



**GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN ENERJİ, EKSERJİ,  
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE EKSERGOEOKONOMİK ANALİZLER İLE  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Miraç Can ÖZTÜRK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2023**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

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

.....

Miraç Can ÖZTÜRK

13/06/2023

# GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN ENERJİ, EKSERJİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE EKSERGOEOKONOMİK ANALİZLER İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Miraç Can ÖZTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

## ÖZET

Günümüzde teknolojinin gelişimiyle birlikte artan enerji talebi, temiz ve sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisine yönelik çalışmalar da hız kazanmıştır. Bu çalışma, Türkiye, Konya, Karapınar'da  $37^{\circ}45'$  ile  $37^{\circ}47'$  kuzey enlemleri ve  $33^{\circ}33'$  ile  $33^{\circ}35'$  doğu boylamları arasında bulunan 226,4 MWe güç kapasitesine sahip şebekeye bağlı bir güneş enerji santrali incelenmiştir. Bu güneş enerji santrali, yarı kesim (half-cut) teknolojisiyle üretilmiş monokristal, çift yüzlü (bifacial) güneş panellerinden ve tek eksende (doğu-batı) güneş takip eden sistemden oluşmaktadır. Güneş ışınım şiddeti ile ortam sıcaklık verilerinin hem yüksek hem de düşük olduğu iki farklı ay (Ağustos 2021 ile Ocak 2022) için güneş enerji santrali üzerinde karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Bununla birlikte bu santralde 6 ay boyunca günlük veriler kullanılarak enerji, ekserji, sürdürülebilirlik ve eksergoekonomik analizler yapılmıştır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanan enerji ve ekserji analizleri sonucunda, santralin enerji verimliliği, maksimum elektrik verimliliği, güç dönüştürme verimliliği ve ekserji verimliliği ortalamaları sırasıyla %75,50; %36,42; %22,34; %21,98 olarak bulunmuştur. Santralin sürdürülebilirlik indeksi ve atık ekserji oranının ortalama değerleri sırasıyla 1,29 ve 0,78 olarak hesaplanmıştır. EXCEM yöntemi kullanılarak termoeekonomik ve eksergoekonomik ortalama parametre değerleri sırasıyla 2,43 W/\$ ve 2,32 W/\$ olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 92802

Anahtar Kelimeler : Güneş, fotovoltaik, termodinamik, enerji, ekserji, eksergoekonomik

Sayfa Adedi : 92

Danışman : Doç. Dr. Battal DOĞAN

EVALUATION OF SOLAR POWER PLANT WITH ENERGY, EXERGY,  
SUSTAINABILITY AND EXERGOECONOMIC ANALYSIS

(M. Sc. Thesis)

Miraç Can ÖZTÜRK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Nowadays, the growing energy demand with the advancement of technology has increased the interest in the renewable energy sources which are clean and sustainable. However the studies in the solar energy which is among the renewable energy sources has also gather speed. In this study, on grid-connected solar power plant having the power capacity of 226,4 MWe and located in Karapınar, Konya, Turkey, between northern latitudes  $37^{\circ} 45'$  and  $37^{\circ} 47'$  and eastern longitudes  $33^{\circ} 33'$  and  $33^{\circ} 35'$  was investigated. This solar power plant is composed of monocrystalline, bifacial solar panels produced with half-cut technology and a solar-tracking system on the single axis (east-west). Comparative assessments have been realized related to this solar power plant for two different months (August 2021 and January 2022) in which solar radiation intensity and ambient temperature data are both high and low. Furthermore, energy, exergy, sustainability and exergoeconomic analyses have been conducted in this plant by using daily data during 6 months. As a result of the energy and exergy analyses based on the first and second laws of thermodynamics, the energy efficiency, maximum electricity efficiency, power conversion efficiency and exergy efficiency averages of the plant were found to be 75,48%; 36,40%; 22,34%; 21,98%, respectively. The average values of the plant's sustainability index and waste exergy rate were calculated at 1,29 and 0,78, respectively. The average values of thermo-economic and exergoeconomic parameters using the EXCEM method have been determined to be 2,43 W/\$ and 2,32 W/\$, respectively.

Science Code : 92802

Key Words : Solar, photovoltaic, thermodynamic, energy, exergy,  
exergoeconomic

Page Number : 92

Supervisor : Assoc. Prof. Battal DOĞAN

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda, konunun tespitinden çalışmanın sonuçlanmasına kadar olan süreçte bana her konuda rehberlik eden ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Battal DOĞAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Yapmış olduğum analizlerimde kullandığım verilerin elde edilmesi ve kullanılmasında yardımlarını esirgemeyen Kalyon Holding şirketi değerli yöneticilerine, çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Ayrıca, eğitim ve meslek hayatım boyunca üzerimde emeği olan hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi olarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	5
3. TEORİK BİLGİLER .....	11
3.1. Fotovoltaik Hücreler (Piller).....	11
3.1.1. Monokristal (Mono-Si) fotovoltaik hücreler .....	13
3.1.2. Polikristal (Multi-Si) fotovoltaik hücreler.....	13
3.1.3. Galyum arsenit (GaAs) fotovoltaik hücreler .....	14
3.1.4. Diğer fotovoltaik hücreler.....	14
3.2. Fotovoltaik Hücresinin Çalışma Prensipleri .....	18
3.3. Fotovoltaik Sistem Ekipmanları .....	20
3.4. Fotovoltaik Sistemler.....	26
3.4.1. Uzay uygulamaları.....	26
3.4.2. Şebekeden bağımsız sistemler.....	26
3.4.3. Şebeke bağlantılı sistemler .....	27
3.4.4. Diğer uygulamalar .....	28
3.5. Fotovoltaik Sistemlerin Maliyeti .....	28

	<b>Sayfa</b>
3.6. Enerji ve Ekserji Analizi.....	28
3.7. Sürdürülebilirlik Analizi.....	30
3.8. Eksergoekonomik Analiz .....	30
3.8.1. EXCEM yöntemi.....	31
<b>4. MATERYAL VE METOT.....</b>	<b>33</b>
4.1. Konya Karapınar YEKA-1 (Faz-1) Güneş Enerjisi Santral Bilgileri.....	33
4.2. Güneş Enerjisi Santralindeki Temel Elemanlar ve Ölçüm Cihazları .....	36
4.2.1. Güneş paneli ve özellikleri .....	36
4.2.2. Merkezi evirici ve özellikleri.....	37
4.2.3. Piranometre ve özellikleri.....	38
4.2.4. WS-600 UMB ve özellikleri.....	39
4.2.5. FV modül sıcaklık sensörü ve özellikleri.....	39
4.2.6. Albedometre ve özellikleri .....	40
4.2.7. Kirlilik izleme sistemi (DustIQ) ve özellikleri.....	41
4.2.8. Hava izleme istasyonu (WMS) ve özellikleri .....	42
4.3. Güneş Enerjisi Santralinin Termodinamik Analizi .....	43
4.3.1. Santralin enerji analizi .....	43
4.3.2. Santralin ekserji analizi.....	46
4.3.3. Santralin sürdürülebilirlik analizi.....	50
4.3.4. Santralin eksergoekonomik analizi .....	50
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>53</b>
5.1. İki Farklı Ay için Değerlendirmeler .....	53
5.1.1. Santralden alınan veriler ile değerlendirme .....	53
5.1.2. Enerji ve ekserji analizleriyle değerlendirme.....	61

	<b>Sayfa</b>
5.1.3. Sürdürülebilirlik analiz ile değerlendirme .....	64
5.1.4. Eksergoekonomik analiz ile değerlendirme.....	64
5.2. 6 Aylık (Ağustos 2021 – Ocak 2022) Değerlendirmeler.....	68
5.2.1. 6 aylık enerji ve ekserji analizleriyle değerlendirme.....	68
5.2.2. 6 aylık sürdürülebilirlik analiz ile değerlendirme .....	69
5.2.3. 6 aylık eksergoekonomik analiz ile değerlendirme.....	70
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>77</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>85</b>
<b>EK-1. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz-1 bölümünün 6 aylık verileri .....</b>	<b>86</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Güneş pili (hücre) sınıflandırılması ve çeşitleri.....	12
Çizelge 3.2. FV sistemlerin avantaj ve dezavantajları .....	26
Çizelge 3.3. FV sitemlerin bazı ülkelerdeki toplam kurulum maliyetleri.....	28
Çizelge 3.4. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması .....	29
Çizelge 4.1. Güneş panelinin elektriksel ve mekaniksel özellikleri.....	37
Çizelge 4.2. Merkezi evirici teknik özellikleri.....	38
Çizelge 5.1. Ağustos ve Ocak aylarının ortalama, albedo ve FV panel temizlik oranı ..	55
Çizelge 7.1. Güneş enerjisi santralının Ağustos 2021 verileri.....	84
Çizelge 7.2. Güneş enerjisi santralının Eylül 2021 verileri .....	85
Çizelge 7.3. Güneş enerjisi santralının Ekim 2021 verileri .....	86
Çizelge 7.4. Güneş enerjisi santralının Kasım 2021 verileri.....	87
Çizelge 7.5. Güneş enerjisi santralının Aralık 2021 verileri.....	88
Çizelge 7.6. Güneş enerjisi santralının Ocak 2022 verileri.....	89

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. FV hücrelerin pazar payları .....	12
Şekil 3.2. Monokristal FV hücre ve temel üretim aşamaları .....	13
Şekil 3.3. Polikristal FV hücre .....	14
Şekil 3.4. Poliimid malzeme üzerinde bir CIGS güneş hücresi .....	15
Şekil 3.5. Cam, ultra ince cam ve poliimid üzerindeki CdTe FV hücreler .....	16
Şekil 3.6. Bazı FV hücrelerin ve FV modüllerin maksimum verimlilikleri .....	18
Şekil 3.7. İletken, yarı iletken, yalıtkan malzemelerin bant aralıkları .....	18
Şekil 3.8. Fotovoltaik bir hücrenin yapısı ve çalışma prensibi .....	19
Şekil 3.9. FV hücre, FV modül ve FV dizi .....	20
Şekil 3.10. Tek ve çift yüzeyli güneş panellerinin dünya pazarındaki payı .....	21
Şekil 3.11. Tam ve yarım güneş hücrelerinin gerilim değeri .....	21
Şekil 3.12. Tam ve yarım güneş hücrelerinin akım değeri .....	22
Şekil 3.13. İki farklı evirici (inverter) .....	23
Şekil 3.14. Birleştirici kutu (combiner box) dış ve iç görünüm .....	24
Şekil 3.15. Tek eksenli güneş takip sistemlerinin şematik gösterimi .....	25
Şekil 3.16. Çift eksenli güneş takip sistemlerinin şematik gösterimi .....	25
Şekil 3.17. Şebekeden bağımsız FV sistemin şematik gösterimi .....	27
Şekil 3.18. Şebeke bağlantılı FV bir sistemin şematik diyagramı .....	27
Şekil 3.19. EXCEM yöntemi temel şeması .....	31
Şekil 4.1. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES projesi faz-1 uydu görüntüsü .....	33
Şekil 4.2. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES projesi faz-1 drone görüntüsü .....	34
Şekil 4.3. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES projesi faz-1 şematik gösterimi .....	35
Şekil 4.4. Kalyon PV G1-144 CAM-CAM güneş paneli .....	36

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.5. General Electric LV5 <sup>+</sup> 1566 merkezi evirici .....	37
Şekil 4.6. Kipp&Zonen SMP 10-A pıranometre .....	38
Şekil 4.7. Luft WS-600 UMB sensörü.....	39
Şekil 4.8. Ingenieurbüro Tm-RS485-MB modül sıcaklık sensörü .....	39
Şekil 4.9. Santral içerisinde montajlanmış bir FV modül sıcaklık sensörü .....	40
Şekil 4.10. Santrale ait albedometre cihazının genel görünümü.....	41
Şekil 4.11. Kipp&Zonen kirlilik takip sistemi.....	41
Şekil 4.12. Santraldeki hava izleme istasyonunun (WMS) genel görünümü .....	42
Şekil 4.13. Santralin (Faz-1) WMS yerleşim planının şematik gösterimi .....	43
Şekil 4.14. Güneş hücresinin akım voltaj (I-V) eğrisi .....	44
Şekil 4.15. Parrott ekserji denkleminin esas aldığı Güneş-Dünya konisi .....	48
Şekil 4.16. Direkt ve difüz güneş ışınımaları .....	49
Şekil 5.1. Güneş ışınımı ve maksimum çıkış gücünün iki farklı aydaki değişimi.....	54
Şekil 5.2. Güneş ışınım şiddeti ile maksimum çıkış gücü arasındaki ilişki.....	56
Şekil 5.3. Ortam ve hücre sıcaklıklarının iki farklı aydaki değişimi .....	57
Şekil 5.4. Rüzgar hızının iki farklı aydaki değişimi .....	57
Şekil 5.5. Hücre ve ortam arasındaki sıcaklık farkı ile rüzgar hızının ilişkisi.....	58
Şekil 5.6. FV panellerin doluluk faktörünün iki farklı aydaki değişimi .....	59
Şekil 5.7. Termal enerji kaybının iki farklı aydaki değişimi .....	60
Şekil 5.8. Termal enerji kaybı ile güneş ışınımı şiddeti arasındaki ilişki .....	60
Şekil 5.9. İki farklı ayda enerji, maksimum elektrik ve güç dönüştürme verimlilikleri .	62
Şekil 5.10. İki farklı aydaki ekserji verimlilikleri.....	63
Şekil 5.11. Doluluk faktörü ve ekserji verimliliği arasındaki ilişki.....	63
Şekil 5.12. Sürdürülebilirlik indekslerinin iki farklı aydaki değişimi .....	64

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.13. Giren ve kaybolan toplam enerji miktarının iki farklı aydaki değişimi.....	65
Şekil 5.14. Giren ve kaybolan toplam ekserji miktarının iki farklı aydaki değişimi.....	65
Şekil 5.15. Santraldeki enerji kaybı ve güneş ışınımı şiddeti arasındaki ilişki.....	66
Şekil 5.16. Santraldeki ekserji kaybı ve güneş ışınımı şiddeti arasındaki ilişki .....	66
Şekil 5.17. Termoeconomik analiz parametresinin iki farklı aydaki değişimi.....	67
Şekil 5.18. Eksergoekonomik analiz parametresinin iki farklı aydaki değişimi.....	67
Şekil 5.19. 6 aylık enerji, maksimum elektrik, güç dönüştürme, ekserji verimliliği.....	69
Şekil 5.20. 6 aylık doldurma faktörü, sürdürülebilirlik indeksi, atık ekserji oranı .....	70
Şekil 5.21. 6 aylık termoeconomik ve eksergoekonomik analiz parametreleri.....	71

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>A</b>	Fotovoltaik modüllerin toplam yüzey alanı, m <sup>2</sup>
<b>E<sub>n</sub></b>	Enerji, W
<b>E<sub>x</sub></b>	Ekserji, W
<b>E<sub>Xinput</sub></b>	Ekserji girişi, W
<b>E<sub>Xoutput</sub></b>	Ekserji çıkışı, W
<b>E<sub>XPV</sub></b>	Fotovoltaik ekserji, W
<b>E<sub>Xsolar</sub></b>	Solar ekserji, W
<b>h<sub>ca</sub></b>	Taşınım ve ışıınım ısı transfer katsayısı, m/s
<b>I<sub>max</sub></b>	Maksimum akım, A
<b>I<sub>sc</sub></b>	Kısa devre akımı, A
<b>K</b>	Sermaye maliyeti, \$
<b>L<sub>en</sub></b>	Enerji kayıp oranı, W
<b>L<sub>ex</sub></b>	Ekserji kayıp oranı, W
<b>P<sub>max</sub></b>	Maksimum güç, W
<b>Q</b>	Termal enerji, W
<b>R<sub>en</sub></b>	Termoekonomik analiz parametresi, W/\$
<b>R<sub>ex</sub></b>	Eksergoekonomik analiz parametresi, W/\$
<b>S<sub>T</sub></b>	Toplam güneş ışıınımı, W/m <sup>2</sup>
<b>T<sub>amb</sub></b>	Ortam sıcaklığı, K
<b>T<sub>cell</sub></b>	Fotovoltaik hücre sıcaklığı, K
<b>T<sub>ec</sub></b>	Standart test koşullarında V <sub>oc</sub> sıcaklık katsayısı, K
<b>T<sub>sun</sub></b>	Güneş sıcaklığı, K
<b>v</b>	Rüzgar hızı, m/s
<b>V<sub>max</sub></b>	Maksimum gerilim, V
<b>V<sub>oc</sub></b>	Açık devre gerilimi, V

**Simgeler** $\eta_{en}$  $\eta_{max,el}$  $\eta_{pce}$  $\Psi$ **Açıklamalar**

Enerji verimliliği,

Maksimum elektrik verimliliği, %

Güç dönüştürme verimliliği, %

Ekserji verimliliği, %

**Kısaltmalar****AC****DC****EXCEM****FF****FV****GES****MW<sub>e</sub>****MW<sub>p</sub>****MPPT****SCADA****SI****WER****WMS****YEKA****Açıklamalar**

Alternatif akım

Doğru akım

Ekserji-maliyet-enerji-kütle

Doldurma faktörü

Fotovoltaik

Güneş enerji santrali

Megawatt elektrik

Megawatt pik

Maksimum güç izleme noktası

Merkezi kontrol ve veri toplama

Sürdürülebilirlik indeksi

Ekserji atık oranı

Hava izleme istasyonu

Yenilenebilir enerji kaynak alanları



## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu teknolojinin de gelişimiyle birlikte yükselen enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü fosil yakıtlardan elde etmektedir. Hem çevresel açıdan sorunlar oluşturan hem de giderek azalan fosil yakıtlar, temiz ve tükenmez yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi sağlamıştır. Aynı zamanda Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu çok sayıda ülke tarafından 2015 yılında imzalanan Paris İklim Anlaşması, ihtiyaç duyulan enerjinin fosil yakıtlardan ziyade daha çevreci kaynaklardan üretilmesini hedeflemektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal ortamda tekrarlayan veya kullanıldıkları oranda yenilenen enerji akışları olarak tanımlanmaktadır. Dünyanın tüm yenilenebilir enerji kaynakları çeşitli teknolojiler kullanılarak doğrudan veya dolaylı olarak enerjiye dönüştürülebilen güneş radyasyonundan üretilmektedir [1].

Fotovoltaik (FV) teknolojisi alanındaki ilk çalışma 1839 yılında Edmond Becquerel tarafından yapılmıştır. Becquerel, iki metal elektrottan oluşan bir elektrolitik hücre kullanarak yaptığı bir deneyde fotovoltaik etkiyi keşfetmiştir. Bazı malzemelerin, özellikle platinin güneş ışığına maruz kaldığında az miktarda elektrik ürettiğini tespit etmiştir. 1883'te Charles Fritz, selenyum kullanarak ilk güneş pilini icat etti, ancak g dönüştürme verimliliği %1 olarak hesaplanmıştır [2]. 1904 yılında Albert Einstein fotoelektrik etki ve ışığın kuantum doğası özellikleri üzerine ünlü çalışmasını yayınlamıştır. Verimliliği yüksek fotovoltaik hücre üretimi ancak yarı iletken teknolojisinin geliştirilmesinden sonra mümkün olmuştur. Özellikle yüksek seviyede saf silisyumun bulunması yarı iletken teknolojisi için çok önemlidir. Silisyumun düşük ışık soğurma özelliğine rağmen yarı iletkenliğinin gelişmişliği fotovoltaik pazarına hakim olmasını sağlamıştır [3]. İlk silisyumlu fotovoltaik hücreler, 1954 yılında Chapin, Fuller, ve Pearson adlı bilim adamları tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde Bell laboratuvarında geliştirilmiştir. %6 oranında verime sahip olan bu fotovoltaik hücrelerin verimlilikleri kısa süre içinde %10'a kadar yükseltilmiştir. İlk zamanlarda fotovoltaik hücrelerde yalnızca Chochralski tarafından geliştirilen tek kristalli silisyumlar kullanılmıştır [4]. Fotovoltaik hücreler ilk kez 1958 yılında Vanguard adlı uyduda kullanılmıştır. Bu 108 adet hücre uyduya uzun bir süre g sağlamıştır ve tüm beklentileri aşmıştır. Böylece, sınırlı ama kaliteli bir fotovoltaik hücre pazarı gelişmiştir. O zamanki yüksek maliyetler nedeniyle, FV teknolojisi uzun yıllar boyunca uzay alanı dışında

kullanılmamıştır [3]. Önceki yıllarda uzayı keşfetme arzusu fotovoltaik teknolojisinin ilerlemesine büyük bir katkı sağlamıştır. 1970'lerde Joseph Lindmeyer, silikon güneş pillerinin verimliliğini %50 arttıran bir süreç geliştirmiştir. Bunun üzerine 1973 yılında Joseph Lindmeyer ve Peter Vardi birlikte Solarex firmasını kurmuştur. Bu firmanın kurulmasından aylar sonra meydana gelen petrol krizi, Solarex firmasının büyümesini sağlamıştır. Bu krizin de etkisiyle bilim camiasının fotovoltaik teknolojisine olan ilgisi daha çok atmıştır [5]. Güneş pili verimliliği 1973'te %15,2'ye, 1974'te %17,2'ye ve 1985'te %25'e yükseldi [6]. 1990'ların sonunda, özellikle ABD, Japonya ve Almanya'daki teşvikler fotovoltaik sistemlere olan talebi artırmıştır [7]. Fotovoltaik endüstrisi, yıllık ortalama %30-40 büyüme oranıyla 2000'den 2021'e kadar etkileyici bir büyüme elde etmiştir [8].

Uzun yıllar süren gelişmeler sonrasında günümüzde fotovoltaik hücrelerden elektrik üretimi çok önemli bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

### Tezin amacı

Bu çalışmanın amacı, çift yüzeyli (bifacial) monokristal güneş panellerinden oluşan tek eksenli (doğu-batı) güneş takip sistemine sahip bir güneş enerji santralının enerji, ekserji, sürdürülebilirlik ve eksergoekonomik analizleri ile incelenmesidir. Konya, Karapınar iklim koşulları altında bulunan güneş enerji santrallerinin hem yüksek hem de düşük güneş ışınım değerlerine ait iki farklı ay için analizler ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca bu iki farklı ayda güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, FV hücre sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çevresel koşulların güneş enerji santrali üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte Güneş enerji santralinden 6 ay boyunca elde edilen veriler ile enerji verimliliği, maksimum elektrik verimliliği, güç dönüştürme verimliliği, ekserji verimliliği, sürdürülebilirlik indeksi, termoeekonomik ve eksergoekonomik analiz parametrelerinin genel ortalama değerleri belirlenmiştir.

### Tezin önemi

Dünyamızda giderek artan çevresel sorunlar, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi problemler, daha çevreci ve temiz bir şekilde enerji üretimini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle her geçen gün daha verimli hale gelen yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili olan bilimsel çalışmalar oldukça önem kazanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin çeşitli sorunları literatürde

cevaplanmıştır. Çift yzelyli gnez panellerinden oluşan ve tek eksende gnez takip sistemli, Tzrkiye, Konya, Karapınar'da bulunan şebeke bağlantılı gnez enerji santrali zzerinde yapılan bu çalışma ile literatze katkı sağlanmıştır.

### Sınırlılıklar

Bu alışma, Tzrkiye'nin Konya ili Karapınar ilçesindeki iklim koşullarında gerçekleştirilmiştir. 2021 yılı Ağustos, Eylzle, Ekim, Kasım, Aralık ayları ile 2022 yılı Ocak ayı olmak zzerinde toplamda 6 aylık bir szureyi kapsamaktadır. Belirtilen her ay 30 gzn kabul edilmiş ve sadece 09.00-17.00 saatleri arasındaki veriler kullanılmıştır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde güneş enerji sistemlerinde farklı amaçlar için enerji, ekserji ve eksergoekonomik çalışmaları bulunmaktadır.

Şahin ve diğerleri, daha önceki ekserji modellerinden hareketle kendilerinin türettikleri ekserji modeliyle, ABD'nin Colorado eyaletine bağlı Golden şehrinde toplam 631,5 Watt gücündeki fotovoltaik hücrelerinin termodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Hesaplamalarında ekserji akışlarını, ekserji kayıplarını ve ekserji verimliliklerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak fotovoltaik hücrelerin enerji verimliliğinin %7 ile %12 arasında, ekserji verimliliğinin ise %2 ile %8 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Fotovoltaik hücre sistemlerinde daha gerçekçi değerlendirme ve planlama yapılabilmesi için ekserji analizlerinin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir [9].

Joshi ve diğerleri, Hindistan, Yeni Delhi şehrinde fotovoltaik sistemler için 27 Mart 2006 günü enerji ve ekserji analizleri uygulamışlardır. Bu analizler sonucunda fotovoltaik sistemlerin ekserji verimliliğinin %7,8 ile %13,8 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarından yola çıkarak uyguladıkları enerji ve ekserji analizlerinin sonuçlarına göre enerji verimliliğinin, ekserji verimliliğinden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır [10].

Joshi ve diğerleri, fotovoltaik ve fotovoltaik-termal sistemlerinin ekserji verimliliği üzerine çeşitli termodinamik yaklaşımlarla değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Bu sistemlerin ekserji verimlilikleri arasındaki farkları göstermişlerdir. Fotovoltaik-termal sistemlerin ekserji verimliliğinin, FV sistemlerin ekserji verimliliğinden yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Fotovoltaik sistemlerin değerlendirilmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için ekserji analizlerinin kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır [11].

Akkaya, yüksek lisans tez çalışmasında, meteorolojik şartların rüzgar ve güneş enerjisi sistemleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Aynı zamanda TÜBİTAK projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Meteoroloji Parkı'na kurulan rüzgar-güneş hibrit sisteminin ölçüm parametreleri ele alınarak bu sistemlerin ayrı ayrı enerji-ekserji verimlilikleri hesaplanmış ve enerji-ekserji kayıplarını tespit edip maliyet kayıplarını

belirlemiştir. Ekserji, maliyet, enerji ve kütle (EXCEM) yöntemini kullanarak bu sistemlerin ayrı ayrı eksergoekonomik analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmasının sonunda enerji verimliliğinin ekserji verimliliğinden daha yüksek çıktığını bu yüzden bu tür enerji tesislerinin kurulum aşamasında verim ve fizibilite hesaplamaları yapılırken ekserji veriminin göz önünde bulundurulmasının daha gerçekçi bir modelleme yapılmasına olanak sağlayacağını vurgulamıştır [12].

Saloux ve diğerleri, fotovoltaik ve fotovoltaik-termal sistemlerin ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Enerji ve ekserji dengeleri üzerinde çalışarak hem termal hem de elektriksel enerji akışında yer alan farklı ekserji kayıplarını belirlemişlerdir [13].

İzgi ve Akkaya, İstanbul Teknik Üniversitesi meteoroloji parkında inşa edilen 750 Watt (W) kapasiteye sahip bir fotovoltaik sistemin eksergoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. İlkbaharı temsil etmek için Nisan ayını, yazı temsil etmek için ise Ağustos ayını seçmişlerdir. Analizlerini bu aylara ait veriler ile yapmışlardır. Sistem üzerinde önce ekserji analizi ve daha sonra EXCEM yöntemiyle eksergoekonomik analizi gerçekleştirmişlerdir [14].

Pandey ve diğerleri, Kuzey Hindistan'da aylık enerji ve ekserji analizleri yaparak polikristal fotovoltaik modüllerin performans değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmalarının sonucuna göre, enerji verimliliği, güç dönüştürme verimliliği ve ekserji verimliliğinin ortalama değerlerini sırasıyla %18,09; %12,26; %11,17 olarak tespit etmişlerdir [15].

Aoun ve diğerleri, Cezayir, Adrar bölgesinde üç gün boyunca (21, 22 ve 23 Mart) monokristal güneş modüllerinin enerji, güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerini araştırmışlardır. 21 Mart günü hava bulutlu iken 22 Mart ve 23 Mart günlerinde hava açık olarak belirtilmiştir. Bulutlu günde enerji, güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerinin sırasıyla %17,2 ile %22,3; %12,3 ile %16,10 ve %5,3 ile %12 arasında değiştiğini bulmuşlardır. Havanın açık olduğu günlerde ise enerji, güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerinin sırasıyla %9,28 ile %22,1; %7,55 ile %16,8 ve %1,8 ile %15,5 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Böylece, verimlilik analizi sonuçlarının farklı hava koşullarından dolayı değişebileceğini kanıtlamışlardır [16].

Sudhakar ve Srivastava, 36 watt kapasitesinde bir fotovoltaik modülün termal, elektriksel ve ekserji çıkışını incelemişlerdir. Gündüz enerji verimliliğinin %6 ile %9 arasında, ekserji verimliliğinin ise %8 ile %10 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, FV modülün ekserji verimliliğinin, başlangıçta yüksek güneş ışınım şiddetiyle arttığını ve maksimum noktaya ulaştıktan sonra azaldığını tespit etmişlerdir. Ek olarak, FV modül sıcaklığının artışıyla ekserji kaybının da arttığı sonucuna varmışlardır [17].

Gaur ve Tiwari, farklı güneş hücre tiplerine dayalı opak ve yarı saydam fotovoltaik modüllerinin eksergoekonomik ve çevresel ekonomik analizlerini gerçekleştirmiştir. Güneş hücresi türüne bakılmaksızın yarı saydam FV modüllerin opak FV modüllere göre daha yüksek enerji kayıp oranı ve daha yüksek ekserji kayıp oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir [18].

Pandey ve diğerleri, Kuzey Hindistan'da her ayın belirli günlerinde ince film fotovoltaik modüllerinin enerji ve ekserji performans değerlendirmelerini yapmışlardır. Performans değerlendirmeleri, güç dönüşümü verimliliğinin ekserji verimliliğinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Şubat ayının bütün aylar arasında en yüksek verimlilikler sahip olduğunu bulmuşlardır [19].

Bayat, yüksek lisans tez çalışmasında, 130 watt gücünde silikon tabanlı polikristal bir güneş paneli ile 30 gün boyunca 09:00-17:00 saatleri arasında her yarım saatte bir gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde ettiği verileri kullanarak enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, güneş panelinin enerji, ekserji ve güç dönüştürme verimlilikleri sırasıyla %23,8 ile %68,4; %9,2 ile %18,3 ve %9,4 ile %18,7 arasında bulunmuştur [20].

Bayrak ve diğerleri, Elazığ ilinde 75 watt kapasitesindeki polikristal bir güneş paneli üzerinde kısmi gölge oluşturarak enerji ve ekserji verimliliklerini incelemişlerdir. 3 farklı (tek hücre, yatay, dikey) şekilde gölgelenme pozisyonu ve gölgelenme oranları oluşturmuşlardır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanarak yaptıkları enerji ve ekserji analizleri sonucunda güneş paneli üzerindeki gölgelenmenin en önemli etkisinin yatay gölgelenme durumunda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [21].

Atlı, yüksek lisans tez çalışmasında, Yaşar Üniversitesi binasındaki her biri 155 watt olan 48 adet güneş panelinden oluşan binaya birleştirilmiş fotovoltaik sistemi incelemiştir. Bir yıl boyunca her aya ait bir günlük verileri kullanarak enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizler gerçekleştirmiştir. Enerji ve ekserji analiz sonuçlarının sırasıyla %10,59 ile %12,71 ve %10,24 ile %12,67 arasında değiştiğini tespit etmiştir. Eksergoekonomik analiz için iki farklı (EXCEM ve SPECO) yöntem kullanmıştır. Eksergoekonomik analiz parametresini, ECXEM yöntemine göre 0,003407 kWh/EUR bulurken SPECO yöntemine göre 0,8335 EUR/kWh bulmuştur [22].

Bayrak ve diğerleri, güneş enerjisinden elektrik üretiminde ekserji ve performans analizleri hakkında geniş bir yelpazede inceleme yapmışlardır. Fotovoltaik ve hibrit sistemlerin ( $FV/T_{su}$  veya  $FV/T_{hava}$ ) avantajlarını ve dezavantajlarını ekserji kavramı üzerinden sunmuşlardır. Hibrit sistemlerin ( $FV/T_{su}$  veya  $FV/T_{hava}$ ) ekserji verimliliğinin, fotovoltaik sistemlerin iki katı olduğu sonucuna varmışlardır [23].

