçmeye yarayan çok fonksiyonlu cihazlardır. Devreye bağlantısı şu şekildedir: Panelden gelen siyah prob COM soketine takılır. Ortak uç anlamındadır. Kırmızı prob ise ölçülecek büyüklüğe göre doğru sokete takılmalıdır. Multimetrenin üzerinde yazan V gerilim- A akım - $\Omega$  ise direnç demektir. Multimetre ile devrede gerilim ölçerken, multimetre mod seçicisi, DC akım V simgesi üzerine getirilir. Kırmızı renkli pozitif prob panelin (+) ucuna, siyah renkli Com prob ise negatif (-) ucuna temas ettirilir. Aksi durumda voltajı negatif ölçer. Şekil 5.9 devrede gerilim ölçmek için kullanılan MY-68 kodlu dijital multimetreyi göstermektedir.



Şekil 5.9. MY-68 Dijital Multimetre.

$V_{oc}$  ve  $I_{sc}$ 'nin reostada ki kayıcı uç yardımıyla multimetre ve ampermetreden rahatlıkla okunabildiği bir önceki bölümde belirtilmişti.  $V_{max}$ ,  $I_{max}$  değerlerinin okunabilmesi için ise panelin ölçüm yapılan her saat aralığında  $P_{max}$  noktasının bulunması gerekir. Sistem  $P_{max}$  noktasına getirildiğinde okunan gerilim değeri  $V_{max}$ 'ı akım değeri ise  $I_{max}$ 'ı verecektir. Bunun için, reostanın kayıcı ucu, direncin en çok olduğu noktadan en düşük olduğu noktaya (sağdan sola) doğru yavaşça çevrilir. Bu çevirme esnasında, direncin düşmesiyle birlikte artan akım değeri ve buna karşılık gelen gerilim değerleri birbirleriyle çarpılarak panelin güç noktaları bulunur. Bulunan değerler arasındaki en yüksek güç değeri  $P_{max}$  noktasını, en yüksek değer in çıkmasını sağlayan eşitlikteki çarpanlar ise  $I_{max}$  ve  $V_{max}$  noktalarını vermiş olur.

Yapılan deneyde, ölçüm esnasında reostadaki direncin değişmesine bağlı olarak her saniye değişen akım, gerilim ve güç değerleri kamera vasıtasıyla videoya alınmış, güç noktaları MS excel programında hesaplanarak en yüksek değer çekilmiştir. Bulunan  $P_{max}$  noktaları ile panelin akım-gerilim (I-V) eğrileri her gün ve saat için oluşturulmuştur.

### 5.2.3. Anemometre

Rüzgârın hızını, kuvvetini ve hatta yönünü ölçmekte kullanılan aletlere anemometre denir. Deneyde kullanılan Delta OHM HD2303 kodlu hassas termo-anemometre ile hem panel üzerindeki rüzgâr hızı ölçülmüş, hem de çevre sıcaklığı dijital olarak okunup kaydedilmiştir. Şekil 5.10 kullanılan termo-anemometreyi göstermektedir.





Şekil 5.10. Delta OHM HD2303 kodlu termo-anemometre.

#### 5.2.4. Piranometre

Piranometreler güneş ışınım şiddetini ölçmeye yarayan cihazlardır. Güneşten panele gelen ışınım şiddeti  $W/m^2$  cinsinden ölçülür. Düz bir zemine düşen direkt ışınım perheliometre tarafından güneş izleyici yörünge sistemleri yardımıyla ölçülmektedir. Difüz güneş ışınım şiddeti ölçümü ise izleyici toplar kullanılarak ve piranometre üzerinde gölgelendirme yapılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.11’de deneyde kullanılan MS-410 kodlu piranometre gösterilmiştir.



Şekil 5.11. MS-410 Piranometre.



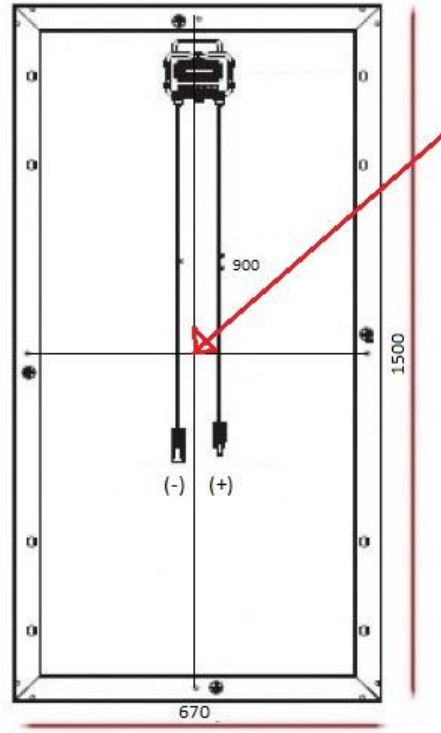
### 5.2.5. Termokupl

Termokupl güneş panelinin arka yüzey sıcaklığının ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır. Panelin arkasında orta noktaya konularak yapılan ölçümler sayesinde panel sıcaklıkları belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Panel sıcaklıklarının belirlenmesinde, birden fazla Termokupl kullanmak pil sıcaklıklarını dolayısı ile panel ortalama sıcaklıklarını daha kesin ve doğru verecektir. Yapılan deneyde Şekil 5.12’de görüldüğü üzere Lascar EL-USB-TC-LCD kodlu Termokupl kullanılmıştır.

Termokupl ile hangi noktadan ölçüm alındığının daha net görülmesi amacıyla deneyde üzerinde çalışılan güneş panelinin arka yüzeyi teknik resim ile çizilmiş ve panelin orta noktası Paint programı aracılığıyla işaretlenmiştir. Şekil 5.13 panel sıcaklık ölçümlerinin alındığı noktayı göstermektedir.



Şekil 5.12. Lascar EL-USB-TC-LCD Termokupl.



Şekil 5.13. Termokupl ile panel sıcaklığının alındığı noktanın şematik gösterimi.

Yukarıda bahsi geçen ölçü aletleri dışında, panelin uçları arasındaki akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi amacıyla iletken kablolar ve probalar kullanılmıştır.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL VERİ SONUÇLARI

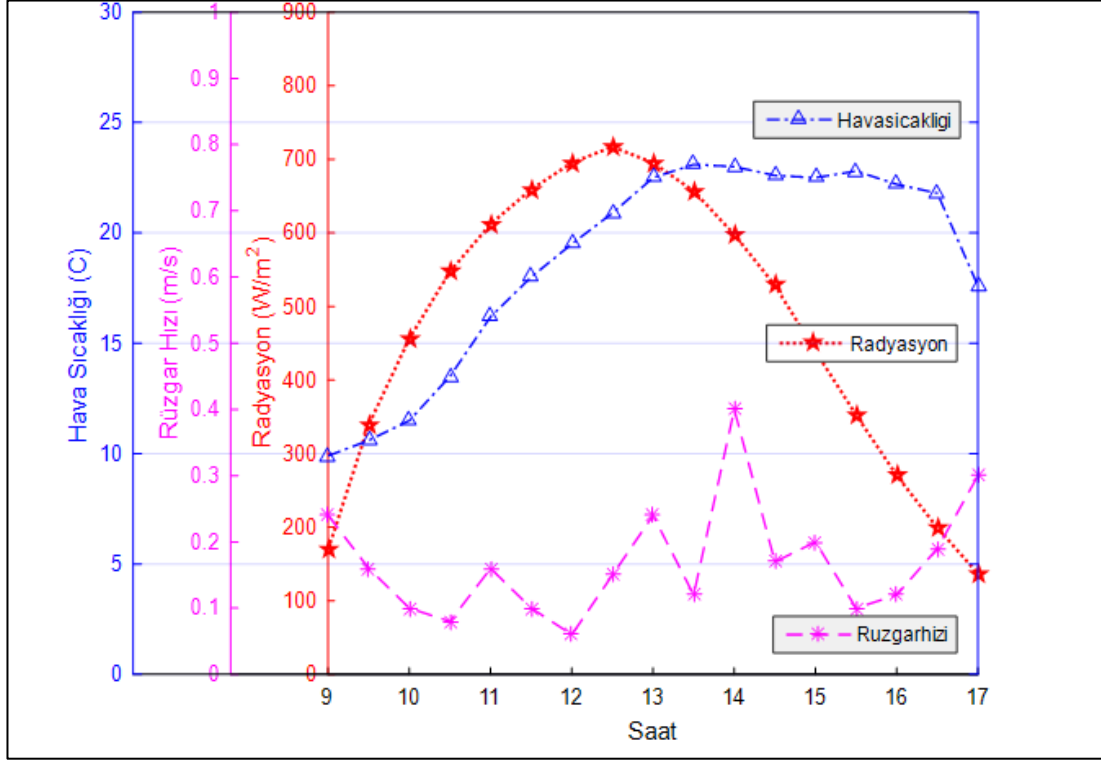
Bölüm 5’te gösterilen deney düzeneğinde, Bölüm 4’te ki her bir parametre için ifade edilen formüller kullanılarak veri sonuçları elde edilmiştir. Kasım ayı boyunca ölçülen ve hesaplanan toplam 16.320 veri MATLAB programına aktarılmış ve ölçümlerin yapıldığı ilk gün olan 1 Kasım için 2 boyutlu grafikler, ay genelindeki değişimlerin gözlenebilmesi için ise 3 boyutlu grafikler türetilmiştir.

Mevsim geçişlerinin yaşandığı ayda iklimsel şartların ve çevre koşullarının panel verimine olan etkisi incelenmiş, bununla birlikte panelin akım-gerilim eğrisi ile enerji ve ekserji verim değişimleri gözlenebilmiştir. 1 Kasım gününe ait panel yüzeyine düşen toplam global radyasyon değeri, panel yüzeyine etki eden rüzgar hızı ve hava sıcaklıklarına ilişkin değişim grafiği Şekil 6.1’de verilmiştir. Buna göre, grafik incelendiğinde ölçümlerin alınmaya başlandığı 09.00’da  $169,7 \text{ W/m}^2$  değeri ile başlayan global radyasyon değeri, 09.00-12.30 saatleri arasında yükselmiş ve saat 12.30’da  $717,10 \text{ W/m}^2$  değeri ile gün içerisindeki en yüksek değere ulaşmıştır. 12.30-17.00 saatleri arasında ise düşüşe geçerek bir sinüs grafiği çizen ışıyım şiddeti, 17.00’da  $136,8 \text{ W/m}^2$  değerine kadar düşmüştür.

Hava sıcaklığındaki değişimlere bakıldığında ise,  $9,9 \text{ }^\circ\text{C}$  ile günün en düşük noktasından başlayan sıcaklık değeri öğle saatlerinde  $23,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ’ye kadar artmış, son ölçümün alındığı 17.00’da ise  $17,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ’ye kadar düşmüştür.

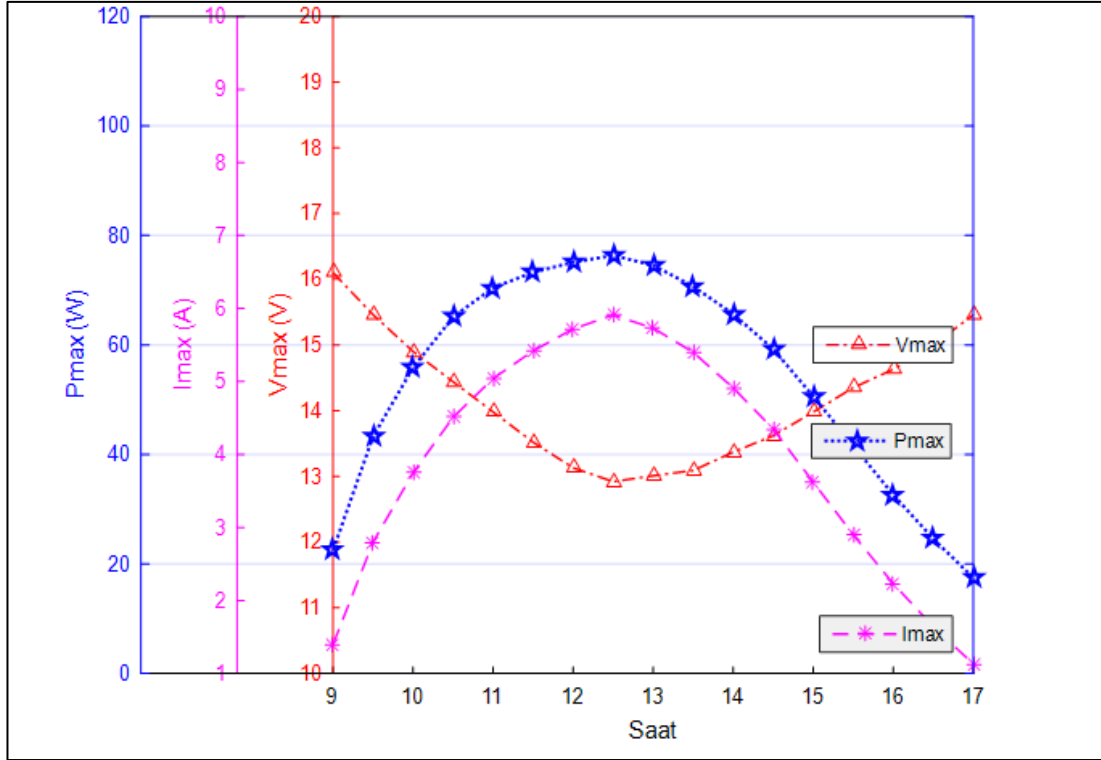
Gün içerisinde değişkenlik gösteren rüzgâr hızının değişimi incelendiğinde, genel itibariyle sabah saatlerinden itibaren giderek azaldığı, öğle saatlerinden 17.00’a kadar ise yükseldiği görülmektedir. 09.00’da anemometreden  $0,24 \text{ m/s}$  olarak okunan rüzgâr hızının gün içerisindeki en düşük noktası  $0,06 \text{ m/s}$  değeri ile 12.00’da gerçekleşmiştir. 12.00-15.30 arası inişli çıkışlı dalgalı bir grafik çizen

rüzgâr hızı, 15.30'dan itibaren tekrar yükselişe geçerek 17.00'da 0,3 m/s değerine ulaşmıştır.



Şekil 6.1. 1 Kasım global radyasyon, hava sıcaklığı ve rüzgar hızı değişim grafiği.

Yukarıda belirtilen çevre koşullarında güneş panelinin elektriksel parametrelerinin değişimi Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Şekil 6.2'de maksimum güç ( $P_{max}$ ), maksimum akım ( $I_{max}$ ) ve maksimum gerilimin ( $V_{max}$ ) gün içerisindeki değişimi incelenirken, Şekil 6.3'te ise kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ile açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )'nin birbirleriyle olan değişimi gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2. 1 Kasım  $P_{max}$ ,  $I_{max}$  ve  $V_{max}$  değişim grafiği.

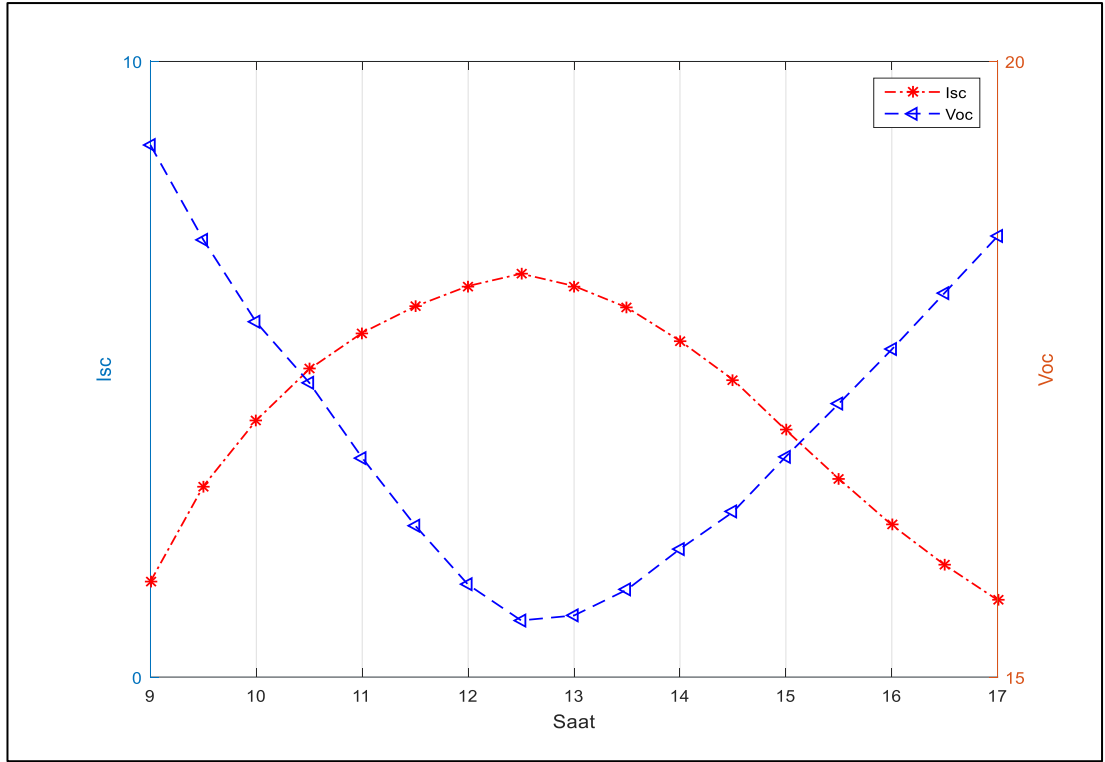
Veri tabanına göre, 1 Kasım saat 09.00'da ampermetreden 1,40 A olarak okunan  $I_{max}$  değeri, 12.30'da 5,91 A değerine ulaşarak gün içerisindeki en yüksek noktaya ulaşmıştır. 12.30-17.00 saatleri arasında düşüşe geçen  $I_{max}$  değeri, Şekil 6.1'de verilen global radyasyon eğrisi ile paralel bir şekilde azalarak 17.00'da 1,13 A ile en düşük seviyeye gelmiştir.

Gün boyunca  $I_{max}$  eğrisi ile ters orantılı olarak değişen  $V_{max}$  eğrisi, 09.00'da 16,1 V ile en yüksek seviyeden başlamış, 09.00-12.30 saatleri arasında kademeli olarak azalarak 12.30'da 12,92 V seviyelerine kadar gerilemiştir. 12.30'dan itibaren voltmetreden okunan değerler gittikçe artış göstermiş ve 17.00'da 15,46 V seviyesine gelmiştir.

$P_{max}$  eğrisi incelendiğinde ise, gün boyunca  $V_{max}$  eğrisinin aksine,  $I_{max}$  eğrisi ile paralel bir şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. 09.00'da 22,54 W olan  $P_{max}$  değeri, 09.00-12.30 saatleri arasında artarak 12.30'da 76,35 W ile tepe noktasına ulaşmıştır ki bu nokta gün içerisindeki en yüksek  $I_{max}$  değerini,  $V_{max}$  için ise en düşük

seviyeyi temsil etmektedir. 12.30-17.00 saatleri arasında orantılı olarak azalan  $P_{max}$  değeri, gün içerisindeki en düşük seviyeye 17,46 W ile 17.00'da gelmiştir.

