

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

**FOTOVOLTAİK PANELLERE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ
FARKLI PASİF YÖNTEMLERİN SİSTEM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Fatih BAYRAK

(111119203)

Anabilim Dalı: Makine Eğitimi

Programı: Enerji

Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Mayıs 2017

HAZİRAN-2017



**FOTOVOLTAİK PANELLERE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ
FARKLI PASİF YÖNTEMLERİN SİSTEM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL ANALİZİ**

Fatih BAYRAK

**Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP
HAZİRAN-2017**

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

**FOTOVOLTAİK PANELLERE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ
FARKLI PASİF YÖNTEMLERİN SİSTEM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Fatih BAYRAK

(111119203)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Mayıs 2017
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2017**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü)
Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL (C.B.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Emre TURGUT (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Erdem IŞIK (M.Ü)

HAZİRAN-2017

ÖNSÖZ

Doktora tezi olarak hazırlanan bu çalışmada; fotovoltaiik panellerin verimini olumsuz yönde etkileyen gölge, gölgelenmeden oluşan sıcak nokta oluşumu ve sıcaklık parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri deneysel bir şekilde incelenmiştir. PV panellerin 4 aylık ölçümleri değerlendirilerek sistemin akım-gerilim eğrileri, kayıp-kazanç oranları, enerji ve ekserji grafikleri çizdirilerek fotovoltaiik panellerin soğutulması ve verimliliklerinin artırılması hakkında fikir vermesi hedeflenmiştir.

Tez çalışmasında elde edilen veriler, TÜBİTAK 1001 proje kapsamında finanse edilmiş ve 215M892 numaralı proje dahilinde kurulmuştur. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışmanın araştırılmasında ve hazırlık sürecinde azmiyle beni destekleyen, her konuda bilgi ve deneyimlerini eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP'a, sayısal çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fatih BAYRAK
Elazığ – 2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIV
KISALTMALAR	XVI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektriksel tanımlar.....	1
1.1.1. Akım	1
1.1.2. Gerilim.....	3
1.1.3. Direnç	3
1.1.4. Ohm yasası.....	4
1.1.5. Elektriksel güç	4
1.2. Fotovoltaik teknoloji ve kısa tarihçesi	5
1.3. Fotovoltaik sistemler	7
1.3.1. Fotovoltaik etki ve hücrelerin işlevi	9
1.3.2. Fotovoltaik hücre parametreleri ve karakteristikleri.....	12
1.3.3. Fotovoltaik hücre ve panellerin birbirine bağlanması	15
1.3.4. Fotovoltaik hücre ve modüllerin performansını etkileyen faktörler.....	15
1.3.4.1. Sıcak nokta (hot spot) ve gölgelenme etkisi.....	16
1.3.4.2. Sıcaklık kayıpları.....	18
1.4. Enerji depolama teknikleri.....	18
1.4.1. Termal Enerji Depolama (TED)	19
1.4.1.1. Duyulur ısı depolama	19
1.4.1.2. Gizli ısı depolama.....	20
1.4.2. Faz değıştiren malzemeler ve sınıflandırılması	21
1.5. Termoelektrik	24
1.5.1. Termoelektrik etkiler	25
1.5.2. Termoelektrik modüller ve yapısı.....	26
1.5.3. Termoelektrik denklemler	28

1.6.	Literatür taraması.....	28
1.6.1.	Fotovoltaik paneller ve sıcaklık etkisi	29
1.6.2.	Faz değıştiren malzemeler ile fotovoltaik panellerin soğutulması	32
1.6.3.	Termoelektrik malzemeler ile fotovoltaik panellerin soğutulması	36
2.	MATERYAL ve METOD	39
2.1.	Deneylerde kullanılan malzemeler	39
2.2.	Deneylerin yapılışı.....	45
2.3.	Termodinamik kavramlar	52
2.3.1.	Enerji sistemleri üzerinde ekserji etkisi ve sürdürülebilirlik	53
2.3.2.	Fotovoltaik sistemlerin enerji analizi.....	54
2.3.3.	Fotovoltaik sistemlerin ekserji analizi	55
2.4.	Belirsizlik analizi	57
2.5.	Sayısal analiz çalışmaları.....	59
2.5.1.	Sistemi yöneten denklemler, sınır şartları ve çözüm yöntemi	60
3.	BULGULAR.....	66
3.1.	Gölgeleme parametrelerinin PV'ler üzerindeki etkilerinin analizi.....	71
3.2.	Fotovoltaik panellerin alüminyum kanatçıklarla soğutulmasının analizi	78
3.3.	Fotovoltaik panellerin alüminyum köpük kanatçıklarla soğutulmasının analizi	98
3.4.	Fotovoltaik panellerde kullanılan faz değıştiren malzemeler sistem verimine etkisinin incelenmesi	101
3.5.	Fotovoltaik panellerde termoelektik (TE) modüller kullanarak sistem verimine etkisinin incelenmesi	107
3.6.	Hibrit sistemlerin fotovoltaik paneller üzerindeki etkilerinin incelenmesi	110
3.7.	Sayısal analiz sonuçları.....	114
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	124
5.	ÖNERİLER.....	128
	KAYNAKLAR.....	129
	ÖZGEÇMİŞ.....	135

ÖZET

Fotovoltaik paneller güneş ışınlarını absorbe ederek elektrik enerjisi üreten enerji sistemleridir. Bununla beraber güneş ışınlarının elektrik enerjisine dönüşümü sırasında yüksek miktarda atık ısı meydana gelmektedir. Sistem üzerinde oluşan bu sıcaklık ile Fotovoltaik (PV) panellerin ürettikleri akım ve gerilim değerleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki mevcuttur. Özellikle sıcak iklim şartlarındaki PV paneller bu ilişkiden daha da olumsuz etkilenerek performansları azalmaktadır.

Bu tez çalışmasında da ilk olarak, polikristal hücre yapısına sahip 75 W gücündeki PV panellerin Elazığ iklim koşulları altında hücre sıcaklıkları, çıkış güçleri, güç kayıp oranları ve enerji-ekserji verimleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonunda, PV panellerin akım değerlerinin güneş ışınımından, gerilim değerlerinin ise hücre sıcaklığından ciddi biçimde etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, PV panel üzerine yerleştirilen ısıl çiftlerden alınan sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında sıcaklığın paneller üzerinde homojen olarak dağılmadığı görülmüştür.

Çalışmaların ikinci bölümünde PV paneller kısmi gölgelenmeye maruz bırakılarak güç ve sıcaklık durumlarının analizi incelenmiştir. Gölgeye maruz kalan hücrelerin gölgelenmeye maruz kalmayan diğer hücrelere direnç oluşturarak sıcak nokta (hot spot) oluşumları meydana getirmiştir. Gölgeleyen ve gölgelenmeyen PV paneller arasında sıcaklık farkları ve ciddi güç kayıpları oluşmuştur.

Üçüncü bölümde ise PV panellere farklı pasif soğutma yöntemleri uygulanarak sistem performansına olan etkileri araştırılmıştır. Pasif soğutma yöntemleri; alüminyum kanatçık, kapalı hücreli alüminyum köpük kanatçık, Faz Değiştiren Malzeme (FDM), Termoelektrik (TE) modül ve hibrit modül (FDM+TE) seçilerek farklı panellere bütünleştirilmiştir. Alüminyum kanatçık modelinde 10 farklı durum incelenmiş ve 7 cm boyunda, 20 cm uzunluğundaki şaşırtmalı dizilim en iyi sonucu vermiştir. Alüminyum köpük kanatçık modelinde, 6 mm ve 10 mm kalınlıklarında ve 5x10 cm boyutlarındaki iki farklı durum analiz edilmiş ve 10 mm kalınlığındaki kanatçıklı model en iyi sonuçları vermiştir. Üç farklı erime sıcaklığında faz değiştiren malzeme seçilerek kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Erime sıcaklığı 29,17 °C olan kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) panel üzerindeki sıcaklığı FDM'ler arasında en fazla düşüren ve en fazla verim arttıran kimyasal olmuştur. Termoelektrik modüller ise PV paneller üzerinde 6 ve 10 adet olmak üzere iki farklı sayıda

yerleştirmiştir. İki farklı TE sayısına sahip PV paneller karşılaştırıldığında ise termoelektrik sayısı fazla olan durum en fazla çıkış gücünü arttıran sistem olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Faz Değiştiren Malzeme (FDM), Termoelektrik, Kanatçık, Enerji, Ekserji



SUMMARY

The numerical and experimental analysis of system efficiency effects of different passive methods in integrated photovoltaic panels

Photovoltaic panels are energy systems that generate electricity by absorbing solar irradiation. However, when the sun's rays are converted to electricity, a high amount of waste heat is generated. There is a non-linear relationship between the temperature and the current and voltage values produced by the photovoltaic (PV) panels. Especially, PV panels in hot climatic conditions are affected more adversely and their performances are decreasing.

In this thesis study, cell temperatures, output powers, power loss ratios and energy-exergy efficiencies of 75 W power PV panels with polycrystalline cell structure under Elazig climatic conditions were investigated. At the end of the experiments, the current values of PV panels are seriously affected by solar radiation and the voltage values are seriously affected by cell temperature. In addition, when the temperature values obtained from the thermocouples placed on the PV panel are compared, it is seen that the temperature is not distributed homogeneously on the panel.

In the second part of the work, PV panels were subjected to partial shading to analyze the power and temperature conditions. The cells exposed to the shade created resistance to other cells that were not exposed to shading, causing hot spot formation. The between shaded and unshaded PV panels have occurred temperature differences and critical power losses.

In the third part, different passive cooling methods were applied to PV panels and the effects on system performance were investigated. Passive cooling methods; Aluminum fins, closed-cell aluminum foam fins, phase change materials (PCM), Thermoelectric (TE) module and hybrid module (FDM + TE) were integrated into different panels. In the aluminum fins model were examined 10 different situations and the staggered array of 7 cm length, 20 cm length gave the best result. In the aluminum foam fins, two different conditions were analyzed, 6 mm and 10 mm in thickness and 5x10 cm dimensions, and the 10 mm thick fin model gave the best results. Phase-changing materials were selected at three different melting temperatures and compared with each other. At the melting temperature of 29.17 °C, calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) is chemical material the most reducing temperature and increasing efficiency of the PV panel. The thermoelectric modules were

placed on PV panels in two different numbers, 6 and 10. The compared to PV panels with two different TE numbers, the case with the higher number of thermoelectric was the most increasing in output power.

Keywords: Photovoltaics, Phase Change Material (FDM), Thermoelectric, Fins, Energy, Exergy



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Ampermetrenin devreye bağlantı şeması (a) Doğru akım, (b) Alternatif akım ...	2
Şekil 1.2.	Akım türlerinin zamana bağlı değişimi (a) doğru akım-DC, (b) alternatif akım AC...	2
Şekil 1.3.	Voltmetrenin devreye bağlanması.....	3
Şekil 1.4.	Direnç sembolleri (a) sabit direnç (b) ayarlanabilen direnç (c) değişken direnç .	3
Şekil 1.5.	Direnç değerine göre I-V (akım-gerilim) eğrisinin değişimi	4
Şekil 1.6.	Güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit sistemler.....	6
Şekil 1.7.	Nesillerine göre fotovoltaik teknolojilerin sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.8.	Silisyum kristal yapısı ve kendinden iletim olgusu	10
Şekil 1.9.	Silisyumda örgü bozukluğu iletimi (a) p tipi yarı iletken (b) n tipi yarı iletken	10
Şekil 1.10.	p-n eklemelerinin çalışma prensibi a) p-n katmanları (b) elektrik alanı	11
Şekil 1.11.	Fotoelektrik etki ve güç üretimi	12
Şekil 1.12.	Fotovoltaik bir hücreye multimetre ve ayarlanabilen direncin bağlanması	12
Şekil 1.13.	Fotovoltaik hücrenin (a) kısa devre akımı (b) açık devre gerilimi.....	14
Şekil 1.14.	Işınımına bağlı olarak bir hücrede gerçekleşen akım-gerilim değerlerinin değişimi [3]	14
Şekil 1.15.	Fotovoltaik hücrelerin devre şeması (a) seri bağlantı, (b) paralel bağlantı.....	15
Şekil 1.16.	Güneş enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm sürecinde gerçekleşen kayıp etkenleri	16
Şekil 1.17.	Bypass diyotsuz bir fotovoltaik sistemin çalışması (a) normal (b) gölgelenme altında	17
Şekil 1.18.	Duyulur ve gizli ısı depolama eğrileri.....	21
Şekil 1.19.	Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) sınıflandırılması [14]	22
Şekil 1.21.	Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) yapısında bulundurması gereken özellikleri (düzenlendi) [17]	24
Şekil 1.22.	Termoelektrik etkilerin modellenmesi (a) Peltier, (b) Seebeck [20].....	26
Şekil 1.23.	Termoelektrik modüllerin (TEM) iç yapısı ve bağlantı şekli.....	27
Şekil 2.1.	Isıl çiftler ve bağlantı şekli	40
Şekil 2.2.	Faz değiştiren malzemeler (a) Kalsiyum klorür hekzahidrat, (b) Biphenyl, (c) Oleik asit	42
Şekil 2.3.	Perkin Elmer JADE model DSC cihazı	42
Şekil 2.4.	KD2 Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı	43
Şekil 2.5.	Açık hücreli alüminyum köpüğün hücre ve gözenek yapıları	43

Şekil 2.6.	Deneylerde kullanılan kapalı hücreli alüminyum kanatçık ve yapısı	44
Şekil 2.7.	6 Adet Termoelektrik modülün bağlantı şeması	44
Şekil 2.8.	Deney setinin şematik gösterimi	45
Şekil 2.9.	Farklı kısmi gölgelenme altındaki paneller (a) gölgesiz (b) 20*20 (c) 30*18 (d) 18*30.....	46
Şekil 2.10.	Diagonal gölgelendirme sistemi (a) arkadan (b) önden	46
Şekil 2.11.	Alüminyum kanatçıkların panele montajı.....	47
Şekil 2.12.	Deney setinin genel görünümü	49
Şekil 2.13.	Deney seti ve ekipmanları	50
Şekil 2.14.	Kanatçıklarının dizilim teknik resimleri (a) A1-A2, (b) A3-A4, (c) A5-A6, (d) A7-A8 (e) A9-A10, (f) gözenekli (B1-B2)	51
Şekil 2.15.	Enerji, ekserji ve anergi arasındaki ilişki [58]	52
Şekil 2.16.	Ekserji veriminin değişimine göre sürdürülebilirlik ve emisyon arasındaki ilişki [59].....	53
Şekil 2.17.	Fotovoltaik sistemler ve katmanları (a) Sadece PV modül, (b) PVmodül+kanatçık, (c) PV modül+FDM	59
Şekil 2.18.	Ara yüzeydeki ısı akılarının şematik gösterimi.....	62
Şekil 2.19.	Hesaplama bölgesinde üçgensel elemanların kullanıldığı sonlu elemanlar gösterimi	63
Şekil 2.20.	Fotovoltaik sistemlerin ağ yapısına ait şematik şekiller (a) PV, (b) PV+kanatçık, (c) PV+FDM.....	64
Şekil 2.21.	Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan çeşitli elemanlar (A) 2 boyutlu (b) 3 boyutlu	65
Şekil 3.1.	Farklı direnç değerlerinde maksimum güç noktası	66
Şekil 3.2.	Deneylerde kullanılan polikristal panelin I-V ve P-V eğrisi.....	67
Şekil 3.3.	Pasif iyileştirme uygulanmamış PV modüllerin farklı aylardaki ortalama arka yüzey sıcaklıkları	68
Şekil 3.4.	Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında alınan ısıtım ve çevre sıcaklık değişimleri	69
Şekil 3.5.	Aylara göre ortalama rüzgar hızları	69
Şekil 3.6.	Panel arka yüzeyindeki sıcaklık değişiminin zamanla değişimi (haziran ayı)..	70
Şekil 3.7.	Diagonal gölgelenme altında PV panelin (a) I-V, (b) P-V eğrileri	72
Şekil 3.8.	Diagonal gölgelenme altında PV panelin (a) I-V, (b) P-V eğrileri	73
Şekil 3.9.	Diagonal gölgelenme altında PV panelin (a) I-V, (b) P-V eğrileri	74
Şekil 3.10.	Kısmi gölgelenmeye maruz kalan PV panellerin güç kayıp oranları (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3.....	75
Şekil 3.11.	Kısmi gölgelenmeye maruz kalan PV panellerin yüzey sıcaklıkları (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3.....	77

Şekil 3.15. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A1 ve A2)	79
Şekil 3.16. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ısınıma göre güç değişimi (A1 ve A2)	80
Şekil 3.17. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A1 ve A2)	81
Şekil 3.18. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A3 ve A4)	82
Şekil 3.19. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ısınıma göre güç değişimi (A3 ve A4)	83
Şekil 3.20. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A3 ve A4)	84
Şekil 3.21. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A1 ve A3)	85
Şekil 3.22. Kanatçıklı panellerin ısınıma göre güç değişimi (A1 ve A3)	86
Şekil 3.23. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A1 ve A3)	86
Şekil 3.24. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A5 ve A6)	87
Şekil 3.25. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ısınıma göre güç değişimi (A5 ve A6)	87
Şekil 3.26. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A5 ve A6)	88
Şekil 3.27. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A7 ve A8)	89
Şekil 3.28. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ısınıma göre güç değişimi (A7 ve A8)	89
Şekil 3.29. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A7 ve A8)	90
Şekil 3.30. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A5 ve A7)	91
Şekil 3.31. Kanatçıklı panellerin ısınıma göre güç değişimi (A5 ve A7)	92
Şekil 3.32. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A5 ve A7)	92
Şekil 3.33. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A9 ve A10)	93
Şekil 3.34. Kanatçıklı panellerin ısınıma göre güç değişimi (A9 ve A10)	93
Şekil 3.35. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A9 ve A10)	94

Şekil 3.36. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A1 ve A5)	94
Şekil 3.37. Kanatçıklı panellerin ışıma göre güç değişimi (A1 ve A5)	95
Şekil 3.38. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A9 ve A10)	95
Şekil 3.39. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A5 ve A9)	96
Şekil 3.40. Kanatçıklı panellerin ışıma göre güç değişimi (A5 ve A9)	96
Şekil 3.41. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A5 ve A9)	97
Şekil 3.42. Test edilen kanatçık soğutmalı fotovoltaik panellerin sınıflandırılması	97
Şekil 3.43. Gözenekli kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri	98
Şekil 3.44. Gözenekli kanatçıklı panellerin ve kanatçıksız panelin ışıma göre güç değişimi (B1 ve B2).....	99
Şekil 3.45. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (B1 ve B2).....	100
Şekil 3.46. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri (Oleik asit) .	101
Şekil 3.47. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri (Oleik asit).....	102
Şekil 3.48. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimleri (Oleik asit)	102
Şekil 3.49. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri (Biphenyl) ..	103
Şekil 3.50. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri (Biphenyl)	103
Şekil 3.51. Faz değiştiren malzemenin (a) yandan (b) panel arka yüzeyine temas eden (c) depoya temas eden bölümlerinin görüşleri.....	104
Şekil 3.52. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimleri (Biphenyl)	104
Şekil 3.53. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri (Kalsiyum klorür heksahidrat).....	105
Şekil 3.54. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri (Kalsiyum klorür heksahidrat)	105
Şekil 3.55. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimleri (Kalsiyum klorür heksahidrat).....	106
Şekil 3.56. Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri (Kalsiyum klorür heksahidrat + kanatçık)	106
Şekil 3.57. Fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri (Kalsiyum klorür heksahidrat + kanatçık)	107
Şekil 3.58. Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri	108
Şekil 3.59. Fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri	108

Şekil 3.60.	Termoelektrik modüllerden elde edilen çıkış güçleri.....	109
Şekil 3.61.	Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimliliği	109
Şekil 3.62.	Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri.....	110
Şekil 3.63.	Fotovoltaik panellerin güç değişimleri.....	111
Şekil 3.64.	Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimleri	111
Şekil 3.65.	Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri.....	112
Şekil 3.66.	Fotovoltaik panellerin güç değişimleri.....	112
Şekil 3.67.	Termoelektrik modüllerden elde edilen çıkış güçleri.....	113
Şekil 3.68.	Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimliliği	113
Şekil 3.69.	450 W/m ² ışıınım altındaki bir fotovoltaik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn.....	115
Şekil 3.70.	900 W/m ² ışıınım altındaki bir fotovoltaik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn.....	116
Şekil 3.71.	450 W/m ² ışıınım altındaki alüminyum kanatçıklı fotovoltaik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn	117
Şekil 3.72.	900 W/m ² ışıınım altındaki alüminyum kanatçıklı fotovoltaik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn	118
Şekil 3.73.	900 W/m ² ışıınım altındaki FDM depolu fotovoltaik panelin yüzey sıcaklık dağılışı (a) 0.sn (b) 100. sn (c) 200.sn (d) 300.sn (e) 400.sn (f) 500. sn	119
Şekil 3.74.	1000 W/m ² ışıınım altındaki PV+FDM+kanatçık (hibrit) sistemin yüzey sıcaklık dağılımı (a) 120.sn (b) 200.sn (c) 290.sn (d) 370.sn (e) 450.sn.....	120
Şekil 3.75.	Rüzgar hızının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi (q=1000 W/m ²)	121
Şekil 3.76.	Isı akısının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi (v=4.3 m/s).....	121
Şekil 3.77.	Ortam sıcaklığının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi (q=1000 W/m ² , v=4.3 m/s)	122
Şekil 3.78.	Çeşitli yapıların (kanatçık, FDM) PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi (q=1000 W/m ² , V _{wind} =4.3 m/s)	122
Şekil 3.79.	FDM gizli erime ısısının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi (q=1000 W/m ² , v=4.3 m/s)	123

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Temel elektrik nicelikleri ve ilişkileri	2
Tablo 1.2.	Güneş hücrelerinin tarihsel gelişimi [1,2]	5
Tablo 1.3.	Fotovoltaik teknolojilerin olumlu ve olumsuz yanları [3].....	8
Tablo 1.4.	Literatürde PV sistemlerdeki kayıp oranları.....	18
Tablo 1.5.	Organik ve inorganik maddelerin olumlu/olumsuz yönlerinin karşılaştırılması [18]	24
Tablo 1.6.	Termoelektrik modüllerin özellikleri.....	27
Tablo 1.7.	Literatürdeki bulunan bazı çalışmalarının özeti	35
Tablo 2.1.	Deneylerde kullanılan fotovoltaik panelin teknik özellikleri	39
Tablo 2.2.	Deneylerde kullanılan anemometrenin teknik özellikleri.....	40
Tablo 2.3.	Faz Değiştiren malzemelerin termodinamik özellikleri	41
Tablo 2.4.	Alüminyum kanatçık parametreleri	47
Tablo 2.5.	Kapalı hücreli alüminyum köpük kanatçık parametreleri	48
Tablo 2.6.	Faz Değiştiren Malzeme (FDM) türleri.....	48
Tablo 2.7.	İki farklı sayıdaki TE modül durumları.....	48
Tablo 2.8.	Hibrit sistem	49
Tablo 2.10.	Analizlerde kullanılan PV malzemenin katmanları ve malzeme özellikleri ...	60
Tablo 2.11.	FDM de kullanılan malzemenin katı ve sıvı fazları için termofiziksel özellikler (a) katı faz (b) sıvı faz.....	60
Table 3.1.	Ölçülen değerlerin belirsizlik analizi	113

SEMBOLLER LİSTESİ

A	panel alanı (m ²)
C_p	sabit basınçta ısı kapasitesi (J/kgK)
Ex	ekserji (W)
FF	dolgu faktörü (-)
G	şekil faktörü (cm)
h	ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
I_{sc}	kısa devre akımı (A)
I_g	güneş ışıınım şiddeti (W/m ²)
I_m	maksimum güç noktasındaki akım (A)
k	ısı iletim katsayısı (W/mK)
N	termoelektrik çift sayısı (-)
P	Güç (W)
GO	gölgelenme oranı (%)
R	direnç (Ω)
T	sıcaklık (K)
V_{oc}	açık devre gerilimi (V)
V_m	maksimum güç noktasındaki gerilim (V)
V	rüzgar hızı (m/s)
ΔP	fotovoltaik panelin güç farkı (W)
ρ	elektriksel direnç (Ωcm)
μ	dinamik viskozite (Pas)
η_I	enerji verimi (-)
η_{II}	ekserji verimi (-)

Alt indisler

ζ	çevre
h	hücre

<i>k</i>	kayıp
<i>elek</i>	elektrik
<i>g</i>	giriş
<i>m</i>	maksimum
<i>çkş</i>	çıkış
<i>g</i>	güneş
<i>term</i>	termal



KISALTMALAR

AC	Alternatif Akım
AR-GE	Araştırma Geliştirme
DC	Doğru Akım
En.	Enerji
Ek.	Ekserji
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
MPP	Maksimum Güç Noktası
PV	Fotovoltaik
TD	Termodinamik
TEC	Termoelektrik Soğutucu
TEG	Termoelektrik Jeneratör
TEM	Termoelektrik Modül
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
STK	Standart Test Koşulları

1. GİRİŞ

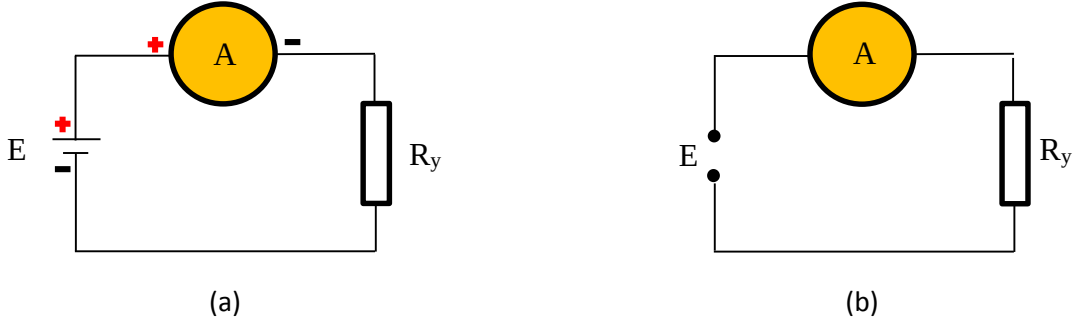
Enerji tüketimi, ülkelerin kalkınma ve sanayileşmesini gösteren en önemli parametrelerden biridir. Fosil kaynaklı enerji türlerinin zamanla azalması, çevreye olan kirli atıkları ve bazılarının teminindeki dışa bağımlılık; dünya çapındaki ülkeleri güvenilir, ekonomik ve temiz enerji üretebilen sistemlere yönlendirmiştir. Tüketilen enerjinin üretilen enerjiden fazla olması durumunda mevcut sanayi, sanayileşme politikaları ve günlük hayat olumsuz etkilenir. Ülkemizde de hızla büyüyen nüfus, ekonomi ve sanayinin enerji ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için halihazırdaki kaynaklara ilaveten yenilenebilir enerji kaynaklarının çok iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin yüksek verimlilikle değerlendirilmesi bir başka önemli husustur.

