

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



**ENERJİ DEPOLAMALI FOTOVOLTAİK GÜNEŞ
PANELLERİNDE GÖLGELENDİRMENİN ENERJİ
VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gamze ERTÜRK
(152143102)**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Teknolojileri Programı
Programı: Termodinamik ve Isı Tekniği
Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP**

HAZİRAN-2018

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

**ENERJİ DEPOLAMALI FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİNDE
GÖLGELENDİRMENİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Gamze ERTÜRK

Yüksek Lisans Tezi

**Makine Mühendisliği Teknolojileri Programı Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP**

HAZİRAN-2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ DEPOLAMALI FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİNDE
GÖLGELENDİRMENİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gamze ERTÜRK
(152143102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Mayıs 2018
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP (F.Ü) 
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Filiz ÖZGEN (F.Ü) 
Dr. Öğr. Üyesi Fatih Bayrak (Sİ.Ü) 

HAZİRAN-2018

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince geniş bilgi birikimi ve deneyimleri ile beni yönlendiren benden yardımlarını, desteğini ve bilgisini esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP'a saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında elde edilen veriler, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Koordinasyon Birimi tarafından finanse edilmiş olup TEKF.16.23 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP'a teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım esnasında bana yardımcı olan, görüş ve önerileri ile araştırmalarımın sonuca ulaşmasında yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Fatih BAYRAK'a verdiği emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Gamze ERTÜRK

Elazığ – 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Güneş enerjisi	3
1.1.1. Güneş hücresi ve fotovoltaik etki	5
1.1.1.1. Fotovoltaik etki.....	5
1.1.1.2. Güneş hücresi	6
1.1.1.3. Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi.....	9
1.1.1.4. Fotovoltaik hücre parametreleri ve karakteristikleri.	12
1.1.1.5. Güneş hücrelerinin sınıflandırılması	13
1.1.1.6. Fotovoltaik sistemi etkileyen parametreler	18
1.1.1.7. Sıcak nokta (hot spot) ve gölgelenme etkisi	18
1.2. Enerji depolama.....	20
1.2.1. Termal enerji depolama yöntemleri.....	20
1.2.1.1. Duyulur ısı depolama.....	21
1.2.1.2. Gizli ısı depolama.....	21
1.2.1.3. Kimyasal yöntemle ısı enerji depolama	25
1.3. Tezin amacı.....	25
1.4. Literatür taraması.....	26
2. MATERYAL ve METOT	34
2.1. Deneylerde ölçüm yapılan cihazlar	39
2.2. Sistemin termodinamik analizi	43
2.2.1. Enerji analizi.....	43
2.2.2. Ekserji analizi	44
2.2.3. Fotovoltaik sistemin enerji dengesi	45
2.2.4. Fotovoltaik sistemin enerji verimliliği	46

2.2.5.	Fotovoltaik sistemin ekserji dengesi	46
2.2.6.	Fotovoltaik sistemin ekserji verimliliği	47
2.2.7.	Belirsizlik analizi	48
3.	BULGULAR VE İRDELEME	51
4.	SONUÇLAR	67
5.	ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR		70
ÖZGEÇMİŞ		76



ÖZET

Fotovoltaik paneller güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Son yıllarda fotovoltaik teknolojisi malzeme biliminin gelişmesi ile ilerleme gösterse de birçok enerji kaynağıyla karşılaştırıldığında fotovoltaik panellerin verimleri oldukça düşüktür. Fotovoltaik panellerin verimlerine etki eden birçok parametre vardır. Bunlar; güneş ışınım şiddeti, sıcaklık, gölgelenme, tozlanma, panel eğim açısı ve kablo kayıplarıdır.

Bu çalışmada ilk olarak çok kristalli (polikristal) bir fotovoltaik panel üzerine farklı pozisyonlarda ve bu pozisyonlara farklı oranlarda gölgelenmeler uygulanarak gölgesiz bir fotovoltaik panel ile gölgeli fotovoltaik panelin elektriksel performans ve termodinamik analiz karşılaştırılması yapılmıştır. Panel üzerine hücresele, yatay ve dikey pozisyonlarda farklı yüzdelerde gölgelenmeler uygulanmıştır. Hücre sıcaklıkları, dolgu faktörü, güç kayıp oranları, enerji ve ekserji verimleri gibi parametreler bütün durumlar için incelenmiştir. Gölgeleme, sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve en önemli etki sistemin yatay gölgelenmesi durumunda gözlemlenmiştir. Maksimum güç kaybı %100 gölgelenme oranında %69,92 hücresele, %66,93 dikey, %99,98 yatay gölgelendirme şeklinde hesaplanmıştır.

Fotovoltaik panel sıcaklığı, panelin elektrik enerjisi üretiminde çok önemli bir etkiye sahiptir. Fotovoltaik sistemlerin enerji kazançları, panel sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Çeşitli soğutma yöntemleri uygulanarak enerji kazançları artırılabilir. İkinci bölümde hem fotovoltaik panelleri soğutmak hem de atık ısıyı depolamak için Faz Değiştiren Madde (FDM) kullanılmıştır. FDM'li panelde gölgelenme durumlarının performansa etkisi incelenmiştir. %50 yatay ve %50 dikey gölgelenme durumları FDM'li sistemler için test edilmiştir. FDM olarak kalsiyum klorür hekzahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 32,9 °C iken FDM'siz sistemin sıcaklığı 44,85 °C, FDM'li sistemin sıcaklığı ise 40,73 °C'dir. Panelin yatay olarak gölgelenmesi durumunda maksimum güç 1,19 W iken FDM'li sistemin güç üretimi maksimum 2,83 W, dikey olarak gölgelenmesi durumunda ise maksimum güç 15,85 W iken FDM'li sistemin güç üretimi maksimum 17,65 W değerine ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Gölgeleme, Faz Değiştiren Madde (FDM), Enerji, Ekserji

SUMMARY

Effects of Partial Shading on Energy and Exergy Efficiencies for Photovoltaic Panels with Energy Storage

Photovoltaic panels are systems that convert solar energy directly into electrical energy. Photovoltaic (PV) technology has progressed with development of material science in recent years. But the efficiency of the photovoltaic panels is low. There are many parameters that affect the efficiency of photovoltaic panels. These; solar radiation, temperature, shading, dusting, angles of inclination of the panel and cable losses.

In this paper is investigated the electrical performance and thermodynamics analysis under the shading shapes and shading ratios of photovoltaics panels which have in 75 W power. Three different cases of shading effects as cell, horizontal and vertical shading at different percentage. Some panel parameters; efficiency, cell temperature, fill factor and power difference are analysed using the current voltage curves for all conditions. The shading makes important effect on energy and exergy efficiencies of the system and the most important effect is formed in case of horizontal shading. The maximum power loss was occurred at the shading rate 100% as 69.92% in cellular, 66.93% in vertical, 99.98% in horizontal shading.

The photovoltaic panel temperature has a very important effect on the production of the electric energy of the panel. The energy gains of photovoltaic systems decrease as the panel temperature increases. Energy gains can be increased by using various cooling methods. In the second part, phase change material (FDM) was used to cool both photovoltaic panels and to store waste heat. The effect of shadowing on the performance of the panel with PCM is investigated. 50% horizontal and 50% vertical shading conditions have been tested for PCM systems. Calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) was used as FDM. When the ambient temperature is 32.9°C , the temperature of the system without PCM is 44.85°C and the temperature of the system with PCM+PV is 40.73°C .

When the panel is horizontally shaded was occurred maximum power is 1.19 W while maximum power of PCM+PV system is 2.83 W and when the panel is vertically shaded was occurred maximum power is 15.85 W, while maximum power of PCM+PV system is 17.65 W.

Keywords: Photovoltaic, Shading, Phase Change Material (PCM), Energy, Exergy



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Türkiye'de elektrik üretimi-2017 Ekim Sonu [5].....	2
Şekil 1.2.	Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [6].....	3
Şekil 1.3.	Güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit sistemler [10].....	4
Şekil 1.4.	Güneş hücresinin yapısı ve çalışma prensibi [12].....	6
Şekil 1.5.	PV panellerin yapısı [15]	7
Şekil 1.6.	Seri bağlı üç özdeş güneş hücresi	8
Şekil 1.7.	Seri bağlı özdeş güneş hücrelerinin I-V karakteristiği [17]	8
Şekil 1.8.	Paralel bağlı üç özdeş güneş hücresi	8
Şekil 1.9.	Paralel bağlı özdeş güneş hücrelerinin I-V karakteristiği [17].....	9
Şekil 1.10.	Becquerel'in fotovoltaiik etkiyi gözlemlediği deney düzeneği [19]	9
Şekil 1.11.	1873 yılındaki fotovoltaiik sistem.....	10
Şekil 1.12.	1954 yılındaki %6 verimli fotovoltaiik sistem.....	10
Şekil 1.13.	Bir güneş hücresinin akım ve gerilim karakteristiği [14].....	13
Şekil 1.14.	Nesillerine göre fotovoltaiik sistemlerin sınıflandırılması [22]	13
Şekil 1.15.	Teknolojik aşamalarına göre güneş hücrelerinin verimleri [24]	14
Şekil 1.16.	PV sistemde kayıplar [25]	18
Şekil 1.17.	Kısmi gölgelenme altında fotovoltaiik panel [10]	19
Şekil 1.18.	Isı depolamasında uygulanan yöntemler [29]	21
Şekil 1.19.	Duyulur ısı ve gizli ısı depolama eğrileri [32]	23
Şekil 1.20.	Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması [33]	24
Şekil 1.21.	Erime sıcaklığı ve erime entalpisine göre FDM'lerin sınıflandırılması [10]	24
Şekil 2.1.	Elazığ İlinin aylara göre (a) güneşlenme süresi (saat) (b) global radyasyon (kWh/m ²) [69].....	35
Şekil 2.2.	Deneysel kurulum ve ölçü cihazlarının şematik gösterimi	36
Şekil 2.3.	Deneysel kurulum ve ölçü cihazlarının genel görünüşü	36
Şekil 2.4.	Fotovoltaiik panelin boyutları, ısı çiftlerin planı ve hücreler arası seri bağlantı (kırmızı çizgi)	37
Şekil 2.5.	Farklı gölgelenme oranları (A1) SR %25 (A2) SR %50 (A3) SR %75 (A4) SR %100, (B1) SR %25 ve (C1) %25	38
Şekil 2.6.	PV panellerin gölgeleme oranları (a) hücresele (b) yatay (c) dikey	38

Şekil 2.7.	Deneylerde kullanılan anemometrenin önden görünümü	40
Şekil 2.8.	Isıl çift (Cu-Co) uçlarının lehimlenmiş görünümü.....	40
Şekil 2.9.	VC 97 Dijital multimetre önden görünümü	41
Şekil 2.10.	Datalogger önden görünümü.....	42
Şekil 2.11.	Pironometre (a) teknik resim (b) genel görünüş [70].....	43
Şekil 2.12.	Ekserjinin disiplinler arası üçgeni [72]	44
Şekil 3.1.	PV paneli hücresel gölgelenme altındaki karakteristikleri (a) I-V (b) P-V	52
Şekil 3.2.	PV panelin hücresel gölgelenme altında enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100.....	54
Şekil 3.2.	PV panelin hücresel gölgelenme altında enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100 (devamı)	55
Şekil 3.3.	PV panelin yatay gölgelenme altındaki karakteristikleri (a) I-V (b) P-V	57
Şekil 3.4.	PV panelin yatay gölgelenme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100	59
Şekil 3.4.	PV panelin yatay gölgelenme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100 (devamı).....	60
Şekil 3.5.	PV panelin dikey gölgelenme altındaki karakteristikleri (a) I-V (b) P-V	61
Şekil 3.6.	PV panelin dikey gölgelenme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100	63
Şekil 3.6.	PV panelin dikey gölgelenme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100 (devamı).....	64
Şekil 3.7.	PV panelin %50 yatay gölgeleme altındaki faz değiştiren madde kullanıldığı ve kullanılmadığı durum karakteristikleri (a) güç-ışınım (b) sıcaklık-rüzgar	65
Şekil 3.8.	PV panelin %50 dikey gölgelenme altındaki faz değiştiren madde kullanıldığı ve kullanılmadığı durum karakteristikleri (a) güç-ışınım (b) sıcaklık-rüzgar ..	66

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Nesillerine göre fotovoltaik sistemler [11,13,23].....	15
Tablo 1.1. Nesillerine göre fotovoltaik sistemler [11,13,23] (devamı).	16
Tablo 1.1. Nesillerine göre fotovoltaik sistemler [11,13,23] (devamı).	17
Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan fotovoltaik panelin özellikleri.....	34
Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan faz değıştiren maddenin termodinamik özellikleri [34]..	39
Tablo 2.3. Anemometrenin teknik özellikleri	39
Tablo 2.4. Multimetrenin teknik özellikleri.....	41
Tablo 2.5. Pironometrenin teknik özellikleri	43
Tablo 2.6. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [72].	45
Tablo 2.7. Deneysel ölçüm sistemlerinin ve hesaplanan değerlerin belirsizlik değeri...	50
Tablo 3.1. PV panelin hücresel gölgelenme altında kayıp oranları	53
Tablo 3.2. PV panelin yatay gölgelenme altında kayıp oranları.....	58
Tablo 3.3. PV panelin dikey gölgelenme altında kayıp oranları.....	62

SEMBOLLER LİSTESİ

A	panel alanı (m^2)
FF	dolgu faktörü (-)
h_{ca}	ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
I_{sc}	kısa devre akımı (A)
I_s	güneş ışınlam şiddeti (W/m^2)
I_m	maksimum güç noktasındaki akım (A)
P	gölgesiz panelin maksimum gücü
SR	gölgelenme oranı (%)
T	sıcaklık (K)
V_{oc}	açık devre gerilimi (V)
V_m	maksimum güç noktasındaki gerilim (V)
v_r	rüzgar hızı (m/s)
ΔP	fotovoltaik panelin güç farkı (W)
η	enerji verimi (-)
ψ	ekserji verimi (-)
<i>Alt indisler</i>	
a	çevre
c	hücre
d	kayıp
s	güneş
m	maksimum
PV	fotovoltaik

KISALTMALAR

En.	Enerji
Ek.	Ekserji
FDM	Faz değiştiren madde
FÜBAP	Fırat Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinasyon birimi
EPDK	Enerji piyasası düzenleme kurumu



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve hızla artan nüfus ile beraber enerjiye olan talep artmıştır. Enerji üretim kaynaklarının sürdürülebilirliği geçmişten günümüze kadar dünyanın en önemli konularından ve sorunlarından biri olmuştur. Enerji üretim kaynakları yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir. Yenilenemeyen enerji kaynakları fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) ve nükleer yakıtlardır. Bunlar tüketildikçe azalan ve doğada belirli miktarlarda bulunan, tekrar oluşumu çok uzun yıllar alabilecek enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları tükenme hızından çok daha hızlı bir sürede kendini yenileyebilen enerji kaynaklarıdır. Bunlar; güneş enerjisi, hidrolik enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi, gelgit enerjisi, dalga enerjisidir.

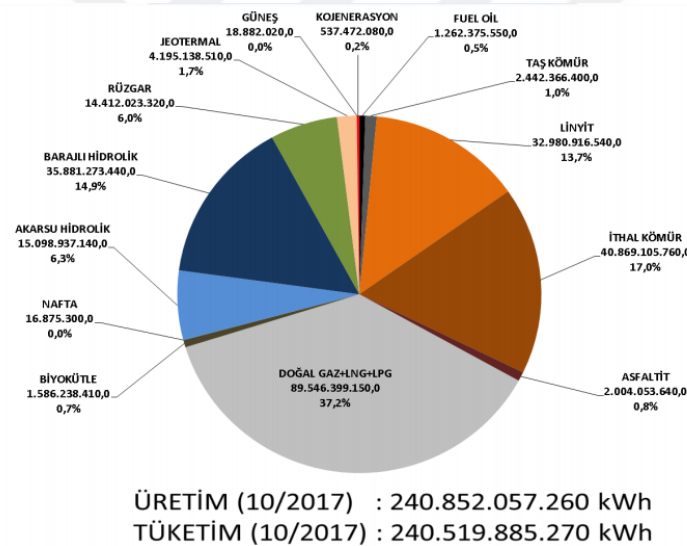
Dünyamızda enerji üretim kaynaklarına baktığımızda dünya enerji ihtiyacının önemli bir kısmını sınırlı olan fosil enerji kaynakları karşılamaktadır. Fosil enerji kaynaklarının sınırlı olması, küresel ısınma ve iklim değişikliklerine yol açması, diğer yandan toplumsal, çevresel ve ekonomik açıdan maliyetli olması insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönlendirmiştir

Yenilenebilir enerji kaynakları tükenmez, temiz ve yerli kaynaklar olup ihtiyaç duyulan her yerde kullanılabilen, ilk yatırım maliyetleri fosil yakıtlara oranla yüksek ancak üretim ve işletme maliyetleri çok ucuz ve daha da önemlisi, dışa bağımlı olmayan kaynaklardır [1]. En genel olarak, yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır [2].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında kapasitesi en yüksek olan, aynı zamanda dünyadaki tüm enerji kaynaklarının da dolaylı olarak kaynağı olan Güneş enerjisidir. Fakat güneşten enerji elde edilecek sistemleri kurmak ve depolamak açısından maliyetler çok yüksektir. Bu yüzden Güneş enerjisi kurulumu tasarımlarında ve projelerin hayata geçirilmesinde fizibilite yapılmak gerekir. Aynı şekilde çok pahalı ekipmanlar gerektiren ölçümler de her yerde yapılamamaktadır. Bu yüzden bilim insanları ve araştırmacılar çok uzun zamanlardan beri bu konuda çalışmalar yaparak en doğru hesaplamaları yapabilmek

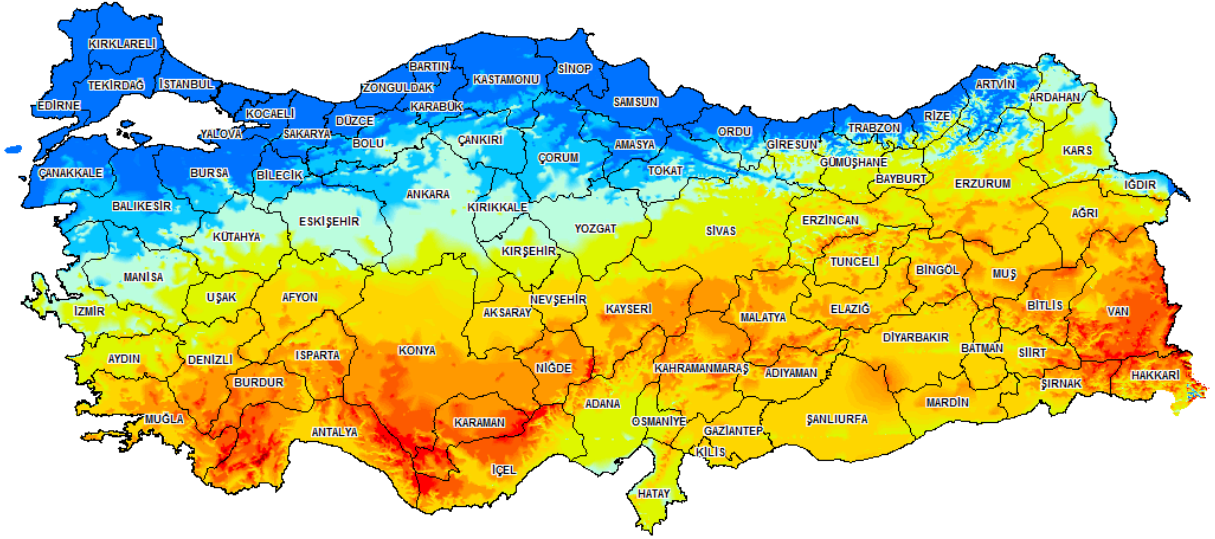
için kendi bölgeleri veya dünyanın birçok yeri için çok değişik parametrelere bağlı modeller geliştirmişlerdir [3].

Gelişmekte olan bir ülke olarak enerji tüketimimiz her geçen gün artmaktadır. Ülkemizin enerji ihtiyacının büyük bir oranı fosil yakıtlardan ithal olarak sağlanmaktadır. Şekil 1.1’de Türkiye’nin 2017 yılı Ekim ayı elektrik üretim kaynakları verilmiştir. Türkiye’nin enerjide büyük oranda dışa bağımlı olması ekonomisi için büyük bir sorundur. Ayrıca ülkemiz, Kyoto protokolünü imzaladığı için küresel ısınmaya neden olan bir takım ölçütlerde yakın gelecekte yaptırımlara maruz kalacaktır. Bu ve benzeri nedenlerle ciddi bir problem olan artan enerji talebinin karşılanabilmesi durumu ve ekolojik faktörler araştırmacıların yeni enerji kaynakları arayışına girmesini gerektirmektedir [4].



Şekil 1.1. Türkiye’de elektrik üretimi-2017 Ekim Sonu [5].

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi fotovoltaik paneller ile sağlanmaktadır. Fotovoltaik paneller üzerine düşen ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Türkiye güneş enerjisi kuşağı içerisinde olduğu için güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ülkemizin büyük bir bölümünde yapılabilir. Şekil 1.2’de ülkemizin güneş enerjisi potansiyel haritası verilmiştir. Fakat fotovoltaik panellerin ilk yatırım maliyetlerin yüksek olması, tüketiciler için dezavantaj oluşturmaktadır. Fotovoltaik panellerin kullanırlığı ve yatırımlarının artması için panellerin çeşitli yöntemlerle enerji kazancının artırılması için çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [6].

1.1. Güneş enerjisi

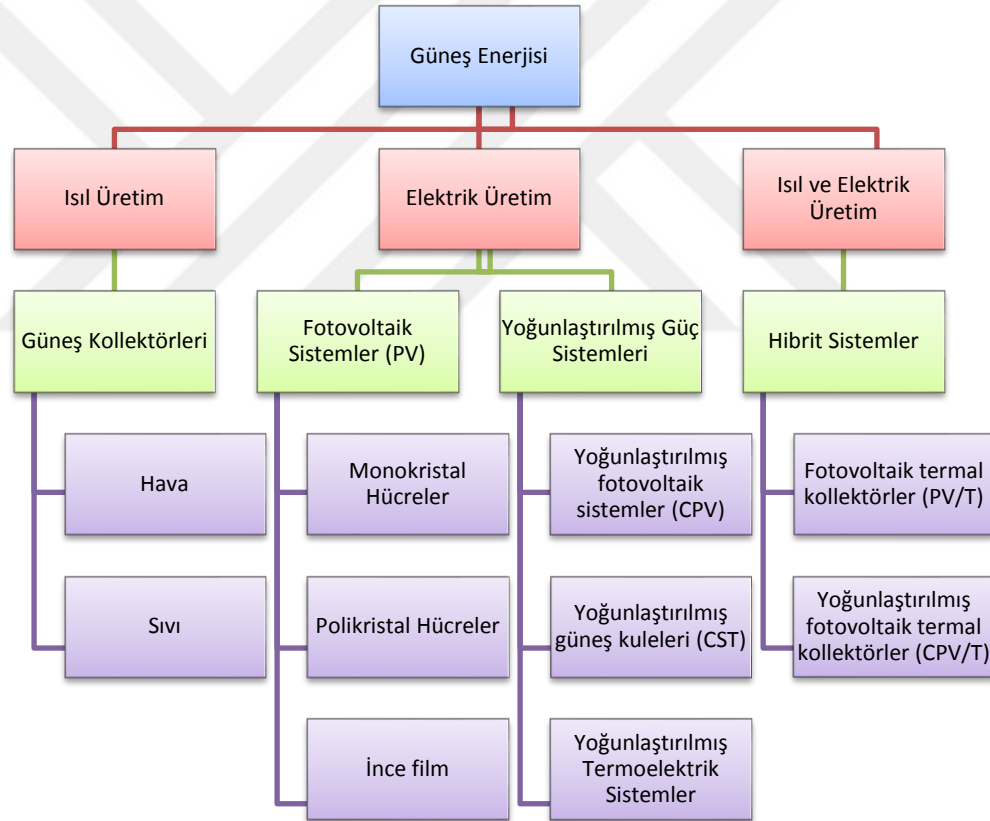
Güneş Dünyamızın enerji kaynağı olan hidrojen ve helyum gazlarından oluşan gök cisimidir. Merkezindeki sıcaklık yaklaşık $8-40 \times 10^6$ K olup, yüzey sıcaklığı ise 6000 K civarındadır. Güneş ile Dünya arasındaki mesafe 150 milyon km^2 'dir. Güneş enerjisinin şiddeti dünya atmosferinin dışında sabit 1370 W/m^2 değerindedir. Yeryüzüne ulaşan ışıınım miktarı ise $0-1000 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişmektedir. Yeryüzüne ulaşan ışıınım miktarı Dünya'da mevcut enerji tüketiminin 20.000 katıdır [7].

Güneş enerjisi; potansiyeli, kullanım kolaylığı, çevresel olarak temiz ve zararsız bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Güneş enerjisinin yeryüzüne ulaşan kısmıyla dünya ısısı yükselir ve bu sayede yaşam şartları oluşur. Rüzgar hareketleri, iklimlerin oluşumu, okyanuslardaki akıntılar ve dalga hareketleri de bu ısı ile sağlanır. Bitkiler fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, hayat kaynağımız olan oksijen ve şekeri üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır. Kısaca güneş enerjisi yalnız teknolojik faydalar meydana getirmez, aynı zamanda doğa olaylarını etkileyerek ve düzenleyerek, canlı cansız tüm varlıkların yaşam şartlarının oluşmasını sağlar [8].

Devamlı artan enerji ihtiyacını karşılamada mevcut kaynakların yetersiz kalması sonucu alternatif enerji kaynakları araştırılması ve geliştirilmesi hız kazanmıştır.

Güneş enerjisinden faydalanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik ilerleme ile verim artırılırken ve maliyet bakımından düşüş göstermiştir [8].

Güneş enerjisi uygun bir teknoloji ile başka bir enerjiye çevrilebilir. Güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit sistemler Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Ülkemiz, güneş enerjisi potansiyeli birçok gelişmiş ülkelere göre son derece elverişli bir konumda olmasına rağmen sahip olduğu potansiyeli yeterince kullanamamaktadır. Ülkemizde güneş enerjisinin en yaygın kullanımı sıcak su ısıtma sistemleridir. Gelişmiş ülkelerde ise güneş enerjisinden ısı enerjinin kullanımı bir yana sadece güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi toplamda GW'lar seviyesine ulaşmıştır [9].



Şekil 1.3. Güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit sistemler [10].