Sukumaran ve Sudhakar, Hindistan'daki Cochin Uluslararası Havalimanı'ndaki polikristal fotovoltaik modüllerden oluşan 12 MWp kapasitesindeki bir güneş enerji santralının ekserji ve enerji analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda santralin, enerji verimliliğinin %13,3 ile %16,4 arasında değiştiğini ve ekserji verimliliğinin %9 ile %10 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir [24].

Bayat ve Özalp, Karabük Üniversitesi mühendislik binası (41.12 K, 32.39 B) üzerine polikristal fotovoltaik paneller ile küçük bir güneş enerji sistemi kurmuşlardır. Daha sonrasında bu sistem üzerinde termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçları, sistem enerji verimliliğinin %24 ile %68,4; maksimum elektrik verimliliğinin %12,6 ile %23,12; güç dönüştürme verimliliğinin %9,6 ile %18,3 ve ekserji verimliliğinin ise %9,3 ile %18,1 arasında değiştiğini göstermektedir. Ayrıca bu sistem üzerinde yaptıkları eksergoekonomik analizler sonucunda termoeekonomik analiz parametresinin 0,06 W/\$ ile 0,45 W/\$ arasında, eksergoekonomik analiz parametresinin ise 0,05 W/\$ ile 0,43 W/\$ arasında değiştiğini tespit etmişlerdir [25].

Bayrak ve Öztop, Türkiye'nin Elazığ ilinin iklim koşullarında fotovoltaik (FV) paneller üzerinde soğutucu özellik göstermesi için FV panellere farklı dizilerde ve farklı uzunluklarda farklı kanat parametreleri uygulamışlardır. Daha sonra bu sistem üzerinde

enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirmişlerdir. Belirsizlik analizinin de uygulandığı bu deney sonuçlarında en yüksek enerji ve ekserji verimliliklerini sırasıyla %11,55 ve %10,91 olarak tespit etmişlerdir [26].

Ekinci, yüksek lisans tezinde Denizli, Konya ve Erzurum illerinde monokristal, polikristal ve ince film güneş panellerinin karşılaştırılmalı enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Ayrıca ince film güneş panelleri ile kristal silikon güneş panellerinin yaşam döngüsü analizlerini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, fotovoltaik teknolojinin sürdürülebilir ve çevre dostu olduğunu kanıtlamıştır. Monokristal güneş panellerinin en verimli güneş paneli tipi olduğunu tespit etmiştir. Ek olarak iç ve dış ortam şartlarının enerji ve ekserji verimliliğini etkilediği sonucuna varmıştır [27].

Kumar ve diğerleri, Hindistan, Sama'da su kanalı üstüne kurulmuş 10 MWp kapasitesindeki şebeke bağlantılı bir fotovoltaik tesisin enerji ve ekserji performansını değerlendirmişlerdir. Bu performans değerlendirmesi için tesisin iki yıllık verilerini kullanmışlardır. Tesisin ortalama performans oranını, sistem ve ekserji verimini sırasıyla 0,78; %11,90 ve %12,03 olarak tespit etmişlerdir [28].

Sreenath ve diğerleri, Hindistan'da 7 farklı havalimanında 7E analizleri gerçekleştirmişlerdir. Her havalimanı için 5 MW'lık Güneş enerji santrali tasarlanmasını planlayarak RETScreen yazılımıyla analizlerini yapmışlardır. Bu çalışma sonucuna göre tüm havalimanları için fotovoltaik enerji santrallerinin teknik olarak uygulanabilir nitelikte olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmanın dünyanın dört bir yanındaki havalimanlarına güneş enerji santralleri kurulmasını teşvik edeceğini beklemektedirler[29].

Pour Rahmatı Khalejan, doktora tez çalışmasında, Türkiye, Samsun'da şebekeye bağlı bir fotovoltaik güç santralının 12 aylık verileri ile Petela, Spanner ve Parrott güneş ekserji modellerinden yararlanarak karşılaştırılmalı enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Ek olarak santrale ait trafo binasının paneller üzerinde oluşturduğu gölgeleme üzerine de bazı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışma sonucuna göre Parrott güneş ekserji modelinde FV ekserji verimliliği %4,97 ile %7,30 arasında değiştiğini, Patella ve Spanner güneş ekserji modellerinde FV ekserji verimliliği %5,33 ile %7,82 arasında değiştiğini tespit etmiştir. Ayrıca gölgeleme oranı ile FV çıkış gücünün ters orantılı olduğunu tespit etmiştir. Ekserji verimliliğinin tüm koşullarda enerji verimliliğinden daha düşük olduğunu ve ekserji

analizlerinin enerji analizlerine göre daha gerçekçi olduğunu göstermiştir. Çevresel faktörlerin de (güneş ışınımı, rüzgar hızı, ortam sıcaklığı, hücre sıcaklığı vb.) fotovoltaik tesisin güç üretiminde etkili olduğunu gözlemlemiştir [30].

C. Manjunath ve diğerleri, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanarak enerji ve ekserji analizini 50 W gücünde bir fotovoltaik modüle uygulamışlardır. Sonuç olarak, fotovoltaik modülün enerji ve ekserji verimliliklerinin maksimum değerlerini sırasıyla %25,2 ve %32,4 olduğunu bulmuşlardır [31].

Özselçuk, yüksek lisans tez çalışmasında Konya ili iklim koşullarında üç farklı panel tipinin (polikristal, perc monokristal-half cut ve perc monokristal) enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizlerini gerçekleştirmiştir. Eksergoekonomik analiz için SPECO yöntemini kullanmıştır. Polikristal, perc monokristal-half cut ve perc monokristal hücre tiplerinin enerji verimlilikleri sırasıyla %16,00; %19,5 ve %20,1; ekserji verimlilikleri sırasıyla %11,6; %16,4 ve %17,0; eksergoekonomik analiz sonuçları ise sırasıyla 35 \$/MWh, 41 \$/MWh, 37 \$/MWh olarak hesaplanmıştır [32].

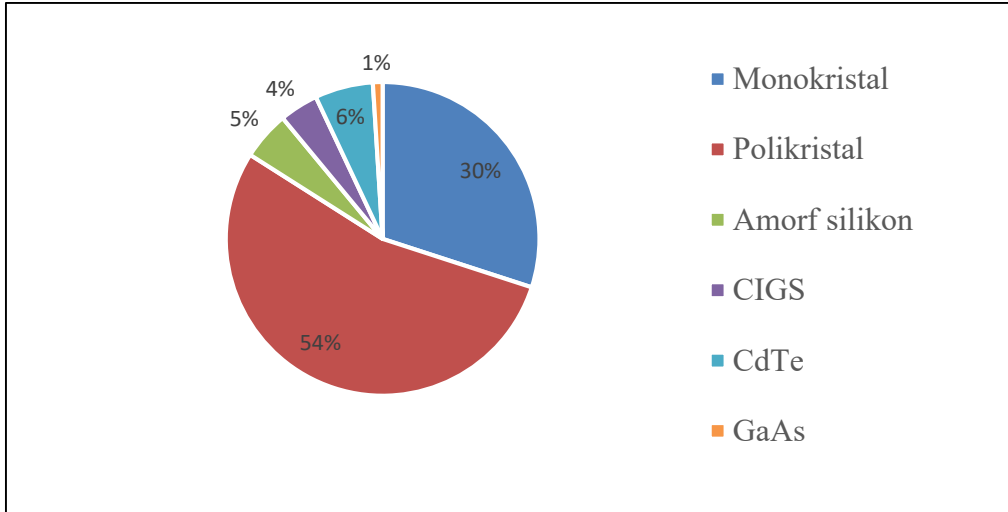
Kuczynski ve Chliszcz, Kuzey Polonya'da monokristal ve amorf fotovoltaik hücrelerin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmiştir. Monokristal hücrelerin 9:00, 12:00 ve 15:00 saatlerindeki ortalama yıllık enerji verimlilikleri sırasıyla %8,3; %8,0 ve %7,1; amorf hücreler için bu değerleri sırasıyla %2,1; %2,2 ve %2,2 olarak bulmuşlardır. Monokristal hücrelerin 9:00, 12:00 ve 15:00 saatlerindeki ekserji verimlilikleri sırasıyla %6,8; %4,9 ve %5,0; amorf hücreler için bu değerleri sırasıyla %1,3; %0,9 ve %0,7 olarak hesaplamışlardır [33].

### 3. TEORİK BİLGİLER

Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının temeli ise en bol ve tükenmez güneş enerjisidir. Dünya üzerine güneşten gelen güç yaklaşık olarak  $1.8 \times 10^{11}$  MW'dır. Bu değer dünyadaki toplam enerji tüketim miktarından çok daha fazladır [34]. Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren sistemlere fotovoltaik sistem denir. Fotovoltaik sistemler, az bakım gerektiren, düşük maliyette yüksek güç çıkışı sağlayan, basit ve sağlam yapılarıyla elektrik üretiminde oldukça tercih edilmektedir. Dünya çapında FV sistemler tarafından üretilen elektrik miktarı her geçen yıl artmaktadır [35]. Sonuç olarak fotovoltaik sistemler güneş enerjisinden yararlanmanın en iyi yollarından biridir. Bu çalışmada güneş enerjisinden elektrik üretimi amaçlayan fotovoltaik sistemlere sahip bir santralin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Fotovoltaik Hücreler (Piller)

Pek çok güneş hücresi çeşidi vardır. En iyi bilinen güneş pili türleri, monokristal silikon ve polikristal silikon olarak ifade edilebilir. Kristal silikon (c-Si) FV hücreler ilk olarak 1950'lerin başında geliştirilmiştir. Güneş pillerinin % 90'ı kristal silikonlu levhalardan oluşur. Aynı zamanda kristal silikon birinci nesil fotovoltaik hücrelerinin temelidir. İnce film FV hücreler, birinci nesil fotovoltaik hücrelerden sonra geliştirilmiştir. Bu hücre tipi cam, plastik, seramik veya metal gibi bir alt katman üzerine bir veya daha fazla fotovoltaik malzemenin ince film tabakası bırakılarak oluşturulur. İnce film tabakası kalınlıkları nanometreden mikrometreye kadar değişir. Hücre bu nedenle esnek ve hafiftir. Bu hücreler yüksek sıcaklıklardan ve gölgeden çok az etkilenir. İnce film hücre üretiminde daha az FV malzeme tüketildiğinden kristal silikonlu birinci nesil FV hücrelere göre üretimleri daha ucuzdur. İnce film hücreleri, ayrı ayrı birbirine bağlanması gereken kristal silikon hücrelerin aksine FV modül içinde yekpare olarak üretilir. Şekil 3.1'de fotovoltaik hücre çeşitlerinin pazar payı gösterilmiştir. Şekilde 3.1'de görüldüğü üzere, polikristal silikon güneş hücreleri %54 değeri ile en yüksek pazar payına sahiptir [36].



Şekil 3.1. FV hücrelerin pazar payları

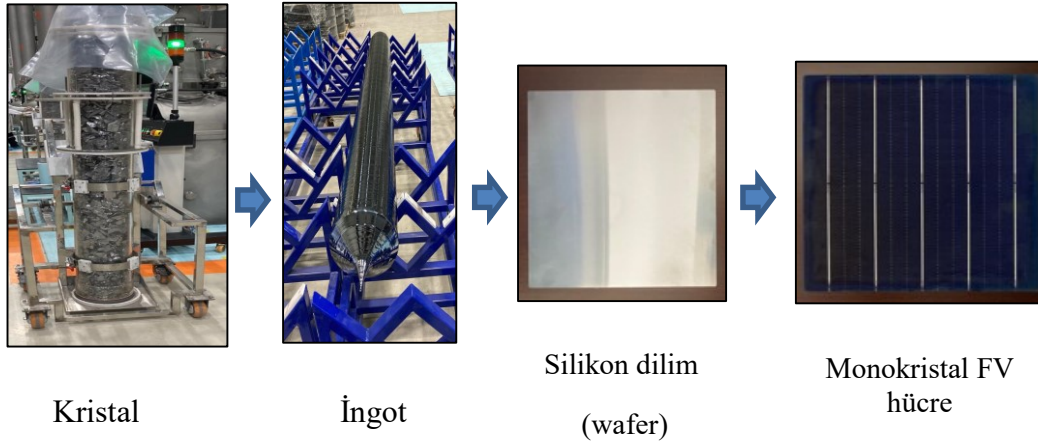
Güneş hücreleri dört farklı nesille ayrılmıştır. Birinci nesil güneş hücrelerinin geliştirilmesinde kristal silikon (c-Si) kullanılmıştır. Bu teknoloji, yüksek enerji verimliliği nedeniyle en eski ve en popüler olanıdır. İkinci nesil güneş hücreleri, en az gelişmiş FV teknolojisidir. Nispeten ucuzdurlar ve düşük verimliliğe sahiptirler. Birinci nesil hücrelerden çok daha ince ve hafif olabilirler. Üçüncü nesil FV teknolojisi güneş hücrelerinin verimlilikleri ve ömürleri konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Nispeten ucuzdurlar ve imal edilmesi kolay malzemelerden üretilirler. Dördüncü nesil FV teknolojisi, organik ve inorganik malzemelerin avantajlarını birleştirir. Bu en son nesil FV teknolojisiyle, diğer tüm güneş hücresi nesillerinin dezavantajlarını yok etmek amaçlanmıştır [37]. Çizelge 3.1’de, güneş pillerinin sınıflandırılması ve çeşitleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Güneş pili (hücre) sınıflandırılması ve çeşitleri [37]

Güneş Pili (Hücresi)			
Kristal silikon Güneş Hücresi	İnce Film Güneş Hücresi		
Wafer Temelli 1. Nesil FV Hücreler	Geleneksel 2. Nesil FV Hücreler	Yeni Geliştirilen 3. Nesil FV Hücreler	İnorganik-Organik 4. Nesil FV Hücreler
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monokristal</li> <li>• Polikristal</li> <li>• GaAs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CuZnSnS</li> <li>• CuInGaSe<sub>2</sub></li> <li>• a-Si</li> <li>• CdTe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organik FV</li> <li>• Kuantum noktalı FV</li> <li>• Boya duyarlı FV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hibrit nano-kristal</li> <li>• Perovskite</li> </ul>

### 3.1.1. Monokristal (Mono-Si) fotovoltaik hücreler

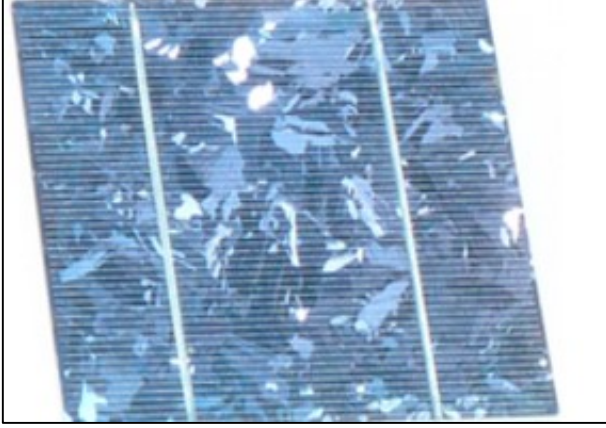
Czochralski yöntemi, monokristal güneş hücreleri üretmek için kullanılır. Czochralski tarafından geliştirilen bu yöntem, kristal silikondan oluşturulan büyük kütüklerin (ingot) kesilerek silikon dilimler (wafer) haline getirilmesidir. Bu dilimler güneş hücrelerini oluşturmak için kullanılır. Monokristal güneş hücreleri, en popüler güneş hücrelerinden biridir. Monokristal hücrelerin üretim süreci, diğer hücre türlerine göre daha karmaşık ve pahalıdır [38]. Şekil 3.2, monokristal FV hücre ve temel üretim aşamalarını göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere, ilk önce kristal silikondan büyük kütükler oluşturulur ve bu kütükler kesilerek silikon dilimler oluşturulur. Sonrasında ise bu dilimler, FV hücre oluşturmak için kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Monokristal FV hücre ve temel üretim aşamaları

### 3.1.2. Polikristal (Multi-Si) fotovoltaik hücreler

Çok kristalli silikon güneş hücrelerini oluşturmak için birkaç farklı kristal silikon yapı karıştırılır. Polikristal FV hücrelerin üretim süreci, monokristal FV hücrelere göre daha ucuz ve daha kolaydır. Bu nedenle en popüler güneş pilleridir. Ancak, monokristal FV hücrelerden daha az verimlidirler. Sıcak ve gölgeli ortamlarda verimde azalma gösterirler [38]. Şekil 3.3, polikristal bir FV hücrenin görünümünü göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere, polikristal FV hücreler genellikle mavi renktedir. Dalgalı bir görünümü vardır.



Şekil 3.3. Polikristal FV hücre [36]

### 3.1.3. Galyum arsenit (GaAs) fotovoltaik hücreler

Galyum arsenit güneş hücreleri, 1.43-1.7 eV değerinde bant aralığı enerjisine sahiptir. Bu yüzden monokristal ve polikristal güneş hücrelerine göre daha yüksek enerjili fotonları soğurabilirler. Isıya karşı dirençlidirler fakat maliyetleri yüksektir. Uygulama alanları sınırlıdır [36].

### 3.1.4. Diğer fotovoltaik hücreler

İkinci, üçüncü ve dördüncü nesil güneş hücrelerinin ortak özelliği ince film teknolojisini kullanılarak üretilibilmeleridir. İnce film teknolojisini kullanarak üretilen FV güneş hücreleri ise esnek yapıda üretilmektedir. Aşağıda, esnek FV güneş hücrelerinin sert yüzeyli FV güneş hücrelerine göre bazı avantajları bulunmaktadır [39]:

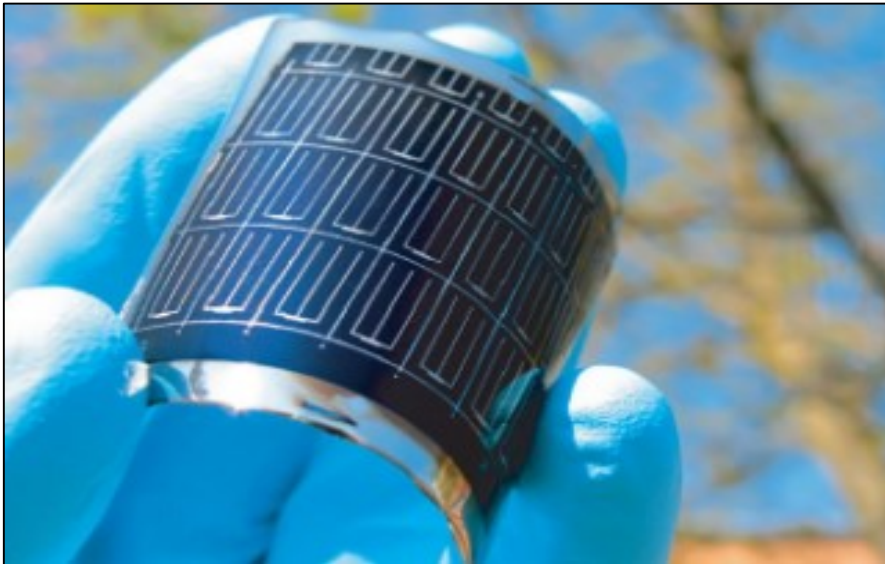
- Esnek FV modüller binaya entegre fotovoltaik sistemlerde (BIPV) ve eğimli yüzeylerde kullanılabilir. Hafif olmaları nedeniyle çatı üstü uygulamalarda ve araç tavanlarında da kullanılabilir.
- Esnek FV modüller seri üretime uygundur. Montaj süreleri kısa ve işçilik maliyetleri düşüktür.
- Esnek FV modülleri üretmek için gereken malzemeler, birinci nesil FV güneş hücrelerinin üretilmesi için gereken malzemelerden çok daha ucuzdur.
- Esnek FV modüller kırılğan değildir.

### Bakır-çinko-kalay-sülfür (CuZnSnS, CZTS) güneş hücreleri

Bu güneş hücresinin bileşenleri dünyada bol miktarda bulunur. Bu bileşenler çevreyi kirletmemektedir. Bu nedenle, fotovoltaik teknolojiler arasında umut vericidirler. Güç dönüştürme verimliliği diğer rakiplerden çok daha düşük olduğu için ticari olarak gelişmemişlerdir [40].

### Bakır indiyum galyum diselenid (CuInGaSe<sub>2</sub>/CIGS) güneş hücreleri

Bu güneş hücreleri, ince ve hafif yapıları ile çok dar alanlarda kullanım için idealdir. Bununla birlikte bu güneş hücreleri uzay uygulamalarına adaydır. İnce film teknolojisi ile üretilen güneş hücreleri arasında bulunan bakır indiyum galyum diselenid güneş hücreleri, yüksek güç dönüştürme verimliliğine sahiptir [41]. CIGS güneş hücresi düşük maliyetlidir ve enerji bant aralığı 1.0 ile 1.7 eV arasında değişmektedir [42]. Şekil 3.4'te, polimide üzerinde bir CIGS güneş hücresinin görüntüsüne yer verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, CIGS güneş hücreleri esnek yapıda üretilebilir.



Şekil 3.4. Poliimid malzeme üzerinde bir CIGS güneş hücresi [39]

### Amorf silikon (a-Si) güneş hücreleri

Amorf silikon (a-Si) güneş hücreleri, en eski ince film teknolojilerinden biridir. Çok eskiden bir yalıtkan olarak bilinen amorf silikon, güneş pilleri yapmak için kullanılıyor. Bu güneş

hücrelerinin hafif ve esnek yapıda oldukları bilinmektedir. Verimliliği artırmak ve bozulma problemlerini çözmek için çok bağlantılı amorf silikon yapıları geliştirilmektedir.

### Kadmiyum tellür (CdTe) güneş hücreleri

Kadmiyum tellür güneş hücreleri esnek yapıda üretilebilir. Bu güneş hücrelerinin yüksek soğurma katsayısına ve ideal bant aralığına sahip olduğu bilinmektedir. CdTe güneş hücreleri, ince film teknolojisi alanında popülerdir ve maliyet açısından rekabetçidir. Ancak, ham madde kısıtlılığı ve bazı çevresel sorunlar bu teknolojinin sorunlarıdır. Şekil 3.5'te, CdTe güneş hücresinin farklı alt tabakalardan (cam, ultra ince cam, poliimid) oluşan görüntüsüne yer verilmiştir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi poliimid alt tabaka, ultra ince cam ve cam hücrelere göre daha esnek ve daha opaktır.



Şekil 3.5. Cam, ultra ince cam ve poliimid üzerindeki CdTe FV hücreler [39]

### Organik FV (OPV) güneş hücreleri

Organik FV güneş hücreleri yarı saydam, hafif ve esnek yapılardır. Bu özelliklerinden dolayı genellikle seralar gibi inşaat uygulamaları için tercih edilirler. Ayrıca, sera çatılarında kullanıldıklarında, diğer FV hücre türlerine kıyasla sera bitkileri üzerine daha az gölge düşürdükleri tespit edilmiştir [43].

### Kuantum noktalı güneş hücreleri

Bu güneş hücreleri, kuantum noktalarını kullanan güneş hücresi tasarımlarıdır. Kuantum noktaları, Exciton Bohr yarıçapının altına indirgenmiş yarı iletken parçacıklardır. Kuantum

noktalı güneş hücreleri, ayarlanabilir bant aralığı sayesinde gelen fotonları çok iyi toplar. Bant aralığını ayarlayabilme yeteneği kuantum noktalı güneş pillerini ilgi çekici hale getirmiştir [44].

#### Boya duyarlı (DSSC) güneş hücreleri

Yeni nesil temiz enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ancak yeni malzemelerin geliştirilmesi ile mümkündür. Bu nedenle, bu hücreler yeni geliştirilmiştir. Bu güneş pilleri şeffaf ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu teknoloji, daha önce geliştirilen güneş pillerinin eksikliklerini (maliyet, verimlilik vb.) gidermek için geliştirilmiştir.

#### Perovskite (PSC) güneş hücreleri

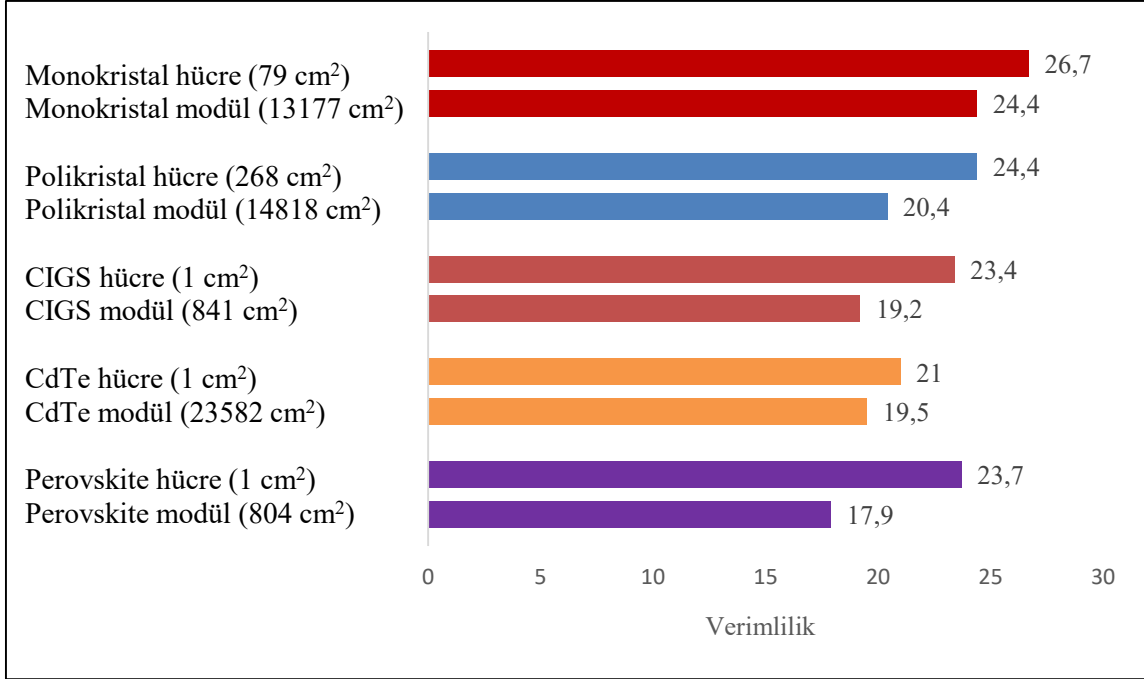
Perovskite bazlı güneş hücreleri yeni keşfedilmiştir. Bu güneş hücreleri oldukça yüksek verimlidir. Ayrıca, bu hücreler geniş bant aralığına sahip hücrelerdir. Sıcaklık artışları çoğu güneş pilinde olduğu gibi bu güneş pilinde de verimlilik değerini düşürmektedir [38]. Perovskite güneş hücreleri araştırmalarından sonrasında ortaya çıkan yüksek verimli güneş panelleri, yakın zaman içerisinde kristal silikon güneş hücrelerinin alternatifi olabilirler.

#### Hibrit nano kristal güneş hücreleri

Hibrit nanokristal güneş pilleri, organik ve inorganik yarıiletken malzemelerin avantajlarını birleştirir. Organik malzemeler, verici ve taşıma delikleri olarak ışığı emen konjuge polimerlerden oluşan organik moleküllere sahiptir. Hibrit hücrelerde, inorganik maddeler yapı içinde alıcı ve elektron taşıyıcı olarak kullanılır. Bu güneş hücrelerinin maliyeti düşüktür [44].

#### FV hücre ve FV modül arasındaki verimlilik farkı

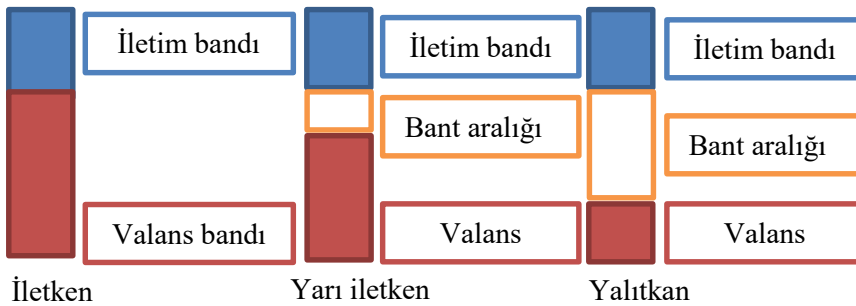
Bir FV modüllerin tüm alanı güneş pilleri ile donatılamaz. Bu nedenle, FV modüllerin verimliliği, FV hücrelere göre biraz daha düşüktür. Şekil 3.6'da, laboratuvar ortamında bazı FV hücreleri ile FV modüllerinden elde edilen maksimum verimliliklerin farkları incelenmiştir.



Şekil 3.6. Bazı FV hücrelerin ve FV modüllerin maksimum verimlilikleri [45]

### 3.2. Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi

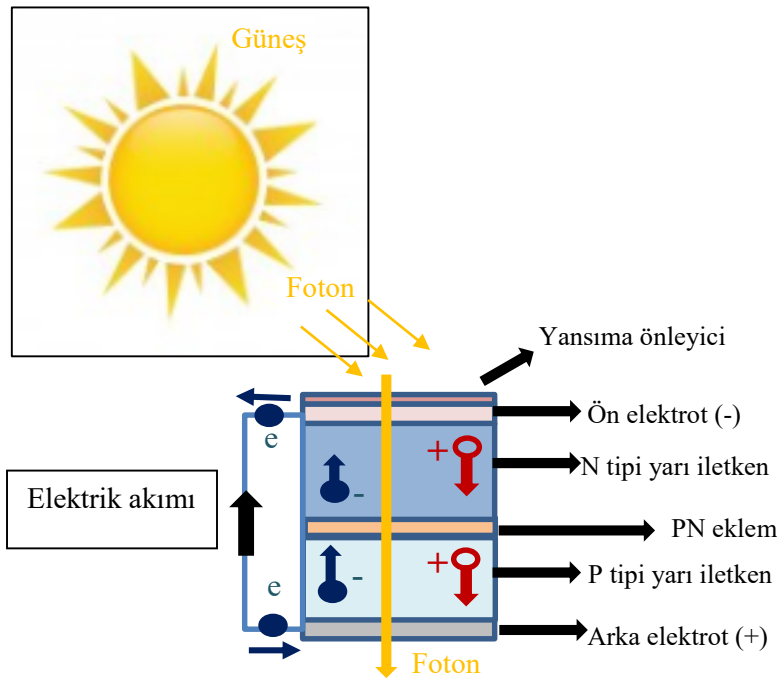
Yarı iletken malzemeler fotovoltaik teknolojinin varlığı için çok önemlidir. Yaygın olarak kullanılan yarı iletken, dünyadaki en bol ikinci element olan silikon (silisyum) malzemesidir. Yarı iletken malzemeler iki enerji bandından oluşmaktadır. Bu bantlardan biri elektron varlığına izin verirken (valans bandı), diğeri elektron varlığına izin vermez (iletim bandı) [46]. Şekil 3.7’de, iletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin bant aralıkları gösterilmiştir. Şekil 3.7’de görüldüğü üzere, yalıtkan malzemelerin bant aralığı daha geniştir.



Şekil 3.7. İletken, yarı iletken, yalıtkan malzemelerin bant aralıkları [46]

FV güneş hücresi, güneş enerjisi tarafından uyarılana kadar elektriksel olarak nötr kalan yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Farklı FV malzemeler, farklı soğurma kapasitelerine ve farklı enerji bandı aralığına sahiptirler. FV malzemelerde bant aralığı enerjisine eşit enerjiye sahip fotonlar emilerek serbest elektronlar oluştururken, bant aralığı enerjisinden daha küçük enerjiye sahip fotonlar FV malzemeden geçer. Öte yandan, bant aralığı enerjisinden daha yüksek enerjiye sahip fotonlar emildiğinde fazla enerjilerini ısı olarak açığa çıkarırlar [36].