1.1. Elektriksel tanımlar

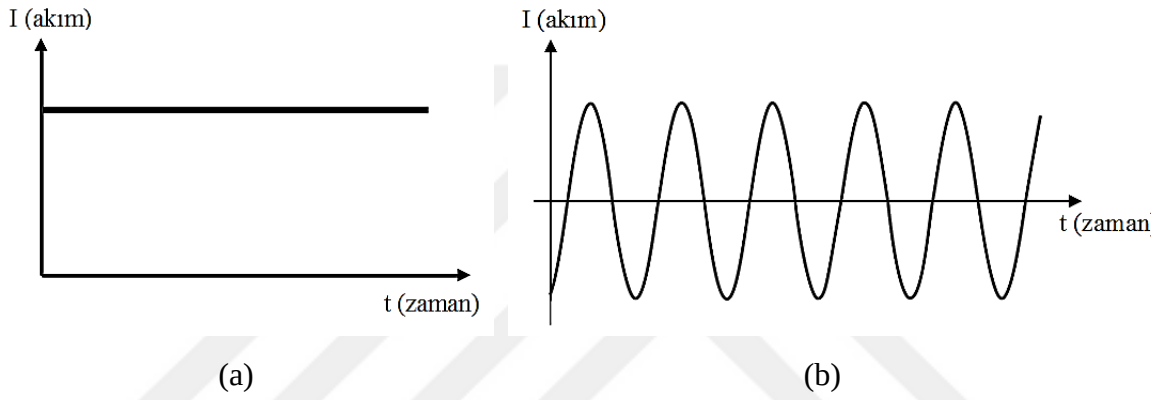
1.1.1. Akım

Metallerin atomlarındaki elektron sayıları, metalin türüne göre değişim göstermektedir. İletken maddelerin atomlarının son yörüngelerinde 4'ten az elektron bulunur. Atomlar, bu elektronları 8'e tamamlayamadıkları için serbest bırakırlar. Bu nedenle, bir iletken maddede milyonlarca serbest elektron bulunur. Bu maddelere elektrik uygulandığında, elektronlar negatif yönden pozitif yöne doğru hareket etmeye başlar. Bu harekete elektrik akımı denir. Bir iletken içinde elektronların sürekli olarak akışı elektrik akımı olarak da adlandırılmaktadır.

Elektrik yüklerinin hareketi ile akım meydana gelir. Akım bir iletken içindeki yük hareketidir. Bir iletken üzerinden birim zamanda geçen elektron sayısını gösterir. Akım sabit değildir ve elektronlar bir yönde ilerlerler. Elektronlar yüklü parçacıklardır. Elektrik akımı yüklerin hareketi nedeniyle oluşur. Elektrik yüklerinin hareketine elektrik akımı denir. Bir iletkenin belirli bir kesitinden, bir saniyede akan yüke ya da geçen elektron miktarına akım şiddeti denir. Akım şiddeti "I" simgesi ile gösterilir ve birimi Amperdir. Akım şiddeti ampermetre ile ölçülür. Ampermetre devreye seri olarak bağlanır. Ampermetrenin iç direnci çok küçük bir değerdir. Bağlandığı yerin direncini etkilememesi için bu değer uygulamada sıfır kabul edilir [1].



Şekil 1.1. Ampermetrenin devreye bağlantı şeması (a) Doğru akım, (b) Alternatif akım



Şekil 1.2. Akım türlerinin zamana bağlı değişimi (a) doğru akım-DC, (b) alternatif akım-AC

Elektrik akımı; doğru akım (Direct Current – DC) ve alternatif akım (Alternative Current – AC) olmak üzere ikiye ayrılır. Ampermetrenin devrelere bağlantı şeması Şekil 1.1’de, Şekil 1.2’de ise akım türlerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Doğru akım, zamana göre yönü ve şiddeti değişmeyen akım olarak adlandırılırken zamana göre yönü ve şiddeti değişen akıma alternatif akım denir.

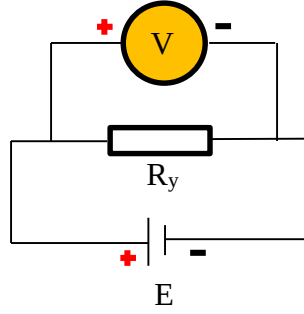
Yukarıda ifade edilen elektriksel nicelikler ve aralarındaki ilişki Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Temel elektrik nicelikleri ve ilişkileri

Elektriksel nicelik	Sembol	Birim	Kısaltma	İlişki
Akım	i	Amper	A	$i = \frac{dq}{dt}$
Gerilim	v	Volt	V	$v = \frac{dw}{dq}$
Güç	P	Joul/saniye (Watt)	J/s (W)	$P = \frac{dw}{dt}$
Enerji	w	Joul (Watt x saat)	J (Wh)	$w = \int P dt$

1.1.2. Gerilim

Bir üreticinin iki kutbu arasındaki potansiyel farka elektriksel gerilim denir. Birimi Volt'tur ve "V" harfi ile gösterilir. Bir elektrik devresinin gerilimini ölçmek için voltmetre devreye Şekil 1.3'deki gibi paralel bağlanır.

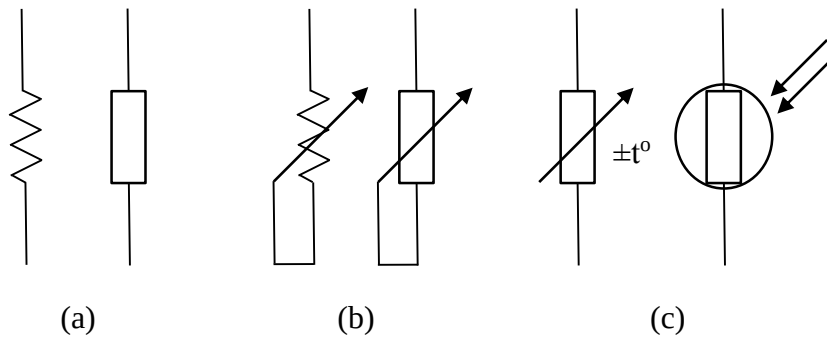


Şekil 1.3. Voltmetrenin devreye bağlanması

1.1.3. Direnç

Akıma karşı zorluk gösteren devre elemanı direnç olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir ifadeyle direnç; bir iletkenin geçen elektronların ne zorlukla geçebildiklerinin bir ölçüsüdür. Ayrıca; elektrik akımının akışına mukavemet gösteren ve uçları arasında gerilim düşümüne neden olan devre elemanlarıdır. Kullanım alanlarına göre çeşitleri; sabit direnç, ayarlı direnç ve değişken direnç olmak üzere 3'e ayrılır.

Sabit dirençler, direnç değeri sabit olan değişmeyen direnç tipidir. Ayarlanabilen dirençler ise istenilen direnç değerinde değişiklik yaparak elektronik devrelerde kullanılan devre elemanlarıdır. Değişken direnç, sıcaklık ve ışık değerine göre direnci azalan ya da artan direnç grubudur. Şekil 1.4'de direnç türleri ve sembolleri gösterilmiştir.



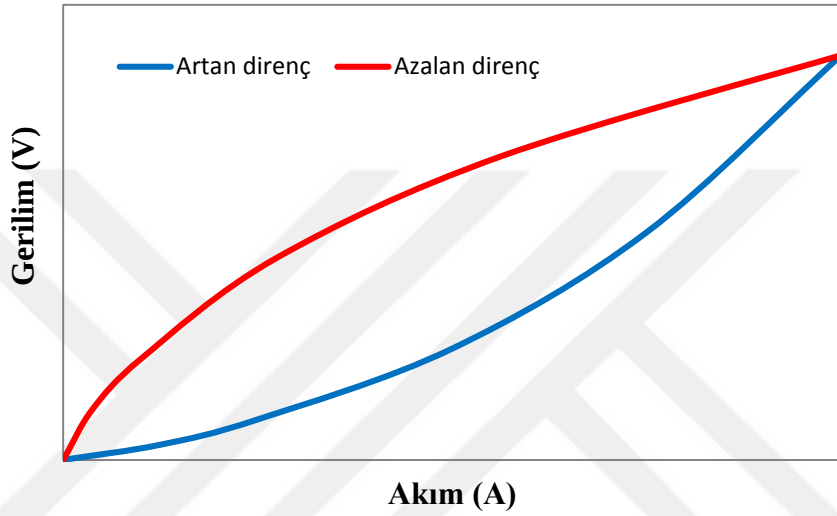
Şekil 1.4. Direnç sembolleri (a) sabit direnç (b) ayarlanabilen direnç (c) değişken direnç

Bu tez kapsamında sıcaklık ya da ışık durumuna göre değişken direnci değil, yüksek güçlü ya da üzerinden yüksek akımın geçebildiği ayarlanabilen direnç çeşidi kullanılmıştır.

1.1.4. Ohm yasası

Bir iletkenin uçları arasındaki gerilimin iletkenin geçen akım oranına ohm yasası adı verilmektedir. Şekil 1.5’de farklı direnç değerleri ile akım-gerilim eğrisinin gösterilmiştir. Direnç değeri arttıkça bu değerlerin oranı iletkenin direncini eşittir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.1)$$



Şekil 1.5. Direnç değerine göre I-V (akım-gerilim) eğrisinin değişimi

1.1.5. Elektriksel güç

Bir elektriksel işin oluşabilmesi için gerekli olan elektriksel güç miktarı o sistemin çektiği akım ile potansiyel farkın çarpına eşittir ve

$$P = IV \quad (1.2)$$

ya da

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1.3)$$

denklemleri ile elde edilir. Birimi Watt, sembolü ise “W” ile gösterilir.

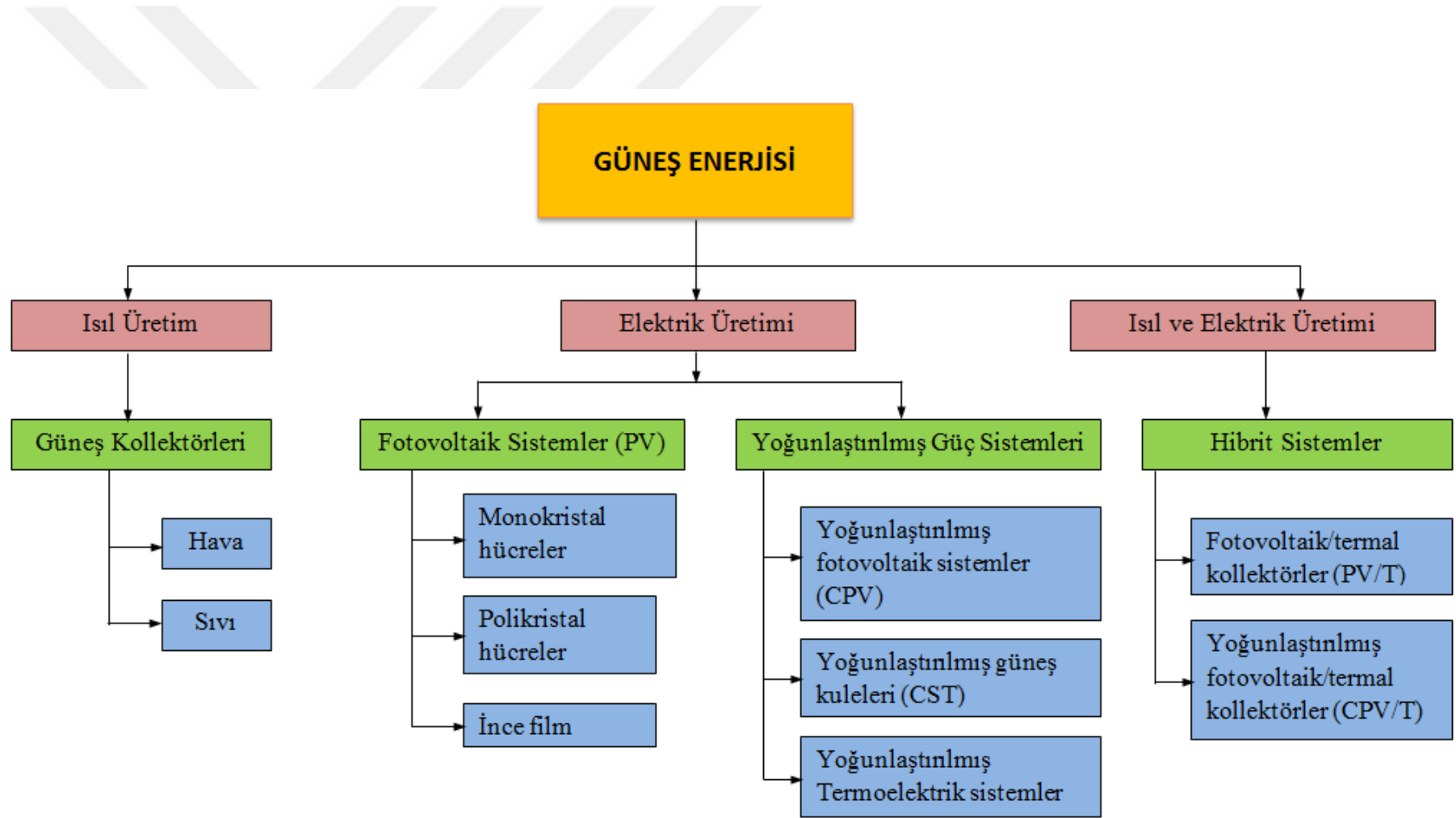
1.2. Fotovoltaik teknoloji ve kısa tarihçesi

Fosil enerji kaynaklarının tükenebilir oluşu ve çevreye verdiği zararları hakkındaki bilincinin gelişmesi ile birlikte yenilenebilir enerjilere duyulan ilgi artmıştır. Yenilenebilir enerji sistemleri arasında fotovoltaik teknolojisi her ne kadar pahalı olsa da istenilen güçler basit tasarım ve kurulumlarıyla bu sistemler arasında popüler olmuştur.

Fotovoltaik etki uzun zamandan beri biliniyor olmasına rağmen ilk fotovoltaik hücre 1957 yılında Bell laboratuvarlarında üretilmişti fakat yüksek maliyetli oluşu ve enerji veriminin düşüklüğü ticarileşmesinin önüne geçmiştir. Fotovoltaik teknoloji ait önemli tarihsel gelişmeler Tablo 1.2’de gösterilmiştir. Ayrıca, güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit sistemlerin kategorize edilmesi Şekil 1.6’da gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Güneş hücrelerinin tarihsel gelişimi [1,2]

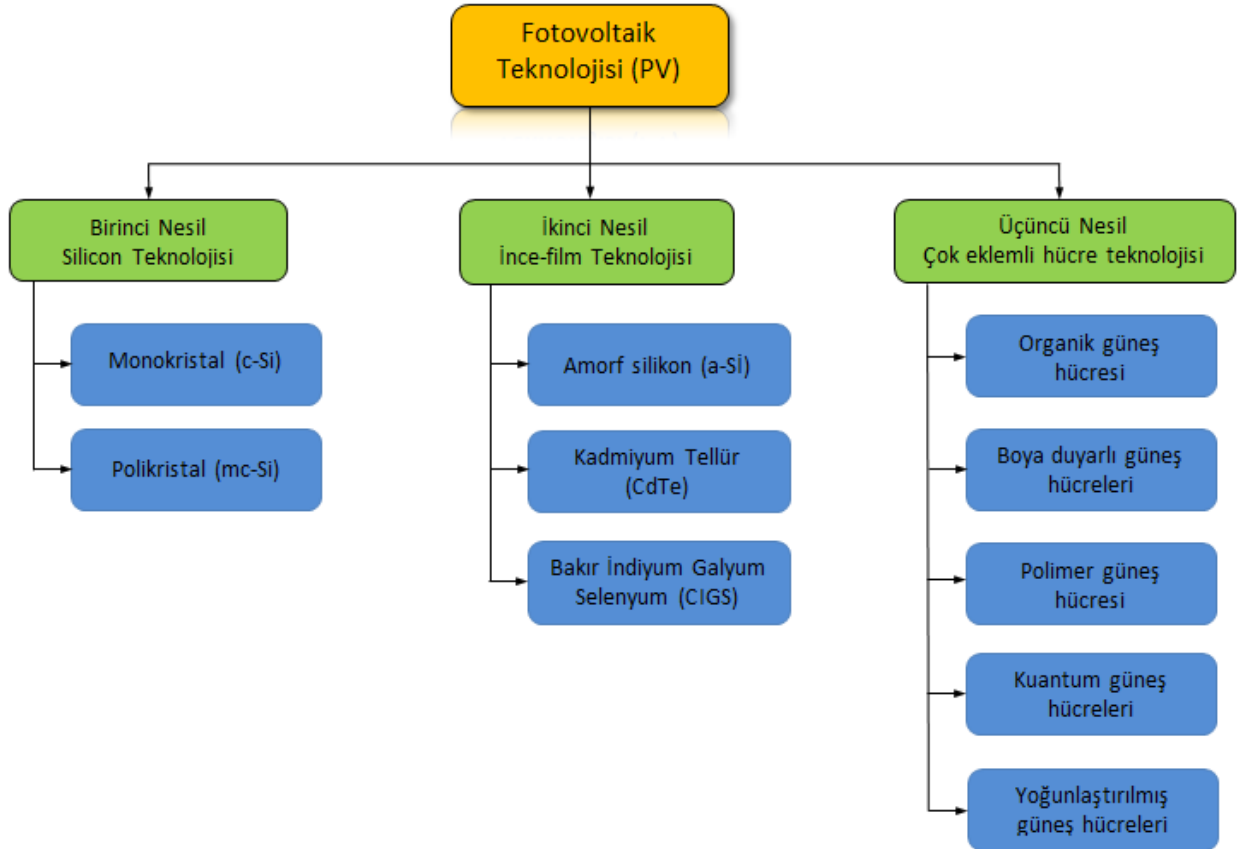
Yapılan çalışmalar	Yıl
Becquerel tarafından fotovoltaik etki keşfedildi.	1839
Smith, selenyumun içindeki foto iletkenliği keşfetti.	1873
Adams ve Day tarafından selenyumda fotovoltaik etkinin bildirilmesi	1877
Fritts, selenyum kullanarak ilk fonksiyonel % 1 verimli PV hücreyi geliştirdi.	1883
Planck tarafından ışığın kuantum yapısının ileri sürülmesi	1900
Wilson tarafından katıların kuantum teorisinin öngörülmesi	1930
Mott ve Schocttky tarafından katı durum teorisinin geliştirilmesi	1940
Barden, Brattain ve Schockley tarafından transistörün keşfedilmesi	1949
Charnin, Puller ve Pearson silisyum hücre verimini % 6 bulması	1954
Reynolds ve arkadaşları tarafından kadmiyum sülfid hücresi tasarımı	1954
Hoffman Elektronik, % 8 verimli silisyum PV hücre geliştirdi	1957
Vanguard 1 isimli yörüngeli uyduda hücrelerin ilk kez kullanılması	1958
Hoffman Elektronik, % 14 verimli silisyum PV hücre geliştirdi	1960
New South Wales Üniversitesinde, % 20 verimli silisyum PV hücreler geliştirildi	1985
Applied Solar Energy şirketi % 19 verimli iki-eklemli PV hücreler geliştirdi.	1989
Spectrolab, % 40 verimli üç-eklemli PV hücreler geliştirdi.	2006
NREL, % 40,8 verimli üç-eklemli PV hücre geliştirdi.	2008
Spectrolab, % 41,6 verimli üç-eklemli PV hücre geliştirdi.	2009



Şekil 1.6. Güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit sistemler

1.3. Fotovoltaik sistemler

Fotovoltaik modüller yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemelerdir. Modüllerden elektrik üretimin devamı için ısınım şiddeti ve süresi çok önemlidir. Hücre verimleri %5 ile % 20 arasında değişmekte olan bu yenilenebilir enerji kaynağı üretim teknolojisine göre hem farklılık göstermekte hem de sınıflandırılmaktadır. Fotovoltaik teknolojilerin sınıflandırılması Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Fotovoltaik hücreler, laboratuvar uygulamalarında %30’ları geçen bir verim gösterebilirler de saha uygulamalarında verimleri %20’lerde kalmıştır. Tek bir hücrenin verimi ve gücü düşük olduğundan hücreler birbirlerine bağlanarak hücresel dizileri, hücresel diziler birbirlerine bağlanarak modülleri, modüller birbirine bağlanarak modül dizilerini, modül dizilerinin birleştirilmesiyle beraber farklı güçlerde Güneş Enerji Santralleri (GES) oluşturulmaktadır. Fotovoltaik teknolojilerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1.3’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Nesillerine göre fotovoltaik teknolojilerin sınıflandırılması

Tablo 1.3. Fotovoltaik teknolojilerin olumlu ve olumsuz yanları [3]

Nesil	Teknoloji	Avantaj	Dezavantaj	Ticari hücre verimi (%)	Ticarileşme payı (%)
Birinci	Monokristal	• Ticari • Silikonu en üst düzeyde kullanabilme • Zehirsizdir. • Polikristale göre yüksek verimlilik	• Polikristal hücrelere göre biraz daha kalındır • Yüksek maliyet	15-19	40
	Polikristal	• Ticari • Silikonu en üst düzeyde kullanabilme • Zehirsizdir • Monokristale göre daha düşük maliyet • Monokristale göre silisyum israfı daha azdır.	• Monokristalden daha düşük verime sahiptir. • Şeffaf kristal yapısı monokristalden daha fazladır. • Monokristal hücreden daha düşük alan verimliliği	13-15	45
İkinci	Amorf Silikon	• Esnek • Hafif • Yüksek emme katsayısı sebebiyle daha az malzeme tüketimi • Düşük maliyetli • Yüksek bant aralığı enerjisi	• Düşük verimlilik • Uzun süreli güneş ışınımında hızlı deformasyon.	5-8	3
	CdTe	• Esnek • Hafif • Düşük maliyet • Geri ödeme zamanı düşüktür.	• Düşük verimlilik • Arka kontaktör sorunları • Kadmiyum oksitlenmesi • Tellür malzemesinin azlığı	8-11	8
	CIGS	• Esneklik • Hafif • En yüksek ince film verimliliği	• Düşük verimlilik • Katmanlar arası kırılma yada çatlamlar • Kadmiyum oksitlenmesi • İndium malzemesinin azlığı	7-11	3

Yüksek güçler elde edebilmek için modüller (panel) seri ve paralel bağlanarak akım ve gerilim değerleri artırılarak istenilen performanslar elde edilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta birleştirilecek modüllerin akım ve gerilim değerlerinin birbirine çok yakın olması gerekliliğidir. Özellikle seri bağlantı yapılan modüllerde, aynı akımı taşımak zorunda

kalan farklı güçteki panellerde zayıf olana göre çalışacağından sistem güç kaybına uğrayacaktır.

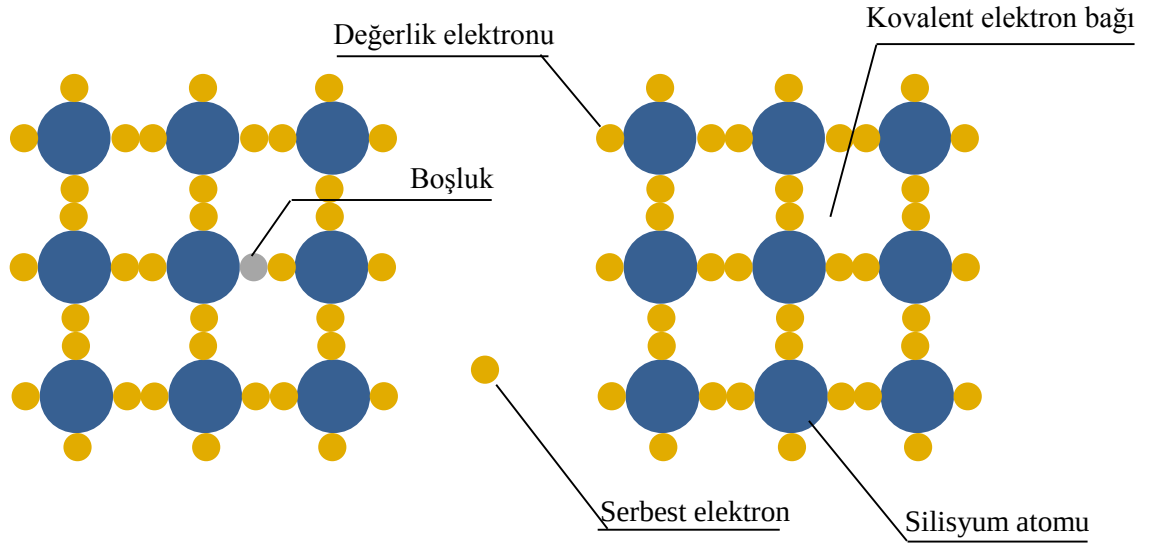
Fotovoltaik tasarımlar, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız sistemler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde gün boyunca üretilen elektrik, üretici tarafından tüketildikten sonra fazlası şebeke elektriğine yönlendirilir. Elektrik üretiminin yapılamadığı gece ya da bulutlu zamanlarda elektrik enerjisi şebekeden sağlanabilir. Bu sistemde çift taraflı sayaç kullanılarak alınan ve verilen elektrik hesaplanır. Şebekeden bağımsız sistemler ise; enerji güç hatlarından uzak alanlarda uygulanan bir sistemdir. Diğerinden farkı depolama ünitesi olarak sıvı jel akü grubundan oluşmasıdır. Bu durum daha fazla maliyet gerektirmektedir. Şebeke bağlantısı olmadığı için bulutlu ya da gece durumları için tüketilecek günlük enerji miktarına göre hesaplama yapıldıktan sonra fotovoltaik santral kurulmalıdır.

Sonuç olarak, her ne kadar pahalı bir elektrik üretim teknolojisi olsa da, tasarım ve kurulum açısından en kolay teknolojidir. Çevreyi kirletmeyen, hareketli parçaları olmadığından bakım maliyeti düşük, kullanılan enerji için bir tutarın olmaması gibi üstünlükleriyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında popülerliği giderek artmaktadır.