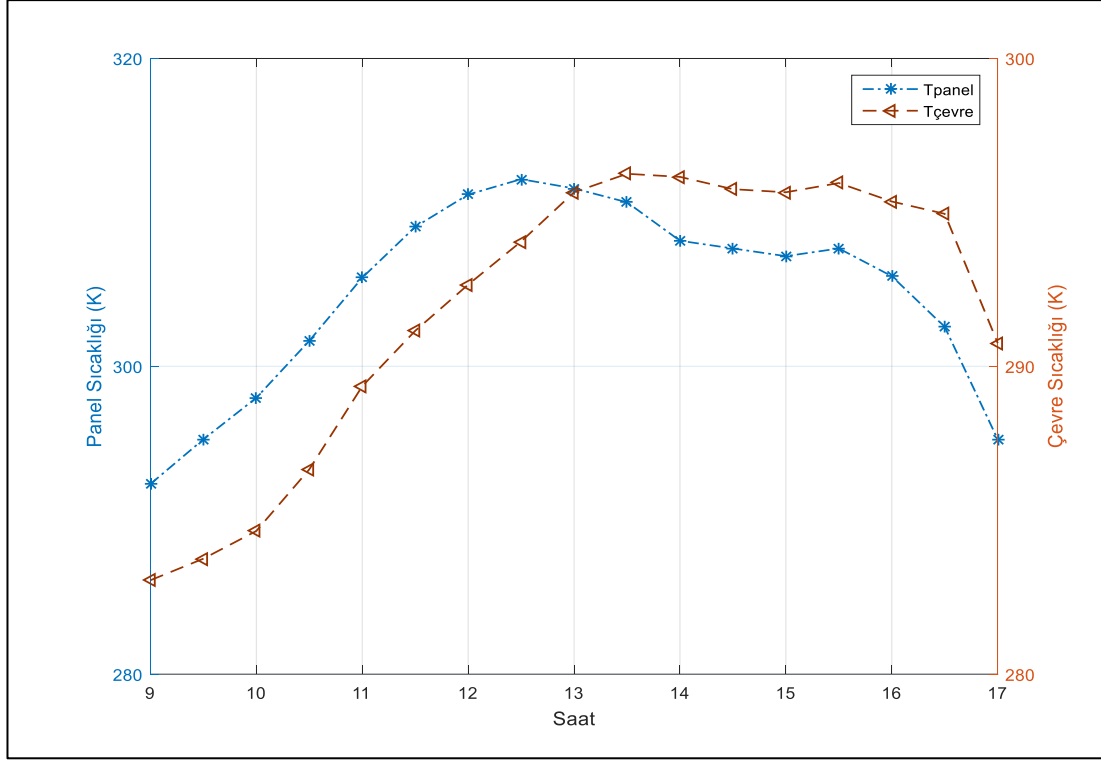
$I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değişiminin gözlemlendiği Şekil 6.3'te de Şekil 6.2'de ki gibi bir benzerlik söz konusudur. Örneğin, 09.00'da 1,55 A ile başlayan  $I_{sc}$  değeri, 12.30'da 6,55 A değerine yükselmiş, 17.00'da ise 1,25 A'e kadar düşmüştür. Buna karşılık,  $V_{oc}$  değeri 09.00'da 19,32 V ile tepe noktasında olmasına karşın, 12.30'da akımın artmasına bağlı olarak 15,46 V'a kadar düşmüştür. 12.30'dan itibaren tekrar artan  $V_{oc}$  değeri 17.00'da 18,58 V'a kadar çıkmıştır.



Şekil 6.3. 1 Kasım Isc ve Voc değişim grafiği.

Laboratuvar test koşullarında  $P_{max}$  değeri 130 W,  $I_{max}$  değeri 7,23 A ve  $V_{max}$  değeri 18 V olan bir güneş panelinin Şekil 6.1'de verilen ortam koşulları altındaki akım, gerilim ve güç eğrileri Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Çevre sıcaklığının en yüksek olduğu öğle saatlerinde akım ve güç değerleri de en yüksek seviyeye ulaşmış, gerilim değerleri ise en düşük seviyede kalmıştır. Bununla birlikte, çevre sıcaklığının yanı sıra güneş panelinin performansını belirleyen bir diğer önemli parametre ise panel sıcaklığıdır. Panel sıcaklığının hem panel verimine hem de panelin enerji

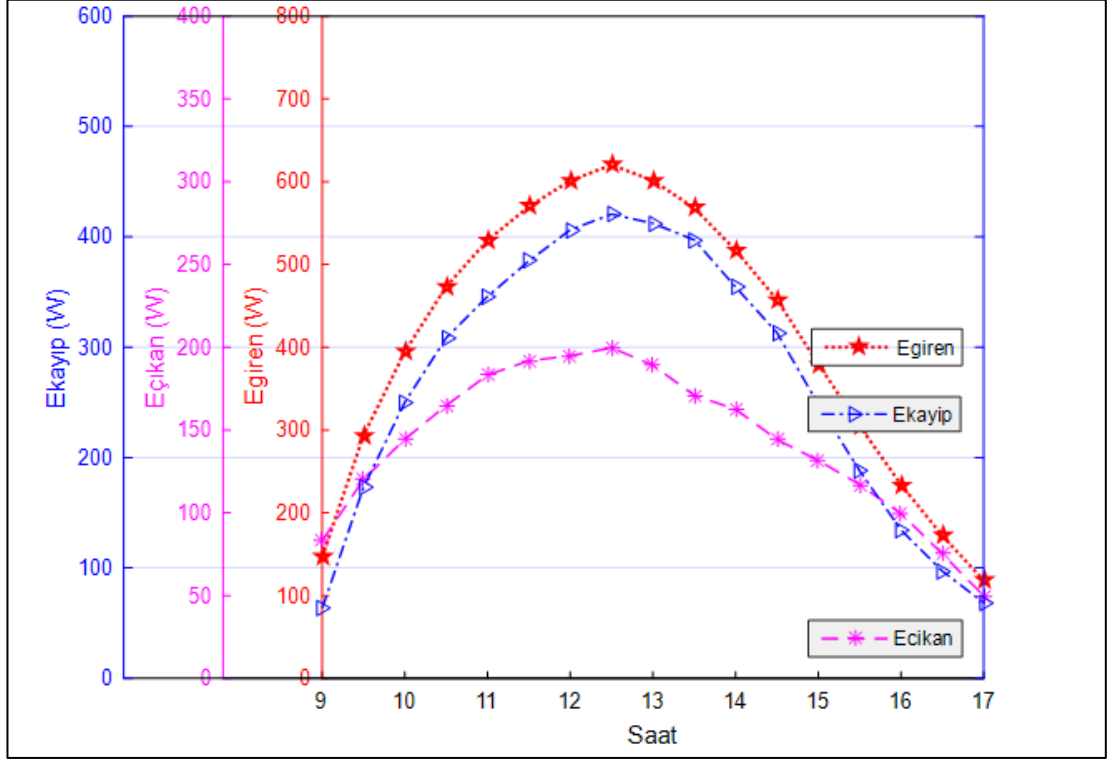
denmesine etkisi vardır. Bu etki ilerleyen kısımlarda gösterilecektir. Şekil 6.4 panel sıcaklığı ile çevre sıcaklığının değişimini göstermektedir.



Şekil 6.4. 1 Kasım panel ve çevre sıcaklıkları değişim grafiği.

09.00'da 292,35 K (19,2 °C) olarak ölçülen panel sıcaklığı öğle saatlerine doğru artış göstermiş ve tepe noktası 312,15 K (39 °C) ile saat 12.30'da gerçekleşmiştir. Bu noktadan sonra yavaşça düşen panel sıcaklığı saat 16.30'dan sonra hızlı bir düşüş göstererek 17.00'da 295,25 K (22,1 °C)'ye kadar gerilemiştir. Panel sıcaklığı ile yaklaşık aynı değişimi gösteren ve saat 13.30'dan sonra düşen çevre sıcaklığı yine 16.30 itibariyle hızlı bir şekilde düşerek 17.00'da 290,75 K (17,6 °C)'ye gerilemiştir. Panelin enerji dengesi 1 Kasım gününe ait veri tabanındaki panelin elektriksel parametre çıktıları ile çevresel faktörlerin formulize edilmesi neticesinde panele giren enerji, çıkan enerji ve enerji kayıpları olarak hesaplanmış ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Panele giren enerji, yarım saat ara ile ölçülen global radyasyon değerinin ısı transferinin gerçekleştiği panel efektif alanı ile çarpılarak bulunmuştur. Panelde oluşan ya da çıkan enerji için ise,  $I_{sc} \times V_{oc} + \dot{Q}$  formülü kullanılmıştır. Burada  $\dot{Q}$ , ısı kaybı oranını temsil etmektedir ve Kelvin cinsinden panel ve çevre sıcaklıkları ile taşınım ve ışınım ısı transferi katsayısı  $h_{ca}$ 'nın Denklem (4.27)'de

yerine konulması ile hesap edilmiştir. Güneşten gelen ışınım şiddetine bağlı olarak panel yüzeyine giren enerji ile panelde oluşan enerji arasındaki fark, enerji kaybı olarak hesap edilmiş ve şekildeki gibi verilmiştir.



Şekil 6.5. 1 Kasım enerji değişim grafiği.

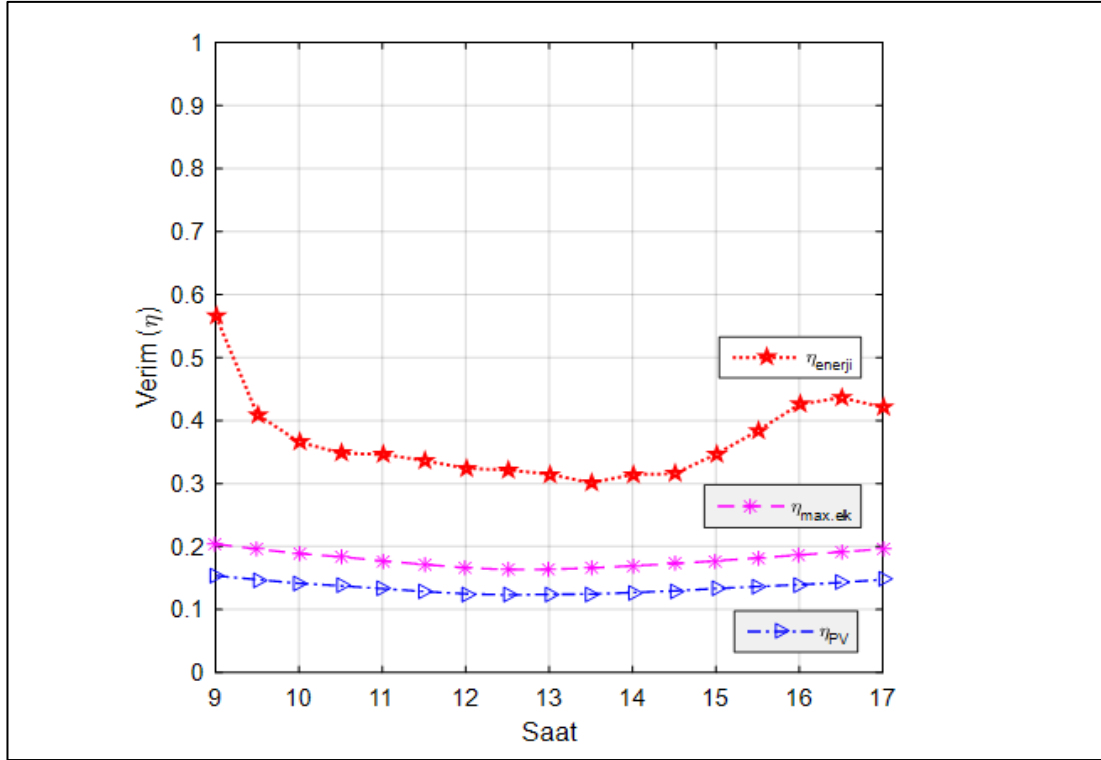
Enerji değişim grafiği incelendiğinde, sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru artan hava sıcaklığı ve panel yüzeyine düşen radyasyon oranının artmasına bağlı olarak, enerji girdisinin arttığı ve tepe noktası 12.30 olacak şekilde bir eğri çizdiği görülmektedir. 09.00'da 146,7 W olarak hesap edilen enerji girdisi, 12.30'da 620,2 W noktasına kadar yükselmiş ve saat 17.00'da 118,3 W'a kadar düşmüştür.

Panelden çıkan enerji incelendiğinde ise,  $E_{giren}$  eğrisinde olduğu gibi 09.00-12.30 saatleri arasında kademeli olarak artarak tepe noktasının saat 12.30'da gerçekleştiği görülmektedir. Ancak 12.30'dan sonra, artan rüzgâr hızı ve gerilime mukabil gittikçe azalan akım değeri ile yine azalan panel sıcaklığı neticesinde daha keskin düşüşler yaşanmıştır.



Enerji kayıp eğrisi de değişik  $E_{\text{çıkan}}$  değerlerine karşılık, giren enerji eğrisi ile yaklaşık aynı oranda değiştiği görülmektedir. 09.00'da 63,63 W ile başlayan enerji kaybı eğrisi öğle saatlerine doğru artmış, 12.30'da 420,8 W ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu noktadan sonra panelde oluşan enerji değerlerine bağlı olarak daha hızlı bir düşüş yaşanmış ve saat 17.00'da 68,51 W seviyesine gelmiştir.

Yukarıda maksimum ve minimum noktaları verilen ve enerji dengesi Şekil 6.5'te gösterilen 1 Kasım gününün, bu veriler ışığındaki verim değerleri ise Şekil 6.6'da verilmiştir. Burada grafikte gösterilen  $\eta_{\text{enerji}}$  panelin enerji verimini,  $\eta_{\text{mak. elek}}$  panelin maksimum elektriksel verimini ve  $\eta_{\text{PV}}$  ise panelin güç dönüşüm verimini ifade etmektedir. Buna göre, grafiğin analizi yapıldığında ölçümlerin yapıldığı 09.00-17.00 saatleri arasında enerji veriminin 0,3 ile 0,56 arasında değişerek elektriksel verimden ve panel veriminden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Zaman dilimi olarak en yüksek enerji verimi 09.00'da, en düşük enerji verimi ise çevre sıcaklığının en yüksek olduğu 13.30'da gerçekleşmiştir. Buradan enerji verim hesabına birden fazla parametre etki etmesine rağmen, düşük sıcaklıkta enerji verimin yüksek, yüksek sıcaklıkta ise düşük olacağı anlamı çıkmaktadır. Saat 16.30'dan sonra enerji veriminin bir miktar düşmesinin sebebi ise, bu noktada panel sıcaklığının 16.30-17.00 saatleri arasında keskin bir düşüş göstererek ısı kaybının 16.30 noktasına oranla azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

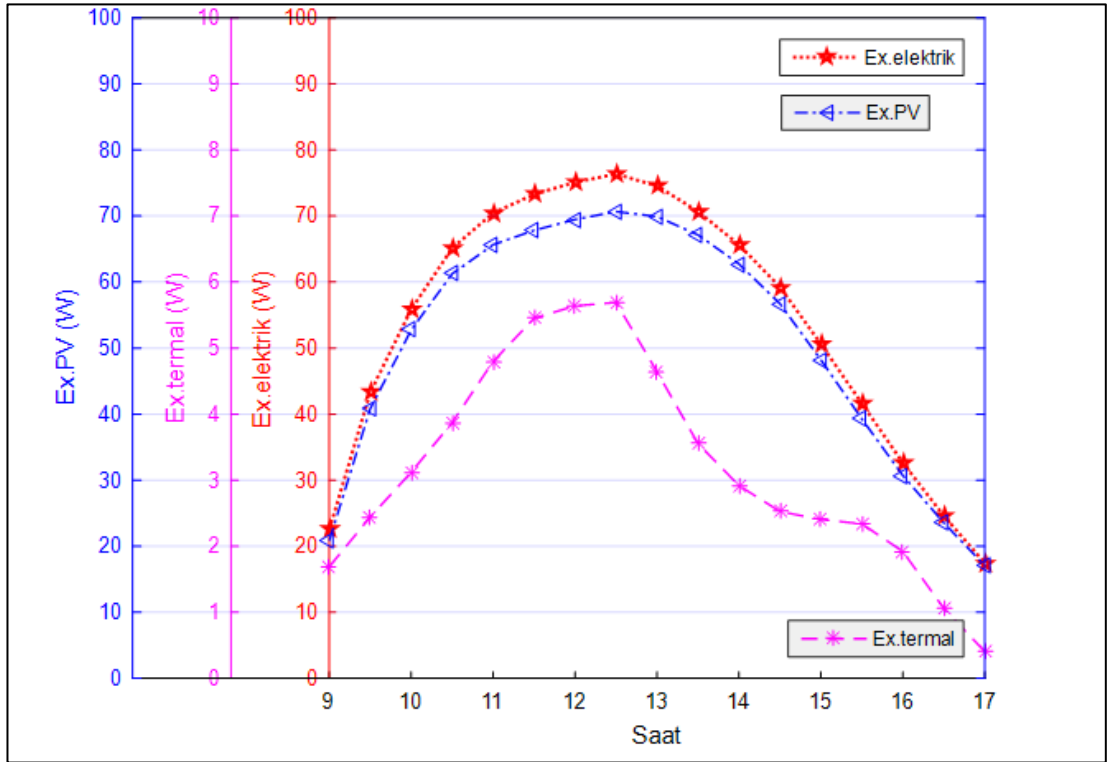


Şekil 6.6. 1 Kasım  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{maksimum elektriksel}}$  ve  $\eta_{\text{PV}}$  değişim grafiği.

$\eta_{\text{mak. elek}}$  ve  $\eta_{\text{PV}}$  verim ifadelerine bakıldığında ise birbirine yakın iki paralel eğri oluşturdukları görülmektedir.  $\eta_{\text{mak. elek}}$  panelin  $I_{\text{sc}}$  ve  $V_{\text{oc}}$  gibi panelin elektriksel parametrelerine doğrudan bağımlı olduğu için sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru azalan ve bu noktadan 17.00'a kadar tekrar artan bir grafik çizmiştir. Spesifik olarak  $\eta_{\text{mak.elek}}$  verim değerleri için minimum değer 0,163 ile saat 12.30'da gerçekleşirken, maksimum değer ise 0,204 ile 09.00'da gerçekleşmiştir. 17.00'da ise bu değer 0,196 seviyesinde kalmıştır.

Panelin güç dönüşüm verimi,  $\eta_{\text{PV}}$ 'de de aynı durum söz konusudur.  $\eta_{\text{PV}}$  değeri için minimum nokta; global radyasyon, panel sıcaklığı,  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{sc}}$  değerlerinin en yüksek,  $V_{\text{max}}$  ve  $V_{\text{oc}}$  değerlerinin en düşük olduğu 12.30'da 0,123 olarak gerçekleşmiştir. Maksimum  $\eta_{\text{PV}}$  değeri ise 09.00'da 0,153 olarak görülmektedir. 17.00'da ise bu değer 0,147 olarak kaydedilmiştir. Buna göre yüzde olarak ifade etmek istenirse 1 Kasım günü için panel %12,3 ile %15,3 arası verimle çalışmıştır.

Önceki kısımlarda panelin çalışma ortamına ait çevresel faktörlerin, panel elektriksel parametrelerinin ve enerji dengesinin birbirleriyle olan değişimi verilmiştir. 1 Kasım için panele ait ekserji değişimine ilişkin grafik ise Şekil 6.7’de verilmiştir. Burada  $\dot{E}_{x_{\text{elektrik}}}$  panelde üretilen elektriksel ekserjiyi,  $\dot{E}_{x_{\text{termal}}}$  panelde meydana gelen ısı kaybı nedeniyle oluşan termal ekserji kaybını ve  $\dot{E}_{x_{\text{PV}}}$  panelin ekserji çıktısını göstermektedir.



Şekil 6.7. 1 Kasım panel ekserji değişim grafiği.

Grafik incelendiğinde,  $\dot{E}_{x_{\text{elektrik}}}$ 'in 17,46 W ile 76,35 W arasında değişerek gün içerisinde sinüs grafiği çizdiği görülmektedir. 09.00'da 22,54 W olan  $\dot{E}_{x_{\text{elektrik}}}$ , 12.30 itibariyle en yüksek değere ulaşmış ve saat 17.00'da ise 17,46 W ile minimum seviyeye gelmiştir. Burada elektriksel ekserjinin Şekil 6.2'de olduğu gibi panelde üretilen akıma bağlı olarak öğle saatlerinde arttığı ve sıcaklık düştükçe de azaldığı görülmektedir.