Ülkemizde EPDK'nın 2012 yılında çıkardığı yasa ile elektrik enerjisinin güneş enerjisinden sağlanması cazip hale gelmiştir. Bu uygulamaların yaygınlaşması ve ülkemizde, birçok AB ülkesinde olduğu gibi güneş enerjili güç santrallerinin

yaygınlaştırılması ülkemizde bu teknolojinin üretilmesine bağlı olmaktadır. Diğer taraftan bu teknolojiyi ithal etmek ülkemize çok da faydalı olamayacaktır. Ülkemiz hem güneş enerjisi teknolojisinin alıp geliştirme için araştırma-geliştirme faaliyetleri yaparsa, hem de güneş enerjisi uygulamalarının yaygınlaştırılması sağlanırsa, mutlaka enerjideki bu ciddi sıkıntı büyük ölçüde giderilmiş olacaktır [9].

1.1.1. Güneş hücresi ve fotovoltaik etki

1.1.1.1. Fotovoltaik etki

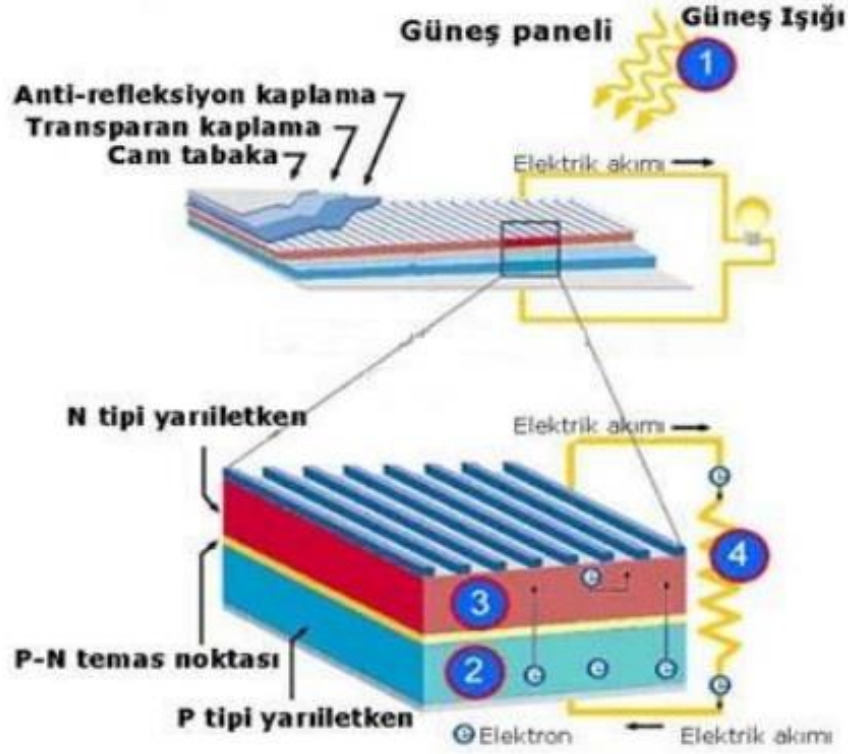
Fotovoltaik sistemler (PV), üzerine gelen ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Burada fotovoltaik sözcüğü, "Foto" Yunancada karşılığı ışık anlamına gelen "phos", "volt" ise 1745–1827 yılları arasında yaşamış ve elektrik alanında öncü bir bilim adamı olan Alessandro Volta'dan gelir. "Foto-voltaik" kelimesi ise "ışık-elektriği" anlamına gelmektedir.

1839 yılında Fransız fizikçi Becquerel, elektrolit işleminde kullanılan elektrotların birine direkt ışık düşürüldüğünde gerilim oluşturduğunu keşfetmiştir. Diğer birçok bilim adamı aynı etkiyi diğer materyalleri kullanarak gözlemlemiştir. 1954 yılında Ruslar, 1959 yılında Amerikalılar, iletişim cihazlarına enerji sağlamak için uydu fırlatmışlardır. Güneş hücrelerin keşfi ve gelişimi uzayı araştırma yarışının sonucudur. Fotovoltaik hücresi, hiçbir hareketli parça olmadan gün ışığını doğru akıma (DC) dönüştüren bir sistemdir. Bu şekilde elde edilen enerji temizdir ve herhangi bir zararlı atık mevcut değildir [11].

Güneş hücrelerinin dayalı olduğu fotovoltaik etki, güneş ışığını oluşturan fotonların silisyum gibi bir yarı-iletken malzemenin yüzeyine çarparak atomlardan elektronları serbest bırakmalarıyla ortaya çıkar. Malzemeye küçük miktarlarda katılan bileşenler ile bu reaksiyonlar kolaylaştırılır ve hızlandırılır.

Kristalin güneş hücresindeki alt tabaka kısmı, P tipi materyallerden (örneğin; alüminyum, galyum, indiyum) bir tanesi ile kaplanarak yeşil boşlukları oluşturmaları sağlanır. N tipi üst tabaka ise fosfor, arsenik veya antimon gibi gezgin elektronlar yaratan kimyasallarla kaplanır. Buradaki amaç, elektronların üzerine düşen ışığın, bu elektronları P bölgesi olan alt tabakaya doğru harekete geçirmeleridir. Bu elektronlar, güneş hücresindeki çizilen yollardan veya kısa devrelerle bu iki tabakayı birbirinden ayıran bariyer üzerinden hareket edebilirler. Fotovoltaik devre doğru ve düzgün olarak yapılandırılmış ise bu

kıyasla yaklaşık 5,5 °C daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. FDM'nin PV/T elektronlar devreyi çizilen yollardan tekrar N bölgesine doğru tamamlar ve elektriği bu sayede üretirler [11]. Güneş hücresinin yapısı ve çalışma prensibi Şekil 1.4'de gösterilmiştir.

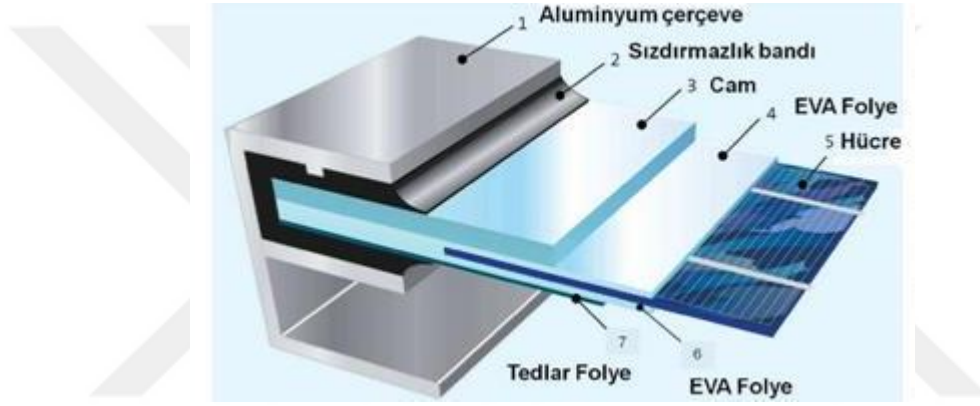


Şekil 1.4. Güneş hücresinin yapısı ve çalışma prensibi [12].

1.1.1.2. Güneş hücresi

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş hücreleri fotovoltaiik ilkeye dayalı olarak çalışan, üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşturan yarı iletken maddelerdir. Hücrelerin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücrelerinin alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,1–0,4 mm arasındadır. Bu enerji, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak %5 - %30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir [13].

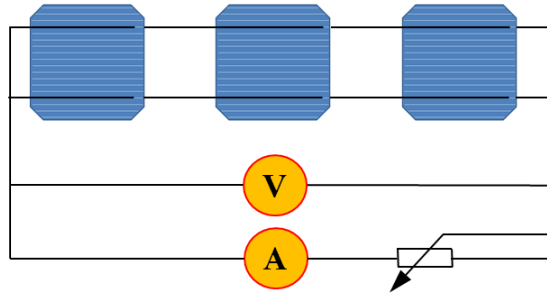
Fotovoltaik paneller genellikle güneş hücrelerden 48, 60 veya 72 adedi bir araya getirilerek, güneş ışınlarından etkilenmeyen 2 tabaka EVA (etilen vinil asetat) arasına yerleştirilerek elde edilir. Daha sonra, arka tarafına 1 tabaka katmanını yerleştirilir ve tüm gövdeyi güneş hücrenin etrafından sıkı bir koruyucu koza olacak şekilde ısıtılır. Daha sonra ön yüzeyine yüksek optiksel geçirgenliğe sahip cam kullanılıp ve camı korumak ve sistemi daha kullanılabilir sağlam bir yapıya getirmek için panel alüminyum çerçeve yerleştirilir. Son olarak, güneş panelinin arkasına elektrik için bir çıkış terminali olarak sigorta kutusu yerleştirilir [14]. Fotovoltaik panellerin temel yapısı Şekil 1.5’de verilmiştir.



Şekil 1.5. PV panellerin yapısı [15].

Güç çıkışını arttırmak için çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel veya seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi paneli ya da fotovoltaik panel adı verilir. Güç ihtiyacına göre paneller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak Mega Watt'lara kadar sistem düzenlenebilir [14].

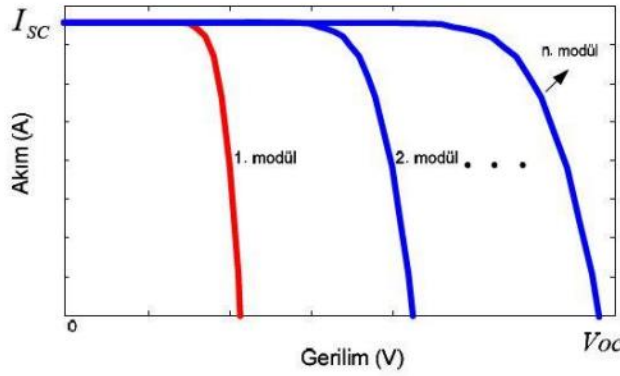
Fotovoltaik hücreler seri veya paralel bağlanarak ürettikleri akım veya gerilim değerleri yükseltilebilir. Hücreler birbirine seri bağlanarak gerilim değerleri yükseltilir. Şekil 1.6’da gösterilen seri bağlı üç hücrenin akım gerilim değerlerini incelersek, hücreler üzerinden geçen toplam akım değişmez ve bir hücrenin ürettiği akıma eşit olur, toplam gerilim değeri ise üç hücrenin açık devre geriliminin toplamına eşittir [16].



Şekil 1.6. Seri bağlı üç özdeş güneş hücresi

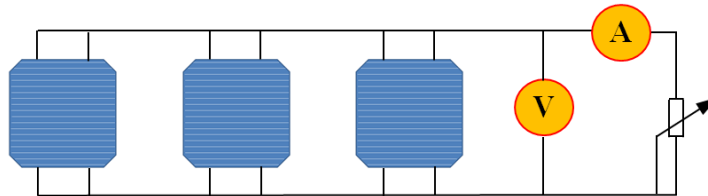
$$I_{\text{toplam}} = I_1 = I_2 = I_3$$

$$V_{\text{toplam}} = V_1 + V_2 + V_3$$



Şekil 1.7. Seri bağlı özdeş güneş hücrelerinin I-V karakteristiği [17].

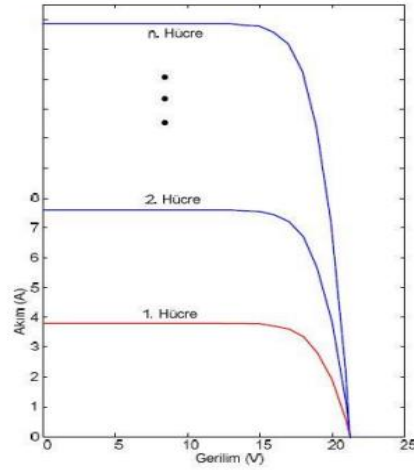
Fotovoltaik hücreler birbirine paralel bağlanarak akım değerleri yükseltilir. Şekil 1.8’de gösterilen paralel bağlı üç hücrenin akım gerilim değerlerini incelersek, hücreler üzerindeki toplam gerilim değişmez ve bir hücrenin gerilimine eşit olur, toplam akım değeri ise üç hücrenin açık devre akımlarının toplamına eşittir.



Şekil 1.8. Paralel bağlı üç özdeş güneş hücresi

$$I_{\text{toplam}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$V_{\text{toplam}} = V_1 = V_2 = V_3$$

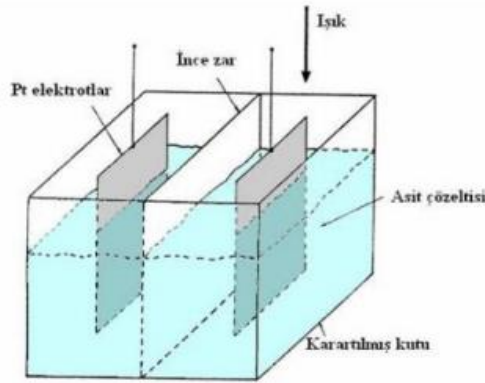


Şekil 1.9. Paralel bağlı özdeş güneş hücrelerinin I-V karakteristiği [17].

Güneş hücreleri çoğunlukla Dünya’da ikinci sırada element olan silisyumdan yapılır ve en az 20 yıllık ömre sahiptir. 1970’lerin sonunda alternatif enerji kaynakları arayışları olunca fotovoltaik sistemlerine ilgi artmıştır. Güneş hücreleri ile güneş ışığını direkt elektriğe dönüşümü, alternatif enerji kaynakları içinde en umut veren seçenek olarak ortaya çıkmaktadır [14].

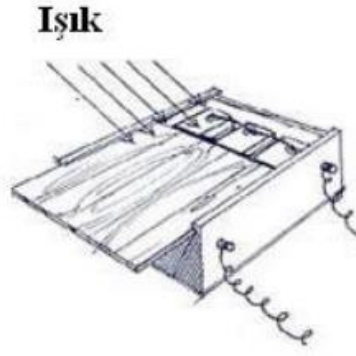
1.1.1.3. Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

- 1839’da Fransız fizikçi Alexander Edmond Becquerel, Şekil 1.10’deki deney düzeneğini kurarak fotovoltaik etkiyi keşfetmiştir [18].



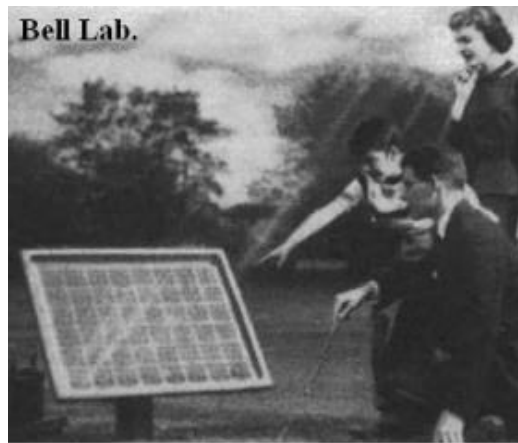
Şekil 1.10. Becquerel'in fotovoltaik etkiyi gözlemlediği deney düzeneği [19].

- 1873'te Willoughby Smith, selenyumun içindeki foto iletkenliği keşfetti. Şekil 1.11’deki ilk basit fotovoltaik düzeneği oluşturdu. Kapak kapalı-yüksek direnç, kapak açık-düşük direnç.



Şekil 1.11. 1873 yılındaki fotovoltaiik sistem

- 1877’de W.G. Adams ve R.E. Day, yaptıkları çalışmalarla katı selenyumdaki fotovoltaiik etkiyi gözlemleyerek, katı maddelerin fotovoltaiik etki oluşturabildiğini kanıtladılar.
- 1883’te Charles Fritts, selenyum kullanarak ilk fonksiyonel %1 verimli fotovoltaiik hücreyi geliştirdi.
- 1946’da Dünya’da ilk olarak Russell Ohl, modern fotovoltaiik hücresi patentini aldı.
- 1954’de Bell Laboratuvarlarında, %6 verimli silisyum fotovoltaiik hücreler yapıldı. Şekil 1.12’de %6 verimli silisyum fotovoltaiik hücrenin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1.12. 1954 yılındaki %6 verimli fotovoltaiik sistem

- 1957’de Hoffman Elektronik firması %8 verimle çalışabilen silisyum fotovoltaiik hücreler geliştirdi.

- 1958’de Hoffman Elektronik firması %9 verimli silisyum fotovoltaik hücreler geliştirdi. Aynı yılda Vanguard I isimli uzay aracında ilk defa fotovoltaik hücreler kullanıldı. Bu hücreler, 100 cm²’ye 0,1 W güç üretiyorlardı.
- 1960’da Hoffman Elektronik firması %14 verimli silisyum fotovoltaik hücreler geliştirmeyi başardı.
- 1970’de Zhores Alferov, GaAs hetero-eklem fotovoltaik hücrelerini oluşturdu.
- 1970’lerin sonunda Dünya’da Petrol krizi oldu ve alternatif enerji kaynakları arayışları başladı. Fotovoltaik hücrelere ilgi arttı. Bu teknolojilere AR-GE çalışmaları başlandı ve hücrelerin üretimi hızlandı.
- 1985’de New South Wales Üniversitesinde, %20 verimle çalışabilen silisyum fotovoltaik hücreler geliştirildi.
- 1988’de Applied Solar Energy Corp., %17 verimli iki-eklemlı fotovoltaik hücrelerin seri üretimine geçti.
- 1989’da Applied Solar Energy Corp., %19 verimli iki-eklemlı fotovoltaik hücreler geliştirdi.
- 1993’de Applied Solar Energy Corp., %20 verimli iki-eklemlı fotovoltaik hücrelerin seri üretimine başlandı.
- 2000’de %20 verimli üç-eklemlı fotovoltaik hücreler geliştirildi.
- 2002’de %26 verimli üç-eklemlı fotovoltaik hücreler geliştirildi.
- 2005’te %28 verimli üç-eklemlı fotovoltaik hücreler geliştirildi.
- 2006’da Spectrolab firması %40 verimli üç-eklemlı fotovoltaik hücreler geliştirdi.
- 2008’de NREL firması %40,8 verimli üç-eklemlı fotovoltaik hücre geliştirerek, bu alanda dünya rekoruna imza attı.
- 2009’da Spectrolab, %41,6 verimli üç-eklemlı fotovoltaik hücre geliştirerek, dünya rekorunun tekrar sahibi oldu [20].

1.1.1.4. Fotovoltaik hücre parametreleri ve karakteristikleri.

Bir güneş hücresini ifade etmek için genellikle altı parametre kullanılır. Bunlar I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , FF ve η dir. İdeal olarak kısa devre akımın maksimum akıma eşit olması gerekir ($I_{sc} = I_{max}$). V_{oc} değeri Denklem 1.1 kullanılarak elde edilir. V_{oc} değeri I_0 bağlı olduğu için yarıiletkenin özelliklerine göre belirlenir.

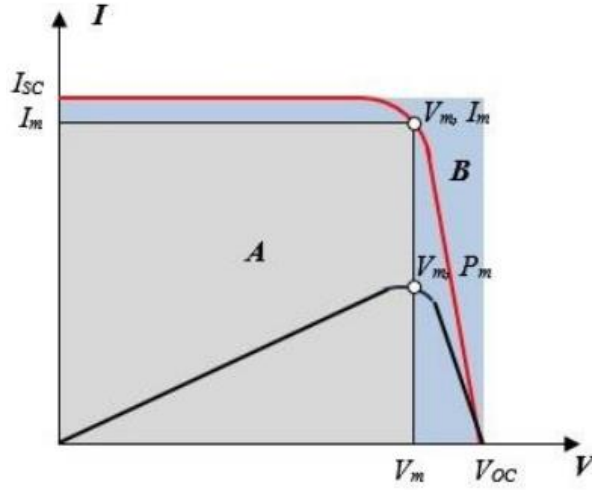
$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (1.1)$$

Fotovoltaik hücre için diğer bir önemli parametre dolum faktörüdür. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımı sırasıyla bir güneş hücresindeki en yüksek gerilim ve akım değerleridir. Ancak bu iki değerden biri maksimumken diğeri sıfır iken güneş hücresinden elde edilen güç sıfır olacaktır. Dolum faktörü (FF) bir güneş hücresinden elde edilecek en yüksek verimi belirleyen parametredir. Dolum faktörü Denklem 1.2'den yararlanılarak elde edilir.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1.2)$$

Şekil 1.13'de görüldüğü gibi grafiksel olarak dolum faktörü (FF) güneş hücresinin akım-gerilim (I-V) karakteristiğinin kare şekline ne kadar yaklaştığının bir ölçüsüdür ve I-V karakteristiği içinde kalan en büyük alandır. Tipik ticari fotovoltaik hücreleri için $FF > \%70$ 'tir. Bir güneş hücresinin “güç dönüşüm verimi” çıkıştaki elektrik gücünün girişteki optik güce (P_{in}) oranı olarak tanımlanır. Dolayısıyla, güneş hücresi maksimum güç durumunda çalışırken dönüşüm verimi Denklem 1.3 ile elde edilir [14].

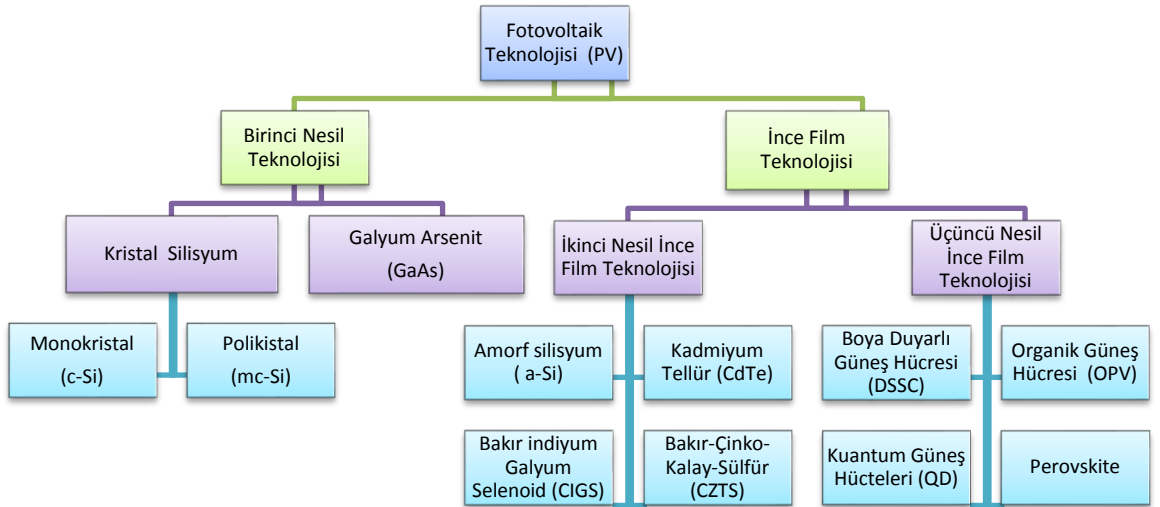
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100 \quad (1.3)$$



Şekil 1.13. Bir güneş hücresinin akım ve gerilim karakteristiği [14].

1.1.1.5. Güneş hücrelerinin sınıflandırılması

Literatür çalışmalarına bakıldığında güneş hücrelerinin sınıflandırılması çok değişik kriterlere göre yapılmıştır. Bunlar; uygulama alanları, hücre yapımında kullanılan malzemenin türü, hücrenin optik karakteristikleri ve teknolojik gelişim aşamaları gibi birçok başlık altında sınıflandırılabilir. Güneş hücrelerinin teknolojik gelişimine göre sınıflandırılması Şekil 1.14’de gösterilmiştir. Şekil 1.15’de ise güneş hücrelerinin verimleri gösterilmiştir [21]. Tablo 1.1’de fotovoltaik sistemlerinin avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 1.14. Nesillerine göre fotovoltaik sistemlerin sınıflandırılması [22].

- Birinci Nesil Güneş Hücreleri

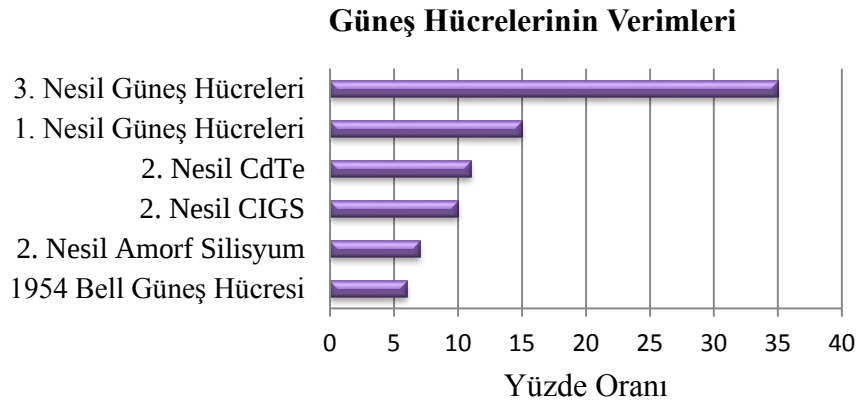
İlk üretilen güneş hücreleri bu sınıfa girerler. Bu güneş hücrelerinin yapımında en çok kullanılan malzeme, silisyum (Si) ve galyum arsenit (GaAs)'tir. Verimleri %20'nin altında olmasına karşın üretim kolaylıkları ve maliyet açısından piyasanın %86'sına hakimdir [7].

- İkinci Nesil Güneş Hücreleri

İnce film teknolojisinin kullanılması ile üretim maliyetleri düşürülmeye başlanmıştır. Maliyetin düşmesine rağmen henüz verimleri yeryüzünde %10 civarında olduğu için yaygınlaşmamıştır. Ancak çalışmalar sonucu verim artırılmaya çalışılmaktadır. Atmosfer dışındaki verim %28-30 civarında olduğu için uzay ve uydu uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

- Üçüncü Nesil Güneş Hücreleri

Günümüzde inorganik malzemelerle yapılan güneş hücrelerinin esnek olmaması, uygulama alanlarının sınırlı olması, pahalı ve rezerv sıkıntısının olması gibi sebepler araştırmacıları farklı malzeme arayışlarına sürüklemiştir. Bu arayışlar gerek ucuz olması gerekse iletken ve yüksek molekül ağırlığına sahip olması gibi avantajlarından dolayı, araştırmacıları organik moleküllere yöneltmiştir. Yarıiletken polimerlerin kullanıldığı organik güneş hücreleri, iletken polimerlerin keşfinden ve geliştirmesinden sonra önemli bir araştırma konusu olmuştur. Güneş hücrelerinde inorganik malzemeler yerine organik malzemeler kullanılması ile gelecekteki güneş enerjisi pazarını işgal edeceği düşünülmektedir [23].



Şekil 1.15. Teknolojik aşamalarına göre güneş hücrelerinin verimleri [24].

Tablo 1.1. Nesillerine göre fotovoltaik sistemler [11,13,23].