1.3.1. Fotovoltaik etki ve hücrelerin işlevi

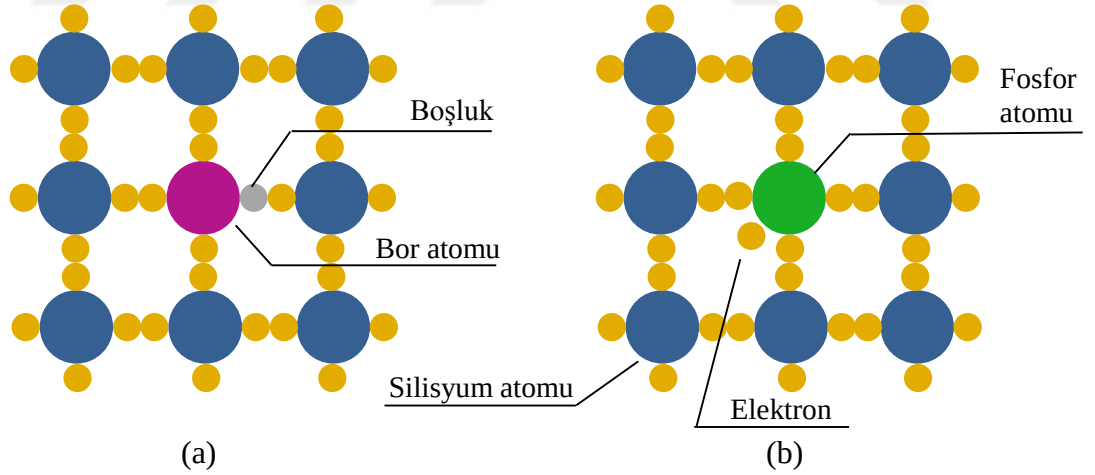
Fotovoltaik etki denildiğinde, güneş ışınlarının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi kastedilmektedir. Bunun için silisyum, galyum-arsenür, kadmiyum-tellür, bakır-iridyum-diselenür gibi yarı iletken malzemeler kullanılır. Kullanımı en yaygın hücre tipi ise kristal silisyum fotovoltaik hücredir.

Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi burada kristal silisyum hücre örneğinde tarif edilecektir. Fotovoltaik hücrelerin üretimi için son derece saf ve kristal kalitesi yüksek silisyum gereklidir. Silisyum atomları, sağlam bir kristal yapı oluşturur. Her silisyum atomunun dış elektron katmanında 4 adet değerlik elektronu bulunur. Kararlı bir elektron dizilimi elde etmek için, kristal yapıda birbirine komşu atomlar, birer elektronu ortaklaşarak bir elektron bağı oluştururlar. Silisyum atomu böylece 4 komşu atomla elektron bağı oluşturarak 8 dış elektronla kararlı soygaz yapısına sahip olurlar. Işık veya ısı akışının etkisiyle, bu elektron bağı kırılabilir. Bağdan ayrılan elektron serbestçe hareket edebilir ve kristal yapıda boşluklar bırakır. Buna kendinden iletim denir [4]. Şekil 1.8'de silisyumun kristal yapısı ve kendinden iletim olgusu verilmiştir.



Şekil 1.8. Silisyum kristal yapısı ve kendinden iletim olgusu

Silisyum malzemesinin enerji üretebilmesi için kristal yapıya kasıtlı olarak saf yapıyı bozan katkılama atomları yerleştirilir. Bunlar; dış elektron katmanlarında silisyum elementinden bir elektron fazlası (fosfor) veya bir elektron eksiği (bor) bulunan atomlardır [4]. Katkılama atomları Şekil 1.9’da gösterildiği gibi yapıda örgü bozukluklarına neden olur.

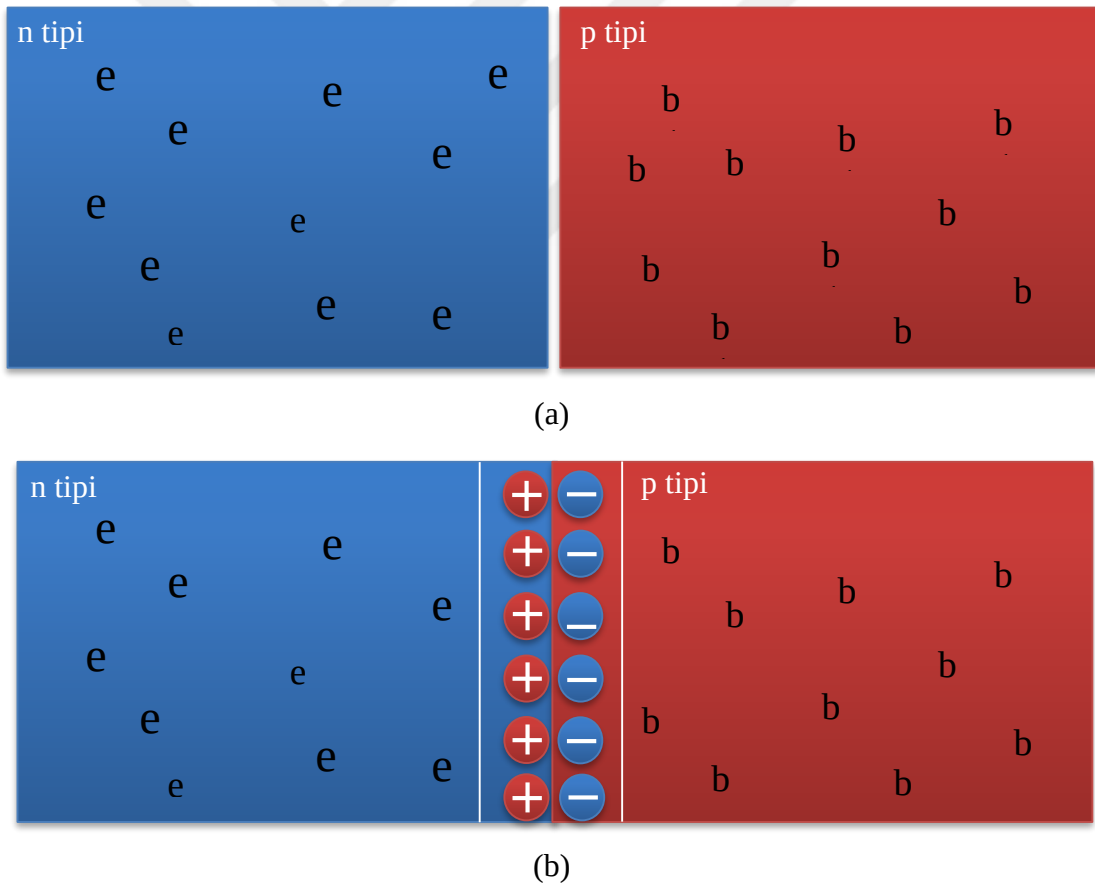


Şekil 1.9. Silisyumda örgü bozukluğu iletimi (a) p tipi yarı iletken (b) n tipi yarı iletken

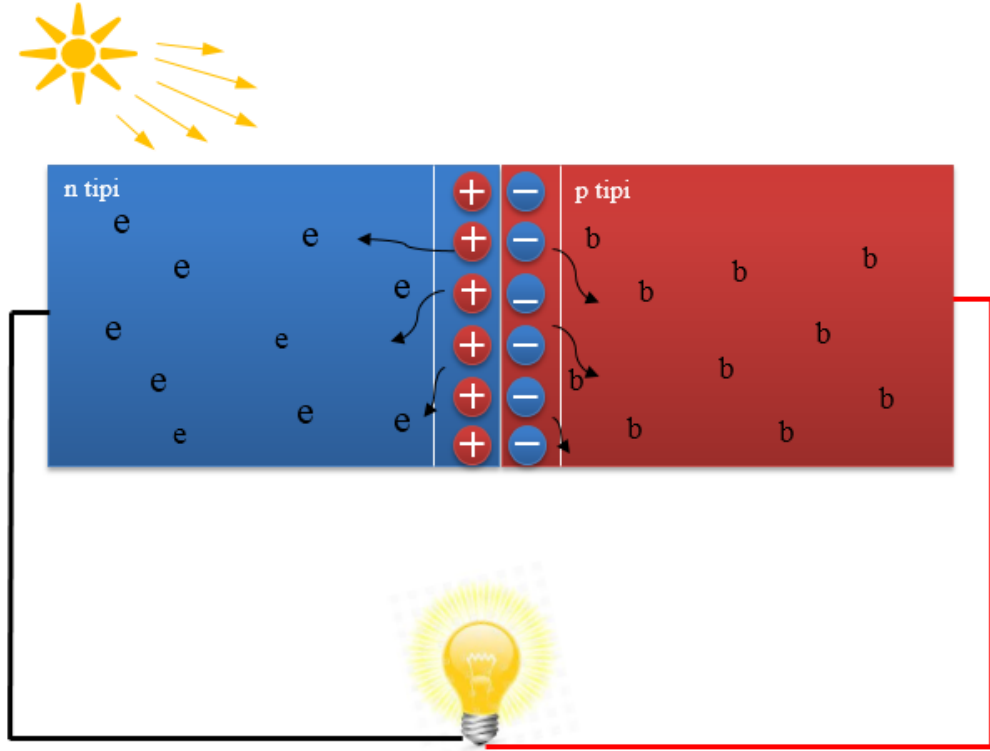
Katkılama için fosfor kullanıldığında n tipi katkılama, kristal yapıya yerleştirilen her fosfor atomu başına bir adet fazla elektron hazır bulunur. Bu elektron, kristal yapının içinde serbestçe hareket edebilir ve böylece elektrik yüklerini taşıyabilir. P tipi katkılamada yerleştirilen her bor atomu başına bir boşluk bulunur. Komşu silisyum atomlarına ait

elektronlar bu boşluğu doldurabilir, böylece geldikleri yerde yeni bir boşluğun açılmasına neden olur.

N ve P tipi yarıiletken tabakalar üst üste dizildiğinde p-n kavşağı yada p-n yapısı meydana gelmektedir. Bu tabakalar temas bölgesine getirildikleri anda elektronlar ve boşluklar diğer tarafta karşıt yüklerle birleşmek için eklem bölgesine geçerler. Birleşme tamamlandığında herhangi bir serbest yük olmayan bir alan oluşur ve bu alan azalma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.10 (a)'da n tipi ve p tipi eklemlerin (b) elektrik alanı sembolik gösterimleri yapılmıştır. Azalma bölgesinde fotoelektrik etki oluşursa, elektronlar p tipi katmanda serbest dolaşırlar ve mevcut elektrik alanı elektron boşluklarını çekerken, elektronları iterler. Bu durum elektron boşluk çiftlerinin akışı bir elektrik akımı yaratır. p-n katmanları tarafından üretilen bu alan elektriksel gerilimi oluşturur. Böylece, fotoelektrik etki ile güç üretimi meydana gelir. Bu güç üretimi modeli Şekil 1.11'da gösterilmiştir.



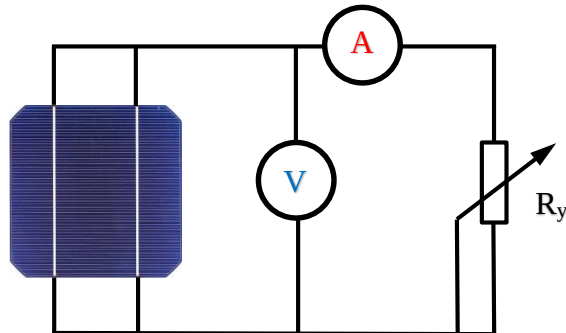
Şekil 1.10. p-n eklemlerinin çalışma prensibi a) p-n katmanları (b) elektrik alanı



Şekil 1.11. Fotoelektrik etki ve güç üretimi

1.3.2. Fotovoltaik hücre parametreleri ve karakteristikleri

Herhangi bir yükün bağlanmadığı fotovoltaik hücreye ışınlam geldiğinde yaklaşık 0,6 V'luk bir gerilim oluşur. Bu gerilim açık devre gerilimi (V_{oc}) olarak pozitif (+) ve negatif (-) kutuplardan ölçülebilir. İki kutup arasına ampermetre bağlanırsa kısa devre akımı (I_{sc}) ölçülebilir. Bir fotovoltaik hücre ya da fotovoltaik panelin karakteristiklerini belirlemek için ise ayarlanabilen direnç Şekil 1.12'deki gibi bağlanarak maksimum güç noktası tespit edilebilir.



Şekil 1.12. Fotovoltaik bir hücreye multimetre ve ayarlanabilen direncin bağlanması

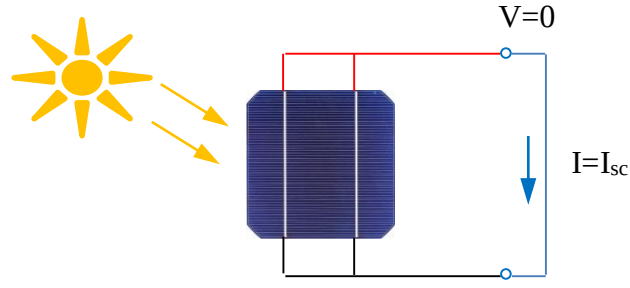
Gerek yurt içinde gerekse de yurt dışında birçok fotovoltaik üreticisi firma bulunmaktadır. Bu hücre ya da modüllerin birbirleriyle karşılaştırabilmek ve karakteristiklerinin belirlenmesinde standart test koşulları (STK) oluşturulmuştur. Bu standartlara göre TS EN 60904 ya da IEC 60904 uyulması gerekmektedir. En temel kavramlar ise [4];

- 1- Hücre ya da modül üzerine dik düşen radyasyon değeri, $E=1000 \text{ W/m}^2$
- 2- Hücre sıcaklığı $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3- Atmosfer zayıflaması $AM=1,5$ olan bir ışık tayfı

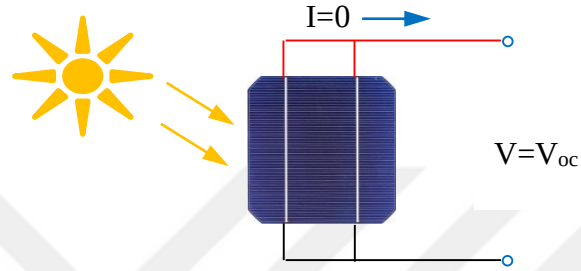
Karakteristik eğrisinin analizinde de 6 parametre bulunmaktadır. Bunlar,

- 1- Kısa devre akımı (I_{sc}): Üst ve alt katmanlar, direnci sıfır olan ya da sıfıra çok yakın bir tel ile bağlandığında elektronlar telin içinden akacak ve alt kısımdaki boşluklarla birleşecektir. Şekil 1.13 (a)'da kısa devre akımı gösterilmiştir. Ampermetrenin iç direnci çok küçük olduğundan genellikle hücrenin iki kutup noktası arasına bağlanmaktadır.
- 2- Açık devre gerilimi (V_{oc}): Yüksüz durumdaki PV sistemin artı (+) ve eksi (-) uçları arasındaki gerilim farkına denilmektedir. Şekil 1.13 (b)'de açık devre gerilimi gösterilmiştir. Ölçü aleti DCV kademesine alınarak paralel olarak bağlanır. Açık devre gerilim değeri; hücrenin yapıldığı maddeye, ışıma şiddetine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.
- 3- Maksimum akım değeri (I_m): PV sistemin yük altında elde edilen en yüksek akım değeridir.
- 4- Maksimum gerilim değeri (V_m): PV sistemin yük altında elde edilen en yüksek gerilim değeridir.
- 5- Maksimum güç noktası (maximum power point – MPP – $P_{mak.}$): Hücre/modülün en yüksek güçte çalıştığı noktadır. Yük direnci altında PV sistemden alınacak en yüksek akım ve gerilim değerlerinin çarpımıdır.
- 6- Dolum faktörü (Fill Factor – FF): Fotovoltaik hücrenin toplam değerini belirleyen bir parametredir. FF değeri, birim değere yaklaştıkça kalitesi artmaktadır. Hücrenin maksimum çıkış gücünün ($P_{mak.}$), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımının (I_{sc}) çarpımına oranı olarak bulunur.

$$FF = \frac{V_{mak.} I_{mak.}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_{mak.}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.4)$$



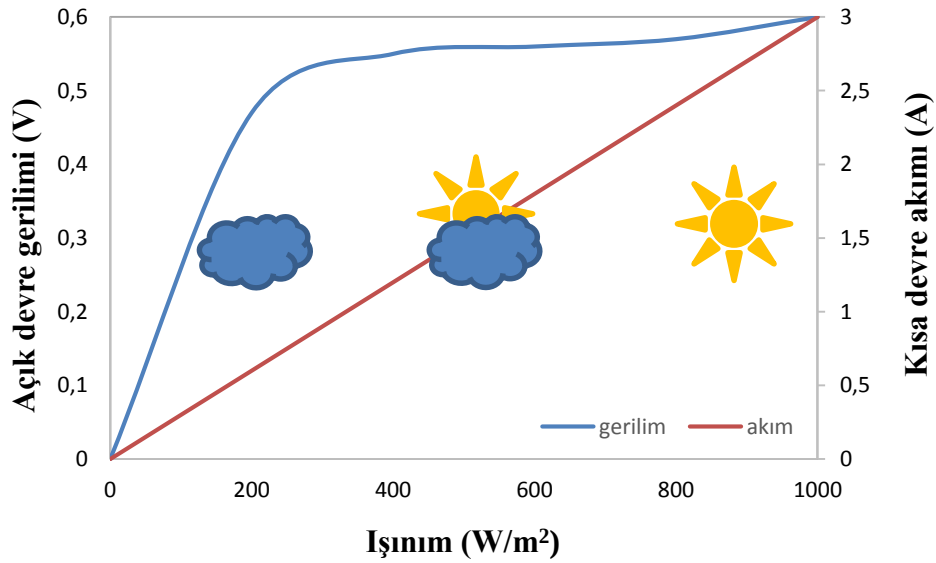
(a)



(b)

Şekil 1.13. Fotovoltaik hücrenin (a) kısa devre akımı (b) açık devre gerilimi

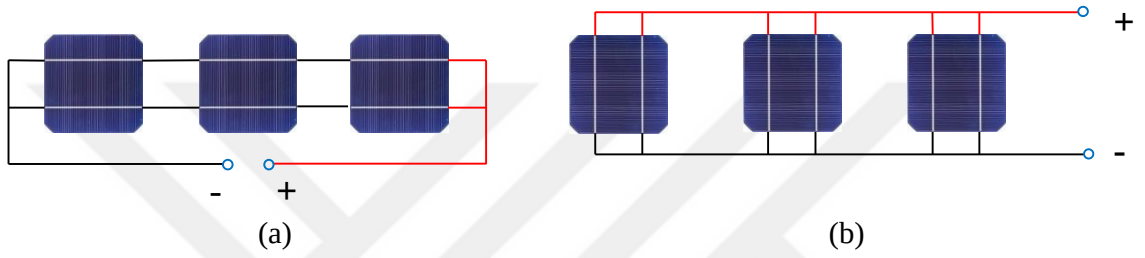
Kısa devre akımı ışınının bir fonksiyonudur. Işınım şiddetinin iki katına çıktığı bir anda, akımında iki katına çıkması beklenir. Açık devre gerilimi ise ışınım değerinin değişmesiyle sabit kaldığı söylenebilir. Şekil 1.14’de ışınımına bağlı olarak akım-gerilim değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 1.14. Işınımına bağlı olarak bir hücrede gerçekleşen akım-gerilim değerlerinin değişimi [3]

1.3.3. Fotovoltaik hücre ve panellerin birbirine bağlanması

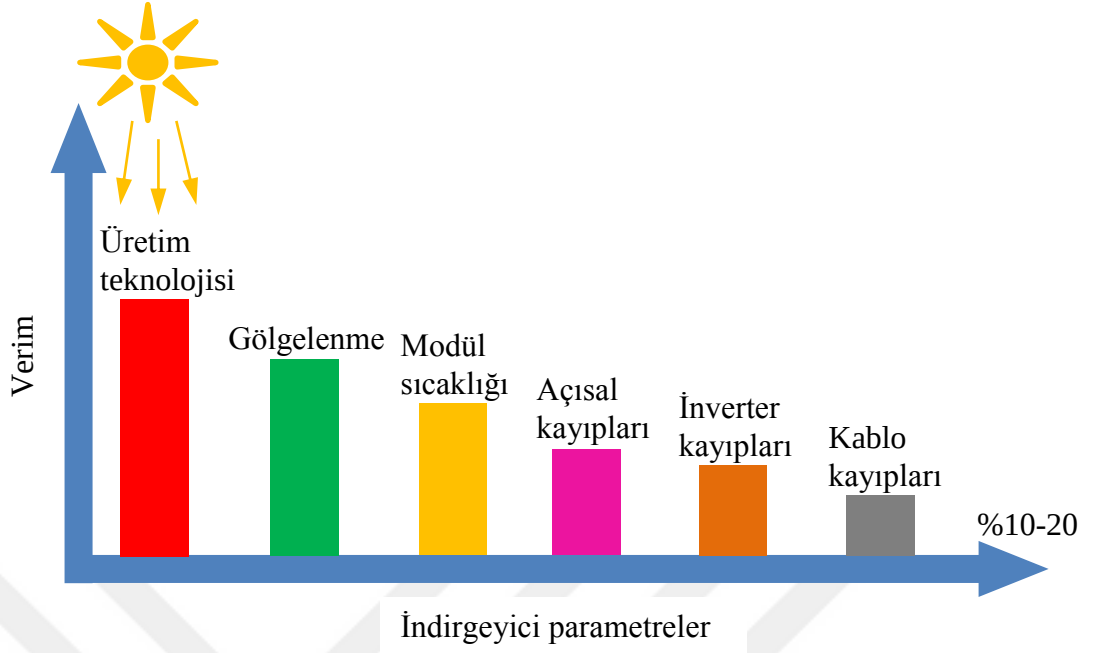
Fotovoltaik hücrelerin kristal yapıları gereği düşük gerilim üretirler bu yüzden birbirlerine seri bağlanarak gerilim değerleri, paralel bağlanarak akım değerleri yükseltilir. Seri bağlama işlemi bir hücrenin ön yüz kontakları diğerinin arka yüz kontaklarına bağlanır. Bağlantı elemanı olarak kurşun içerikli olmayan lehimler kullanılır. Standart bir fotovoltaik panel 36 ya da 72 hücrenin birbirine seri bağlanmasıyla oluşur. Paralel bağlama işlemi ise pozitif kontaklar ve negatif kontaklar kendi içinde birbirine bağlanarak elde edilir. Şekil 1.15’de hücrelerin seri ve paralel bağlantı şekilleri verilmiştir.



Şekil 1.15. Fotovoltaik hücrelerin devre şeması (a) seri bağlantı, (b) paralel bağlantı

1.3.4. Fotovoltaik hücre ve modüllerin performansını etkileyen faktörler

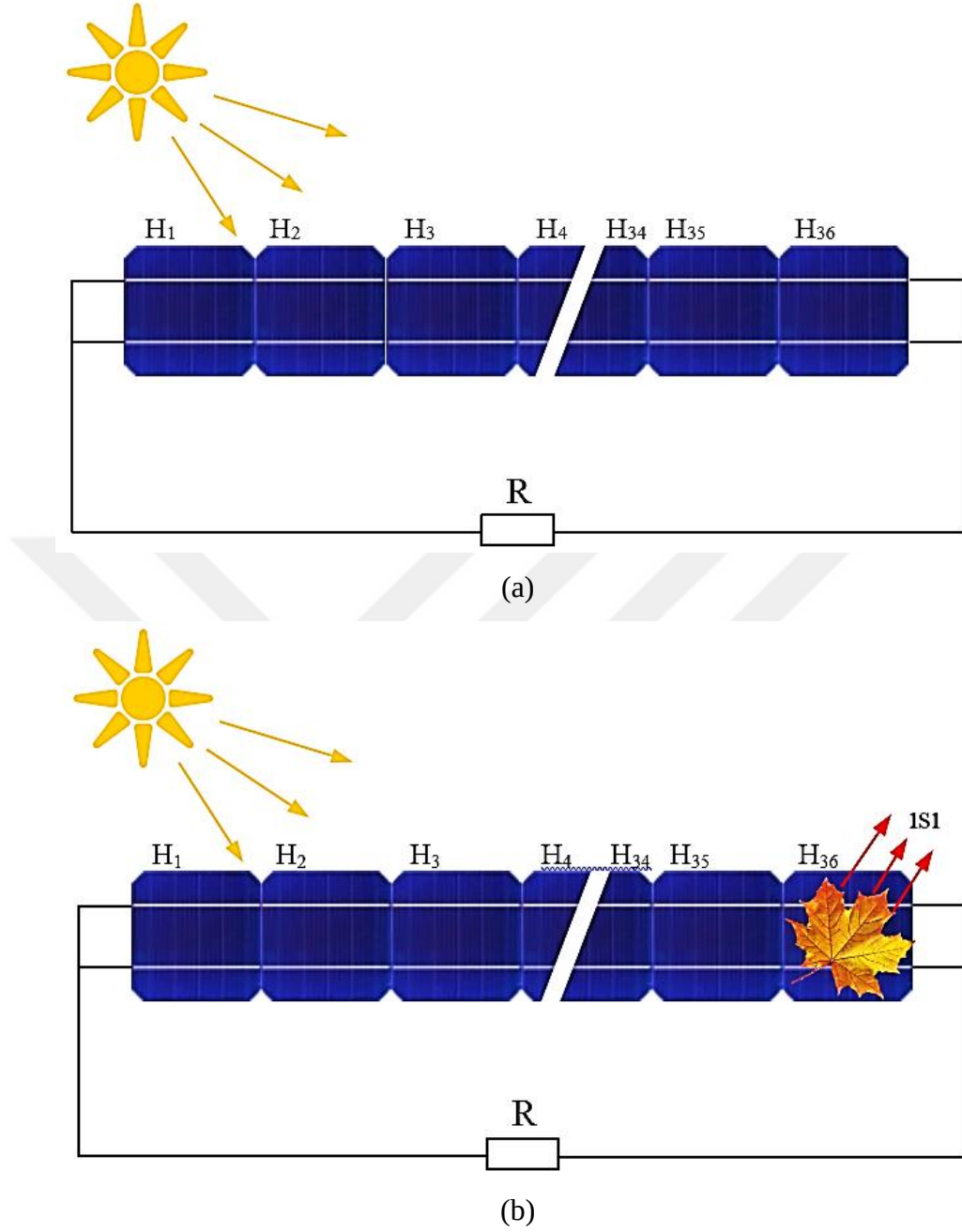
PV hücreler üzerine düşen ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik üreten yarıiletken malzemelerdir. Laboratuvar ve standart test koşullarında üretilen modüllerin verimleri uygulama alanlarındaki koşulların belirsizliği yüzünden benzerlik göstermemektedir. Bu farklılıklar modüllerin verimini önemli derecede etkilemektedir. Modüllerin çalışmasını engelleyen bazı parametreler; ışınlm, yansıma, gölgelenme, tozlanma, sıcaklık, uyumsuzluk, kablo (AC/DC), inverter kayıpları gibi sıralanabilir ve Şekil 1.16’da bu indirgeyici parametreler etken değerlerine göre verilmiştir.