$\dot{E}_{x_{\text{termal}}}$  eğrisi incelendiğinde ise 0,4 W ile 5,69 W arasında değiştiği görülmektedir. 09.00'da 1,69 W ile başlayan  $\dot{E}_{x_{\text{termal}}}$ , Şekil 6.5'de ki enerji kaybı eğrisinde olduğu gibi 12.30'da en yüksek değere ulaşmıştır. 17.00'da ise 0,4 W ile en düşük seviyeye

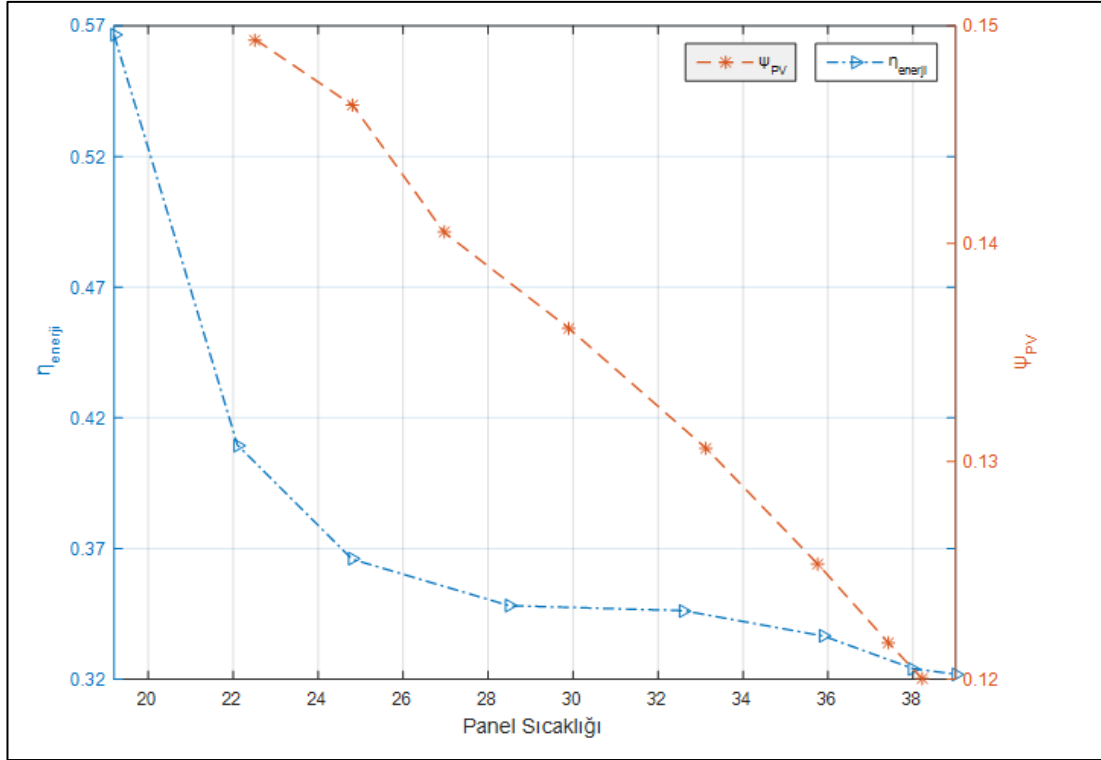
gelmiştir. Burada panelde meydana gelen termal ısı kaybının sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru arttığı ve 12.30'dan 17.00 arası azaldığı görülmektedir.

Panelin ekserji çıktısı da  $\dot{E}_{X_{\text{elektrik}}}$  eğrisinde olduğu gibi 12.30 tepe noktası olacak şekilde öğle saatlerine doğru artmış, 12.30-17.00 arası ise azalmıştır. 09.00'da 20,84 W olan  $\dot{E}_{X_{PV}}$ , 12.30'da 70,66 W'a ulaşmış ve 17.00'da ise 17,06 W'a düşmüştür.

Yukarıda verilen veriler ışığında enerji ve ekserji verim hesabı yapılmış ve Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Panel sıcaklığına göre enerji ve ekserji verim değişimi birbirleriyle kıyaslanarak yorumlanmıştır. Grafığe göre 19 °C ile 39 °C arasında değişen panel sıcaklığına göre enerji verimi 0,321 ile 0,566 arasında değişirken, ekserji verimi ise 0,12 ile 0,151 arasında değişmiştir. Panel sıcaklığı 19 °C'den 22 °C'ye çıktığında enerji verimi 0,566'dan hızla 0,4 seviyesine düşmüş ve bu noktadan sonra 39 °C'ye kadar düşük miktarlarda azalmıştır. Panel sıcaklığı 39 °C olduğunda ise enerji verimi minimum seviyeye olan 0,321'e gerilemiştir.

Ekserji verimi incelendiğinde ise enerji verim eğrisine kıyasla, panel sıcaklığına bağlı olarak lineer olarak azaldığı görülmektedir. Panel sıcaklığı 19 °C iken maksimum ekserji verimi 0,151 iken, panel sıcaklığı 39 °C'ye ulaştığında bu değer 0,12'ye kadar gerilemiştir.

Grafikten de anlaşılacağı üzere sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru çevre sıcaklığı ve buna bağlı olarak artan panel sıcaklığı neticesinde enerji verimi ve panel verimi azalmaktadır. Ekserji verimi de bu aralıkta doğrusal olarak azalmaktadır. Öğle saatlerinden sonra panel sıcaklığı düştüğünden dolayı enerji ve ekserji verimlerinde de tekrar artış görülmektedir.

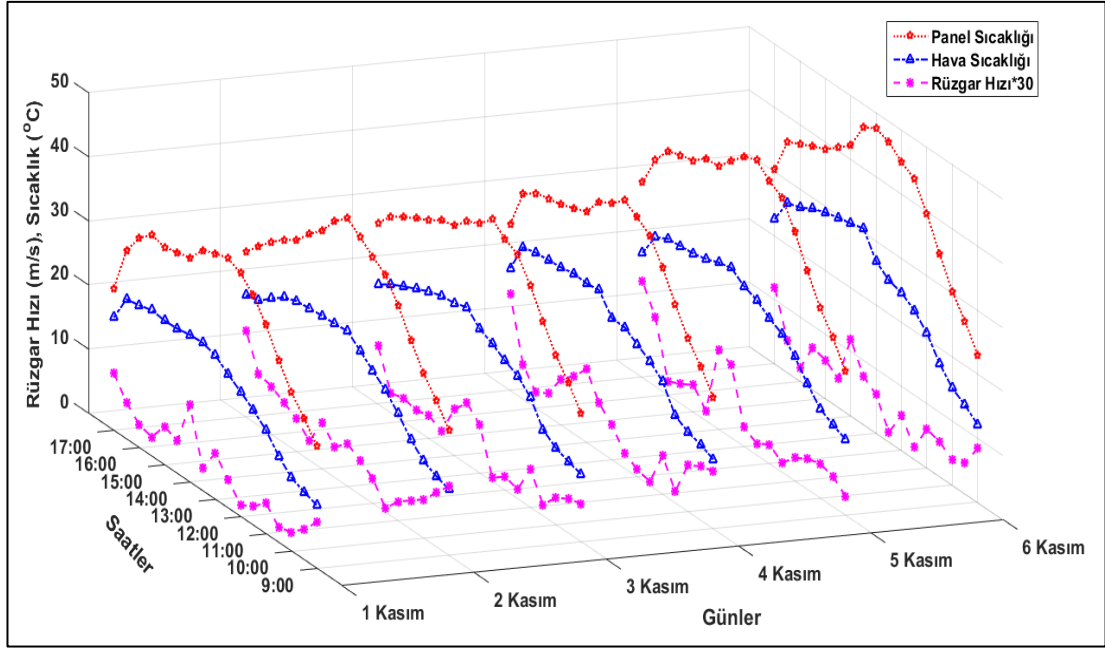


Şekil 6.8. 1 Kasım panel sıcaklığına göre enerji ve ekserji verimi değişim grafiği.

### 6.1. 1 KASIM İLE 6 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI

1 Kasım'a ait ölçülen ve hesaplanan tüm değişkenler önceki bölümde verilmişti. Ay genelinde 30 gün süre ile ölçümler alındığından dolayı, tüm parametrelerin gün içerisindeki değişimini vermek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle, ay geneli 5 bölüme ayrılarak birbirleriyle bağlantılı her parametre 3 boyutlu grafikler halinde verilmiştir. Bu kapsamda, bu bölümde 1 Kasım ile 6 Kasım arasındaki veri sonuçları bir bütün halinde incelenecektir. Şekil 6.9 panel sıcaklığı, hava sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çevresel faktörlerin değişim grafiğini göstermektedir.

Grafiğe göre 1 Kasım ile 6 Kasım arasında en düşük panel sıcaklıkları; 1 Kasımda 19,2 °C, 2 Kasımda 19,5 °C, 3 Kasımda 20,1 °C, 4 Kasımda 19,5 °C, 5 Kasımda 22,5 °C ve 6 Kasımda 23 °C ile saat 09.00'da gerçekleşmiştir.



Şekil 6.9. 1Kasım ile 6 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.

En yüksek panel sıcaklıkları ise 1 Kasımda 39 °C ile saat 12.30'da, 2 Kasımda 41,8 °C ile 13.00'da, 3 Kasımda 40,9 °C ile saat 12.30'da, 4 Kasımda 41,8 °C ile 13.00'da, 5 Kasımda 46 °C ile 12.30'da, 6 Kasımda 47,5 °C ile saat 13.00'da gözlemlenmiştir.

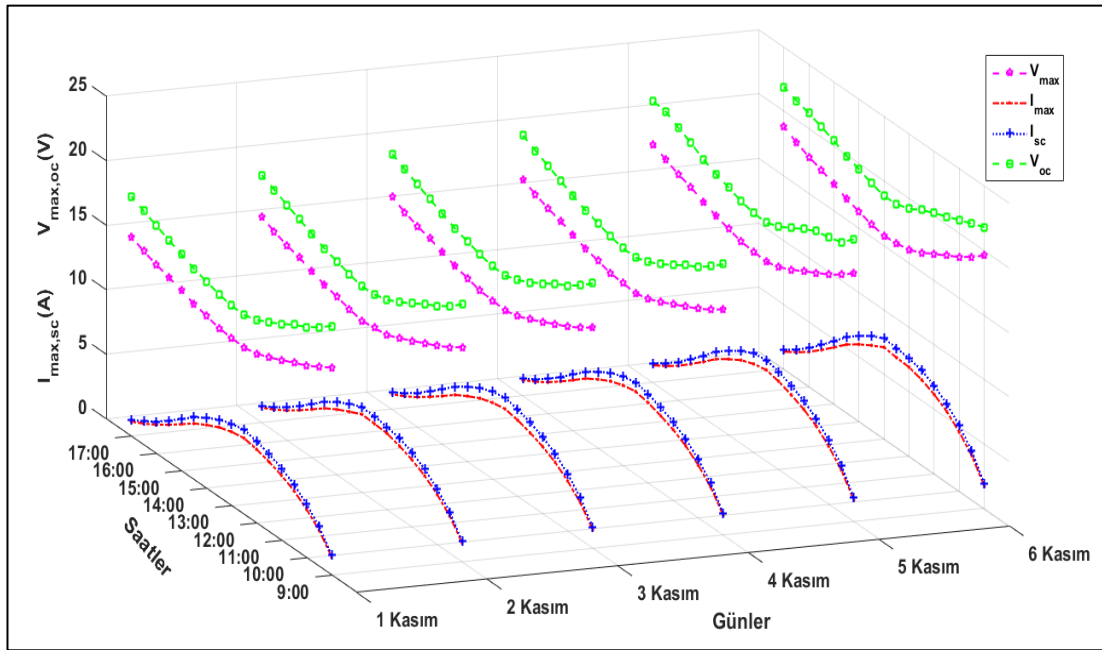
Aynı günlerde en düşük hava sıcaklıkları 1 Kasımda 9,9 °C, 2 Kasımda 10,3 °C, 3 Kasımda 10,6 °C, 4 Kasımda 10,8 °C, 5 Kasımda 11,9 °C ve 6 Kasımda 12,1 °C ile saat 09.00'da gerçekleşmiştir.

En yüksek hava sıcaklıkları ise; 1 Kasımda 23,1 °C ile 13.30'da, 2 Kasımda 24,2 °C ile 13.00'da, 3 Kasımda 24,5 °C ile 13.30'da, 4 Kasımda 25,1 °C ile 13.30'da, 5 Kasımda 26,5 °C ile 13.30'da ve 6 Kasımda 30,6 °C ile saat 13.30'da gözlemlenmiştir.

Grafikteki rüzgâr hızları incelendiğinde, en düşük değerler 1 Kasımda 0,06 m/s ile 12.00'da, 2 Kasımda 0,02 m/s ile 11.30'da, 3 Kasımda 0,02 m/s ile 12.30'da, 4 Kasımda 0,02 m/s ile 11.30'da, 5 Kasımda 0,05 m/s ile 14.30'da ve 6 Kasımda 0,05 m/s ile 12.30'da gerçekleşmiştir.

En yüksek rüzgâr hızları ise 1 Kasımda 0,4 m/s ile saat 14.00'da, 2 Kasımda 0,45 m/s ile 17.00'da, 3 Kasımda 0,3 m/s ile 17.00'da, 4 Kasımda 0,45 m/s ile 17.00'da, 5 Kasımda 0,5 m/s ile 17.00'da ve 6 Kasımda 0,4 m/s ile 14.00'da gözlemlenmiştir.

Panelin bulunduğu ortama ilişkin çevresel faktörlerin değişim grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir. 1 Kasım ile 6 Kasım arası panelin elektriksel parametrelerine ilişkin değişim grafiği ise Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. 1 Kasım ile 6 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği.

Grafik incelendiğinde 1 Kasım ile 6 Kasım arasında  $V_{oc}$  değerleri  $V_{max}$  değerlerinden büyük olmak üzere, sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru azalan ve 17.00'a kadar artan bir eğri oluşturmuşlardır. İlgili aralıkta en düşük  $V_{oc}$  değeri 19,32 V ile 1 Kasım saat 09.00'da gerçekleşirken, en yüksek değer ise 21,9 V ile 5 Kasım 09.00'da gerçekleşmiştir.  $V_{max}$  eğrisinde ise en düşük değer 16,1 V ile 1 Kasım 09.00'da, en yüksek değer ise 19,6 V ile 6 Kasım 09.00'da gözlemlenmiştir.

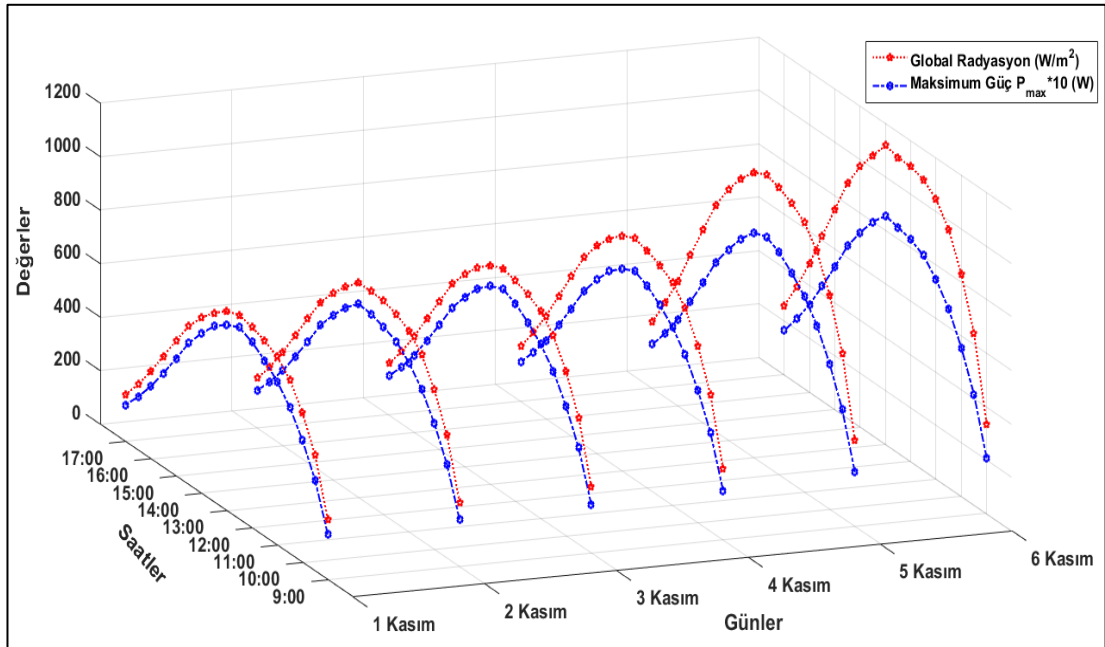
Akım değerleri incelendiğinde  $I_{max}$  eğrisi ile  $I_{sc}$  değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. En düşük  $I_{sc}$  değeri 1,55 A ile 1 Kasım 09.00'da, en yüksek değer ise 7,83 A ile 5 Kasım 12.30'da gerçekleşmiştir.  $I_{max}$  eğrisinde en yüksek

değer 7,1 A ile 6 Kasım 13.00'da, en düşük değer ise 1,4 A ile 1 Kasım 09.00'da gözlemlenmiştir.

Panele ait maksimum güç ile global radyasyon eğrisinin aynı aralıkta değişim grafiği ise Şekil 6.11'de verilmiştir.  $P_{max}$  verileri 10 ile çarpılarak radyasyon verileri ile kıyaslanmıştır. Buna göre, 1 Kasım ile 6 Kasım arasında radyasyon ve maksimum güç verileri birbirine paralel çıkmıştır. Her bir gün için parametrelerin tepe noktası değişmesine rağmen, sabah ile öğle saatleri arasında ve öğle ile akşam saatleri arasındaki eğimler yaklaşık aynıdır.

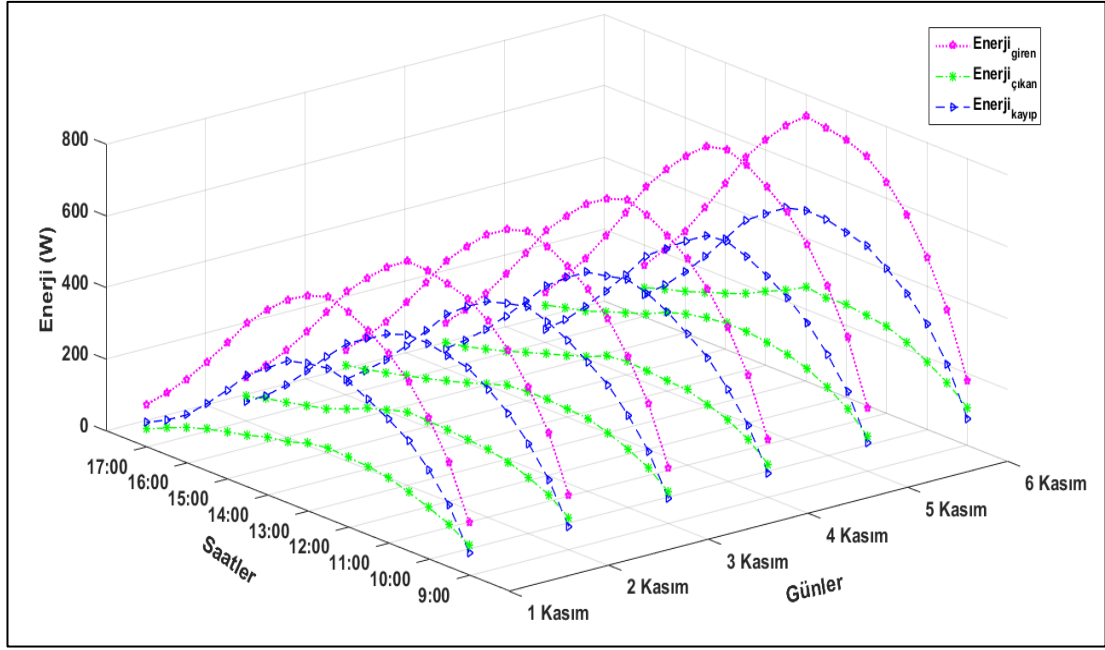
Bu aralıkta en düşük radyasyon değeri  $136,8 \text{ W/m}^2$  ile 1 Kasım 17.00'da, en yüksek değer ise  $857,2 \text{ W/m}^2$  ile 5 Kasım 12.30'da gerçekleşmiştir. En düşük  $P_{max}$  değeri ise 17,46 W ile 1 Kasım saat 17.00'da, en yüksek değer ise 111,68 W ile 6 Kasım 13.00'da gözlemlenmiştir.