Monokristal (c-Si)	Ticari amaçla kullanılan ilk güneş hücresi olmakla birlikte piyasada hala yaygın olarak kullanılan güneş hücresidir. Laboratuvar koşullarında %24 verim sağlanmasına rağmen ticari ürünlerde verim %16- 17 civarındadır. Maliyetinin karşılanma süresi 4-6 yıl arası ve 20 yıllık bir sürede yaklaşık %7'lik verim kaybı meydana gelir. Saf kristal gereksinimi yüzünden pahalıdır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu hücrelerin dezavantajıdır.
Polikristal (mc-Si)	Çok kristalli silisyum güneş hücrelerinin üretimi monokristal güneş hücrelerine göre daha fazladır. Bunun başlıca nedeni polikristal üretiminin kolay ve ucuz olmasıdır. Laboratuvar koşullarında %16,2 verim sağlanmasına rağmen ticari ürünlerde verimleri %12-15 arasındadır. İlk yatırım maliyetini karşılama süresi 2-4 yıl civarındadır. Ancak 20 yıllık bir sürede %14 verim kaybı meydana gelir.
Galyum Arsenit (GaAs)	Galyum elementi doğada silisyum kadar bol bulunmamasından dolayı güneş hücresi yapımında, silisyuma oranla daha az kullanılmaktadır. GaAs güneş hücrelerinin ticari verimi %22, laboratuvar şartlarında verimi ise %25'in üzerindedir. Diğer yarıiletkenlerle kullanılarak oluşturulan çok eklemlili GaAs hücrelerinde ise %30 civarında verim elde edilmiştir. GaAs güneş hücreleri, daha çok uzay uygulamaları için üretilen optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır. GaAs'in uzay uygulamalarındaki güneş pillerinde kullanılmasının temel nedeni, silisyuma göre sıcaklığa ve radyasyona karşı daha dayanıklı olmasıdır.

Tablo 1.1. Nesillerine göre fotovoltaik sistemler [11,13,23] (devamı).

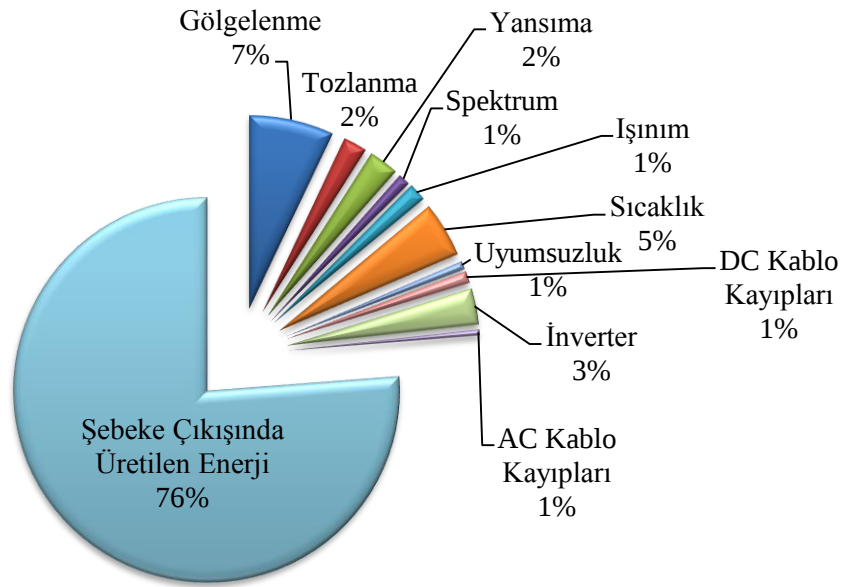
Amorf Silisyum (a-Si)	Amorf silisyum malzemesinin soğurma katsayısı yüksektir. Laboratuvar ortamında bu hücrelerin verimlilikleri %10 civarında iken piyasada kullanılan hücrelerde bu verimlilik %5 ile %7 arasında değişmektedir. Bundan dolayı bu hücreler enerji ihtiyacı çok fazla olmayan yerlerde tercih edilirler. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılırlar. Genellikle binalarda entegre yarı saydam cam yüzeyler, binanın dış cephelerinde kullanılırlar.
Kadmiyum Tellür (CdTe)	Yüksek soğurma katsayısı yanında; ince film büyütme teknolojisinin birçoğu ile kolayca üretime olanak tanınması, geniş yüzey alanlı güneş hücre üretiminde kadmiyum tellür bileşik yarıiletkeninin öne çıkmasını sağlamıştır. CdTe panel üretimi en düşük üretim maliyetine sahip ince film teknolojisidir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde verimlilik %16 civarındadır. Piyasada kullanılan hücrelerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir.
Bakır indiyum Galyum Selenoid (CIGS)	CIGS güneş hücresi çok yüksek soğurma katsayısı ve güneş ışığı tayfına uygun sayılabilecek yasak enerji bant aralığına sahiptir Dünyada birçok büyük üretici firma CIGS tabanlı panellerin ticari gelişimi ile yakından ilgilenmektedir. Bu güneş hücresi, yarı iletken esnek bir taban üzerine yapılır. CIGS güneş hücresi laboratuvar ortamında hücre verimlerinin %20 seviyelerini aşmalarına rağmen ticari anlamda CIGS panelleri tipik olarak %12 ile %14 arasında verime sahiptir.
Boya Duyarlı Güneş Hücresi (DSSC)	1990'ların başında Michael Gratzel tarafından İsviçre'de Lozan'daki Federal Politeknik Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. Ticari üretimi az olan boya-duyarlı hücreler laboratuvar çalışmalarında %12,3 gibi bir verime ulaşılmıştır. Üretimnin kolay ve maliyetinin düşük olması ve eğer rutenyumsuz boyalar kullanılmış ise istikrarlı ve yeterli kaynağa sahip materyallere dayanması bu hücrelerin avantajlarıdır.

Tablo 1.1. Nesillerine göre fotovoltaik sistemler [11,13,23] (devamı).

Bakır-çinko-kalay-sülfür (CZTS)	CZTS güneş hücreleri opto-elektronik ve kristalografik özelliklerinin yanında üretim yöntemleriyle de CIGS güneş hücrelerine çok benzerdir. Fakat CZTS güneş hücrelerinin laboratuvar verimleri yaklaşık %10 civarında ve bu CIGS güneş hücrelerinin verimi ile kıyaslandığında yarısı kadardır. Silikon tabanlı güneş panellerine göre daha az verimli olmalarına rağmen, maliyetlerinin daha düşük olması ve kullanılan malzemelerin doğada bol bulunması ince film teknolojisini avantajlı konuma getiriyor. .
Organik Güneş Hücresi (OPV)	Organik fotovoltaik güneş hücreleri doğada bol olan ve düşük enerjili fotovoltaik hücre üretimini amaçlar. Organik güneş hücrelerinin veriminin hızla %10 seviyelerine ulaşmıştır fakat uzun süreli güvenilirlik kadar önemli olan verimlerinin düşük seviyelerde olması tercih edilmelerine neden olmaktadır. İletken olmaları, düşük maliyetli olmaları, üretim tekniklerinin kolay olması, yüksek molekül ağırlığına sahip organik moleküller istenilen özelliğe göre kolayca değiştirilebilmeleri, doğada bol bulunmaları ve hafif olmaları bu hücrelerin avantajlarıdır.
Kuantum Güneş Hücteleri (QD)	Büyük bant aralığına sahip yarıiletken malzeme içerisinde, küçük bant aralığına sahip malzemenin çok ince katmanlar halinde üretilmesi ile elde edilir. Küçük bant aralığına sahip malzemenin soğurma özelliği ile fotoakımın artması, çıkış gerilimininse azalmaması hedeflenir. Kuantum kuyulu güneş pillerinde (QWSC) teorik verim sınırı %44 civarındadır. Kuantum kuyuları, özellikle fotovoltaik (PV) cihazların performansını artırmak amacıyla, solar spektrumun iyi uyumunu elde etmek için çok katmanlı yapı içerisine (p-n eklem içerisine) yerleştirilir.
Perovskite	Çeşitli dalga boylarında ışığa tepki gösterebilmektedir, buda güneş ışığından daha fazla yararlandığını gösterir. Ayrıca esneklik, yarı şeffaflık, özel form faktörleri, hafif olmaları bu hücrelerin avantajlardır.

1.1.1.6. Fotovoltaik sistemi etkileyen parametreler

Fotovoltaik sistemin ürettiği güç birçok parametreye bağlıdır. Fotovoltaik sistemi oluşturan bileşenlerin karakteristikleri, sistemin coğrafi konumu, sistemin kurulum noktasının etrafında bulunan yapılar, panelin alanı, panel yüzeyine gelen ışınlam değerleri, panel eğim açısı, panel ve çevre sıcaklığı, rüzgar hızı gibi parametreler bunlardan bazılarıdır. Bir fotovoltaik sistemdeki kayıpları Şekil 1.16'daki gibi sınıflandırabiliriz [25].



Şekil 1.166. PV sistemde kayıplar [25].

Bu çalışmada, fotovoltaik panelin kısmi gölgelenmesinin ve panel yüzey sıcaklığının, fotovoltaik panel güç çıkışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

1.1.1.7. Sıcak nokta (hot spot) ve gölgelenme etkisi

Fotovoltaik panellerin performansı birçok parametreden etkilenebilir ama bunlardan en önemlilerinden birisi gölgelenmedir. Gölgelenmeye neden olabilecek faktörler; ağaçlar ve çalılar, komşu binalar, telefon direkleri, kar, yapraklar, kuş pislikleri ve tozlanma gibi faktörleri kapsamaktadır.

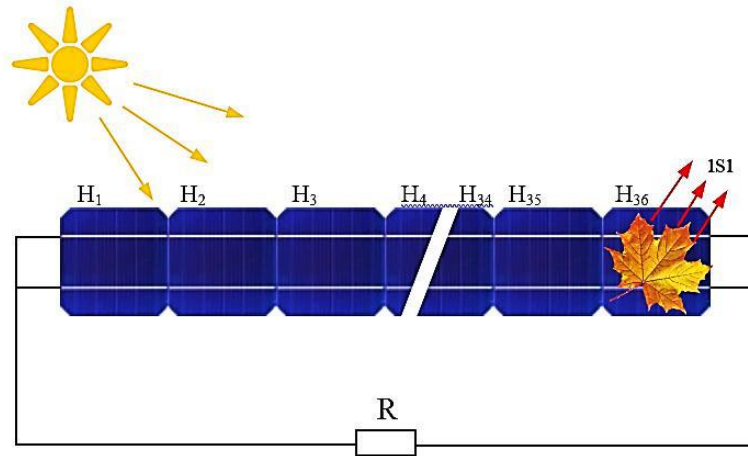
Özellikle şehir ve kent merkezlerinde komşu binalar, uzaktaki yüksek yapılar fotovoltaik sistemlerini gölgeleyebilir. Ya da bazen tasarımdan dolayı binanın kendi kendini gölgelemesi de mümkündür. Bu gibi durumlar panelin performansını düşüreceği için tasarım esnasında doğru kararlar verilmeli ve fotovoltaik panel sistemi doğru

projelendirilmelidir. Gölgelemeye sebep olabilecek bir diğer parametre ise ağaçlardır. Projelendirme esnasında çevredeki ağaçlar iyi analiz edilmeli ve hatta mümkünse kışın yaprak döken ağaçlar tercih edilmelidir. Böylelikle kışın daha düşük açıyla gelen güneş ışınlarının panel üzerine düşürülmesi kolaylaşmaktadır [16].

Kar özellikle dağlık bölgelerde, toz, is ve kirlenme ise endüstriyel bölgelerde önemli gölgelenme etmenleridir. Fotovoltaik panellerin yatayla yaptığı 12° ve daha üzerindeki açılar bu etkilerin yağmur suları yardımıyla temizlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu tip gölgelenmeler, fotovoltaik panellerin eğim açısının artırılmasıyla önemli ölçüde giderilebilir.

Günümüzde, birçok insan güneş panellerinin verimlerinin sıcaklıkla doğru orantılı olduğu düşünürler. Fakat bu tamamen yanlış bir bilgidir, belirli bir sıcaklıktan sonra güneş panellerinde panel gerilimi ve panel gücü sıcaklıkla ters orantılı olarak düşmeye başlar. Yani sıcaklık arttıkça güneş panelinin verimi düşer [26].

Panel üzerindeki hücrelerinin herhangi bir sebeple kısmi gölgelemeye maruz kaldığı zaman gölgeli hücrenin ürettiği akım diğer hücrelerden düşük olur ve yük durumuna geçer. Güneş hücreleri tarafından üretilen gücün bir kısmı zayıf hücre üzerine dağılarak, hücrenin sıcaklığının yükselmesine neden olur. Bu sıcaklık artışı hücrenin enerji çevrimi olumsuz yönde etkileyerek, yanmasına bile neden olabilir. Bu duruma Hot Spot Etkisi denilmektedir.



Şekil 1.17. Kısmi gölgelenme altında fotovoltaik panel [10].

Şekil 1.17’de gösterildiği gibi 36 adet seri bağlı hücreden oluşan bir panelde fotovoltaik hücrelerden 35 tanesi normal çalışırken bir tanesi çok düşük akım üretirse 35 fotovoltaik hücrenin gücü bu zayıf hücre üzerine dağılır ve panelden güç alınması mümkün

olmaz. Otuz altıncı hücre üzerine dağılan güç miktarı uyumsuzluğa ve fotovolttaik hücrelerin sızıntı akımlarına bağlıdır. Uyumsuzluk etkisi sebebiyle seri bağlı güneş hücrelerinden oluşan panelde iki etki gözlenir. Birincisi gölgelenme etkisi ile sıcaklık artar ve açık devre gerilimi azalır. Panelin çıkış gücü gölgeli hücreye bağlı olarak değişim gösterir [16].

Fotovolttaik panellerde kısmi gölgelenme altında oluşan güç kayıplarını ve sıcak nokta oluşumunu önlemek için seri bağlı hücrelere paralel olarak bağlanmış olan baypas diyotlar kullanılır.

1.2. Enerji depolama

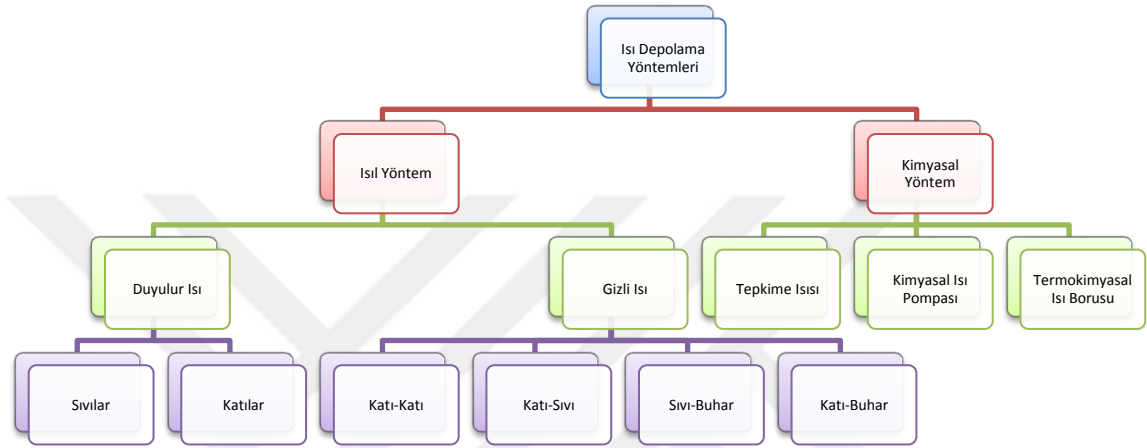
Dünya’da enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve giderek azalması sonucunda alternatif enerji kaynakları ve üretilen enerjinin depolanması büyük önem arz etmektedir. Enerji depolama bir taraftan enerjinin kullanıldığı alanlarda oluşan atık enerjiyi depolama, diğer taraftan, yalnız belirli zamanlarda enerji verebilen alternatif enerji kaynaklarının enerjisini depolayarak, enerji elde etme zamanı ile talebi arasında oluşan farkı gidermeyi amaçlamaktadır. Bu şekilde enerji sistemlerinin verimi artırılmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Enerji, ihtiyaç duyulduğunda kullanılmaya hazır olmalıdır. Enerjiyi istenildiği zaman kullanabilmek için onu saklamaya depolama denir. Çok değişik formlarda enerji depolama yöntemleri vardır. Başlıca enerji depolama yöntemleri kimyasal, mekaniksel, ısı ve elektriksel enerji depolama yöntemleridir [27].

1.2.1. Termal enerji depolama yöntemleri

Termal enerji bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Atomik veya moleküller titreşim, dönme ve öteleme sonucunda oluşur ve termal enerjinin aktarımı sıcaklık farkından kaynaklı ısı akışıyla gerçekleşir. Termal enerji depolaması enerjinin elde edilmesiyle, talep arasındaki fark ve yer-zaman arasındaki uyumsuzluğu gideren, hem ısıtma hem de soğutma için kullanılan sistemdir. Bu enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbonlara (CFC) ihtiyaç duymadan doğrudan soğutma-ısıtma yapılabilmektedir. Ayrıca elektrik enerjisine duyulan gereksinim azalmakta ve elektriğe en çok gereksinim duyulan zamanlarda elektriğe aşırı yüklenme engellenebilmektedir [28].

TED sistemleriyle ucuz olan saatlerde depolanan enerjinin pahalı saatlerde kullanılmasıyla da daha ekonomik enerji tüketimi sağlanabilir Termal enerji depolama sistemleri, enerjinin verimli bir şekilde depolanmasını ve istenilen zamanda ve yerde bu enerjinin kullanılmasını hedefler [27]. Termal enerjinin depolanması için kullanılan temel yöntemler Şekil 1.18’de verilmiştir.



Şekil 1.18. Isı depolamasında uygulanan yöntemler [29].

1.2.1.1. Duyulur ısı depolama

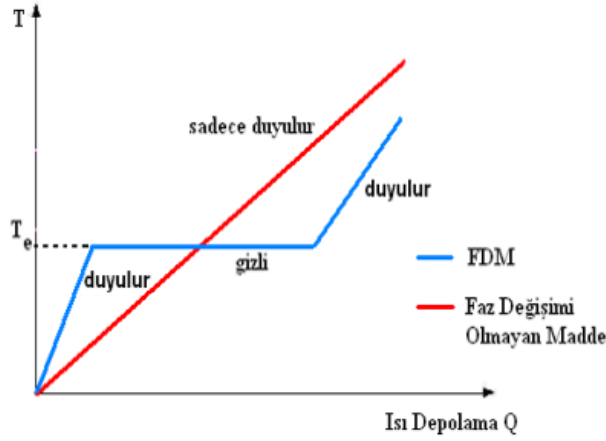
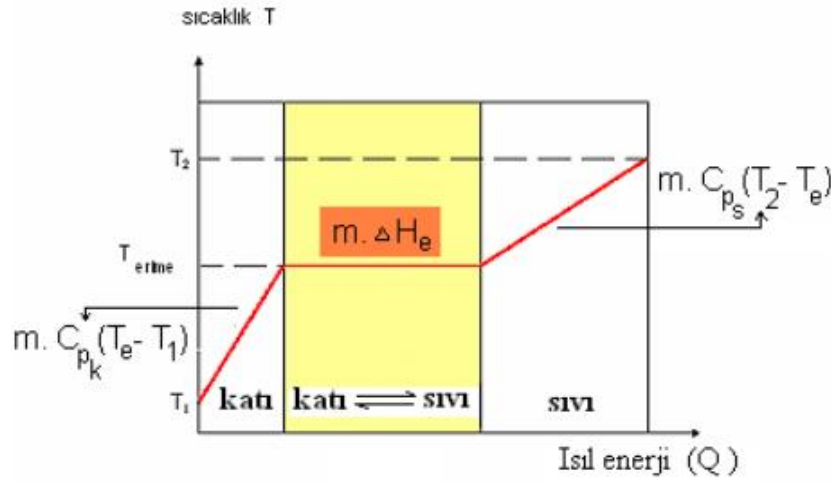
Duyulur ısı depolama yönteminde, ısı depolama maddenin sıcaklığındaki değişimden ortaya çıkan duyulur ısıdan yararlanır. Duyulur ısı katı, sıvı veya sıvı ile katının beraber olduğu hibrit materyallerde depolanabilir. Bu sistemde depolama ve geri kazanma süresince depolama materyalinin sıcaklığı değişir. Çok sayıda depolama ve geri kazanma çevriminin gerçekleşebilmesi bu sistemin avantajı, gereksinim duyulan depo hacminin büyük olması ise dezavantajıdır [30].

1.2.1.2. Gizli ısı depolama

Maddenin faz değişimi sırasında çevreden aldığı veya verdiği ısıdır. Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi duyulur ısıya göre 4-5 kat daha küçüktür. Termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayabilen maddeler Faz Değiştiren Maddeler (FDM)’dir. Isı depolama materyalinin iç enerjisinin önemli oranda değişmesi, bu materyalin faz değiştirmesine neden olur. Uygun sıcaklık sınırlarında, depolama materyalinin faz değiştirmesi ile ortaya çıkan gizli ısı depolanabilir. Isı depolama amacıyla, belirli sıcaklıklarda faz değişimlerine uğrayan ve gizli ısı değerleri yüksek olan materyallerden

yararlanılır. Depolama katı-sıvı, katı-katı ve katı-buhar dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Katı durumdaki materyal kristalleşerek diğer bir katı faza dönüştüğünde kristalleşme ısısı şeklinde ısı depolanabilir. Katı- katı faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısı miktarı azdır. Sıvı-buhar şeklinde açığa çıkan gizli ısı miktarı fazladır ama uygulamada gaz fazın depolanması için, basınçlı kapların kullanılması gibi sorunlar gizli ısının depolanmasını sınırlandırır. Ayrıca katı-buhar ve sıvı-buhar şeklinde gerçekleşen faz değişimlerinde hacim değişiminin fazla olması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır [30,31].

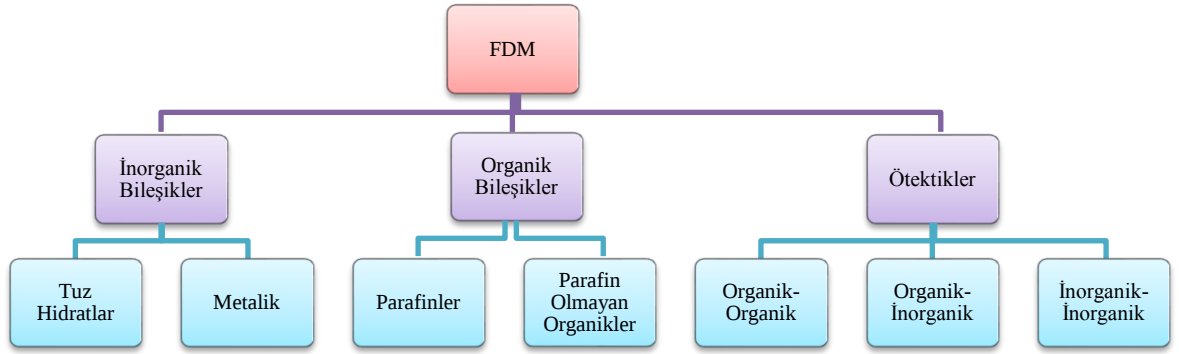
Gizli ısı depolamanın diğer termal enerji depolama teknikleri ile kıyaslandığında; duyulur ısı depolamaya göre termal enerji depolama kapasitesi yüksektir, ısı deposu hacmi daha küçüktür. FDM olarak kullanılan maddelerin birim kütlelerinin termal enerji depolama kapasiteleri daha yüksektir. Faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur [30]. Şekil 1.19’da duyulur ve gizli ısı depolama eğrileri verilmiştir.



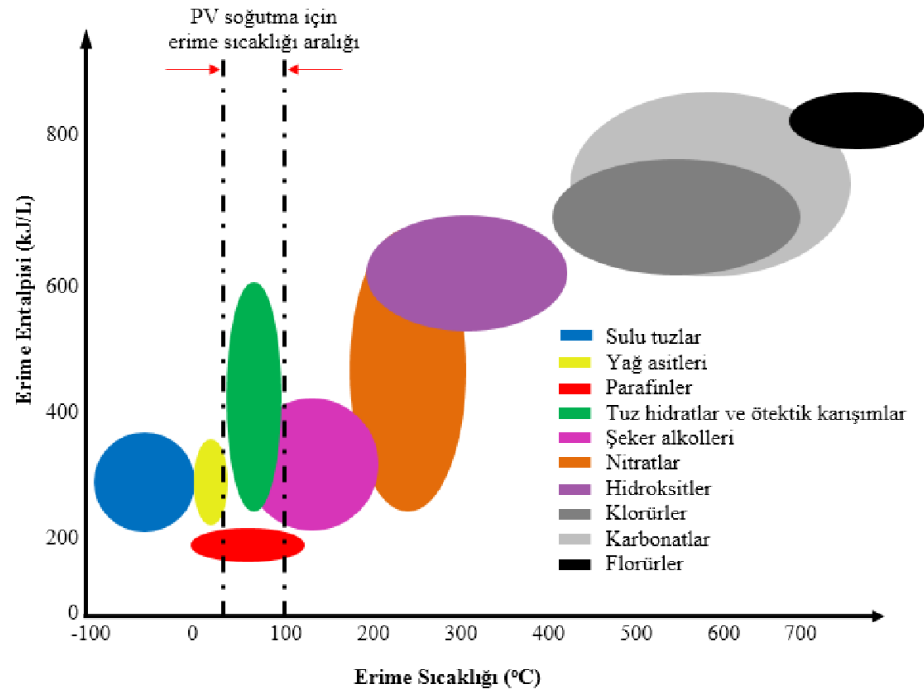
Şekil 1. 19. Duyulur ısı ve gizli ısı depolama eğrileri [32].

1.2.1.2.1. Faz değıştiren maddeler (FDM)

FDM herhangi bir maddenin faz değışimi esnasında gizli ısısından yararlanarak termal enerjinin depolanmasında kullanılan malzemelerdir. Faz değıştiren maddeler sabit bir sıcaklık aralığında depolama olanağı sağlayarak, erime sıcaklığına bağılı olarak hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanılabilirler. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması Şekil 1.20’de erime sıcaklıklarına göre sınıflandırılması ise Şekil 1.21’de verilmiştir.



Şekil 1.170. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması [33].



Şekil 1.21. Erime sıcaklığı ve erime entalpisine göre FDM'lerin sınıflandırılması [10].

İnorganik faz değiştiren maddelerin olumlu yönleri; yüksek ergime ısısı, ucuz ve yanıcı olmamaları, yüksek ısıl iletkenlik; olumsuz yönleri ise; aşırı soğuma göstermeleri, faz bozulması, korozi olmaları ve hidrat sayısında azalma şeklinde özetlenebilir. Organik FDM'lerin olumlu yönleri; kimyasal yönden dengede olmaları, genellikle aşırı soğuma göstermemesi, korozi ve toksik olmamaları, yüksek ergime ısısı ve düşük buhar basıncı göstermeleri, olumsuz yönleri ise düşük termal iletkenlik, faz değişimi sırasında büyük hacim değişimi, yanıcı olmaları şeklinde özetlenebilir [30].