Güneş pillerinin çalışma prensibi fotovoltaj etkiye dayanmaktadır. Bu etki, yarı iletken olarak bilinen malzemelerde meydana gelir. Güneş ışığının fotovoltaj etki üzerindeki işlevi, sağladığı bir miktar enerjiyle elektrik üretmek için en dış elektronun değerlik bandından iletim bandına geçirmektir. Silikon malzemelerde, bir elektronun bant aralığını geçebilmesi için 1.12 eV (elektron volt) enerjiye ihtiyacı vardır [46]. Şekil 3.8’de, bir güneş hücresinin yapısı ve çalışma prensibi gösterilmiştir. Hücrenin önü, yansımaları en aza indiren ve mümkün olduğu kadar çok güneş ışınımını emen yansımaya önleyici bir kaplama ile kaplıdır. Harici bir devreye bağlı bir iletken sadece ön tarafta biriken elektronların akışına izin verir. Elektronlar harici devreden geçer ve arka taraftaki pozitif yüklü deliklerle birleşerek devreyi tamamlarlar. PN bağlantısı, bir hücrenin ana kısmıdır. Burada ışığı alan kısım N-tipi, alt kısım P-tipi malzemedir.



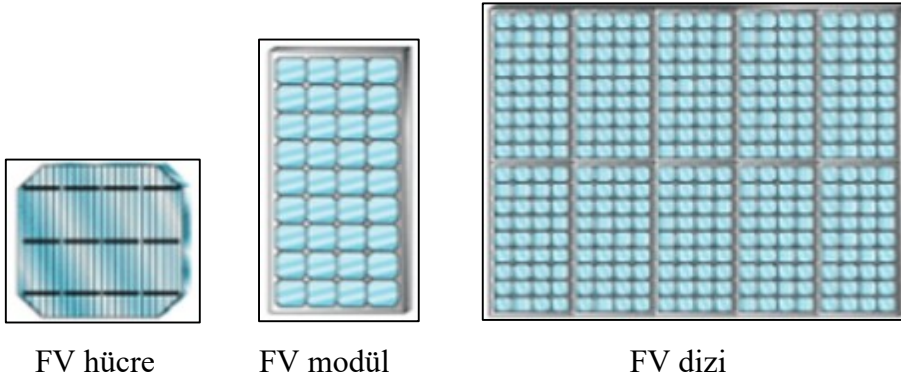
Şekil 3.8. Fotovoltaj bir hücrenin yapısı ve çalışma prensibi [46]

### 3.3. Fotovoltaik Sistem Ekipmanları

Fotovoltaik sistemlerde birçok ekipman kullanılmaktadır. Bu bölümde, FV sistemlerin bazı temel ekipmanlarından bahsedilmektedir.

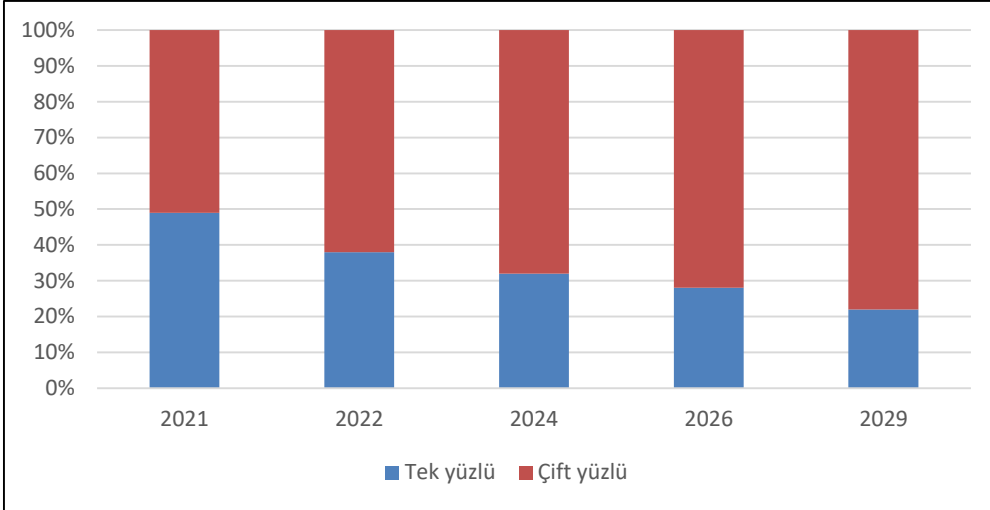
#### Güneş paneli (FV modül)

Bir fotovoltaik sistemin en temel bileşeni güneş panelidir. Güneş panelleri güneş enerjisinden doğru akım üretir [47]. Şekil 3.9'da, FV hücre (güneş hücresi, güneş pili), FV modül (güneş paneli) ve FV diziler gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi birden fazla güneş hücresi, FV modülleri (güneş paneli), birden fazla FV modüller ise FV diziyi oluşturur.



Şekil 3.9. FV hücre, FV modül ve FV dizi [48]

Güneş panelleri monofacial (tek yüzlü) ve bifacial (çift yüzlü) olmak üzere ikiye ayrılabilir. Tek yüzlü güneş panelleri gelen güneş ışınımı sadece tek bir yüzey üzerinde elektrik enerjisine çevirir. Çift yüzlü güneş panelleri ise gelen ve yansıyan güneş ışınımını iki yüzey üzerinde elektrik enerjisine çevirir. Bununla birlikte, farklı zeminlere yani farklı yansımaya katsayılarına bağlı olarak, iki yüzeyli FV modüller, tek yüzeyli FV modüllere göre %7-25 daha yüksek verim sunmaktadır [49]. Şekil 3.10'da, tek ve çift yüzlü güneş panellerinin dünya pazarındaki payının yakın zaman içerisindeki durumu gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi gelecekte çift yüzlü güneş panellerinin dünya pazarında daha fazla yer kaplayacağı tahmin edilmektedir.

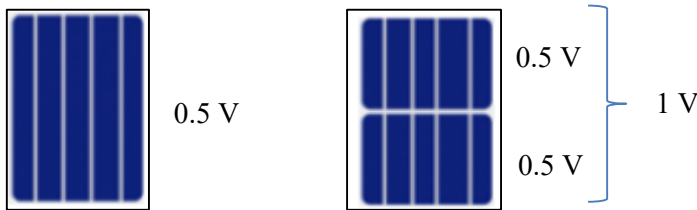


Şekil 3.10. Tek ve çift yüzeyli güneş panellerinin dünya pazarındaki payı [35].

### *Yarı kesim (half cut) teknolojisi*

Güneş panellerinin üretiminde sıklıkla kullanılan half-Cut (yarı kesim) panel teknolojisi, özel bir lazerin bir güneş hücresini ortasından keserek iki farklı hücre oluşturduğu bir işlemdir. Bu yöntem, bir güneş panelinde normalden daha fazla güneş hücresi olmasını sağlar.

Güneş hücresi ikiye bölündüğünde her bir yarım hücre tam bir hücrenin ürettiği gerilim değerine sahip olur. Çünkü gerilim, iki farklı nokta arasındaki potansiyel farktır. Şekil 3.11’de, tam ve yarım hücrelerin gerilim değerleri verilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü gibi, yarı kesim teknolojisi, üretilen gerilim değerini arttırmaktadır [50].



Şekil 3.11. Tam ve yarım güneş hücrelerinin gerilim değeri

Yarı kesim sonrası oluşan her bir yarım hücrenin akımı, bir tam hücrenin çıkış akımının yarısına eşittir. Çünkü çıkış akımı hücre alanına bağlıdır ( $28-35 \text{ mA/cm}^2$ ) ve hücre yarıya bölündükten sonra alan değişmez. Bununla birlikte, akım değeri yarıya indiği için güç kaybı

da yarıya düşer. Şekil 3.12’de görüldüğü üzere, tam hücrenin güç kaybı,  $P_{kayıp} = I^2 R$  iken yarı kesim sonrası oluşan hücrelerin toplam güç kaybı,  $P_{kayıp} = \left(\frac{I}{2}\right)^2 R + \left(\frac{I}{2}\right)^2 R = \frac{1}{2} I^2 R$  olur [50].



Şekil 3.12. Tam ve yarı güneş hücrelerinin akım değeri

Bağlantı baralarından geçen akım yarı yarıya azaldığı için baralar üzerinden kaybedilen güçte azalır. Bağlantı baralarının uzunlukları da yarı yarıya kısalır. Yarım hücreler birleştirilirken bakır teller kullanıldığından hücrenin dayanıklılığı artar. Tam hücreye göre yarım hücrelerde gölgelenme kayıpları da daha azdır [50].

#### *Pasif verici ve arka hücre (PERC) panel teknolojisi*

Güneş panellerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) panel teknolojisinin Türkçe anlam karşılığı pasif verici ve arka hücredir. Bu teknoloji, hücrenin arka kısmına eklenen pasifleştirilmiş katmanlar sayesinde daha fazla güneş ışığını hapsedmeye ve elektron kayıplarını önlemeye yardımcı olur [51]. Son zamanlarda, PERC panel teknolojisi, yüksek güç dönüştürme verimliliği ve düşük maliyeti nedeniyle monokristal güneş pilleri için ana teknoloji haline gelmiştir [52].

#### Evirici (inverter)

Fotovoltaik sistemin önemli bir diğer bileşeni eviricidir. Güneş panelleri doğru akım üretir. Bu üretilen doğru akımı evlerimizde, işyerlerimizde vs. kullanabilmemiz için alternatif akıma çevirmemiz gerekir. Bu dönüştürme işlemi gerçekleştirilen cihazlara evirici (inverter) denir [47]. Eviriciler, şebeke bağlantılı sistemler için yüksek gerilim kaynağı (110 volt ve üstü), şebekeden bağımsız sistemler için düşük gerilim (12-48 volt) kaynağı olarak kullanılabilir [53]. Şekil 3.13’te, iki farklı evirici görüntüsüne yer verilmiştir. Şekil 3.13’te,

sol taraftaki görüntü bir dizi eviriciyi (string inverter) ve sağ taraftaki görüntü ise bir merkezi eviriciyi (central inverter) göstermektedir.



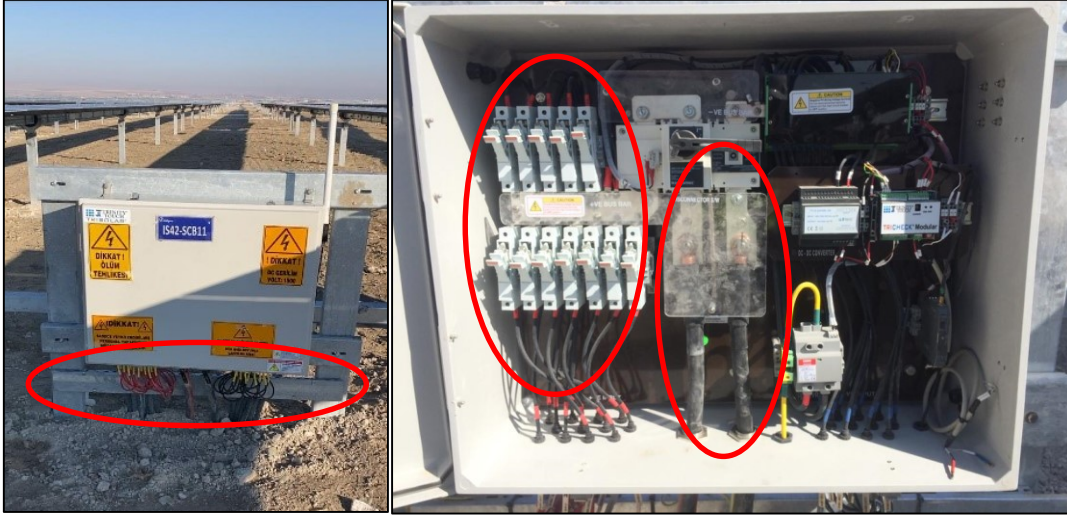
Şekil 3.13. İki farklı evirici (inverter)

#### Enerji depolama sistemleri (piller, bataryalar vs.)

Enerji depolama sistemleri, FV modüller tarafından üretilen fazla enerjiyi depolar ve bu depolanan enerjiyi yeterli enerji üretilmediği zamanlarda kullanılmak üzere dağıtır. Enerji depolama sistemlerini oluşturan ve en yaygın olarak bilinen pil (batarya) türleri, kurşun asit (LA), nikel kadmiyum (NiCd), nikel metal hidrit (NiMH) ve lityum iyon (Li-ion) olarak ifade edilebilir [54].

#### Birleştirici kutu (combiner box)

Birleştirici kutular, birden fazla FV modül dizisini tek bir paralel devrede birleştirmek için kullanılır. FV sistem dizisinin pozitif ve negatif kutupları bulunur. Pozitif kutuplarda koruyucu görevi gören sigortalar vardır. Her iki kutup birleştirici kutu içerisindeki baraya bağlanır. Bu sayede, güneş panellerinin ürettiği doğru akım, güvenli bir şekilde birleştirici kutu içerisinde toplanmış olur [48]. Şekil 3.14’te, bir birleştirici kutunun dış ve iç görünümüne yer verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, FV dizilerden elde edilen DC güç birleştirici kutu içerisinde toplanır ve sonrasında daha büyük kesitli DC kablolar ile merkezi invertere iletilir.



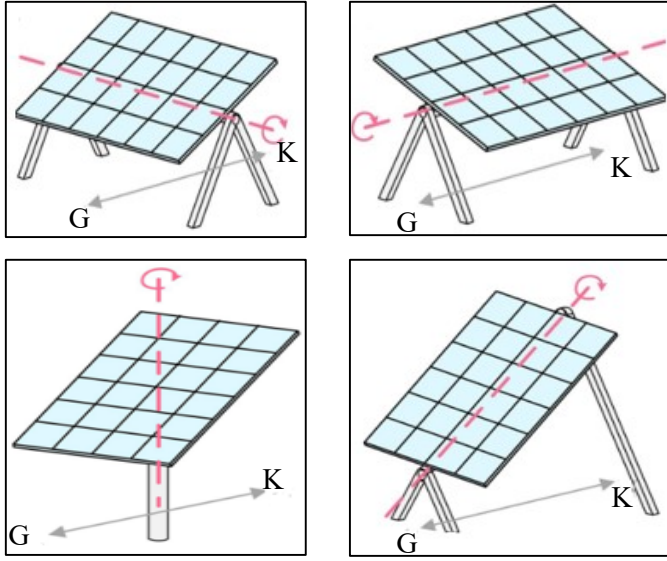
Şekil 3.14. Birleştirici kutu (combiner box) dış ve iç görünüm

### Şarj kontrol cihazı

Şarj kontrol cihazı, enerji depolama sistemlerini (bataryalar, piller vs.) aşırı şarj ve aşırı deşarjdan korumak için kullanılır. Bazı modelleri DC-DC güç dönüşümü sağlar. FV diziler, gün boyunca şarj kontrolörlerine ve enerji depolama cihazlarına maksimum enerji sağlar. Geceleri FV dizilerden güç aktarılmadığından, şarj kontrolörü, enerji depolama cihazlarından yüke talep edildiği şekilde güç aktarımını sağlar [48].

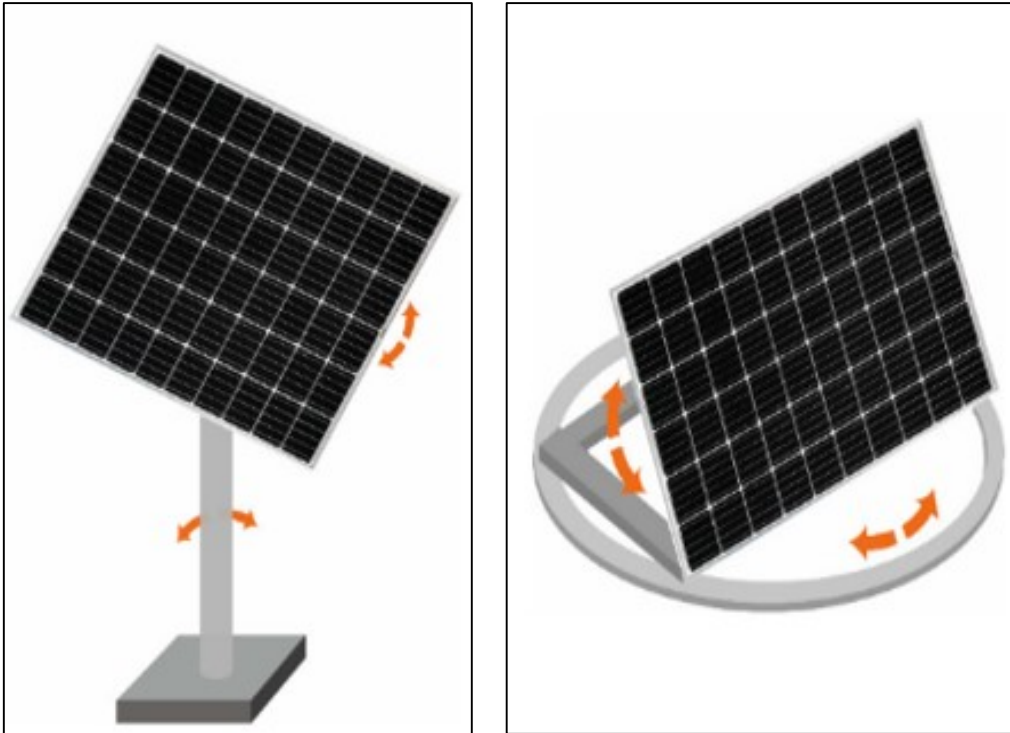
### Tek ve çift eksenli güneş takip sistemleri

Bir fotovoltaik sistemin ürettiği elektrik miktarı, maruz kaldığı güneş ışınımı miktarına bağlıdır. Güneşin konumu gün boyunca değişir, bu nedenle mümkün olan maksimum çıkış gücünü üretmek için FV sistemler her zaman güneşe karşı hizalanmalıdır. Güneş takip sistemleri, güneş ışınımını FV modüllere dik olarak yönlendirmeye amaçlar ve enerji üretimini artırmak için kullanılır. Güneş takip sistemleri genellikle tek eksenli ve çift eksenli olarak sınıflandırılır. Tek eksenli güneş takip sistemleri dört farklı sınıfa ayrılır [55]. Şekil 3.15'te, tek eksenli dört farklı güneş takip sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi, tek eksenli güneş takip sistemleri, doğu-batı yönünde düzenlenmiş yatay bir eksenle, kuzey-güney doğrultusunda düzenlenmiş yatay bir eksenle, optimum eğim açısına ayarlı dikey bir eksenle ve doğu-batı doğrultusunda düzenlenmiş optimum eğim açısına ayarlı yatay bir eksenle dönen sistemlerdir.



Şekil 3.15. Tek eksenli güneş takip sistemlerinin şematik gösterimi [55]

Şekil 3.16'da, çift eksenli güneş takip sistemlerinin şematik gösterimi verilmiştir. Güneşin hareketini tek bir dönme eksenini etrafında mükemmel bir şekilde takip etmek mümkün değildir. Güneşin konumunu hem yatay ekseninde hem de dikey ekseninde takip eden sistemlere çift eksenli güneş takip sistemi denir. Son zamanlarda, bu sistemlere olan ilgi artmıştır [56].



Şekil 3.16. Çift eksenli güneş takip sistemlerinin şematik gösterimi [57]

### 3.4. Fotovoltaik Sistemler

Güneş enerjisi sistemleri, elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan her yerde faydalı olabilir. Elektrik enerjisi ihtiyacına göre çeşitli fotovoltaik sistemler ortaya çıkmıştır. Fotovoltaik sistemlerin uygulamaları, uzay uygulamaları, şebekeden bağımsız sistemler, şebeke bağlantılı sistemler ve diğer uygulamalar olarak sınıflandırılabilir [58]. Çizelge 3.2’de, fotovoltaik sistemlerin avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

Çizelge 3.2. FV sistemlerin avantaj ve dezavantajları [59]

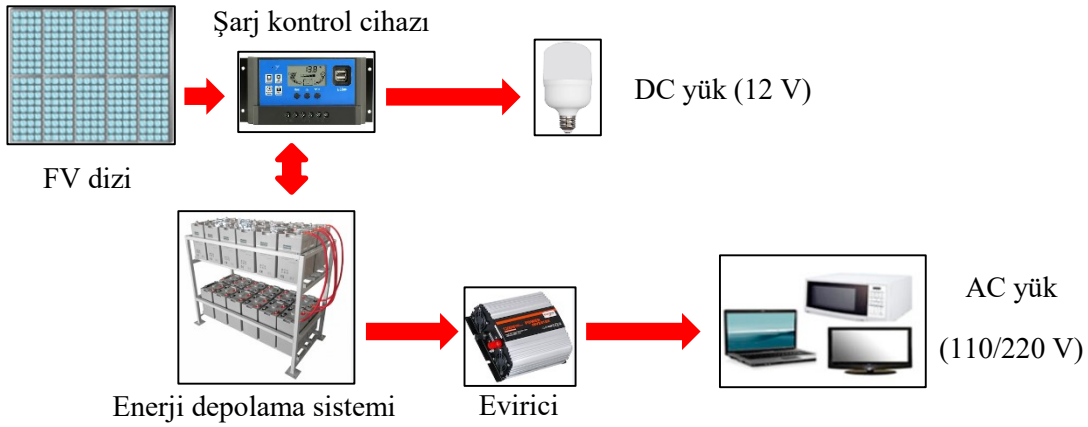
Avantaj	Dezavantaj
Güvenilir, çevre dostu, temiz	Piyasada bulunan sistemler her durumda kullanılmıyor
Düşük işletme ve bakım maliyeti	Yüksek ilk maliyet
Bakımı az ve gürültüsüz	Diğerlerinden daha büyük bir kurulum alanı gerekli
Bedava enerji kaynağı	Teknoloji gelişimine yüksek bağımlılık
Sera gazı emisyonlarını azaltıcı	Coğrafik koşullar (güneş ışınımı)

#### 3.4.1. Uzay uygulamaları

Güneş hücreleri, ilk olarak 1958 yılında uzaydaki uzay araçlarının elektrik ihtiyacını karşılayabilmek için kullanılmıştır. O zamanlarda görevlerini başarıyla tamamlayan güneş hücreleri, uzay alanında bu teknolojinin günümüze kadar kullanılmasını sağlamıştır. Uzay uygulamalarında hafif FV modüller daha çok tercih edilmektedir.

#### 3.4.2. Şebekeden bağımsız sistemler

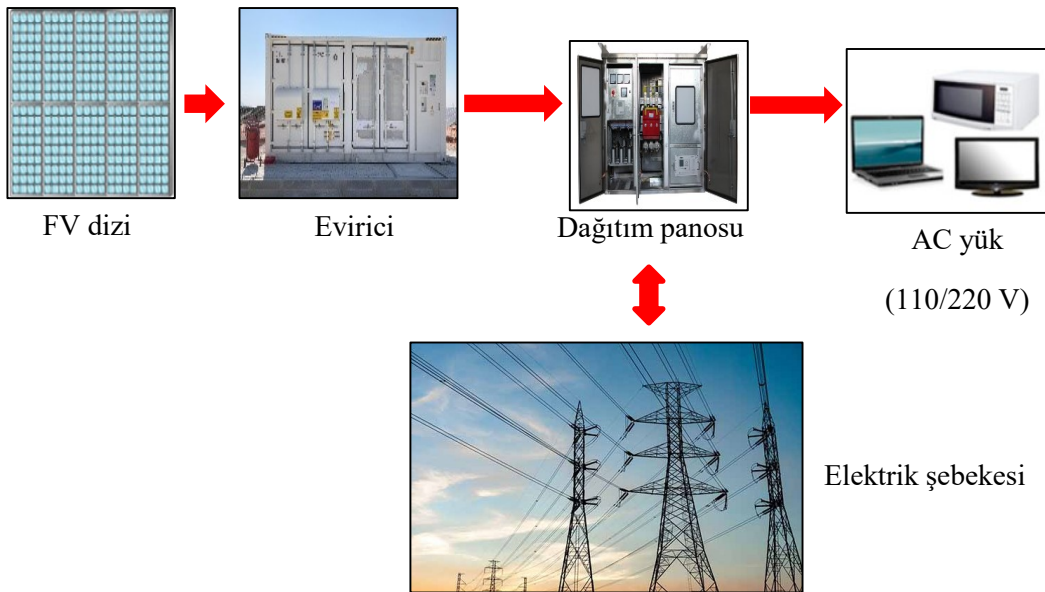
Şekil 3.17’de, şebekeden bağımsız FV sistemin şematik diyagramı yer almaktadır. Bu sistemler, FV paneller, enerji depolama elemanları, şarj kontrol cihazları, AC-DC yükler ve eviricilerden oluşmaktadır. Elektrik şebekesine bağlı değildirler. Daha çok düşük güç ihtiyaçları ve elektrik şebekesinden uzak yerleşim yerleri için kullanılırlar.



Şekil 3.17. Şebekeden bağımsız FV sistemin şematik gösterimi [59]

### 3.4.3. Şebeke bağlantılı sistemler

Şekil 3.18’de, şebeke bağlantılı FV bir sistemin şematik diyagramı gösterilmiştir. Bu sistemlerin elektrik şebekesi ile bağlantıları vardır. Yüksek güç kapasitesine sahiptirler. Üretilen elektrik enerjisi doğrudan ofislerde, diğer ticari binalarda ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir veya elektrik tedarik şirketlerine satılabilir. Bu sistemlerle, FV sistemler tarafından gerekli enerji sağlanamadığında (gece, güneşsiz günler) güç elektrik şebekesinden geri alınabilir. Dolayısıyla bu tür sistemlerde enerji depolama elemanlarına (batarya, akü vs.) ihtiyaç yoktur.



Şekil 3.18. Şebeke bağlantılı FV bir sistemin şematik diyagram [59]

### 3.4.4. Diğer uygulamalar

FV paneller, sokak lambaları, trafik sinyalleri, hesap makineleri, saatler ve otomobillerde elektrik motorlarına güç sağlayan pilleri şarj etmek için kullanılabilir. Ek olarak, FV paneller çatı, cam ve dış cephe kaplaması gibi yapı malzemelerinde binaya entegre fotovoltaik sistemler (BIPV) olarakta kullanılabilir [60].

### 3.5. Fotovoltaik Sistemlerin Maliyeti

Fotovoltaik bir sistemin kurulum maliyeti, FV modüller, eviriciler, mekaniksel kurulum, elektriksel kurulum, sistem tasarımı, nakliye, teknoloji gelişimi ve üretici politikası gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu nedenle, tahmin edilmesi zordur. Çizelge 3.3'te, çeşitli ülkelerde EUR/W<sub>p</sub> cinsinden FV sistemlerin toplam kurulum maliyetlerinin temsili değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. FV sistemlerin bazı ülkelerdeki toplam kurulum maliyetleri [45]

Ülkeler	FV Sistem Kurulum Maliyeti ( EUR/W <sub>p</sub> )
Japonya	1.432
Hırvatistan	1.070
ABD	0.919
Portekiz	0.761
Arjantin	0.745
Brezilya	0.697
İspanya	0.690
Türkiye	0.685
Fransa	0.684
İtalya	0.664
Yunanistan	0.615
Almanya	0.587
Çin	0.531
Hindistan	0.499

### 3.6. Enerji ve Ekserji Analizi

Termodinamik, enerji bilimi olarak tanımlanabilir. Enerjinin ne olduğu ile ilgili herkesin bir anlayışı vardır ancak kesin bir tanımını yapmak zordur. Enerji, değişime neden olan bir

faktör olarak görülebilir. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesini ifade eder ve enerjinin termodinamik bir özellik olduğunu vurgular. Termodinamiğin ikinci yasası, niceliğe (miktar) ek olarak enerjinin niteliğinin de (kalite) hesaba katılması gerektiğini açıkça ortaya koyar ve doğadaki değişimlerin enerjinin kalitesini düşürme eğiliminde olduğunu belirtir [61].

Tüm mühendislik uygulamaları, madde ve enerjinin etkileşimini içerir, bu nedenle termodinamiği ilgilendirmeyen bir araştırma alanı hayal etmek zordur. Termodinamiğin uygulama alanlarına, otomobil motorlarının, elektrikli araçların, jet ve roket motorlarının, nükleer güç veya termik santrallerinin tasarımları örnek olarak gösterilebilir. İnsan vücudu da termodinamiğin önemli bir uygulama alanıdır [61].

Enerji analizi, yalnızca enerjinin nicel analizini sağlayan ve termodinamiğin birinci yasasına dayanan bir tekniktir. Enerji ve diğer sistemleri analiz etmek, tasarlamak ve iyileştirmek için kütle korunumu ile enerjinin korunumu ilkelerini termodinamiğin ikinci yasasıyla birlikte kullanan bir tekniktir. Termodinamiğin ikinci yasasına dayalı ekserji analizi, enerjinin yalnızca nicel analizini değil, aynı zamanda nitel analizini de verir. Ekserji bir referans ortamla dengede olan bir sistem veya enerji akışı tarafından üretilen maksimum iş miktarı olarak tanımlanabilir. Enerjiden farklı olarak ekserji bir korunum yasasına tabi değildir (ideal ve tersinir süreçler hariç). Aksine, ekserji tüketilir veya yok edilir [10]. Çizelge 3.4'te, enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırması gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [62]

Enerji	Ekserji
Nicel (miktar) analizdir.	Nitel (kalite) analizdir.
Çevre parametrelerinden bağımsızdır. Sadece madde ve enerji akış parametrelerine bağlıdır.	Çevre parametrelerine bağlıdır. Bununla birlikte madde ve enerji akış parametrelerine de bağlıdır.
Hareket veya hareket üretebilme yeteneğidir.	İş veya iş üretebilme yeteneğidir.
Yoktan var edilemez veya yok edilemez. Sürekli korunur.	Sadece tersinir süreçlerde korunur. Tersinmez süreçlerde sürekli kaybolur.
Termodinamiğin birinci yasasına dayanır.	Termodinamiğin ikinci yasasına dayanır.

### 3.7. Sürdürülebilirlik Analizi

Sürdürülebilirliğin birçok tanımı mevcuttur. Ancak en yaygın olarak bilinen tanım Brundtland raporunda bulunmaktadır. Rapora göre sürdürülebilir kalkınma, bugünün ihtiyaçlarını karşılarken, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilmelerinden ödün vermemektir [63]. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması, insanoğlunun önemli bir hedefidir. Bu hedefe ulaşmanın en etkin ve en verimli yollarından biri de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıdır [64].

Enerji sürdürülebilirliği yaşam açısından çok büyük önem taşımaktadır. Sürdürülebilirlik için bir enerji kaynağının temiz olması yeterli değildir. Bununla birlikte enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması da sürdürülebilirlik açısından son derece önemli ve gereklidir.

Ekserji analizi, mevcut enerji sistemlerindeki verimsizlikleri tespit ederek daha verimli sistemlerin tasarlanmasına yardımcı olduğu için sürdürülebilir değerlendirme adına kilit bir rol oynamaktadır [62]. Enerji sistemlerinde sürdürülebilir değerlendirme, ekserji verimi ve sürdürülebilirlik indeks ile ilişkilidir.

Atık ekserji oranı (WER) ve sürdürülebilirlik indeksi (SI) gibi ekserjiye dayalı sürdürülebilirlik göstergeleri, bir ekserji girişi sürecindeki ekserji kayıplarını ve tersinmezlikleri verir. Ekserji kayıpları arttıkça atık ekserji oranı artar, sürdürülebilirlik indeksi azalır. Sürdürülebilirlik indeksi, sistemin ömrünü tanımlar, atık ekserji oranı ise ekserji girişi başına kayıp ekserji oranını temsil eder. Bu ölçümler sistemin tersinmezlikleri, termodinamik etkinliği ve sürdürülebilirliği hakkında yeterli veri sağlar [65].

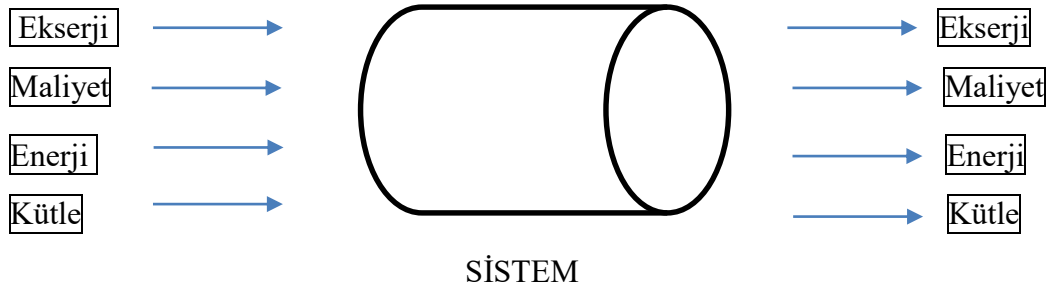
### 3.8. Eksergoekonomik Analiz

Eksergoekonomik analiz, ekserji analizine dayalı termodinamik değerlendirmeleri ekonomik ilkelerle uygun bir şekilde birleştiren mühendislik dalıdır. Eksergoekonomik analizin ana hedefleri, sistem tasarımcısına, uygun maliyetli bir sistem tasarımı ve işletme imkanı sunmaktır. Eksergoekonomik analiz, enerji, ekserji ve ekonomik analizlerle elde edilemeyen bilgiler sağlamaktadır [66].