Şekil 1.16. Güneş enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm sürecinde gerçekleşen kayıp etkenleri

1.3.4.1. Sıcak nokta (hot spot) ve gölgeleme etkisi

Belirli çalışma koşulları altında bir fotovoltaik paneli oluşturan bazı hücreler enerji üretmek yerine, tüketici olabilirler. Bunun nedenleri, gölgelemeler veya kırılmalar gibi hücre hasarları olabilir. Gölgeleyen bir PV hücre, hücre malzemesi zarar görebilecek derecede ısınabilir. Gölgeleyen yerde sıcak nokta meydana gelir. Sıcak nokta, bağlantı telleri tahrip olmadıkça PV hücrenin verimini sadece düşük oranda azaltır. Ancak sıcak nokta nedeniyle hücrenin ve dolayısıyla modülün hasar görme olasılığı her yeni gölgelemede artar. Şekil 1.17 (a)'da standart güneşlenme altındaki bir PV modülün gösterilmiştir. 36 hücreden oluşan bu PV sistem de üretilen akım, bir direnç tarafından tüketilmektedir. Şekil 1.17 (b)'deki gibi bir PV sisteme yaprak düştüğünde ya da kısmi gölgeleme olduğundan bu hücre tüketici durumunda olur. Bunun sebebi gerilim tersine dönerek negatif bir değer alır ve karanlıkta kalan hücre aydınlatılan hücrelerin ürettiği enerjiyi tüketerek ısıya dönüşür [4].



Şekil 1.17. Bypass diyotsuz bir fotovoltaiik sistemin çalışması (a) normal (b) gölgelenme altında

Sıcak nokta oluşumunu önlemek için, akıma bypass yapılarak PV hücrelerinin yanından geçirilir. Bypass diyotlar genellikle her 18 hücre dizi (string) grubuna ters bağlanarak işlem tamamlanır. Bu şekilde gölgelenen hücrede bloke yönünde daha büyük bir gerilimin meydana gelmesi önlenir. Ayrıca, gölgelenmeye karşı en düşük duyarlılık, her hücrenin birer bypass diyodu ile donatılması durumunda elde edilebilir. Gölgelenme etkisinin; bypass diyot sayısına, gölgelenme şekline ve eviricinin kontrol karakteristiğine bağlı olduğu unutulmamalıdır.

1.3.4.2. Sıcaklık kayıpları

Fotovoltaik modüller STK’da test edilir ve bu koşullar altındaki akım, gerilim, güç ve kayıp oranları belirtilir. Şekil 1.11’de gösterildiği gibi PV hücreler güneş ışıınımlı altında elektrik üretmeye başlarlar fakat yapılarından dolayı ışıınımlı belirli bir yüzdesi elektrik olarak dönüşürken geri kalan büyük bir yüzdelik kısmı ısı enerjisine dönüşür. ışıınımlı şiddetinin artmasıyla güç üretimi artarken, yapısında oluşan ısı gerilimde azalmaya sebep olur. Gerilimdeki lineer olmayan bu düşüş verim ve güç kaybına neden olur. Bu yüzden PV güç üretim sistemlerinde ışıınımlı değeri çok, sıcaklık değeri az olması istenmektedir. Tablo 1.4’de PV sistemlerden gerçekleşen kayıp oranları listelenmiştir. Yapılan AR-GE ve akademik çalışmalar da PV sistemlerin soğutma teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Tablo 1.4. Literatürde PV sistemlerdeki kayıp oranları

Kayıplar	Deniz [5]	Keskin vd. [6]
ışıınımlı	% 1,5	
Yansıma	% 2,5	% 4,5
Gölgeleme	% 7	% 2
Tozlanma	% 2	% 2,5
Sıcaklık	% 4,6	% 3,5
Uyumsuzluk	% 0,7	
Kablo	% 1,5	% 3,5
İnverter	% 3	% 4,5
TOPLAM	% 22,8	% 20,5

1.4. Enerji depolama teknikleri

Enerji depolama teknikleri, depolanacak enerjinin kapasitesi, türü, gün/süre ve uygulanacak tekniğe göre sınıflandırılabilir. Genel olarak; mekanik, kimyasal, elektriksel ve termal olmak üzere 4 farklı türde enerji depolama tekniği kullanılmaktadır.

- Mekaniksel enerji depolama: Büyük miktardaki enerjilerin depolanmasında kullanılan bir yöntemdir. Örneğin; doğrusal/dönel hareketten, elastik malzemelerin gerilmesinden, gazların sıkıştırılmasından ve belirli bir yükseklikteki cismin potansiyel gücünden açığa çıkan enerjiler bu yöntemle depolanmaktadır.
- Kimyasal enerji depolama: Enerji, bir veya daha fazla kimyasal bileşik tarafından depolanır. Bu bileşikler diğer bileşiklerle reaksiyona girdiğinde enerji salınır ya da

alınır. Kimyasal enerji depolamaya verilebilecek en basit ve en çok uygulanan sistem pildir. Pillerin içerisindeki kimyasal olaylar, elektrik enerjisi tarafından meydana gelirken elektrik enerjisi kimyasal enerji olarak depolanır. Pillerin iki kutbu arasına bağlanacak elektriksel bir yük depolanan kimyasal enerjiyi tekrardan elektrik enerjisine çevirmektedir [7].

- c) Elektriksel enerji depolama: Bu yöntemde kondansatör, bobin ve yakıt hücrelerinden yararlanılarak elektrik enerjisi depolanabilir. Elektrik enerjisini depolamasında kondansatörlerin en büyük problemleri boyutları olmuştur. Yüksek kapasitelerde enerji depolanacağı zaman doğrusal olarak kondansatöründe boyutu da arttığından kullanım zorlukları oluşturmıştır. Bu yüzden süperkapasitörler üretilmiş ve yüksek kapasiteli enerjiler daha küçük boyutlardaki kondansatörlerle depolanabilmiştir.
- d) Termal enerji depolama: Isı enerjisinin daha sonra kullanılmak üzere geçici bir süre depolanmasıdır. Tez kapsamında enerji depolama yöntemlerinden termal enerji depolama kullanıldığından ayrı bir başlık altında daha detaylı bir şekilde incelemiştir.

1.4.1. Termal Enerji Depolama (TED)

Termal enerji, bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Termal enerji; atomik veya moleküler titreşim sonucunda oluşur ve bu enerjinin aktarımı sıcaklık farkından kaynaklı ısı akışıyla gerçekleşir. Termal enerjiyi depolamak için temelde üç yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı depolamalarıdır. TED sistemlerinin temelinde depolama sistemine enerji sağlanması, bu enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılması prensibi yatmaktadır. Başka bir cümleyle ifade edilecek olursa, yükleme, depolama ve geri kazanma olarak özetlenebilecek bir süreçtir [8].

1.4.1.1. Duyulur ısı depolama

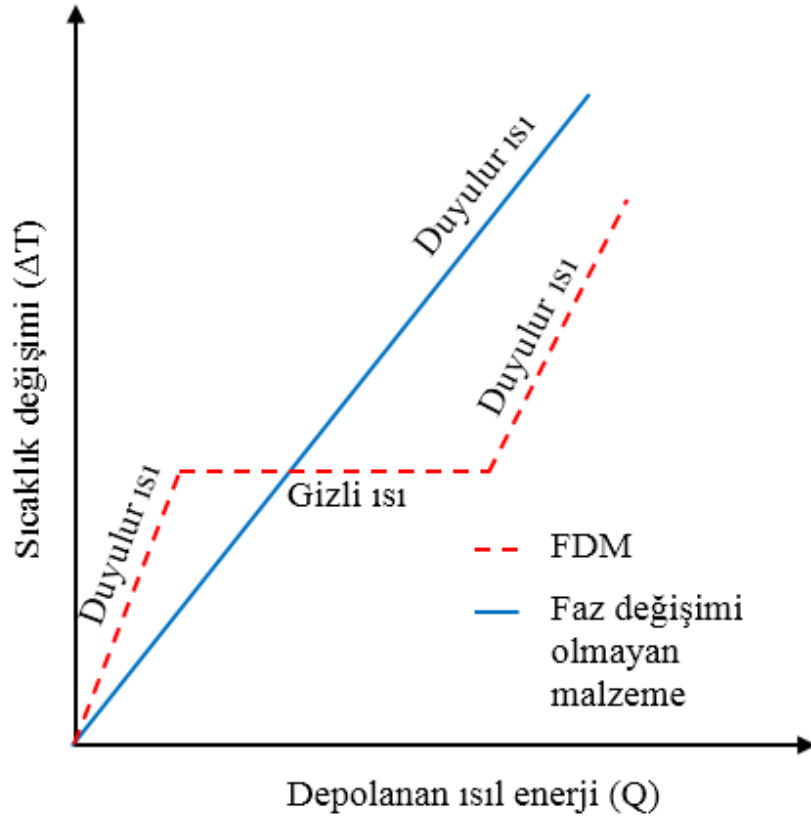
Bu yöntemin temel çalışma prensibi, ısı depolayan materyalin sıcaklığının değişmesi sonucunda ortaya çıkan duyulur ısıdan yararlanılır. Duyulur ısı depolama; maddenin bir fazdan diğer bir faza tamamen geçtikten sonraki fazında ısının depolanması veya depolanmış ısının geriye verilmesi periyodudur. Duyulur ısı depolama kullanılan malzemelerinin çoğu ucuz ve temin edilebilirlik açısından kolaydır. Ayrıca; bu malzemelerin özellikleri, ısı

depolama sistemlerinin tasarımları bakımından da uygundur. Bu nedenle günümüzdeki birçok ısı depolama uygulamasında bu yöntemden faydalanılmaktadır [7,9].

1.4.1.2. Gizli ısı depolama

Enerjinin sabit bir faz geçiş sıcaklığında faz değişimi yoluyla madde içerisinde depolanmasına gizli ısı depolama denir. Gizli ısı depolama özelliği taşıyan malzemelere faz değiştiren malzemeler (FDM) adı verilir.

Maddeler katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz ve katı-katı olmak üzere dört tür faz değişimi göstermektedirler. Faz değiştiren malzemeler, faz değiştirme aralığı olarak, bilinen belirli bir sıcaklık aralığında, bir fazdan başka bir faza geçiş yaparlar. Faz değiştiren malzemelerin daha detaylı bir tanımı, bir fazdan diğer bir faza geçiş esnasında, yani faz değiştirme prosesi süresince ısı soğurabilen ve bu ısıyı depolayabilen, tam tersi faz değişimi durumunda ise depoladığı bu ısıyı yayabilen malzemeler olarak yapılabilir. Faz değişimi esnasında ortamdaki depolanmış veya ortama yayılan ısı gizli ısıdır. Ortam sıcaklığı, faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığına kadar yükseldiğinde, FDM erimeye başlar ve erime işlemi boyunca ortamdaki sürekli olarak ısı soğurur. FDM tarafından soğurulan bu ısı, maddeyi katı halde tutan kimyasal yapıyı bozmak için kullanılır. Diğer taraftan, ortam sıcaklığı faz değiştiren malzemenin katı faza geçme sıcaklığına düştüğünde ise FDM katılaşmaya başlar ve katılaşma işlemi boyunca yapısındaki ısıyı ortama geri yayar. Faz değişim işlemi sırasında, faz değiştiren malzeme tamamen eriyinceye veya katılaşmaya kadar sıcaklığı sabit kalır. Şekil 1.18’de gizli ve duyulu ısı depolama grafiği gösterilmiştir. Faz değiştiren malzemelerin ortam sıcaklığında önemli seviyede bir değişim olmadığı durumda, erime ve katılaşma işlemleri sırasında, büyük miktarda gizli ısı absorbe ediyor ve bu ısıyı yayıyor olmaları, faz değiştiren malzemelerin ısı depolama kaynağı olarak büyük ilgi görmelerine neden olmaktadır [10,11].



Şekil 1.18. Duyulur ve gizli ısı depolama eğrileri

Gizli ısı depolamanın duyulur ısı depolamaya göre avantajları sıralanacak olursa [12];

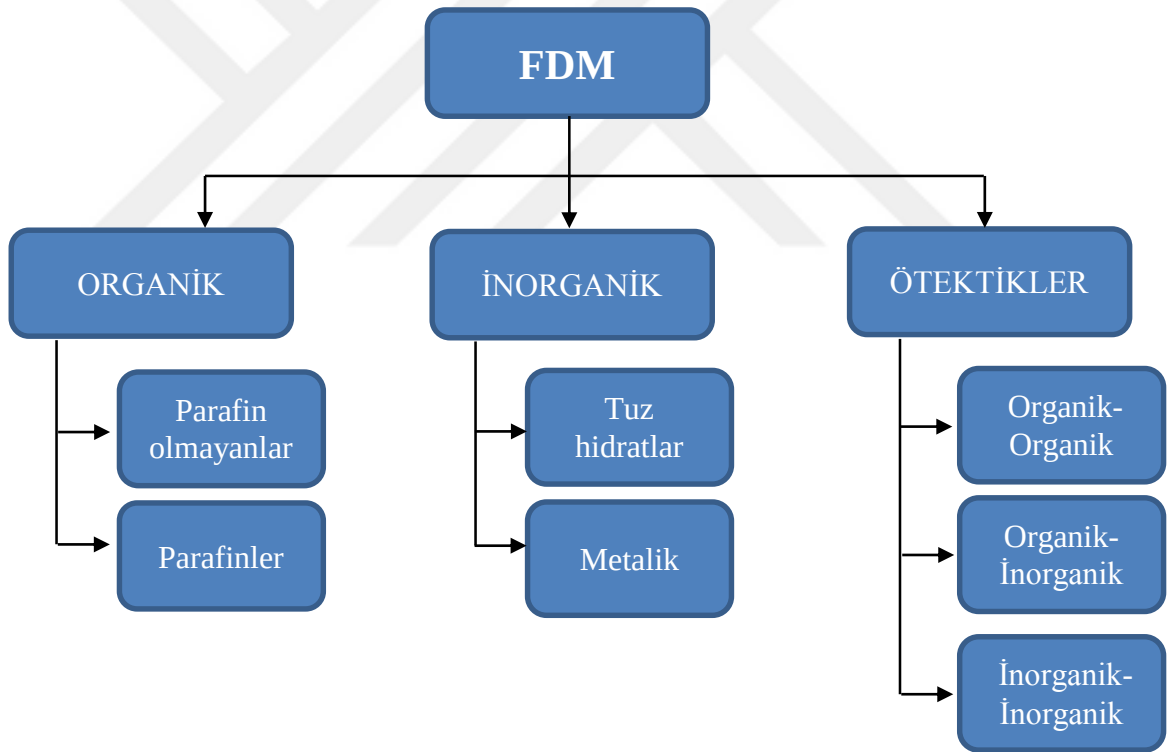
- FDM'nin birim kütlesi veya birim hacmi başına ısı depolama kapasitesi duyulur ısı depolama maddelerine kıyasla daha yüksektir.
- Duyulur ısı depolama sistemlerine nispeten "kullanılacak ısı deposunun hacmi" daha küçüktür.
- Enerji depolama süresince FDM'nin sıcaklığı hemen hemen sabit kaldığından "sabit sıcaklıkta enerji depolama ve geri kazanım uygulamaları" için oldukça uygundur.

1.4.2. Faz değiştiren malzemeler ve sınıflandırılması

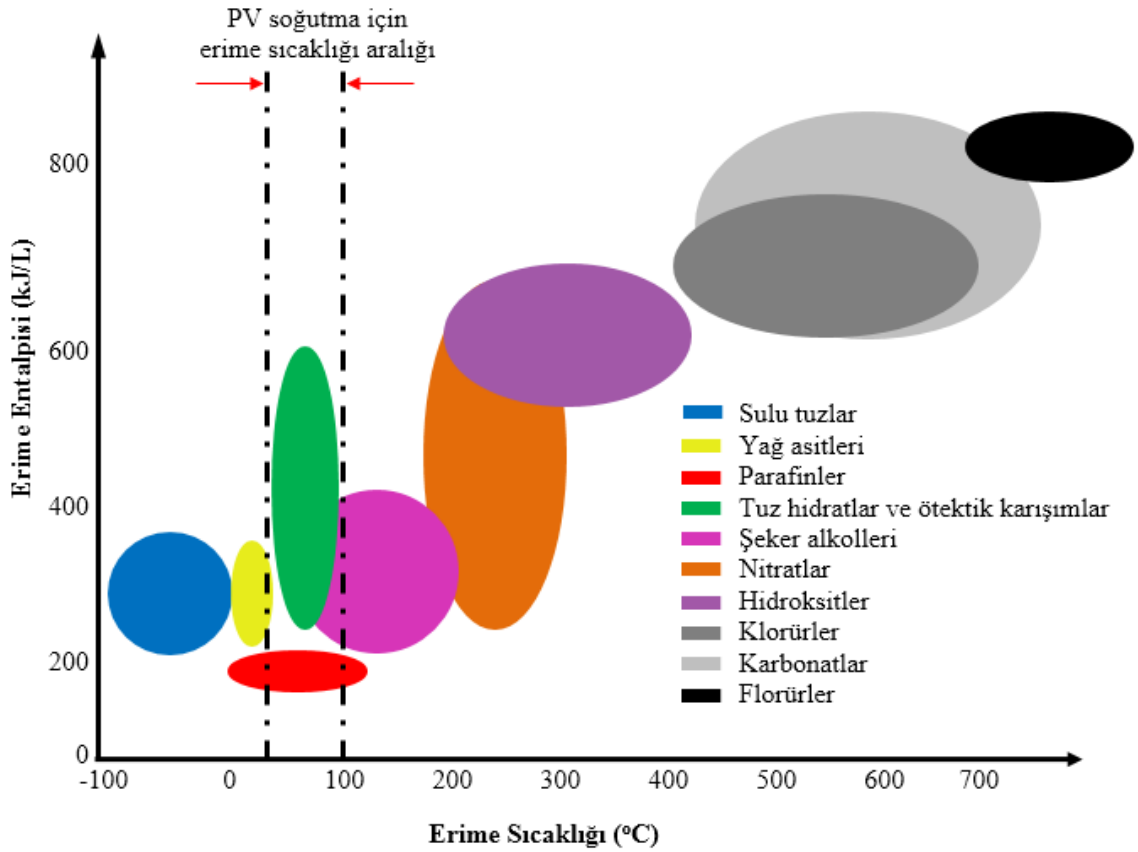
FDM'nin uygulanacağı ya da entegre edileceği sistemin çalışma sıcaklığı belirlenerek, FDM seçimi yapılmalıdır. Ticari ve laboratuvar şartlarında üretilen çok geniş sıcaklık aralıklarında FDM'ler bulunmakla beraber genel olarak 0-120 °C aralığındaki FDM'ler literatür çalışmaları arasına girmiştir. Organik, inorganik bileşikler ve ötektikler şeklinde sınıflandırılıp kendi içlerinde alt gruplara ayrılırlar.

Organik malzemeler; parafin ve parafin olmayan maddeler olarak tanımlanmaktadır. İnorganik maddeler ise tuz hidrat ve metalik olarak sınıflandırılır. İnorganik bileşikler, birim kütle başına yüksek gizli ısıya sahiptirler ve organik bileşiklere kıyasla düşük maliyetlidirler ve yanıcı değildirler. Ötektikler iki veya daha fazla bileşen içeren faz değiştiren malzemelerdir. Genellikle Organik-Organik, Organik-İnorganik ve İnorganik-İnorganik kombinasyonları uygulanmaktadır [13].

FDM'lerin büyük bir kısmı depolama için istenen tüm özellikleri bünyesinde bulundurmaz. Bu yüzden malzemenin en ucuz ve istenen özelliklere en yakın olanın seçilmesi sistem tasarımı için önemlidir. Literatür çalışmalarının bazılarında da ısı transfer hızını ve kimyasal kararlılığı arttırmak için, malzemelerin içine kanatçıklı yapılar, metalik parçacıklar eklenmektedir. FDM'lerin sınıflandırılması Şekil 1.19'de erime sıcaklıklarına göre sınıflandırılması ise Şekil 1.20'da verilmiştir.



Şekil 1.19. Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) sınıflandırılması [14]



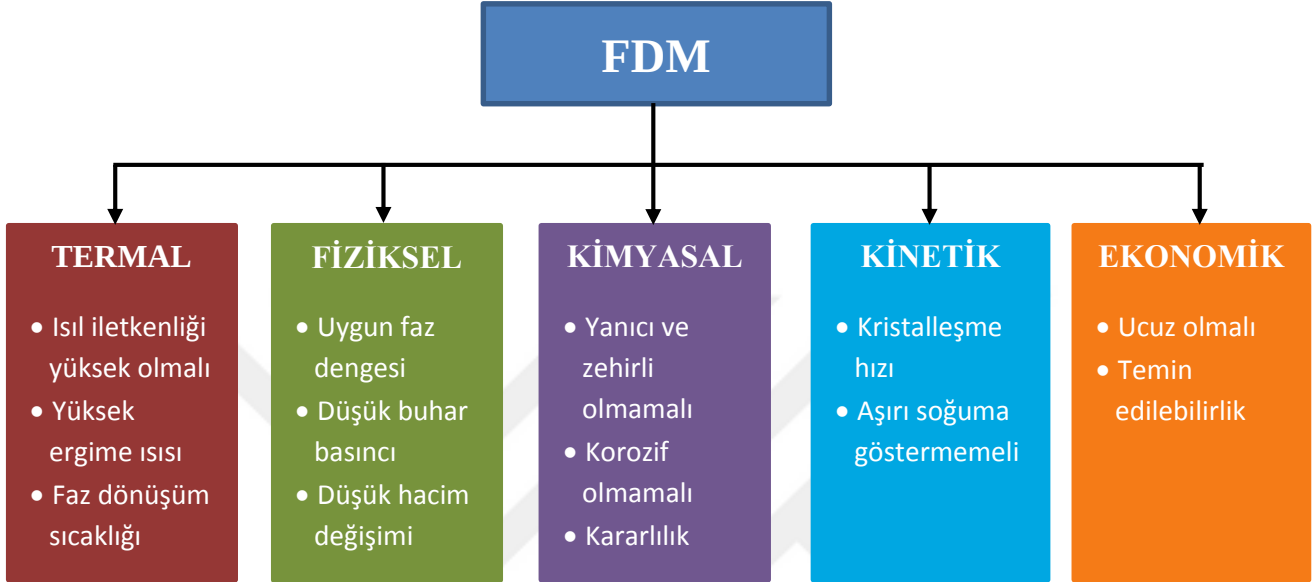
Şekil 1.20. Erime sıcaklığı ve erime entalpisine göre FDM'lerin sınıflandırılması (düzenlendi) [15]

Organik sınıfa ait olan parafinler; C₅ ile C₁₅ arasında olanlar sıvı, C₁₅ üzerindeki katı yapıdadırlar. Bu grupta ticari olarak en çok kullanılan ürün parafin wax'dır. Parafin wax, petrolün damıtılmasıyla elde edilir ve saf değildir. Saf parafinler ise çok pahalı olduklarından laboratuvar ortamlarında çalışılmaktadır. Parafinler yüksek erime gizli ısılarına sahip olup aşırı soğuma göstermezler. Metal malzemelerle uyumlu olduğundan rahatlıkla depolanabilirler. Isı iletim katsayıları düşük, yüksek sıcaklıklarda yanıcı olabilirler [7,16].

Parafin olmayan maddeler: Yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikoller gibi geniş aralıkta bulunurlar. Yağ asitleri birçok parafin ve tuz hidrata göre daha uygun erime noktasına sahiptirler. Yemeklik ve soya yağları büyük oranda palmitik, stearik, oleik ve linoleik asit içerirler. Son yıllarda yağ asitleri birçok araştırmada özellikle de soğutma uygulamalarında FDM olarak kullanılmıştır. Yağ asitlerinin çoğu oda sıcaklığı veya altında erime aralığına sahiptir ve birbirleriyle kolaylıkla karışabilirler. Ayrıca ucuz, termal özellikleri iyi ve güvenilirler [12,17].

Tuz hidratları: Faz değiştirme sıcaklıkları 0-150 °C arasında değişmektedir ve inorganik grubun büyük bir çoğunluğunu oluştururlar. Bu maddelerin en büyük dezavantajı erime-

katılaşma esnasındaki faz ayrımıdır. En önemli özellikleri ise; ergime gizli ısılarının yüksek olması, ergime-donma sonucunda hacim değişiminin az olması, organik FDM'lere göre ısı iletkenliklerinin yüksek olmasıdır [12]. FDM'lerin termofiziksel özellikleri Şekil 1.21'de, avantaj ve dezavantajlarının kıyaslaması Tablo 1.5'de verilmiştir.