Panele ait elektriksel parametreler ile çevresel faktörlerin enerji denklemlerinde yerine yazılması ile hesap edilmiş enerji değişim grafiği Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.11. 1 Kasım ile 6 Kasım arası global radyasyon ve maksimum güç değişim grafiği ( $P_{max}$  değerleri 10 ile çarpılmıştır).



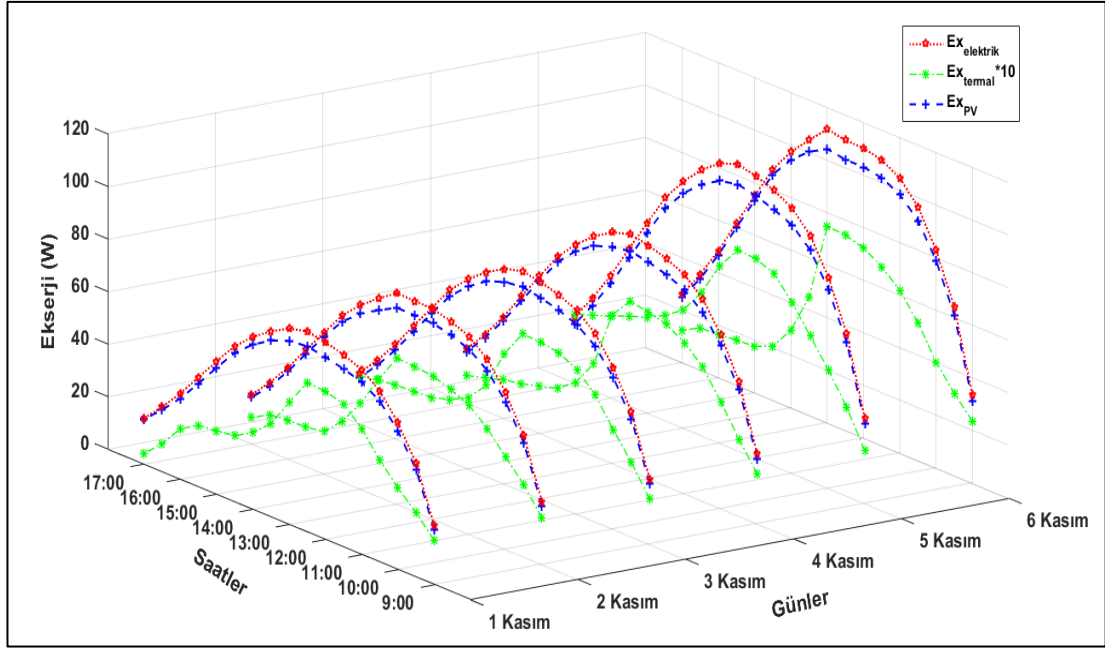


Şekil 6.12. 1 Kasım ile 6 Kasım arası panel enerji değişim grafiği.

1 Kasım ile 6 Kasım arasında giren enerji, çıkan enerji ve enerji kaybı olarak ifade edilen parametreler şekildeki gibi verilmiştir. Buna göre, bu aralıkta  $E_{giren}$  ile  $E_{kayıp}$  eğrisi birbirine çok yakın sinüs eğrileri gibi görünmesine karşın, farklı günlerdeki  $E_{çikan}$  değerlerine bağlı olarak iki eğri arasındaki fark değişmektedir. İlgili aralıkta son günlere doğru panele enerji girdisi artmıştır.

$E_{giren}$  verileri incelendiğinde en düşük değer 118,3 W ile 1 Kasım saat 17.00'da, en yüksek değer ise 741,4 W ile 5 Kasım saat 12.30'da gerçekleşmiştir. Aynı aralıkta  $E_{çikan}$  verilerinde en düşük değer 49,8 W ile 1 Kasım saat 17.00'da, en yüksek değer ise 262,4 W ile 6 Kasım saat 13.00'da gözlemlenmiştir.  $E_{kayıp}$  eğrisinde bu durum ise, 1 Kasım saat 09.00'da 63,6 W en düşük enerji kaybı, 5 Kasım saat 13.00'da ise 478,6 W en yüksek enerji kaybı olarak kaydedilmiştir.

1 Kasım ile 6 Kasım arası panel enerji değişim grafiği Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Aynı aralıkta panelin ekserji değişim grafiği ise Şekil 6.13'te verilmiştir.

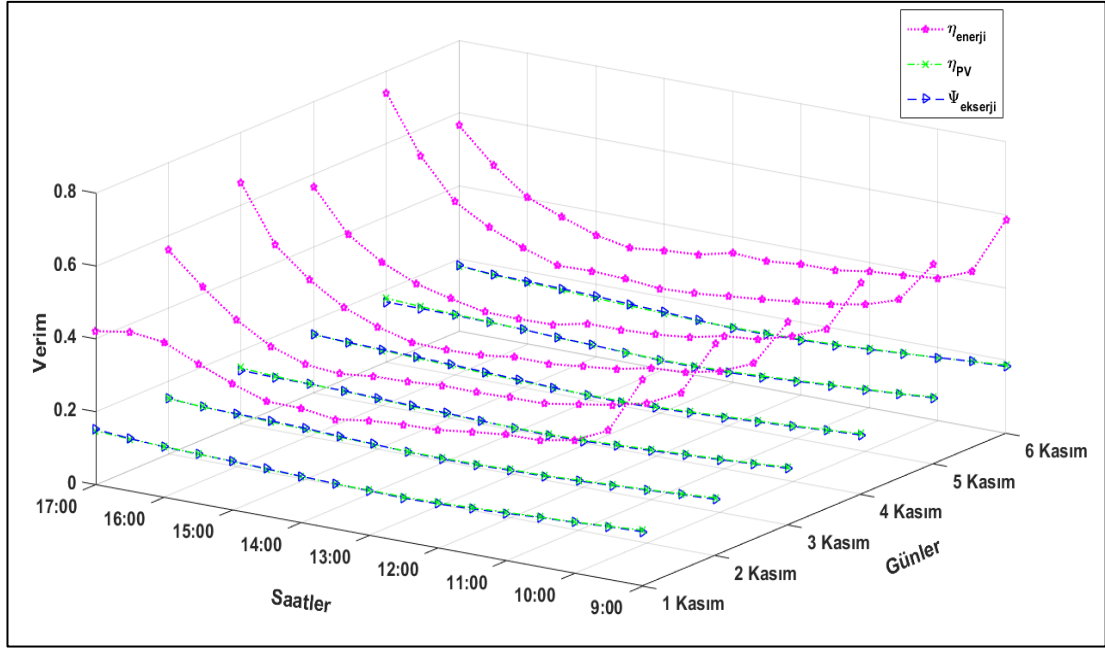


Şekil 6.13. 1 Kasım ile 6 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği.

Grafiğe ilişkin 6 günlük veriler incelendiğinde farklı günlerde farklı tepe noktalarına sahip birbirine paralel elektriksel ekserji ve panel ekserji eğrileri olduğu görülmektedir. Bu aralıkta özellikle 3 Kasımdan sonra panelde artan akım ve güç değerlerine bağlı olarak  $\dot{E}_{\text{elektrik}}$  ve dolayısıyla da  $\dot{E}_{\text{PV}}$  değerleri önemli ölçüde artmıştır.

Termal ekserji verilerininin 10 ile çarpılarak kıyaslandığı grafikte, en düşük  $\dot{E}_{\text{elektrik}}$  değeri 17,46 W ile 1 Kasım 17.00'da, en yüksek değer ise 111,68 W ile 6 Kasım saat 13.00'da gerçekleşmiştir. Aynı aralıkta  $\dot{E}_{\text{termal}}$  eğrisinde ise en düşük değer 0,4 W ile 1 Kasım 17.00'da, en yüksek termal ekserji kaybı ise 7,63 W ile 5 Kasım saat 12.30'da gözlemlenmiştir. Buna göre,  $\dot{E}_{\text{PV}}$  verilerinde en düşük değer 17,06 W ile 1 Kasım 17.00'da, en yüksek panel ekserjisi ise 103,03 W ile 6 Kasım saat 12.00'da kaydedilmiştir.

Tüm bu veriler ışığında 1 Kasım ile 6 Kasım arası panele ait enerji, ekserji ve güç dönüşüm verimleri bir arada Şekil 6.14'te ki gibi gösterilebilir.



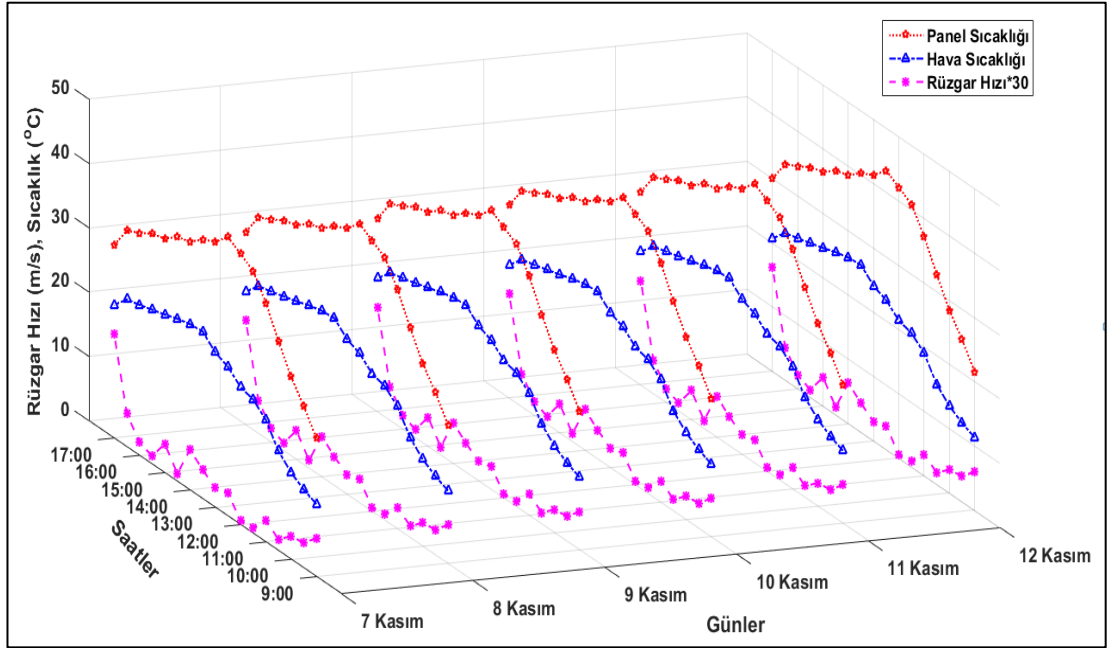
Şekil 6.14. 1 Kasım ile 6 Kasım arası verim değişim grafiği.

Grafiğe göre, 6 günlük veriler incelendiğinde  $\eta_{PV}$  ve  $\Psi_{PV}$  verim değerlerinin birbirine çok yakın seyrettiği görülmektedir. Aynı aralıkta rüzgâr hızı, hava sıcaklığı gibi çevresel faktörlere bağlı olarak  $\eta_{enerji}$  değerlerinin yüksek çıktığı görülmektedir. Ancak genel bir değerlendirme yapılmak istenirse  $\eta_{enerji}$  değerlerinin sabah ve akşam saatlerinde yüksek, öğle saatlerinde ise düşük olduğu söylenebilir. Bunun sebebi olarak öğle saatlerinde akım değerlerinin artmasına karşılık, panel yüzeyine düşen ışınım şiddetinin artması gösterilebilir.

Spesifik olarak ilgili aralıkta en düşük  $\eta_{enerji}$  değeri 0,3 (%30) ile 1 Kasım 13.30'da, en yüksek değer ise 0,739 (%73,9) ile 5 Kasım saat 17.00'da gerçekleşmiştir. Yine en düşük  $\eta_{PV}$  değeri 0,123 (%12,3) ile 1 Kasım 12.30'da, en yüksek panel verimi ise 0,187 (%18,7) ile 6 Kasım saat 09.00'da gözlemlenmiştir. Bu durum ekserji verimi,  $\Psi_{PV}$ 'de ise 1 Kasım 12.30'da 0,12 (%12) en düşük değer, 6 Kasım saat 09.00'da ise 0,188 (%18,8) en yüksek değer olarak kaydedilmiştir. Bu durumda sıcaklığa bağlı olarak enerji veriminin yanı sıra, ekserji ve panel verimi de sabah ve akşam saatlerinde yüksek iken, öğle saatlerinde düşmektedir.

## 6.2. 7 KASIM İLE 12 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI

Bir önceki bölümde 1 Kasım-6 Kasım arası veriler ve buna ilişkin grafikler incelenmişti. Bu bölümde ise 7 Kasım ile 12 Kasım arasındaki veri sonuçları incelenecektir. Bu kapsamda Şekil 6.15 ilgili aralıkta panelin çalışma ortamındaki çevresel faktörlerin değişimini, Şekil 6.16 ise panelin akım-gerilim değişimini vermektedir. Her bir parametre grubuna ait grafikler bir önceki bölümde gösterilen grafikler ile benzerlik gösterse de grafiklerin z eksenindeki skala, parametre eğrilerinin eğim açıları ve tepe noktaları farklılık göstermektedir. Bundan dolayı bu bölümde özellikle, incelenecek grafiklerin bir önceki bölümde verilen grafiklerle arasındaki farklılıklara dikkat çekilmeye çalışılacaktır. Sayısal olarak veri analizinden ziyade, enerji, ekserji ve panel verim değerlerine odaklanılacaktır.

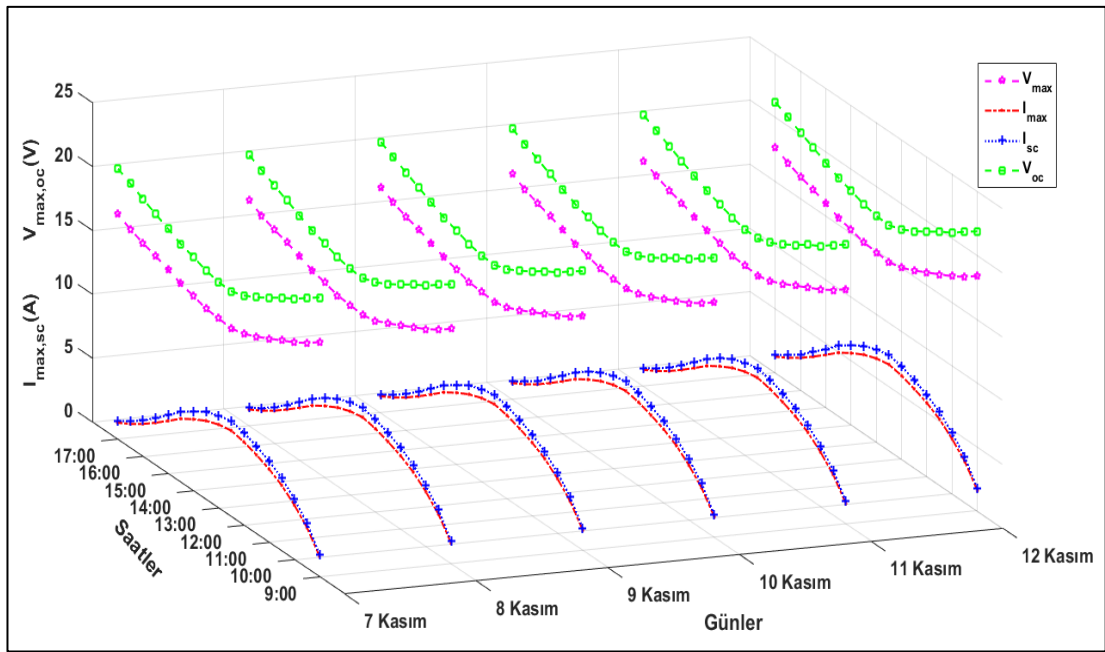


Şekil 6.15. 7 Kasım ile 12 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.

Grafiğe göre, panel ve çevre sıcaklıkları bir önceki bölümde verilen değerlere kıyasla düştüğü görülmektedir. Ayrıca 1-6 Kasım grafiğindeki panel sıcaklıkları ele alındığında, tepe noktasından son ölçümün alındığı 17.00'a kadar dalgalı bir düşüş görülürken, yukarıda ki grafikte tepe noktasından sonra daha doğrusal bir düşüş kaydedilmiştir.

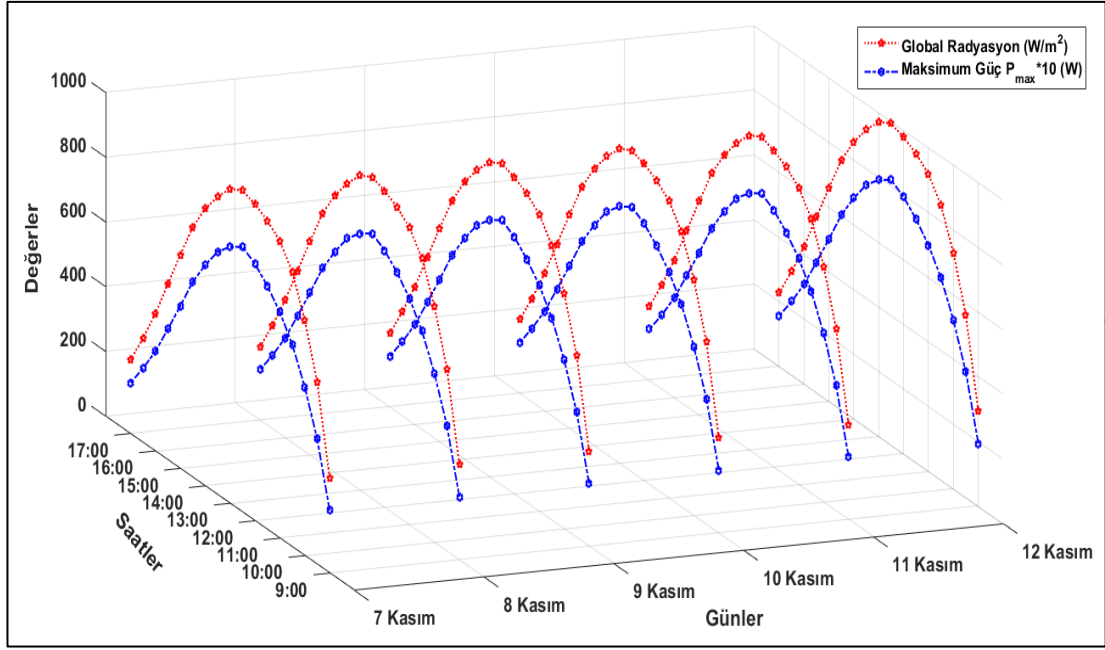
Rüzgâr hızı verileri bir önceki grafiğe nazaran daha fazla değişkenlik göstermiştir. Burada hava sıcaklığının azalmasına paralel olarak rüzgâr hızı ve şiddetinin arttığı söylenebilir.

Şekil 6.16'da verilen akım ve gerilim eğrilerine ilişkin,  $V_{oc}$  ile  $V_{max}$  ve  $I_{max}$  ile  $I_{sc}$  eğrilerinin değişimi bir önceki grafikte olduğu gibi birbirlerine paralel olmuştur. Ancak aşağıdaki grafikteki akım ve gerilim değerleri bir öncekine nazaran genel itibariyle daha düşüktür.