### 3.8.1. EXCEM yöntemi

Bir sistemin ekonomik değerlendirilmesinde kullanılan EXCEM (Exergy, Cost, Energy, Mass) (Ekserji-Maliyet-Enerji-Kütle) yöntemi dört temel parametre içermektedir. Bu dört parametrenin Türkçe karşılığı ekserji, maliyet, enerji ve kütle olarak bilinmektedir [67].

EXCEM yönteminin ana prensibi, EXCEM tarafından temsil edilen her bir niceliğin akışının, tüm noktalarda (sistem içi, sistem dışı) incelenmesini gerektirir. EXCEM tarafından temsil edilen niceliklerden sadece kütle ve enerji korunum yasalarına tabidir. Ekserji ve maliyet koruma yasalarına tabi olmadıklarından artar, azalır veya sabit kalır [67]. Şekil 3.19'da EXCEM yönteminin temel şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.19. EXCEM yöntemi temel şeması [67]

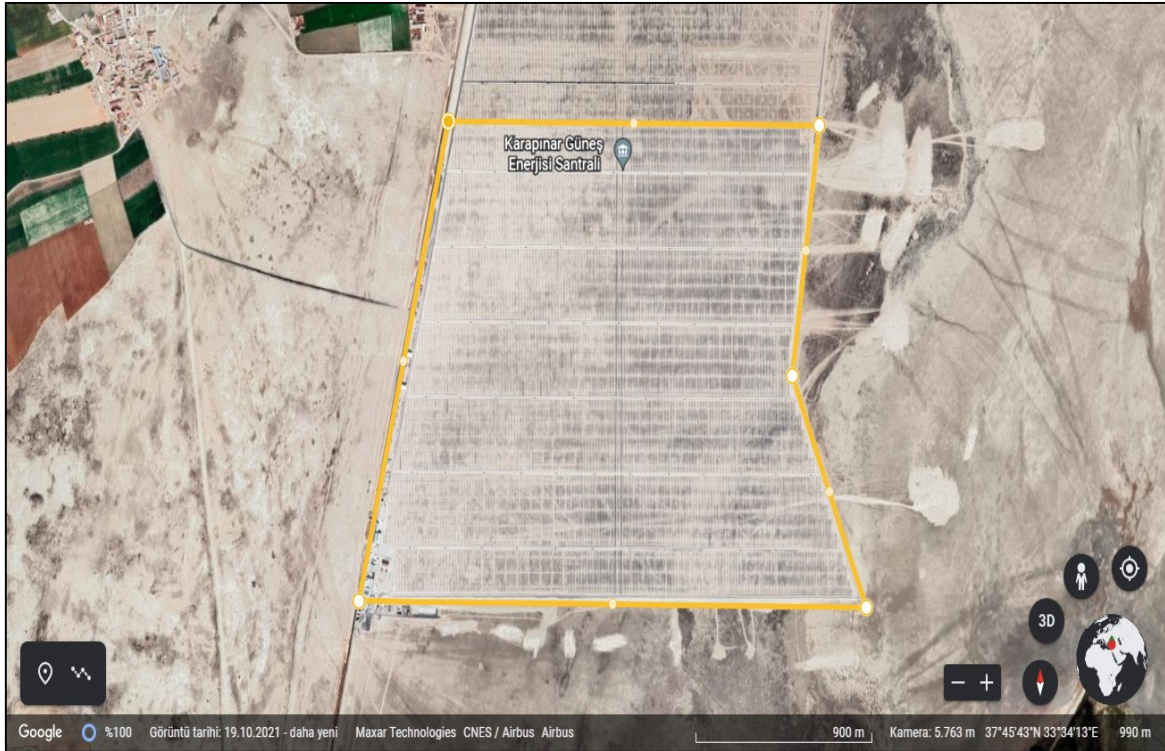


## 4. MATERYAL VE METOT

### 4.1. Konya Karapınar YEKA-1 (Faz-1) Güneş Enerjisi Santral Bilgileri

Konya, Karapınar, YEKA-1 güneş enerji santrali (GES) projesinin Faz-1 bölümü, 37°45 ve 37°47 kuzey enlemleri ile 33°33 ve 33°35 doğu boylamları arasında yer almaktadır. Bu güneş enerji santrali, 675 378 adet monokristal bifacial güneş panelinden ve tek eksenli (doğu-batı yönünde düzenlenmiş yatay bir eksenle) güneş takip sisteminden oluşmaktadır. Ayrıca santralde 3.43 MWe gücünde 66 adet merkezi evirici, 1 056 adet birleştirici kutu, 4 adet hava izleme istasyonu (Weather Monitoring Station, WMS), 1 adet 154 KV trafo merkezi bulunmaktadır.

Şekil 4.1’de işaretlenmiş alan Konya, Karapınar, YEKA-1 GES projesinin faz-1 bölümünün uydu üzerinden görüntüsüdür. Bu santralin toplam kurulu alternatif akım (AC) gücü 226.4 MWe değerindedir. Santralindeki güneş panellerinin yüzey alanının toplamı 1 372 432.932 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Santralin yatırım maliyeti ise yaklaşık olarak 200 000 000 \$ olarak bilinmektedir.



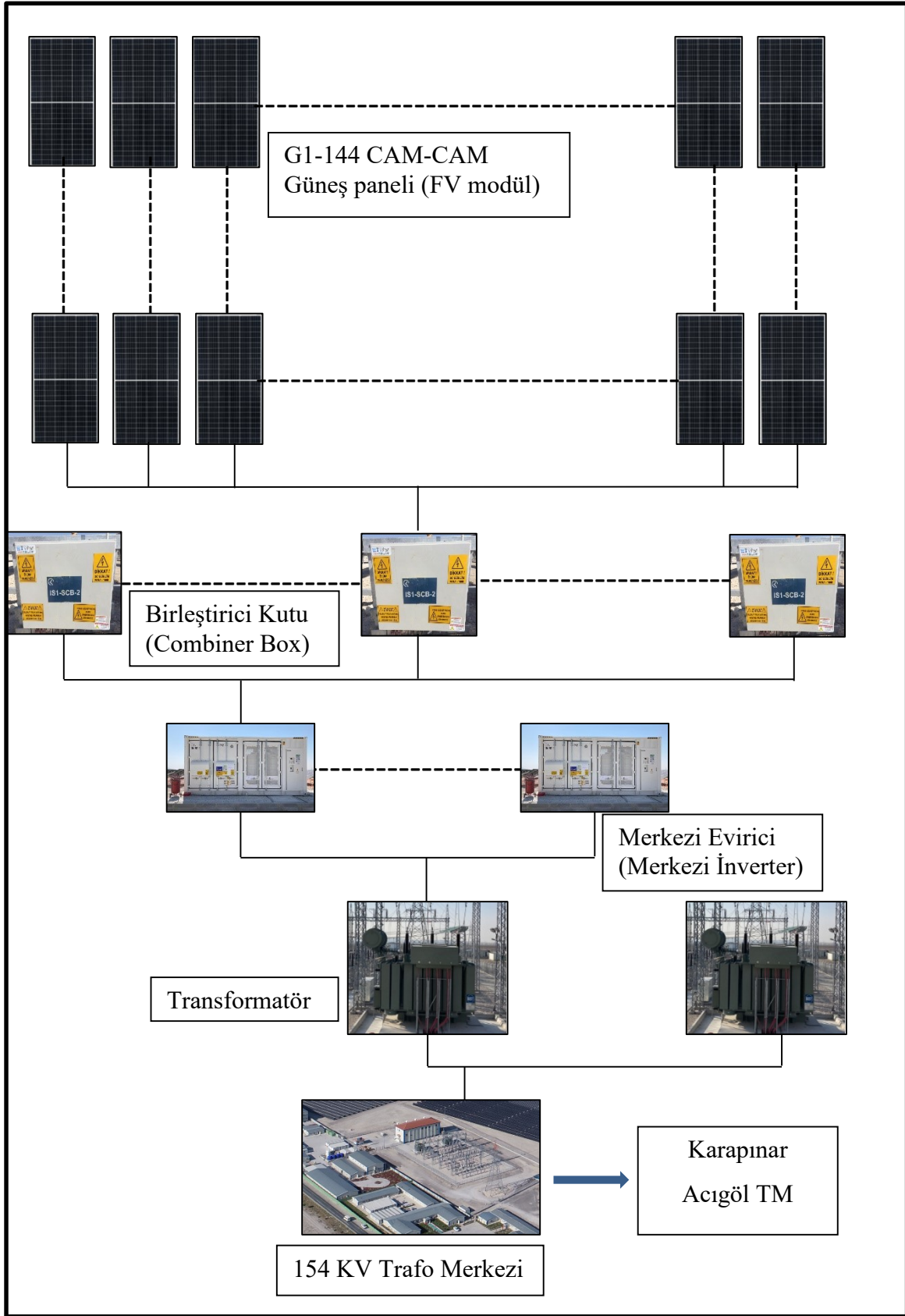
Şekil 4.1. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES projesi faz-1 uydu görüntüsü

Şekil 4.2’de Konya, Karapınar, YEKA-1 güneş enerji santralinin faz-1 bölümünün havadan drone ile görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 4.2. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES, faz-1 drone görüntüsü

Şekil 4.3’te Konya, Karapınar, YEKA-1 GES, faz-1 bölümünün şematik gösterimi çizilmiştir. Şekil 4.3’te görüldüğü üzere güneş panelleri birbirleri arasında önce seri ve sonra paralel şekilde bağlanarak panel dizileri oluşturulmuştur. Güneş panelleri tarafından DC elektrik akımı üretilmektedir. Bu panel dizileriyle üretilen doğru akım, DC solar kablolarıyla birleştirici kutularda (combiner box) toplanmaktadır. Birleştirici kutularda toplanan ve daha yüksek değerlere ulaşan doğru akım, daha büyük kesite sahip DC solar kablolar yardımıyla merkezi eviricilere iletilmektedir. Merkezi eviricilere aktarılan doğru akım (DC) ise burada alternatif akıma (AC) çevrilmektedir. Merkezi eviricilerin içerisinde bulunan yükseltici trafolarla AC elektrik gücü yükseltilerek orta gerilim kablolarıyla santrale ait 154 KV trafo merkezine iletilmektedir. Buradan da daha güçlü yükseltici trafolar tarafından AC elektrik gücü daha çok yükseltilerek Karapınar Acıgöl trafo merkezine iletilmektedir. Böylece güneş enerji santralinin şebeke ile bağlantısı tamamlanmaktadır.



Şekil 4.3. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES, faz-1 şematik gösterimi

## 4.2. Güneş Enerjisi Santralindeki Temel Elemanlar ve Ölçüm Cihazları

### 4.2.1. Güneş paneli ve özellikleri

Konya, Karapınar, YEKA-1 GES Faz-1 bölümüm için kullanılan Kalyon PV markasına ait güneş panelinin genel görünümü Şekil 4.4'te, gösterilmiştir. G1-144 CAM-CAM kodlu her birinin ön yüzeyi 400 Wp değerine kadar DC çıkış gücü üretebilen ve arka yüzeyinden %20'ye kadar enerji geri kazanımı sağlayabilen güneş paneli çift yüzeyli (bifacial) olup yarı kesim (half-cut) teknolojisi ile üretilmiştir.

Güneş panelinin elektriksel özellikleri standart test koşullarında (Güneş ışınım şiddeti: 1 000 W/m<sup>2</sup>, hava kütlesi 1.5 kg, hücre sıcaklığı 25°C, ölçüm toleransı  $\pm$  %2.5) belirlenmiştir.



Şekil.4.4. Kalyon PV G1-144 CAM-CAM güneş paneli

Güneş enerji santralinde kullanılan güneş panelinin standart test koşullarındaki elektriksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Güneş panelinin elektriksel ve mekaniksel özellikleri

Maksimum Güç Gerilimi (V)	41.0
Maksimum Güç Akımı (A)	9.76
Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ ) (A)	10.24
Açık Devre Gerilimi ( $V_{oc}$ ) (V)	48.80
Panel Tipi	Mono-C Silicon Bifacial PERC
Hücre Adeti	144 Yarım Hücre
Modül Uzunluğu	2024 mm $\pm$ 2 mm
Modül Genişliği	1004 mm $\pm$ 2 mm
$V_{oc}$ Sıcaklık katsayısı, $T_{cc}$ ( $^{\circ}C$ )	-0.28 %/ $^{\circ}C$
Doluluk Faktörü, FF	0.80078125

#### 4.2.2. Merkezi evirici ve özellikleri

Güneş enerji santralinde General Electric markasına ait, her biri 3.43 MWe AC maksimum çıkış güç değerine sahip merkezi eviriciler kullanılmıştır. LV5<sup>+</sup> 1566 Solar Inverter kodlu merkezi eviricilere ait genel görünüm Şekil 4.5'te, teknik özellikleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Şekil 4.5. General Electric LV5<sup>+</sup> 1566 merkezi evirici

Çizelge 4.2. Merkezi evirici teknik özellikleri

GİRİŞ VERİLERİ	
MPPT Aralığı ( $V_{dc}$ )	936-1300
MPPT Kabul Edilebilir DC Voltaj ( $V_{dc}$ )	1500
Maksimum Sürekli DC Akım ( $A_{dc}$ ) ( $35^{\circ}C / 50^{\circ}C$ )	4000/3200
MPPT Sayısı	1 adet
DC Giriş Sayısı	24 adete kadar
ÇIKIŞ VERİLERİ	
Etkin AC Çıkış Gücü ( $35^{\circ}C / 50^{\circ}C$ )(PF=1) <sup>3</sup> (MW)	3.43/3.04
AC Çıkış Voltajı ( $\pm \%10$ ) <sup>4</sup> ( $V_{ac}$ )	660
Maksimum AC Akım ( $35^{\circ}C / 50^{\circ}C$ ) ( $A_{ac}$ )	3000/2655
Şebeke Frekansı ( $\pm \%5$ ) (Hz)	50/60
Inverter Verimlilik (Max / EU / CEC) <sup>5</sup> (%)	98.9/98.6/98.7

#### 4.2.3. Piranometre ve özellikleri

Şekil 4.6'da santraldeki hava izleme istasyonlarında (WMS) kullanılan piranometre cihazı gösterilmiştir. Marka ve ürün kodu sırasıyla Kipp&zonen SMP 10-A olan cihaz ile birlikte yatay yüzeye düşen global güneş ışınımları ölçülmektedir.



Şekil 4.6. Kipp&amp;Zonen SMP 10-A piranometre

#### 4.2.4. WS-600 UMB ve özellikleri

Şekil 4.7’de santraldeki hava izleme istasyonlarında kullanılan ve marka, model, ürün kodu sırasıyla Lufft WS-600 UMB olan kompakt hava istasyonu gösterilmiştir. Bu ölçüm cihazı ile birlikte sıcaklık ve rüzgar hızı ölçülmektedir. Ayrıca bu cihaz farklı ölçümler de (basınç, nem, rüzgar yönü vs.) yapabilmektedir.



Şekil 4.7. Lufft WS-600 UMB sensörü

#### 4.2.5. FV Modül sıcaklık sensörü ve özellikleri

Şekil 4.8’deki hava izleme istasyonlarına bağlı, marka, model ve ürün kodu Ingenieurbüro Tm-RS485-MB olan modül sıcaklık sensörü ile FV modüllerin panel sıcaklıkları ölçülmektedir. Şekil 4.9’da santral içerisindeki bir FV modül sıcaklık sensörünün montajlanmış hali gösterilmiştir.



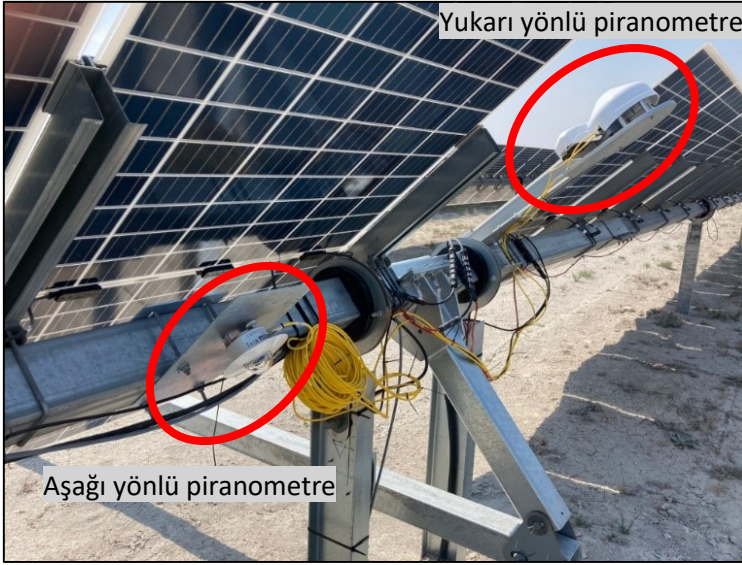
Şekil 4.8. Ingenieurbüro Tm-RS485-MB modül sıcaklık sensörü



Şekil 4.9. Santral içerisinde montajlanmış bir FV modül sıcaklık sensörü

#### 4.2.6. Albedometre ve özellikleri

Güneş ışınlarının yer yüzeyinden yansıma (albedo) ölçümü için 2 adet piranometre kullanılmaktadır. Piranometrelerden bir tanesi gökyüzüne doğru (yukarı yönlü) bakacak şekilde montajlanmış ve gelen global radyasyonu ölçmektedir. Diğeri ise yeryüzüne doğru (aşağı yönlü) bakacak şekilde kurulmuş ve yeryüzünden yansıyan radyasyonu ölçmektedir. Sonuç olarak piranometre cihazlarının ölçüm sonuçlarının birbirine oranı albedo katsayısını vermektedir. Saha içerisinde WMS-2 ve WMS-3 istasyonlarına bağlı olmak üzere iki farklı konumda iki farklı albedometre bulunmaktadır. Şekil 4.10'da albedometre cihazının saha içerisindeki montajlanmış halinin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 4.10. Santrale ait albedometre cihazının genel görünümü

#### 4.2.7. Kirlilik izleme sistemi (DustIQ) ve özellikleri

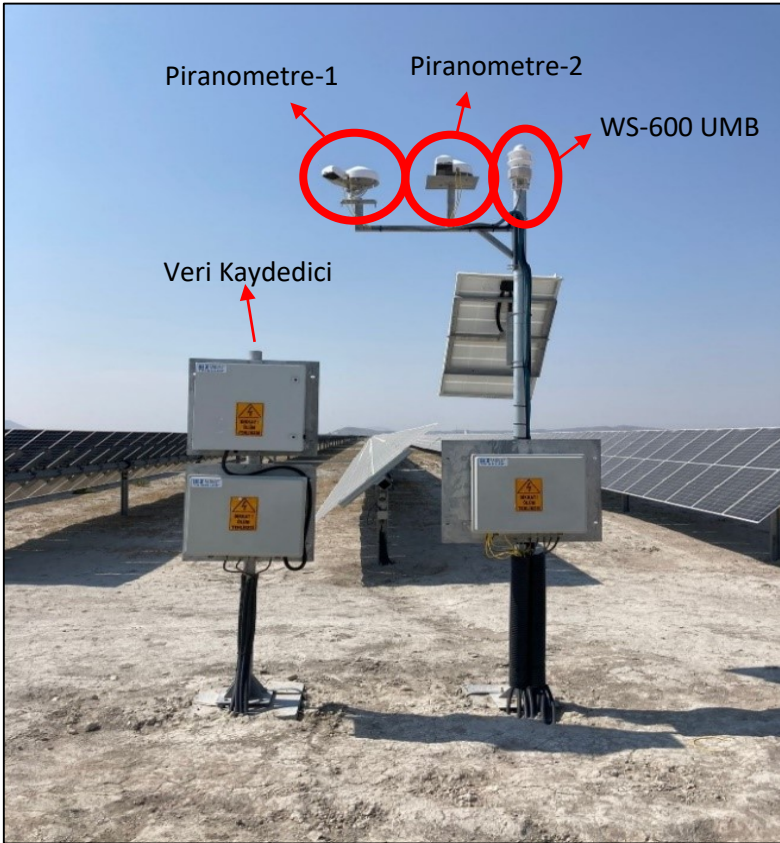
FV panellerin temizlik ölçümleri için iki farklı konumunda bulunan ve iki farklı hava izleme istasyonuna (WMS-2, WMS-3) bağlı olan birer adet Kipp&Zonen markaya ait kirlilik izleme sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.11’de DustIQ cihazı gösterilmiştir. Bu cihaz üzerinden kirlilik takibi yapılabildiği gibi panel yüzeyini kapatabilecek tüm durumların (kar veya gölgelenme gibi) tespiti de yapılabilmektedir.



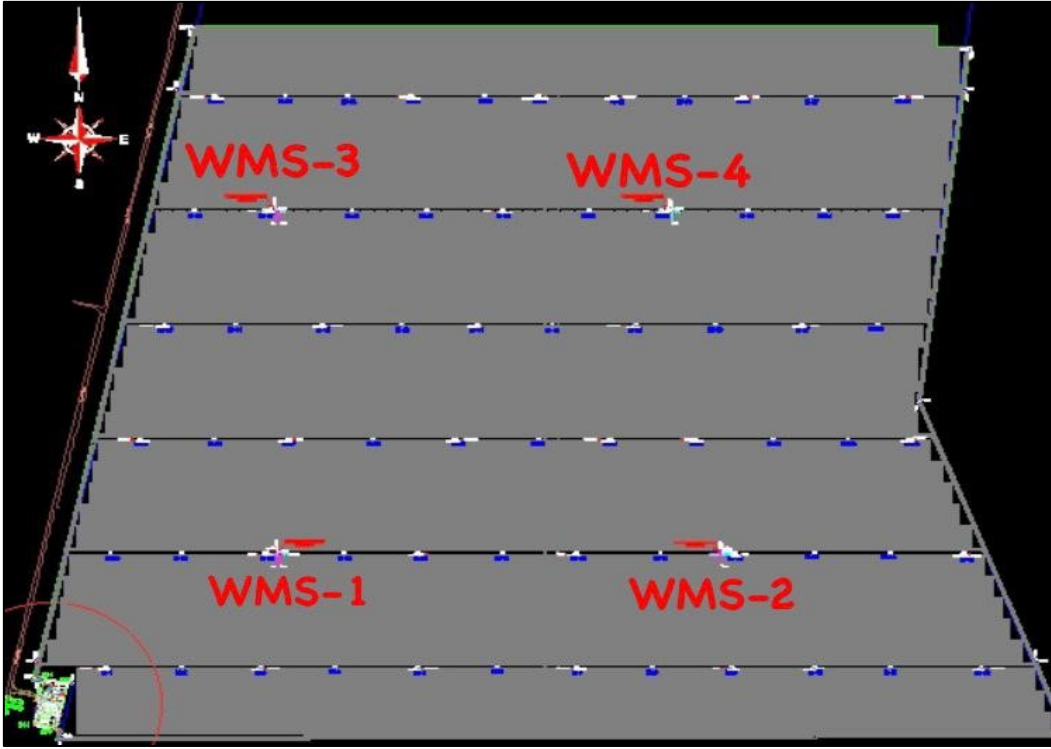
Şekil 4.11. Kipp&Zonen kirlilik takip sistemi (Dust IQ)

#### 4.2.8. Hava izleme istasyonu (WMS) ve özellikleri

Piranometre, WS-600 UMB, FV modül sıcaklık sensörü, albedometre ve DustIQ ölçüm cihazları santral içerisinde bulunan hava izleme istasyonlarındaki veri kaydedicilere bağlıdır. Bu ölçüm cihazları aldıkları ölçüm verilerini kısa mesafeli haberleşme kablolarıyla (RS 485 vs.) hava izleme istasyonuna aktarmaktadır. Hava izleme istasyonuna aktarılan bu veriler daha uzun mesafede iletim yapabilen haberleşme kablolarıyla (fiber kablo vs.) santrale ait 154 KV trafo merkezinde bulunan merkezi kontrol ve veri toplama (SCADA) sistemine iletilmektedir. Merkezi eviricilerden saatte bir maksimum çıkış gücü verileri, hava izleme istasyonlarından ise dakikada bir güneş ışınım şiddeti, rüzgar hızı, FV hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, albedo katsayısı ve FV modül temizlik oranı verileri SCADA sistemine aktarılmaktadır. Şekil 4.12’de santral içerisinde bulunan bir WMS gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere WMS içerisinde 2 adet piranometre, 1 adet veri kaydedici ve 1 adet WS-600 UMB sensörü bulunmaktadır. Şekil 4.13’te ise santralin WMS yerleşim planı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere santral içerisinde dört farklı WMS vardır fakat bu çalışma için iki WMS (WMS-2, WMS-3) verisi kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Santraldeki hava izleme istasyonunun (WMS) genel görünümü



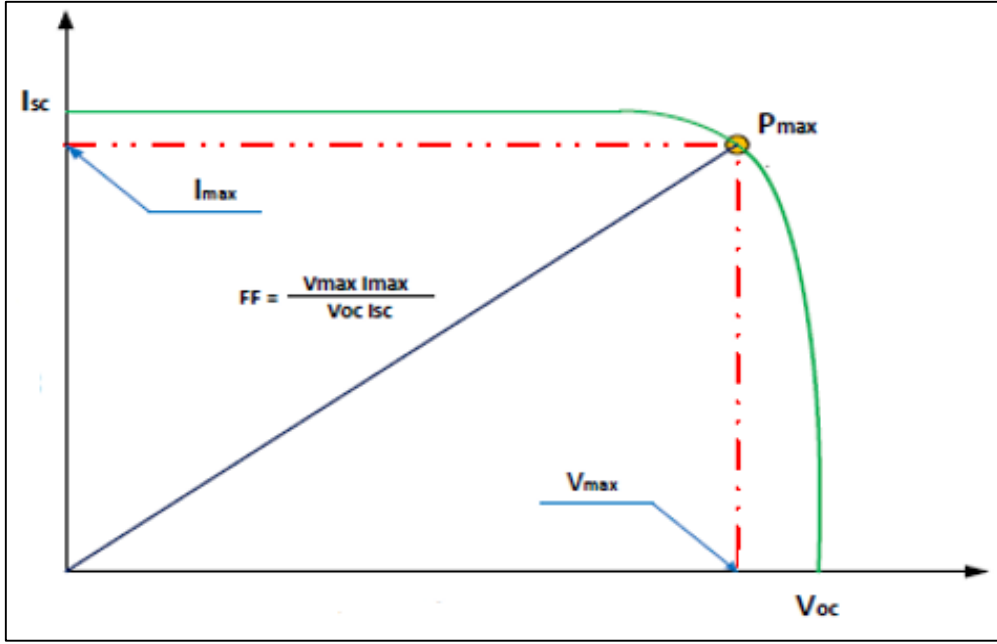
Şekil 4.13. Santralin (Faz-1) WMS yerleşim planının şematik gösterimi

### 4.3. Güneş Enerjisi Santralının Termodinamik Analizi

Bu tez çalışmasında çift yüzeyli FV güneş panellerinden ve tek eksenli güneş takip sistemli bir güneş enerji santralinde enerji, ekserji, sürdürülebilirlik ve eksergoekonomik analizler ile değerlendirme yapabilmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

#### 4.3.1. Santralin enerji analizi

Bir güneş hücresinin çıkış özelliklerinin I-V eğrisi Şekil 4.14’de görüldüğü üzere doğrusal olmayan bir eğimdir. Burada, maksimum akım ( $I_{max}$ ), maksimum gerilim ( $V_{max}$ ), maksimum çıkış gücü ( $P_{max}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve doldurma faktörü (FF) ifadelerine yer verilmiştir.



Şekil 4.14. Güneş hücresinin akım-voltaj (I-V) eğrisi [25]

Bir güneş hücresinin maksimum çıkış gücü I-V eğrisi grafiğinin altında kalan en büyük dikdörtgenin alanı olarak tanımlanabilir. Eş. 4.1, maksimum çıkış gücü denklemdir.

$$P_{\max} = V_{\max} I_{\max} \quad (4.1)$$

Atmosferik şartlara göre değişen açık devre gerilimi ( $V'_{oc}$ ) ve kısa devre akımları ( $I'_{sc}$ ) ölçüm cihazları ile ölçülebileceği gibi Eş. 4.2 ve Eş. 4.3'teki formüllerle de hesaplanabilir. Eş. 4.2'de, standart test koşullarındaki açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), FV modül hücre sıcaklığı ( $T_{cell}$ ) ve sıcaklığa bağlı voltaj değişim katsayısı ( $T_{ec}$ ) ifadelerine yer verilmiştir. Hücre sıcaklığının birimi Santigrat derece, sembolü ise  $^{\circ}C$ 'dir.

$$V'_{oc} = V_{oc} \frac{(100 + (T_{cell} - 25)(T_{ec}))}{100} \quad (4.2)$$

Eş. 4.3'te, standart test koşullarındaki kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve toplam güneş ışınımı ( $S_T$ ) ifadelerine yer verilmiştir.

$$I'_{sc} = I_{sc} \left( \frac{S_T}{1000} \right) \quad (4.3)$$

Eş. 4.4'te görüldüğü üzere doldurma faktörü, güneş pillerinin üretebileceği maksimum çıkış gücün, atmosferik şartlara göre değişebilen kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımına bölümüdür [58].

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{\max}I_{\max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (4.4)$$

Bir fotovoltaik sistemin enerjisi elektriksel ve termal olmak üzere iki temel değişkene bağlıdır. Fotovoltaik etki ile elektrik üretimi gerçekleşirken aynı zamanda güneş pilleri de güneş ışınımı nedeniyle ortaya çıkan termal enerjiden dolayı ısınırlar. FV yüzeylerde ortaya çıkan termal enerji yararlı bir amaç için kullanılmadığından dolayı, çevreye ısı kaybı olarak geçer [20]. Bir FV sistemin enerji çıkışı Eş. 4.5'deki gibi belirtilebilir. Burada, FV sistemin çıkış enerjisi ( $\dot{E}_{n_{\text{output}}}$ ), elektrik enerjisi ( $\dot{E}_{n_{\text{el}}}$ ) ve termal enerji ( $\dot{E}_{n_{\text{th}}}$ ,  $\dot{Q}$ ), ifadelerine yer verilmiştir.

$$\dot{E}_{n_{\text{output}}} = \dot{E}_{n_{\text{el}}} + \dot{E}_{n_{\text{th}}} = V_{oc}I_{sc} + \dot{Q} = \frac{P_{\max}}{FF} + \dot{Q} \quad (4.5)$$

#### Enerji verimliliği ( $\eta_{\text{en}}$ )

Eş. 4.6'da,  $h_{ca}$ , güneş hücresi ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıyım ısı transfer katsayısı, A, FV modül (güneş paneli) yüzey alanını ve  $T_{\text{amb}}$ , ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Güneş hücresi ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıyım ısı transfer katsayısı Eş. 4.7'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır. Burada v, rüzgar hızını temsil etmektedir [58].

$$\dot{Q} = h_{ca}A(T_{\text{cell}} - T_{\text{amb}}) \quad (4.6)$$

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8(v) \quad (4.7)$$

Bir FV sistemin enerji verimliliği, tüm fotovoltaik modüllerin yüzeyinden elde edilen çıkış enerjisinin giriş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Eş. 4.8'de,  $\dot{E}_{n_{\text{input}}}$ , giriş enerjisini ifade etmektedir. Bir FV sistemin giriş enerjisi, tüm güneş panellerinin toplam yüzey alanına giren toplam güneş ışınım şiddetidir [68].

$$\eta_{en} = \frac{E_{n_{output}}}{E_{n_{input}}} = \frac{V_{oc}I_{sc} + Q}{S_{TA}} = \frac{\frac{P_{max}}{FF} + Q}{S_{TA}} \quad (4.8)$$

#### Maksimum elektrik verimliliği ( $\eta_{max,el}$ )

Bir FV sistemin maksimum elektrik verimliliği, tüm FV güneş panellerinden üretilen maksimum elektrik enerjisinin toplam giriş enerjisine oranıdır. Eş. 4.9'daki gibi hesaplanmaktadır [68].

$$\eta_{max,el} = \frac{V_{oc}I_{sc}}{S_{TA}} = \frac{\frac{P_{max}}{FF}}{S_{TA}} \quad (4.9)$$

#### Güç dönüştürme verimliliği ( $\eta_{pce}$ )

Bir FV sistemin güç dönüştürme verimliliği, maksimum gerçek çıkış gücünün, giriş gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_{pce} = \frac{V_{max}I_{max}}{S_{TA}} \quad (4.10)$$

$V_{max}I_{max}$  ifadesi yerine “ $P_{max}$ ” ifadesi yazıldığında güç dönüştürme verimliliği Eş. 4.11'deki gibi ifade edilmektedir [68].

$$\eta_{pce} = \frac{P_{max}}{S_{TA}} \quad (4.11)$$

### **4.3.2. Santralin ekserji analizi**

Ekserji analizi; termodinamiğin ikinci yasasına dayalı olmakla birlikte var olan kullanılabilir enerjinin ne kadarının gerçek işe dönüştürüldüğünü bulmaya yardımcı olmaktadır. Ekserji analizi ile enerji analizi arasındaki en belirleyici fark ise; ekserji analizinde sistemin etkileşimde olduğu çevrenin şartlarına yer verilirken, enerji analizinde ise çevre şartlarına yer verilmez. Bu yüzden ekserji analizi bizi gerçeğe bir adım daha yaklaştırabilir.