Şekil 1.21. Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) yapısında bulundurması gereken özellikleri (düzenlendi) [17]

Tablo 1.5. Organik ve inorganik maddelerin olumlu/olumsuz yönlerinin karşılaştırılması [18]

	Olumlu	Olumsuz
Organik	- Korozif özelliği yoktur. - Aşırı soğuma genellikle yoktur. - Kimyasal ve termal denge içerisindedir.	- Düşük ısı ve erime Entalpisi - Yanıcı özellik gösterebilmeleri
İnorganik	Yüksek erime entalpisi	- Korozyon - Faz ayrışması - Termal dengesizlikler - Aşırı soğuma

1.5. Termoelektrik

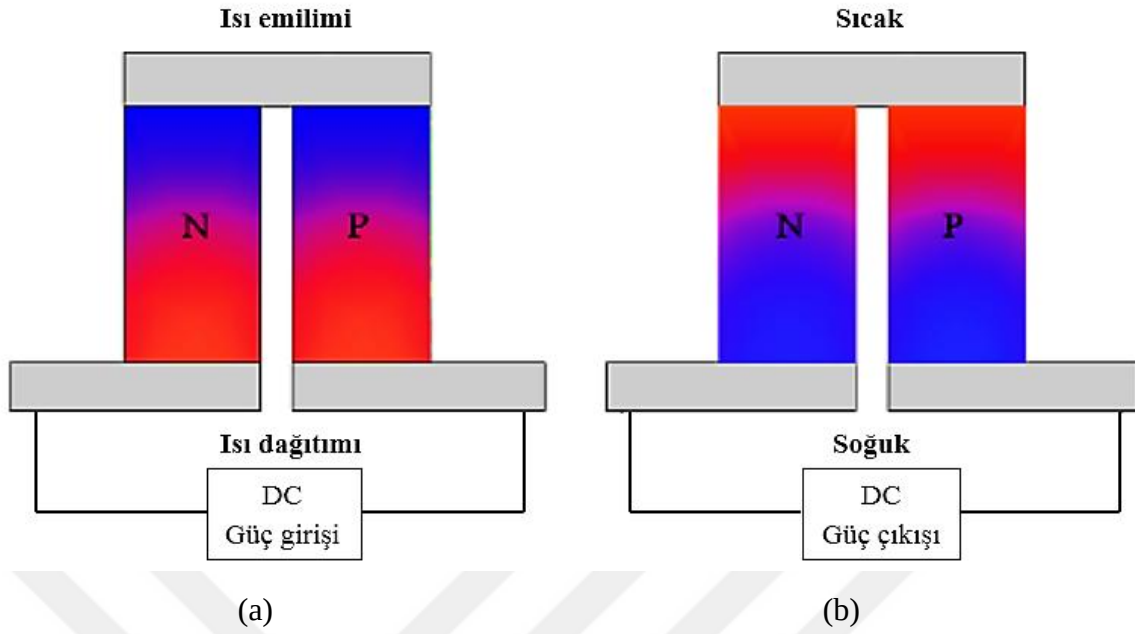
Elektriksel ve ısı etkilerin bir arada bulunduğu, yarı iletkenlerden oluşan devreye termoelektrik devre adı verilir. Bu devre ile çalışan sisteme de termoelektrik sistemler denir.

Isı enerjisinin elektrik enerjisine, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümlerinin temelini oluşturan termoelektrik etkiler, 150 yıldan daha fazla zamandır bilinmektedir. Termoelektrik etki, 1821 yılında Thomas Johann Seeback ve 1934 yılında Charles Athanase Peltier isimli araştırmacıların yaptıkları çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

1.5.1. Termoelektrik etkiler

Sıcaklık farkının elektriğe, elektriğin sıcaklık farkına dönüşmesi termoelektrik olarak adlandırılır ve Seeback, Peltier ve Thomson etkileri olmak üzere 3 çeşittir. Seeback ve Peltier etkilerinin modellenmesi Şekil 1.22’de gösterilmiştir.

- a) *Seeback Etkisi:* İki farklı yarı iletken malzemelerin birbirine seri olarak birleştirilmesi ile oluşan sistemde farklı sıcaklıklarda elektrik üretimi meydana gelir. Bu gerilim “ Seeback” olarak adlandırılır. Devreden ölçülen gerilim, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır.
- b) *Peltier Etkisi:* İki farklı materyalden oluşmuş bir kapalı devreden “I” akımı geçirilirse, birim zamanda açığa çıkarılan ısı miktarı, “I” akımı ile doğru orantılıdır. Peltier etkisiyle ısı, soğuk yüzeyden sıcak yüzeye transfer edilmekte, ayrıca bir ısı üretilmemektedir.
- c) *Thomson etkisi:* Bir iletkenin iki ucunun farklı sıcaklıklarda tutuluyor olduğu durumda uygulanan akımın yönüne bağlı olarak enerjinin iletken üzerinde soğurulması ya da birikmesi olayıdır. Diğer bir ifadeyle, Thomson etkisi, ısıtmada ya da soğutmada homojen bir iletken üzerinden akım geçtiği sürece sıcaklık gradyeninin meydana geldiğini ifade eder. Thomson ısı akım şiddeti, sıcaklık farkı ve zamanla doğru orantılıdır ve kullanılan metallerin cinsine bağlıdır [19].



Şekil 1.22. Termoelektrik etkilerin modellenmesi (a) Peltier, (b) Seebeck [20]

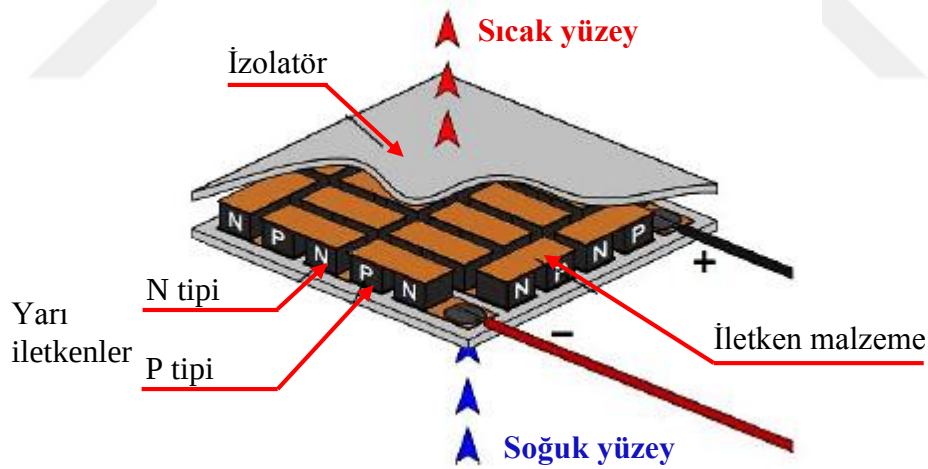
1.5.2. Termoelektrik modüller ve yapısı

Termoelektrik modüller (TEM), termoelektrik jeneratörler (TEG) ve termoelektrik soğutucular (TEC) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Termoelektrik modüller, termodinamik prensiplere göre doğrudan enerji dönüşümlerini gerçekleştiren sistemlerdir. Tablo 1.6’da TEM’lerin sınıflandırılması ve aralarındaki farklar gösterilmiştir. TEG’ler ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür ve elektrik üretimi için yüzeyleri arasında sıcaklık farkının oluşması gerekmektedir. Sıcaklık farkı arttıkça üretilen güç değeri de lineer olmayan bir eğriyle artacaktır. TEC’ler ise, ısı pompaları gibi çalışırlar. Sisteme gerilim uygulandığında soğuk yüzey soğutulur ve sıcaklık farkı elde edilir ve diğer yüzey soğutucu gibi çalışmaya başlar. Bu işlemin tam tersi uygulandığında da ısıtıcı olarak görev görür.

Tablo 1.6. Termoelektrik modüllerin özellikleri

Özellikler	Termoelektrik modüller (TEM)	
	Termoelektrik soğutucular (TEC)	Termoelektrik Jeneratörler (TEG)
Termoelektrik etki	Peltier	Seeback
Yapılan iş	Isı pompalama	Güç üretimi
Eleman boyutu	Genelde küçük	Büyük
Lehim sıcaklığı	Düşük	Yüksek
İzolatör	RTV silikon	Teflon

Termoelektrik modüller, izolasyon malzemesi üzerine yerleştirilmiş N ve P tipi yarı iletken malzemelerin birbirine seri bağlanması ile meydana gelir. N tipi malzemeler bir elektron fazlalığına sahiptirler ve ısı ile serbest olan elektronlarla taşınır. P tipi yarı iletken malzeme ise, bir elektron eksikliği olan malzemedir ve ısı boşluklar yardımıyla taşınır. TEM'lerin içerisinde kullanılan hücre çiftlerinin sayısına göre güçleri belirlenmektedir [21]. Hücre çiftlerinin ve bir TEM'in iç yapısı Şekil 1.23'de gösterilmiştir.

**Şekil 1.23.** Termoelektrik modüllerin (TEM) iç yapısı ve bağlantı şekli

Bir termoelektrik modülün soğutma performansı, performans katsayısı ile değerlendirilir. Performans katsayısının değeri boyutsuz bir değer olup, termoelektrik malzemenin sıcaklık farkı vasıtasıyla elektrik enerjisini dönüştürmedeki verimini ifade eder. Bu parametrenin zamana göre değişen boyutsuz soğutma performans değeri [19],

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{K} \quad (1.5)$$

1.5.3. Termoelektrik denklemler

Ticari olarak satılan termoelektriklerin soğuk yüzey sıcaklığı T_c , sıcak yüzey sıcaklığı T_h , maksimum gücü P_{max} , iç direnci R şeklinde gösterilmektedir. Yük direnci ise bizim sisteme bağladığımız direnç değeri olup R_L şeklinde gösterilmektedir. Kullanılacak bir termoelektrik modül için verimliliğin yüksek olmasında; büyük Seebeck sabiti α , düşük elektriksel direnç R ve düşük termal iletkenlik k_{th} değerleri etkindir.

Termoelektrik jeneratörün termal iletkenliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_{th} = \frac{\alpha^2}{RZ} \quad (1.6)$$

N adet çiftten oluşan bir termoelektrik modülde sıcak yüzeyden emilen ısı miktarı

$$Q_h = 2N \left(\alpha I T_h - I^2 \left(\frac{\rho}{2G} \right) + k \Delta T G \right) \quad (1.7)$$

soğuk yüzeyden atılan ısı miktarı

$$Q_c = 2N \left(\alpha I T_c - I^2 \left(\frac{\rho}{2G} \right) + k \Delta T G \right) \quad (1.8)$$

Termoelektrik modülün ürettiği güç;

$$P = Q_h - Q_c \quad (1.9)$$

veya

$$P = IV \quad (1.10)$$

Termoelektrik modülün verimi ise elde edilen elektriksel gücün harcanan ısı güce oranıdır

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \quad (1.11)$$

1.6. Literatür taraması

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil kaynaklara göre insan sağlığını ve çevreyi daha az etkilemektedir. Petrol fiyatlarının artması, iklim değişikliği ve bununla beraber gelen küresel ısınma ülkeleri yenilenebilir enerji teknolojilerine yatırım desteklerine yönlendirmiştir. İlerleyen teknoloji ve malzeme bilimi ile verimleri her geçen gün artan bu teknolojiler AR-GE çalışmalarının ve ülkelerin kalkınma politikaları içerisinde yer almıştır.

Bu bölümde yenilenebilir enerji teknolojilerinin popüler konularından biri olan fotovoltaik modüllerin enerji, ekserji verimleri, sıcaklığın etkisi, soğutma teknikleri ve atık ısıdan elektrik üretim parametreleri incelenecektir.

1.6.1. Fotovoltaik paneller ve sıcaklık etkisi

Fotovoltaik modüllerin verimini etkileyen panel yüzey sıcaklığı, gölgelenmeden kaynaklanan güç kayıpları, sıcak nokta oluşumu (hot point), enerji ve ekserji verimleri bu bölümde incelenmiştir.

Malik ve Damit [22] tek kristalli fotovoltaik panelin çevre şartlarındaki verimleri ile STK'larındaki verimlerin karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonunda elde ettikleri veriler ise sırasıyla şöyledir: hücre sıcaklığındaki birim °C yükselişe hücre veriminde % 0,06 kayıp meydana gelmektedir. Farklı çevre sıcaklığı ve benzer güneş ışınlam değerlerinde çıkış gücü veya verim, artan hücre sıcaklığı ile azalır. Deneylerdeki panel ile STK'daki panel verimleri arasında % 54 fark tespit edilmiştir.

Radziemska ve Klugmann [23] silisyum hücreli fotovoltaiklerin I-V karakteristiklerine etki eden sıcaklık parametresini incelemişlerdir. Hücre sıcaklığı, ışınlam değerinin ve süresinin bir fonksiyonu olarak 22 °C ile 70 °C arasında değişim göstermiştir. Hücre sıcaklığındaki birim °C yükselişinde, fotovoltaik çıkış gücünde yaklaşık % 0,8 azalma bulunmuştur. Hücre sıcaklığının artmasıyla kısa devre akımında (I_{sc}) minimum değişiklik gözlemlenirken, açık devre geriliminde (V_{oc}) ciddi düşüşler görülmüştür.

Radziemska [24] tek kristal hücreli fotovoltaik panelin farklı sıcaklıklar altındaki akım-gerilim eğrilerini, dolgu faktörü ve verimini deneysel yöntemlerle incelemiştir. Panelin; 25 °C'deki çıkış gücü 79,60 W verimi % 13,3 olarak bulurken 60 °C'deki sıcaklıkta bu değerler 61,28 W ve % 10,3 değerlerine azaldığını belirtmiştir. Son olarak, panel üzerinde artan hücre sıcaklığı gerilim değerini azalttığından çıkış gücü ve verimi önemli derecede etkilemiştir.

Cuce vd. [25] çalışmalarında, mono-kristal ve polikristal fotovoltaik modüllerin performansını etkileyen parametreleri deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler, sırasıyla 200-500 W/m² ve 15-60 °C aralığında çeşitli yoğunluk seviyeleri ve hücre sıcaklıkları için kalibre edilmiş bir güneş simülatörü altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ışık yoğunluğunun geçerli parametreler üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Açık devre voltajı ve maksimum voltaj, hücre sıcaklığı arttıkça önemli ölçüde azalır. Elde edilen sonuçlar vasıtasıyla, PV sistemlerinin performansını artırmak için kilit ögenin, PV'ye düşen ışık yoğunluğunu en yükseğe çıkarmak ve hücre sıcaklığını en aza indirmek olduğu sonucuna varılmıştır. Öte yandan, açık devre voltajında ve maksimum voltajda ciddi düşüşü önlemek için hücre sıcaklığı mümkün olduğunca minimum tutulmalıdır.

Oğuz vd. [26] 100 W gücündeki 3 farklı tip fotovoltaik panelin aynı güneş ışınlamı altındaki elektrik üretimlerinin kıyaslamasını yapmışlardır. Panellerin gerilim değerleri

incelendiğinde en yüksek voltajı ince film teknolojisi ile üreten panel verirken mono ve polikristal hücreli paneller birbirlerine yakın gerilimler üretmişlerdir. Panellerin güç kıyaslamasına bakıldığında ise ince film panelin çıkış akımı çok düşük olduğundan gerilim değeri yüksek olsa bile en düşük üretimi vermiştir. Mono ve polikristalin güç eğrileri incelendiğinde ise polikristal hücreli panelden en yüksek güç değerleri elde edilmiştir. Ayrıca; panellerin ergonomik ve ekonomik kısımları da incelendiğinde polikristal panellerin öne çıktığı belirtilmiştir.

Sudhakar ve Srivastava [27] fotovoltik panellerin elektrik üretimine etki eden; modül sıcaklığı, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, dolgu faktörü ve ısı kayıp katsayıları gibi parametreleri deneysel yöntemle incelenmiştir. Deneyler sonunda enerji verimini % 6,4 ekserji verimini ise % 8,5 bulmuşlardır. Ayrıca, modül sıcaklığının PV panellerin verimi üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğun ve ciddi ekserji kayıplarına yol açtığını vurgulamışlardır.

Fotovoltik sistemlerin; sıcaklık etkisini, dolgu faktörünü, enerji ve ekserji verimleri inceleyen lisansüstü tezler de aşağıdaki gibidir.

Eke [28] PVSYST 3.02 simülasyon programını kullanarak fotovoltik güç sistemlerinin verimlilik analizini yapmıştır. Fotovoltik sistemin yıllık ve aylık elektrik üretimi, güç kayıpları, çalışma süresi ve sıcaklığı incelenerek simülasyon verileri ile gerçek sistemin verimleri karşılaştırılmıştır. Farklı güçlerdeki sistemler için önerilerde bulunmuştur.

Dişçigil [29] 3 farklı sistemin [a) PV/T yalıtımlı, b) PV yalıtımlı ve c) PV yalıtımsız] aynı şartlardaki verimlerini karşılaştırmıştır. Fotovoltik panellerin yüzey sıcaklıklarının artması elektriksel verimlerini negatif etkilemektedir. Bu yüzden yalıtımı yapılan ve su ısıtma işlemi yapılarak PV'nin sıcaklığı düşürülerek en yüksek verim ve en düşük yüzey sıcaklığı yalıtımlı fotovoltik/termal sistemde olmuştur.

Mastar [30] Güneş takip sistemleri % 25 ile % 40 arasında verimliliğe etki etmektedir. 15 kWp'lik bir sisteme güneş takip mekanizması tasarlamıştır. Tasarlanan sistemin sabit eksenliye göre yıllık kazancı ve verimlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca güneş takip sistemlerinin düşük maliyetli ve yüksek çevrim oranlı redüktörler olduğunu ve bunların üzerinde de çalışılması gerektiği vurgulamıştır.

Sarioğlu [31] Fotovoltik panellerin farklı gölgelenme durumlardaki güç performansına olan etkilerini incelemiştir. Sistemde bypass diyotları kullanılarak gölgelenmeden meydana gelen olumsuzluklar %30 ile %50 oranlarında düşürülmüştür. Ayrıca, güneş ışınımından

meydana gelen sıcaklığın yanı sıra seri bağlı hücrelerde oluşan gölgelenme sıcak noktalar meydana getirerek hücre sıcaklığını %10 ile %15 civarında arttırdığını belirtmiştir.

Kaplan [32] Fotovoltaik panelin katalog değerlerini kullanarak Matlab ortamında modellemesini yapmıştır. Seri direncin fotovoltaiklerin çalışma gücü üzerindeki etkisini incelemiştir. Fotovoltaik paneller için optimum çalışma ortamının soğuk ve güneşli iklim bölgeleri olduğunu belirtmiştir.

Kaymak [33] Enerji kayıplarını ve ekserji verimliliğinin rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerindeki önemini incelemiştir. Yaptığı deneysel çalışmaların sonunda; fotovoltaik panellerin hücre sıcaklıkları ile çevre sıcaklıkları arasında farklılıkların olduğunu, hücre sıcaklığının verime negatif etki ettiğini ve entropi kayıplarının yüksek seviyelerde olduğunu belirtmiştir.

Yerli [3] farklı meteorolojik parametreleri kullanarak; parametrelerin fotovoltaik paneller üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu parametreler (a) yayılı (difüz) ışınım değeri; genel olarak sabah, öğle-ikindi ve akşam olmak üzere 3 farklı grupta ele alınmış ve etkileri incelenmiştir. (b) atmosferik sıcaklık; deneyler sonunda çevre sıcaklığının fotovoltaik paneller üzerinde bazı aylarda pozitif etkisi olurken bazı aylarda negatif etkisinin olduğunu göstermiştir. (c) hücre sıcaklığı; elde ettiği veriler sonucunda hücre sıcaklığının negatif bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur. (d) bağıl nem ve rüzgar; bu parametrelerde diğer (a,b,c) parametreler gibi olumlu ya da olumsuz net bir sonuç elde edilememiştir.

Bakır [34] Fotovoltaik (PV) ve fotovoltaik/termal (PV/T) sistemlerini aynı test koşullarında deneysel olarak karşılaştırmıştır. Elde ettiği veriler doğrultusunda sistemlerin enerji ve ekserji verimlerini hesaplamış ayrıca belirsiz ve ekonomik analizlerini yapmıştır. Deneyler sonunda PV/T sistemin PV sisteme göre olumlu olmasının sebebinin soğutma etkisinin olduğunu belirtmiştir. Son olarak sıcaklık etkisinin azaltılması ile PV/T sistemlerin amortisman sürelerinin kısılacağını ifade etmiştir.

Öztürk [35] Karabük iklim şartlarında gerçekleştirilen deneylerde PV panellerin zamana bağlı sabit farklı sıcaklıklar (10, 20, 30 ve 40 °C) altındaki verim analizi incelemiştir. Deneyler sırasında güneş ışınım şiddeti, çevre sıcaklığı, panel arka sıcaklığı, akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Panel kapalı bir sistem içerisinde tutulup arka yüzey rezistans ile ısıtılır iken buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi ile soğutulmuştur. Ortamda nem olmaması için kurutucu yerleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda panel arka sıcaklığının 14,9 °C olduğunda panel verimi %12, 51,3 °C olduğunda % 10,7 olarak hesaplamıştır. Sonuç olarak 40 °C en düşük verim değerlerini elde etmiştir.

Keskin [36] PVSYST programını kullanarak Türkiye'deki 7 il (Ankara, Antalya, İzmir, Konya, Samsun, Şanlıurfa, Van) için 3 ayrı fotovoltaik teknolojisi için (monokristal, polikristal ve amorf silikon) farklı iklim koşullarında enerji ve maliyet analizlerini yapmıştır. Analizler incelendiğinde en yüksek verim değerine monokristal teknolojisi en yüksek üretim değerine ise amorf silikon teknolojisi çıkmıştır. Sistemde en yüksek kayıplar %8-9 oranlarında modül üzerindeki sıcaklık farkları olmuştur. Ayrıca; illerin rakım değerleri yani yükseklikleri de bu programda incelenmiş ve yükseklik değerinin sisteme pozitif etki ettiği belirtilmiştir.

Tuna [37] fotovoltaik paneller kullanarak çardak serinletme sistemi kurmuştur. Bu yeni sistemle ortamdaki açık hava sıcaklığı yaklaşık 10-15°C düşürülmüştür. PV panelin verimi %17,12 olarak hesaplanırken amorti süresi ise 3,7 yıl olarak belirtilmiştir.

1.6.2. Faz değiştiren malzemeler ile fotovoltaik panellerin soğutulması

Bir PV modülüne ulaşan güneş ışınımının çoğu elektrik enerjisinden çok termal enerjiye dönüşür ve modülün yüzey sıcaklığını artırır. PV modüllerde sıcaklık artışı kısa vadede verim kaybına uzun vadede ise hücre bozulmalarına neden olur. Sıcaklık artışlarını azaltmak için genellikle termal yönetim teknikleri fotovoltaik modüllere ya da sistemlere uygulanır. Bu bölümde; literatürde bulunan fotovoltaik modüllerin termal yönetiminde kullanılan faz değiştiren malzemelerin etkisi araştırılmış ve detaylı bir tablo olarak özetlenmiştir.

Machniewicz vd. [38] fotovoltaik panellere etki eden sıcaklık etkisini ESP-r yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarının amacı, panellerin arka yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimlerini faz değiştiren malzemeler ile indigeyerek panel veriminin artırılmasıdır. Simülasyon çalışmalarında RT10HC, RT18HC, RT25HC ve RT35HC olmak üzere 4 farklı FDM kullanmışlardır. Bu faz değiştiren malzemelerin erime sıcaklıkları sırasıyla 9, 17, 22 ve 34 °C iken her birinin ısı iletim katsayıları 0,2 W/mK olarak alınmıştır. Ayrıca, gizli ısı kapasiteleri ise sırasıyla 126, 222, 177 ve 197 kJ/kg'dır. Elde edilen sonuçlarda, yaz aylarında panellerin verimine en büyük etki eden RT18HC ile RT25HC olmuştur. Sonuç olarak 18-25 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılan FDM'lerin panellerin verimine pozitif yönde etki ettiğini vurgulamışlardır.

Stropnik ve Stritih [39] çalışmalarında faz değiştiren malzemeler kullanılarak fotovoltaik panellerin elektrik veriminin artırılmasını sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmalarındaki simülasyon analizlerini TRNSYS programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. RT28HC isimli FDM'yi ise hem deneysel hem de sayısal analizlerde

kullanmışlardır. FDM'siz ve FDM'li panellerin sıcaklıkları karşılaştırıldığında ΔT ($T_{FDM'siz} - T_{FDM'li}$) 35,6 °C olarak bulunmuştur. FDM'siz panelin yıllık elektrik üretim verimi % 11,4 iken FDM'li panelin yıllık elektrik üretimi ise %12,2 olarak hesaplanmıştır.

Huang vd. [40] nümerik ve sayısal çalışmalarında kanatçık ve FDM etkilerinin PV paneller üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kimyasal olarak RT25 (SIVI) ve GR40 (katı) kullanılmışlardır. 3 farklı depo içerisine farklı uzunluk ve kalınlıklarda kanatçık kullanılarak FDM'ler koyulmuştur. FDM'siz panel ile FDM'li (GR40) panel arasında 18 °C, RT25 ile 35°C bir sıcaklık farkı olmuştur. Paneller üzerinde genel bir sıcaklık dağılımı yapıldığında en düşükten en yükseğe sıralama PV+FDM+kanatçıklı, PV+FDM, PV+kanatçık ve PV şeklinde olmuştur.

Hasan vd. [41] Fotovoltaik panellerin sıcaklıktan doğan verim kayıplarını azaltabilmek için erime sıcaklıkları 21 °C ile 29 °C arasında değişen 5 farklı faz değiştiren malzeme kullanmışlardır. FDM deposu olarak 4 depo kullanmışlardır. Bu depoların malzemeleri ve genişlikleri ise, (A) alüminyum 5 cm, (b) perspeks 5cm, (c) alüminyum 3 cm (d) perspeks 3cm'dir. Tüm deneyler sonunda alüminyumun ısı iletim katsayısı perspeksin ısı iletim katsayısından daha iyi olduğundan tüm FDM'ler içinde en iyi performansı vermiştir. Alüminyum deponun genişlik durumu incelendiğinde ise 5 cm'lik depoda diğerine göre daha iyi sonuçlar almışlardır. Faz değiştiren malzemeler kıyaslandığında ise saf tuz hidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) polikristal hücre üzerinde en fazla sıcaklık düşüşünü sağlamıştır.

Huang vd. [42] Fotovoltaik paneller üzerindeki fazla sıcaklığın soğutulabilmesi için FDM ve kanatçık entegreli yeni nesil güneş panelini deneysel olarak çalışmışlardır. FDM olarak Waksol A, RT25 ve RT35 maddelerini kullanmışlardır. Kanatçıklar arası mesafe 33, 24, 12, 8 ve 4 mm olarak ayrı ayrı alınıp deneyler tekrar edilmiştir. Deneyler sonunda panelin ön yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri en düşük 8 mm aralıklarda çıkarken en yüksek sıcaklık kanatçıksız panel yüzeyinde meydana gelmiştir. Ayrıca bu çalışmada RT25 kimyasalının kullanılması panel üzerinde daha olumlu sonuçlar vermiştir.