Faz değiştiren madde seçiminde dikkate alınması gereken kriterler;

- İstenilen sıcaklık aralığında erime sıcaklığına sahip olmalıdır.
- Birim hacim ya da kütle başına depoladığı faz değişim ısısı yüksek olmalıdır.
- Yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmalıdır.
- Düşük buhar basıncına sahip olmalı ve faz değişimi esnasında küçük hacim değişimi göstermelidir.
- Düzenli erime ve katılaşma davranışı göstermelidir [32].

1.2.1.3. Kimyasal yöntemle ısı enerji depolama

Bir kimyasal reaksiyon gerçekleşirken alınan veya verilen ısıya reaksiyon ısısı denir. Reaksiyon ısısının enerji depolama için kullanılması yöntemine termokimyasal enerji depolama denmektedir. Isı enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek uzun süre depolanabilir. Yöntem birçok karmaşık süreci içerse de temeli endotermik olarak ısı alan tepkimenin ekzotermik reaksiyonla bu ısıyı geri vermesi olayıdır [34].

1.3. Tezin amacı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimi yenilenemeyen enerji kaynaklarının verimi ile karşılaştırıldığında çok düşük kalmaktadır. Bu yüzden AR-GE çalışmaları yenilenebilir enerji kaynaklarının verimlerini arttırmaya yönelik olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan fotovoltaik panellerde sıcaklık ve gölgelenme etkenleri bu sistemlerin verimini daha da düşürmektedir. Özellikle bir fotovoltaik panel içerisindeki güneş hücrelerinin seri bağlı olması durumunda birinin kısmi gölgelenmesi diğer seri bağlı hücrelerin akımlarını düşürmektedir. Sonuç olarak akımın azalması halinde güç kayıpları meydana gelmekte ve sistem verimsiz çalışmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak çok kristalli (polikristal) bir fotovoltaik panel üzerine farklı pozisyonlarda ve bu pozisyonlara farklı oranlarda gölgelenmeler uygulanarak gölgesiz bir fotovoltaik panel ile akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V), enerji ve ekserji eğrilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonraki aşamada hem fotovoltaik panelleri soğutmak hem de atık ısıyı depolamak için Faz Değiştiren Madde (FDM) kullanılmıştır. FDM'li panelde gölgelenme durumlarının performansa etkisi incelenmiştir. %50 yatay ve %50 dikey gölgelenme durumları FDM'li sistemler için test edilmiştir.

Tez kapsamında dünyada giderek artan fotovoltaik panellerde enerji üretimi konusunda araştırma yapmak ve ülkemizde fotovoltaik teknolojisinin oluşumuna ve gelişimine katkıda bulunmak ve böylelikle dışa bağımlılığı azaltıp, güvenilir ve ekonomik bir üretim sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca; paneller üzerinde gölgelenmeden oluşan sıcak nokta oluşumları, panel sıcaklıkları, gölgelenme parametrelerinin geometrisi gibi problemler analiz edilerek yatırımcılara katkı sağlamaktır.

1.4. Literatür taraması

Yaygın olarak kullanılmakta olan fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve tükenme ihtimali nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı gittikçe artmaktadır. Güneş enerjisi özellikle son dönemlerde üzerinde araştırma faaliyetlerinin yoğunluk kazandığı bir bilimsel çalışma alanı haline gelmiştir. Güneş enerjisinin payını arttırmak için fotovoltaik panel verimlerini artırma çalışmaları büyük önem kazanmıştır.

Fotovoltaik sistemlerin farklı teorik ve deneysel çalışmaları literatürde bulunmaktadır. Konu kapsamında literatürde yürütülen çalışmalar, fotovoltaik sistemlerin farklı işletme koşullarındaki enerji ve ekserji analizi ve performansa etki eden parametrelerin incelenmesi olmak üzere iki kısımda ele alınabilir.

a-Fotovoltaik sistemlerin farklı işletme koşullarındaki performans analizleri;

Fotovoltaik sistemlerin verimlerinin düşük ve maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı enerji kazançlarının artırılabilmesi için fotovoltaik panellere etki eden parametrelerin analiz edilmesi gerekmektedir. Fotovoltaik panellere etki eden en önemli parametreler; güneş ışıının şiddeti, güneşlenme süresi ve fotovoltaik panelin çalışma sıcaklığıdır. Bu kısımda literatürde bulunan fotovoltaik panellerin çalışma performanslarını etkileyen parametreler incelenmiş ve özetlenmiştir.

Sudhakar ve Srivastava [35] NIT Bhopal Enerji Merkezine kurulu 36 W gücünde PV panelinin kapsamlı bir şekilde enerji ve ekserji analizi deneysel olarak incelenmiştir. Güneş paneli için enerji ve ekserji verimlilik değerleri sırasıyla %6-%10 ve %8-%10 olarak bulunmuştur. Sıcaklığın, panel performansını olumsuz olarak etkilediğini, panel sıcaklığının azaltılması ile panelin ekserji veriminin arttığı sonucuna varmışlardır.

Saidur vd. [36] çeşitli güneş enerjisi sistemlerinin ekserji analizi üzerine derleme çalışması yapmışlardır. Çalışma kapsamında olan sistemler; fotovoltaiik (PV) , güneş havuzu, güneş kollektörleri (hava, su) , kurutma v.b. En yüksek ekserji yıkımı güneş ısıtma cihazları ve güneş iklimlendirme sistemlerinde gözlenmiştir. Güneş sistemleri ekserji verimliliğinin günlük güneş ışıınımı ve radyasyon yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Şahin vd. [37] fotovoltaiik panelin güneş ışıınınının değışimi ile enerji ve ekserji verimliliklerini, sıcaklık değışimi ile akım-gerilim değierlerini incelemişlerdir. Golden Colorado'da 105,23° batı, 39,71° kuzey enlemde sabit yerleştirilmiş, fotovoltaiik paneller ile 28 Haziran 2001 tarihinde 11:00-17:00 saatleri arasında yaptıkları çalışmada günlük enerji veriminin %7-%12 arasında değierler aldığını, ekserji veriminin ise %2-%8 arası değierler aldığını belirlemişlerdir. I-V eğrisinin panelin sıcaklığıyla değıştiğı vurgulamışlardır.

Pandey vd. [38] Hindistan iklim koşullarında yılın farklı aylarında fotovoltaiik panelin enerji ve ekserji analizlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sonunda; enerji ve ekserji verimliliğı tüm aylarda en yüksek Şubat ayında olduğu ölçülmüştür. Bununla birlikte, tüm verimlerin Temmuz ayında azaldığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak sıcaklıkla verim arasında ters orantı olduğunu belirtmişlerdir.

Joshi vd. [39] çalışmalarında PV sistemin ve PV/T sistemin enerji ve ekserji verimliliğini incelemişlerdir. Fotovoltaiik sistemin enerji verimi %33~45 arası, ekserji verimi %7,8~13,8, PV/T sistemin ekserji verimi %11,3~16 arası değierler aldığı tespit edilmiştir.

Visa vd. [40] çalışmalarında 5 farklı tipteki fotovoltaiik panellerin çevresel etkilere göre performansını test etmişlerdir. Deneyler sonucunda kış ve yaz mevsimi için ılıman bir iklimde en yüksek verim polikristal panelde, en sabit verim CdTe (Kadmiyum Tellürid)

panelde ve en iyi güç ise ince film panelleri arasında CIGS (Copper indium gallium selenide) panelde olduğunu belirtmişlerdir.

Akyüz vd. [41] PV sisteminde yeni ve klasik ekserji verimliliği yaklaşımlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, ekserji verimliliği değişimleri Türkiye’de Kurulu PV sisteminden elde edilen gerçek deneysel veriler kullanılarak iki durum için incelenmiştir. Matlab-simulink programında yeni bir yazılım ile geleneksel ve yeni ekserji verimlerinin analizi yapılmıştır. Ekserji verimi genellikle yeni yaklaşımda klasik olana göre daha düşük değerlerde elde edilmiştir. En yüksek ekserji verimliliği düşük rüzgar hızı ve çevre sıcaklığın yanı sıra yüksek güneş radyasyonu ile elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Yerli vd. [42] yaptıkları çalışmada meteorolojik parametrelerin fotovoltaik sistemin elektrik üretimine etkilerini detaylı olarak ele almışlardır. Deneylerde İstanbul iklim şartlarında akım, gerilim, güneş ışıınımı, difüz (yayılı) ışıınım, atmosfer sıcaklığı, fotovoltaik hücre sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar şiddeti değerleri farklı zaman aralıklarında ölçülmüştür. Ölçülen verilerin analizi için Matlab programı kullanılarak bir kod yazılmıştır. Analizlerden elde edilen grafiklerden, fotovoltaik panelin elektrik üretiminde hangi meteorolojik parametrenin üretimi hangi şartlarda arttırıp azalttığını belirtmişlerdir.

Dolara vd. [43] polikristal ve monokristal fotovoltaik panellerin kısmi gölgelenme altındaki performansını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda uygulanan gölge oranlarının ve gölgesiz fotovoltaik panelin güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri sunulmuştur. Fotovoltaik panelin tek bir hücrenin %50 gölgelenmesiyle güç üretiminin %30 azaldığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak gölgelenme oranının artmasıyla panelin I-V ve P-V değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Picault vd. [44] fotovoltaik panellerin elektrik üretimini farklı çevre koşulları altında tahmin edilmesi için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Bu çalışmanın amacı fotovoltaik panellerin kayıplarını azaltmak olduğunu belirtmişlerdir. Maksimum güç çıkışını %4’den daha fazla artırmak için alternatif dizi konfigürasyonları üzerine yeni deneysel çalışmalar yapılmasını önermişlerdir.

Shaik vd. [45] Matlab yazılımını kullanarak fotovoltaik sistemin sıcaklık, güneş ışıınımı ve gölgelenme altındaki karakteristiklerini incelemiş ve simülasyonunu yapmışlardır. Ayrıca genetik algoritma yaklaşımını iki geleneksel algoritma ile karşılaştırmış ve bu yaklaşımın diğer metotlarla aynı analizleri verdiğini belirtmişlerdir.

Bai vd. [46] fotovoltaik panellerin gölgelenme altındaki performansını deneysel olarak incelemiş ve simülasyon yapmışlardır. Gölgeleme oranının güç üretimini doğrudan etkilediğini savunmuşlardır.

Belhachat ve Larbes [47] farklı gölgelenme durumlarında fotovoltaik dizi konfigürasyonlarının performansını incelemişlerdir. Kısmi gölgelenme koşulları altında PV dizi konfigürasyonlarının performanslarının değişken olduğunu ve maruz kalınan gölgelenme modeline göre en iyi performansı, yani en yüksek maksimum gücü veren PV dizisi konfigürasyonunu belirtmişlerdir.

Diaz-Dorado vd. [48] farklı gölgelenme durumları altındaki fotovoltaik sistemlerinin elektriksel davranışlarının simülasyonu için bir metot tanıtmışlardır. Bu metotla herhangi bir sıcaklık ve ışınım koşulları için kısmi gölgeli fotovoltaik sistemlerin I-V karakteristiklerini sunmuşlardır.

Martinez-Moreno vd. [49] çalışmalarında PV paneli üzerinde gölgelenme kayıplarını hesaplamak için basit bir matematiksel model sunmuşlardır. Modellerinde fotovoltaik panellerin akım-gerilim eğrilerini değerlendirmeden, güç hesaplarını yapmışlardır. Modeli kontrol etmek için farklı gölgeleme durumları altında fotovoltaik panel üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır ve modelin geçerliliği belirtilmiştir.

Alsayid vd. [50] çalışmalarında fotovoltaik paneller üzerinde farklı gölgelenme durumlarını analiz ederek kısmi gölgelenmenin fotovoltaik panel üzerinde neden olabileceği etkiler incelenmiştir. Öncelikle Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak simülasyon yapılmıştır, daha sonra gölgelenme etkisi 140 W seri bağlı iki ticari fotovoltaik panelde ölçülerek deneysel olarak gösterilmiştir. Sonuçların akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri çizilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Matlab/Simulink yazılımında geliştirilen simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar benzerlik göstermiştir.

Khaing vd. [51] çalışmalarında çok kristal, amorf ince film, CdTe ince film ve CIGS ince film olmak üzere dört tip farklı PV panelleri üzerinde kısmi gölgelenme etkisi ele alınmıştır. PV panellerin I-V ve P-V eğrileri incelenmiştir. Kısmi gölgelenme altında baypas diyot kullanılarak en iyi performansı a-Si paneli ardından CdTe paneli, mc-Si panel, baypas diyot kullanılmadığında ise CIGS panel ve mc-Si paneli olduğu belirtmişlerdir.

Khalaf vd. [52] çalışmalarında bir simülasyon modülü kullanarak, fotovoltaik panel üzerinde gölgelenme etkisini değerlendirmişlerdir. Farklı boyutlardaki PV panelleri için I-V ve P-V karakteristik eğrileri incelenmiştir. Gölgelenme durumlarında üç yüzde oranı (%25 %50 %75) ve gölgelenmenin olmadığı parametreler uygulanmıştır. İki fotovoltaik panelin verimliliği (Kyocera-54W, Solar-130W) gölgelenme etkisinin farklı yüzdeleri altında test edilmiştir. Fotovoltaik sistemde küçük boyutlardaki panel büyük boyutlardaki panelden gölgelenmede daha az etkilendiğini belirtmişlerdir.

Taha vd. [53] fotovoltaik panel üzerinde gölgelenme etkisini bir simülasyon modeli kullanarak değerlendirmişlerdir. Deneyler dört yüzde gölgelenme durumları (%25 %50 %75 %100 ve gölgesiz durum) ile sabit ışınlam ve sıcaklık koşulları altında yapılmıştır. Kyocera 54W ve 130W fotovoltaik panellerinin I-V ve P-V karakteristiklerini incelenmiştir. Sonuçlar Matlab yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Gölgeleme oranını artmasıyla her iki panelin performansının geniş ölçüde azaldığını vurgulamışlardır.

Ramabadran vd. [54] çalışmalarında seri ve paralel bağlı fotovoltaik panellerin gölgelenme etkisi altında performansını karşılaştırmışlardır. 36 hücreli seri ve paralel bağlı paneli çeşitli gölgelenme oranlarında test etmişlerdir. Gölgeleme koşul altında en uygun konfigürasyon paralel bağlı fotovoltaik panel olduğunu sunmuşlardır.

Deline vd. [55] çalışmalarında, aralıklı gölgelenmenin büyük fotovoltaik diziler üzerindeki etkisini yeni bir analitik yaklaşımıyla sunmuşlardır. Ölçüm değerlerinde maksimum hata oranı %1 olarak bulunmuştur.

Tian vd. [56] çalışmalarında sıcaklık, gölgelenme ve bypass diyotun fotovoltaik panelin performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Dört panelden oluşan fotovoltaik dizisinin performansı üç durumda incelenmiştir. Her bir gölgelenme ve bypass diyotunun etkisi için I-V ve P-V karakteristikleri hesaplanmış ve bu karakteristiklerin farklı oranlarda azaldığını sunmuşlardır.

Schill vd. [57] fotovoltaik panellerin akım- gerilim karakteristikleri etki eden kısmi gölgelenme parametresini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, fotovoltaik panellerinin verimliliğinin ilk beş ay alınan ölçümler sonunda %20 düştüğünü belirtmişlerdir.

Vijayalekshmy vd. [58] kısmi gölgelendirme kayıplarını azaltmak ve dolayısıyla güç üretimini arttırmak için fotovoltaik panellerin çapraz bağlı bağlantıları için yeni bir Zig-Zag dizisi planı önermişlerdir. Sistemin performansı beş farklı gölgelenme durumu için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda yeni düzeninin güç-gerilim (P-V) karakteristiklerindeki çoklu yerel maksimum sayısını azalttığını ve Global Maksimum Güç Noktası (GMPP) izleme algoritmasının daha da basitleştirdiğini vurgulamışlardır.

Sathyanarayana vd. [59] çalışmalarında fotovoltaik paneller üzerinde gölgelenme etkisi incelemişlerdir. Gölgelenme etkisini iki kısımda incelemişlerdir. Birinci kısımda fotovoltaik panel üzerine şeffaf olmayan bir malzeme kullanarak farklı oranlarda (%0 - %25 - %50 - %75) gölgelenme uygulamışlardır. İkinci kısımda ise farklı fiziksel nesneler kullanarak; kuşların, yaprakların, binaların ve kabloların gölgelenmesini incelemişlerdir. Bu durumlar için I-V, P-V karakteristikleri, dolgu faktörü ve verimlilikleri üzerindeki değişimler incelenmiştir.

Sarioğlu [16] yapmış olduğu çalışmada ticari bir ürün olan 72 adet seri bağlı güneş gözesinden oluşan 95Wp gücünde çok kristalli silisyum bir fotovoltaik (PV) panelin baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumda gölgelenme etkisi altındaki güç değişimi akım gerilim eğrilerinden yola çıkılarak incelenmiştir. Verim, dolum çarpanı, maksimum güç gibi bazı panel parametreleri her iki durum için de hesaplanmıştır. Panel üzerinde %2,7'lik bir gölgelenme ile baypas diyot yokken %77,88 olarak hesaplanan güç kaybının baypas diyot kullanıldığında %45,35 değerine kadar düştüğü gözlenmiştir.

b-Faz değiştiren malzemeler ile fotovoltaik panellerin soğutulması;

Fotovoltaik paneller güneş ışınımını alması ile güneşten gelen enerjinin bir kısmını elektrik enerjisine bir kısmını da ısı enerjisine dönüştürürler. Bu da panel sıcaklığını yükselterek panelin verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüzde fotovoltaik panelin sıcaklığını düşürerek güç üretimi artırmak için çeşitli çözümler uygulamaktadır. Son yıllarda fotovoltaik panelin verimli kullanılması konusunda ısı enerjisi depolama yöntemleri büyük önem arz etmektedir. Bu kısımda; literatürde bulunan fotovoltaik panellerde kullanılan faz değiştiren maddelerin etkisi araştırılmış ve özetlenmiştir.

Machniewicz vd. [60] fotovoltaik panellerin elektrik enerjisi üretimine etki eden sıcaklık parametresini ESP-r yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarının amacı fotovoltaik panellerin yüzeylerinde oluşan sıcaklık dalgalanmalarını önlemek için faz

değiştiren malzeme kullanarak panellerin elektrik kazançlarının artırılmasıdır. Elde edilen sonuçlarda 20 °C civarında olan sıcaklıklarda kullanılan faz değiştiren maddeler ile panellerin veriminin olumlu yönde etkilendiğini belirtmişlerdir.

Hasan vd. [61] fotovoltaik panellerin iklim ve sıcaklık durumlarındaki etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında faz değiştiren madde olarak ötekteit karışım ve tuz hidrat kullanarak FDM'siz panel ile FDM'li panellerin sıcaklık ve güç karşılaştırılmasını yapmışlardır. Çalışma iki farklı iklim koşulu için gerçekleştirilmiştir. Dublin, İrlanda ve Vehari, Pakistan'da Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım aylarında sabah 9:00 akşam 18:00 arasında ölçümler yapılmıştır. Güneş paneli olarak 65 W'lık polikristal kullanılmıştır. Deneyler sonunda en yüksek verimler Pakistan'da elde edilmiştir. Fotovoltaik panelin elektrik verimi %13,1 PV-FDM-1 (ötekteit karışım) %13,9 PV-FDM-2 (tuz hidrat) %14,5 elde edilmiştir.

Cellura vd. [62] çalışmalarında faz değiştiren madde kullanarak fotovoltaik panellerin üzerindeki etkisini incelenmiştir. Faz değiştiren maddenin erime sıcaklığı 28-38 °C arasındadır. COMSOL paket programı içerisindeki kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak sayısal analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, PV sistemin verimi %12 PV/FDM verimi %26 olarak hesaplamışlardır.

Biwole vd. [63] fotovoltaik panelin sıcaklığını ortam sıcaklığına yakın tutmak için faz değiştiren madde kullanımını incelemişlerdir. Çalışmalarında fotovoltaik panelin arkasına FDM ekleyerek sabit 1000 W/m² ışınım altında iki saat boyunca panelin çalışma sıcaklığını 40 °C altında muhafaza edilebilir sonucuna varmışlardır.

Smith vd. [64] faz değiştiren madde (FDM) ile bir PV sistemden elde edilen yıllık enerji üretim artışını belirlemek için genel bir analiz yapmışlardır. FDM'nin bir soğutucu olarak görev yaptığını ve bu şekilde PV hücresinin pik sıcaklığını sınırladığını ve verimini artıracaklarını belirtmişlerdir. FDM destekli soğutma yıllık iklim değişikliklerin az ve güneşlenme değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde en faydalı olduğunu vurgulamışlardır. Optimum FDM erime sıcaklığı kullanılarak, yıllık PV enerji üretimi Meksika ve doğu Afrika da %6'nın üzerinde, Orta ve Güney Amerika gibi birçok yerlerde %5'in üzerinde, Afrika Arabistan, Güney Asya ve Endonezya takımadalarında ise daha fazla artacağını belirtmişlerdir. Avrupa'da, enerji çıkışı artırma ise yaklaşık %2 ve %5 arasında değiştiği sonucuna varmışlardır.

Stropnik ve Stritih [65] faz değiştiren madde kullanarak PV panellerin performansını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde Faz değiştiren madde olarak RT28HC kullanılmıştır. Analizlerini TRNSYS programını kullanarak yapmışlardır. PV sistemin yıllık verimi %11,4 PV/FDM yılılık verimi ise %12,2 olarak hesaplamışlardır.

Browne vd. [66] faz değiştiren maddelerin fotovoltaiik teknolojilerinin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Faz değiştiren maddeler paneller üzerindeki ısıyı üzerine çekerek fotovoltaiik panelin soğumasını yani elektrik enerji kazançlarının artmasını neden olurlar. Çalışmalarında farklı tipdeki faz değiştiren maddeleri sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren maddelerin, fotovoltaiik panellerinin verimi için önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Huang vd. [67] Faz değiştiren maddelerin fotovoltaiik paneller üzerindeki performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Üç farklı PV/FDM sistemi için faz değiştiren madde olarak RT25 kullanmışlardır. Ortam sıcaklığının 23 °C, ışıınım değerinin 750 W/m² olduğu zamanda 130 dakika süreyle PV/FDM sisteminin sıcaklığını 29 °C altında tutulduğunu göstermişlerdir.

Browne vd. [68] çalışmalarında faz değiştiren maddenin PV/T kolektörü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. FDM'li sistemde su sıcaklığının FDM'siz sisteme sistemi için sistemi soğutup, ısıyı depolamanın etkili bir aracı olduğunu vurgulamışlardır.

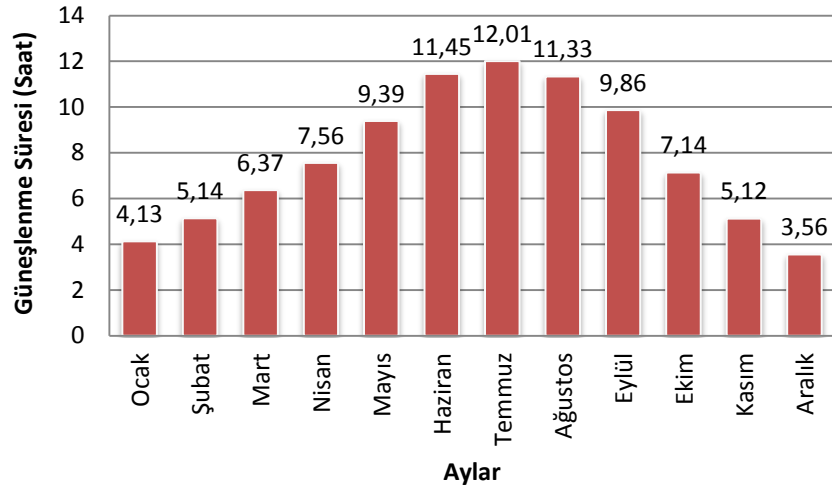
2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada çok kristalli yapıya sahip fotovoltaik panel kullanılmıştır. Standart test koşulları altında maksimum gücü 75 W olan çok kristalli silisyum fotovoltaik panel 36 adet seri bağlı hücreden oluşmaktadır. Panelin üretici firma tarafından verilen özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

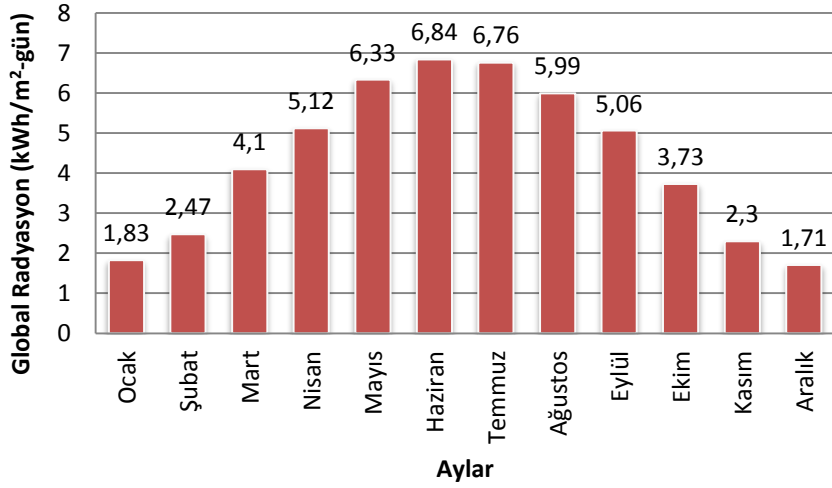
Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan fotovoltaik panelin özellikleri

Elektriksel özellikler		
Standart test koşullarındaki maksimum güç	P_{max}	75 W
Açık devre gerilimi	V_{oc}	21,93 V
İdeal çalışma gerilimi	V_{mp}	18,11 V
Kısa devre akımı	I_{sc}	4,14 A
Çalışma akımı	I_{mp}	3,69 A
Çalışma sıcaklığı	°C	-40 ile 85 °C
Güç oranı toleransı		±%3
Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı		0,0045%/C
Açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı		-0,32%/C
Mekanik özellikler		
Polikristal hücre		4x9 toplam 36 hücre
Boyutlar		770x670x25 mm
Temperli cam		3,2 mm
EVA		0,50 mm

Fotovoltaik panelinin ölçümleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Laboratuvarı bünyesinde bulunan ölçüm cihazları kullanılarak alınmıştır. Deneyler 2016 yılının haziran ve temmuz ayları içerisinde, havanın açık olduğu günlerde yapılmıştır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi Elazığ ilinin aylık güneşlenme süresi ve global radyasyon değerlerinin en yüksek olduğu iki ay Haziran ve Temmuz aylarıdır. Deneylerdeki ölçümler, saat 09:00-16:00 arasında yarım saat arayla periyodik olarak alınmıştır.