Şekil 6.16. 7 Kasım ile 12 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği.

Panelin  $P_{max}$  eğrisi ile radyasyon değerlerinin kıyası ise Şekil 6.17'de verilmiştir.

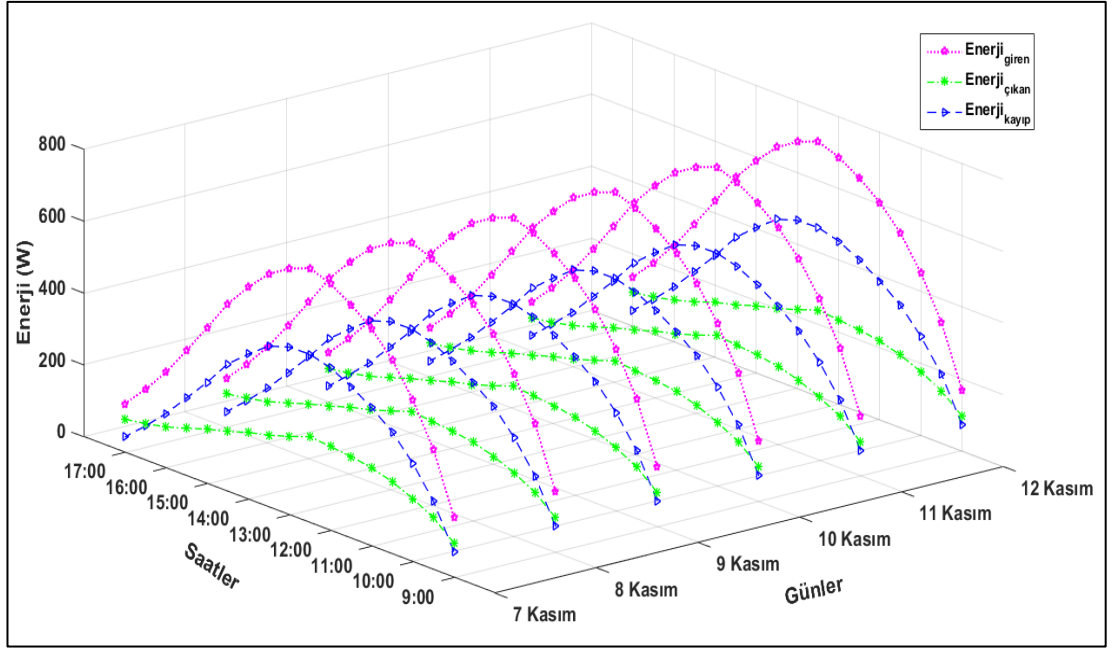


Şekil 6.17. 7 Kasım ile 12 Kasım arası maksimum güç ve radyasyon değişim grafiği.

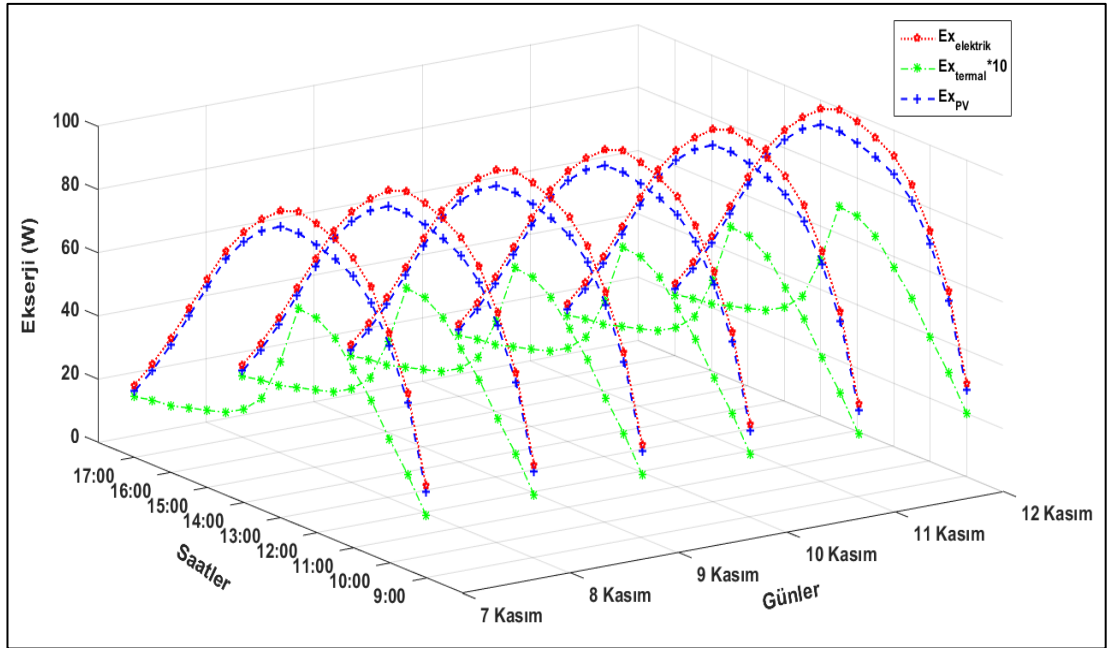
Verilere göre  $P_{max}$  ve radyasyon değerleri 7 Kasım-12 Kasım aralığında düşmesine rağmen grafiğe göre daha yüksek gibi gözükmesinin sebebi, Şekil 6.17'deki z ekseninin bir önceki grafiğe kıyasla daha düşük skalaya sahip olmasındandır. Her iki grafikteki bir diğer farklılık ise paralel iki eğri arasındaki farkın yukarıda ki grafikte daha fazla olmasıdır.

Panele ait çevresel ve elektriksel parametreler ışığında 7 Kasım ile 12 Kasım arasındaki enerji değişim grafiği Şekil 6.18'de, ekserji değişimi ise Şekil 6.19'da verilmiştir.

Panelde meydana gelen enerji değişimi incelendiğinde verilerin 1 Kasım-6 Kasım arasındaki grafiğe oranla düştüğü görülmektedir. Farklı günlerde farklı tepe noktalarına sahip parametreler 7 Kasım-11 Kasım arasında hemen hemen aynı değerlerde olmasına rağmen, 12 Kasım'da  $E_{giren}$ ,  $E_{çıkan}$  ve  $E_{kayıp}$  değerlerinde artış görülmüştür.



Şekil 6.18. 7 Kasım ile 12 Kasım arası panel enerji değişim grafiği.

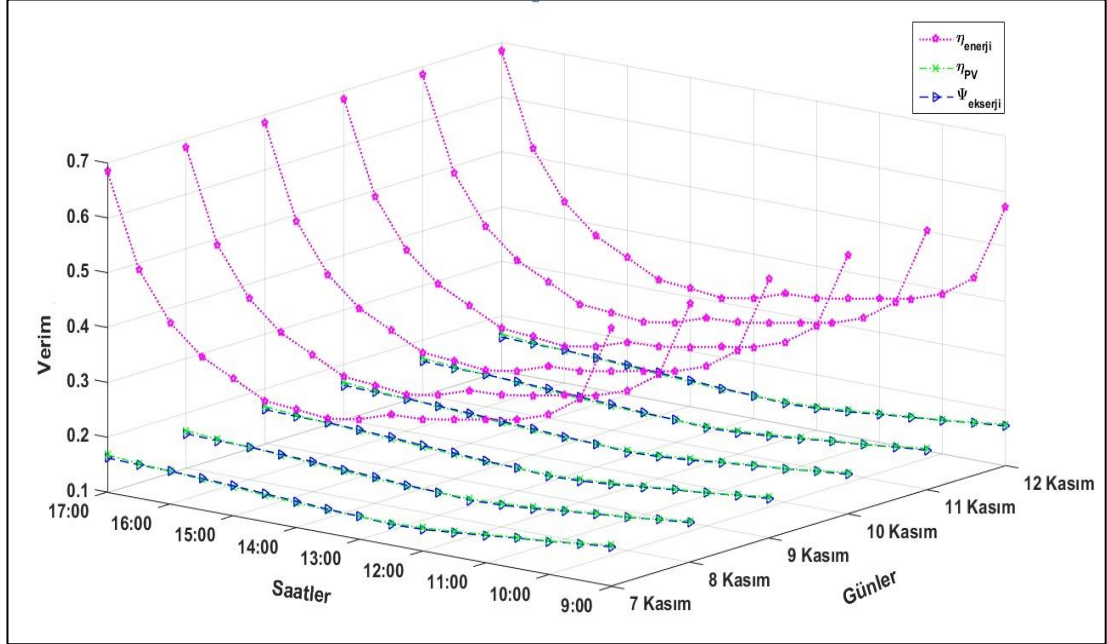


Şekil 6.19. 7 Kasım ile 12 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği.

Şekildeki grafikte panele ait ekserji değişimi incelendiğinde yine 1 Kasım-6 Kasım aralığına kıyasla önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte, Bölüm 6.1’de verilen ekserji grafiğinin tepe noktaları gün gün artarken, 7 Kasım-12 Kasım tarihleri arasında eğrilerin tepe noktaları hemen hemen aynıdır. Bir diğer önemli fark

ise termal ekserji kaybı  $\dot{E}x_{\text{termal}}$ , bir önceki grafikte daha fonksiyonel bir şekilde artıp azalırken Şekil 6.19'da daha keskin düşüşler görülmüştür.

Panele ait enerji, ekserji ve güç dönüşüm verim değişimi ise Şekil 6.20'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, Bölüm 6.1'de verilen verim grafiğindeki gibi panel verimi  $\eta_{\text{PV}}$  ile ekserji verimi  $\Psi_{\text{PV}}$ 'nin birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Bununla birlikte 7 Kasım-12 Kasım tarihleri arasında  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{PV}}$  ve  $\Psi_{\text{PV}}$  değerlerinin düştüğü görülmektedir. Spesifik olarak özetlemek gerekirse, ilgili tarihte en düşük  $\eta_{\text{enerji}}$  değeri 0,24 (%24) ile 11 Kasım saat 14.00'da, en yüksek  $\eta_{\text{enerji}}$  değeri ise 0,684 (%68,4) ile 7 Kasım saat 17.00'da gerçekleşmiştir. En düşük  $\eta_{\text{PV}}$  değeri 0,103 (%10,3) ile 10 Kasım 13.30'da, en yüksek  $\eta_{\text{PV}}$  değeri ise 0,175 (%17,5) ile 7 Kasım 09.00'da gözlemlenmiştir.  $\Psi_{\text{PV}}$ 'de bu durum ise en düşük değer 0,104 (%10,4) ile 10 Kasım 12.30'da, en yüksek değer ise 0,172 (%17,2) ile 7 Kasım saat 09.00'da kaydedilmiştir.



Şekil 6.20. 7 Kasım ile 12 Kasım arası panel verim değişim grafiği.

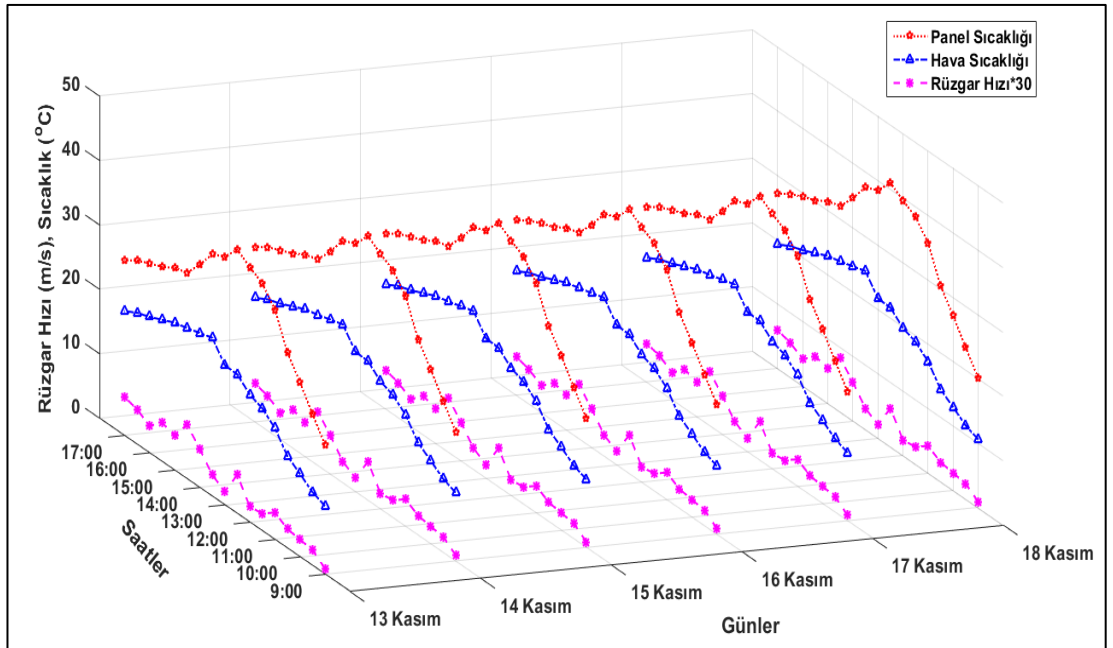


### 6.3. 13 KASIM İLE 18 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI

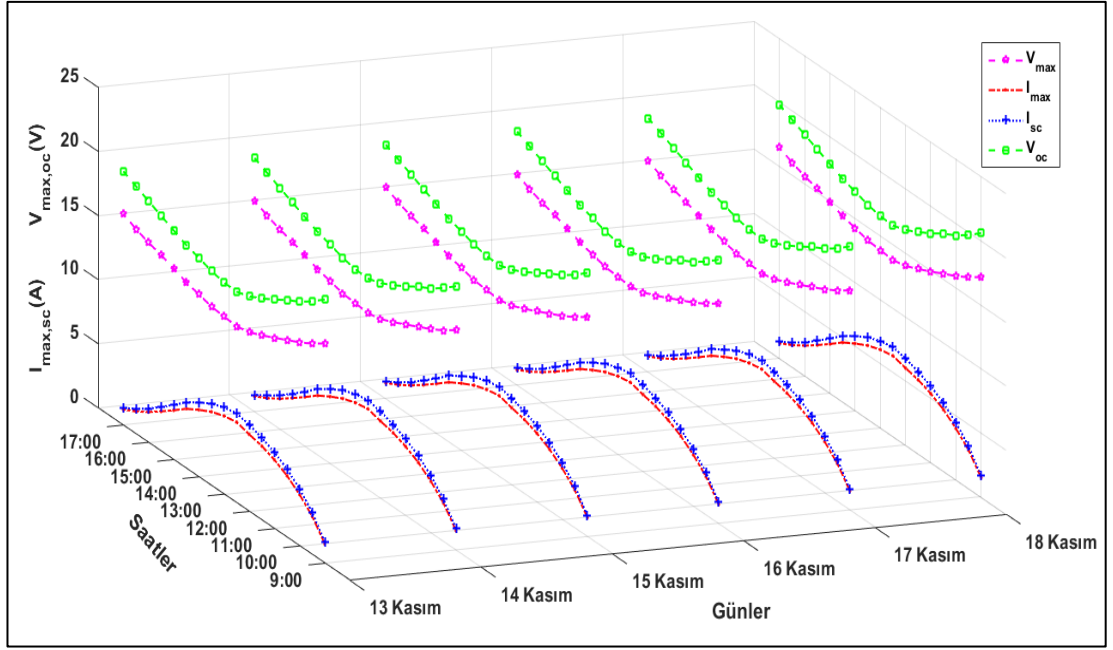
Bu bölümde 13 Kasım ile 18 Kasım arasındaki veri sonuçları verilecektir. Bu bağlamda Şekil 6.21 çevresel faktörlerin değişim grafiğini, Şekil 6.22 ise panelin akım ve gerilim değişim grafiğini göstermektedir.

Şekil 6.21'den de anlaşılacağı üzere 13 Kasım-18 Kasım tarihleri arasında Bölüm 6.2'de ki verilere kıyasla, hava sıcaklıkları dolayısı ile panel sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Parametrelerin tepe noktalarının değiştiği grafikte rüzgâr hızları ise değişkenlik göstermiştir.

Şekil 6.22'de ise akım ve gerilim değerleri önceki grafiklerde olduğu birbirine paralel çıkmıştır.

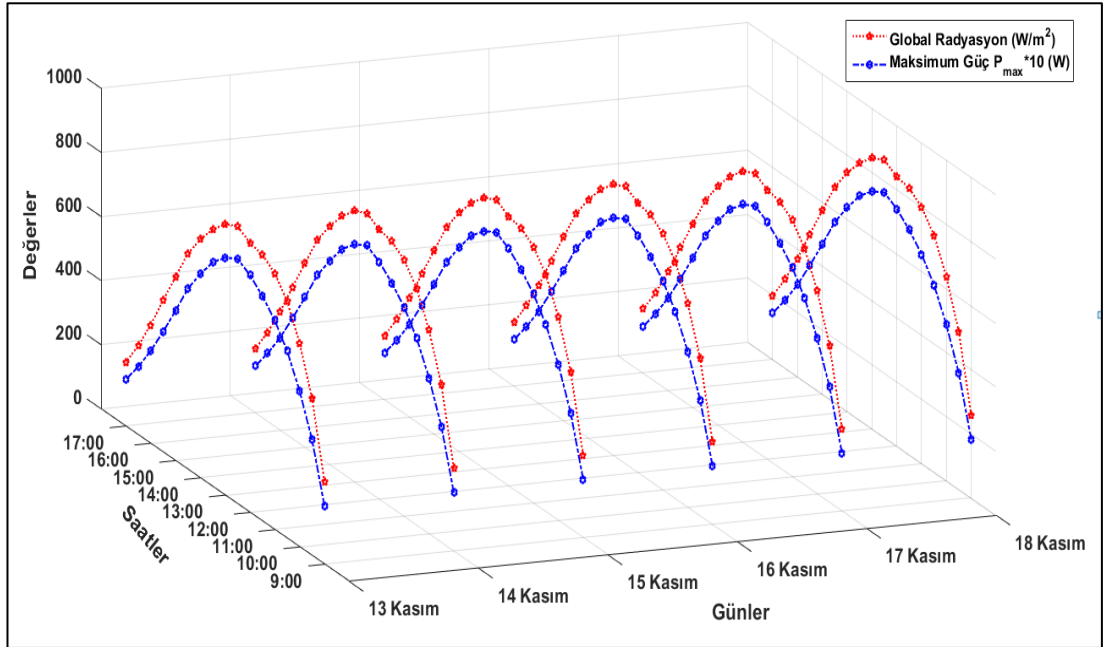


Şekil 6.21. 13 Kasım ile 18 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.



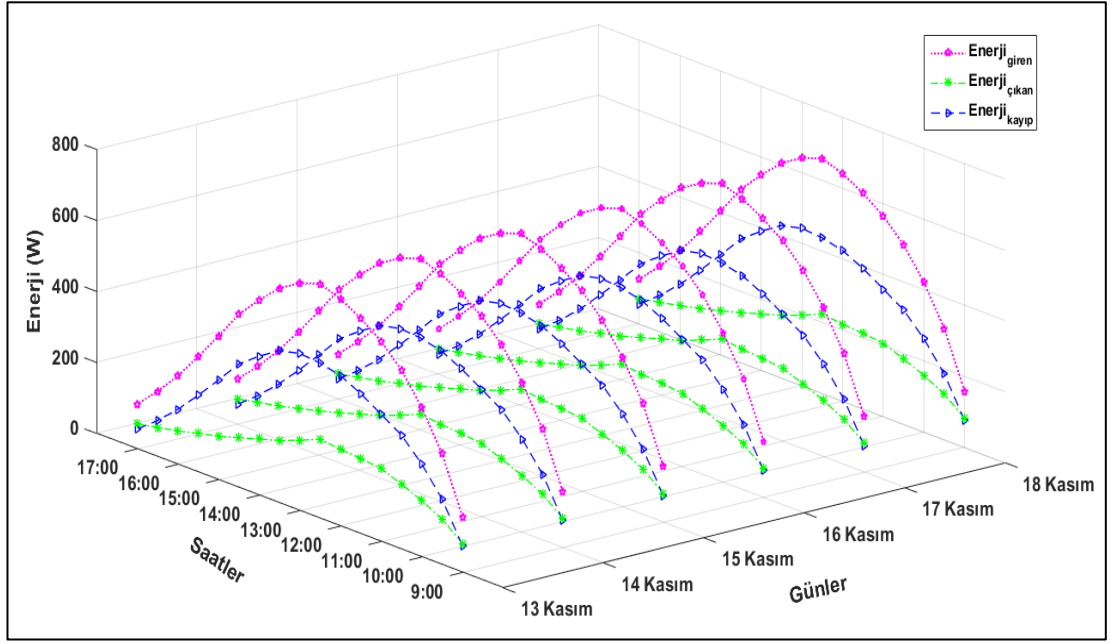
Şekil 6.22. 13 Kasım ile 18 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği.