Hasan vd. [43] Pakistanın-Vehari ve İrlanda-Dublin şehirlerindeki iklim koşullarını baz alarak elde ettikleri veriler ile fotovoltaik panellerin iklim ve sıcaklık durumlarında ki etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelenmişlerdir. Araştırmalarında 2 farklı faz değiştiren malzeme kullanılarak FDM'siz panel ile FDM'li panellerin hem sıcaklık hem de güç karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmalarının sonunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ malzemesi her iki bölgede de kaprik-palmitik asit ve FDM'siz paneller ile karşılaştırıldığında daha yüksek sıcaklık düşüşü ve güç tasarrufu sağlamıştır. Ayrıca, sayısal ve deneysel sonuçların birbirleriyle

uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. 65 W'lık polikrystal bir panelden Vehari iklim koşullarında elde edilen güçler; PV panel için 42,52 W, PV+FDM_{C-P} için 47,84 W ve PV+FDM_{CaCl2.6H2O} içinse 48,04 W hesaplanmıştır.

Hasan vd [44] faz değıştiren malzeme (FDM) içeren bir binaya entegre edilmiş fotovoltaiik (BIPV) paneli, ölçekli bir alanın yapı elemanı olarak değerdendirmişlerdir. Fotovoltaiik panelin arkasına FDM katmanı ve PV+FDM'nin arkasında yalıtılmış bir oda ekleyerek prototip tamamlanmıştır. Eklenen FDM katmanının etkisi, sıcak iklim koşullarında sırasıyla PV ve kapalı alanın elektriksel ve termal enerji verimliliğı üzerindeki etkisi incelenmiştir. BIPV'deki FDM, ön ve arka PV yüzeylerinde FDM'siz PV'ye kıyasla sırasıyla 12,3 °C ve 22,6 °C sıcaklık düşüşü sağlamıştır. FDM'nin dahil edilmesi ile PV sistemin enerji üretimi maksimum % 7,2 genelde ise % 5,5 oranında arttırılmıştır.

Huang [45] Bu çalışmada, tekli FDM uygulaması için gelişmiş bir PV/FDM sayısal simülasyon modeli, PV/FDM sistemindeki üçgen bir hücrede çoklu FDM'lerin termal performansını öngörmek üzere değıştirilmiştir. PV/FDM sisteminin farklı faz geçici sıcaklık FDM'leri ile termal regülasyonu tartışılmıştır. Farklı kombinasyonları karşılaştıran RT27-RT21, günlük çalışma sırasında en yüksek sıcaklık düşüşüne ulaşır.

Browne vd. [14] fotovoltaiik teknolojilerin (PV, CPV, BIPV) termal yönetiminde kullanılan FDM'lerin detaylı bir incelemesini yapmışlardır. FDM'lerin paneller üzerinde biriken atık ısıyı kendi üzerine çekerek elektriksel verimlerin artmasına neden olmuştur. Bu çalışmalarda; FDM'lerin şarj ve deşarj süreleri tespiti, ısı iletim katsayılarının artırılması, farklı tipdeki FDM'lerin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi PV'lerin geleceğı adına önemli olduğı vurgusu yapılmıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, fotovoltaiik modüllerin yüzey sıcaklıklarının indirgenmesinde kullanılan FDM'ler başarılı olmuştur. Genel olarak araştırmacılar panellerin yüzey sıcaklıklarını azaltarak, güç ve verim değerlerine yoğunlaşmış ekserji analizleri eksik kalmıştır. Tablo 1.7'de literatürdeki çalışmaların genel bir özeti verilmiştir.

Tablo 1.7. Literatürdeki bulunan bazı çalışmalarının özeti

Yazarlar	Yıllar	Dergi	Analiz	Çalışma türü	FDM özellikleri				Panel özellikleri		Sonuçlar	
					FDM isimleri	Erime sıcaklığı (°C)	Gizli ısı kapasitesi (kJ/kg)	Isı iletim katsayısı (W/mK)	Panel türü	Panel gücü (W)	Sıcaklık farkı (°C)	Verim farkı (%)
Machniewicz vd. [38]	2015	Energy procedia	Sıcaklık-Verim	Sayısal	RT10HC	9	126	0,2	İnce film CIS	-	~ 10	-
					RT18HC	17	222					
					RT25HC	22	177					
					RT35HC	34	197					
Stropnik ve Stritih [39]	2016	Renewable Energy	Sıcaklık-Verim	Deneysel ve sayısal	RT28HC	28	245	0,2	Monokristal	250	35,6	8,7
Huang vd [40]	2006	Solar Energy	Sıcaklık	Deneysel ve sayısal	RT25	26,6	232	0,19	-	-	~ 35	~ 8
					GR40	43	82	0,15			~ 18	
Hasan vd [41]	2010	Solar Energy	Sıcaklık	Deneysel	RT20	21,23	140,3	0,2	Polikristal	Hücresel	~ 18	-
					*C-L	20,78	171,98	0,139				
					*C-P	22,33	196,07	0,143				
					CaCl ₂ .6H ₂ O	29,17	213,12	1,09				
					SP22	22,97	182	0,6				
Hasan vd. [43]	2015	Solar Energy	Sıcaklık, Güç	Deneysel ve sayısal	C-P	22,5	173	0,14	Polikristal	65	~ 21	
					CaCl ₂ .6H ₂ O	29,8	191	1,08				
Hasan vd. [44]	2016	Energy and Buildings	Sıcaklık, Güç	Deneysel	RT42	41	145	0,2	Polikristal	40	~ 8,4	
Huang [45]	2011	Solar Energy Materials and Solar Cells	Sıcaklık	Sayısal	RT21	21	134	0,2	-	-	~ 30	-
					RT27	27	184	0,2				
					RT31	29	169	0,2				
					RT60	60	144	0,2				

1.6.3. Termoelektrik malzemeler ile fotovoltaik panellerin soğutulması

Björk ve Nielsen [46] dört farklı tipteki ticari fotovoltaik hücre ile bizmut tellür (Bi_2Te_3) malzemeli termoelektrikleri (TEG) kombine ederek sistem performansını analitik olarak incelemişlerdir. TEG'lerin düşük verimlerinden dolayı, PV üzerindeki sıcaklık değerinin artmasıyla PV performansında çok az da olsa bozulmalar görülmüştür. Kristalin Si (c-Si), bakır indiyum galyum selenid (CIGS) ve kadmiyum tellür (CdTe) PV hücrelerinde kombine sistem tek başına PV sisteminkinden daha düşük verime sahipken, Amorf Si (a-Si)+PV Hibrit sistemi diğerlerinden daha iyi verim yüzdesi elde etmiştir. Çalışmalarının sonunda PV+TEG Hibrit sistemlerin artan sıcaklık ile PV'yi olumsuz yönde etkilendiğinden, güç üretimi için uygun bir seçenek olmadığı belirtilmiştir.

Makki vd. [47] sayısal çalışmalarında ısı borulu hibrit (PV-TEG) sisteminin verimliliğini ve güç üretimini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, aynı çalışma koşullarında geleneksel bir PV panel ile Hibrit PV panel karşılaştırıldığında sistem verimi açısından hibrit sistemin verimi daha yüksek çıkmıştır. TEG modüllerinin PV hücreleriyle entegrasyonda mevcut atık ısıdan yararlanmanın yanı sıra PV hücrelerinin performansını geliştirmeye yardımcı olduğu böylece daha yüksek çıkış gücü elde edildiği belirtilmiştir.

Benghanem vd. [48] termoelektrik modüller kullanarak fotovoltaik hücrelerin performansındaki değişimleri incelemişlerdir. Deneylerinde $18,8 \text{ cm}^2$ boyutlarında hücreyi ele almışlardır. Hücrelerden birine herhangi bir soğutma yapılmazken diğerine termoelektrik modül ile soğutma tekniği uygulanmıştır. Işınım değerinin artmasıyla sistemin seri direnç değerinin arttığı, azaldıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Soğutma uygulanan sistemin direnç değeri soğutma uygulanmayan sisteme göre daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, sistemler arasındaki verim farkı en fazla %5 ile öğle saatlerinde olmuştur.

Kane ve Verma [49] yaptıkları sayısal çalışmada, PV modülün verimliliğini ve ömrünü uzatmak için termoelektrik soğutma sistem uygulamasını önermişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen soğutma yönteminin PV modülünün verimliliğini arttırdığını ve yaklaşık 10°C 'lik bir sıcaklık düşüşü gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Lin vd. [50] TE modül ve hibrit (PV+TE) sistemlerinin; sıcaklık, güç ve verim değerlerini sayısal bir çalışmayla kıyaslamışlardır. Çalışmanın sonunda; hibrid sistemin termal verimliliği, tek başına fotovoltaik modülün termal verimliliğinden daha düşük çıkmıştır.

Düşük değerli termal iletkenliğe ve yüksek değerli Seebeck katsayılarına sahip termoelektrik malzemeleri imal edebildiğinde $\eta_{hibrit} > \eta_{pv}$ sonucuna varılacağı belirtilmiştir.

Yang ve Yin [51] fotovoltaik (PV), fotovoltaik/su (PV/HW) ve fotovoltaik/termoelektrik/su (PV/TE/HW) sistemlerini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. 750 W/m^2 ışıma değerinde sistemlerin verimleri sırasıyla, %12,6, %16,6, ve %16 olarak hesaplanırken ışıma değeri 1000 W/m^2 değerine çıkarıldığından sistemlerin verim değerleri sırasıyla %8,4, %12,1 ve %11 olarak hesaplanmıştır.

Najafi ve Woodbury [52] fotovoltaik modüller tarafından üretilen atık ısıyı elektriğe dönüştürmek için termoelektrik güç jeneratörü modüllerinin (TEG) kullanılması ihtimali sayısal olarak araştırılmıştır. Birleştirilmiş PV-TEG sistemi için kapsamlı bir ısı transferi modeli MATLAB vasıtasıyla geliştirilmiş ve farklı koşullar altında simüle edilmiştir. TE modülünün sıcak tarafı, güneş panelinin arka tarafına tutturularak hava kanalının tepesine bağlı olduğu kabul edilir. Hava, kanaldan akar ve TE modüllerinin soğuk tarafını soğutur. TE modüller sıcaklığı elektriğe dönüştürür ve atık ısıdan ekstra güç üretir ve sistemin genel performansını artırır. Ayrıca çalışmalarında, TE modül sayısının PV gücüne etkisi incelenmiş ve TE modül sayısı arttıkça fotovoltaik panelden elde edilen çıkış gücünde belli bir oranda artmıştır.

Rezani vd. [53] fotovoltaik/termoelektrik sistemlerden oluşan hibrit sistemin elektrik üretimindeki uyumluluğunu araştırmışlardır. Model, farklı hava koşullarına sahip Avrupa'daki üç örnek şehir için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, panelin ön yüzeyine gelen ışıma ile ısı kaybı ve rüzgar hızından dolayı konveksiyonel ısı kaybının hibrid panel performansını etkileyen en kritik parametre olduğunu göstermektedir. Elde edilen diğer sonuçlar, mevcut termoelektrik malzemelerle birlikte TE modüllerin elektrik üretiminin PV panelinin elektrik üretimine kıyasla önemsiz olduğunu ve TE modülün hibrid sistemin elektrik üretiminde çok küçük bir rol oynadığını belirtmişlerdir.

Makki vd. [54] güneş hücrelerinin performans artırımı için hibrit sistemlerin geliştirilmesi başlıklı bir derleme çalışması yapmıştır. Çalışmalarında, hücre sıcaklığının paneller üzerindeki etkileri ve soğutma teknikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Son olarak hibrit sistemler; doğal hava-su sirkülasyonlu, zorlanmış hava-su sirkülasyonlu, ısı borulu, faz değiştiren malzemeli ve termoelektrik olarak ayrılarak bu sistemlerin avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir.

Detaylı literatür araştırmalarından sonra tez kapsamındaki çalışmalar; fotovoltaik panellerin standart test koşullarındaki sıcaklık değerlerinin üzerindeki koşullarda gösterdiği

performansı, gölgelenme geometrilerinin sıcaklığa etkisi ve farklı pasif soğutma tekniklerinin etkisi gibi birçok parametre aynı iklim koşullarda incelenmiştir. Literatürde konular ayrı ayrı ele alınarak incelenmiş olup tez kapsamında bu parametreler aynı güneş ışıınımı ve sıcaklıkta karşılaştırılmaları yapılmıştır. Ayrıca, fotovoltaiik modüllerin ekserji analizi tüm sistemler için incelererek gelecekte yapılacak diğer çalışmalara fikir sağlamıştır.



2. MATERYAL ve METOD

Fotovoltaik panellerin farklı pasif yöntemler ile verimliliklerinin artırılması TÜBİTAK 215M892 numaralı proje tarafından finanse edilmiştir. Projenin iki temel amacı bulunmaktadır;

- (a) Fotovoltaik paneller üzerinde elektrik enerjisinin bir kısmının ısı enerjisine dönüşümünden kaynaklanan sıcaklık değerinin, farklı pasif teknikler ile düşürerek verim değerlerinin artırılması,
- (b) Fotovoltaik panellerin arka yüzeyine yerleştirilen termoelektrik malzemeler ile atık ısıdan seeback etkisi ile tekrardan elektrik üretmek ve ısınan yüzeyin sıcaklığı absorbe edilerek panel üzerindeki olumsuz etkiyi pozitif çevirmektir.

Deneyler, 2016 yılının Haziran-Eylül ayları içerisinde, havanın kapalı olmadığı günlerde gerçekleştirilmiştir. Deneyler de kullanılan ekipman ve malzemelere ait teknik bilgiler ise aşağıda detaylı bir şekilde verilmektedir.

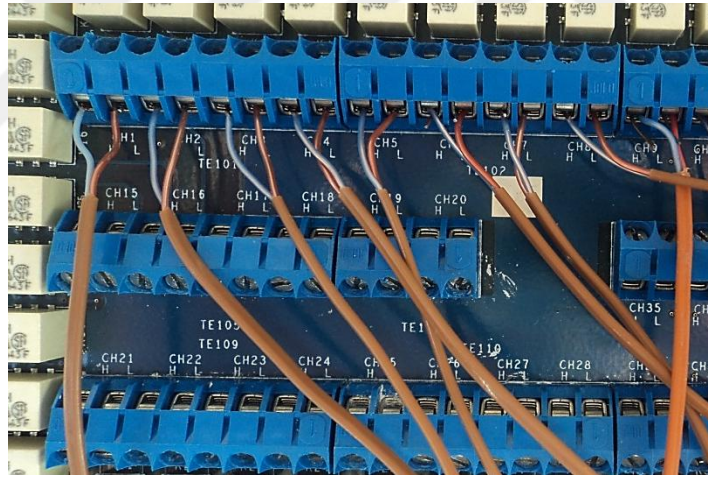
2.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Deneylerde ticarileşme oranı en yüksek olan polikristal panel seçilmiştir. Ayrıca, bu tip panellerin monokristal panellere göre daha ucuz olması ve sıcaklıktan daha fazla etkileniyor olması çalışma için en uygun seçenek olmuştur. Tablo 2.1’de polikristal panelin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan fotovoltaik panelin teknik özellikleri

Açıklama	Özellikler
Standart test koşullarındaki maksimum güç	P_m 75 W
Açık devre gerilimi	V_{oc} 21,93 V
İdeal çalışma gerilimi	V_m 18,11 V
Kısa devre akımı	I_{sc} 4,14 A
Çalışma akımı	I_m 3,69 A
Çalışma sıcaklığı	$^{\circ}C$ -40 ile 85 $^{\circ}C$
Güç oranı toleransı	$\pm\%3$
Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı	0,0045%/C
Açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı	-0,32%/C
Poli kristal hücre	4x9 toplam 36 hücre
Boyutlar	770x670x25 mm
Temperli cam	3,2 mm
EVA	0,50 mm

PV sistemin enerji-ekserji analizlerinin yapılabilmesi için güneş ışınlam şiddetinin W/m^2 cinsinden, çevre sıcaklığı, panel yüzey sıcaklığı, akım, gerilim, rüzgar hızı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Güneş ışınlamını ölçmek için KIPP&ZONEN marka CMP3 model piranometre kullanılmıştır. Piranometrenin hassasiyeti $-40\text{ }^{\circ}C$ ile $+40\text{ }^{\circ}C$ arasında % 5, $+40\text{ }^{\circ}C$ ile $+80\text{ }^{\circ}C$ arasında ise % 10' dur. Sıcaklıkların ölçümü için OMEGA marka, 0,51 mm çapında T-tipi ısı çifti kullanılmıştır. Isıl çiftlerin hassasiyeti $\pm\text{ } \% 0,5$, sıcaklık aralığı $-200\text{ }^{\circ}C$ ile $+300\text{ }^{\circ}C$ arasındadır. Isıl çiftler, sıcak ve soğuk noktalar arasındaki sıcaklık farkından oluşur ve bu fark uçlar arasında mV değerinde bir gerilim üretir. Gerilim değerlerinin aynı anda ölçülebilmesi için KEITHLEY 2701 marka 40 kanallı veri derleyici (data logger) kullanılmıştır. 40 kanallı çoklayıcının üzerindeki bağlantı klemesleri üzerinde “H” ve “L” harfleri bulunmaktadır. “H” pozitif kutup “L” negatif kutup olarak adlandırılmıştır. Isıl çiftlerin bakır uçları çoklayıcının pozitif, diğer ucu ise çoklayıcının negatif kutbuna bağlanır. Şekil 2.1’de deneylerde kullanılan ısı çiftler ve çoklayıcıya bağlantı şekli gösterilmektedir. Sistemin ideal yük direncinin tespiti ve I-V eğrilerinin tespiti için 150 W, 20 Ω ’luk ayarlanabilir direnç (reosta) kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Isıl çiftler ve bağlantı şekli

Çevreye taşınım ve ışınlam yoluyla gerçekleşen ısı transfer katsayısını hesaplamak için DT-619 model anemometre kullanılarak rüzgar hızı ölçülmüştür. Tablo 2.2’de kullanılan cihazın teknik özellikleri verilmiştir.

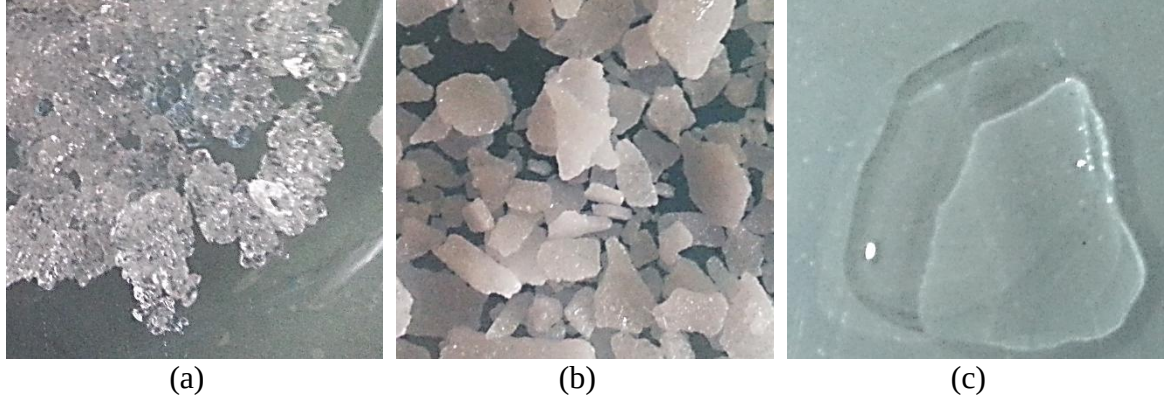
Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan anemometrenin teknik özellikleri

Özellikler	Hassasiyet
Hava Hızı Ölçüm Aralığı	0.3 – 45 m/s
Hava Hızı Çözünürlüğü	0.1 m/s
Hava Hızı Kararlılığı	$\pm 3\%$ - ± 0.20 m/sn

Fotovoltaik modüllerin yüzey sıcaklıklarının düşürülmesi için 3 farklı faz değiştiren malzeme kullanılmıştır. FDM'ler farklı erime sıcaklıklarında seçilerek PV modüller üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Faz değişim sıcaklığı ve faz değişim entalpisi mikro/nano kapsüllerin enerji depolama amaçlı kullanımı öncesinde yapılacak seçimde dikkate alınan önemli iki parametredir. Bu sebeple, üretilcek mikro/nano kapsüller içerisindeki FDM'nin erime, katılaşma sıcakları ve entalpileri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) tekniği ile ölçüldü. Analizler Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizikokimya Araştırma Laboratuvarında mevcut Perkin Elmer JADE model DSC cihazı ile gerçekleştirildi. Analiz işlemleri için öncelikle cihaz saf indium ile kalibre edildi. 5-10 mg mikro/nano kapsül örneği alınıp 40 mL/dakika akış hızındaki azot atmosferi altında 3°C/dakika ısıtma ve soğutma hızıyla 0°C ile 100 °C aralığında gerçekleştirildi. Mikro/nano kapsüllerin faz değişim sıcaklığı belirlenirken, DSC programı sayesinde maksimum eğimi elde edecek şekilde DSC pikine teğet çizilecek ve bu teğetin temel çizgiyi (base line) kestiği noktaya karşılık gelen sıcaklık değeri faz değişim sıcaklığı olarak alındı. Faz değişim entalpisi ise, yine program sayesinde DSC pikinin altında kalan alanın integrasyonu ile belirlendi. DSC işlemleri üretilcek her mikro/nano FDM numunesi için 3'er kez tekrarlandı ve faz değişim sıcaklıkları ve faz değişim entalpileri için ortalama değerler kaydedildi. FDM'lere ait termodinamik özellikler Tablo 2.3'de verilirken oda sıcaklığındaki halleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Faz Değiştiren malzemelerin termodinamik özellikleri

Malzeme	Safılık (%)	Katı-sıvı faz değişimi (erime) sıcaklığı (°C)	Erime gizli ısısı (J/g)	Termal iletkenlik (W/mK)
Tuz hidrat	97	29,17	213,12	1,09
Biphenyl	99	69.17	132.79	0,11
Oleik asit	90	9.56	128.65	0,19



Şekil 2.2. Faz değıştiren malzemeler (a) Kalsiyum klorür hekzahidrat, (b) Biphenyl, (c) Oleik asit

Üretilen mikro/nano kapsüllerin ısı iletkenlikleri KD2 Pro model ısı iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçüldü. Ölçüm işlemleri, 10 g örnek bir cam tüpe konarak ısı iletkenlik cihazının ölçüm probuyla malzemenin sıkıca teması sağlandı. Ölçümler 3 kez tekrarlanıp ortalama sonuçlar kaydedildi. DSC ve ısı iletkenlik cihazları Şekil 2.3 ve 2.4’de gösterilmiştir.

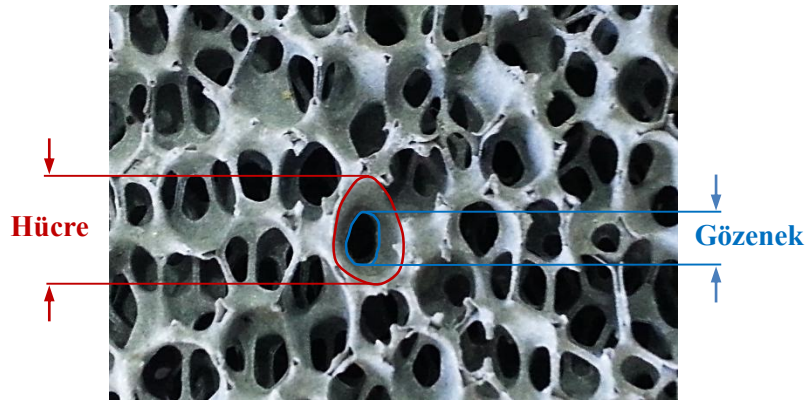


Şekil 2.3. Perkin Elmer JADE model DSC cihazı

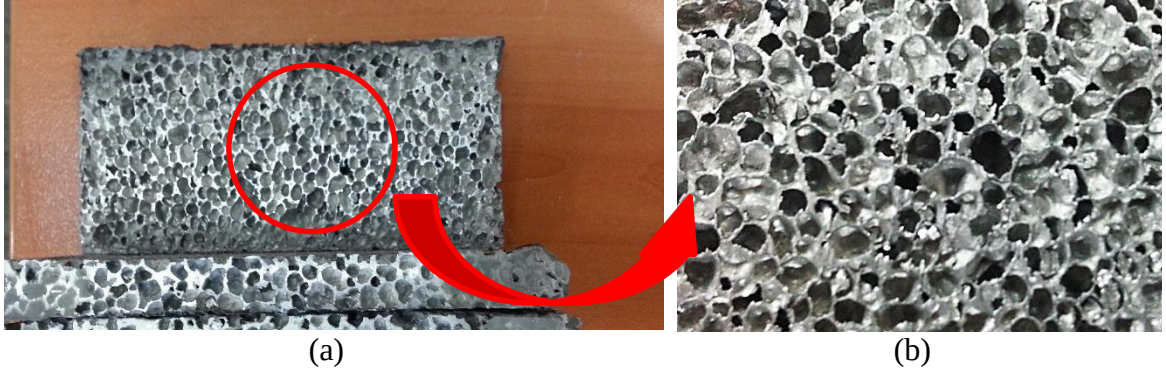


Şekil 2.4. KD2 Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı

Fotovoltaik modüllerin yüzey sıcaklıklarının düşürülmesinde kullanılan diğer yöntemler ise alüminyum kanatçık ve termoelektrik modüllerdir. Alüminyum kanatçıklar düzlem kanatçıklı seçilip gözenekli ve gözenekli olmayan iki türde analiz yapılmıştır. Gözenekli malzemeler yada metalik köpükler, genellikle alüminyum veya bir metalin hücresel yapısından meydana gelmektedir. Metalik köpüklerin üzerindeki hücrelerin çıplak gözle ayırt edilebilmesi onun açık hücreli, ayırt edilemediğinde de kapalı hücreli bir köpük olduğunu belirtmektedir. Açık hücreli alüminyum köpüğün yapısı Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan kapalı hücreli alüminyum köpüklerin yapısı Şekil 2.6’da verilmiştir.