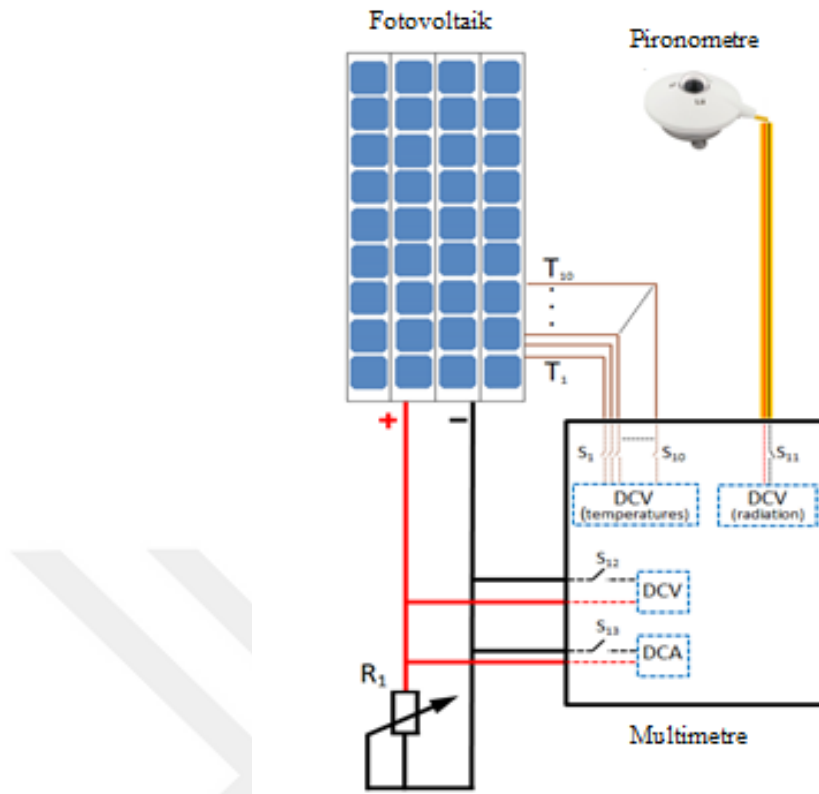
(a)



(b)

Şekil 2.1. Elazığ İlının aylara göre (a) güneşlenme süresi (saat) (b) global radyasyon (kWh/m²) [69].

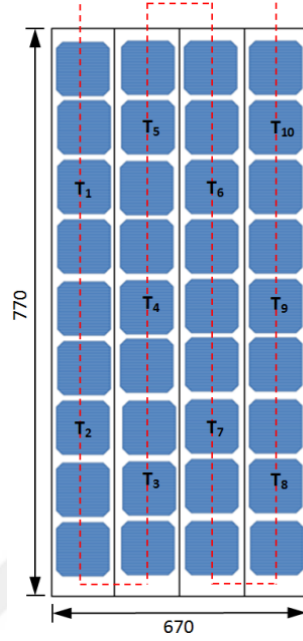
Deney düzeneği; çok kristalli fotovoltaiik panel, anemometre, ısı çiftler, multimetre, veri derleyici (datalogger) ve piranometreden oluşmaktadır. Polikristal fotovoltaiik panelin ekipmanları ve deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.3’de deney düzeneğinin genel görünüşünün fotoğrafı verilmiştir. Şekil 2.4’de boyutları, hücreler arasındaki bağlantı ve ısı çiftlerin bağlantıları verilmiştir.



Şekil 2.2. Deneysel kurulum ve ölçü cihazlarının şematik gösterimi

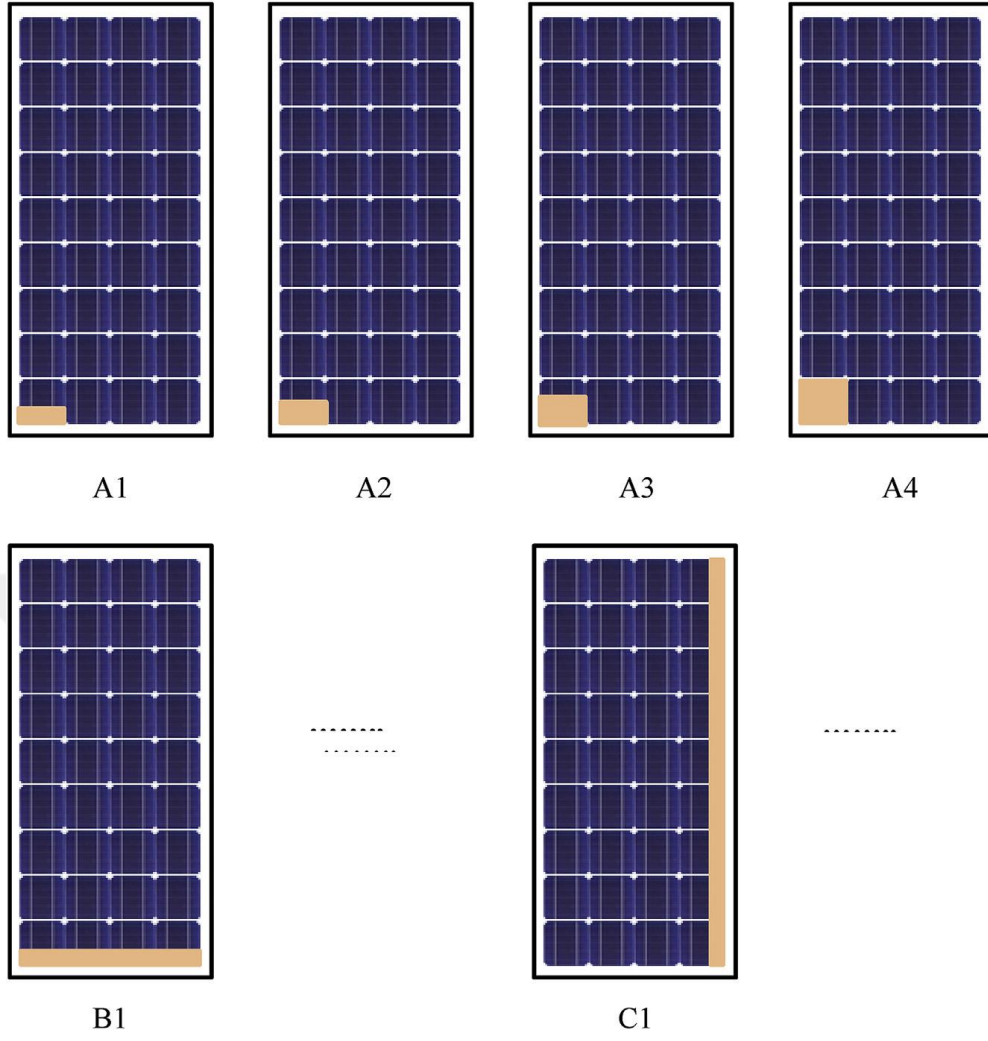


Şekil 2.3. Deneysel kurulum ve ölçü cihazlarının genel görünüşü

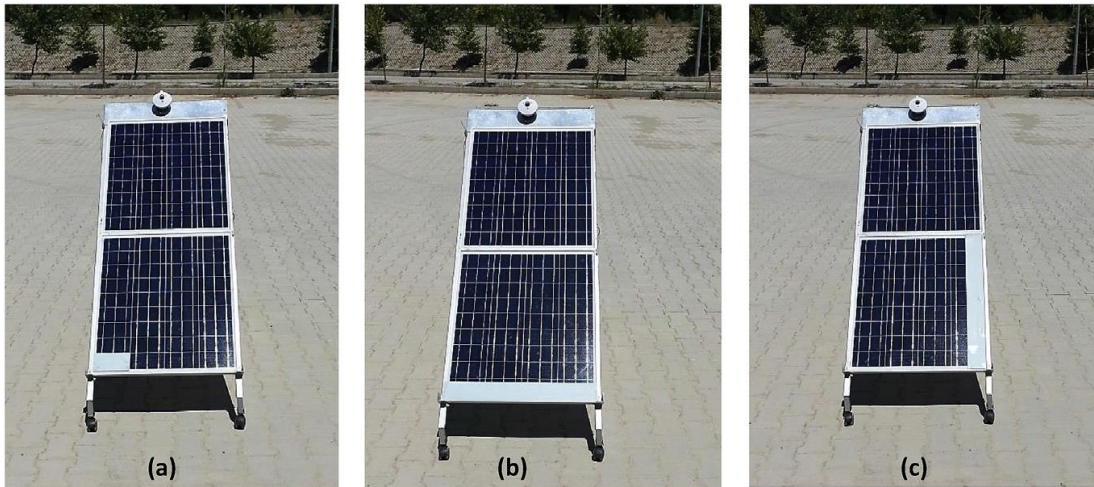


Şekil 2.4. Fotovoltaik panelin boyutları, ısı çiftlerinin planı ve hücreler arası seri bağlantı (kırmızı çizgi)

Panel gölgelenme elemanı olarak şeffaf olmayan malzemeler kullanılmıştır. Gölgeleme etkisi üç kısımda incelenmiştir. Birinci kısımda bir hücre üzerinde farklı yüzdelerde gölgelenmeler yapılmıştır. İkinci kısımda yatay, üçüncü kısımda ise dikey güneş hücrelerine farklı yüzdelerde gölgelenmeler uygulanarak değişim incelenmiştir. %0 gölgesiz, %100 tam gölgelenmeyi ifade etmektedir. Diğer gölgelenmeler (%25, %50, %75) ise hücresel, yatay ve dikey gölgelenmeler sistemlere uygulanmıştır. Her bir durum aynı güneş ışınlamı altında gölgelenmeyen fotovoltaik panel ile karşılaştırılarak tüm durumlar için, I-V ve P-V eğrileri, enerji-ekserji verimleri ve güç kayıp oranları verilmiştir. Şekil 2.5’de panelin üzerine uygulanan gölge miktarları gösterilmektedir. Şekil 2.6’da ise panelin üç farklı gölgelenme altındaki fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.5. Farklı gölgeleme oranları (A1) SR %25 (A2) SR %50 (A3) SR %75 (A4) SR %100, (B1) SR %25 ve (C1) %25



Şekil 2.6. PV panellerin gölgeleme oranları (a) hücresel (b) yatay (c) dikey

Gölgelendirme deneylerinden sonra sistemde hem fotovoltaiik panelleri soğutmak hem de atık ısıyı depolamak için Faz Değiştiren Madde (FDM) kullanılmıştır. FDM’li panelde gölgelenme parametresinin performansa etkisi incelenmiştir. %50 yatay ve %50 dikey gölgelenme durumları FDM’li sistemler için test edilmiştir. Deneylerde FDM olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan faz değıştiren maddenin termodinamik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Panel arkasına 2 mm kalınlıkta alüminyum plaka montaj edilip, 1 cm kalınlıkta depo içersine FDM doldurulmuştur.

Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan faz değıştiren maddenin termodinamik özellikleri [34]

Erime Sıcaklığı (°C)	27-32
Yoğunluk (kg/m^3)	1710,0
Erime Isısı (J/g)	187,49

2.1. Deneylerde ölçüm yapılan cihazlar

2.1.1. Anemometre

Deneylerde dış ortamın rüzgâr hızını ölçmek için anemometre kullanılmıştır. Tablo 2.3’de deneylerde kullanılan anemometrenin teknik özellikleri, Şekil 2.7’de kullanılan anemometrenin önden görünümü verilmiştir.

Tablo 2.3. Anemometrenin teknik özellikleri

Özellikler	DT- 619
Hava Hızı Ölçüm Aralığı	0 – 30 m/s
Sıcaklık Ölçüm	-10 - +60 °C
Doğruluk	$\pm 3\%$ - $\pm 0,20$ m/sn



Şekil 2.7. Deneylerde kullanılan anemometrenin önden görünümü

2.1.2. Isıl çiftler

Deneylerde ısı çiftleri panellerin alt ve üst taraflarında farklı noktalara yerleştirilerek, panellerin sıcaklıkları ölçülmüştür. Deney düzeneğinde sıcaklıklar 0,51 mm kalınlığında, T tipi, Bakır-Konstant ısı çifti ile ölçülmüştür. Panel üzerinde toplam 10 noktadan sıcaklık ölçülmüştür. Isıl çiftler OMEGA marka olup hassasiyeti $\pm 0,5\%$, sıcaklık aralığı $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Şekil 2.8’de kullanılan ısı çiftinin görünümü verilmiştir.



Şekil 2.8. Isıl çift (Cu-Co) uçlarının lehimlenmiş görünümü

2.1.3. Dijital multimetre

Multimetre; akım (Amper), gerilim (Volt), direnç (Ohm) ve kısa devre ölçebilen elektronik bir ölçü aletidir. Deneylerde sistemin alternatif akım ve gerilim değerleri VC 97 modelinde bir dijital multimetre ile ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan multimetrenin teknik özellikleri Tablo 2.4’de, multimetrenin önden görünüşü ise Şekil 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.4. Multimetrenin teknik özellikleri

Fonksiyonlar	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
DC Gerilim	400mV/4V/40V/400V/1000V	$\pm (0,5\%+4)$
AC Gerilim	400mV/4V/40V/400V/750V	$\pm (0,8\%+10)$
DC Akım	400 μ A/4000 μ A/40mA/400mA/10A	$\pm (1\%+10)$
AC akım	400 μ A/4000 μ A/40mA/400mA/10A	$\pm (1,5\%+10)$
Direnç	400 Ω /4k Ω /40k Ω /400k Ω /4M Ω /40M Ω	$\pm (0,8\%+4)$



Şekil 2.9. VC 97 Dijital multimetre önden görünümü

2.1.4. Datalogger

Datalogger istenilen verileri belirli bir süre boyunca, belirli aralıkla kaydeden cihazlardır. Datalogger sıcaklık, güneşlenme değerleri, nem, su seviyesi, basınç, rüzgar hız ve yönü, birçok fiziksel veriyi ve çevresel koşulları kaydeden cihazlardır. Deneylerde Isıl çiftlerde oluşan gerilim farkı ve pironometre ile ölçülen ışıyım değeri datalogger ile meteorolojik parametrelere çevirilerek, bilgisayara yüklenmiş ve EXCELİNUX yazılımı kullanılarak kaydedilmiştir. Deneylerde KEITHLEY marka 2701 modelinde Datalogger cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.10’da deneylerde kullanılan Datalogger önden görünümü verilmiştir.

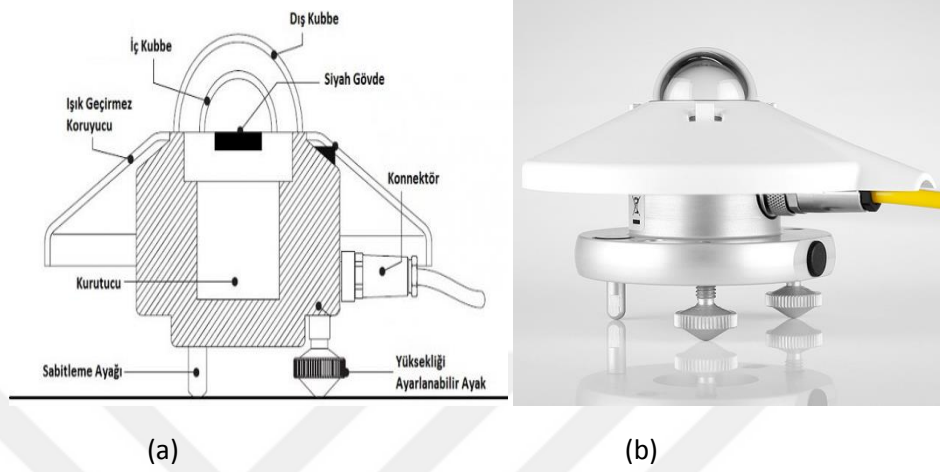


Şekil 2.10. Datalogger önden görünümü

2.1.5. Piranometre

Piranometre yatay birim yüzeye düşen global ışıyım miktarını ölçen alettir. Piranometre, 2 katlı camdan oluşan yarım kürenin altına yerleştirilmiş ve bakır-konstantan ısı çiftleri içeren siyah metalden oluşur. Isıl çiftlerin sıcak eklemleri siyah metal yüzeyin alt tarafına yerleştirilmiştir. Soğuk eklemler ise radyasyon almayacak biçimde yerleştirilmiştir. Pironometre’nin çalışma prensibi siyah yüzeyin gelen ışığı emerek oluşan elektrik hareket gücü sayesinde soğuk eklemden daha yüksek bir sıcaklığa ulaşmasıdır. 10 mV ila 20 mV arasında oluşan bu elektrik hareket gücünün belli bir zaman aralığında integrali alınır. Ve buradan elde edilen sonuç global radyasyonun ölçüm değeridir. Deneylerde güneş ışıyımı KIPP&ZONEN marka CMP3 model piranometre ile

ölçülmüştür. Pironometrenin teknik resmi ve genel görünüşü Şekil 2.11’de verilmiştir. Tablo 2.5’de deneylerde kullanılan pironometrenin teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.11. Pironometre (a) teknik resim (b) genel görünüş [70].

Tablo 2.5. Pironometrenin teknik özellikleri

Dalga boyu aralığı (geçirgenliği %50’den fazla)	300 ~ 2800 nm
Maksimum Işınım	2000 W/m ²
Çalışma sıcaklığı, °C	-40° ~ +80°C
Hassasiyet	±5% (-10° ~ +40°C)
Non-linerite	< ±2.5% (0 ~ 1000 W/m ²)
Tilt tepkisi	< ±2% (1000 W/m ² (±80°))
Tepki Süresi	18 s

2.2. Sistemin termodinamik analizi

2.2.1. Enerji analizi

Enerji, iş ya da iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Enerji; fiziksel bir sistemin ne kadar iş ya da ısı alışverişi yapabileceğini belirleyen bir durum fonksiyonudur. Enerji korunumludur başka bir ifadeyle evrende var olan enerji yok olmaz, sadece biçim değiştirebilir. Termodinamiğin birinci kanunu, enerjinin termodinamik bir kavram olarak

korunumunu ve dönüşümünü ifade etmektedir. Bir sistem için enerji dengesi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$e_{depolanan} = e_{girdi} - e_{çıktı} \quad (2.1)$$

Burada $e_{depolanan}$ sistemde depolanan enerjiyi e_{girdi} ve $e_{çıktı}$ sırasıyla sisteme giren ve sistemden çıkanların enerjilerini göstermektedir. Sistemden çıkanların enerjisi ise;

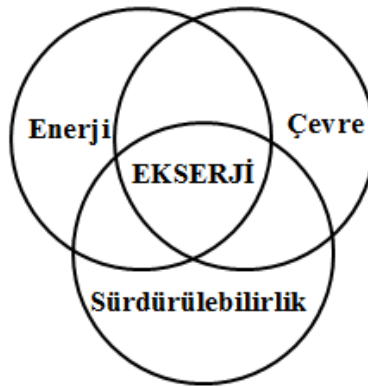
$$E_{çıktı} = e_u + e_k \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada e_u ürünlerin enerjisini ve e_k enerji kaybını göstermektedir [71].

2.2.2. Ekserji analizi

2.2.2.1. Ekserjinin tanımı

Çevre sıcaklığında çalışan enerji sistemleri için, “kullanılabilir enerji” olarak da bilinen ekserjiyi, enerjinin faydalı kısmı olarak düşünebiliriz. Yani enerjinin faydalı kısmı, enerjinin başka enerji formuna dönüştürülebilen kısmıdır. Tablo 2.6’da enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.12. Ekserjinin disiplinler arası üçgeni [72].

Ekserji kavramının en önemli boyutlarını maddeler halinde ifade edecek olursak;

- Ekserji, sistem ve çevrenin bir arada oluşturduğu kombine çevrimden elde edilebilen maksimum teorik iştir. Buradaki sistem, verilen bir durumdan çevre ile denge durumu olan ölü duruma geçer. Ölü durumda kombine sistem enerjiye sahiptir ancak ekserjiye sahip değildir.
- Sistemin tüm durumları için ekserji, sıfıra eşit ya da sıfırdan büyüktür.

- Değeri sistem durumu ile belirli olduğundan ekserji, ekstensif özelliktir ve burada bahsi geçen çevre daha önceden belirlenmiş olmalıdır. Ekserji, birim kütle ya da birim mol başına göre yazıldığında intensif özellik olarak temsil edilebilir.
- Ekserji, sistem durumunun çevresel durumdan uzaklaşma ölçüsüdür. Verilen bir durumdaki T sıcaklığı ile çevrenin T_0 sıcaklığı arasındaki fark büyüdükçe ekserji değeri de buna bağlı olarak büyür.
- Çevreye göre göreceli olarak belirlendiğinden, sistemin kinetik ve potansiyel enerji büyüklüklerinin tamamı ekserji büyüklüğüne katılır.
- Ekserji, kimyasal ve termomekaniksel ekserjilerin toplamı şeklinde ifade edilir. Termomekaniksel ekserji, fiziksel, kinetik ve potansiyel ekserji şeklinde sınıflandırılır.
- Ekserji, sistemler arasında transfer edilebilir ve sistemler içindeki tersinmezlikler yüzünden tahrip edilebilir. Bununla beraber ekserji, bir ekserji dengesi ile açıklanabilir [73].

Tablo 2.6. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [72].

Enerji	Ekserji
Sadece madde ve enerji akış parametrelerine bağlı, çevre parametrelerinden bağımsızdır.	Madde ve enerji akış parametrelerinin yanı sıra çevre parametrelerine de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değere sahiptir. (Einstein'ın $E=mc^2$ bağıntısına göre)	Sıfıra sahip değeri vardır (Çevre ile dengede olduğu ölü durumda sıfırdır).
Enerji, hareket veya hareket üretebilme kabiliyetidir.	Ekserji, iş veya iş üretebilme kabiliyetidir.
Daima korunur. Yoktan var edilemez veya yok edilemez.	Tersinir proseslerde korunur, tersinmez proseslerde daima kaybolur.
Niceliğin bir ölçütüdür.	Niceliğin ve entropi nedeniyle niteliğin (kalitenin) bir ölçütüdür.

2.2.3. Fotovoltaik sistemin enerji dengesi

Fotovoltaik sistemin enerji dengesi aşağıdaki gibi verilir.

$$E_{nPV} = V_m I_m \quad (2.3)$$

Elektrik gücü çıkışı, PV sistemlerinden gelen gerilimin ve akımın bir ürünüdür. Bu dönüşüm etkinliği, sabit güneş radyasyonu altında bile sabit değildir. Bununla birlikte, bir maksimum güç noktası vardır ve bu noktadaki gerilim değeri V_m , açık devre geriliminden

(V_{oc}) daha düşüktür. Akım I_m ise, kısa devre akımından (I_{sc}) düşük fakat ona çok yakın bir değerdir.

2.2.4. Fotovoltaik sistemin enerji verimliliği

Fotovoltaik sistemin enerji verimliliği sistemin çıktı enerjisinin (elektrik ve termal enerji), fotovoltaik yüzey üzerine ulaşan girdi enerjisine (güneş enerjisine) oranı olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_I = \frac{V_m I_m}{I_s A} \quad (2.4)$$

Maksimum güç noktası, aşağıdaki gibi doldurma faktörü olarak adlandırılan bir terimle adlandırılmıştır

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5), denklem (2.4)'de yerine yazıldığında,

$$\eta_I = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{I_s A} \quad (2.6)$$

Güneş fotovoltaik hücreleri için, verimlilik ifadesi ışınsal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesini ölçer.

2.2.5. Fotovoltaik sistemin ekserji dengesi

Fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektrik ekserjisi, mevcut enerjinin tamamını faydalı olarak kullanmayı amaçlar. Fotovoltaik sisteme bağlı ekserji üretimi ise üç bileşenden oluşmaktadır; i-) elektrik kazancı ii-) dışsal ve iii-) içsel kayıplardır. Fotovoltaik sistem için yukarıda bahsedilen bileşenler için ekserji dengesi aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV} = Ex_{PV,elektrik} - Ex_{PV,termal} - Ex_{PV-d,elektrik} \quad (2.7)$$

Burada $Ex_{PV,elektrik}$ fotovoltaik sisteminin elektrik ekserjisini, $Ex_{PV-d,elektrik}$ ve $Ex_{PV,termal}$ sırasıyla içsel ve dışsal kayıplardan kaynaklanan ekserji yıkımını göstermektedir. İçsel kayıplar elektrik ekserjisi yıkımından ve dışsal kayıplar ise ısı kaybından kaynaklanmaktadır. Fotovoltaik sistemin elektrik ekserjisi, elektrik enerjisine benzer şekilde aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV,elektrik} = V_{oc}I_{sc} \quad (2.8)$$

Elektrik ekserji kaybı aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV-d,elektrik} = V_{oc}I_{sc} - V_mI_m \quad (2.9)$$

Fotovoltaik sistemdeki termal ekserji, fotovoltaik sistemin yüzeyinden çevreye olan ısı kaybından oluşmaktadır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV,termal} = \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) x [h_{ca}A_c(T_c - T_a)] \quad (2.10)$$

$$h_{ca} = 5,7 + (3,8xv_r) \text{ için} \quad 0 \leq v_r \leq 7 \text{ ms}^{-1} \quad (2.11)$$

Burada v_r fotovoltaik sistemin hemen üzerinde ölçülen rüzgar hızıdır.

Denklem (2.8)-(2.10)'de elde edilen denklem (2.7) numaralı denklemde yerine konulursa, Fotovoltaik sistemin toplam ekserji değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Ex_{PV} = V_mI_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) x [h_{ca}A_c(T_c - T_a)] \quad (2.12)$$

2.2.6. Fotovoltaik sistemin ekserji verimliliği

Fotovoltaik sistemin ekserji verimi, fotovoltaik sistemin ekserji değerinin fotovoltaik sistem yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserji değerine oranı ile bulunur.

$$\psi_{PV} = \frac{V_mI_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) x h_{ca}A_c(T_c - T_a)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A} \quad (2.13)$$

Burada $Ex_{güneş}$ güneş kolektörünün yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserjisidir. Aşağıda verilen denklemler kullanılarak güneş radyasyonunun ekserjisini üç farklı yaklaşımla değerlendirilebilir. Jeter tarafından türetilmiş Denklem 2.14 güneş radyasyonunun ekserjisinin değerlendirilmesinde kullanılan en basitleştirilmiş olanıdır.

Burada güneş radyasyonunun ekserjisi güneş sıcaklığında akış sıcaklığı olarak kabul edilir. Diğer bir yaklaşım Denklem 2.16 ile Petela tarafından geliştirilmiştir. Petela tarafından verilen güneş radyasyonu ekserjisi güneş sıcaklığının da termal radyasyon olarak kabul edilir. Denklem 2.17’de direk (I_{be}) ve difüz (I_{dif}) radyasyon bileşenleri ile güneş radyasyonunun ekserjisi verilmiştir.

$$Ex_{güneş} = \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) x I_s \quad (2.14)$$

$$Ex_{güneş} = \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)\right] x I_s \quad (2.15)$$

$$Ex_{güneş} = I_{be} x \left(1 - \frac{4T_a}{3T_s}\right) + I_{dif} \left(1 - \frac{4T_a}{3T_s^*}\right) \quad (2.16)$$

Burada T_s güneş radyasyon sıcaklığıdır (5777 K) ve T_s^* aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{T_s}{T_s^*} = 0,9562 + 0,2777 \ln\left(\frac{1}{f}\right) + 0,0511f \quad (2.17)$$

Burada f difüz radyasyon yansıtma katsayısıdır [40].