Şekil 6.23 ise panele ait  $P_{max}$  eğrisi ile radyasyon değişim grafiğini göstermektedir.



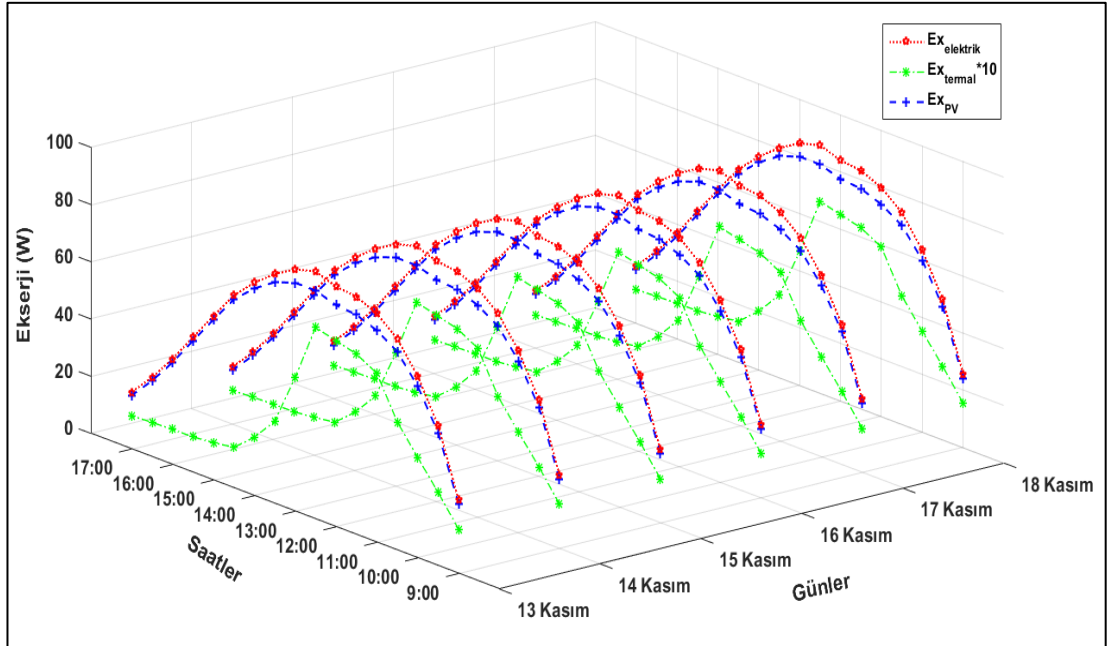
Şekil 6.23. 13 Kasım ile 18 Kasım arası  $P_{max}$  ve radyasyon değişim grafiği.

Buna göre panelin enerji değişim grafiği Şekil 6.24'te verilmiştir.



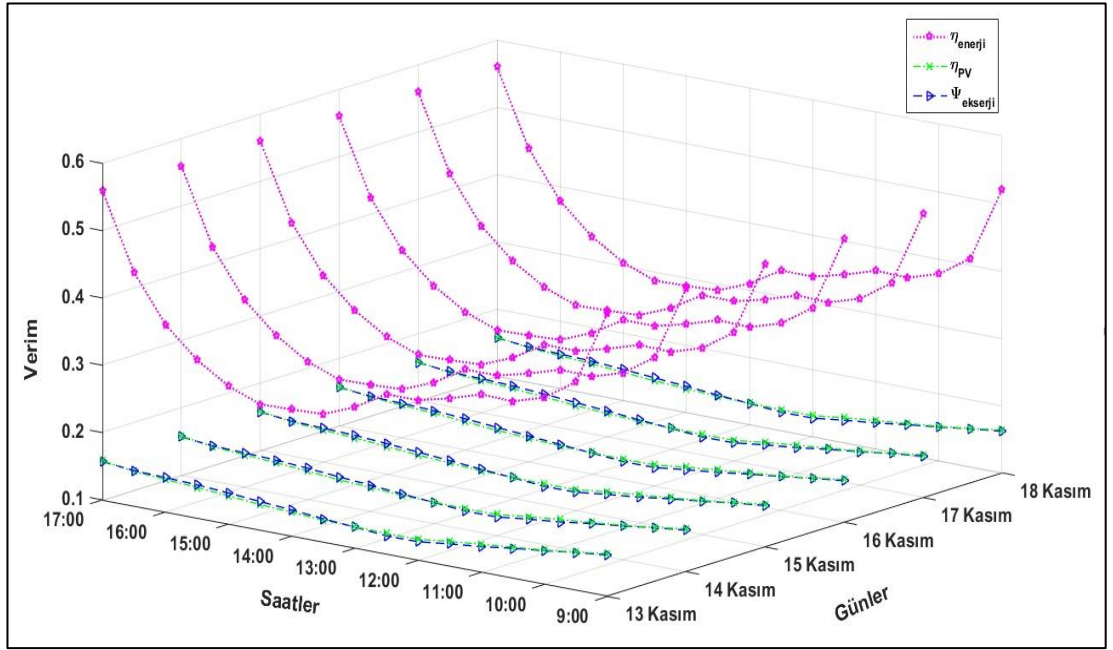
Şekil 6.24. 13 Kasım ile 18 Kasım arası panel enerji değişim grafiği.

Panelin ekserji değişimi ise Şekil 6.25'te gösterilmiştir.



Şekil 6.25. 13 Kasım ile 18 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği.

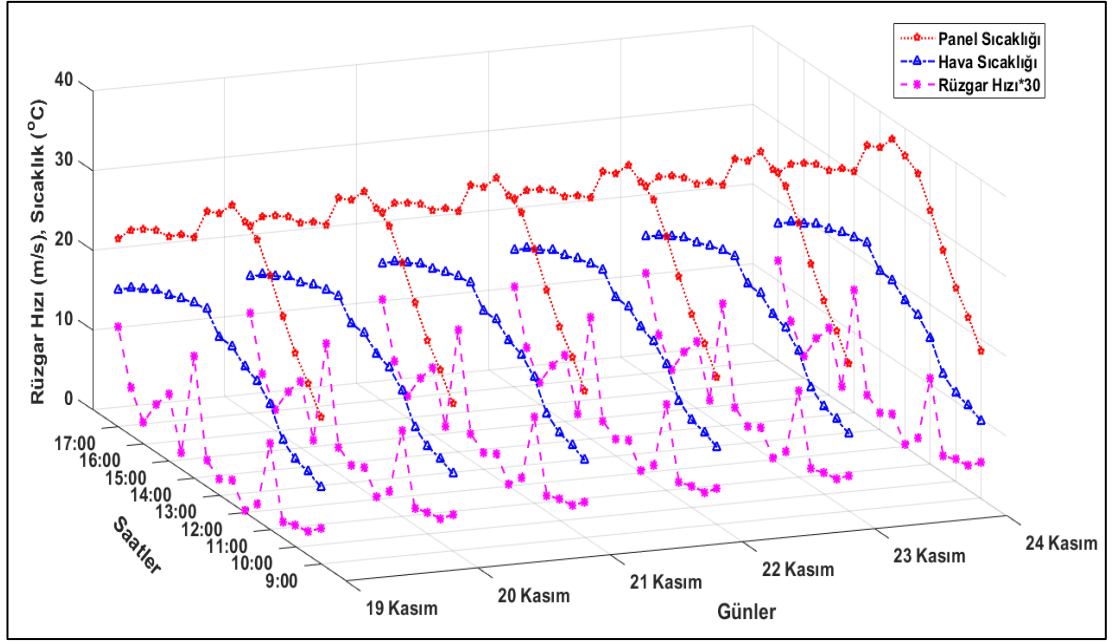
Veriler ışığında panelin enerji, ekserji ve güç dönüşüm verimi değişim grafiği Şekil 6.26'da verilmiştir. Veriler incelendiğinde, 13 Kasım-18 Kasım tarihleri arasında  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{PV}}$ ,  $\psi_{\text{PV}}$  değerlerinde Bölüm 6.2'de ki gibi bir benzerlik görülmektedir. Kısaca özetlemek gerekirse, ilgili tarihte en düşük  $\eta_{\text{enerji}}$  değeri 0,249 (%24,9) ile 17 Kasım saat 14.00'da, en yüksek  $\eta_{\text{enerji}}$  değeri ise 0,677 (%67,7) ile 14 Kasım saat 17.00'da gerçekleşmiştir. En düşük  $\eta_{\text{PV}}$  değeri 0,113 (%11,3) ile 16 Kasım 12.30'da, en yüksek  $\eta_{\text{PV}}$  değeri ise 0,163 (%16,3) ile 13 Kasım 09.00'da gözlemlenmiştir.  $\psi_{\text{PV}}$ 'de bu durum ise en düşük değer 0,11 (%11) ile 16 Kasım 12.30'da, en yüksek değer ise 0,161 (%16,1) ile 13 Kasım saat 09.00'da kaydedilmiştir.



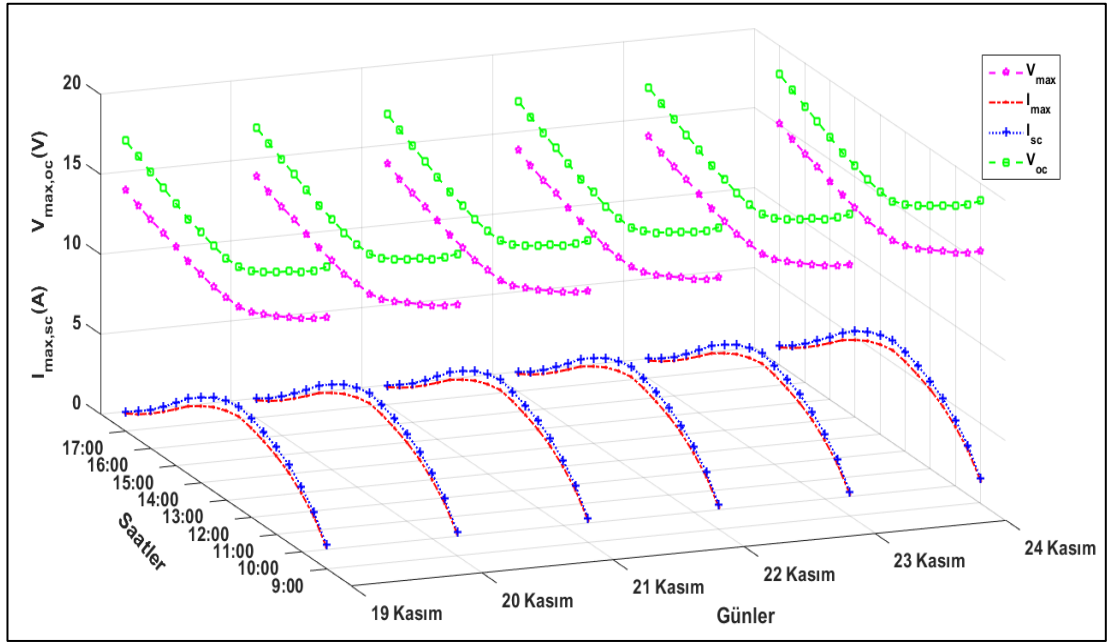
Şekil 6.26. 13 Kasım ile 18 Kasım arası panel verim değişim grafiği.

#### 6.4. 19 KASIM İLE 24 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI

Bu bölümde 19 Kasım ile 24 Kasım arasındaki veri sonuçları incelenecektir. Bu bağlamda Şekil 6.27 çevresel faktörlerin değişim grafiğini, Şekil 6.28 ise panelin akım ve gerilim değişim grafiğini göstermektedir.

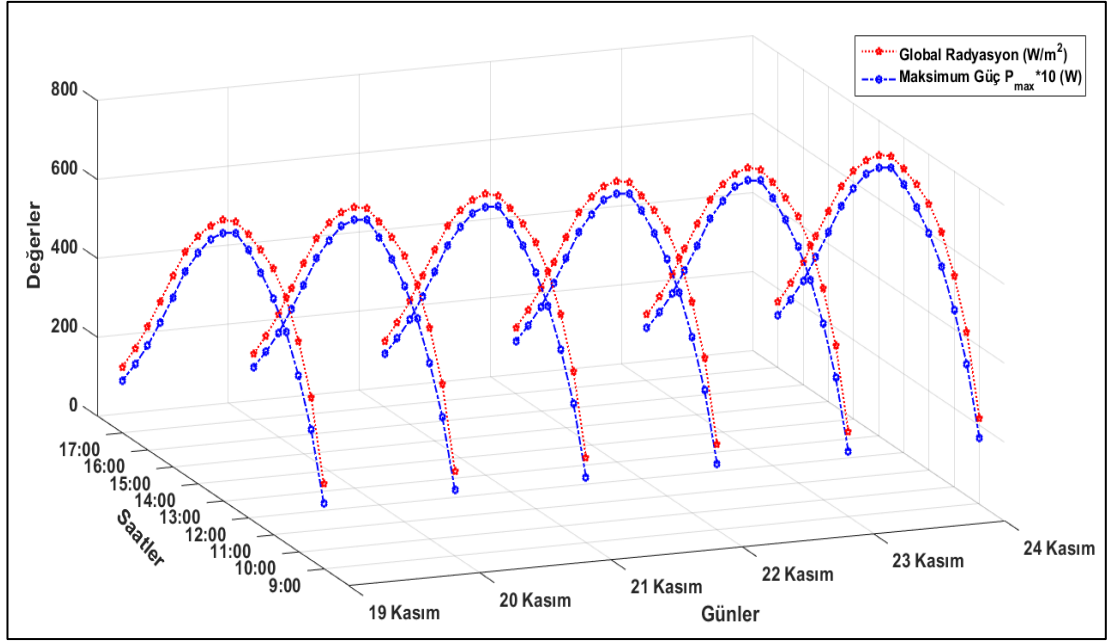


Şekil 6.27. 19 Kasım ile 24 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.



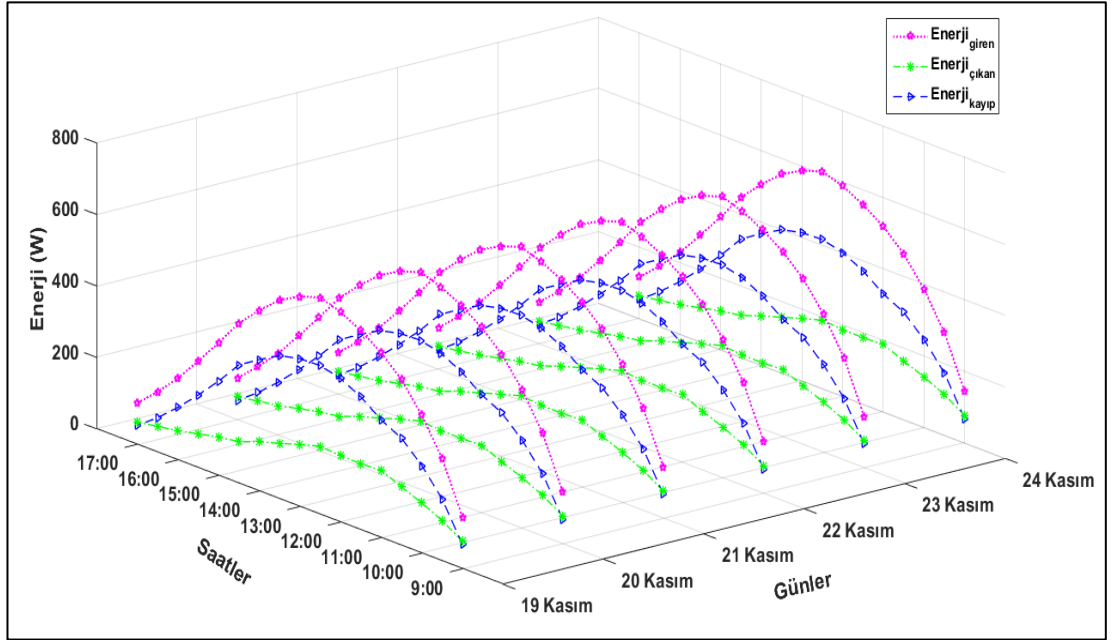
Şekil 6.28. 19 Kasım ile 24 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği.

Panelin  $P_{max}$  eğrisi ile radyasyon değişim grafiği ise Şekil 6.29'da verilmiştir.



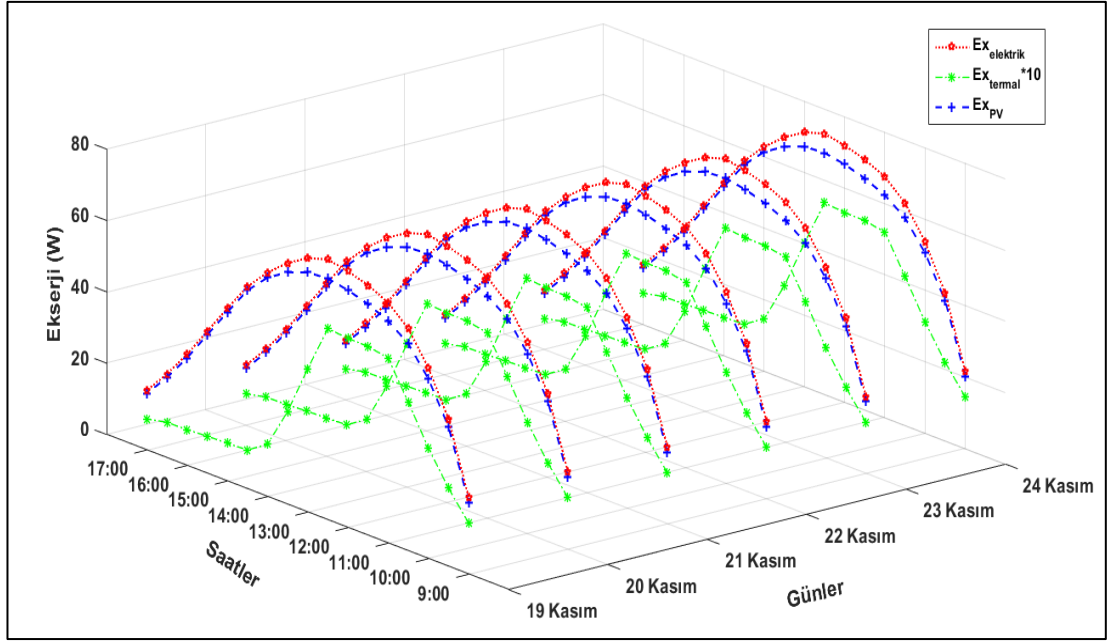
Şekil 6.29. 19 Kasım ile 24 Kasım arası  $P_{max}$  ve radyasyon değişim grafiği.

Buna göre panelin enerji değişim grafiği Şekil 6.30'da gösterilmiştir.