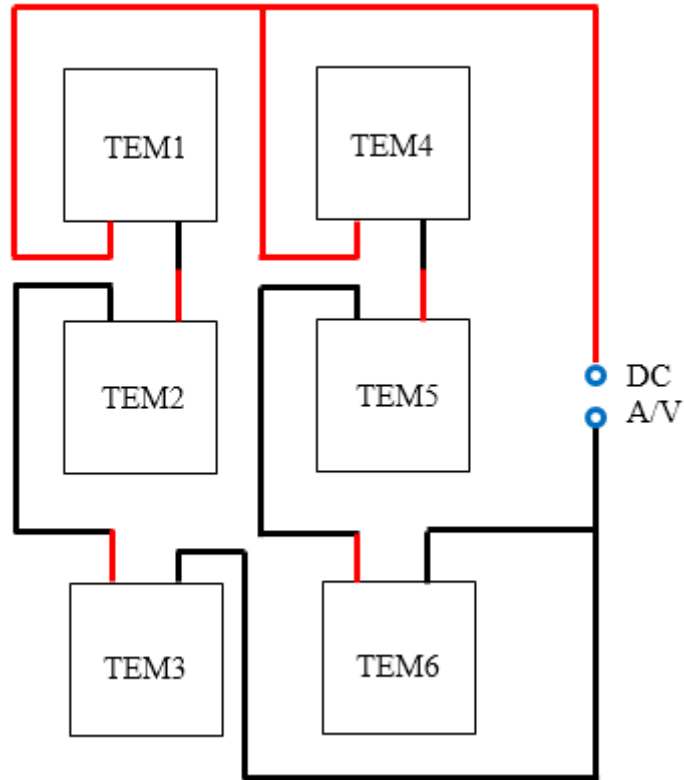


Şekil 2.5. Açık hücreli alüminyum köpüğün hücre ve gözenek yapıları



Şekil 2.6. Deneylerde kullanılan kapalı hücreli alüminyum kanatçık ve yapısı

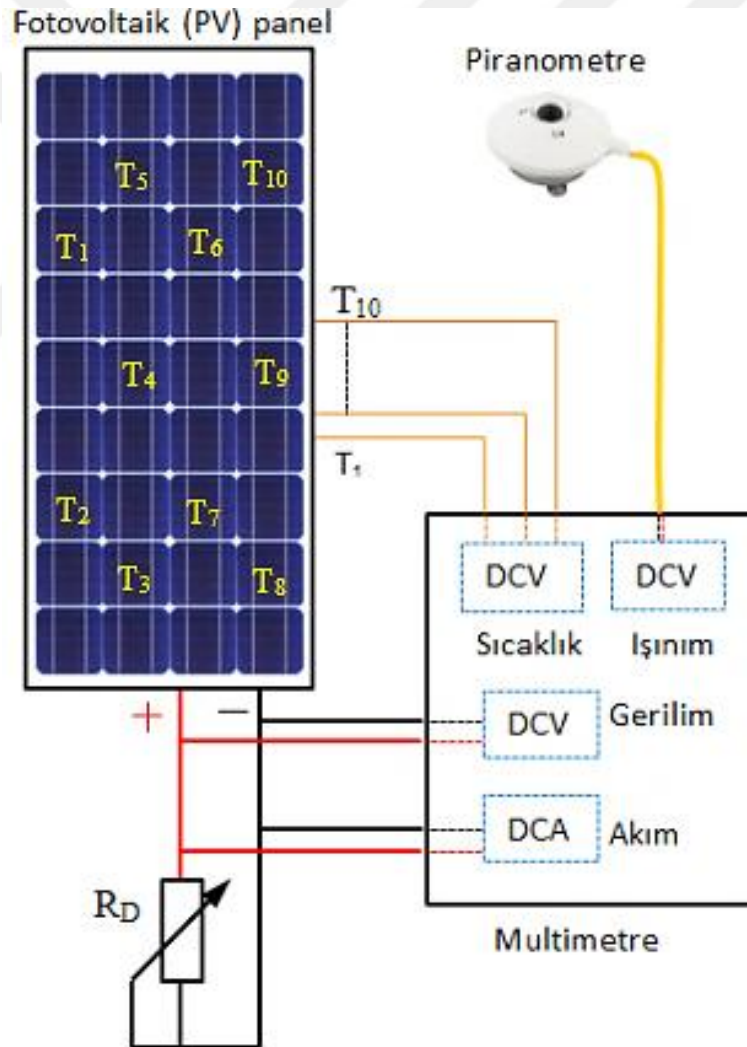
Fotovoltaik modül üzerindeki atık ısıdan tekrar elektrik üretmek için TEC-12708 model termoelektrik modül kullanılmıştır. Termoelektriklerin sıcak ve soğuk yüzeylerin tespiti için yaklaşık 60 W gücünde bir batarya termoelektrik modülün iki kutup uçlarına paralel olarak bağlanır. Isınan yüzey sıcak, soğuyan yüzey ise soğuk olarak işaretlenir. Deneylerde kullanılan TE modüllerin bağlantı şeması Şekil 2.7’de çizilmiştir.



Şekil 2.7. 6 Adet Termoelektrik modülün bağlantı şeması

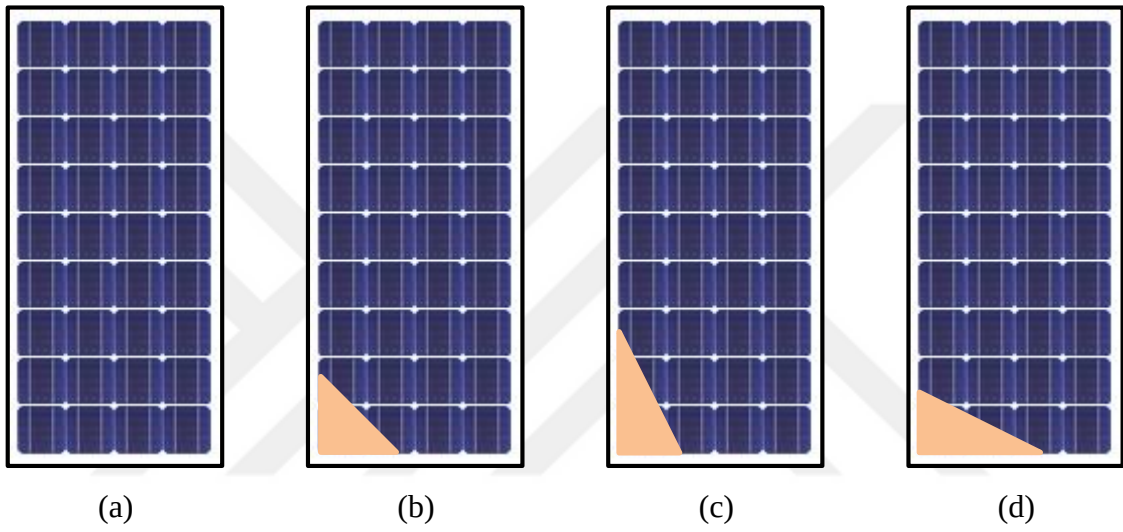
2.2. Deneylerin yapılışı

Deneyler, Elazığ iklim koşullarında 2016 yılının Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerdeki ölçümler, saat 09:00 – 16:00 arasında birer saat arayla periyodik olarak alınmıştır. İlk olarak fotovoltaiik modüllerin aynı güneş ışınımı altındaki çıkış güçleri ve modül sıcaklıkları arasındaki ilişki incelenmiştir. PV modül üzerine bağlanan ısıl çiftlerin yerleşim planı ve deney setinin şematik gösterimi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. PV panellerin hangi yük direnci altında ne kadar çıkış gücü sağladığını anlayabilmek için sisteme ayarlanabilir direnç bağlanmıştır. Optimum yük direnci elde edildikten sonra modüllerin I-V eğrileri çizdirilerek maksimum güç noktasının tayini yapılmıştır.

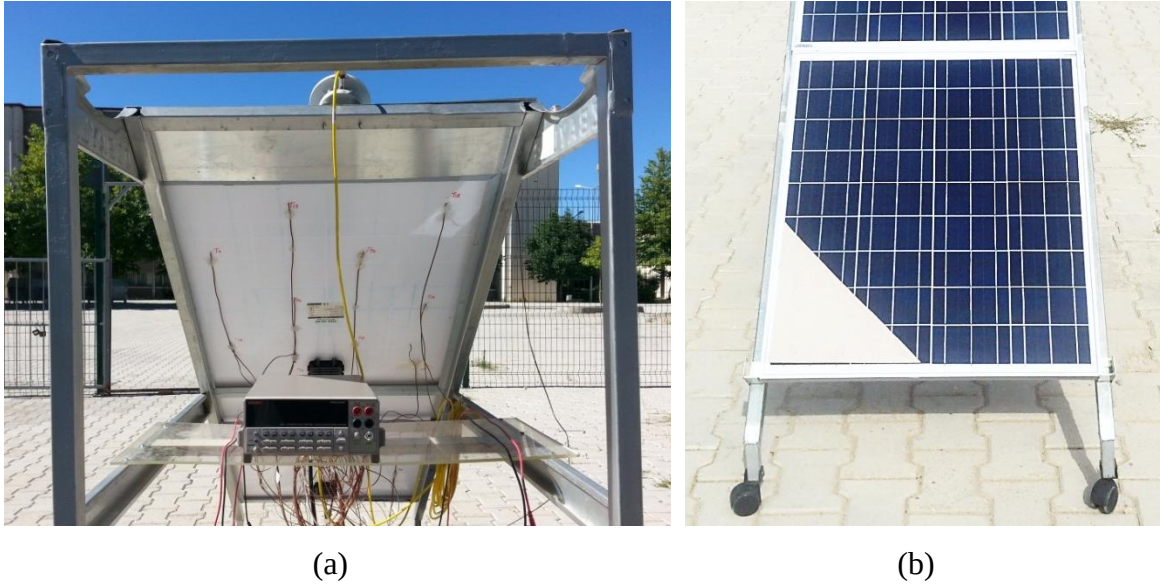


Şekil 2.8. Deney setinin şematik gösterimi

Çalışmanın birinci bölümünde literatürdeki fotovoltaik modüllerin performansını etkileyen parametreler incelenmiştir. En çok kayıp oranının gölgelenme ve sıcaklık etkilerinden kaynaklandığı görülmüştür. Bu yüzden deneysel ilk çalışma gölgelenmenin PV sistem üzerindeki etkisinin ve sıcaklık bağıntısının araştırılması olmuştur. Gölgelenme oranları (GO) diagonal şekilde ve farklı boyutlarda incelenmiştir. Her bir grup kendi içerisinde aynı güneş ışınımı altında gölgelenmeyen PV modül ile kıyaslanarak I-V eğrisi, enerji-ekserji verimleri ve güç kayıp oranları verilmiştir. Şekil 2.9’da PV modüllerin gölgelenme parametreleri ve yüzdelik gölgelenme oranı verilmiştir.

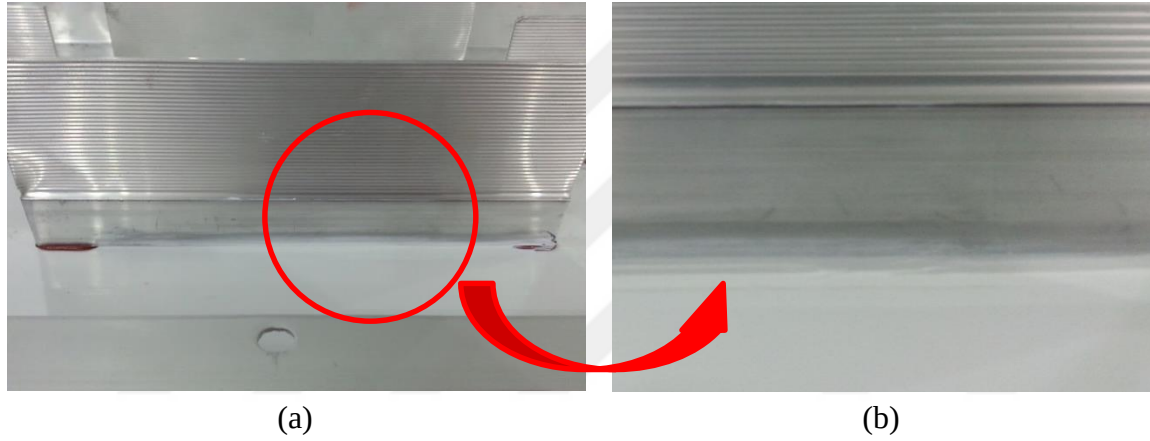


Şekil 2.9. Farklı kısmi gölgelenme altındaki paneller (a) gölgesiz (b) 20*20 (c) 30*18 (d) 18*30



Şekil 2.10. Diagonal gölgelendirme sistemi (a) arkadan (b) önden

Elazığ iklim koşullarında PV panellerin ön deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda pasif soğutma teknikleri uygulamalarına geçilmiştir. Pasif soğutma yöntemlerinden ilk olarak alüminyum düzlemsel kanatçık parametreleri PV panellere entegre edilerek uygulanmış ve elde edilen en iyi sonuç kapalı hücreli alüminyum köpük deneyleri için tekrar edilmiştir. Kanatçık çalışmalarının kombinasyonları Tablo 2.4 ve 2.5’de detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.11’de deneylerde kullanılan düzlemsel alüminyum kanatçığın panel arkasına entegrasyonu gösterilmiştir. Kanatçığın iki ucuna yanmaz silikon sürülerek panele tutturulmuştur. Bu işlemler diğer kanatçıklar için de gerçekleştirildikten sonra panel ile kanatçık arasındaki boşluk termal macun ile doldurularak ısı iletim katsayısı arttırılmıştır.



Şekil 2.11. Alüminyum kanatçıkların panele montajı

Tablo 2.4. Alüminyum kanatçık parametreleri

PV panel türü	Kanatçık uzunluğu (cm)	Kanatçık boyu (cm)	Dizilim	Kanatçık sayısı (adet)	Toplam kanat uzunluğu (cm)
A1	7	60	Sıralı-Dikey	9	540
A2	12	60	Sıralı-Dikey	9	540
A3	7	60	Sıralı-Yatay	9	540
A4	12	60	Sıralı-Yatay	9	540
A5	7	20	Şaşırtmalı-Dikey	26	520
A6	12	20	Şaşırtmalı-Dikey	26	520
A7	7	20	Şaşırtmalı-Yatay	26	520
A8	12	20	Şaşırtmalı-Yatay	26	520
A9	7	20	Şaşırtmalı-Dikey	13	260
A10	12	20	Şaşırtmalı-Dikey	13	260

Tablo 2.5. Kapalı hücreli alüminyum köpük kanatçık parametreleri

Sistem	Kanatçık kalınlığı (mm)	Kanatçık uzunluğu (cm)	Kanatçı k boyu (cm)	Dizilim	Kanatçı k sayısı (adet)	Toplam kanat uzunluğu (cm)
B1	6	5	10	Şaşırtmalı	28	280
B2	10	5	10	Şaşırtmalı	28	280

PV sistemler üzerinde uygulanan ikinci pasif yöntem ise Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) olmuştur. Literatürdeki PV+FDM sistemleri incelendiğinde faz değiştiren malzemelerin optimum faz değişim sıcaklığının 25-35 °C arasında olduğu beyan edilmiştir. Bu nedenle çalışmada 3 farklı FDM seçilmiştir. Bu kimyasallardan biri deneylerde kullanılan fotovoltaik modülün yüzey sıcaklığın üzerinde, diğeri literatürdeki ideal erime sıcaklığının altında, son FDM ise yukarıda bahsedilen sıcaklık aralığında seçilerek PV sistemler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu sistemlerin açıklamaları Tablo 2.6'da verilmiştir.

PV sistemlerin üzerinde oluşan atık ısıdan TE modüller kullanılarak sıcaklık farkından yeni bir elektrik üretimi sağlanacaktır. Aynı model ve güçteki TE modüller birbirlerine seri ve paralel bağlanarak elektriksel devre oluşturulmuştur. Bu çalışmada TE modüllerin iki farklı PV paneller üzerinde bütünleştirildiğindeki durumları analiz edilmiştir. TE modül durumları Tablo 2.7'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 2.8'de hibrit (PV+FDM+TE) sistemin açıklaması yapılmıştır. Deneysel çalışmaların genel görünümü Şekil 2.12'de, ekipmalar ile şematik çizimi Şekil 2.13'de ve kanatçıkların yerleşim planı Şekil 2.14'de gösterilmiştir.

Tablo 2.6. Faz Değiştiren Malzeme (FDM) türleri

Sistem	Sistem tanımı	Açıklamalar
C1	PV+FDM1	Faz değiştiren malzeme olarak Oleik asit kullanılmıştır.
C2	PV+FDM2	Faz değiştiren malzeme olarak Biphenyl kullanılmıştır.
C3	PV+FDM3	Faz değiştiren malzeme olarak Tuz hidrat kullanılmıştır.
C4	PV+FDM3+kanatçık	Tuz hidrat + FDM deposuna entegre alüminyum kanatçık

Tablo 2.7. İki farklı sayıdaki TE modül durumları

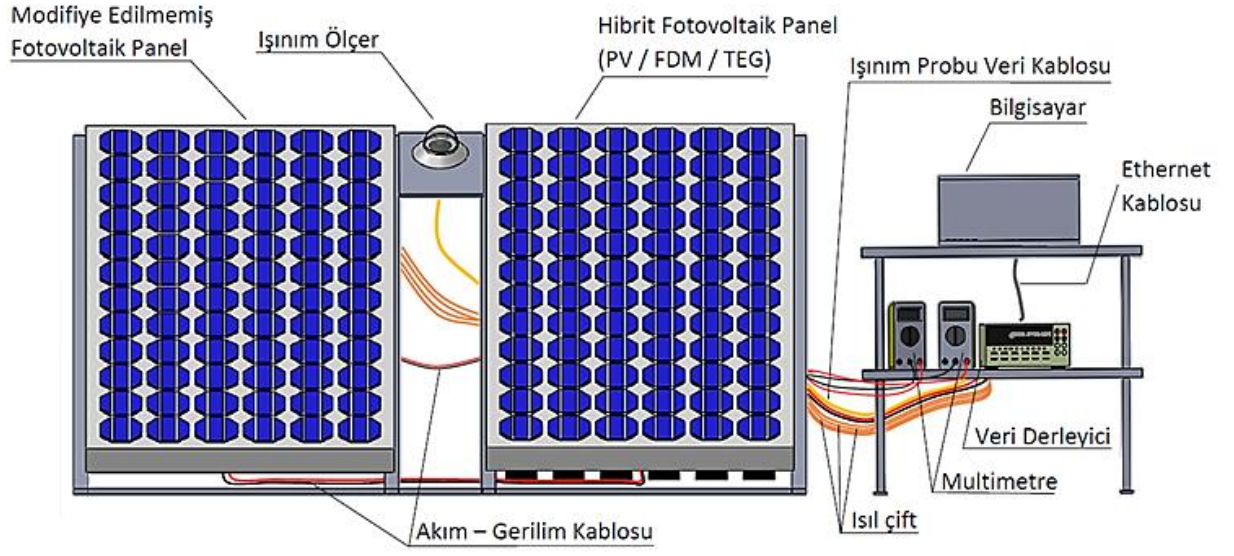
Sistem	Sistem tanımı	Açıklama
D1	PV+TEM1+kanatçık	6 adet TEM kullanılmıştır.
D2	PV+TEM2+kanatçık	10 adet TEM kullanılmıştır.

Tablo 2.8. Hibrit sistem

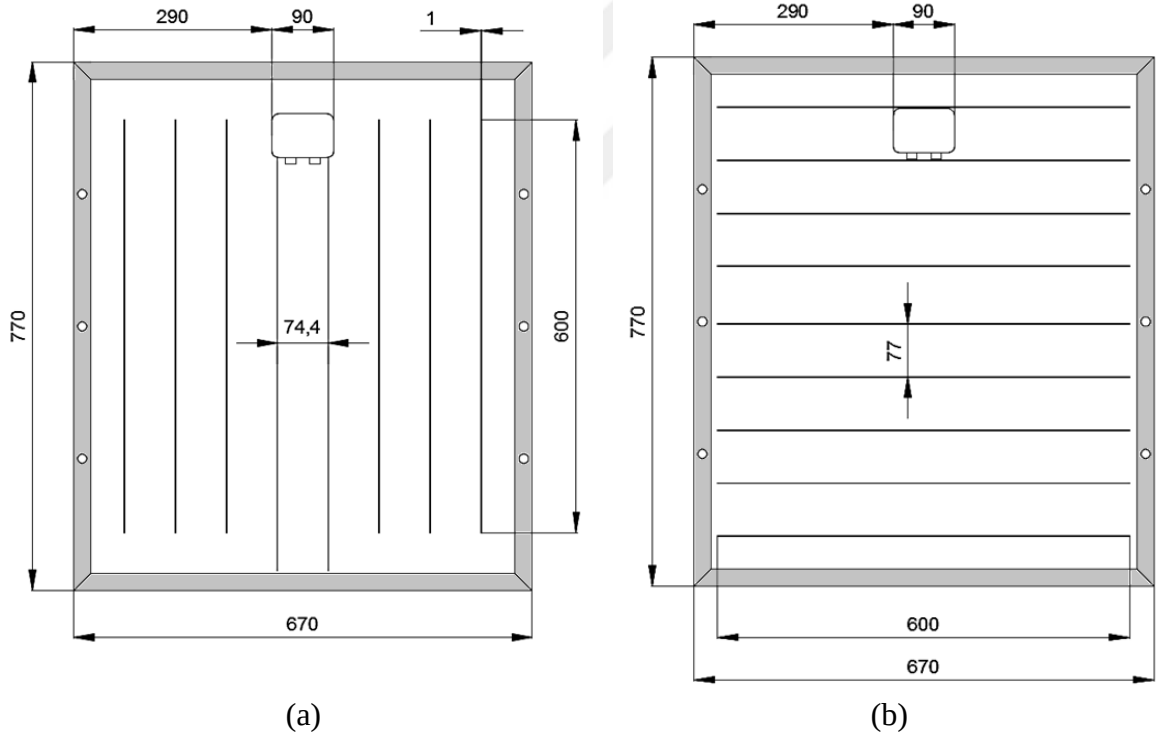
Sistem	Sistem tanımı	Açıklama
E1	PV+FDM+TEG+kanatçık	FDM'ler arasında verimi olumlu etkileyen Tuz hidrat ve 6 adet TEM'in birleştirilmesinden oluşmuştur.

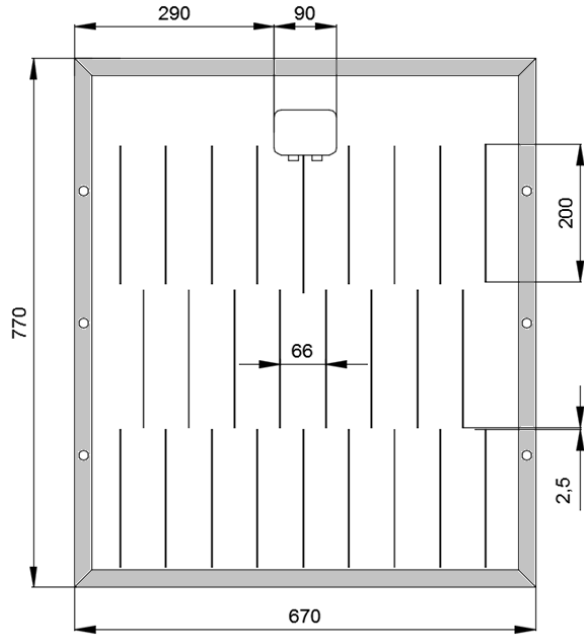


Şekil 2.12. Deney setinin genel görünümü

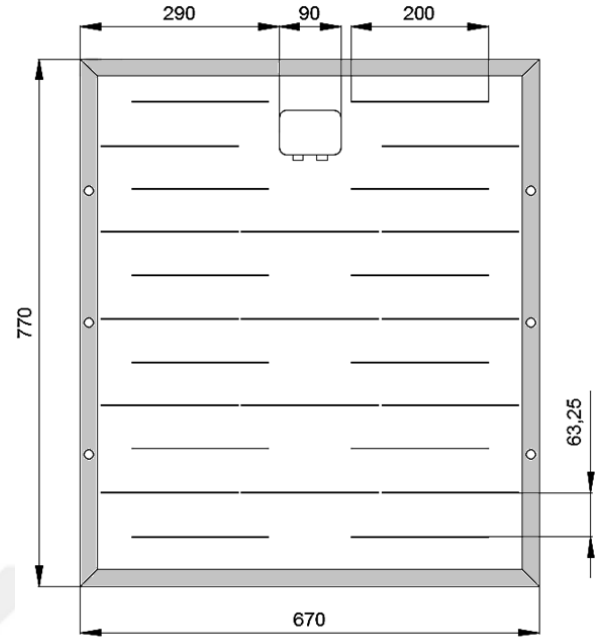


Şekil 2.13. Deney seti ve ekipmanları

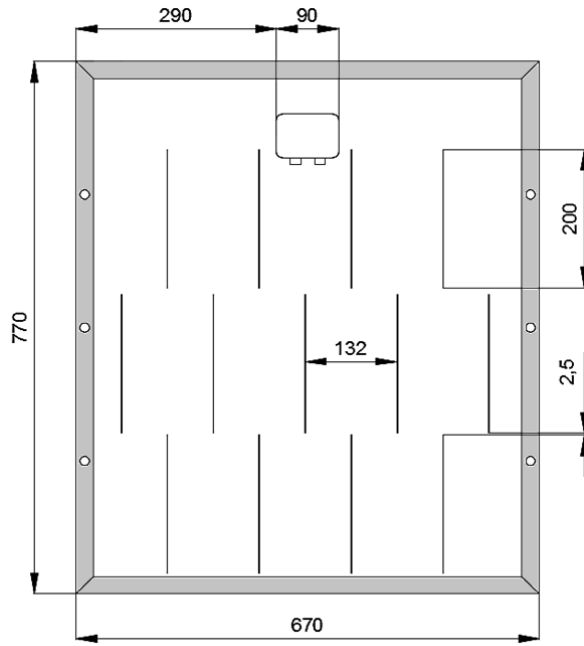




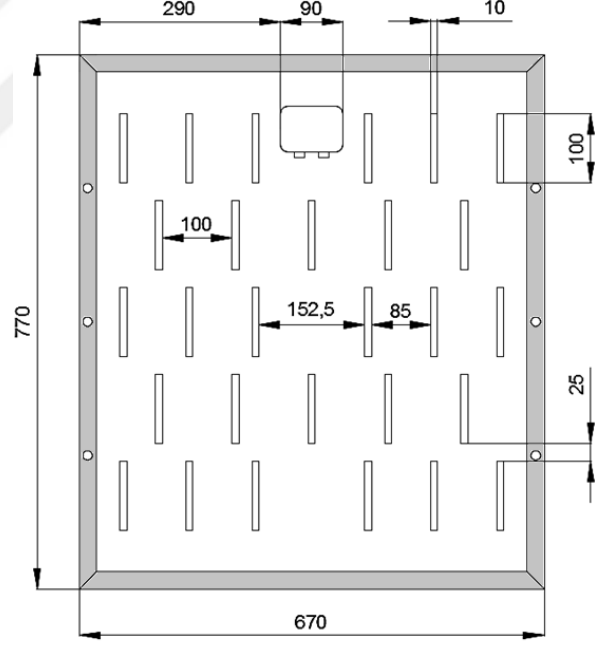
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.14. Kanaçıklarının dizilim teknik resimleri (a) A1-A2, (b) A3-A4, (c) A5-A6, (d) A7-A8 (e) A9-A10, (f) gözenekli (B1-B2)

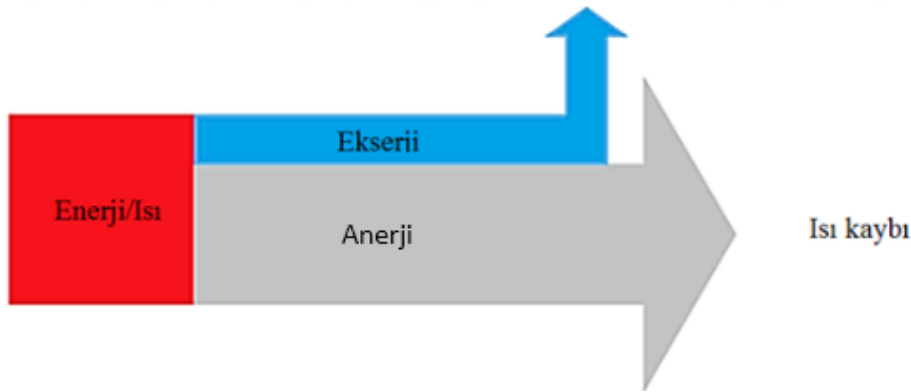
2.3. Termodinamik kavramlar

Termodinamiğin (TD) I. kanunu göre; enerji, vardan yok edilemediği gibi yoktan da var edilemez sadece enerjinin farklı formlarına dönüşebilir. Bunun yanında enerji; madde ya da kütsel akış parametrelerine bağıdır, çevresel parametrelere bağı değildir ve miktarın (niceliğın) bir ölçüsüdür [55,56].