2.2.7. Belirsizlik analizi

Deneysel belirsizlikler ve hatalar, sistemde kullanılan cihaz ve ölçüm aletlerinin seçiminden, çalışma durumundan, işlem koşullarından, kalibrasyonundan, çevre koşullarından ve okumalardan dolayı ortaya çıkar. Bu hata ve belirsizliklerin belirlenmesinde ‘Belirsizlik Analizi’ kullanılmaktadır.

Belirsizlik analizinin hem deneysel sonuçların yorumlanmasında, hem de sistem kurulumu öncesindeki tasarım çalışmalarında uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, kullanılan tüm ölçüm aletlerinin yapısından kaynaklanan belirsizlikle ilgili bilgiler, ölçüm aletlerinin üreticilerinden alınmış ve Denklem 2.18 yardımıyla elde edilmiştir [74].

Burada ölçülmesi gereken büyüklük R, bu büyüklüğe etki eden n tane bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ise $R = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ şeklinde ifade edilir. Her bir

bağımsız değişkene ait hata oranları $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı W_R ise [75],

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

akım ve güç için eşitlik;

$$I = V/R \quad (2.19)$$

ve

$$P = IV \quad (2.20)$$

$$W_I = \left[\left(\frac{\partial I}{\partial V} W_V \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R} W_R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

$$W_P = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial I} W_I \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial V} W_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.22)$$

$$W_\eta = \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial V_m} W_{V_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I_m} W_{I_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I_s} W_{I_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I_s} W_A \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

$$W_{\eta_{II}} = \left[\left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial V_m} W_{V_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial I_m} W_{I_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial T_a} W_{T_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial T_c} W_{T_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial h} W_h \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial T_s} W_{T_s} \right)^2 \left(\frac{\partial \eta_{II}}{\partial I_s} W_{I_s} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

Sistemin belirsizlik analizi eşitlikleri (2.21-2.24) kullanılarak hesaplandı ve ölçülen değerler Tablo 2.7’de gösterilmiştir.

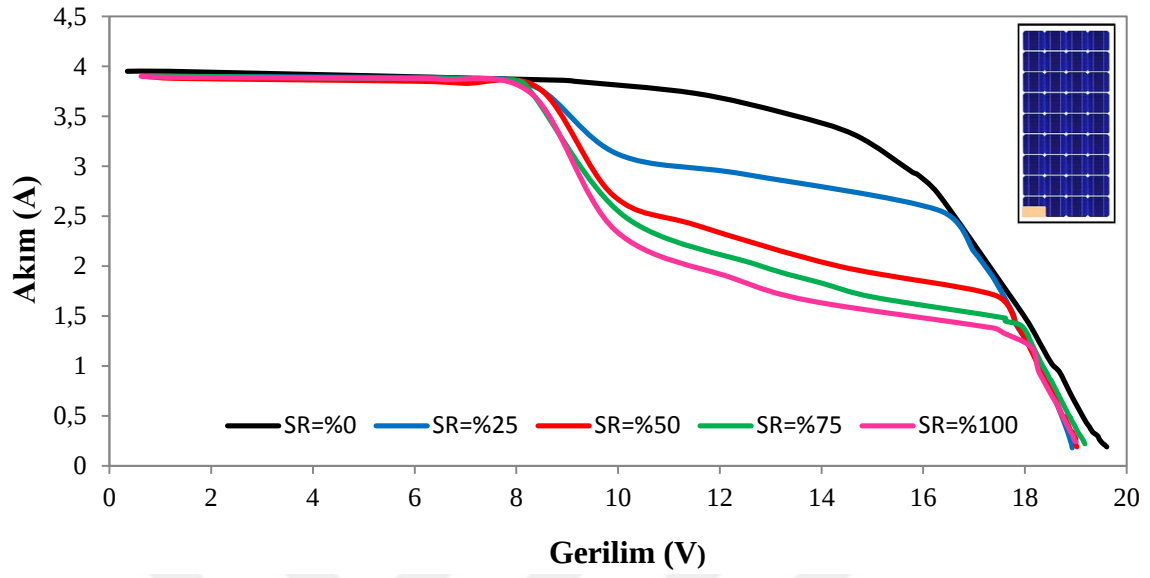
Tablo 2.7. Deneysel ölçüm sistemlerinin ve hesaplanan değerlerin belirsizlik değerleri

Parametre	Birim	Belirsizlik (%)
Sıcaklık	°C	±0,776
Hız	m/s	±0,03
Güneş ışınlımı	W/m ²	±0,02
Akım	A	±0,85
Güç	W	±1,52
Enerji verimliliği	-	±1,29
Ekserji verimliliği	-	±17,54

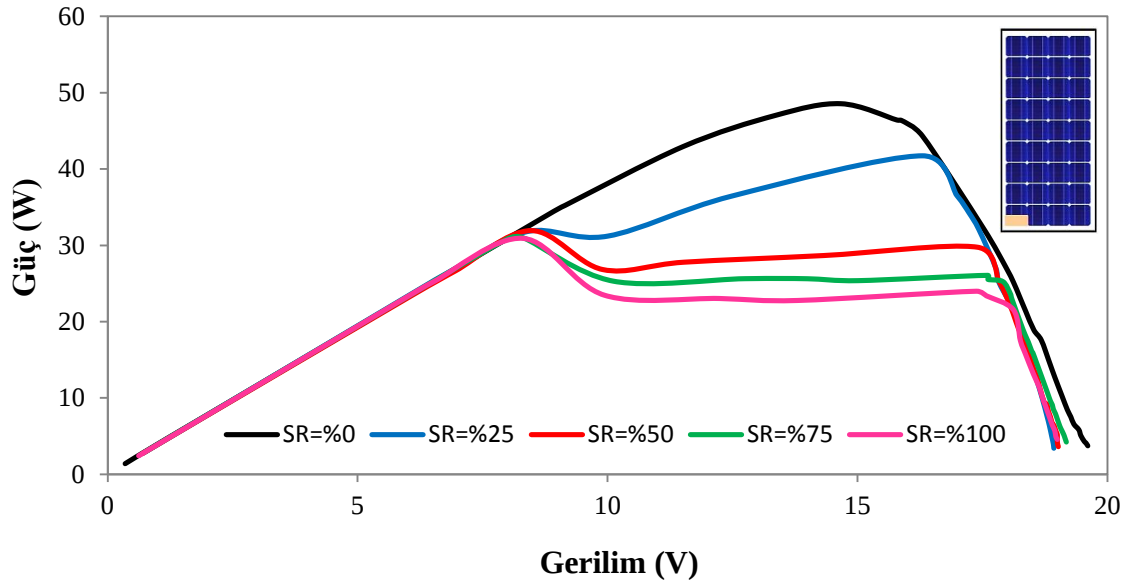
3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu deneysel çalışmada fotovoltaiik panel üzerinde kısmı gölgelenme etkisi termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu kullanılarak incelenmiştir. 36 hücrenin seri bağlanması ile oluşan çok kristal silisyum panel üzerinde gölgelenme etkisi hücresel, yatay ve dikey olmak üzere üç kısımda incelenmiştir. Gölgelendirme deneylerinden sonra faz değıştiren madde kullanılarak ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) %50 yatay ve %50 dikey gölgelenme durumu için FDM’li sistem incelenmiştir. Uygulanan her bir gölgelenme pozisyonları ve gölgeleme oranları için fotovoltaiik panelin akım, gerilimi, sıcaklık değeri, yüzeyine gelen ışıının şiddeti, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı değeri ölçülmüştür. Ölçülen bu değlerden faydalanarak I-V, P-V eğrileri ile enerji-ekserji grafikleri çizdirilmiştir.

Birinci kısımda bir hücre üzerine farklı büyüklükte gölgelenme uygulanmıştır. SR %0 gölgesiz durumu, SR %100 hücrenin tamamen gölgelendiği durumu, SR %25 hücrenin %25, SR %50 hücrenin %50, SR %75 hücrenin %75 oranında gölgelendiğini belirtmektedir. Şekil 3.1’de (a) ve (b) I-V ve P-V karakteristiği sırasıyla hücresel olarak farklı gölgelenme oranları için gösterilmiştir. P-V eğrileri üzerinden maksimum güç (P_m) değeri belirlenmiş ve bu güç değeri için maksimum akım (I_m) ve maksimum gerilim (V_m) elde edilmiştir. I-V karakteristiğinden faydalanarak her bir gölgelenme etkisi için kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.1. PV paneli hücresel gölgelenme altındaki karakteristikleri (a) I-V (b) P-V

Şekil 3.1 incelendiğinde gölgelenme oranının artmasıyla V_{oc} geriliminde küçük miktarda azalmalar meydana gelmiştir. V_{oc} açık devre gerilimindeki gölgeli hücrenin ısınmasından kaynaklanan azalma P-V karakteristiğinde de görülmektedir. Gölgelenme etkisi maksimum akım ve maksimum gerilim değerlerini değiştirmiştir. Bu değerlerin değişmesi maksimum güç değerini değiştirmiştir. Şekil 3.1'deki parametrelerden faydalanarak modülün η (verimlilik), FF (dolum çarpanı), ΔP ($P_{m,gölgesiz} - P_{m,gölgeli}$), $\Delta P/P$ (gölgesiz duruma göre güç kayıp oranı) değerleri hesaplanmıştır.

Burada $\Delta P/P$ (%) oranı,

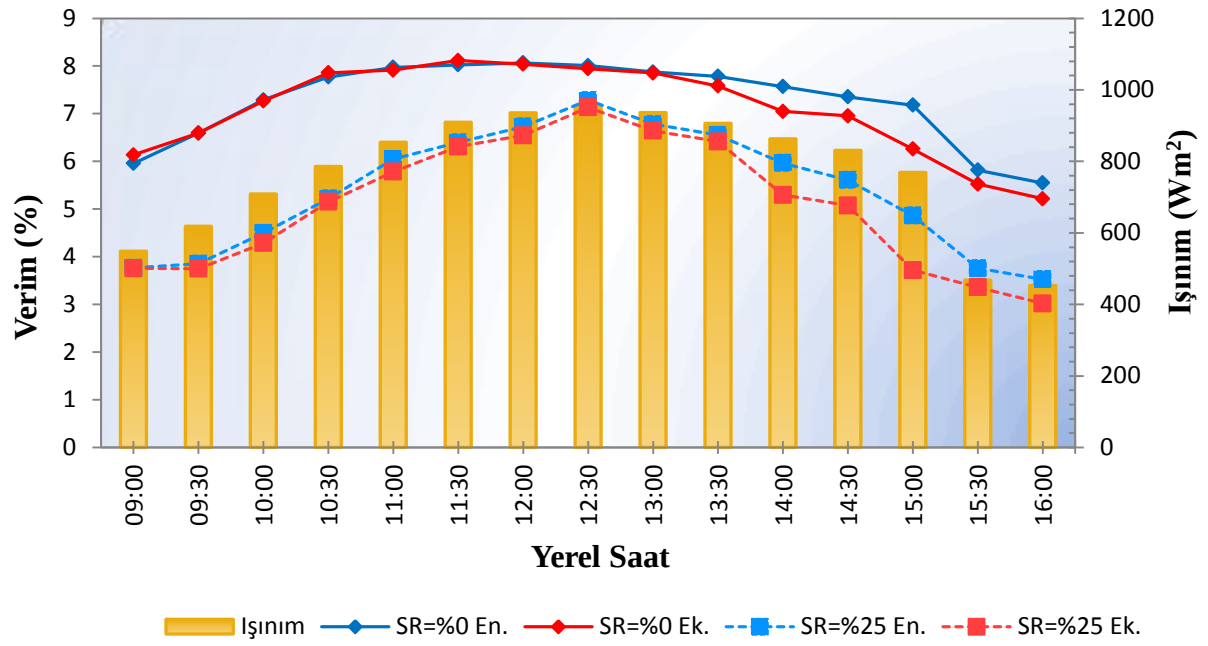
$$\frac{\Delta P}{P} (\%) = \frac{P_{m,gölgesiz} - P_{m,gölgeli}}{P_{m,gölgesiz}} \times 100 \quad (3.1)$$

ifadesi kullanılarak elde edilir.

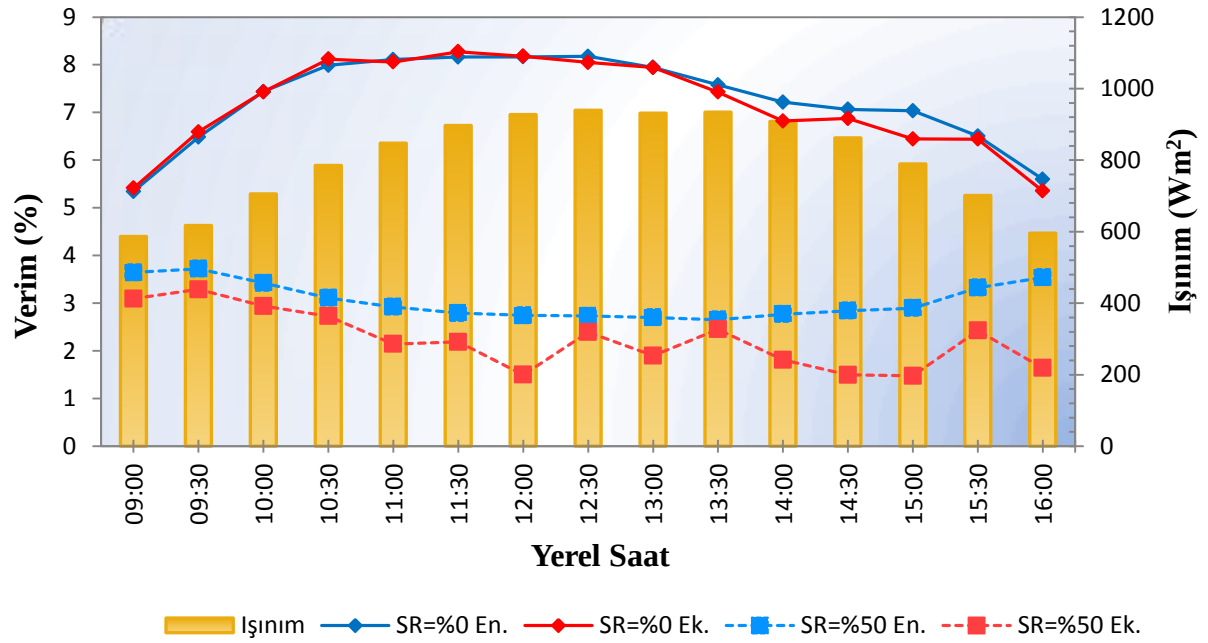
Tablo 3.1. PV panelin hücresel gölgelenme altında kayıp oranları

Hücresel gölgelenme			
SR (Gölgelenme Oranı)	FF (%)	ΔP (W)	$\Delta P/P$ (%)
0,00	52,68	0,00	0,00
0,25	45,97	3,58	9,06
0,50	25,67	25,06	65,88
0,75	23,47	26,43	66,38
1,00	22,80	27,33	69,22

Bir hücre üzerindeki gölgelenme arttıkça dolum çarpanı azalmaktadır. Gölgesiz durumda dolum çarpanı %52,68 iken bir hücrenin tamamen gölgelenmesi ile %22,80 olmuştur. ΔP ifadesi gölgesiz durumdaki maksimum güç ile gölgeli durumdaki maksimum güç arasındaki farktır ve gölgelenme etkisi ile kaybedilen gücü belirtmektedir. Her bir gölgelenme etkisi için güç kaybı artmaktadır. Denklem 3.1'den faydalanarak $\Delta P/P$ (%) elde edilen güç kayıp yüzdeleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu değerlere göre hücrenin %25'i gölgelendiğinde panelin çıkış gücünde %9,06 hücrenin %50'si gölgelendiğinde panelin çıkış gücündeki kayıp %65,88, hücrenin %75'i gölgelendiğinde panelin çıkış gücü %66,38 azalmıştır ve bir hücrenin tamamının gölgelenmesi ile panelin çıkış gücü %69,22 azalmaktadır ve kaybedilen güç 27,33 W ulaşmıştır.

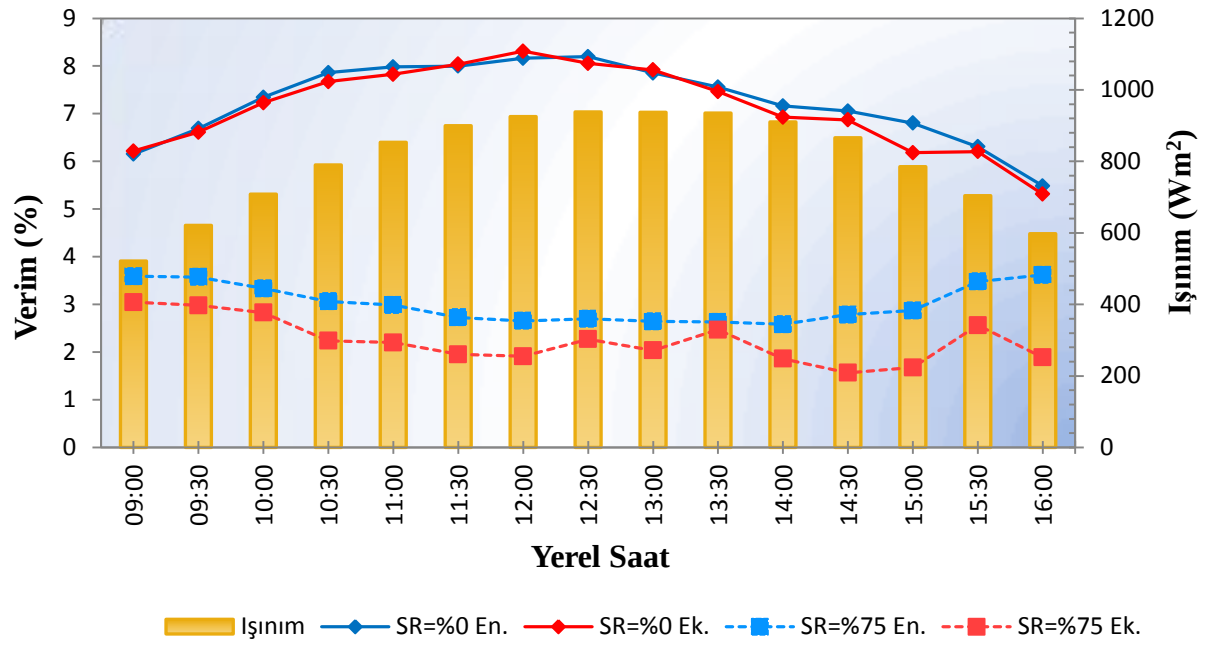


(a)

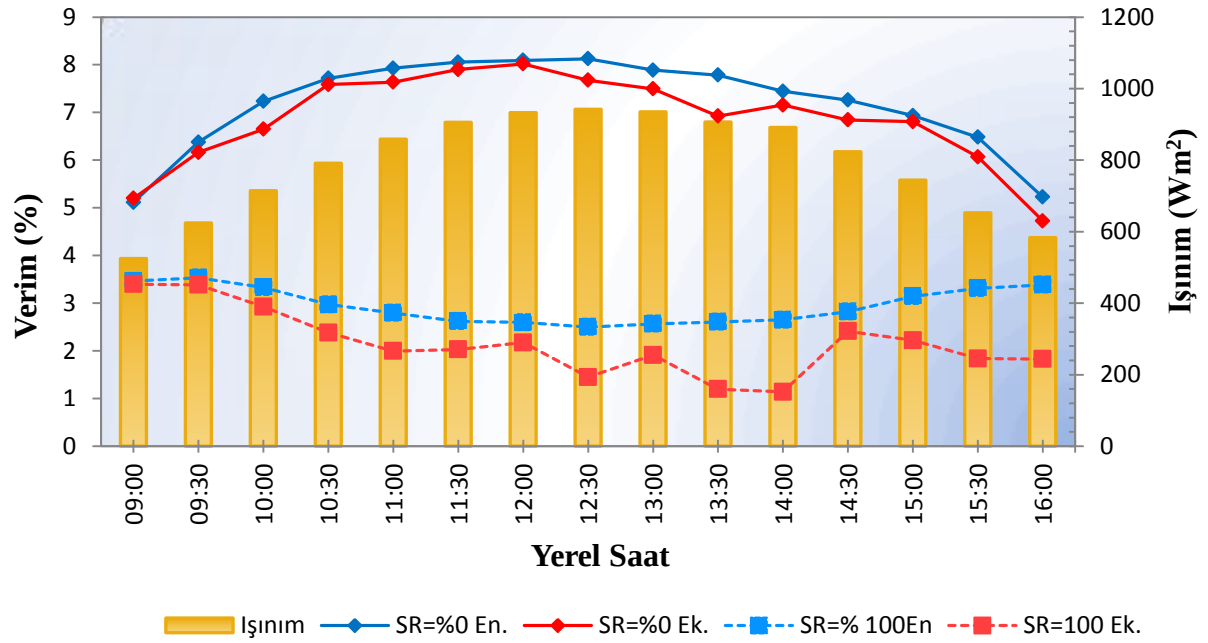


(b)

Şekil 3.2. PV panelin hücresel gölgelenme altında enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100



(c)

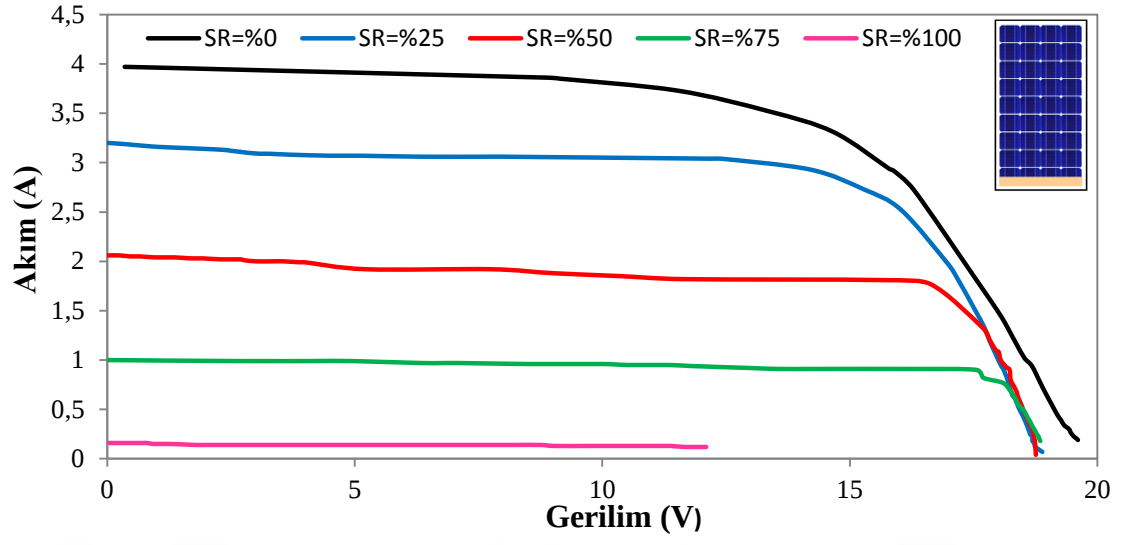


(d)

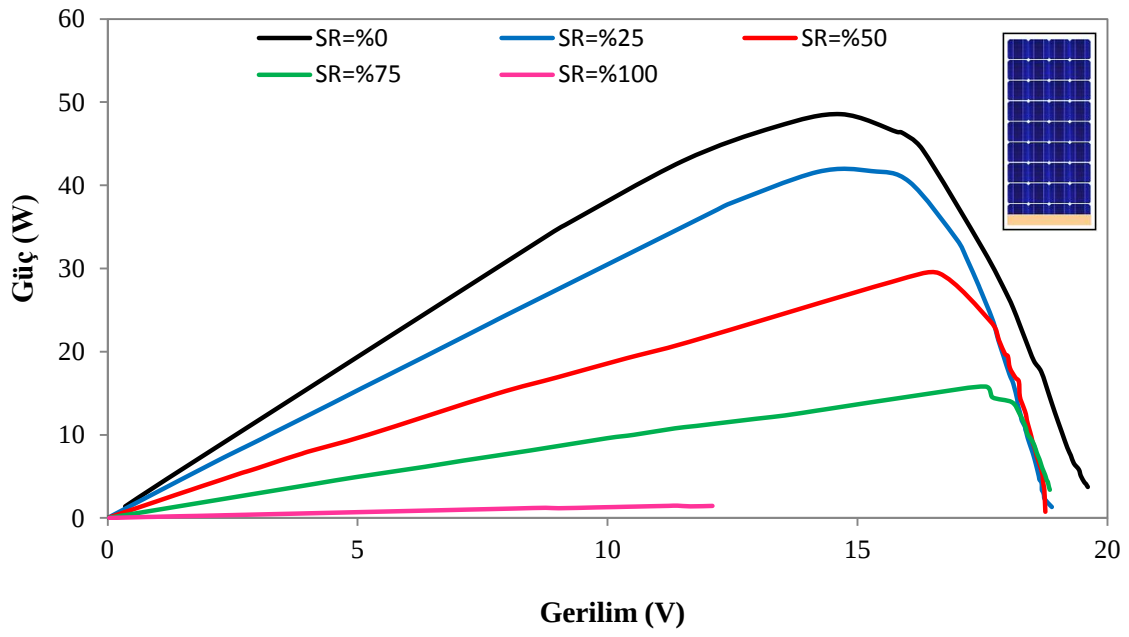
Şekil 3.2. PV panelin hücresel gölgelenme altında enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100 (devamı)

Şekil 3.2’de fotovoltaiik panelin farklı hücreseel gölgelenme altındaki enerji-ekserji değeri verilmıştır. Ölçümler sırasında ışıının şiddeti $430,62 \text{ W/m}^2$ ile $955,87 \text{ W/m}^2$ arasında değişmektedir. $SR=0$ (gölgesiz durum) olduğunda panelin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla minimum %5,54 ve %5,51 maksimum %8,06 ve %8,03 arasında değişmektedir. Panelin verimliliği gölgelenme oranının artmasıyla azalmıştır. Bu değerler panelin tek bir hücresinin %100 gölgelenmesi durumunda enerji ve ekserji verimliliği %2,5 ve %1,5 değerine ulaşmıştır. Dış ortam sıcaklığı 35°C iken gölgesiz panelin yüzey sıcaklığı $46,92^\circ\text{C}$ iken panelin %25 gölgelenmesi durumunda panel yüzey sıcaklığı $47,46^\circ\text{C}$ ulaşmıştır. Panelin %50 gölgelenmesi durumunda ise panel yüzey sıcaklığı $50,91^\circ\text{C}$ civarındadır. Hücre üzerinde gölgelenme miktarı artıkça gölgeli hücrenin sıcaklığı da artmaktadır.