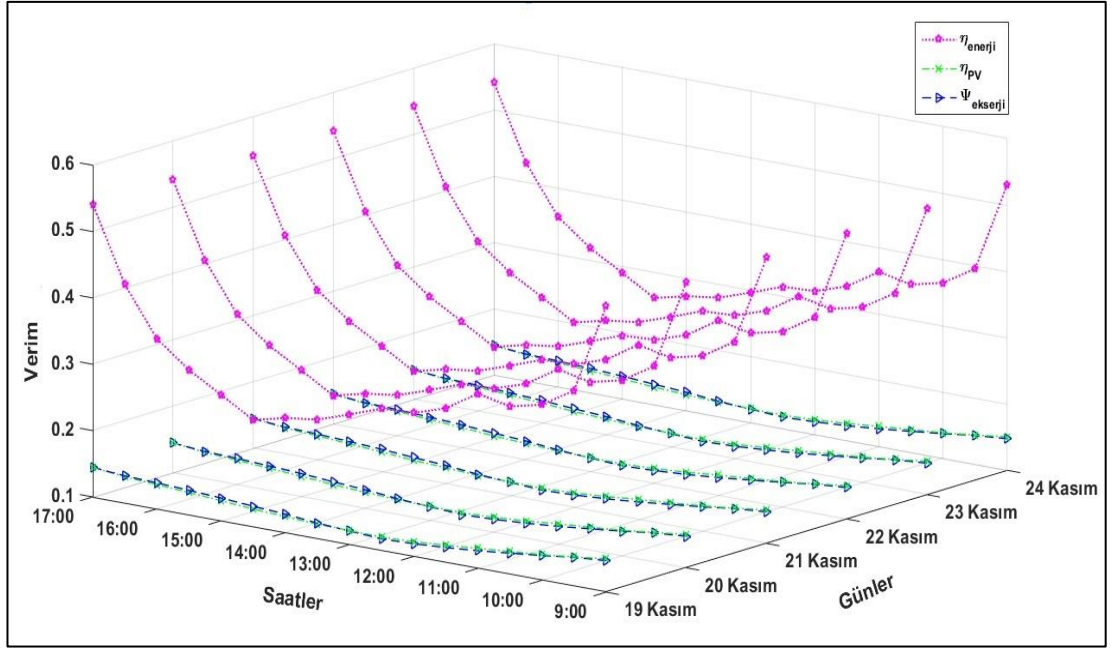
Şekil 6.30. 19 Kasım ile 24 Kasım arası panelin enerji değişim grafiği.

Panel ekserji değişim grafiği ise Şekil 6.31'de verilebilir.



Şekil 6.31. 19 Kasım ile 24 Kasım arası panelin ekserji değişim grafiği.

Buna göre panelin enerji, ekserji ve güç dönüşüm verim değişimi Şekil 6.32’de gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde 19 Kasım-24 Kasım tarihleri arasında en düşük  $\eta_{\text{enerji}}$  değeri 0,26 (%26) ile 19 Kasım 14.30’da, en yüksek değer ise 0,648 (%64,8) ile 24 Kasım 17.00’da gerçekleşmiştir. En düşük  $\eta_{\text{pv}}$  değeri 0,12 (%12) ile 19 Kasım 12.30’da, en yüksek değer ise 0,182 (%18,2) ile 24 Kasım 09.30’da gözlemlenmiştir.  $\psi_{\text{pv}}$ ’de bu durum ise en düşük değer 0,117 (%11,7) ile 19 Kasım 12.30’da, en yüksek değer ise 0,172 (%17,2) ile 22 Kasım saat 09.00’da kaydedilmiştir.

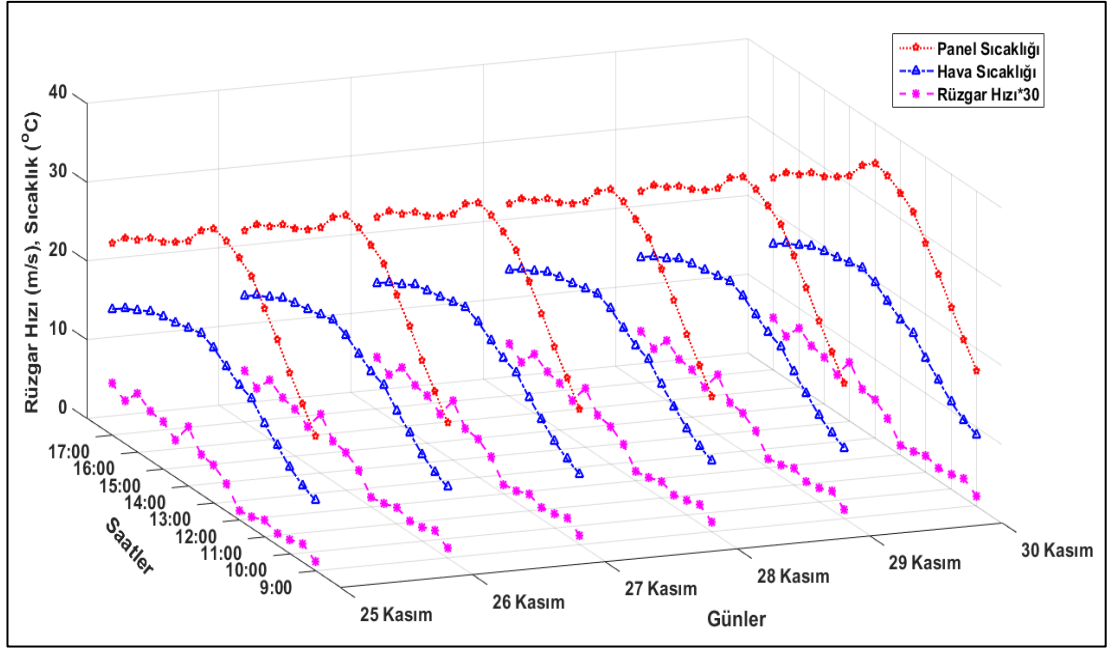


Şekil 6.32. 19 Kasım ile 24 Kasım arası panelin verim değişim grafiği.

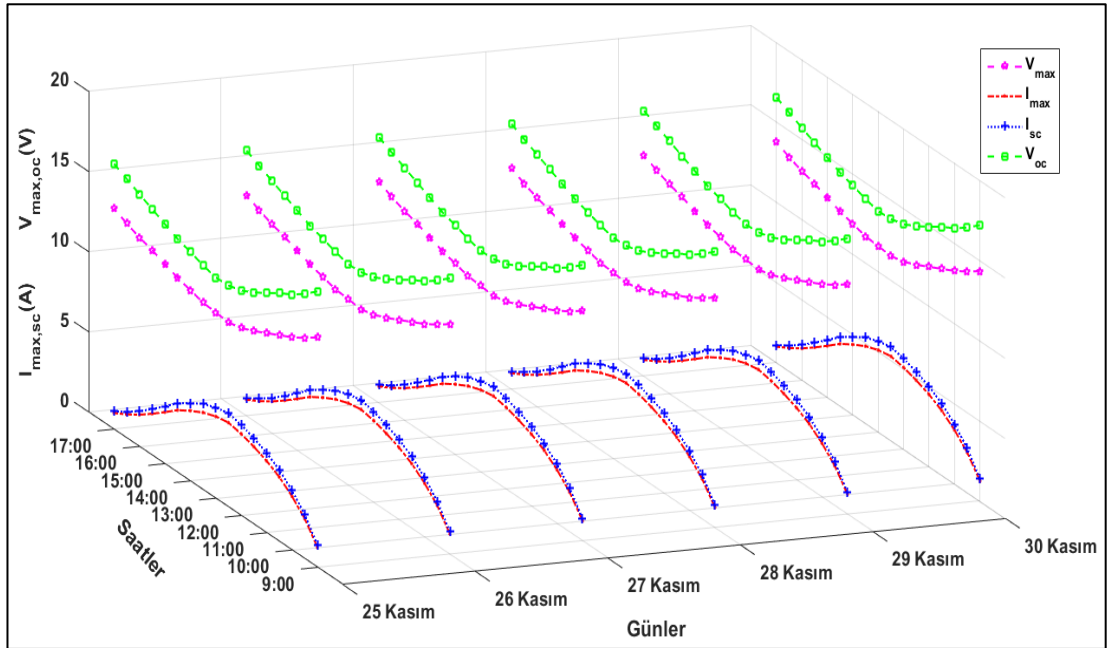
### 6.5. 25 KASIM İLE 30 KASIM ARASI VERİ SONUÇLARI

Bu bölümde de 25 Kasım ile 30 Kasım arasındaki veri sonuçları verilecektir. Bu bağlamda Şekil 6.33 çevresel faktörlerin değişim grafiğini, Şekil 6.34 ise panelin akım ve gerilim değişim grafiğini göstermektedir.



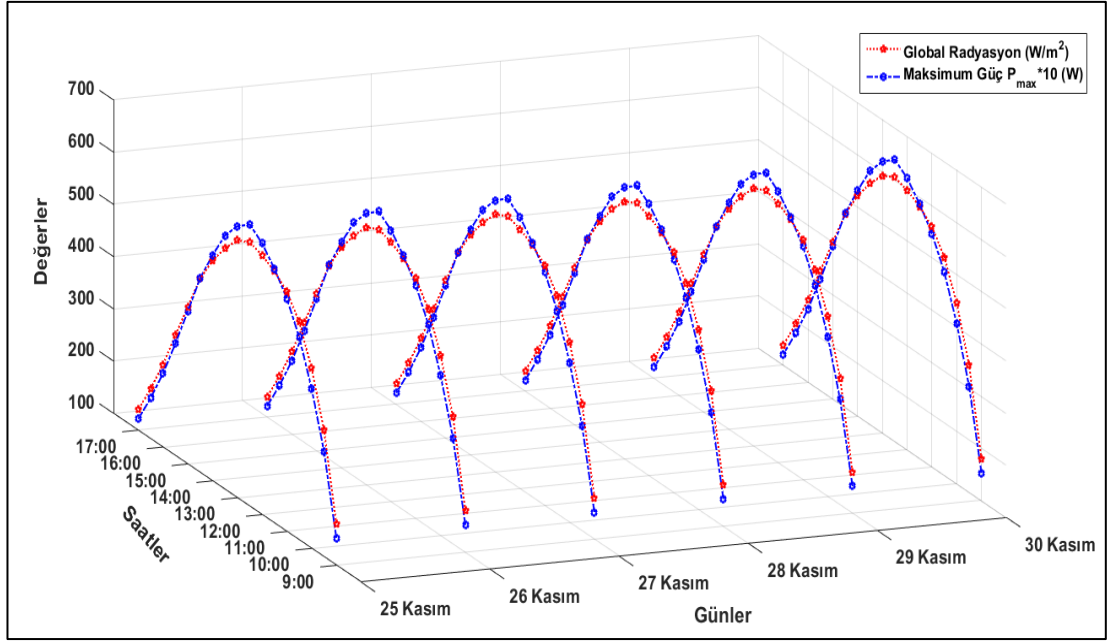


Şekil 6.33. 25 Kasım ile 30 Kasım arası çevresel faktörlerin değişim grafiği.



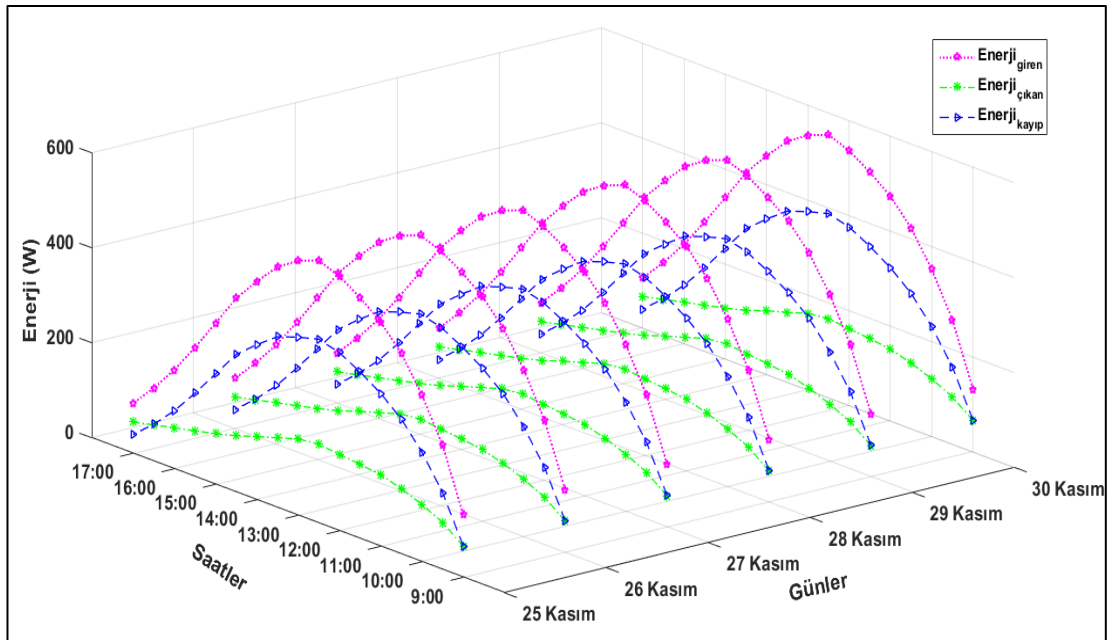
Şekil 6.34. 25 Kasım ile 30 Kasım arası akım ve gerilim değişim grafiği.

Panele ait  $P_{max}$  eğrisi ile radyasyon değişim grafiği ise Şekil 6.35'te verilmiştir.

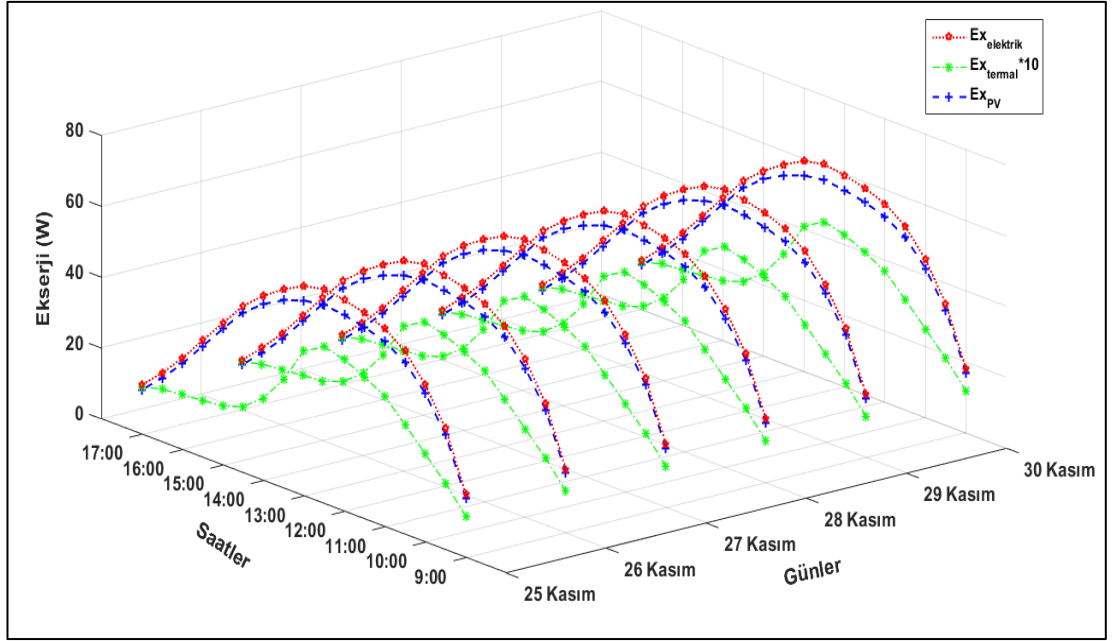


Şekil 6.35. 25 Kasım ile 30 Kasım arası  $P_{max}$  ve radyasyon değişim grafiği.

Buna göre panelin enerji değişim grafiği Şekil 6.36'da, ekserji değişim grafiği ise Şekil 6.37'de verilebilir.

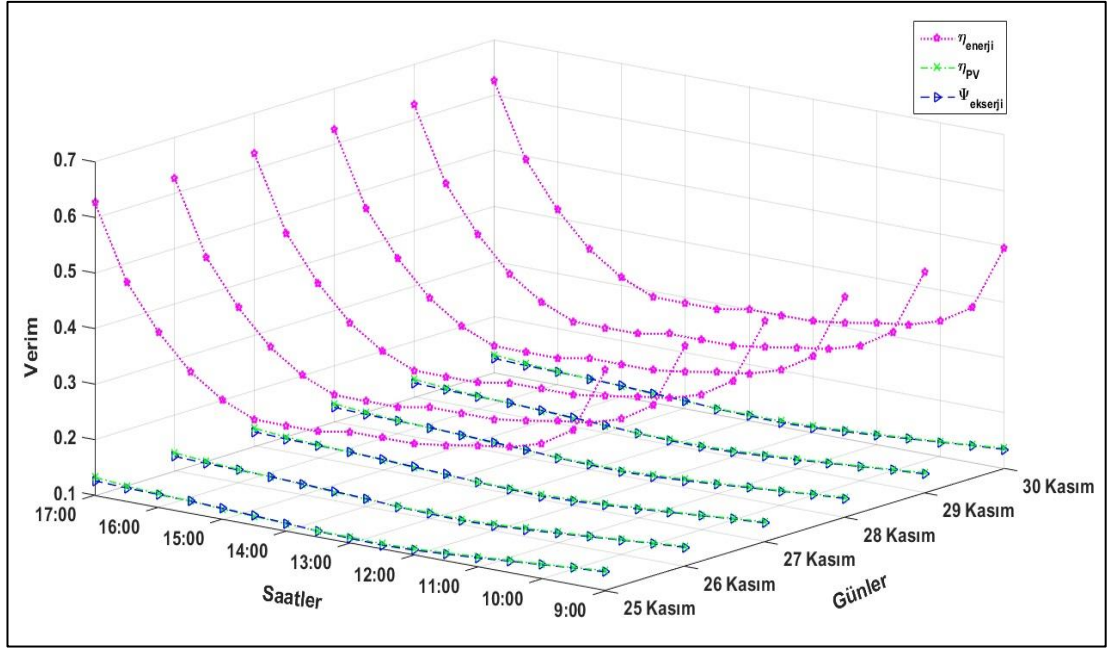


Şekil 6.36. 25 Kasım ile 30 Kasım arası panel enerji değişim grafiği.



Şekil 6.37. 25 Kasım ile 30 Kasım arası panel ekserji değişim grafiği.

Bununla birlikte enerji, ekserji ve güç dönüşüm verim değişimi Şekil 6.38’de verilmiştir. 25 Kasım-30 Kasım tarihleri arasında grafiğe göre en düşük  $\eta_{\text{enerji}}$  değeri 0,238 (%23,8) ile 30 Kasım 14.00’da, en yüksek değer ise 0,672 (%67,2) ile 26 Kasım 17.00’da gerçekleşmiştir. En düşük  $\eta_{\text{pv}}$  değeri 0,094 (%9,4) ile 30 Kasım 12.30’da, en yüksek değer ise 0,172 (%17,2) ile 24 Kasım 09.00’da gözlemlenmiştir.  $\psi_{\text{pv}}$ ’de bu durum ise en düşük değer 0,092 (%9,2) ile 30 Kasım 12.30’da, en yüksek değer ise 0,181 (%18,1) ile 24 Kasım saat 09.30’da kaydedilmiştir.



Şekil 6.38. 25 Kasım ile 30 Kasım arası panel verim değişim grafiği.

## 6.6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan ölçümler neticesinde, polikristal bir güneş panelinin akım, gerilim ve güç değişiminin yanı sıra panelin çalışma ortamına ait çevresel faktörlerin de değişimi incelenmiş ve böylece panele ait tüm enerji-ekserji hesabı yapılarak verimleri hesaplanmıştır.