Eş. 4.12’de ifade edildiği gibi FV bir sistemin birim zamandaki ekserjisi ( $\dot{E}_{X_{PV}}$ ), birim zamanda sistem tarafından üretilen elektriksel ekserjisi ( $\dot{E}_{X_{el}}$ ) ile birim zamandaki ısı kaybı olarak bilinen termal ekserji ( $\dot{E}_{X_{th}}$ ) arasındaki farka eşittir.

$$\dot{E}_{X_{PV}} = \dot{E}_{X_{el}} - \dot{E}_{X_{th}} \quad (4.12)$$

Eş. 4.13’te, bir FV sistemin elektriksel ekserjisi ( $\dot{E}_{X_{el}}$ ) ifade edilmiştir.

$$\dot{E}_{X_{el}} = V_{max} I_{max} = P_{max} \quad (4.13)$$

Bir FV sistemin ısı kaybından meydana gelen termal ekserjisi ( $\dot{E}_{X_{th}}$ ) Eş. 4.14’de ifade edilmiştir. Burada hücre ve ortam sıcaklıkları birimleri Kelvin ve sembolleri K’dır.

$$\dot{E}_{X_{th}} = \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}} \right) \quad (4.14)$$

Eş. 4.6’daki termal enerji ifadesini Eş. 4.14’te yerine yazarsak termal ekserji ifademiz Eş.4.15’teki gibi olur.

$$\dot{E}_{X_{th}} = h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb}) \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}} \right) \quad (4.15)$$

Eş. 4.13 ve Eş. 4.15, Eş. 4.12’de yerine yazıldığında bir FV sistemin birim zamandaki ekserjisi denklemi Eş. 4.16’daki gibi tanımlanır.

$$\dot{E}_{X_{PV}} = V_{max} I_{max} - h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb}) \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}} \right) \quad (4.16)$$

Güneş ekserjisi ( $\dot{E}_{X_{solar}}$ ) ifadesinin 5 farklı denklemi aşağıda verilmiştir. Eş. 4.17’de Petela Güneş ekserji modeli (1964), Eş. 4.18’de Spanner Güneş ekserji modeli (1964), Eş. 4.19’de Parrott Güneş ekserji modeli (1978), Eş. 4.20’de Nobusawa Güneş ekserji modeli (1980) verilmiştir. Eş. 4.21’de ise Jeter Güneş ekserji modeli (1981) belirtilmiştir [69].

$$\dot{E}_{X_{solar}} = \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right) \right] (S_T A) \quad (4.17)$$

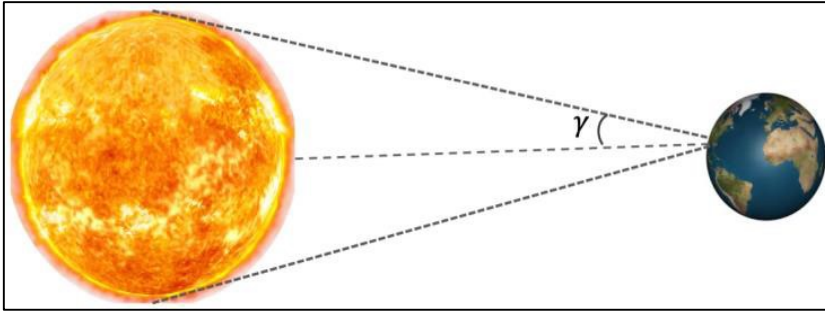
$$\dot{E}_{X_{\text{solar}}} = \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sun}}} \right) \right] (S_T A) \quad (4.18)$$

$$\dot{E}_{X_{\text{solar}}} = \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sun}}} \right) (1 - \cos \gamma)^{0.25} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sun}}} \right)^4 \right] (S_T A) \quad (4.19)$$

$$\dot{E}_{X_{\text{solar}}} = (0.95) (S_T A) \quad (4.20)$$

$$\dot{E}_{X_{\text{solar}}} = \left[ 1 - \left( \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sun}}} \right) \right] (S_T A) \quad (4.21)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $T_{\text{sun}}$ , Güneş sıcaklığını,  $\cos \gamma$  ise Şekil 4.15’de görüldüğü üzere, Güneş-Dünya konisinin yarım açısını, temsil etmektedir. Güneş sıcaklığı hesaplamalarda yaklaşık 5777 K alınmaktadır [70].



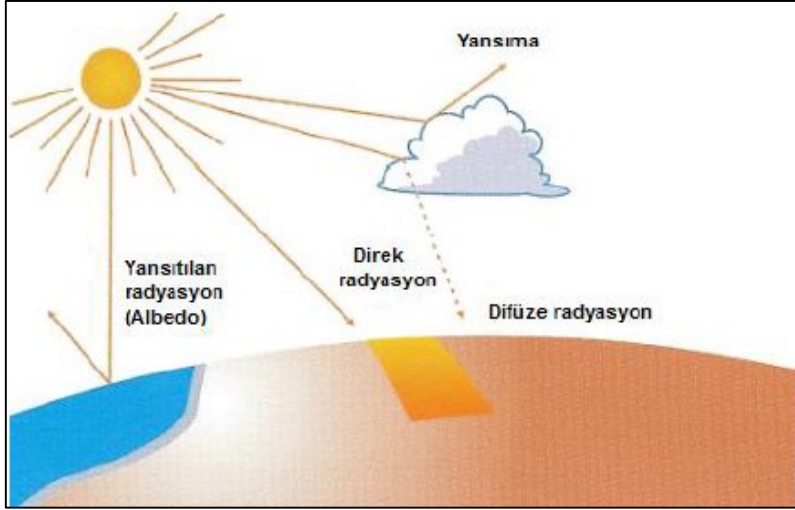
Şekil 4.15. Parrott ekserji denkleminin esas aldığı Güneş-Dünya konisi

Hesaplanan  $\gamma$  açısının Temmuz ayındaki değeri  $0.0046^\circ$  ile Ocak ayındaki  $0.0047^\circ$  arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu sınır değerler, dünyanın güneşe olan Temmuz ayındaki minimum ve Ocak ayındaki maksimum uzaklıklarına karşılık gelir. Parrott modelinin kullanıldığı çalışmalarda  $\gamma \cong 0.005^\circ$  olarak alınmıştır ve katkısı çok küçükte olsa bazı durumlarda dikkate alınması gerekebilmektedir [30].

Yatay yüzeylere ulaşan toplam güneş ışıınımları, Eş. 4.22’de ifade edildiği üzere iki ayrı şekilde direkt (doğrudan) ve difüz (yaygın) güneş ışıınımindan oluşmaktadır [71]. Burada  $S_T$ , yatay yüzeye düşen global güneş ışıınımlarını,  $S_{Tb}$ , yatay yüzeye düşen direkt güneş ışıınımlarını,  $S_{Td}$ , yatay düzeye düşen difüz güneş ışıınımlarını ifade etmektedir. Şekil 4.16’da, direkt ve difüz güneş ışıınımlarının şematik gösterimi verilmiştir. Ayrıca, pıranometre cihazları güneşten

gelen hem direk hem de difüz ışınımları ölçerek yatay yüzeye düşen global ışınımları hesaplayabilmektedir.

$$\overline{S_T} = \overline{S_{Tb}} + \overline{S_{Td}} \quad (4.22)$$



Şekil 4.16. Direkt ve difüz güneş ışınımları [72]

Son olarak, Eş. 4.21 ifadesindeki Jeter Güneş ekserji modeli, Güneş ekserjisinin hesaplanmasında en çok tercih edilen modeldir. Bu nedenle bu tez çalışmasında da ekserji analizleri yapılırken Eş. 4.21'den yararlanılmıştır.

#### Ekserji verimliliği ( $\psi$ )

Ekserji verimliliği çıkan ekserji miktarının giren ekserji miktarına oranı şeklinde tanımlanır. Burada,  $\dot{E}_{x_{output}}$ , çıkan ekserji ve  $\dot{E}_{x_{input}}$ , giren ekserjiyi ifade etmektedir.

$$\psi = \frac{\dot{E}_{x_{output}}}{\dot{E}_{x_{input}}} = \frac{\dot{E}_{x_{PV}}}{\dot{E}_{x_{solar}}} \quad (4.23)$$

Eş. 4.16 ve Eş. 4.21 ifadeleri Eş. 4.23'te yerine yazıldığında Eş. 4.24'teki gibi bir FV sistemin ekserji verimliliği ifadesi elde edilir [68].

$$\psi = \frac{V_{max} I_{max} - h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb}) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right)}{\left[1 - \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)\right] (S_T A)} \quad (4.24)$$

### 4.3.3. Santralin sürdürülebilirlik analizi

Ekserji verimi, sistemin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini geliştirmek için kullanılabilir. Ekserji verimi ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki, Eş. 4.25 ve Eş. 4.26'da ifade edilmiştir [73]. Burada SI, sürdürülebilirlik indeksini ifade etmektedir. Ekserji kayıpları ( $\dot{L}_{ex}$ ) ile atık ekserji oranı arasındaki ilişki Eş. 4.27'de verilmiştir. Burada WER, atık ekserji oranını temsil etmektedir. Ekserji kayıpları Eş. 4.29'dan, giren ekserji miktarı ise Eş. 4.21'den hesaplanmıştır.

$$\psi = 1 - \frac{1}{SI} \quad (4.25)$$

$$SI = \frac{1}{1-\psi} \quad (4.26)$$

$$WER = \frac{\dot{L}_{ex}}{\dot{E}x_{input}} \quad (4.27)$$

### 4.3.4. Santralin eksergoekonomik analizi

Enerji ve ekserji analizlerinin tamamlanmasından sonra bir eksergoekonomik analiz yapılabilir. Bu tez çalışması kapsamında ekonomik analiz yöntemi olarak EXCEM yöntemi uygulanmıştır. EXCEM yöntemi ile enerji açısından analiz yapılırsa, Eş. 4.28'de görüldüğü üzere, toplam giren enerji değeri ile toplam üretilen enerji değerinin farkı enerji kaybını vermektedir.

$$\dot{L}_{en} = S_T A - P_{max} \quad (4.28)$$

EXCEM yöntemi ile ekserji açısından analiz yapılırsa, Eş. 4.29'da görüldüğü üzere,  $\dot{L}_{ex}$ , ekserji kaybı ifadesi, sisteme giren toplam ekserjinin, sistemden üretilen toplam ekserjinin farkıyla elde edilmektedir.

$$\dot{L}_{ex} = \left( 1 - \left( \frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right) (S_T A) \right) - \left( P_{max} - (h_{ca} A) (T_{cell} - T_{amb}) \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}} \right) \right) \quad (4.29)$$

Kayıpların maliyeti ( $\dot{R}$ ), Eş 4.30'da ifade edilmiştir. Burada,  $\dot{L}$ , termodinamik kaybı, K, yatırım maliyetini ifade etmektedir.

$$\dot{R} = \frac{\dot{L}}{K} \quad (4.30)$$

Denklem 4.31'de termoeconomik analiz parametresi ( $\dot{R}_{en}$ ), Denklem 4.32'de eksergoekonomik analiz parametresi ( $\dot{R}_{ex}$ ), ifadelerine yer verilmiştir [74]. Bu yöntem, mevcut sistemin kurulumu için harcanan birim maliyete karşılık kaybedilen enerjinin ve kaybedilen ekserjinin miktarını göstermektedir. Burada,  $\dot{L}_{en}$ , toplam enerji kaybını,  $\dot{L}_{ex}$ , toplam ekserji kaybını ifade etmektedir.

$$\dot{R}_{en} = \frac{\dot{L}_{en}}{K} \quad (4.31)$$

$$\dot{R}_{ex} = \frac{\dot{L}_{ex}}{K} \quad (4.32)$$



## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Konya ili Karapınar ilçesinde bulunan şebekeye bağlı bir güneş enerji santralinin (YEKA-1 GES Faz-1) enerji, ekserji, sürdürülebilirlik ve eksergoekonomik analizlerle değerlendirilmiştir. Maksimum AC çıkış gücü 226.26 MWe olan güneş enerji santrali, tek eksenli güneş takip sistemi ve iki yüzeyli monokristal güneş panellerinden oluşmaktadır.

Analizlerde kullanılmak üzere belirtilen aylar için 30 gün boyunca sadece 09:00 ile 17:00 saatleri arasında veri toplanmıştır. Toplanan veriler; maksimum çıkış gücü, güneş ışınım şiddeti, rüzgar hızı, FV hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, albedo katsayısı ve FV modül temizlik oranıdır. Bu verilerin tümü merkezi kontrol ve veri toplama sisteminden dakikalık ve saatlik olarak alınmıştır. Bu dakikalık ve saatlik verilerin ortalamalarıyla günlük veriler oluşturulmuştur. Tüm analizlerde günlük veriler kullanılmıştır.

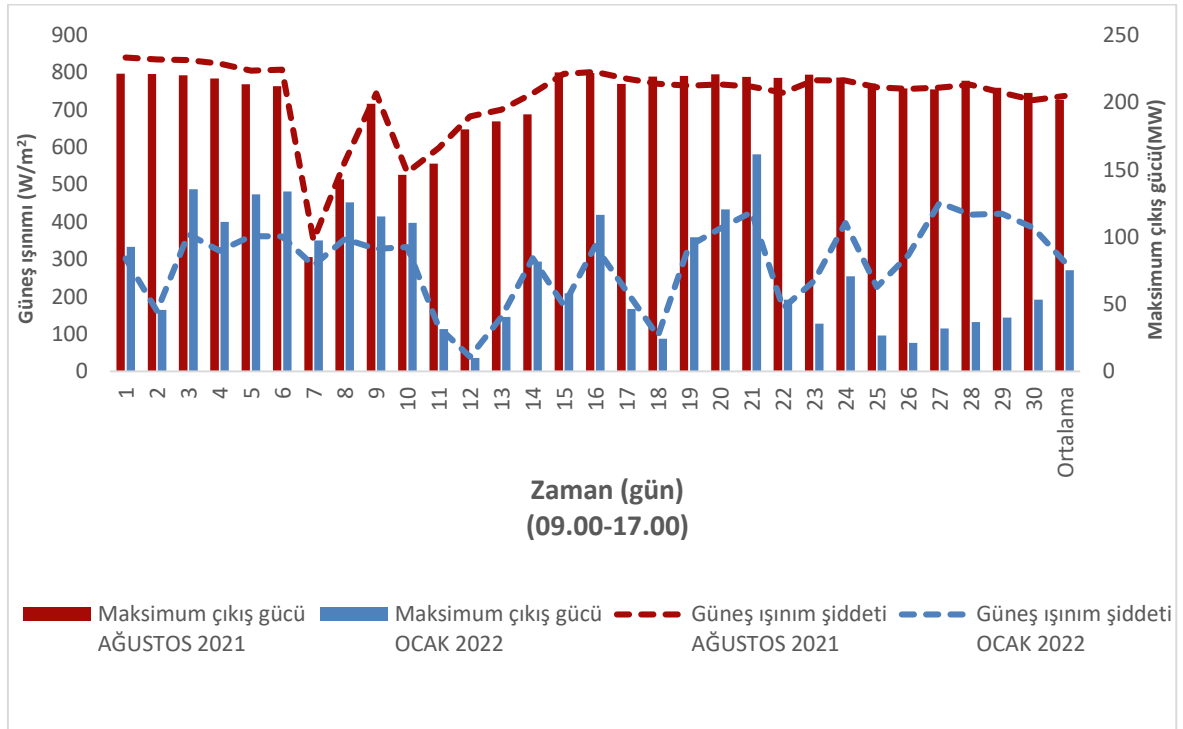
### 5.1. İki Farklı Ay için Değerlendirmeler

Güneş enerji santrallerinde, güneş ışınım şiddeti ve sıcaklık, temel ekipmanlar (FV modül, evirici vs.) üzerinde doğrudan etkili olan temel parametrelerdir. Bu çalışmada, aylık ortalama güneş ışınım şiddeti ile sıcaklığın en yüksek ve en düşük olduğu Ağustos 2021 ile Ocak 2022'deki santral verileriyle analizler yapılmış, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analizlerin yapılabilmesi için Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarına ait toplamda 560 237 adet veriden faydalanılmıştır.

#### 5.1.1. Santralden alınan veriler ile değerlendirme

Şekil 5.1'de santralin Ağustos 2021 ve Ocak 2022'deki günlük güneş ışınım şiddeti ile maksimum çıkış gücü verilerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, genelde her iki ayda da güneş ışınım şiddetinin arttığı günlerde maksimum çıkış güçleri de artış göstermiştir. Ağustos ayına ait güneş ışınım şiddeti ve maksimum çıkış gücü değerleri Ocak ayına göre daha yüksektir. Ağustos ayının maksimum, minimum ve ortalama güneş ışınım şiddeti değerleri sırasıyla 840,45 W/m<sup>2</sup>; 350,74 W/m<sup>2</sup>; 737,39 W/m<sup>2</sup> iken Ocak ayında bu değerler sırasıyla 451,18 W/m<sup>2</sup>; 38,79 W/m<sup>2</sup>; 292,35 W/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir.

Ağustos ayının en yüksek, en düşük ve ortalama maksimum çıkış gücü değerleri sırasıyla 222,22 MW; 85,02 MW; 201,75 MW iken Ocak ayında ise bu değerler sırasıyla 161,29 MW; 10,00 MW; 75,27 MW olarak bulunmuştur. 7, 8 ve 10 Ağustos tarihlerinde güneş ışınım şiddeti değerlerinde beklenmedik bir düşüş gerçekleşmiştir. Bunun nedeni bu günlerde havanın bulutlu olmasıdır. Bulutlanma, yağmur ve kar yağışı gibi yerel hava koşulları yer yüzeyine gelen güneş ışınımının zayıflamasına neden olur. Ayrıca, Şekil 5.1’de Ocak ayının son günleri için güneş ışınım değerlerine baktığımızda, güneş ışınım şiddetinin artmasına rağmen diğer günlere göre daha az maksimum çıkış gücü üretildiği görülmektedir. Bunun nedeni, bu günlerde FV panel yüzeylerini kapatacak şekilde meydana gelen kar ve buzlanma gibi olumsuz hava olaylardır. Kar yağışından sonra hava normale dönmüş ve ortalama güneş ışınım miktarı yükselmiş ancak güneş panellerin üstü kar ile kaplı olduğu için ortalama maksimum çıkış gücü yükselmemiştir.



Şekil 5.1. Güneş ışınımı ve maksimum çıkış gücünün iki farklı aydaki değişimi

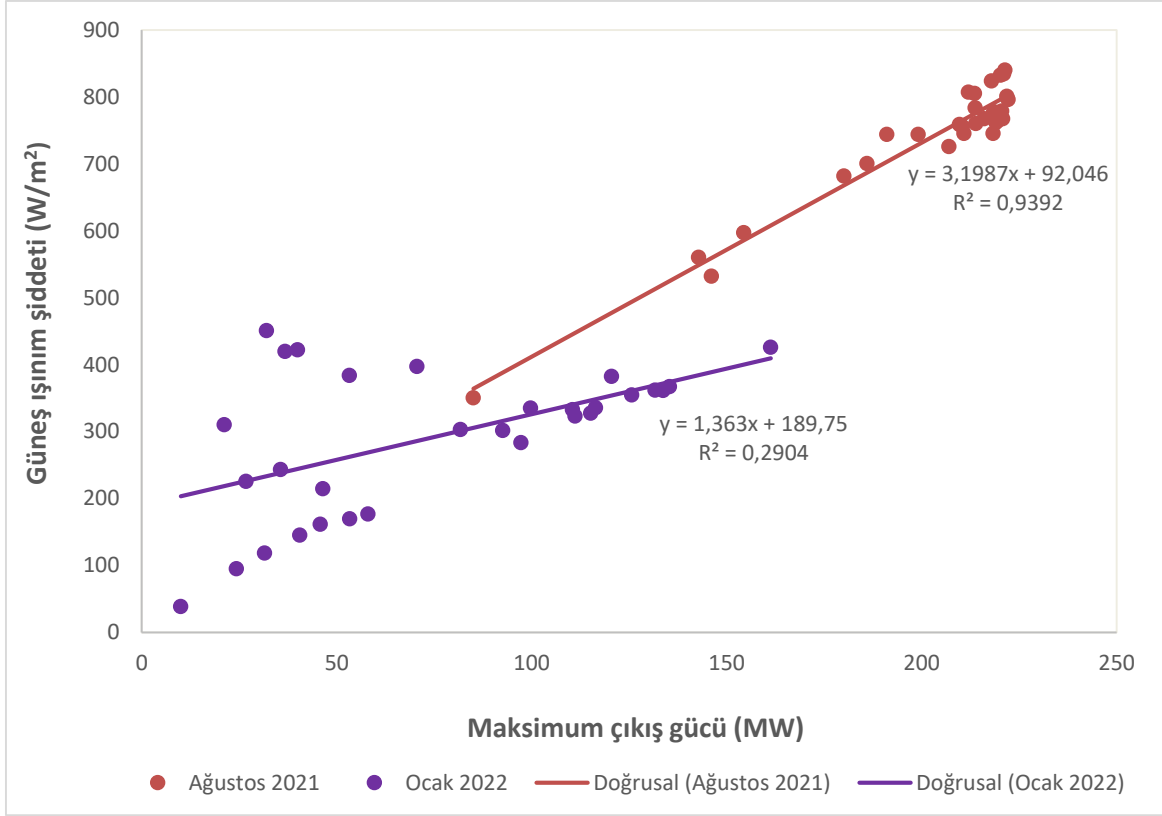
Çizelge 5.1’de santraldeki albedometre ile DustIQ cihazlarından elde edilen verilere yer verilmiştir. Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere Albedo katsayısı her zaman 0 ile 1 arasında bir değerdir [75]. Ağustos ayındaki ortalama albedo katsayısı 0,1145 iken Ocak ayındaki kar yağışları ortalama albedo katsayısını 0,2349’a yükselmiştir. Ortam karla kaplıysa daha yüksek albedo katsayıları görülür. Ağustos ayındaki FV panellerin ortalama temizlik oranı

% 97,83, Ocak ayında ise FV panel yüzeyini birkaç gün kapatan kar yağışları nedeniyle, FV panellerin ortalama temizlik oranı düşüş göstererek % 90,32 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Ağustos ve Ocak aylarının ortalama, albedo ve FV panel temizlik oranı

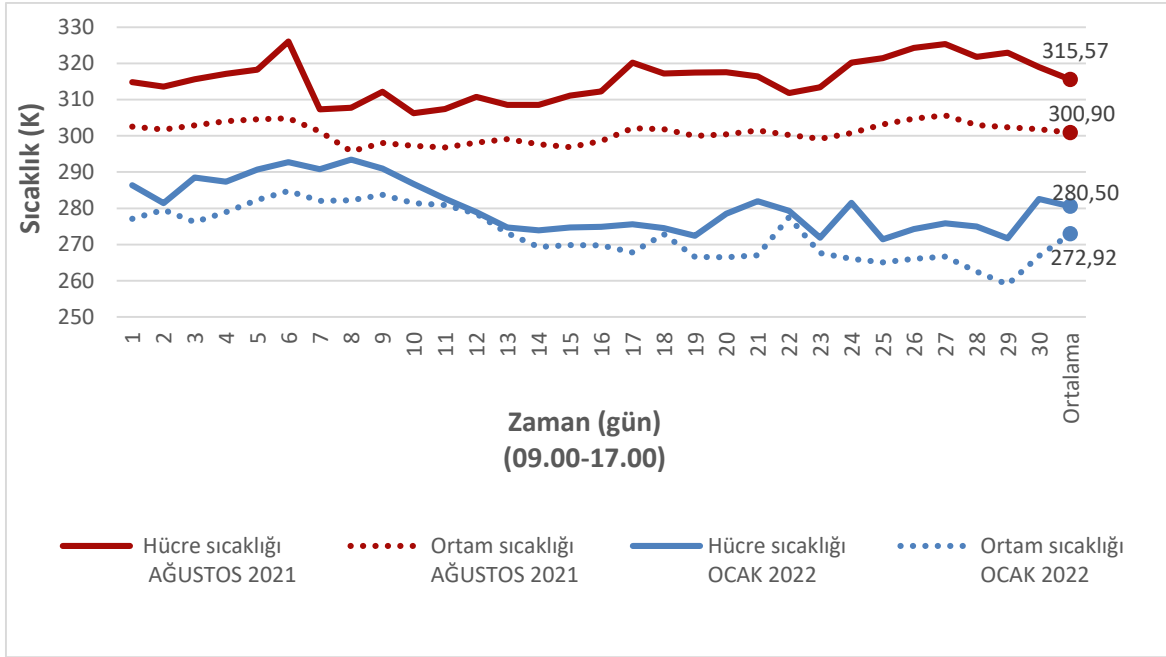
AĞUSTOS (2021)					
ZAMAN	YUKARI (W/m <sup>2</sup> )	AŞAĞI (W/m <sup>2</sup> )	ALBEDO KATSAYISI	TEMİZLİK SENSÖRÜ 01 (%)	TEMİZLİK SENSÖRÜ 02 (%)
WMS-2	671.5859	76.8905	0.1145	97.8974	DEĞER YOK
WMS-3	DEĞER YOK	DEĞER YOK	DEĞER YOK	97.9985	97.5897
Ortalama	671.5859	76.8905	0.1145	97.8285	
OCAK (2022)					
ZAMAN	YUKARI (W/m <sup>2</sup> )	AŞAĞI (W/m <sup>2</sup> )	ALBEDO KATSAYISI	TEMİZLİK SENSÖRÜ 01 (%)	TEMİZLİK SENSÖRÜ 02 (%)
WMS-2	265.6918	59.4309	0.2237	89.4453	DEĞER YOK
WMS-3	256.9522	63.2252	0.2461	91.1594	90.3464
Ortalama	261.3220	61.3281	0.2349	90.3170	

Şekil 5.2’de Ağustos 2021 ve Ocak 2022 için günlük verilerle güneş ışınlam şiddeti ve maksimum çıkış gücü arasındaki ilişki regresyon analizi metodu kullanılarak incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, Ağustos ayında güneş ışınlam şiddeti arttıkça maksimum çıkış gücü de artmaktadır. Ancak bu durum Ocak ayı için geçerli değildir. Ocak ayında panel yüzeyini kapatacak şekilde meydana gelen olumsuz hava (kar, buzlanma vs.) şartları, güneş ışınlamının arttığı günlerde maksimum çıkış gücünün artmasında engel olmuştur. Kısacası, olumsuz hava koşullarına göre olumlu hava koşullarında güneş ışınlam şiddeti arttıkça maksimum çıkış gücünün de artması daha yüksek ihtimaldir.



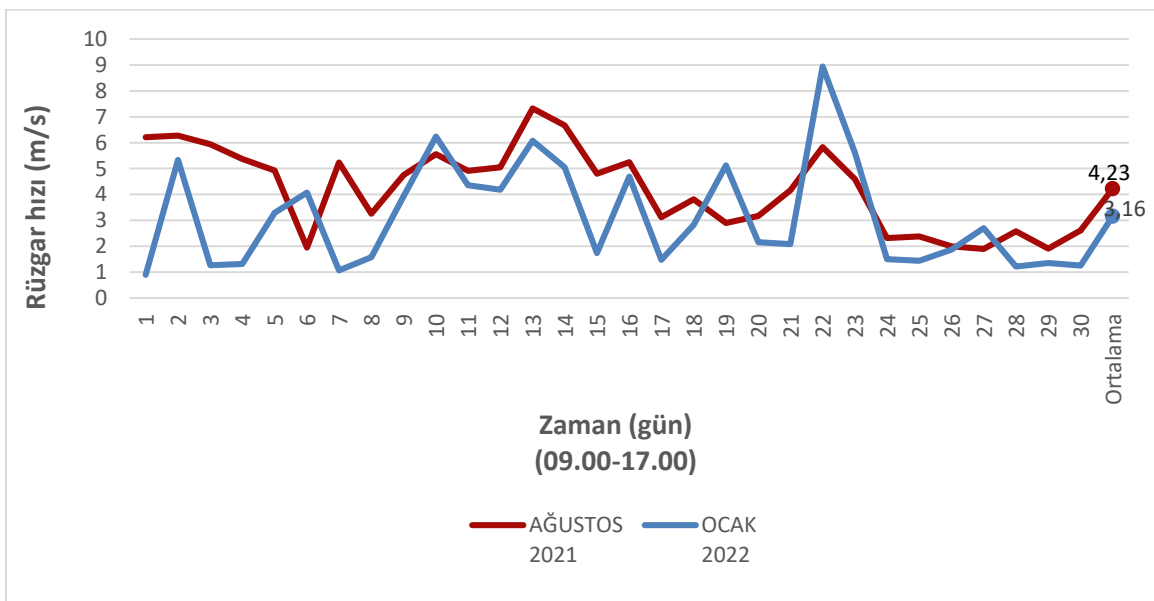
Şekil 5.2. Güneş ışınım şiddeti ile maksimum çıkış gücü arasındaki ilişki

Şekil 5.3'te Ağustos 2021 ve Ocak 2022 ayları için santralin günlük ortam ve FV hücre sıcaklıklarının zamanla değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, Ocak ayına göre Ağustos ayındaki günlük ortam ve FV hücre sıcaklıkları daha yüksektir. Ağustos ayındaki günlük FV hücre ve ortam sıcaklık verilerinin ortalama değerleri sırasıyla 315,57 K; 300,90 K iken Ocak ayı için bu değerler sırasıyla 280,50 K ve 272,92 K'dir. Bunun nedeni, FV hücre sıcaklığı formülüne göre şu şekilde açıklanabilir. ( $T_{cell} = T_{amb} + \frac{S_T}{800} (T_{std} - 20)$ , burada  $T_{cell}$ , FV hücrelerin sıcaklığını,  $T_{amb}$ , dış ortam sıcaklığını,  $S_T$ , güneş ışınım şiddetini ve  $T_{std}$ , standart koşullardaki FV panelin yüzey sıcaklığını göstermektedir [76].) Tüm paneller aynı olduğu için  $T_{std}$ , değeri sabittir. Bu durumda, ortam sıcaklığı ve güneş ışınım şiddeti arttıkça FV hücre sıcaklığı da artacaktır. Ocak ayına göre Ağustos ayında, ortam sıcaklığı ve güneş ışınım şiddeti verileri daha yüksek olduğundan Ocak ayına göre Ağustos ayının FV hücre sıcaklıklarının da daha yüksek olması gayet normaldir. Yüksek güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı, yüksek çalışma sıcaklığına neden olur [77]. Kısacası, ortam sıcaklıkları ve güneş ışınım şiddetleri arttıkça FV hücre sıcaklığı ve FV hücreler ile ortam sıcaklık farkı artar. Ayrıca, FV hücreler ile ortam sıcaklıkları arasındaki fark Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksektir.