İkinci kısımda panele yatay olarak farklı büyüklükte gölgelenme uygulanmıştır. Şekil 3.3’de (a) ve (b) I-V ve P-V karakteristiği sırasıyla farklı gölgelenme oranları için gösterilmiştir. Şekil 3.3 incelendiğinde V_{oc} gerilimi gölgelenme artıkça, azalmıştır. Buna bağılı olarak maksimum güçteki azalma P-V karakteristiğinde görülmektedir. I-V ve P-V karakteristiklerinden faydalanarak her bir gölgelenme durumu için panelin I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , P_m ifadeleri belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak FF , ΔP ve $\Delta P/P$ değerleri hesaplanmıştır. Tablo 3.2 incelendiğinde gölgesiz durumda dolum çarpanı %51,97 iken panelin bir dizisinin yatay olarak tamamen gölgelenmesi ile %0,34 olmuştur. Bu durumda çıkış gücü %99,98 azalmaktadır, Panelin maksimum gücü neredeyse 0 elde edilir.



(a)



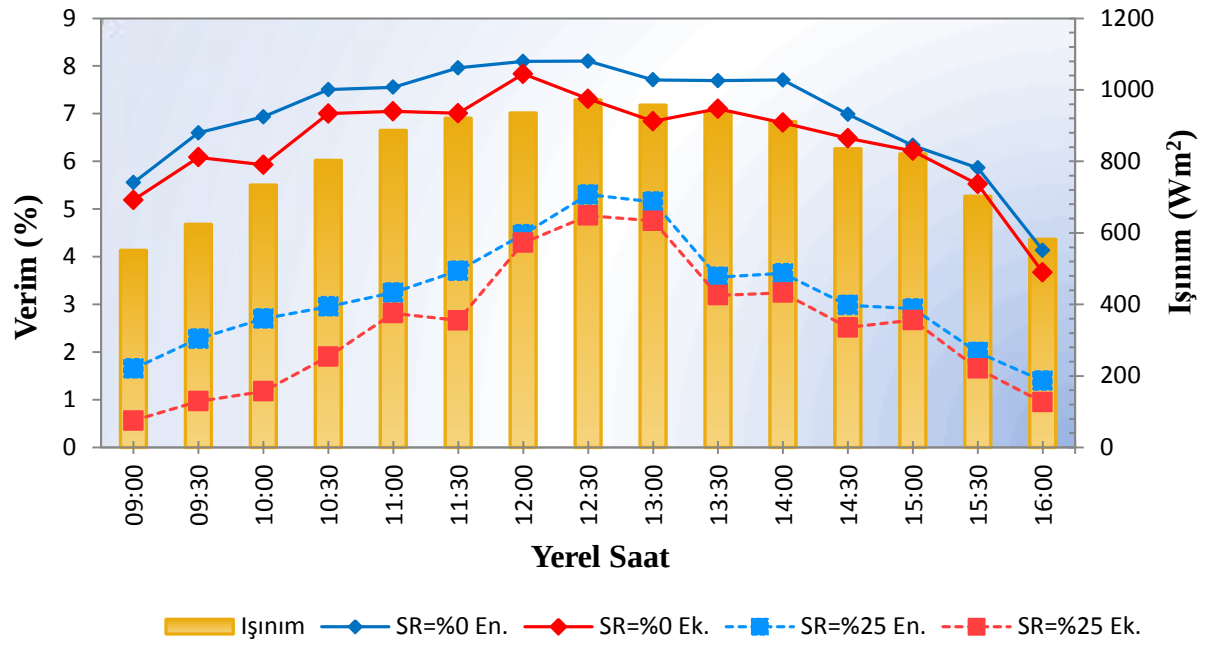
(b)

Şekil 3.3. PV panelin yatay gölgelenme altındaki karakteristikleri (a) I-V (b) P-V

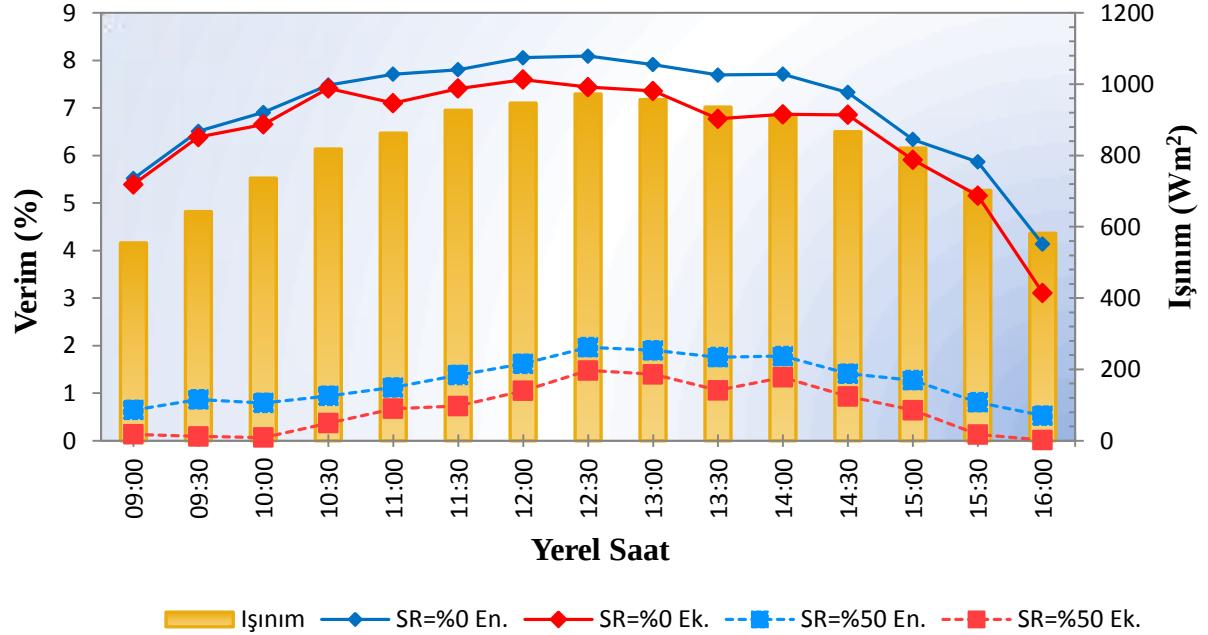
Tablo 3.2. PV panelin yatay gölgelenme altında kayıp oranları

Yatay gölgelenme			
SR (Gölgelenme Oranı)	FF (%)	ΔP (W)	$\Delta P/P$ (%)
0,00	51,97	0,00	0,00
0,25	48,84	14,02	34,53
0,50	26,23	29,67	75,97
0,75	11,30	37,74	92,96
1,00	0,34	40,60	99,98

Şekil 3.4’de fotovoltaik panelin farklı yatay gölgelenme altındaki enerji-ekserji değerleri verilmiştir. Sonuçlar gölgesiz panelle karşılaştırılmıştır. Panelin verimliliği gölgelenme oranının artmasıyla azalmıştır. Yatay gölgelenme paneldeki tüm baypas diyotları devre dışı bıraktığından en düşük güç edilmiştir. SR=%0 (gölgesiz durum) olduğunda panelin enerji ve ekserji verimliliği %8,10 ve %7,83 ‘dür. Panelin %25 yatay olarak bir dizisinin gölgelenmesinde %5,3 ve %4,86 düşmüştür. Panelin %50 gölgelenmesinde ise maksimum enerji ve ekserji verimliliği %1,96 ve %1,47 ‘ye ulaşmıştır.

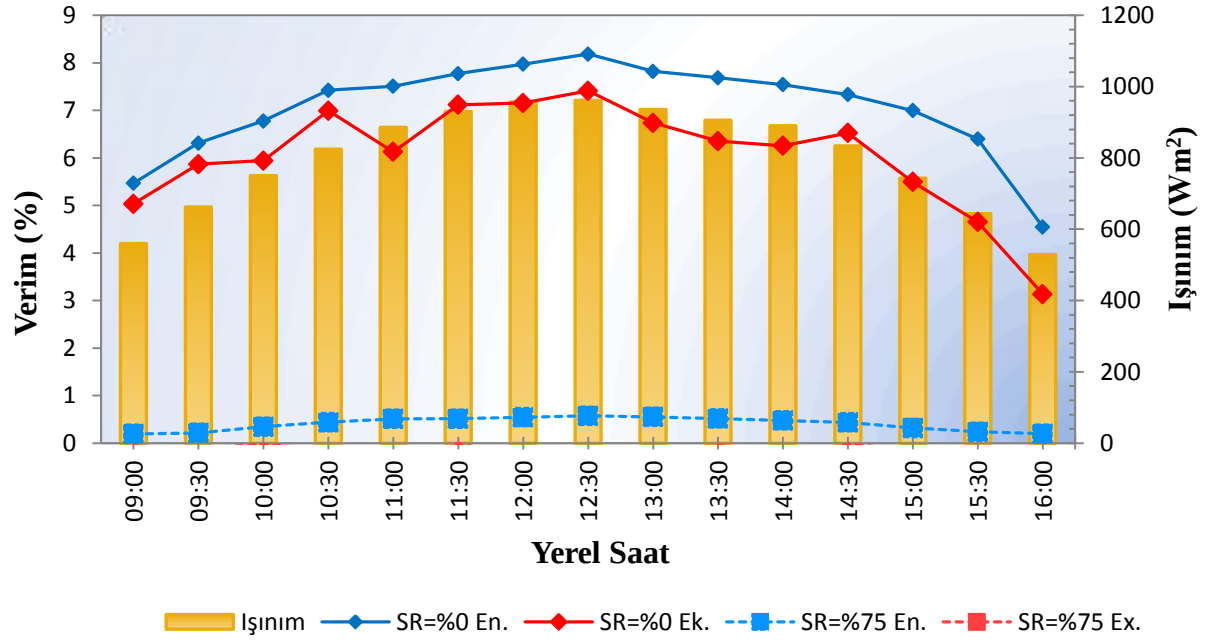


(a)

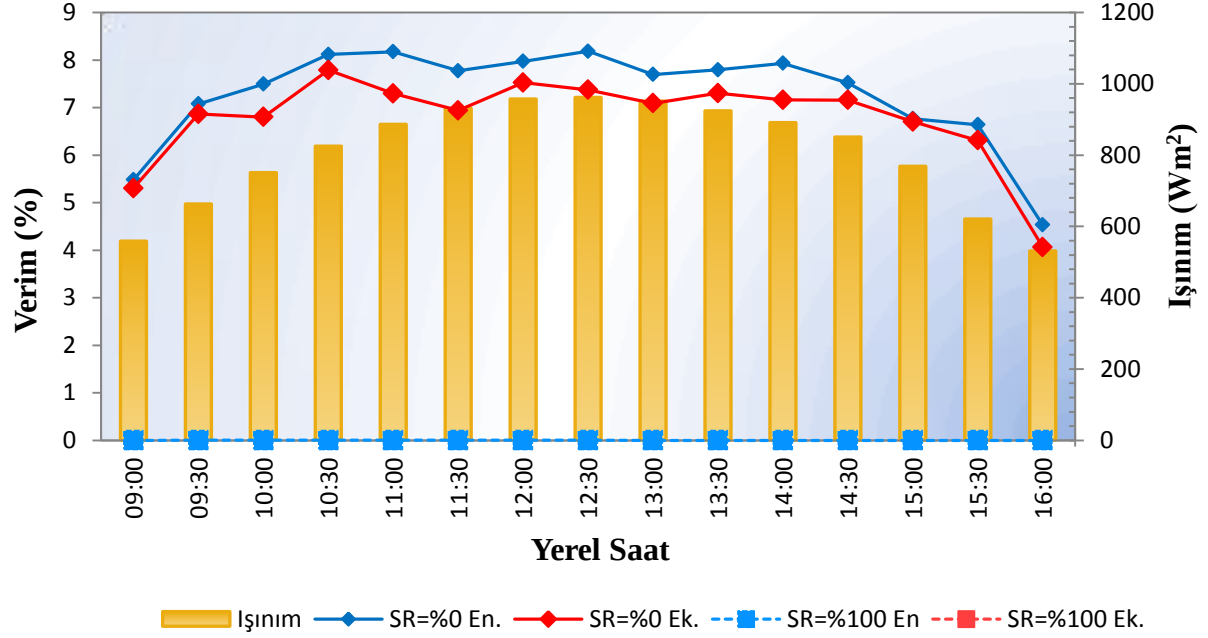


(b)

Şekil 3.4. PV panelin yatay gölgeleme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100



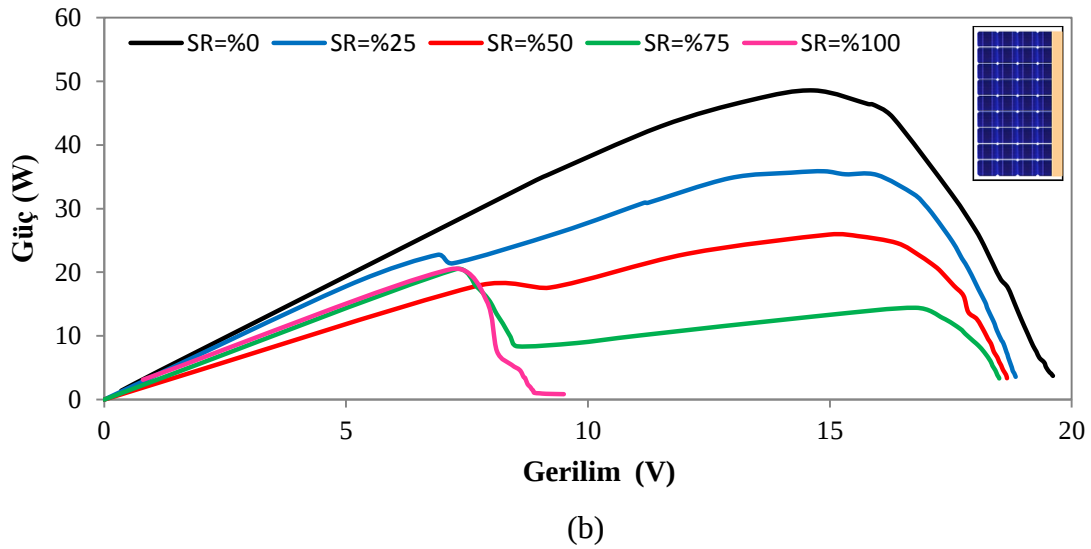
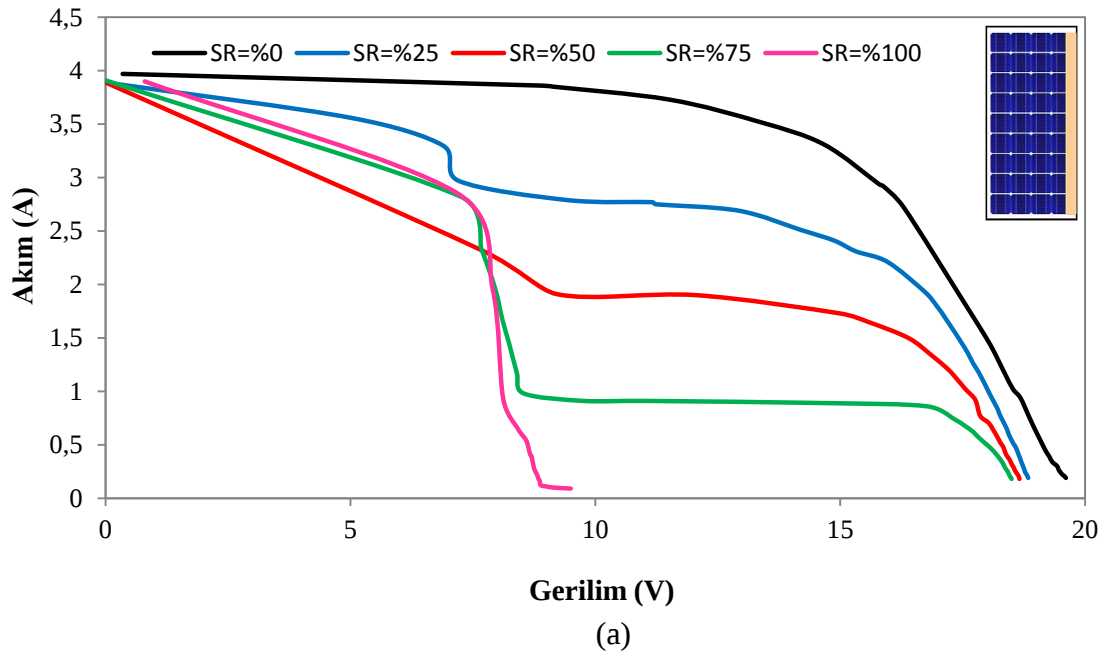
(c)



(d)

Şekil 3.4. PV panelin yatay gölgeleme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100 (devamı)

Üçüncü kısımda panele dikey olarak farklı büyüklükte gölgelenme uygulanmıştır. Şekil 3.5’de (a) ve (b) I-V ve P-V karakteristiği sırasıyla farklı gölgelenme oranları için gösterilmiştir. Şekil 3.5 incelendiğinde diğer gölgelenmelere benzer olarak V_{oc} gerilimi gölgelenme arttıkça, azalmıştır. Buna bağlı olarak maksimum güçteki azalma P-V karakteristiğinde görülmektedir. Tablo 3.3 incelediğinde gölgesiz durumda dolum çarpanı %51,97 iken panelin bir dizisinin dikey olarak tamamen gölgelenmesi ile %16,68 olmuştur.

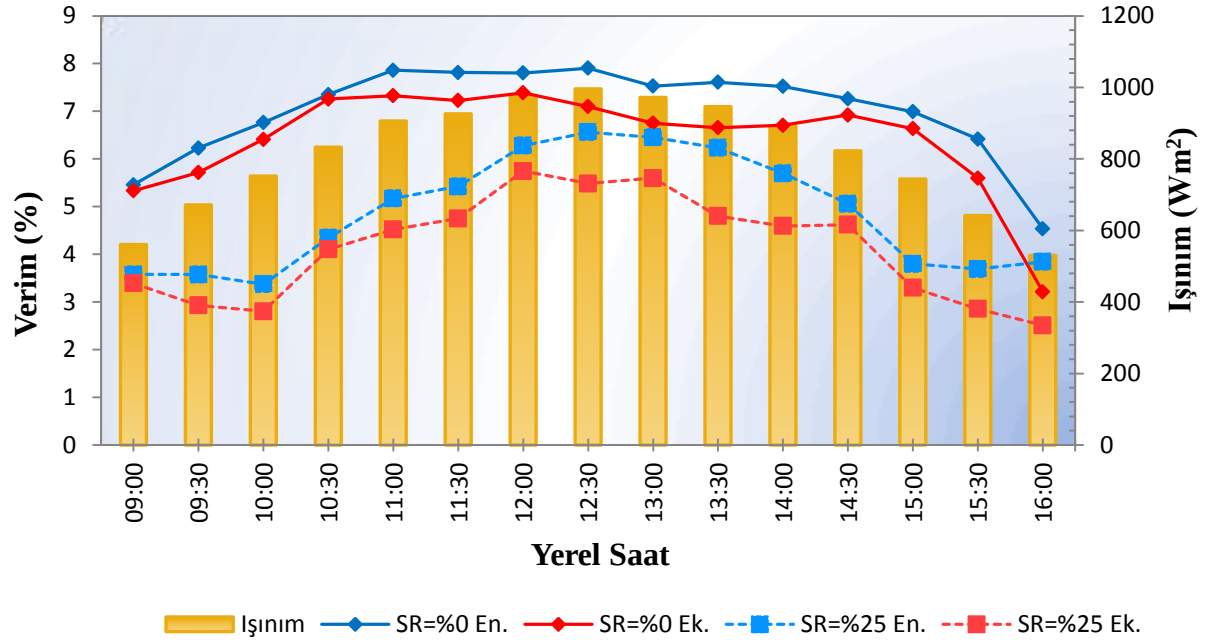


Şekil 3.5. PV panelin dikey gölgelenme altındaki karakteristikleri (a) I-V (b) P-V

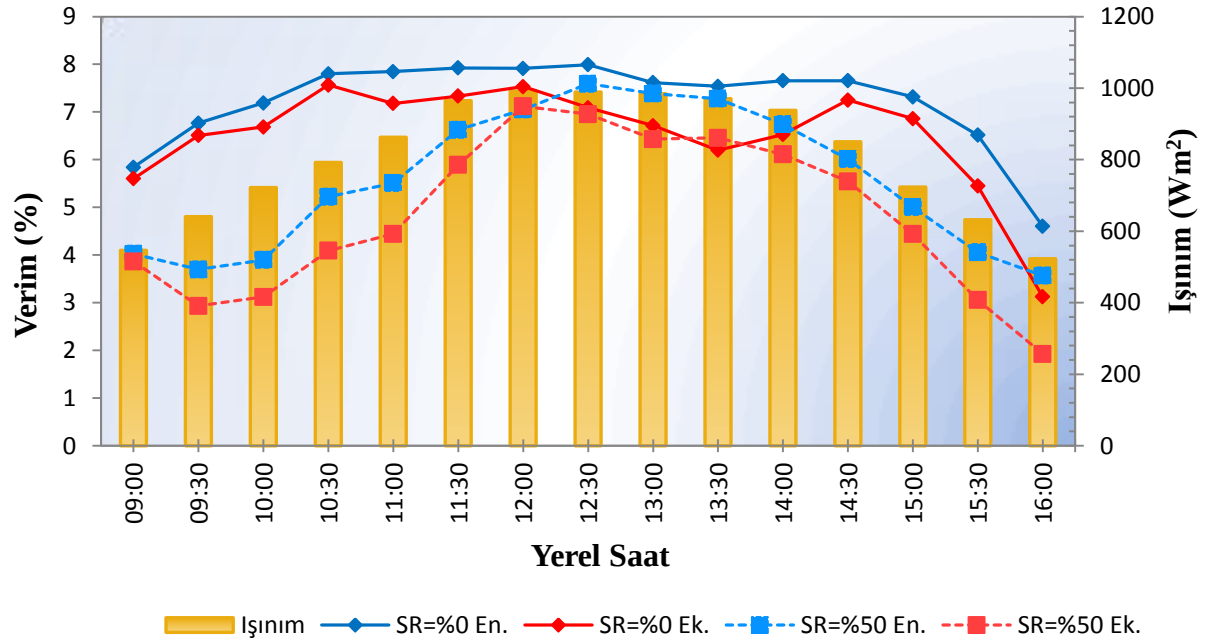
Tablo 3.3. PV panelin dikey gölgelenme altında kayıp oranları

Dikey gölgelenme			
SR (Gölgelenme Oranı)	FF (%)	ΔP (W)	$\Delta P/P$ (%)
0,00	51,97	0,00	0,00
0,25	43,62	6,90	16,99
0,50	36,09	7,65	18,85
0,75	17,80	25,12	61,88
1,00	16,68	25,44	66,93

Şekil 3.6’da fotovoltaiik panelin farklı dikey gölgelenme altındaki enerji-ekserji değerleri verilmiştir. SR=%0 (gölgesiz durum) olduğunda panelin en yüksek enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla, %7,9 ve %7,38 ölçülmüştür. Bu değerler panelin tek bir dizisinin %100 dikey olarak gölgelenmesi durumunda sırasıyla, %1,67 ve %0,82 değerine ulaşmıştır.