Bölüm 6’da verilen grafikler sayesinde ele alınan parametrelerin gün içerisinde birbirleriyle olan değişimi zamana bağlı olarak incelenmiştir. Bölüm 6.1 ile Bölüm 6.6 arasında ise Kasım ayı 5 bölüme ayrılarak her bir parametrenin ay genelindeki değişimi ele alınmış, özellikle enerji, ekserji ve güç verimi olmak üzere grafiklerin sayısal analizlerine bağlı olarak yorum yapılmıştır.

Veri tabanındaki tüm veriler ve Matlab programı aracılığıyla çizilmiş grafikler ele alındığında, ay genelinde hava sıcaklıklarının tepe noktası 12.30, 13.00 ve 13.30 olarak değiştiği ve bu değişime bağlı olarak panel sıcaklığının da hava sıcaklığı eğrisine paralel olduğu görülmektedir.

Rüzgâr hızındaki değişim incelendiğinde genel itibariyle değişkenlik göstermesine rağmen, gün içerisinde özellikle sabah ve akşam saatlerinde rüzgâr hızının yüksek olduğu görülmektedir. Ay genelinde bu durum ise hava sıcaklığının düşük olduğu noktalarda nisbeten yüksek, yüksek olduğu noktalarda ise rüzgâr hızının göreceli olarak düşük olduğu söylenebilmektedir.

Panelin yukarıda izah edilen çevre şartlarında elektriksel parametrelerinin değişimi incelendiğinde ise,  $V_{oc}$  ve  $V_{max}$  eğrilerinin ay genelinde sabah ve akşam saatlerinde yüksek, öğle saatlerinde en düşük olacak şekilde fonksiyon grafikleri oluşturdukları,  $I_{oc}$  ve  $I_{max}$  değerlerinin ise birbirine yakın iki sinüs grafiği çizdiği görülmektedir. Buna göre, günlere bağlı olarak panelde üretilen akım ve gerilim değerlerinin hava sıcaklığı ve güneş ışınım şiddeti ile doğrudan bağlantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Akım ve gerilim değerlerindeki değişimin yanısıra maksimum güç eğrisi için de aynı durum söz konusudur. Panel yüzeyine düşen global radyasyon değerleri ile panelde

üretileen akım ve güç değerleri, sabah saatlerinden öğle saatlerine yaklařtıķça doğru orantılı olarak artmakta ve öğle saatlerinden akşam saatlerine yaklařtıķça da yine doğru orantılı olarak azalmaktadır.

Radyasyon değerleri sadece panelin elektriksel parametrelerini değil, panele giren enerji girdisini de etkilemekte ve böylece enerji değişim grafiğinde giren enerji,  $E_{giren}$  eğrisinin de sabah ve akşam saatlerinde düşük, öğle saatlerinde yüksek olacak şekilde bir sinüs grafiği çizdiği görölmektedir. Panelde üretileen enerji ise, taşınım ve ışınım ısı transfer katsayısı ve panel ile çevre sıcaklığı arasındaki farka bağlı olduğundan dolayı zaman zaman değişkenlik gösterse de, tepe noktasının  $E_{giren}$  eğrisi ile eşdeğer olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda giren ve çıkan enerjiler arasındaki kayıp ise  $E_{giren}$  eğrisinin hemen altında yer almıştır.  $E_{giren}$  değerleri öğle saatlerinde yüksek olduğundan dolayı,  $E_{kayıp}$  değerleri de bu noktalarda yüksek çıkmıştır.

Panelin  $V_{max}$  ve  $I_{max}$  değerleri ile doğrudan bağlantısı olan elektriksel ekserji  $\dot{E}_{X_{elektrik}}$ , ay genelinde  $P_{max}$  eğrisi ile orantılı olacak şekilde sabah ve akşam saatlerinde düşük, öğle saatlerinde ise en yüksek olduğu görölmüştür. Panelde ısı kaybından kaynaklanan termal ekserji kaybı  $\dot{E}_{X_{termal}}$ 'in her ne kadar ay genelinde hava ve panel sıcaklıklarına bağlı olarak tepe noktası değişse de, öğle saatlerinde en yüksek, akşam saatlerinde ise en düşük olacak şekilde elde edilmiştir. Bu durumda panelin ekserji çıktıısı  $\dot{E}_{X_{PV}}$ , ay genelinde tepe noktaları eşdeğer olacak şekilde  $\dot{E}_{X_{elektrik}}$  eğrisi ile paralel olacaktır.

Tüm bu veriler ışığında ay genelinde panel enerji, ekserji ve güç verim değişimi incelendiğinde, ekserji verimi ile panel verim değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görölmektedir.  $\eta_{enerji}$  değerleri, sabah ve akşam saatlerinde yüksek, öğle saatlerinde ise en düşük çıkmıştır.  $\eta_{PV}$  ve  $\psi_{PV}$  eğrilerinden,  $\psi_{PV}$  eğrisi daha fazla değişim gösterirken,  $\eta_{PV}$  eğrisi ise nisbeten daha doğrusaldır. Panel enerji verimi  $\eta_{enerji}$ , ay genelinde 0,238-0,684 (%23,8-%68,4) arasında değişirken, panel-güç dönüşüm verimi  $\eta_{PV}$  ise 0,094-0,187 (%9,4-%18,7) arasında değişim göstermiş ve ekserji verimi  $\psi_{PV}$  de 0,092-0,183 (%9,2-%18,3) aralığında değişmiştir.

130 W gücündeki polikristal bir güneş paneli ile yapılan deneylerde, panelin Karabük iklim koşullarında gerçek performansı, potansiyeli ve kullanılabilirliği gözlemlenmiştir. Panele ait tüm elektriksel parametreler ve çevresel faktörler veriler ışığında yorumlanarak, panel verimi ile birlikte enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Birbiri ile bağlantılı her bir parametrenin değişimi gün gün incelenmiş ve elde edilen deneysel sonuçların literatürdeki verilere uygun olduğu saptanmıştır. Yapılan bu çalışmanın Karabük ilinde güneş panellerinde enerji ve ekserji analizlerine ilişkin yapılması muhtemel çalışmalara referans olacağı ve literatüre katkı sağlayacağı ön görülmüştür.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: US Department of Energy, “What Are Greenhouse Gases?”, <http://www.eia.gov/oiaf/1605/ggccebro/chapter1.html> (2007).
2. İnternet: UNFCCC, “Kyoto Protocol”, [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/3145.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/3145.php) (2014).
3. Luther, J., “World in transition – towards a sustainable energy system”, *Ger. Advis. Coun. Glob. Change.*, 3 (2013).
4. King, R. R., “40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells”, *Appl. Phys. Lett.*, 90: 183-516 (2007).
5. Öztürk, R., “Güneş pilleri ile elektrik enerjisi üretimi ve karavanlarda uygulanmasının teknik ve ekonomik analizi”, *Tesisat Mühendisliği Derg.*, Temmuz-Ağustos Sayısı, 14–18 (2003).
6. Altaş, İ. H., “Fotovoltaaj güneş pilleri: yapısal özellikleri ve karakteristikleri”, *Karadeniz Tek. Üniversitesi Elektr. Mühendisliği Bölümü, Enerj. Elektr. Elektromekanik Bileşim Yayıncılık A.Ş.*, 66-71 (1998).
7. Çetinkaya, H. B., “Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 2-10 (2001).
8. Goetzberger, A., Hebling, C., and Schock, H-W., “Photovoltaic materials, history, status and outlook”, *Mater. Sci. Eng. R Reports*, 40 (1): 1–46 (2003).
9. Adams, R. E., and Day, W. G., “On the action of light on selenium”, *Proceedings of the Royal Society of London*, London, 1-5 (1876).
10. Oruç, E., “Silisyum güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri ve üretim teknolojileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 24-27 (2007).
11. Green, M. A., “Photovoltaics: Technology overview”, *Energy Policy*, 28 (14): 989–998 (2000).
12. Reynolds, D. C., Leies, G., Antes, L. L. and Marburger, R. E., “Photovoltaic effect in Cadmium Sulfide”, *Phys. Review*, 96: 533–536 (1954).
13. Ohl, R. S., “Light-sensitive electric device including silicon”, *US Patent*, 2: 443-542 (1941).



14. Queisser, H. J., “Detailed balance limit for solar cell efficiency”, *Mater. Sci. Eng. B*, 159–160: 322 (2009).
15. Green, M. A., “Solar cell efficiency tables (version 41)”, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 21: 1-2 (2013).
16. Internet: NREL, “National Renewable Energy Laboratory”, <http://www.nrel.gov/ncpv/>. (2015).
17. Yastrebova, N. V., “High-efficiency multijunction solar cells: Current status and future potential”, *Univ. Ottawa*, Canada (2007).
18. King, R. R., “Pathways to 40 percent-efficient concentrator photovoltaics”, *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona (2005).
19. Wanlass, M., “Monolithic, ultra-thin GaInP/GaAs/GaInAs tandem solar cells” *4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, USA (2006).
20. Garcia, I., “A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solar cell working at 1000 suns”, *Appl. Phys. Lett.*, 94: 053-509 (2009).
21. Geisz, J. F., “40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions”, *Appl. Phys. Lett.*, 93: 123-505 (2008).
22. Sabnis, V., “High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides”, *AIP Conference Proceedings*, 1477: 14 (2012).
23. Wurfel, P., “Thermodynamic limitations to solar energy conversion,” *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures*, 14: 18 (2002).
24. Internet: International Energy Agency — Photovoltaic Power Systems Programme, “Snapshot of Global PV 1992-2014”, <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=32>. (2015).
25. Internet: BP, “Statistical Review of World Energy – Historical Data Workbook BP”,  
: <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. (2015).
26. Internet: Solar Power Europe (SPE), formerly known as EPIA – European Photovoltaic Industry Association EPIA, “Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019”, <http://www.solarpowereurope.org/>. (2015).
27. Internet: Wikipedia, “Growth of photovoltaics”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics#Forecast\\_for\\_2015](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics#Forecast_for_2015). (2015).
28. Internet: Energy Trend PV, “PriceQuotes.” <http://pv.energytrend.com/>. (2014).

29. İnternet: Energy, Fraunhofer Institute for Solar Systems ISE , “Photovoltaics Report”, <https://www.ise.fraunhofer.de> (2015).
30. İnternet: US Department of Energy, “International Energy Statistics”, <https://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=29&aid=12&cid=regions&syid=1980&eyid=2012&unit=BKWH>. (2007).
31. İnternet: İndex Mundi, “Historical Data Graphs per Year”, <http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?c=xx&v=79> (2015).
32. Erkul, A., “Monokristal, polikristal ve amorf-silisyum güneş panellerinin verimliğinin incelenmesi ve aydınlatma sistemi uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-15 (2010).
33. İnternet: Solar Dükkan, “Mono, Polycrystalline ve İnce Film Karşılaştırması”, <http://monovepolyfotovoltaik.blogspot.com.tr/>. (2014).
34. Öztürk, H., “Güneş Enerjileri Ve Uygulamaları”, *Birsen Yayınevi*, Adana, 195-210 (2008).
35. Eke, R., “Güneş pili parametrelerinin işletme koşullarıyla ilişkilendirilmesi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 22-23 (2007).
36. İnternet: Fed Enerji, “Polikristal Güneş Panelleri”, <http://fedenerjisolar.tr.gg/Polikristal-G.ue.ne%26%23351%3B-Panelleri.htm>. (2016).
37. İnternet: Gazi Üniversitesi, “Organik Tabanlı Güneş Hücreleri”, <http://w3.gazi.edu.tr/~znseferoglu/research/dssc-tr.pdf> (2012).
38. İnternet: Slideshare, “Fotovoltaik Güneş Enerjisi Teknolojileri ve Günam Kuruluşunda Geline Aşama”, <http://www.slideshare.net/abdelk/rasit-turan> (2010).
39. İnternet: Photovoltaics Lab IOFFE, “GaAs based solar cells”, [http://pvlab.ioffe.ru/about/solar\\_cells.html](http://pvlab.ioffe.ru/about/solar_cells.html). (2013).
40. İnternet: Teknik Kütüphane, “Organik Güneş Pilleri”, <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/organik-gunes-pilleri/8810#ad-image-0>. (2012).
41. Özden, Ş., “Farklı sürelerle cdcl2 ortamında ısıl işlem görmüş ince film cdte/cds güneş pillerinin elektriksel karakterizasyon yöntemleriyle incelenmesi”, Doktora Tezi, *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla, 9-10 (2015).
42. İnternet: National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Solar Spectra”, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>. (2000).

43. İnternet: Green Rhino Energy, “Solar Radiation Spectra.” <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/spectra.php> (2013).
44. İnternet: Elektrik Port, “Güneş Pilleri Nasıl Çalışır?”, <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/gunes-pilleri-nasil-calisir/10272#ad-image-0>. (2012).
45. İnternet: Diyot.Net, “Diyotlar”, <http://diyot.net/diyotlar/>. (2014).
46. İnternet: “Fotovoltaik Güneş Pilleri.” <http://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/pv.html>.
47. İnternet: “Güneş Pillerinin Yapısı Nedir?” <http://www.webmastersitesi.com/webmaster-sozlugu/226339-gunes-pillerinin-yapisi-nedir.htm> (2011).
48. Yılmaz, H. R., Kılıç, E., Özçalık, H. R. ve Gani, A., “Fotovoltaik (PV) güneş pilinin iki diyotlu modellenmesi”, *1<sup>st</sup> International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES)*, Sakarya, 1-6 (2013).
49. Yılmaz, H. R., Aksu, M., Özer, Z., ve Özçalık, H. R., “Matlab ile gerçekleştirilen fotovoltaik (pv) güneş pili modeli ile güneş enerjisi üretimindeki önemli etkenlerin tespit edilmesi”, *Eloco*, Bursa (2012).
50. Ortiz-Conde, A., Sanchez, F. J. and Muci, J., “New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I–V characteristics”, *Solid State Electronics Laboratory*, Caracas (2005).
51. Bayrak, M., ve Cebeci, G., “3,6 kW Gücündeki Fotovoltaik Generatörün Matlab Simulink İle Modellenmesi,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektr. Mühendisliği Bölümü*, Elazığ, 1-7 (2012).
52. Deniz, P., “Yenilenebilir Güç Ve Enerji Kaynağı Güneş Ve Fotovoltaik- Güneş Elektrik Sistemi”, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, 1-3 (2009).
53. İnternet: PV Education, “Fill Factor”, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>
54. Demirci, F., “Fotovoltaik güneş pillerinin çalışmasını etkileyen dış faktörlerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 58-60 (1996).
55. Engin, R., “Güneş Pilleri”, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Fiz. Bölümü Yayınları*, Van, 3 (151): 3-5 (1995).
56. Karamanov, M., “Güneş enerjisi ve güneş pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 28-31 (2007).

57. Grozdev, M., “Alternatif Enerji kaynakları: güneş enerjisi ve güneş pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 25-27 (2010).
58. Özçalık, H. Z., Yılmaz, Ş., ve Kılıç, E., “Güneş pilinin bir diyotlu eşdeğer devre yardımıyla matematiksel modelinin çıkarılması ve parametrelerin verimliliğe etkilerinin incelenmesi”, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 4, 5 (2013)..
59. Tercan, M. B., “Güneş pili karakterizasyon yöntemleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 129-130 (2000).
60. Demirtaş, M., “Güneş ve rüzgar enerjisi kullanarak şebeke ile paralel çalışabilen hibrit enerji santrali tasarımı ve uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 36-40 (2008).
61. Özgener, L., “HVAC Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliliği ve Uygulamaları”, *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 3-7 (2003).
62. Lee, K. C., “Classification of Geothermal Resources by Exergy”, *Geothermics*, 30: 431–442 (2001).
63. Çengel, Y. A., ve Boles M. A., “Thermodynamics: An Engineering Approach”, Çeviri Editörü/Editörleri: Ali Pınarbaşı, *Güven Bilimsel*, İstanbul, 867-870 (2012).
64. Dinçer, İ., and Rosen, M. A., “Exergy Energy, Environment and Sustainable Development”, *Elsevier Ltd.*, Canada, (2013).
65. Dinçer, İ., and Rosen, M. A., “Effect of Varying Dead-State Properties on Energy and Exergy Analysis of Thermal Systems,” *Int. J. Therm. Sci.*, 43: 121–133 (2004).
66. Erduranlı, P., “Enerji Santralına Ekserji Analizinin Uygulanması,” Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 30-32 (1997).
67. Hepbaşlı, A., “Endüstriyel işletmelerde ekserji yönetim sisteminin kurulması gerekli mi?”, *Termodinamik*, 190: 24-27 (2008).
68. Ross, R. T., “Limits on the yield of photochemical solar energy conversion”, *J. Appl. Phys.*, 48 (11): 4783–4785 (1977).
69. Landsberg, P., “The Carnot factor in solar-cell theory”, *Solid. State. Electron.*, 42:(4) 657–659 (1998).
70. Wurfel, P., “Thermodynamic limitations to solar energy conversion,” *Phys. E Low- Dimens. Syst. Nanostructures*, 14 (1–2): 18–26 (2002).

71. Petela, R., "Influence of gravity on the exergy of substance," *Int. J. Exergy*, 5 (1): 1–17( 2008).
72. Bisquert, J., "Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells," *J. Phys. Chem. B*, 108 (24): 8106–8118 (2004).
73. Dincer, I., "Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 9 (2): 169–189 (2005).
74. Sahin, A. D., "Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems," *Sol. Energy Mater. Cells*, 91 (153): 27-29 (2007).
75. Joshi, A., "Thermodynamic assessment of photovoltaic systems," *Sol. Energy*, 83 (1139–1149): 1–7 (2009).
76. Dinçer, İ., "The role of exergy in energy policy making", *Energy Policy*, 30: 137–149 (2002).
77. Dinçer, İ., "Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems," *Int. J. Energy Res.*, 31 (1): 29–55 (2007).
78. Bejan, A., "Thermal Design and Optimization", *John Wiley and Sons*, USA, (1996).
79. İnternet: Termodinamik.info, "Türkiye’de Yüksek Enerji Tüketen Sektörlerin Enerji ve Ekserji Analizleri Üzerine Bir Araştırma", <http://www.termodinamik.info/bilimsel/turkiye-8217-de-yuksek-enerji-tuketen-sektorlerin-enerji-ve-ekserji-analizleri-uzerine-bir-arastirma>. (2012).
80. Tiwari, G. N., "Solar Energy: Fundamentals, Design, Modeling and Applications". *Narosa Publishing House*, New Delhi, Washington, 18-24 (2002).
81. Santarelli, M., "A thermoeconomic analysis of a PVhydrogen system feeding the energy requests of a residential building in an isolated valley of the Alps", *Energy Convers. Manag.*, 45 (3): 427–451 (2004).
82. Green, M. A., "Third Generation Photovoltaics Advanced Solar Energy Conversion", *Springer*, Berlin, 108-112 (2003).
83. Marti’ A., "Next Generation Photovoltaics High Efficiency through Full Spectrum Utilization", *Institute of Physics Publishing Ltd*, Bristol, 140-145 (2004).

## ÖZGEÇMİŞ

Mutlucan BAYAT, 1988 yılında Kırşehir ili Kaman ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kaman'da tamamladı. 2006 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yükseköğrenimine başladı ve 2011 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. 2012 yılında ilk olarak 6 ay süre ile Hacettepe Üniversitesi YDYO'da, sonrasında ise 8 ay süre ile Londra'da Stafford House School of English dil okulunda yabancı dil eğitimi aldı. Akabinde, Loughborough Üniversitesi'nde bilimsel hazırlık ve akademik dil eğitimine devam etti. Türkiye'ye döndükten sonra 2013 yılı Kasım ayında ÖYP araştırma görevlisi olarak Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji ABD'ye atandı. 2014 yılı Şubat ayında KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır.

### **Adres Bilgileri:**

Adres : Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 2. Kat Oda No: 220  
Merkez / KARABÜK

Tel: : 05444691055

E-posta : [mutlucanbayat@karabuk.edu.tr](mailto:mutlucanbayat@karabuk.edu.tr)