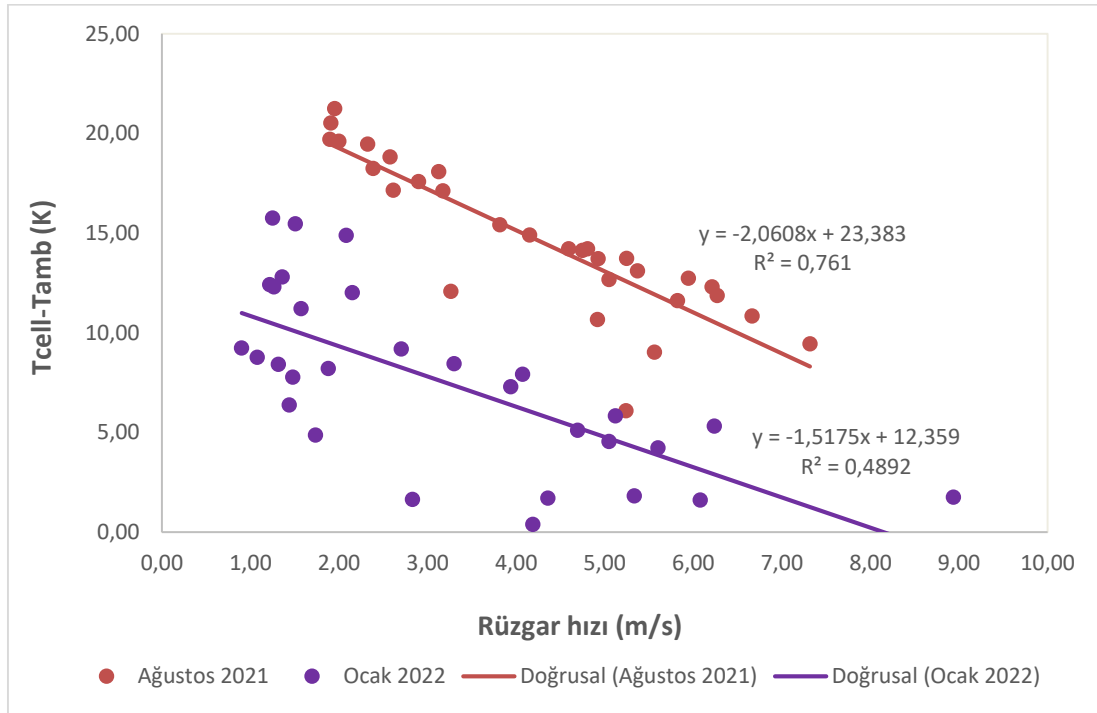
Şekil 5.3. Ortam ve hücre sıcaklıklarının iki farklı aydaki değişimi

Şekil 5.4'te Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarına ait günlük rüzgar hızı verilerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, günlük rüzgar hızı verilerinin ortalaması Ağustos ayında Ocak ayına göre daha yüksektir. En yüksek ve en düşük rüzgar hızları Ocak ayında 8,94 m/s, 0,90 m/s olarak ölçülmüştür. Eş. 4.7'ye göre, rüzgar hızı ne kadar yüksek olursa güneş hücresi ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıınım ısı transfer katsayısı da o kadar yüksek olur. Güneş enerjisi santrallerinde rüzgar hızının takibi bu nedenle çok önemlidir.



Şekil 5.4. Rüzgar hızının iki farklı aydaki değişimi

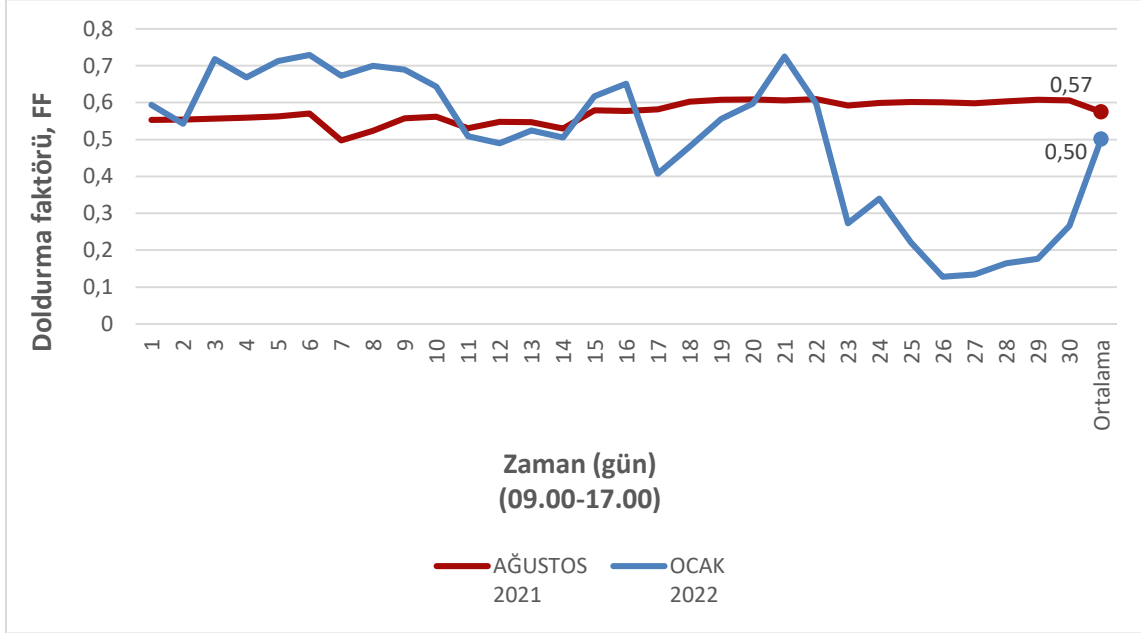
Şekil 5.5’de Ağustos 2021 ve Ocak 2022 ayları için FV hücreler ile ortam arasındaki sıcaklık farkı ve rüzgar hızının birbiriyle olan ilişkisi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, FV hücreler ile ortam sıcaklık farkının rüzgar hızıyla arasında negatif korelasyon mevcuttur. Çünkü, rüzgar hızı arttıkça güneş hücresi ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıınım ısı transfer katsayısı artar ve FV hücrelerden, ortama doğru daha çok ısı transferi olarak FV hücrelerin sıcaklığı azalır. Son olarak, Şekil 5.5’e göre belirtilen değişkenler arasındaki bu ters orantılı ilişki, sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda daha etkilidir.



Şekil 5.5. Hücre ve ortam arasındaki sıcaklık farkı ile rüzgar hızının ilişkisi

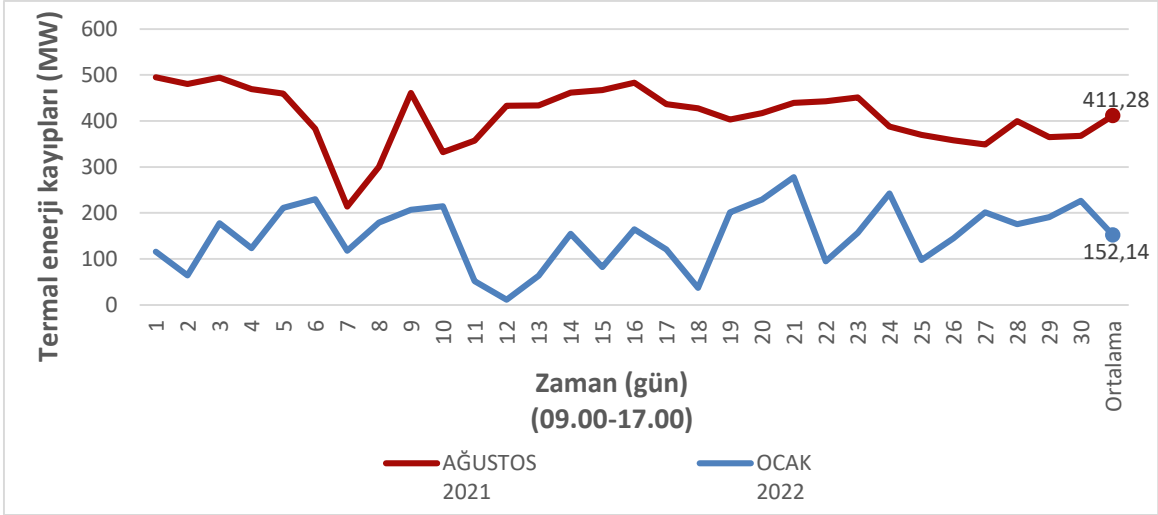
Şekil 5.6’da Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarına ait santraldeki FV panellerin doluluk faktörlerinin otuz günlük değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, FV panellerin doldurma faktörü değerleri Ocak ayına göre Ağustos ayında daha istikrarlı bir hareket göstermiştir. Ağustos ve Ocak aylarında FV panellerin doldurma faktörü değerlerinin ortalaması sırasıyla 0,50 ve 0,57 olarak hesaplanmıştır. Ocak ayında FV panellerin doldurma faktörünün ortalaması Ağustos ayına göre daha yüksek olması beklenirken Ocak ayının bazı günlerinde yaşanan olumsuz hava koşulları bu duruma engel olmuştur. Böylece, Ocak ayında FV panellerin doldurma faktörü değerleri Ağustos ayına göre daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, Ocak ayının son günlerinde doldurma faktöründe ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Bu düşüşün nedeni, daha önce de belirtildiği gibi FV panel yüzeyini

kaplayan kar ve buz gibi olumsuz hava koşullarıdır. Sonuç olarak, olumsuz hava şartları FV panellerin doluluk faktörünü olumsuz etkilemektedir.



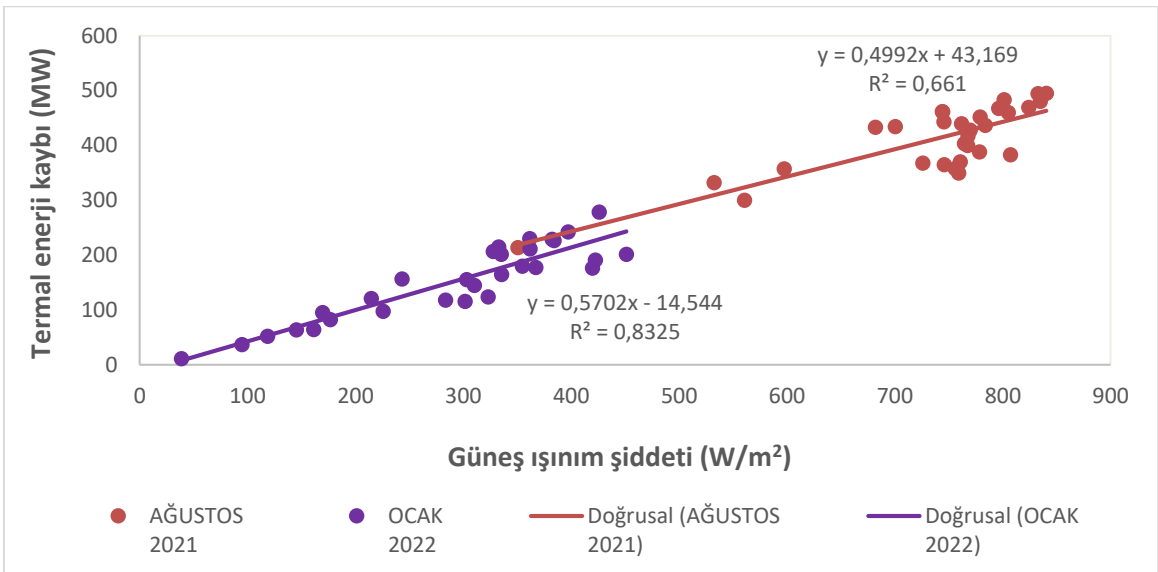
Şekil 5.6. FV panellerin doluluk faktörünün iki farklı aydaki değişimi

Şekil 5.7’de Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarındaki günlük termal enerji kaybının zamanla değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, Ağustos ayında termal enerji kaybının en yüksek değeri 494,72 MW iken en düşük değeri 213,63 MW’dır. Ocak ayında ise termal enerji kaybının en yüksek değeri 278,10 MW iken en düşük değeri 11,25 MW olarak hesaplanmıştır. Termal enerji kayıplarının Ağustos ayı ortalaması 411,28 MW iken Ocak ayı ortalaması ise 152,14 MW’dır. Sonuç olarak, Ağustos ayındaki termal enerji kayıpları Ocak ayına göre daha yüksektir. Bunun nedeni, rüzgar hızının dolayısıyla güneş hücresi ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışınlım ısı transfer katsayısının ve FV hücreler ile ortam arasındaki sıcaklık farkının Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek olmasıdır. Kısacası, FV sistemlerin sıcak ve rüzgarlı ortamlarda termal enerji kayıpları daha yüksektir. Ayrıca, Şekil 5.1 ve Şekil 5.8 birlikte incelendiğinde, güneş enerjisi santralının her iki ayda aylık termal enerjisi ortalaması, aylık maksimum çıkış gücü ortalamasından daha yüksektir. Bu santralde maksimum çıkış gücünden daha fazlası termal enerji olarak kaybedilmiştir. Bu santralde termal enerji faydalı bir iş için kullanılmadığından kayıp olarak nitelendirilmiştir.



Şekil 5.7. Termal enerji kaybının iki farklı aydaki değişimi

Şekil 5.8’de Ağustos 2021 ve Ocak 2022 ayları için termal enerji kaybının ve güneş ışınımı miktarı arasındaki ilişki regresyon incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, Ocak ayında güneş ışınım şiddeti  $38,79 \text{ W/m}^2$ ’den  $451,18 \text{ W/m}^2$  değerine doğru artarken termal enerji değeri de  $11,25$ ’ten  $278,10 \text{ MW}$  değerine doğru yükselmektedir. Ağustos ayında ise güneş ışınım şiddeti  $350,74 \text{ W/m}^2$ ’den  $840,45 \text{ W/m}^2$  değerine doğru artarken termal enerji değeri de  $213,63$ ’ten  $494,72 \text{ MW}$  değerine doğru yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bu iki değişken arasındaki bu doğru orantılı ilişkinin Ağustos ayına göre Ocak ayında daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, FV sistemlerde güneş ışınımı arttıkça termal enerji miktarı da artmaktadır.

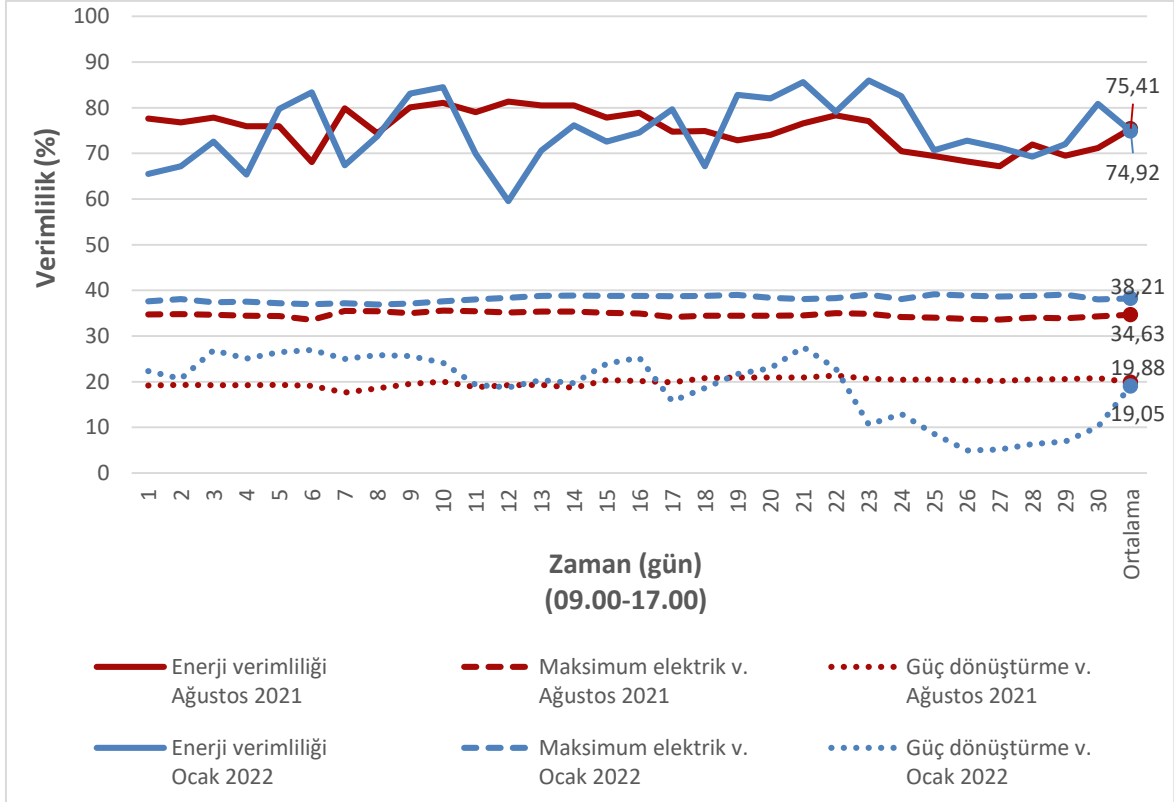


Şekil 5.8. Termal enerji kaybı ile güneş ışınımı şiddeti arasındaki ilişki

### 5.1.2. Enerji ve ekserji analizleriyle değerlendirme

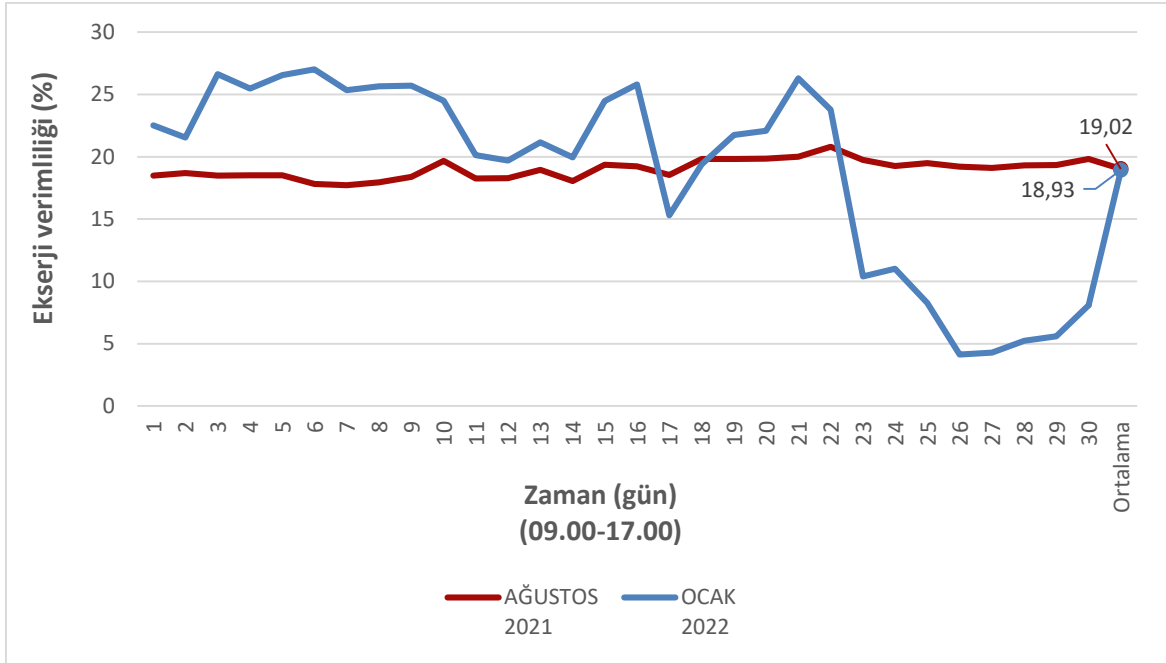
Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarına dayalı olarak Ağustos 2021 ve Ocak 2022 ayları için Konya, Karapınar iklim koşullarında FV bir sistemin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerle, FV sistemin enerji, maksimum elektrik, güç dönüştürme ve ekserji verimlilikleri hesaplanmıştır. Ayrıca, Eş. 4.8, Eş.4.9 ve Eş.4.10'a bakıldığında, FV sistemin enerji verimliliği ile maksimum elektrik verimliliği arasındaki fark termal enerji kaybına bağlıdır ve maksimum elektrik verimliliği ile güç dönüştürme verimliliği arasındaki fark ise doldurma faktörüne bağlıdır. Eş. 4.10 ve Eş. 4.24 incelendiğinde enerji verimliliği ile ekserji verimliliği arasındaki farklılığın ise bazı çevre şartlarına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.9'da Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarına ait 30 gün boyunca güneş enerji santralinin enerji, maksimum elektrik ve güç dönüştürme verimliliklerinin değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, enerji, maksimum elektrik ve güç dönüştürme verimliliklerinin aylık ortalama değerleri Ağustos ayı için sırasıyla %75,41; %34,63 ve %19,88 iken bu değerler Ocak ayı için sırasıyla %74,92; %38,21 ve %19,05'tir. Literatürdeki bir çalışma, sıcaklığın azalması ile FV panel güç dönüştürme veriminin artacağını belirtmektedir [20]. Ağustos ayına göre Ocak ayındaki ortam sıcaklığı daha yüksek olduğundan Ağustos ayına göre Ocak ayında güç dönüştürme verimliliklerin daha yüksek olması beklenmektedir. Fakat, Ocak ayının bazı günlerinde güneş panellerinin yüzeylerini kapatacak şekilde meydana gelen olumsuz hava şartları bu duruma engel olmuştur. Sonuç olarak, olumsuz hava koşulları güneş panellerinin güç dönüştürme verimliliklerini olumsuz etkilemektedir.



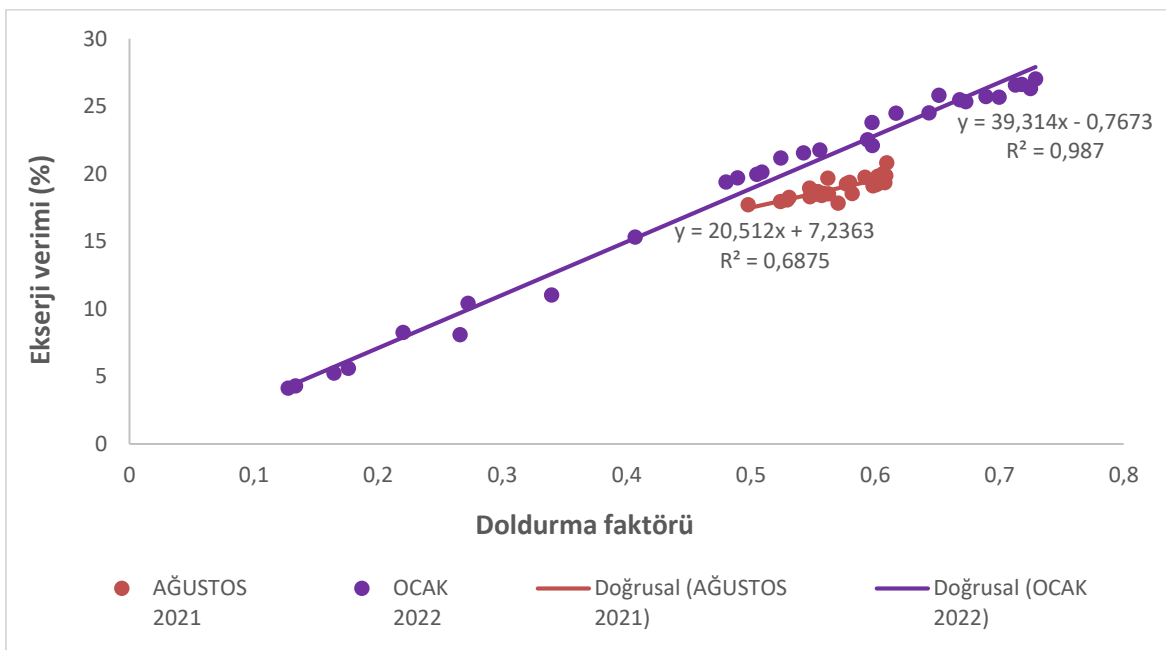
Şekil 5.9. İki farklı ayda enerji, maksimum elektrik ve güç dönüştürme verimlilikleri

Şekil 5.10'da güneş enerji santralının Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarına ait günlük ekserji verimliliklerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, Ağustos ve Ocak aylarındaki ekserji verimliliklerinin aylık ortalama değerleri sırasıyla %19,02 ve %18,93 olarak hesaplanmıştır. Ağustos ayındaki ekserji verimliliğinin aylık ortalama değeri Ocak ayına göre daha düşük olması beklenirken Ocak ayında yaşanan olumsuz hava koşulları sonrasında bu değer Ağustos ayında daha yüksek bulunmuştur. Sonuç olarak, olumsuz hava koşulları güneş panellerinin ekserji verimliliklerini olumsuz etkilemektedir. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 birlikte incelendiğinde her iki ay için güç dönüştürme verimliliklerinin aylık ortalaması, ekserji verimliliklerinin aylık ortalamasından daha yüksektir. Son olarak, doldurma faktörü, güç dönüştürme ve ekserji verimliliği grafiklerinde benzer hareketler gözlenmiştir.



Şekil 5.10. İki farklı aydaki ekserji verimlilikleri

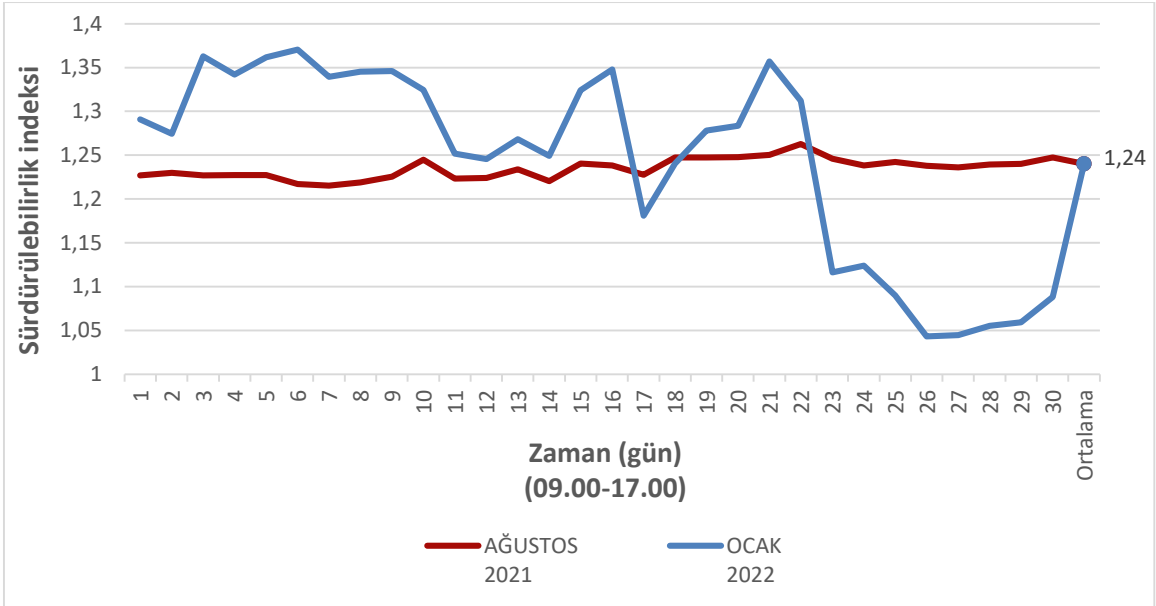
Şekil 5.11’de 2021 yılı Ağustos ve 2022 yılı Ocak aylarının doldurma faktörü ile ekserji verimliliği arasındaki ilişki regresyon analizi metodu kullanılarak incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, iki değişken arasında her iki ayda da pozitif korelasyon tespit edilmiştir. Doğru orantılı bu ilişkinin Ağustos ayına göre Ocak ayında daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.11. Doluluk faktörü ve ekserji verimliliği arasındaki ilişki

### 5.1.3. Sürdürülebilirlik analiz ile değerlendirme

Şekil 5.12’de güneş enerji santralinin Ağustos 2021 ve Ocak 2022 aylarında günlük sürdürülebilirlik indeksinin zamanla değişimi incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, sürdürülebilirlik indeksinin aylık ortalaması her iki ay için de aynıdır. Bunun başlıca nedeni, Ağustos ve Ocak aylarının ekserji verimlerinin birbirine yakın değerler olmasıdır. Eş. 4.26’ya baktığımızda ekserji verimliliği ne kadar yüksekse sürdürülebilirlik indeksinin de o kadar yüksek olabileceğini görebiliriz. Yine Eş. 4.26’ya göre sürdürülebilirlik indeksinin 1 rakamına yakın olması sürdürülebilirliğin daha düşük olduğunu ifade etmektedir.

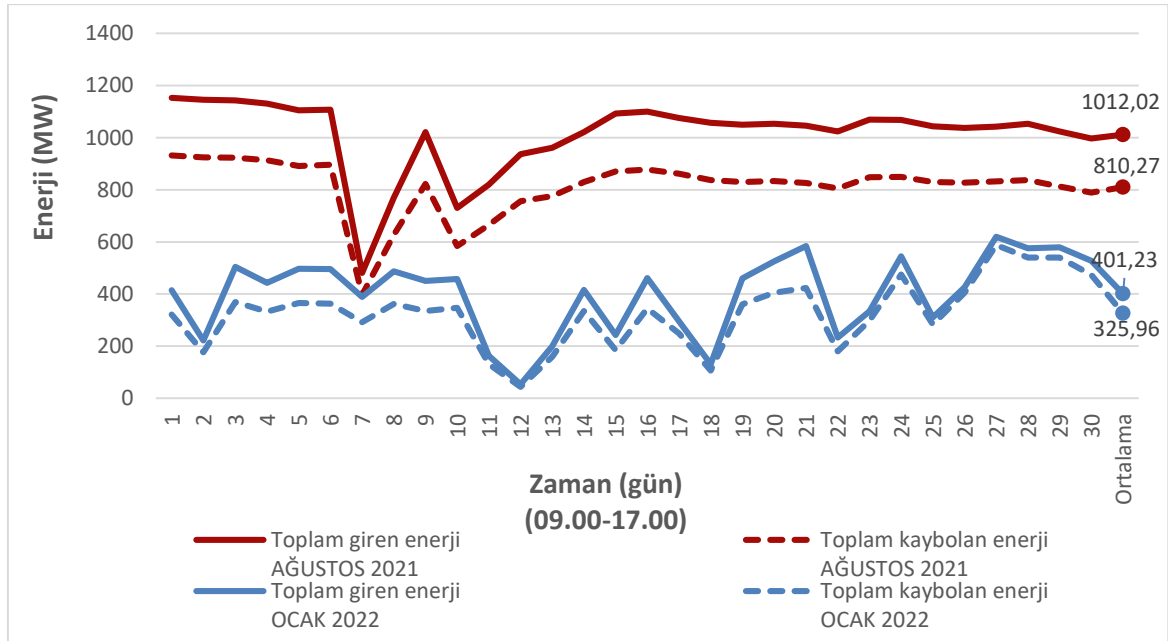


Şekil 5.12. Sürdürülebilirlik indekslerinin iki farklı aydaki değişimi

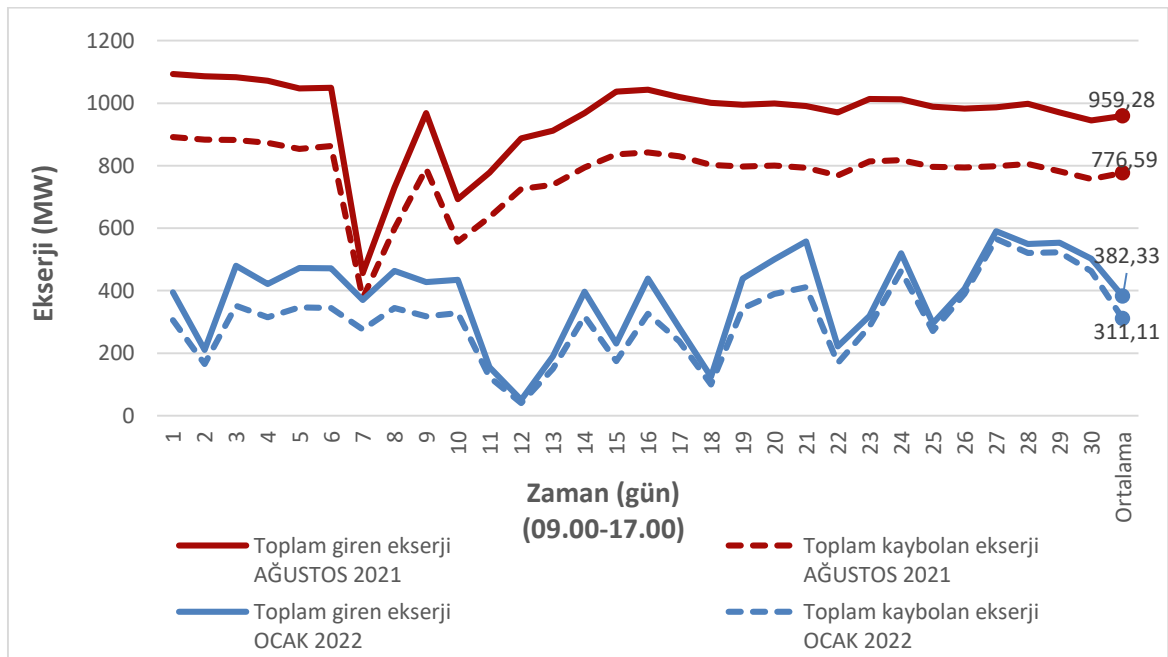
### 5.1.4. Eksergoekonomik analiz ile değerlendirme

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te santrale giren ve kaybolan toplam enerji ve ekserji miktarları günlük olarak verilmiştir. Bu şekillere göre, santrale giren ve kaybolan toplam enerji ve ekserji miktarları Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksektir. Her iki ayda da, toplam kaybolan enerji ve ekserji miktarları çok fazladır. Bu kayıplar, termal enerji, doldurma faktörlerinden kaynaklı kayıplar, kablo kayıpları ve inverter kayıpları gibi santral içerisinde oluşan kayıplardan oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 5.7 ile Şekil 5.13 birlikte incelendiğinde, toplam kayıpların büyük bir bölümünü, termal enerji kayıplarının oluşturduğu tespit edilmiştir. FV sistemleri daha verimli hale getirmek için termal enerjiyi kullanan fotovoltaik

termal (FV/T) sistemler tercih edilebilir. Diğer bir büyük kayıp da FV panellerin doldurma faktörlerinden kaynaklanmaktadır. FV panellerin doldurma faktörleri üzerinde yapılan çalışmalar ile bu kayıplar azaltılarak FV sistemlerin verimlilikleri yükseltilebilir. Diğer kayıplar (kablo kayıpları, inverter kayıpları vs.) toplam kayıpların geriye kalan küçük bir bölümünü oluşturmaktadır.