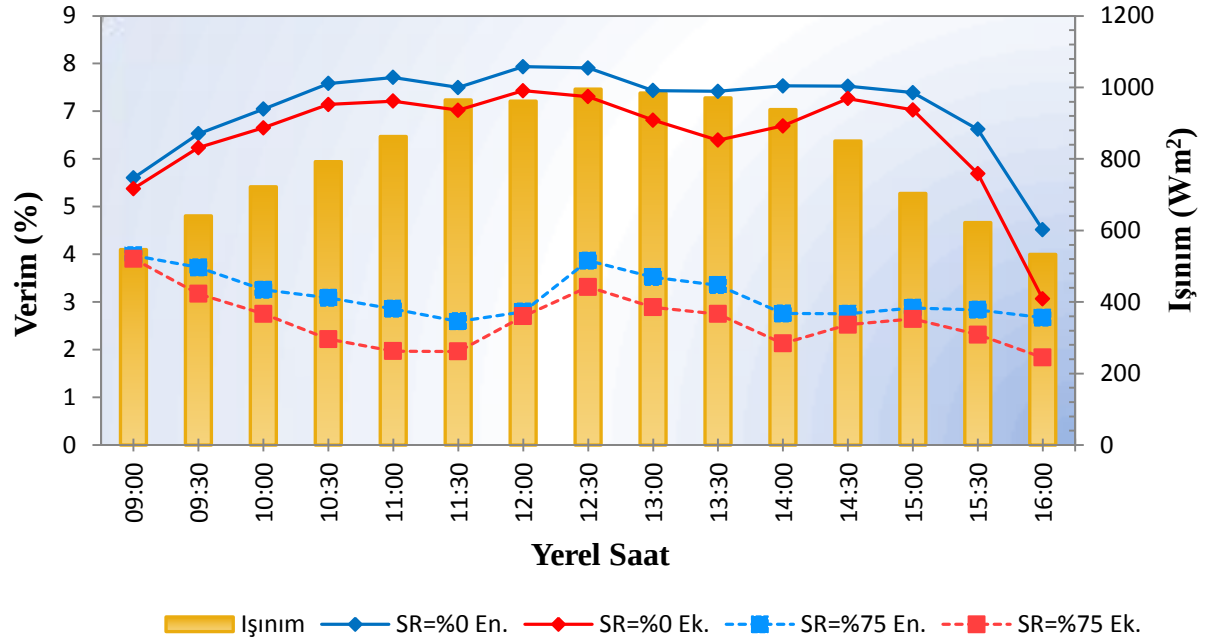


(a)

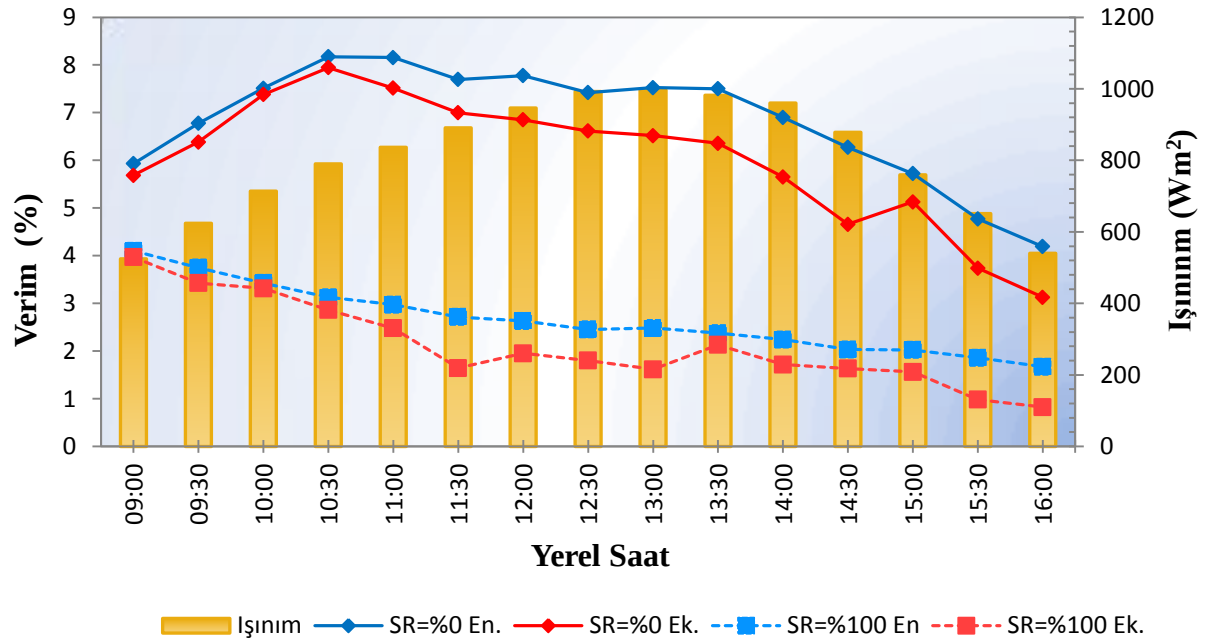


(b)

Şekil 3.6. PV panelin dikey gölgeleme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100



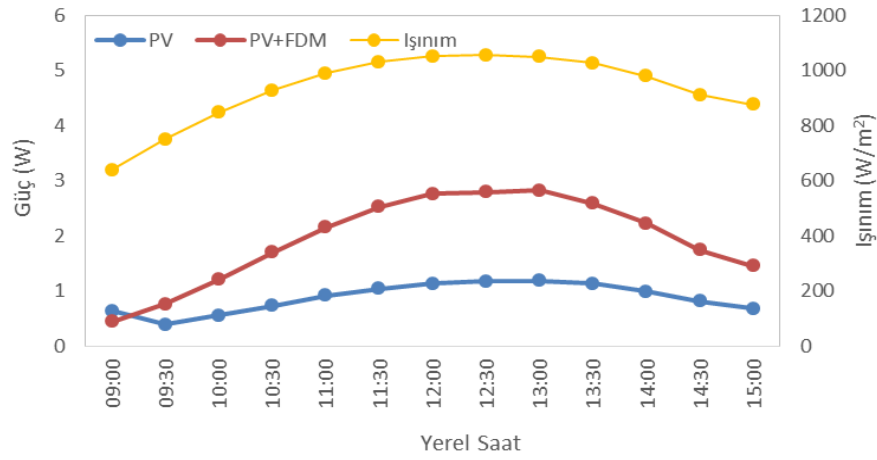
(c)



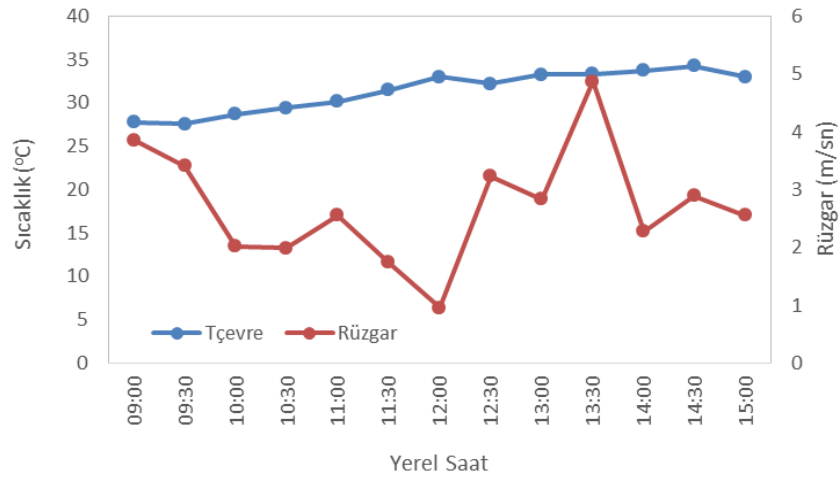
(d)

Şekil 3.6. PV panelin dikey gölgelenme altındaki enerji-ekserji verimlilik karakteristikleri (a) SR %25 (b) SR %50 (c) SR %75 (d) SR %100 (devamı)

Son olarak %50 yatay ve %50 dikey gölgelenme için FDM'li sistemin güç üretimine etkisi incelenmiştir. Ölçüm sırasında ışıınım şiddeti $639,6 \text{ W/m}^2$ ile $1056,6 \text{ W/m}^2$ arasında değişmektedir. Ortam sıcaklığı $32,9 \text{ }^\circ\text{C}$ iken FDM'siz sistemin sıcaklığı $44,85 \text{ }^\circ\text{C}$ FDM'li sistemin sıcaklığı ise $40,73 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Şekil 3.7 incelendiğinde fotovoltaiik panelin bir dizisinin yatay olarak gölgelenmesi durumunda maksimum güç $1,19 \text{ W}$ iken FDM'li sistemin güç üretimi maksimum $2,83 \text{ W}$ ulaşmıştır.



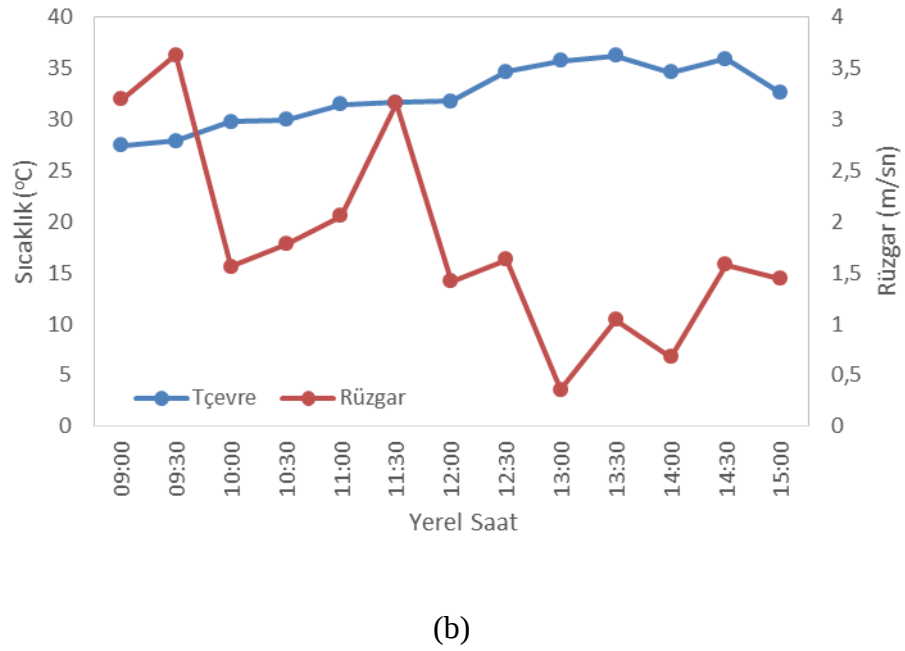
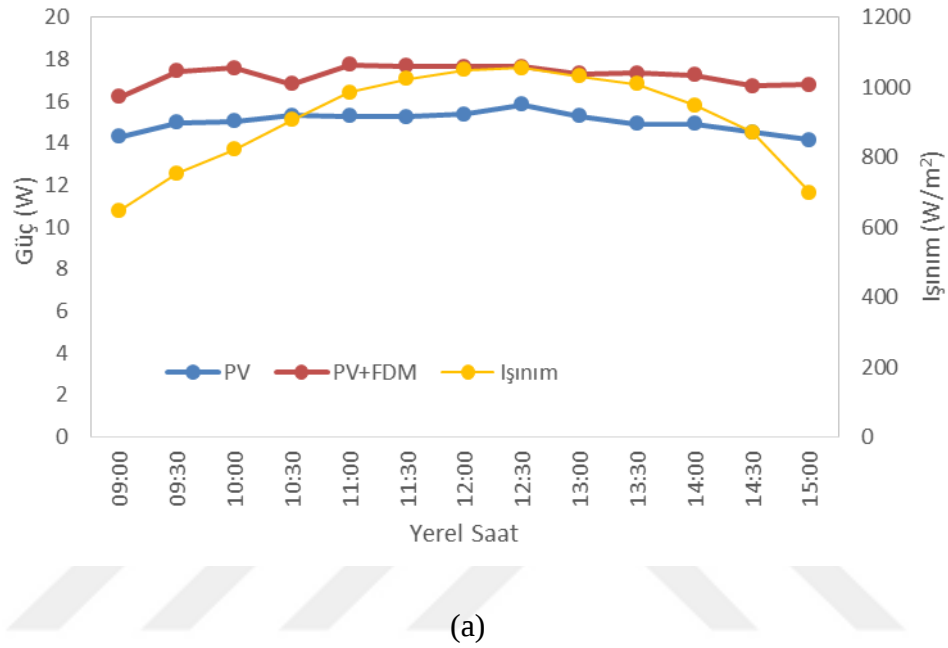
(a)



(b)

Şekil 3.7. PV panelin %50 yatay gölgeleme altındaki faz değıştiren madde kullanıldığı ve kullanılmadığı durum karakteristikleri (a) güç-ışıınım (b) sıcaklık-rüzgar

Şekil 3.8 incelendiğinde fotovoltaik panelin bir dizisinin dikey olarak gölgelenmesi durumunda ise maksimum güç 15,85 W iken FDM’li sistemin güç üretimi maksimum 17,65 W ulaşmıştır.



Şekil 3.8. PV panelin %50 dikey gölgelenme altındaki faz değiştiren madde kullanıldığı ve kullanılmadığı durum karakteristikleri (a) güç-ışınım (b) sıcaklık-rüzgar

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu kullanılarak fotovoltaik panelin kısmi gölgelenme etkisi altındaki performansı incelenmiştir. Sonuçlar deneysel olarak elde edilmiştir. 75 W gücündeki fotovoltaik panele farklı gölgelenme oranları uygulanmıştır. Daha sonraki aşamada bir PV panelin arkasına faz değiştiren madde deposu yerleştirilerek FDM'li ve FDM'siz panellerin gölgelenme etkisi altında performans testleri incelenmiştir.

- Farklı gölgelenme şekilleri ve oranları altında fotovoltaik panellerin performansı ile sıcaklık analizi incelenmiştir. Tüm durumlar için fotovoltaik panelin I-V ile P-V eğrileri çizilmiştir. Gölgelenme durumuna bağlı olarak gölgelenme oranı arttıkça panellerin çıkış güçleri azalmaktadır. Özellikle en büyük fark I_m değerinde görülmüştür.
- Maksimum akım kaybı, panelin %100 yatay gölgelendirilmesi durumunda olup akım değerinin 3,31 A' den 0,14 A' e kadar düştüğü görülmüştür
- Gölgelenmenin fotovoltaik paneller üzerinde en önemli etkisi yatay gölgelenme durumunda olup çıkış güçlerinde ciddi düşüş meydana gelmiştir.
- Çevre ve fotovoltaik hücre sıcaklıklarının yüksek olması hem çıkış gücünü hem de sistem verimliliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Güneş ışıınım değerinin maksimum olduğu zaman gölgelenme oranının ve sıcaklığın artması nedeniyle enerji ve ekserji verimliliği azalmaktadır. Sıcaklığın artması ile sıcak nokta oluşumu meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Dolum faktörü (FF), fotovoltaik sistemlerin ekserji verimi davranışını bilmek için önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, gölgelenme oranı arttıkça dolum faktörü azalmaktadır.
- Fotovoltaik panelin hücresel, yatay, dikey sırasıyla %25 gölgelenmesi durumunda maksimum enerji ve ekserji verimlilikleri %7,28 , %7,13 , %6,55 ve %5,74 , %5,30 ve %4,86 şeklinde elde edilmiştir.

- Fotovoltaik panelin gölgesiz durumunda maksimum enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %8,19 ve %8,05 elde edilmiştir.
- Fotovoltaik panellerin performansını artırmak için faz değıştiren madde kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 32,9 °C iken PV sistemin sıcaklığı 44,85 °C, PV+FDM sistemin sıcaklığı ise 40,73 °C'dir.
- Fotovoltaik panelin bir dizisinin yatay olarak %50 gölgelenmesi durumunda PV sistemin maksimum gücü 1,19 W iken PV+FDM sistemin güç üretimi maksimum 2,83 W ulaşmıştır.
- Fotovoltaik panelin bir dizisinin dikey olarak %50 gölgelenmesi durumunda ise PV sistemin maksimum gücü 15,85 W iken PV+FDM sistemin güç üretimi maksimum 17,65 W elde edilmiştir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmanın sonraki aşamalarında yapılması önerilenler aşağıdaki gibi belirtilmiştir;

- Aynı güçteki monokristal, polikristal, ince film paneller üzerinde bu çalışmaların her biri uygulanarak, farklı üretim teknolojilerindeki panellerin tepkileri karşılaştırılabilir.
- Farklı faz değiştiren malzemeler kullanılarak fotovoltaiik paneller üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Paneller üzerine farklı geometrilerde gölgelenme uygulanarak panellerin tepkileri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Cingil, İ.**, 2008. Yenilenebilir enerji kaynakları ve ekonomik etüdü, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Doğan, A.R.**, 2012. Güneş enerjisi destekli alternatif ısıtma sistemlerinin enerji ve ekonomi yönünden karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] **Yenisey, D.**, 2015. İç Anadolu bölgesi için güneye bakan eğimli yüzeye gelen günlük global, direkt ve difüz radyasyonun hesaplanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Dinçer, F.**, 2011. Çevresel faktörlerin güneş paneline etkisinin matlab/simulink programında modellenmesi ve simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- [5] http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369&skskskbzrsihmpvh, 26 Kasım 2017.
- [6] <http://www.enerjiatlasi.com/gunes-enerjisi-haritasi/turkiye>, 26 Kasım 2017.
- [7] **Doğan, H.**, 2014. Fotovoltaik güneş pilleri, *Yüksek Lisans Tezi*, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [8] **Akçalı, İ.**, 2001 .Güneş enerjisi sistemleri, *İstanbul Ticaret Odası*.
- [9] **Dinçer, F.**, 2011. Türkiye’de güneş enerjisinden elektrik üretimi potansiyeli - ekonomik analizi ve AB ülkeleri ile karşılaştırmalı değerlendirme, *KSU Mühendislik Dergisi*, 14 (1).
- [10] **Bayrak, F.**, 2017. Fotovoltaik panellere bütünleştirilmiş farklı pasif yöntemlerin sistem verimliliğine etkisinin sayısal ve deneysel analizi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [11] **Alkan, A.**, 2016. Yenilenebilir hibrit enerji kaynakları ile beslenen konutlarda akıllı enerji depolama ve yönetim sistemi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [12] **T.C. Millî Eğitim Bakanlığı**, 2013. Sehpa üzerine panellerin montajı, *Yenilenebilir Enerji Teknolojileri*, Ankara.
- [13] **Karamanav, M.**, 2007. Güneş enerjisi ve güneş pilleri, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- [14] **Özen, Y.**, 2015. III-V grubu güneş hücresi geliştirilmesi ve prototip yoğunlaştırıcı fotovoltaik modül üretimi, *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [15] <http://www.solarensa.com/sistem-bilesenleri.html>, 06.12.2017.
- [16] **Sarioğlu, G.**, 2012. Güneş gözelerinde gölgelenme etkisi, *Yüksek lisans tezi*, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [17] http://www.emo.org.tr/ekler/6498f1f48b54a20_ek.pdf, 03.12.2016.
- [18] **Kapluhan, E.**, 2014. Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: güneş enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki kullanım durumu, *Coğrafya dergisi*, 29, 70-98.
- [19] **Yerli, B.**, 2011. İstanbul iklim şartlarında meteorolojik parametrelerin PV (fotovoltaikpil) elektrik üretimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **Özçelik, S.**, Fotovoltaik (Pv) teknolojileri, *G.Ü Fotonik uygulama ve araştırma merkezi*, Ankara.
- [21] **Bozkurt, A.**, Güneş pilleri, *Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi*.
- [22] <https://www.perovskite-info.com/perovskite-solar>, 04.12.2017.
- [23] **Akman, E., Akın, S., Karanfil, G., Sönmezoğlu, S.**, 2013. Organik güneş pilleri, *Trakya Univ J Sci*, 14(1), 1-30.
- [24] <http://www.reoo.net/index.aspx?menuid=13&type=articleinfo&lanmuid=57&infoid=156&language=en> 04.12.2017
- [25] **Deniz, E.**, Güneş enerjisi santrallerinde kayıplar, *Akademi Enerji*, İzmir.
- [26] <http://www.enerjibes.com/gunes-panelleri-ve-hot-spot-etkisi>, 06.12.2017.
- [27] **Kozak, M., Kozak, Ş.**, 2012. Enerji depolama yöntemleri, *SDU International Technologic Science*, 4, 17-29.
- [28] **Paksoy, H., Evliya, H., Turgut, B., Mazman, M., Konuklu, Y., Gök, Ö., Yılmaz, M.Ö., Yılmaz, S., Beyhan, B., Şahan, N.**, Alternatif enerji kaynaklarının termal enerji depolama ile değerlendirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü*, Adana.
- [29] **Yılmaz, S.**, 2008. Soğutma uygulamaları için faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama, *Yüksek Lisans Tezi*, Ç.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [30] **Yılmaz, M.Ö.**, 2005. Yeraltı termal enerji depolamada kullanılan farklı dolgu maddelerinin termal özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ç.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.

- [31] **Kurt, S.**, 2012. Yeni nesil bina malzemeleri için faz değıştiren madde geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ç.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [32] **Sarı, A.**, 2011. Faz değışimi yoluyla ısı enerjisinin depolanması ve bu alanda yapılan çalışmalar, *Kimya lisans öğrencileri (kimyagerlik, kimya öğretmenliği ve kimya mühendisliği) araştırma projesi eğitimi çalıştay*, Çanakkale.
- [33] **Rathod, M.K., Banerjee, J.**, 2013. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18,246-258.
- [34] **Karakuzu , E., Coşkun, M.B.**, 2015. Faz değıştiren maddelerle sera ısıtma olanakları, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12,15-25.
- [35] **Sudhakar, K., Srivastava, T.**, 2014. Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic modüle, *International Journal of Ambient Energy*, 35, 51-57.
- [36] **Saidura, R., Boroumandjazi, G., Mekhlif, S., Jameel, M.**, 2012. Exergy analysis of solar energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 350– 356.
- [37] **Sahin, A.D., Dincer, İ., Rosen, M.A.**, 2007. Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell system, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 153-159.
- [38] **Pandey , A.K., Pant , P.C., Sastry, O.S., Kumar ,A., Tyagi S. K.**, 2015. Energy and exergy performance evaluation of a typical solar photovoltaic module, *Thermal Science*, 19, 625-636.
- [39] **Joshi, A.S., Dincer, İ., Reddy, B.V.**, 2009. Thermodynamic assessment of photovoltaic systems, *Solar Energy*, 83, 1139–1149.
- [40] **Visa, I., Burduhos, B., Neagoe, M., Moldovan, M., Duta, A.**, 2016. Comparative analysis of the infield response of five types of photovoltaic modules, *Renewable Energy*, 95, 178-190.
- [41] **Akyuz, E., Coskun ,C., Oktay, Z., Dincer I.**, 2012. A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency, *Energy*, 44,1059-1066.
- [42] **Yerli B., Kaymak M. K., İzgi E., Öztopal A., Şahin A. D.**, 2010. Atmosferik değışkenlerin istanbul iklim şartlarında fotovoltaik elektrik üretimine etkisi, *8. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, Aralık 1-5, Bursa, Türkiye.

- [43] **Visa, I., Burduhos, B., Neagoe, M., Moldovan, M., Duta, A.,** 2016. Comparative analysis of the infield response of five types of photovoltaic modules, *Renewable Energy*, 95,178-190.
- [44] **Picault, D., Raison, B., Bacha, S., de la Casa, J., Aguilera, J.,** 2010. Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses, *Solar Energy*, 84, 1301-1309.
- [45] **Shaiek, Y., Smida, M.B., Sakly, A., Mimouni, M.F.,** 2013. Comparison between conventional methods and GA approach for maximum power point tracking of shaded solar PV generators, *Solar Energy*, 90, 107-122
- [46] **Bai, J., Cao, Y., Hao, Y., Zhang, Z., Liu, S., Cao, F.,** 2015. Characteristic output of PV systems under partial shading or mismatch condition, *Solar Energy*, 112, 41-54.
- [47] **Belhachat, F., Larbes, C.,** 2015. Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions, *Solar Energy*, 120, 399-418.
- [48] **Diaz-Dorado E., Cidrás J., Carrillo C.,** 2014. Discrete I-V model for partially shaded PV-arrays, *Solar Energy*, 103, 96-107.
- [49] **Martínez-Moreno, F.,Munoz, J., Lorenzo, E.,** 2010. Experimental model to estimate shading losses on PV arrays, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, 2298–2303.
- [50] **Alsayid, B.A., Alsadi, S.Y., Jallad, J.S., Dradi M.H.,** 2013. Partial shading of PV system simulation with experimental results, *Smart Grid and Renewable Energy*, 4, 429-435.
- [51] **Khaing, H.H., Liang, Y.J., Htay, N.N.M., Fan, J.,** 2014. Characteristics of Different Solar PV Modules under Partial Shading, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 8 (9).
- [52] **Khalaf, Y., Ibrahee, O., Adi, M., Mohamme, S., Qasim, M., Waleed, K.,** 2014. Maximum power point evaluation of photovoltaic modules under shading effect, *European Scientific Journal*, 10.
- [53] **Taha, M.Q., Salih, M.S.,** 2012. Performance analysis of photovoltaic modules under shading effect. *Global Advanced Research Journal of Engineering*, 1(9), 228-235.

- [54] **Ramabadran, R., Mathur, B.,** 2009. Effect of shading on series and parallel connected solar pv modules, *Modern Applied Science*, 3.
- [55] **Deline, C., Dobos, A., Janzou, S., Meydbray, J., Donovan, M.,** 2013. A simplified model of uniform shading in large photovoltaic arrays, *Solar Energy*, 96, 274-282.
- [56] **Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E., Jenkins, P.,** 2013. Determination of the optimal configuration for a photovoltaic array depending on the shading condition, *Solar Energy*, 95, 1-12.
- [57] **Schill, C., Brachmann, S., Koehl, M.,** 2015. Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules, *Solar Energy*, 112, 259-262.
- [58] **Vijayalekshmy, S., Bindu, G.R., Rama Iyer, S.,** 2016. A novel Zig-Zag scheme for power enhancement of partially shaded solar arrays, *Solar Energy*, 135, 92-102.
- [59] **Sathyanarayana, P., Rajkiran B., Lakshmi Sagar P. S., Girish K.,** 2015. Effect of shading on the performance of solar PV panel, *Energy and Power*, 5(1A), 1-4.
- [60] **Machniewicz, A., Knera, D., Heim, D.,** 2015. Effect of transition temperature on efficiency of PV/PCM panels, *Energy Procedia*, 78, 1684-1689.
- [61] **Hasan, A., McCormack S. J., Huang, M. J., Norton, B.,** 2014. Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics, *Energies*, 7, 1318-1331.
- [62] **Cellura, M., Ciulla, G., Lo Brano, V., Marvuglia, A., Orioli, A.,** 2008. A Photovoltaic panel coupled with a phase changing material heat storage system in hot climates, *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Dublin 22nd to 24th October.
- [63] **Biwole, P., Eclache, P., Kuznik, F.,** 2011. Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials, *World Renewable Energy Congress-Sweden*.
- [64] **Smith, C. J., Forster, P. M., Crooka, R.,** 2014. Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling, *Applied Energy*, 126, 21-28.

- [65] **Stropnik, R., Stritih, U.**, 2016. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM, *Renewable Energy*, 97, 671-679.
- [66] **Browne, M.C., Norton, B., McCormack, S.J.**, 2015. Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 762–782.
- [67] **Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B.**, 2006. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics, *Solar Energy*, 80, 1121– 1130.
- [68] **Browne, M.C., Norton, B., McCormack, S.J.**, 2016. Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM, *Solar Energy*, 133, 533–548.
- [69] <http://www.eie.gov.tr/mycalculator/pages/23.aspx>, 06.12.2017.
- [70] <http://www.enerjibes.com/piranometre-nedir-ne-ise-yarar/>, 04.12.2017.
- [71] **Öztürk, M., Özek, N., Batur, H., Koç, M.**, 2011. Fotovoltaik sistemlerin (pv) fotovoltaik-termal kolektörlerin termodinamik değerlendirilmesi, *Mühendis ve Makine*, 619, 50-62.
- [72] **Dincer, İ.**, 2002. The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy*, 30, 137–149.
- [73] **Tekel, E.**, 2006. Termik santrallerin enerji ve ekserji analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, P.Ü. Fen Bilimleri Ens. Denizli.
- [74] **Akyüz, E., Coşkun, C., Oktay, Z.**, 2012. Kınalı keklik yetiştirme tesisine rüzgar ve güneş birleşik güç sisteminin uygulanması, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 626, 56-65.
- [75] **Bayrak, F., Ertürk, G., Öztop H.F.**, 2017. Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels, *Journal of Cleaner Production*, 164, 58-69.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad :Gamze ERTÜRK
Doğum Yeri ve Tarihi :Merkez/Elazığ - 17.07.1992
Lisans :F.Ü. Makine Mühendisliği
Y.Lisans :F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Termodinamik ve Isı Tekniği Programı

SCI kapsamındaki yayın listesi

- 1) Bayrak, F., Ertürk, G., Öztıp H.F., Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels, *Journal of Cleaner Production*, 164, 58-69, **2017**.

Uluslararası Konferans ve Sempozyumlar

- 1) Bayrak, F., Öztıp H.F., Ertürk, G., Thermodynamics and power analysis of photovoltaic panels under the diagonally partial shading, *Solar Conference and Exhibition*, Turkey, Istanbul, 6-8 December, 368-373, **2016**.

Projeler

- 1) Enerji depolamalı Fotovoltaik-Termoelektrik hibrid güç üretim cihazının tasarım ve performans karakteristiklerinin incelenmesi, TÜBİTAK 1001, 215M892, **2016**.
- 2) Enerji depolamalı fotovoltaik güneş panellerinde gölgelendirmenin enerji ve ekserji verimliliği üzerine etkisinin araştırılması, FÜBAP, TEKF.16.23, **2016**.