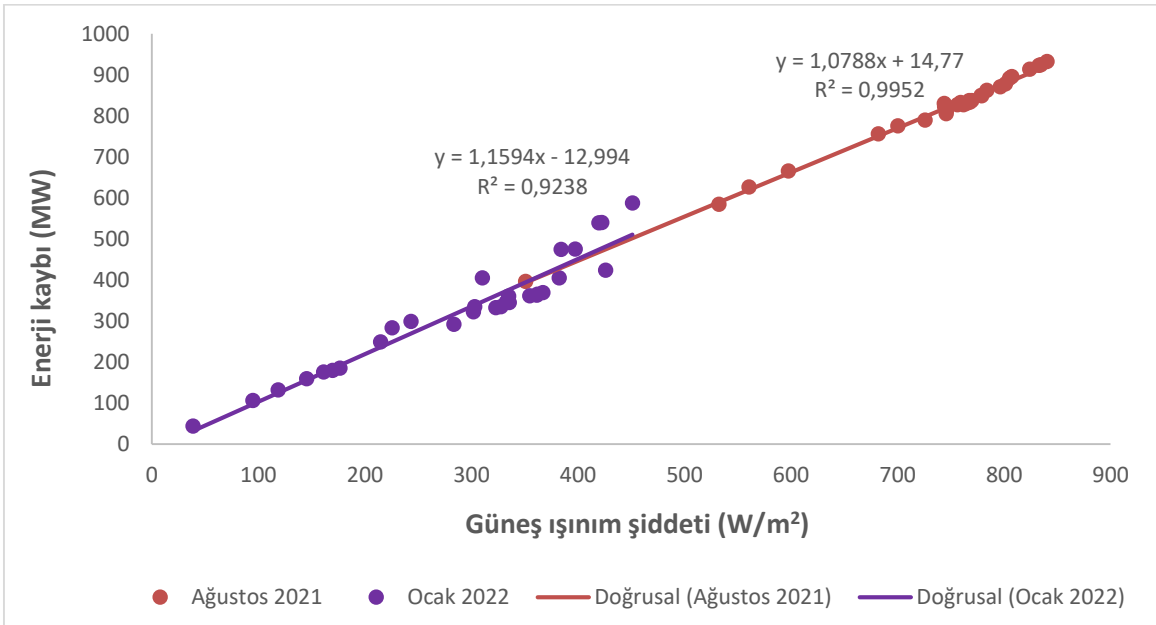


Şekil 5.13. Giren ve kaybolan toplam enerji miktarının iki farklı aydaki değişimi

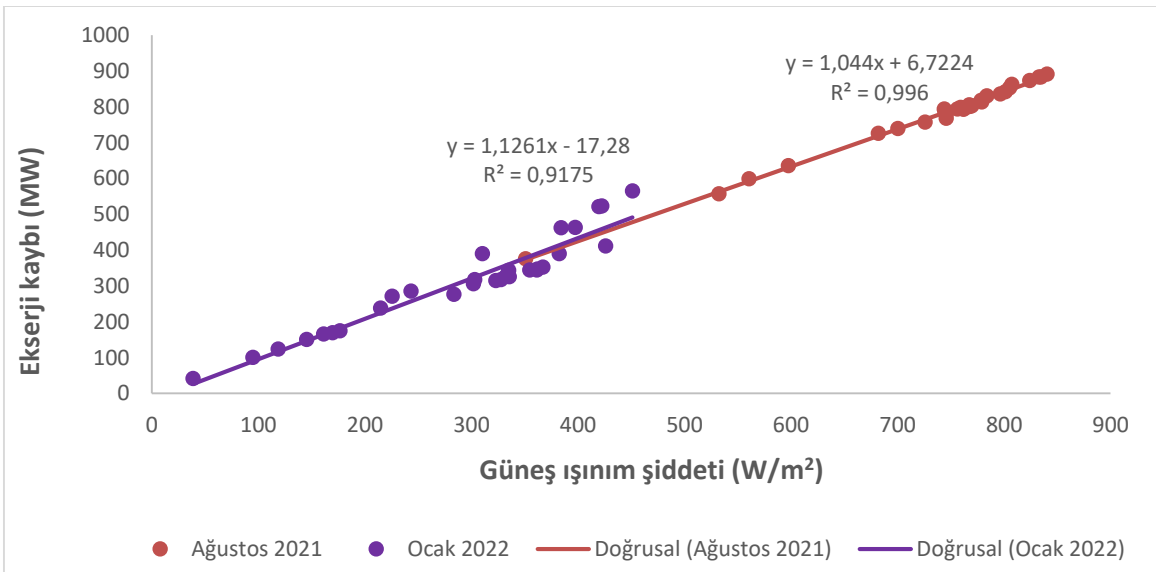


Şekil 5.14. Giren ve kaybolan toplam ekserji miktarının iki farklı aydaki değişimi

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da Ağustos 2021 ve Ocak 2022 ayları için toplam enerji, ekserji kayıpları ile güneş ışınım şiddeti arasındaki ilişki regresyon analizi metodu ile incelenmiştir. Bu şekillerde görüldüğü üzere, her iki ayda da güneş ışınım şiddeti arttıkça toplam enerji ve toplam ekserji kayıplarının arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu değişkenler arasında doğru orantılı bir ilişki mevcuttur. Fakat bu değişkenler arasındaki doğru orantılı ilişki Ocak ayına göre Ağustos ayında biraz daha etkilidir. Sonuç olarak, güneş ışınım şiddeti arttıkça toplam enerji kaybı ve toplam ekserji kaybı artmaktadır.

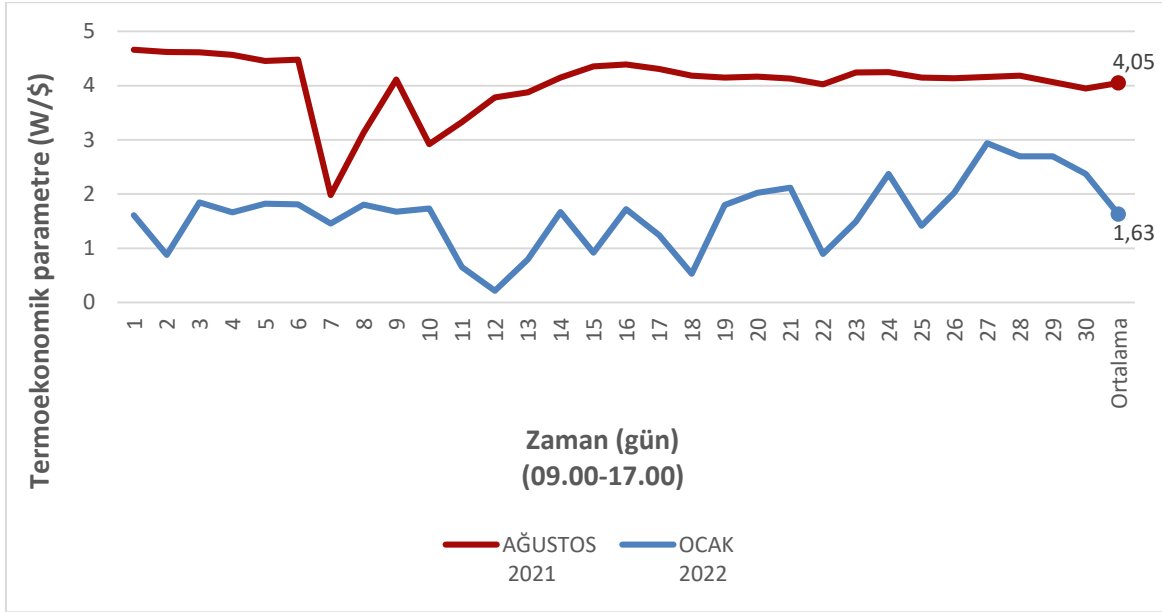


Şekil 5.15. Santraldeki enerji kaybı ve güneş ışınım şiddeti arasındaki ilişki

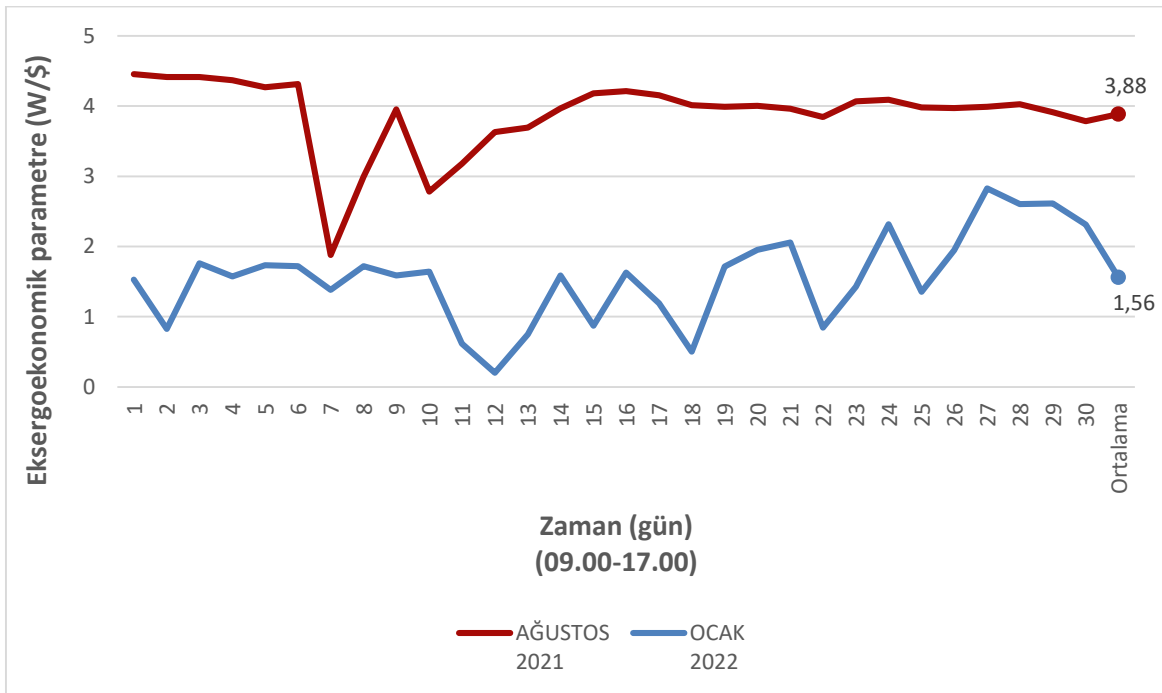


Şekil 5.16. Santraldeki ekserji kaybı ve güneş ışınım şiddeti arasındaki ilişki

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de santralin Ağustos 2021, Ocak 2022 aylarındaki termoeekonomik analiz ve eksergoekonomik analiz parametrelerinin günlük değişimi incelenmiştir. Bu şekillerde görüldüğü üzere, Ocak ayına göre Ağustos ayındaki termoeekonomik ve eksergoekonomik analiz parametreleri daha yüksek çıkmıştır. Bunun temel nedeni, Ocak ayına göre Ağustos ayındaki toplam enerji ile ekserji kayıplarının daha yüksek olmasıdır.



Şekil 5.17. Termoeekonomik analiz parametresinin iki farklı aydaki değişimi



Şekil 5.18. Eksergoekonomik analiz parametresinin iki farklı aydaki değişimi

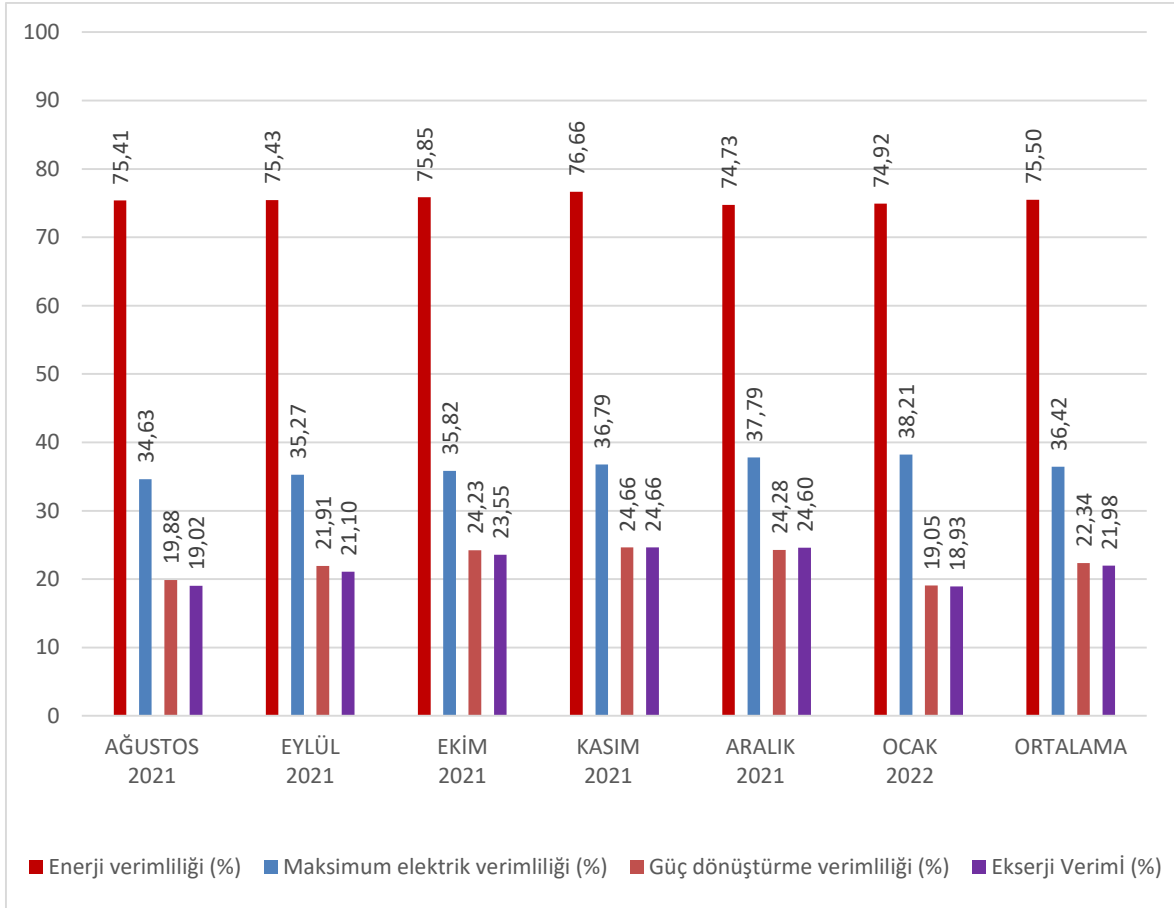
## 5.2. 6 Aylık (Ağustos 2021 – Ocak 2022) Değerlendirmeler

Bu bölümde, 2021 yılının Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları ile 2022 yılının Ocak ayında toplanan 6 aylık santral verileriyle enerji, ekserji, sürdürülebilirlik ve eksergoekonomik analizler yapılmıştır. Analizlerin gerçekleştirilebilmesi için belirtilen altı ay boyunca 09.00-17.00 saatleri arasında maksimum çıkış güç üretimi, güneş ışınım şiddeti, rüzgar hızı, FV hücre sıcaklığı ve ortam sıcaklıkları verilerinden faydalanılmıştır.

Altı aylık veriler doğrultusunda santralin albedo katsayısının ortalaması 0.15 olarak, fotovoltaik panellerin ortalama temizlik oranı ise %96.42 olarak tespit edilmiştir.

### 5.2.1. 6 aylık enerji ve ekserji analizleriyle değerlendirme

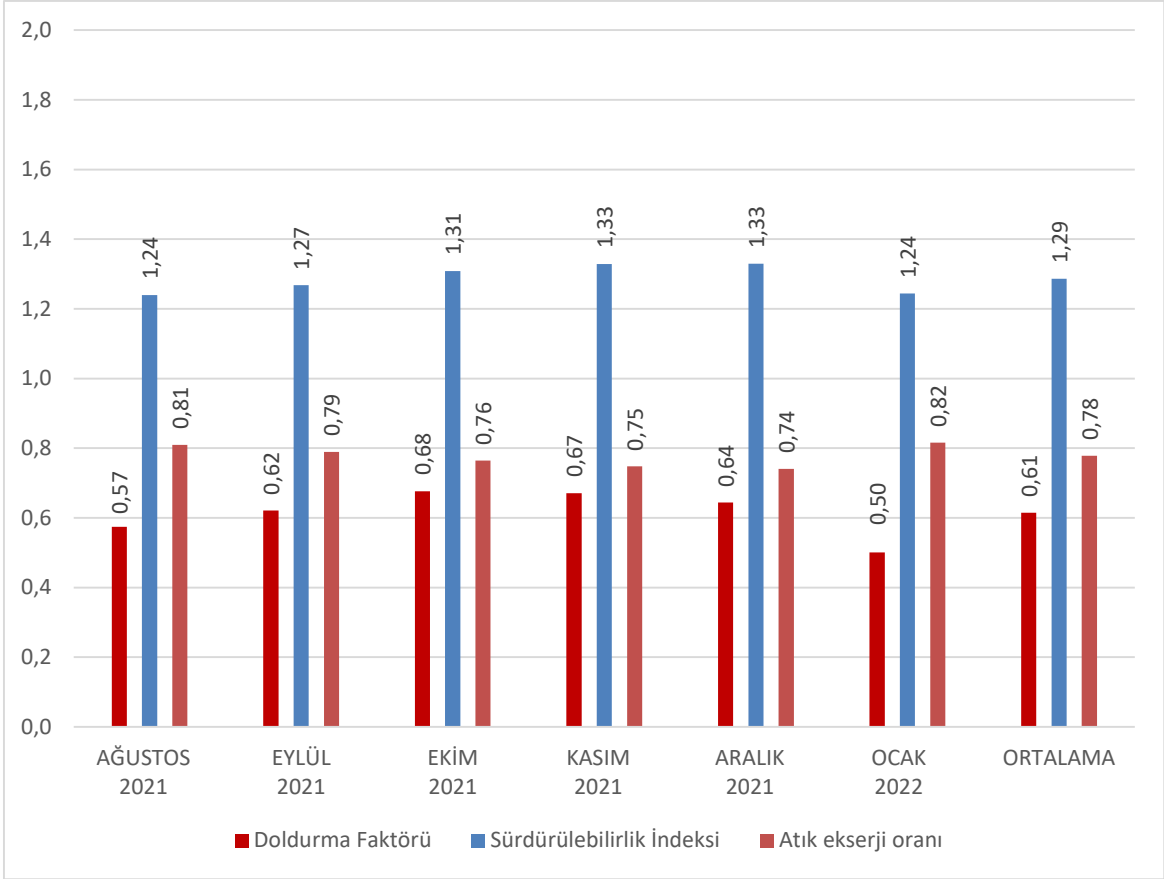
Şekil 5.19'da, 6 ay boyunca güneş enerji santralinin enerji, maksimum elektrik, güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerinin günlük verilerden elde edilen aylık ortalamaları verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, 6 aylık verilere göre santralin enerji, maksimum elektrik, güç dönüştürme ve ekserji verimlilikler ortalama değerleri sırasıyla %75,50; %36,42; %22,34 ve %21,98 olarak hesaplanmıştır. Monokristal tek yüzlü güneş panelleri %22.1'lik, monokristal çift yüzlü güneş panelleri %23.1'lik bir verim değerine ulaşabilir [78]. Brezilya'da gerçekleştirilen bir çalışma güneş takip sistemiyle birlikte kullanılan bifacial panellerin diğer sistemlere göre toplam kazancının %19.39 ile %27.39 arasında değiştiğini ispat etmiştir [79]. Şekil 5.1'de bahsedildiği üzere, Ağustos ayından Ocak ayına doğru güneş ışınım şiddetini azalmaktadır. Buna rağmen, Ağustos ayından Ocak ayına doğru güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerinde artış gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, Ağustos ayından Ocak ayına doğru ortam sıcaklığının azalması ve yeterli miktarda güneş ışınımıdır. Sonuç olarak güneş panelleri güneş ışınım şiddetinin yeterli olduğu soğuk ortamlarda daha verimli çalışırlar. Ayrıca, Kandilli, C. [80] monofacial FV sistemlerin ekserji verimlerini yaklaşık %12 olarak tespit etmiştir. Bayat ve Özalp, [25] Karabük ilinde monofacial güneş panellerinden oluşan bir FV sistemin enerji, maksimum elektrik, güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerinin sırasıyla %24 ile %68.4, %12.6 ile %23.12, %9.6 ile %18.3, %9.3 ile %18.1 arasında değiştiğini bulmuştur. Palaez, vd., [81] tek eksenli güneş takip sistemleriyle kullanılan bifacial güneş panellerinin modül türüne ve yerin albedo katsayısına bağlı olarak %4 ile %15 arasında enerji verimini arttırdığını göstermişlerdir.



Şekil 5.19. 6 aylık enerji, maksimum elektrik, güç dönüştürme, ekserji verimliliği

### 5.2.2. 6 aylık sürdürülebilirlik analiz ile değerlendirme

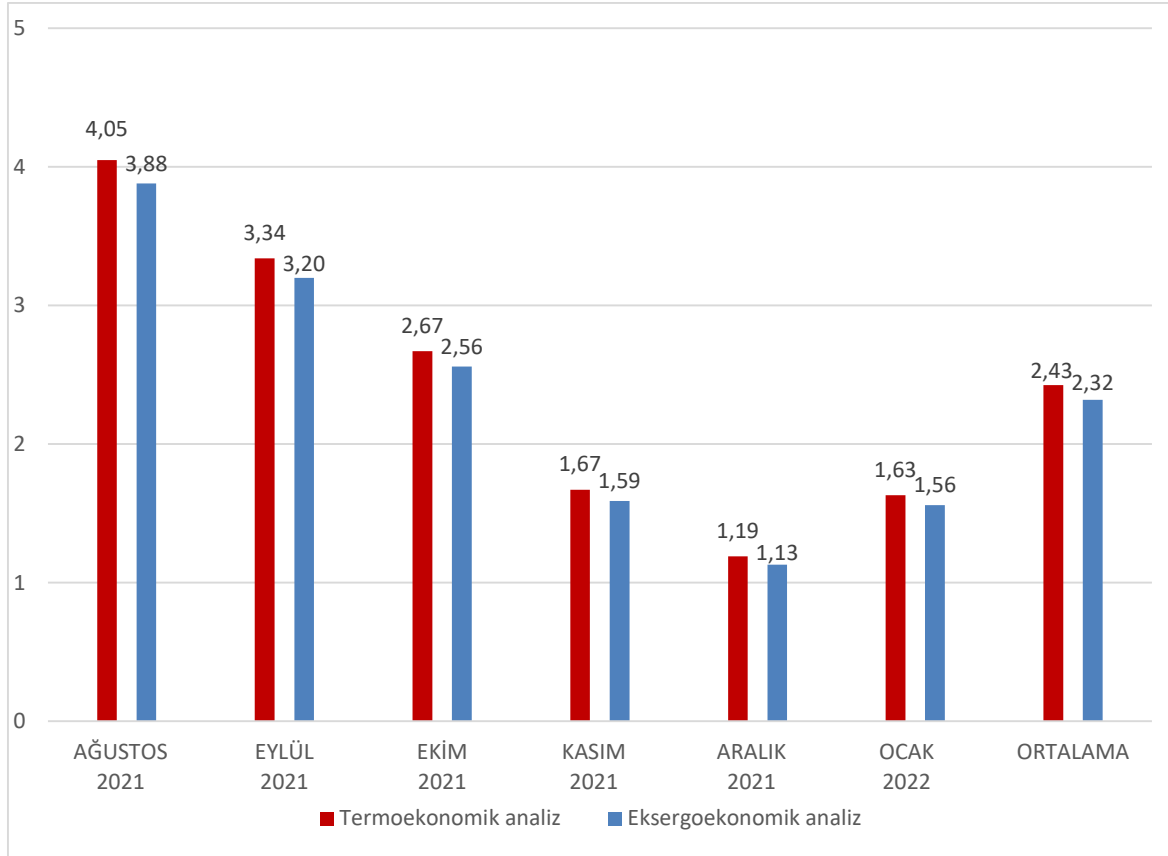
Şekil 5.20'de, 6 ay boyunca güneş enerji santralının doldurma faktörünün, sürdürülebilirlik indeksinin ve atık ekserji oranının günlük verilerden elde edilen aylık ortalamaları verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, 6 aylık veriler doğrultusunda FV modüllerin doldurma faktörünün, FV sistemin sürdürülebilirlik indeksinin ve FV sistemin atık ekserji oranının ortalama değerleri sırasıyla 0,61; 1,29 ve 0,78 olarak tespit edilmiştir. Ağustos ayından Ocak ayına doğru ekserji verimliliği arttığından, Ağustos ayından Ocak ayına doğru sürdürülebilirlik indeksi değerleri yükselmiş, atık ekserji oranı ise düşmüştür. Ocak ayında yaşanan olumsuz hava şartları (kar vs.) FV panellerin doldurma faktörünü, FV sistemin sürdürülebilirlik indeksini ve FV sistemin atık ekserji oranını olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 5.20. 6 aylık doldurma faktörü, sürdürülebilirlik indeksi, atık ekserji oranı

### 5.2.3. 6 aylık eksergoekonomik analiz ile değerlendirme

Şekil 5.21’de, 6 ay boyunca güneş enerji santralının termoekonomik ve eksergoekonomik analiz parametrelerinin günlük verilerden oluşturulan aylık ortalamaları verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, 6 aylık verilerin doğrultusunda termoekonomik ve eksergoekonomik analiz parametre değerlerinin ortalamaları sırasıyla 2,43 W/\$ ve 2,32 W/\$ olarak bulunmuştur. Karabük üniversitesindeki tek yüzlü küçük bir güneş enerji sistemi üzerinde yapılan bir çalışma, bu sistemin termoekonomik analiz parametresini 0.06 ile 0.45 W/\$ arasında, eksergoekonomik analiz parametresini ise 0.05 ile 0.43 W/\$ arasında değiştiğini göstermektedir [25]. İstanbul’da 750 Wp değerinde tek yüzlü FV bir sisteminin EXCEM modeline göre Ağustos ve Nisan ayları için termoekonomik analiz parametre değeri sırasıyla 0.222 W/\$, 0.134 W/\$ olarak, eksergoekonomik analiz parametre değeri ise sırasıyla 0.214 W/\$, 0.129 W/\$ olarak bulunmuştur [82]. Ayrıca Şekil 5.19 ve Şekil 5.21 birlikte incelendiğinde güç dönüştürme ve ekserji verimlilikleri arttıkça termoekonomik ile eksergoekonomik analiz parametrelerinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. 6 aylık termoeekonomik ve eksergoekonomik analiz parametreleri



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yarı-kesim teknolojisiyle üretilmiş, monokristal ve çift yüzlü güneş panellerinden oluşan tek eksenli güneş takip sistemli bir güneş enerji santrali incelenmiştir. Konya, Karapınar'da bulunan ve şebekeye bağlı bu güneş enerji santralinde güneş ışınım şiddeti ile ortam sıcaklık verilerinin yüksek ve düşük olduğu iki farklı ay (Ağustos 2021 ile Ocak 2022) için karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, altı ay boyunca santral için enerji, ekserji, sürdürülebilirlik, termoekonomik ve eksergoekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler neticesinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- Güneş enerjisi santralinde, güneş ışınım şiddetinin ve güneş panellerinden üretilen maksimum çıkış gücünün Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, olumsuz hava şartlarının (kar, yağmur, bulutlanma vs.) güneş ışınım şiddeti ve maksimum çıkış gücü üzerinde olumsuz etkisi olduğu tespit edilmiştir.
- Güneş enerjisi santralinin Ağustos ve Ocak aylarındaki ortalama albedo katsayıları sırasıyla 0.1145 ve 0.2349 olarak bulunmuştur. Ocak ayının bazı günlerinde gerçekleşen kar yağışları sonrası ortam kar ile kaplanmış ve albedo katsayısı artmıştır. Ayrıca, Ağustos ve Ocak aylarının FV modül yüzeylerinin temizlik oranlarının ortalamaları sırasıyla % 97.83 ve % 90.32 olarak ölçülmüştür. Kar yağışları sonrası FV modüllerin yüzeyleri kar ile kapandığından ortalama FV modül temizlik oranı Ağustos ayına göre Ocak ayında daha düşüktür.
- Güneş ışınım şiddeti ile FV modüllerden üretilen maksimum çıkış gücü arasında doğru orantılı bir ilişki mevcuttur. Ancak, Ocak ayına göre Ağustos ayında güneş ışınım şiddeti arttıkça maksimum çıkış gücünün de artması daha yüksek ihtimaldir.
- Güneş enerjisi santralinin ortam sıcaklığı ve FV hücre sıcaklığı Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek ölçülmüştür. Ortam sıcaklığı ile güneş ışınım şiddeti arttıkça, FV hücre sıcaklığının arttığı ve FV hücre ile ortam sıcaklıkları arasındaki farkında büyüdüğü tespit edilmiştir.
- Güneş enerjisi santralinin ortalama rüzgar hızı Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek bulunmuştur. Rüzgar hızı arttıkça, FV hücre ile ortam arasındaki sıcaklık farkının azaldığı tespit edilmiştir. Bu ters orantılı ilişkinin, sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda daha etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Güneş enerjisi santralinde bulunan FV modüllerin doldurma faktörleri Ocak ayına göre

Ağustos ayında daha yüksek hesaplanmıştır. Ocak ayının bazı günlerinde gerçekleşen olumsuz hava şartları, Ocak ayının ortalama doluluk faktörü değerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

- Güneş enerjisi santralının termal enerji kaybının ortalaması Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek bulunmuştur. Santralin termal enerji kayıplarının soğuk ortamlara göre sıcak ortamlarda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Güneş ışınım şiddeti ile termal enerji kayıpları arasında doğru orantılı bir ilişki tespit edilmiştir. Doğru orantılı bu ilişkinin sıcak ortamlara göre soğuk ortamlarda daha etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Santralin enerji verimliliği Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek iken maksimum elektrik verimliliği ise Ağustos ayına göre Ocak ayında daha yüksek bulunmuştur.
- Santralin güç dönüştürme ve ekserji verimliliğinin Ağustos ayına göre Ocak ayında daha yüksek olması beklenirken tam tersi bir durum tespit edilmiştir. Bunun nedeni, Ocak ayında meydana gelen olumsuz hava koşullarıdır. Olumsuz hava koşulları FV sistemlerin güç dönüştürme ve ekserji verimliliklerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.
- Güneş enerjisi santralının doldurma faktörü, güç dönüştürme verimliliği ve ekserji verimliliği benzer grafikler oluşturduğu gözlemlenmiştir.
- Santralin ekserji verimi ile FV modüllerin doluluk faktörü arasında doğru orantılı bir ilişki tespit edilmiştir. Doğru orantılı bu ilişkinin Ağustos ayına göre Ocak ayında daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.
- Güneş enerjisi santralının Ağustos ve Ocak aylarındaki sürdürülebilirlik indekslerinin ortalama değerleri birbirine eşit çıkmıştır. Ocak ayının bazı günlerinde meydana gelen olumsuz hava koşulları Ocak ayının ekserji verimliliğinin ortalamasını düşürdüğünden Ocak ayının sürdürülebilirlik indeksinin ortalaması da düşmüştür.
- Güneş enerjisi santraline giren ve kaybolan toplam enerji ve ekserji miktarları Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksektir. Bununla birlikte her iki ayda da kaybolan enerji miktarı üretilen enerji miktarından yüksektir. FV sistemlerin kayıplarının azaltılması üzere yapılacak çalışmalar ile bu sistemlerin daha verimli hale gelebileceği düşünülmektedir.
- Güneş ışınım şiddeti ile toplam enerji ve toplam ekserji kayıpları arasında doğru orantılı bir ilişki tespit edilmiştir.
- Güneş enerjisi santralının termoekonomik ve eksergoekonomik analiz parametre değerleri Ocak ayına göre Ağustos ayında daha yüksek bulunmuştur. Soğuk ortamlara

göre sıcak ortamlarda termoekonomik ve eksergoekonomik analiz parametreleri daha yüksektir.

- Güneş enerjisi santralinde termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanarak 6 ay süreyle gerçekleştirilen enerji ve ekserji analizleri sonucunda santralin enerji verimliliği, maksimum elektrik verimliliği, güç dönüştürme verimliliği ve ekserji verimliliği ortalamaları sırasıyla %75,50; %36,42; %22,34 ve %21,98 olarak bulunmuştur.
- Altı aylık veriler doğrultusunda güneş enerjisi santralinde FV modül temizlik oranı, albedo katsıyı, doldurma faktörü, sürdürülebilirlik indeksi ve atık ekserji oranı ortalamaları sırasıyla %96,42; 0,15; 0,61; 1,29 ve 0,78 olarak tespit edilmiştir.
- Güneş enerjisi santralinde EXCEM yöntemi kullanılarak termoekonomik ve eksergoekonomik parametre değerleri W/\$ cinsinden hesaplanmıştır. Santralin 6 aylık verileriyle termoekonomik ve eksergoekonomik parametre değerlerinin ortalaması sırasıyla 2,43 W/\$ ve 2,32 W/\$ olarak bulunmuştur.
- Çift yüzlü (bifacial) FV modüllerden oluşan çift eksenli güneş takip sistemlerin verimliliklerinin gözlenmesi gerektiği düşünülmektedir.
- Santralin ekserji verimliliği, güç dönüştürme verimliliğinden daha düşük bulunmuştur. Ekserji verimliliği hesaplamalarında çevre şartları dikkate alınmaktadır. Bu nedenle ekserji analizleri bizi gerçeğe bir adım daha yakınlaştırır.



## KAYNAKLAR

1. El Chaar, L. and El Zein, N. (2011, June). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2166.
2. Bosio, A. Pasini, S., and Romeo, N. (2020, April). The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. *Coatings*, 10(4), 2.
3. Haselhuhn, R. and Hemmerle, C. (2012). *Fotovoltaik Sistemler* (Birinci Baskı) (çev. Dilman Sprachdienste UG, Honnover/Almanya). İstanbul: Çataklı Enerji Eğitim Yayıncılık Danışmanlık ve Tic. Ltd. Şti. (Eserin orijinali 2010'da yayımlandı), 1.bölüm 14-16, 2.bölüm 15,20.
4. Goetzberger, A. and Hebling, C. (2000, April). Photovoltaic materials, past, present, future. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62(1-2), 4.
5. Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N. and De Melo Cunha, J. P. (2022, March). A photovoltaic technology review: history, fundamentals and applications. *Energies*, 15(5), 2,3.
6. Lincot, D. (2017, September-October). The new paradigm of photovoltaics: From powering satellites to powering humanity. *Comptes Rendus Physique*, 18(7-8), 383.
7. Mints, P. (2012). The history and future of incentives and the photovoltaic industry and how demand is driven. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(6), 711.
8. Chen, Y., Chen, D., Altermatt, P. P., Zhang, S., Wang, L., Zhang, X., Xu, L., Feng, Z., Shen, H. and Verlinden, P. J. (2022, September). Technology evolution of the photovoltaic industry: Learning from history and recent progress. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2.
9. Sahin, A. D., Dincer, I. and Rosen, M. A. (2007, January). Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(2-3), 153-159.
10. Joshi, A. S., Dincer, I. and Reddy, B. V. (2009, August). Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83(8), 1139-1149, 1141.
11. Joshi, A. S., Dincer, I. and Reddy, B. V. (2009, October). Performance analysis of photovoltaic systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1884-1897.
12. Akkaya, Y. E. (2011). *Rüzgar ve Güneş enerjisi sistemlerinin eksergoekonomik analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
13. Saloux, E., Teysedou, A. and Sorin, M. (2013, December). Analysis of photovoltaic (PV) and photovoltaic/thermal (PV/T) systems using the exergy method. *Energy and Buildings*, 67, 275-285.

14. Izgi, E. and Akkaya, Y. E. (2013, April). Exergoeconomic analysis of a solar photovoltaic system in Istanbul, Turkey. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21(2), 350-359.
15. Pandey, A. K., Tyagi, V. V. and Tyagi, S. K. (2013). Exergetic analysis and parametric study of multi-crystalline solar photovoltaic system at a typical climatic zone. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 333-343.
16. Aoun, N., Nahman, B. and Chenni, R. (2014). Study of Experimental Energy and Exergy of mono-crystalline PV Panel in Adrar Region, Algeria. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(10), 585-589.
17. Sudhakar, K. and Srivastava, T. (2014). Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*, 35(1), 51-57.
18. Gaur, A. and Tiwari, G. N. (2014). Exergoeconomic and enviroeconomic analysis of photovoltaic modules of different solar cells. *Journal of Solar Energy*, 2014, 1-8.
19. Pandey, A. K., Pant, P. C., Sastry, O. S., Kumar, A. and Tyagi, S. K. (2015). Energy and exergy performance evaluation of a typical solar photovoltaic module. *Thermal Science*, 19(suppl. 2), 625-636.
20. Bayat, M. (2016). *Slikon tabanlı polikristal bir güneş panelinin Karabük iklim koşullarında enerji ve ekserji analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-123, 62-63, 61.
21. Bayrak, F., Ertürk, G. and Oztop, H. F. (2017, October). Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 164, 58-69.
22. Atlı, Y. B. (2017). *Binaya birleştirilmiş bir fotovoltaiik sistemin performansının dinamik ekserjisi ve eksergoekonomik analiz yöntemleriyle değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
23. Bayrak, F., Abu-Hamdeh, N., Alnefaie, K. A. and Öztop, H. F. (2017, July). A review on exergy analysis of solar electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 755-770.
24. Sukumaran, S. and Sudhakar, K. (2018, April). Performance analysis of solar powered airport based on energy and exergy analysis. *Energy*, 149, 1000-1009.
25. Bayat, M. and Ozalp, M (2018). Energy, Exergy and Exergoeconomic Analysis of a solar Photovoltaic Module. In Dincer İ., Ozgur Colpan C. and Kizilkan O. (Eds.), *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*. Cambridge: Academic Press, 383-402.
26. Bayrak, F., Oztop, H. F. and Selimefendigil, F. (2019, August). Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Solar Energy*, 188, 484-494.

27. Ekinci, G. (2019). *PV sistemlerin yaşam döngüsü, enerji ve ekserji analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
28. Kumar, M., Chandel, S. S. and Kumar, A. (2020, August). Performance analysis of a 10 MWp utility scale grid-connected canal-top photovoltaic power plant under Indian climatic conditions. *Energy*, 204, 1-13.
29. Sreenath, S., Sudhakar, K. and Yusop, A. F. (2021, October). Energy-exergy-economic-environmental-energo-exergo-enviroecono (7E) analysis of solar photovoltaic power plant: A case study of 7 airport sites in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 1-18.
30. Pour Rahmatı Khalejan, S. H. (2022). *Şebekeye bağlı bir fotovoltaiik tesisin termodinamik, enerji ve ekserji analizi*, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun, 1-58, 33.
31. Manjunath, C., Reddy, J., Reddy, K. S. R., Kumar, I. G. and Sanketh, S. (2022). Energy, exergy performance and analysis of 50w solar photovoltaic module. *Materials Today: Proceedings*, 54, 531-536.
32. Özselçuk, A. (2022). *Bir fotovoltaiik sistemin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
33. Kuczynski, W. and Chliszcz, K. (2023, March). Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113138.
34. Parida, B., Iniyani, S. and Goic, R. (2011, April). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625.
35. Kanneboina, V. (2022, September). Detailed review on c-Si/a-Si:H heterojunction solar cells in perspective of experimental and simulation. *Microelectronic Engineering*, 265, 5, 10.
36. Ogbomo, O. O., Amalu, E. H., Ekere, N. N. and Olagbegi, P.O. (2017, August). A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1227-1229.
37. Olaleru, S. A., Kirui, J. K., Wamwangi, D., Roro, K.T. and Mwakikunga, B. (2020, January). Perovskite solar cells: The new epoch in photovoltaics. *Solar Energy*, 196, 296, 297.
38. Rathore, N., Panwar, N. L., Yettou, F. and Gama, A. (2021). A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), 1203, 1205.
39. Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., Artegiani, E. and Romeo, A. (2020, May). Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, 110, 1-3, 8.

40. Sun, H., Huang, J., Young, T. L., Cong, J., Li, J., Sun, K., Yan, C., Soufiani, A. M., Cui, X., Nielsen, M. P., Zhang, X., Stride, J. A., Green, M. A. and Hao, X. (2022, July). Defect Engineering for Efficient  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}_4$  Solar Cells via Moisture-Assisted Post-Deposition Annealing. *Advanced Optical Materials*, 10(18), 1.
41. Tan, J. and Anderson, W. A. (2003, May). Current transport in copper indium gallium diselenide solar cells comparing mesa diodes to the full cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 77(3), 283,284.
42. Chelvanathan, P., Hossain, M. I. and Amin, N. (2010, May). Performance analysis of copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells with various buffer by scaps. *Current Applied Physics*, 10(3), 387.
43. Kumar, M., Hailot, D. and Gibout, S. (2022, January). Survey and evaluation of solar technologies for agricultural greenhouse application. *Solar Energy*, 232, 23.
44. Bagher, A. M., Vahid, M. M. A. and Mohsen, M. (2015, August). Types of solar cells and application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 100, 108.
45. Fraunhofer, I. S. E. (2023, 21 February). Photovoltaics report. *Freiburg*, 29, 47.
46. Sampaio, R. G. V. and Gonzalez, M. O. A. (2017, July). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 592, 593.
47. Qi, X., Wang, J., Królczyk, G., Gardoni, P. and Li, Z. (2022, June). Sustainability analysis of a hybrid renewable power system with battery storage for islands application. *Journal of Energy Storage*, 50(104682), 2.
48. Franklin, E. (2018, May). Solar photovoltaic (PV) system components. *The University of Arizona Cooperative Extension*. Arizona, no. May, 2, 4.
49. Jia, X., Zhou, C., Tang, T. and Wang, W. (2021, August). Life cycle assessment on PERC solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 227(2021), 2.
50. Shukir, S. S. (2021, Semtemper-December). Half-Cut Cell Solar Panels to Reduce Effect of High Temperature and Shadow on the Productivity of Solar Panels. *Journal of Alternative and Renewable Energy Sources*, 7(3), 28,29.
51. Ayoub, J., Rammal, R., Assi, A. and Assi, I. (2017). *Two Techniques Used to Improve the Efficiency of Existing PV Panels: Thermal Management & PERC Technology*. 29th International Conference on Microelectronics (ICM), Beirut, Lebanon. 2017, 2.
52. Zhang, D., Wang, L., Jia, R., Tao, K., Jiang, S., Ge, H., Wang, B., Gao, Z., Li, X., Li, M. and Jin Z. (2022, February). Improving the Performance of PERC Silicon Solar Cells by Optimizing the Surface Inverted Pyramid Structure on Large-area Mono-crystalline Silicon Wafers. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 138(2022), 1.
53. Archer, M. D. and Green, M. A. (2001). *Clean Electricity from Photovoltaics* (2. Edition). London: Imperial College Press, 591.

54. Vega-Garita, V., Hanif, A., Narayan, N., Ramirez-Elizondo, L. and Bauer, P. (2019, October). Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module. *Journal of Power Sources*, 438, 1,2.
55. Zhu, Y., Liu, J. and Yang, X. (2020, April). Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. *Applied Energy*, 264, 1,4.
56. Khadidja, B., Dris, K., Boubeker, A. and Noureddine, S. (2014). Optimisation of a solar tracker system for photovoltaic power plants in Saharian region, example of Ouargla. *Energy Procedia*, 50, 613.
57. Seme, S., Štumberger, B., Hadžiselimović, M. and Srednešek, K. (2020, August). Solar photovoltaic tracking systems for electricity generation: A review. *Energies*, 13(16), 9.
58. Joshi, A., S., Dincer, İ. and ReddyV. (2009, October). Performance analysis of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1888, 1893.
59. Meral, M. E. and Dinçer, F. (2011, June). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2178, 2179.
60. Singh, G. K. (2013). Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, 53, 3.
61. Çengel, Y. A. and Boles, M.A. *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik* (çev. T. Derbentli). İstanbul: Literatür Yayıncılık. (Eserin orijinali 1994’de yayımlandı). 2,3.
62. Dincer, I. (2002, January). The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy*, 30(2), 140, 139.
63. Munier, N. (2005). *Introduction to sustainability*. Amsterdam: Springer, 10.
64. Hepbasli, A. and Alsuhaibani, Z. (2011, August). Exergetic and exergoeconomic aspects of wind energy systems in achieving sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2812.
65. Khanlari, A., Sözen, A., Afshari, F. and Tuncer, A. D. (2021, September). Energy-exergy and sustainability analysis of a PV-driven quadruple-flow solar drying system. *Renewable Energy*, 175, 1157.
66. Utlu, Z. and Hepbaşlı, A. (2014, September). Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 748.
67. Rosen, M. A. and Dincer, I. (2003, June). Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes. *Energy Conversion and Management*, 44(10), 1634, 1640.

68. Joshi, A. S., Dincer, I. and Reddy, B. V. (2009, August). Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83(8), 1142,1143.
69. Jeter, S. M. (1981). Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation. *Solar Energy*, 26(3), 231-236.
70. Holmberg, J., Flynn, C. and Portinari, L. (2006, April). The colours of the Sun. *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, 367(2), 450.
71. Duffie, J. A., Beckman, W. A. and Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. New York: John Wiley & Sons. 10.
72. Durak, M. (2016, Nisan). *Güneş enerjisi: Teori ve uygulama*. İstanbul: İTÜ Yayınevi. 36.
73. Rosen, M. A., Dincer, I. and Kanoglu, M. (2008, January). Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy policy*, 36(1), 135.
74. Dincer, I. and Rosen, M. A. (2012). *Exergy: energy, environment and sustainable development*. ABD: Newnes. 399.
75. Ziar, H., Sönmez, F. F., Isabella, O. and Zeman, M. (2019, December). A comprehensive albedo model for solar energy applications: Geometric spectral albedo. *Applied Energy*, 255, 1.
76. Yılandı, A. (2008). *Güneş-Hidrojenli bir sistemin kurulması ve performansının analizi*, Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 102.
77. El Hammoumi, A., Chtita, S., Motahhir, S. and El Ghzizal, A. (2022, November). Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels. *Energy Reports*, 8, 11993.
78. Karayel, G. K., Javani, N. and Dincer, I. (2022, May). Green hydrogen production potential for Turkey with solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45), 19356.
79. De Melo, K. B., da Silva, M. K., de Souza Silva, J. L., Costa, T. S. and Villalva, M. G. (2022, June). Study of energy improvement with the insertion of bifacial modules and solar trackers in photovoltaic installations in Brazil. *Renewable Energy Focus*, 41, 186.
80. Kandilli, C. (2019, February). A comparative study on the energetic-exergetic and economical performance of a photovoltaic thermal system (PVT). *Research on Engineering Structures & Materials*, 5(1), 82.
81. Pelaez, S. A., Deline, C., Greenberg, P., Stein, J. S. and Kostuk, R. K. (2019). Model and validation of single-axis tracking with bifacial PV. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3), 715.

82. Izgi, E. and Akkaya, Y. E. (2013). Exergoeconomic analysis of a solar photovoltaic system in Istanbul, Turkey. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21(2), 350.



**EKLER**

## EK-1. Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz-1 bölümünün 6 aylık verileri

Çizelge 7.1. Güneş enerjisi santralinin Ağustos 2021 verileri

AĞUSTOS (09.00-17.00)	Ortalama Maksimum Çıkış Gücü $P_{max}$ , (MW)	Ortalama Güneş Işınımı $S_T$ , (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama Rüzgar Hızı $V$ , (m/s)	Ortalama Hücre Sıcaklığı $T_{cell}$ , (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı $T_{amb}$ , (K)
01.08.2021	221.36	840.45	6.21	314.81	302.51
02.08.2021	221.07	834.81	6.27	313.64	301.79
03.08.2021	220.25	832.87	5.94	315.64	302.91
04.08.2021	217.90	824.29	5.37	317.12	304.03
05.08.2021	213.57	805.25	4.93	318.31	304.59
06.08.2021	212.02	807.32	1.95	326.11	304.86
07.08.2021	85.02	350.74	5.24	307.30	301.22
08.08.2021	142.80	560.62	3.26	307.80	295.73
09.08.2021	199.10	744.33	4.75	312.15	298.01
10.08.2021	146.12	532.39	5.56	306.26	297.24
11.08.2021	154.37	597.48	4.92	307.44	296.78
12.08.2021	180.04	682.11	5.05	310.80	298.13
13.08.2021	185.99	700.48	7.32	308.54	299.10
14.08.2021	191.04	744.08	6.67	308.54	297.71
15.08.2021	222.22	796.41	4.81	311.13	296.92
16.08.2021	221.88	801.34	5.25	312.28	298.55
18.08.2021	213.74	783.97	3.13	320.22	302.14
19.08.2021	219.28	769.86	3.82	317.25	301.84
20.08.2021	219.59	764.73	2.90	317.53	299.95
21.08.2021	220.81	767.87	3.17	317.57	300.45
22.08.2021	219.04	761.88	4.15	316.41	301.51
23.08.2021	218.35	745.62	5.82	311.83	300.23
24.08.2021	220.56	779.10	4.59	313.43	299.22
25.08.2021	218.53	778.41	2.32	320.26	300.80
26.08.2021	213.88	760.62	2.39	321.44	303.19
27.08.2021	210.44	756.11	2.00	324.34	304.73
28.08.2021	209.67	759.21	1.90	325.35	305.65
29.08.2021	216.07	767.50	2.58	321.80	302.98
30.08.2021	210.88	745.91	1.91	322.94	302.41
31.08.2021	207.02	726.04	2.61	318.97	301.82
Ortalama Değerler	201.75	737.39	4.23	315.57	300.90

EK-1. (devam) Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz 1 bölümünün 6 aylık verileri

Çizelge 7.2. Güneş enerjisi santralinin Eylül 2021 verileri

EYLÜL (09.00-17.00)	Ortalama Maksimum Çıkış Gücü $P_{max}$ , (MW)	Ortalama Güneş Işınımı $S_T$ , (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama Rüzgar Hızı V, (m/s)	Ortalama Hücre Sıcaklığı $T_{cell}$ , (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı $T_{amb}$ , (K)
01.09.2021	207.50	723.74	2.47	319.31	301.55
02.09.2021	163.28	604.18	6.01	305.94	296.68
03.09.2021	220.93	736.91	5.36	307.05	294.68
04.09.2021	220.29	734.78	3.62	310.77	294.92
05.09.2021	215.35	731.90	2.26	315.51	296.38
06.09.2021	213.86	705.19	6.27	308.14	297.50
07.09.2021	215.06	700.55	4.32	307.49	294.26
08.09.2021	211.18	695.56	2.90	311.86	295.48
09.09.2021	209.53	706.21	1.63	319.01	298.47
10.09.2021	208.82	694.53	2.48	316.19	297.76
11.09.2021	209.98	684.35	4.19	307.25	294.01
12.09.2021	202.62	682.72	1.96	315.38	295.95
13.09.2021	200.76	674.71	1.78	318.49	298.46
14.09.2021	180.75	631.69	1.65	315.96	297.11
15.09.2021	138.49	536.97	2.30	306.64	293.35
16.09.2021	107.72	423.12	4.67	296.76	289.78
17.09.2021	164.29	551.87	4.95	301.06	291.19
18.09.2021	214.61	686.05	1.44	313.87	292.99
19.09.2021	181.52	618.39	1.72	315.51	297.68
20.09.2021	191.02	635.31	1.77	318.16	298.53
21.09.2021	199.87	636.32	2.38	316.26	299.05
22.09.2021	112.32	390.46	4.93	298.32	291.40
23.09.2021	88.07	283.28	5.54	290.74	286.25
24.09.2021	172.00	573.28	4.15	298.52	286.76
25.09.2021	210.00	637.85	2.61	307.96	290.53
26.09.2021	210.84	646.38	2.41	309.81	292.11
27.09.2021	209.89	643.13	2.60	309.97	293.04
28.09.2021	204.11	626.35	2.46	310.59	293.82
29.09.2021	197.08	611.76	3.44	307.27	293.25
30.09.2021	156.41	499.04	5.17	300.13	291.17
Ortalama Değerler	187.94	623.55	3.31	309.33	294.47

EK-1. (devam) Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz 1 bölümünün 6 aylık verileri

Çizelge 7.3. Güneş enerjisi santralinin Ekim 2021 verileri

EKİM (09.00-17.00)	Ortalama Maksimum Çıkış Gücü $P_{max}$ , (MW)	Ortalama Güneş Işınımı $S_T$ , (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama Rüzgar Hızı V, (m/s)	Ortalama Hücre Sıcaklığı $T_{cell}$ , (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı $T_{amb}$ , (K)
01.10.2021	210.35	622.16	4.12	302.66	289.72
02.10.2021	200.17	601.44	2.29	306.90	289.91
03.10.2021	200.31	592.82	4.10	302.44	290.04
04.10.2021	182.78	601.50	3.94	302.92	289.88
05.10.2021	196.52	588.97	3.50	302.55	289.00
06.10.2021	201.46	591.76	3.37	301.10	287.48
07.10.2021	197.20	589.93	1.38	308.95	288.81
08.10.2021	194.44	586.68	1.26	310.59	290.58
09.10.2021	189.22	579.11	1.23	314.36	294.36
10.10.2021	185.11	571.15	1.24	314.10	295.20
11.10.2021	179.39	550.97	1.87	311.12	295.00
12.10.2021	175.51	538.85	1.61	312.48	294.96
13.10.2021	175.03	533.69	2.98	308.05	294.59
14.10.2021	174.07	535.11	2.76	306.87	291.75
15.10.2021	175.24	534.41	1.53	310.69	293.25
16.10.2021	127.29	404.33	4.47	305.02	295.30
17.10.2021	123.87	393.62	2.73	298.20	288.82
18.10.2021	131.48	404.31	2.65	298.48	288.24
19.10.2021	160.78	468.68	3.60	299.85	288.71
20.10.2021	180.03	499.61	3.47	299.03	286.95
21.10.2021	183.09	511.79	1.29	303.93	285.90
22.10.2021	180.35	519.63	1.20	306.45	288.43
23.10.2021	178.33	522.16	1.15	307.23	289.35
24.10.2021	171.16	493.20	1.14	306.53	289.21
25.10.2021	111.71	380.43	4.89	291.57	285.42
26.10.2021	156.29	461.22	2.76	293.51	282.33
27.10.2021	123.64	394.54	1.12	298.50	286.25
28.10.2021	152.08	445.47	2.60	298.69	287.48
29.10.2021	158.01	449.68	3.60	295.28	285.24
30.10.2021	158.34	449.89	1.15	300.52	284.63
Ortalama Değerler	171.11	513.90	2.50	303.95	289.56

EK-1. (devam) Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz 1 bölümünün 6 aylık verileri

Çizelge 7.4. Güneş enerjisi santralının Kasım 2021 verileri

KASIM (09.00-17.00)	Ortalama Maksimum Çıkış Gücü $P_{max}$ , (MW)	Ortalama Güneş Işınımı $S_T$ , (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama Rüzgar Hızı V, (m/s)	Ortalama Hücre Sıcaklığı $T_{cell}$ , (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı $T_{amb}$ , (K)
01.11.2021	51.31	178.02	5.85	293.79	290.13
02.11.2021	83.15	248.10	3.88	293.23	287.49
03.11.2021	121.20	355.28	1.36	300.31	288.93
04.11.2021	144.99	426.90	1.56	301.44	288.12
05.11.2021	159.10	442.63	1.09	303.35	287.46
06.11.2021	159.07	436.44	1.67	301.16	287.43
07.11.2021	157.61	436.66	2.07	299.13	286.34
08.11.2021	150.04	415.69	1.26	302.05	287.59
09.11.2021	155.36	429.10	1.27	304.55	289.30
10.11.2021	99.71	284.78	8.84	284.74	281.61
11.11.2021	129.94	347.45	4.04	284.84	277.76
12.11.2021	158.60	416.31	1.13	292.59	277.28
13.11.2021	132.75	374.21	1.21	293.19	280.38
14.11.2021	134.85	372.12	0.90	298.17	284.00
15.11.2021	137.25	377.82	1.73	296.97	284.72
16.11.2021	146.04	385.82	2.71	291.55	282.11
17.11.2021	135.00	369.40	1.02	296.02	282.54
18.11.2021	125.45	350.28	0.91	298.29	285.36
19.11.2021	97.68	302.31	4.21	288.12	282.55
20.11.2021	25.45	98.50	4.71	281.95	280.24
21.11.2021	102.58	299.20	1.81	289.46	280.72
22.11.2021	131.47	359.14	1.48	296.99	283.93
23.11.2021	77.49	243.86	3.94	292.19	286.63
24.11.2021	92.70	307.88	1.50	295.65	286.32
25.11.2021	56.04	218.61	2.28	286.32	280.84
26.11.2021	123.29	329.46	1.80	293.58	282.07
27.11.2021	24.06	95.07	5.29	286.80	285.91
28.11.2021	102.86	293.41	7.27	294.65	289.93
29.11.2021	76.15	263.12	7.79	294.95	292.02
30.11.2021	104.64	325.85	11.98	296.12	292.59
Ortalama Değerler	113.19	326.11	3.22	294.40	285.08

EK-1. (devam) Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz 1 bölümünün 6 aylık verileri

Çizelge 7.5. Güneş enerjisi santralinin Aralık 2021 verileri

ARALIK (09.00-17.00)	Ortalama Maksimum Çıkış Gücü $P_{max}$ , (MW)	Ortalama Güneş ışınımı $S_T$ , (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama Rüzgar Hızı $V$ , (m/s)	Ortalama Hücre Sıcaklığı $T_{cell}$ , (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı $T_{amb}$ , (K)
01.12.2021	109.98	291.37	2.65	286.29	279.17
02.12.2021	141.20	347.52	1.52	290.93	278.09
03.12.2021	132.15	334.45	2.24	291.40	281.19
04.12.2021	65.58	190.48	3.44	288.76	284.08
05.12.2021	127.28	325.66	2.03	292.91	283.43
06.12.2021	112.80	290.97	4.92	291.98	285.13
07.12.2021	109.37	319.33	6.66	292.93	285.47
08.12.2021	34.70	128.18	2.82	283.17	280.66
09.12.2021	126.24	324.67	2.27	292.39	282.09
10.12.2021	110.36	293.45	4.55	289.58	283.30
11.12.2021	122.37	324.69	1.42	293.31	283.32
12.12.2021	130.55	337.69	1.49	294.06	283.99
13.12.2021	68.33	205.54	1.60	287.90	282.97
14.12.2021	11.97	47.04	2.19	281.80	281.29
15.12.2021	19.95	71.09	3.32	279.97	279.05
16.12.2021	32.18	123.29	1.49	280.21	276.69
17.12.2021	19.44	72.90	4.45	274.50	273.64
18.12.2021	41.57	155.30	1.06	278.38	274.53
19.12.2021	27.54	102.73	1.63	276.94	274.43
20.12.2021	29.92	110.21	3.11	276.44	273.98
21.12.2021	75.50	246.28	1.74	279.53	273.19
22.12.2021	131.43	335.57	3.47	276.90	269.96
23.12.2021	70.76	224.01	3.79	272.07	267.77
24.12.2021	105.42	289.78	1.75	277.77	268.29
25.12.2021	130.96	333.35	2.23	281.94	272.01
26.12.2021	43.34	165.94	0.98	279.94	275.33
27.12.2021	65.19	230.75	1.48	285.05	279.05
28.12.2021	58.78	210.96	1.49	285.20	279.66
29.12.2021	124.06	329.53	3.28	289.28	280.40
30.12.2021	101.34	265.92	1.32	287.33	280.02
Ortalama Değerler	82.67	234.29	2.55	284.63	278.41

EK-1. (devam) Konya, Karapınar, YEKA-1 GES faz 1 bölümünün 6 aylık verileri

Çizelge 7.6. Güneş enerjisi santralının Ocak 2022 verileri

OCAK (09.00-17.00)	Ortalama Maksimum Çıkış Gücü $P_{max}$ , (MW)	Ortalama Güneş Işınımı $S_T$ , (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama Rüzgar Hızı V, (m/s)	Ortalama Hücre Sıcaklığı $T_{cell}$ , (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı $T_{amb}$ , (K)
01.01.2022	92.55	301.81	0.90	286.33	277.09
02.01.2022	45.78	161.30	5.33	281.38	279.58
03.01.2022	135.32	367.22	1.27	288.50	276.20
04.01.2022	111.13	323.01	1.31	287.34	278.94
05.01.2022	131.60	361.89	3.30	290.71	282.27
06.01.2022	133.72	361.50	4.07	292.73	284.81
07.01.2022	97.28	283.42	1.08	290.75	282.00
08.01.2022	125.67	354.68	1.57	293.42	282.22
09.01.2022	115.14	327.68	3.94	290.97	283.68
10.01.2022	110.48	332.96	6.24	286.70	281.38
11.01.2022	31.47	118.60	4.36	282.62	280.92
12.01.2022	10.00	38.79	4.19	278.91	278.53
13.01.2022	40.55	145.27	6.08	274.72	273.12
14.01.2022	81.70	303.18	5.05	273.87	269.33
15.01.2022	58.03	176.69	1.74	274.73	269.87
16.01.2022	116.37	335.61	4.69	274.84	269.75
17.01.2022	46.44	214.83	1.48	275.56	267.80
18.01.2022	24.30	94.98	2.83	274.48	272.85
19.01.2022	99.72	335.09	5.12	272.43	266.61
20.01.2022	120.50	382.44	2.15	278.53	266.52
21.01.2022	161.29	425.91	2.08	281.94	267.05
22.01.2022	53.32	169.64	8.94	279.29	277.54
23.01.2022	35.56	243.33	5.60	271.86	267.64
24.01.2022	70.58	397.33	1.51	281.47	266.01
25.01.2022	26.69	225.64	1.44	271.44	265.07
26.01.2022	21.11	310.33	1.88	274.23	266.02
27.01.2022	32.01	451.18	2.70	275.87	266.68
28.01.2022	36.74	419.74	1.22	274.94	262.52
29.01.2022	39.91	422.35	1.36	271.73	258.92
30.01.2022	53.28	384.11	1.25	282.57	266.82
Ortalama Değerler	75.27	292.35	3.16	280.50	272.92



*Gazili olmak ayrıcalıktır*