Niceliğın ölçüldüğü enerji analizi sonuçları; sistemlerin verimliliklerinin değeriendirilmesinde yeterli değildir. Çünkü ısı sistemlerde gerek duyulan enerji kullanılabilir enerjidir. Bu nedenlerle; verimlilik analizleri, önemli bir parametre olan çevre şartlarının da göz önüne alındığı termodinamiğın ikinci yasasına göre yapılmalıdır [57].

II. Kanun, yararlı (kullanılabilir) enerji kavramını gündeme getirmekte ve tersinmezlik sonucunu ortaya koymaktadır. Başka bir ifadeyle açıklamak gerekirse, enerjinin bir biçimden diğeriine dönüşümü sırasında ne kadarının kullanılabilir ne kadarının kullanılmaz olduğı termodinamiğın ikinci kanunu ile belirtilir. Bu kanuna göre;

- Verilen bir ısı miktarı tamamıyla işe çevirmek imkansızdır.
- Dönüşüm sürecinde enerjinin kalitesi düşer ve yararlılığı azalır.
- Sonuç olarak enerjinin iş yapabilme yeteneğı zayıflar.

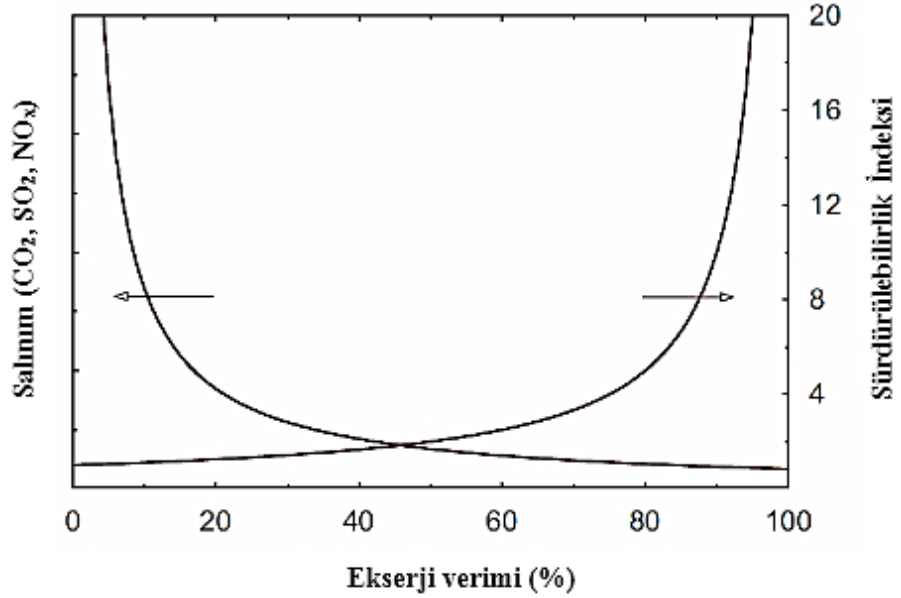


Şekil 2.15. Enerji, ekserji ve anerji arasındaki ilişki [58]

Enerji türlerinin bazıları ısı enerjisine kayıpsız olarak dönüşürken, ısı enerjisinin mekanik enerjiye kayıpsız olarak dönüştürülmesi olanaksızdır. Enerjinin dönüşümü kayıpsız gerçekleşiyorsa bu duruma tersinir, enerji dönüşümü sırasında oluşan düzensizliklere tersinmezlik adı verilmiştir. Isı enerjisi, ekserji ve anerjinin toplamından oluşur. Ekserji, ısı enerjisinin işe dönüştürülebilir kısmıdır. Şekil 2.15’de enerji, ekserji ve anerji arasındaki ilişki şematik olarak gösterilmiştir.

2.3.1. Enerji sistemleri üzerinde ekserji etkisi ve sürdürülebilirlik

Ekserji, sürdürülebilir enerji ve teknolojilerin faydalarını açıklamada bir ölçü olarak tanımlanmaktadır. Ekserji, enerji sistemlerini değerlendirmek ve iyileştirmek için kullanılabilir ve enerji sağlanandan daha yararlı ve anlamlı bilgi sağlayarak yeşil enerjiden yararlanmanın faydalarını daha iyi anlamamıza yardımcı olabilir. Ekserji, verimlilik iyileştirmelerini ve daha sürdürülebilir teknolojilere atfedilebilen termodinamik kayıplarda meydana gelen azalmaları açıkça tanımlar. Ayrıca ekserji, enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler, enerji kayıplarını azaltarak çevresel etkileri azaltabilir. Ekserji yöntemleri kapsamında bu tür faaliyetler, ekserji verimliliğini artırır ve ekserji kayıplarını azaltır [59]. Ekserji veriminin değişimine göre sürdürülebilirlik indeksi ve salınım değerleri grafiği Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Ekserji veriminin değişimine göre sürdürülebilirlik ve emisyon arasındaki ilişki [59]

Ekserji analizinin esas amacı, ısı ve kimyasal işlemlerin termodinamik hatalarının sebeplerini miktar olarak değerlendirmek ve meydana çıkarmaktır. Isıl sistemler için ekserji analizinin yararları aşağıdaki gibidir;

- Entropi üretiminin en aza indirilmesine dayanan sistem tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine yardımcı olur.
- Termodinamik kayıpları sadece birinci yasaya göre değil, ikinci yasayı da dikkate alarak değerlendiren bir termodinamik analiz yöntemidir.
- Herhangi bir enerji dönüşümü sisteminin uygun olarak tasarlanmasına ve işletilmesine olanak sağlar.

- Termodinamiğin II. yasasının analizini kolaylaştırma ve sistemdeki kayıpları yorumlama olanağı sağlar [1].

2.3.2. Fotovoltaik sistemlerin enerji analizi

Fotovoltaik sistemlerin enerji verimliliği, sistemin çıkış enerjisinin (fotovoltaik yüzeydeki güneş radyasyonu) giriş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Fotovoltaik sistemlerin birinci yasası veya enerji verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\eta_I = \frac{V_m I_m}{I_s A} \quad (2.1)$$

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. Maksimum güç noktası, aşağıdaki gibi doldurma faktörü olarak adlandırılan bir terimle adlandırılmıştır [60,61].

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2), denklem (2.1)'de yerine yazıldığında,

$$\eta_I = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{I_s A} \quad (2.3)$$

denklemini elde edilir. Denklem (2.1) ve denklem (2.2) de bulunan V_m ve I_m değerleri çarpımı elektriksel güç olarak (P_m) tanımlanmaktadır. Bir fotovoltaik sistemin gücü, akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile bulunabildiği gibi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak da empirik denklemlerle hesaplanabilir. Literatürde en çok kullanılan ya da tercih edilen maksimum güç denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [62].

$$P_m = P_m^{STC} \left[1 + (T - 25) \alpha_p \right] \quad (2.4)$$

$$P_m = V_m I_m \quad (2.5)$$

2.3.3. Fotovoltaik sistemlerin ekserji analizi

Fotovoltaik sistemin elektriksel ekserji mevcut enerjiyi faydalı enerji olarak kullanmayı amaçlamaktadır. Ekserji analizi, enerji kalitesi veya kabiliyetini göz önünde bulundurur ve fotovoltaik sistemin genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum \dot{E}_{giriş} = \sum \dot{E}_{çıkış} \quad (2.6)$$

PV modülünün ekserji verimi, toplam çıktı ekserjisinin toplam girdi ekserjisine oranı [60] olarak tanımlanır

$$\eta_{II} = \frac{Ex_{çıkış}}{Ex_{giriş}} \quad (2.7)$$

PV sistemlerin ekserji verimlerini değerlendirebilmek için, toplam güneş ışıyım ekserjisinin bilinmesi gerekir. Güneş ışıyım ekserjisi ($Ex_{güneş}, Ex_{giriş}$) yaklaşık olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{giriş} = \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A \quad (2.8)$$

Denklem (2.8) ile belirlenen bu değer, güneşin iç yüzeyinden fotovoltaik modülün yüzeyine gelen ısıyım ekserjisini ifade etmektedir. Ortam sıcaklığı 300 K ve güneş sıcaklığı 5777 K olarak dikkate alındığında termodinamik etkinlik 0,948 olur. Güneş ışıyım miktarı bu değer ile gerçek değerine çok yakın bir değer elde edilir. PV yüzey tarafından alınan güneş ışıyım değeri PV yüzeyin alanı ile çarpıldığında güneş ışıyım ekserjisi hesaplanmış olur. Patela ise, güneş ışıyım ekserjisini analitik olarak ifade edebilmek için, piston-silindir düzeneğinin tersinir adyabatik genişlemesini ele almış ve aşağıdaki gibi ifade etmiştir [63-64].

$$Ex_{giriş} = I_s A \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_c}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_c}{T_s} \right)^4 \right] \quad (2.9)$$

Bir PV sistemin ekserji çıktısı

$$\dot{E}x_{çıkış} = \dot{E}x_{elek} - \dot{E}x_{k,termal} - \dot{E}x_{k,elek} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denklemde, $\dot{E}x_{elek}$ elektriksel ekserjiyi, $\dot{E}x_{k,elek}$ ve $\dot{E}x_{k,termal}$ iç ve dış kayıplardan kaynaklanan elektriksel kayıpları göstermektedir. İçsel kayıplar elektriksel ekserjinin, dışsal kayıplar ise çevreye gerçekleşen ısı kayıplarıdır. Bir fotovoltiaik sistemin elektriksel ekserjisini bulabilmek için PV yüzey tarafından alınan ekserji içeriğinin maksimum elektriksel ekserji üretebilmesi gerekmektedir. Bu ifadeye göre sistemin elektriksel ekserji

$$\dot{E}x_{elek} = V_{oc}I_{sc} - (V_{oc}I_{sc} - V_mI_m) \quad (2.11)$$

Burada, $V_{oc}I_{sc}$ üretilen elektrik miktarını, $V_{oc}I_{sc} - V_mI_m$ ise elektriksel ekserji kaybını ifade eder. Üretilen elektrik miktarı ve elektriksel ekserji kaybının toplamı elektriksel ekserjiyi verir.

$$\dot{E}x_{elek} = V_mI_m \quad (2.12)$$

Bir fotovoltiaik sistemin termal ekserjisi, PV sistem yüzeyinden çevreye olan ısı kaybı olarak oluşur ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir [65].

$$\dot{E}x_{termal} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \dot{Q} \quad (2.13)$$

Fotovoltiaik yüzeyden çevreye doğru gerçekleşen ısı kaybı ($\dot{Q}$)

$$\dot{Q} = h_{ca}A(T_h - T_c) \quad (2.14)$$

denklem (2.14) deki gibi hesaplanırken, çevreye taşınım ve ışıınım yoluyla gerçekleşen ısı transfer katsayısı (h_{ca}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8v \quad (2.15)$$

buradaki v değeri ise rüzgar hızı olup anemometre ile ölçülerek bulunur.

Yukarıda verilen (2.12-2.14) arasındaki denklemler, denklem (2.10)'da yerine yazıldığında fotovoltiaik sistemin çıkış ekserjisi bulunmuş olunur.

$$\dot{E}x_{çıkış} = V_mI_m - \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) h_{ca}A(T_h - T_c) \quad (2.16)$$

Son olarak (2.8) ve (2.16) numaralı denklemler (2.7) numaralı denklemde yerine yazıldığında sistemin ekserji verimi aşağıdaki gibi düzenlemiştir.

$$\eta_{II,PV} = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) h_{ca} A (T_c - T_a)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A} \quad (2.17)$$

2.4. Belirsizlik analizi

Akademik çalışmaları genel olarak deneysel ve teorik olarak ikiye ayırabiliriz. Teorik çalışmalar ise nümerik ve analitik kısımlardan oluşur. Nümerik yada analitik analizler matematiksel çözümlemelere dayanarak problemin analizini içerirken simülasyon çalışmaları gerçek hayattaki bir sistemin veya sürecin işleyişinin modellenmesidir. Yapılan teorik çalışma ister nümerik olsun isterse de simülasyon, deneysel çalışmalarla desteklendiğinde anlam kazanmaya başlamaktadır. Deneysel çalışmalarda ise elde edilen verilerin doğruluğu hakkında net fikir söylenemez. Bunun için bir deneysel çalışmanın geçerliliği öncelikle yöntemin sonra ölçülen değerlerin doğruluğuyla ilişkilidir.

Deneysel çalışmaların geçerliliğini sağlayan en önemli değişken, deneylerde ortaya çıkabilecek hatalardır. Bu hatalardan ilki deney setinin ve ölçü aletlerinin yapısından kaynaklanan hatalar diğeri ise deneyi gerçekleştiren kişiden kaynaklanan hatalardır.

Herhangi bir deney seti aracılığıyla tespit edilmesi/hesaplanması gereken büyüklük R , bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkiler ise; $x_1, x_2, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda; $R=R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ yazılabilir. Deneylerde etkili olan her bir bağımsız değişkene ait sabit hata miktarları (belirsizlikler), $W_1, W_2, \dots, W_n$ olsun. R büyüklüğünün belirsizliği ise W_R olarak gösterildiğinde [66,67]

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

gibi yazılır. Belirsizlik analizi yapılmasında en önemli avantajı, deneylerde en büyük hataya neden olan değişkenin tespit edilmesidir.

Tezde yapılan deneyler için belirsizlik analizi yöntemi kullanılarak hata analizi yapılmıştır. Ölçülen büyüklüklerin hata analizinde kullanılacak olan belirsizlik değerleri,

ölçü aletlerinin üretici firmaları tarafından bildirilen hata değerlerinden ve deneysel tecrübelerden elde edilmiştir. Deneylerde ölçülen değerler; güneş ışıyım şiddeti, çevre sıcaklığı, panel yüzey sıcaklığı, rüzgar hızı, akım ve gerilim şeklindedir.

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

ve

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

Denklem (2.19) ve (2.20), denklem (2.18)'de uygulanarak

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

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

denklemleri elde edilmiştir. Enerji verimi; ışıyım, panelin yüzey alanı ve yük altındaki maksimum akım-gerilim değerlerinin bir fonksiyonu olduğundan

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

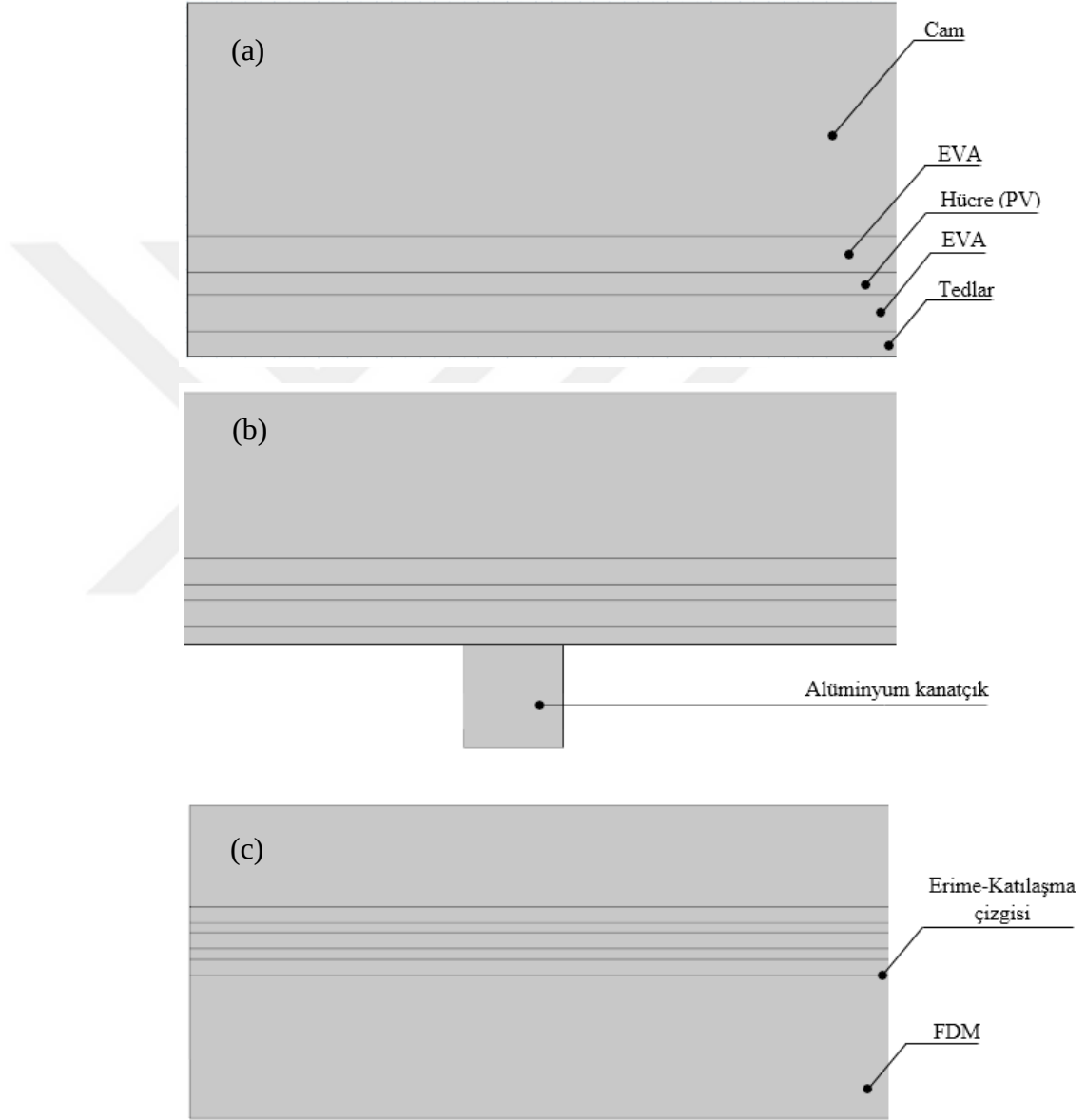
şeklinde hata analizi sonucuna varılabilir. Ekserji verimi ise bu değerlerin dışında sıcaklıkların ve rüzgar hızının bir fonksiyonu olduğundan

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

şeklinde yazılabilir. Belirsizlik analizi sonuçlarından elde edilen veriler bulgular bölümünde anlatılmıştır.

2.5. Sayısal analiz çalışmaları

Proje kapsamında PV modül için katmanlar ve yapılan düzenlemeler (kanatçık ve faz değıştiren malzeme eklenmiş hali) şematik olarak Şekil 2.17’de gösterilmektedir. PV modül; cam, eva, PV ve tedlardan meydana gelmektedir.



Şekil 2.17. Fotovoltaik sistemler ve katmanları (a) Sadece PV modül, (b) PV modül+kanatçık, (c) PV modül+FDM

Analizlerde kullanılan PV malzemenin katmanları ve malzeme özellikleri Tablo 2.10’da gösterilmektedir. Tablo 2.11’de ise kullanılan Faz Değıştiren Malzemenin (FDM) katı ve

sıvı fazındaki termofiziksel özellikler verilmiştir. FDM için aynı zamanda gizli erime ısısı 143.3 kJ/kg ve erime sıcaklığı ise 21°C olarak alınmıştır.

Tablo 2.10. Analizlerde kullanılan PV malzemenin katmanları ve malzeme özellikleri

PV katmanları	Kalınlık (mm)	Isı iletim katsayısı (W/m ²)	C _p (J/kgK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Cam	3,2	0,98	820	2515
EVA	0,5	0,31	2090	960
Hücre (PV)	0,31	150	712	2330
Tedlar	0,35	0,23	1465	1162

Tablo 2.11. FDM de kullanılan malzemenin katı ve sıvı fazları için termofiziksel özellikler (a) katı faz (b) sıvı faz

(a)	Özellikler	Değer	Birim
	Isıl iletkenlik (k)	0,2	W/mK
	Yoğunluk (ρ)	880	kg/m ³
	Sabit basınçta ısı kapasitesi (C _p)	1800	J/kgK

(b)	Özellikler	Değer	Birim
	Isıl iletkenlik (k)	0,2	W/mK
	Yoğunluk (ρ)	770	kg/m ³
	Sabit basınçta ısı kapasitesi (C _p)	2400	J/kgK
	Dinamik viskozite (μ)	15,66*1e ⁻³	Pas

2.5.1. Sistemi yöneten denklemler, sınır şartları ve çözüm yöntemi

Sadece PV modül ve kanatçık durumunda sistemi yöneten denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u \nabla T + \nabla q = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{vd} \quad (2.25)$$

$$q = -d_z k \nabla T \quad (2.26)$$

PV modül için numerik analizde sınır şartları ise:

Üst yüzeyde sabit ısı akısı durumunda, ısı akısı sınır şartı:

$$-nq = d_z q_0 \quad (2.27)$$

PV modülün katmanlar arası süreklilik sınır şartı:

$$-n_{dst} q_{dst} = n_{src} q_{src} \quad (2.28)$$

$$T_{dst} = T_{src} \quad (2.29)$$

Faz Değiştiren malzeme durumunda ise, sıvı tarafı doğal taşınım etkilerinin de yer aldığı Navier-Stokes denklemleri ve süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_0 (u \nabla) u = -\nabla p + \nabla \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho g \quad (2.30)$$

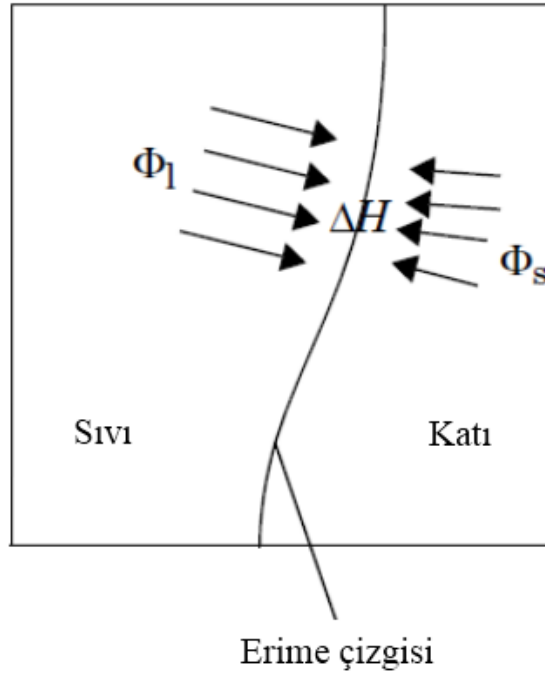
$$\nabla u = 0 \quad (2.31)$$

$$\rho = \rho_0 \alpha_p (T - T_f) \quad (2.32)$$

Katı eridiğinde katı-sıvı ara yüzeyi katı tarafa doğru hareket eder. Bu ara yüzdeki enerji dengesi aşağıdaki şekilde formüle edilir:

$$\rho_0 \Delta H v n = (\phi_1 - \phi_s) n \quad (2.33)$$

Burada ΔH gizli erime ısısını ve ϕ_1, ϕ_s ise ara yüzeydeki ısı akılarını temsil eder. Şekil 2.18’de ise ara yüzeydeki ısı akılarının şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.18. Ara yüzeydeki ısı akılarının şematik gösterimi

Bir başka modelleme de ise doğal taşınım etkilerini göz önüne almadan aşağıdaki denklemler kullanılarak da faz değiştiren malzeme kullanımı durumunda sıcaklık dağılımları belirlenebilmektedir:

$$A_c \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + A_c \rho C_p u \nabla T + \nabla q = A_c Q + q_o + A_c Q_p + A_c Q_{vd} \quad (2.34)$$

$$q = -A_c k \nabla T \quad (2.35)$$

$$\rho = \theta \rho_{faz1} + (1 - \theta) \rho_{faz2} \quad (2.36)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} \left(\theta \rho_{faz1} C_{p, faz1} + (1 - \theta) \rho_{faz2} C_{p, faz2} \right) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (2.37)$$

$$k = \theta k_{faz1} + (1 - \theta) k_{faz2} \quad (2.38)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{(1 - \theta) \rho_{faz2} - \theta \rho_{faz1}}{\theta \rho_{faz1} + (1 - \theta) \rho_{faz2}} \quad (2.39)$$

Bu proje kapsamında FDM kullanıldığı durumda ilk yaklaşım kullanılmış ve doğal taşınım etkileri de göz önüne alınmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde hesaplama bölgesi küçük ağ

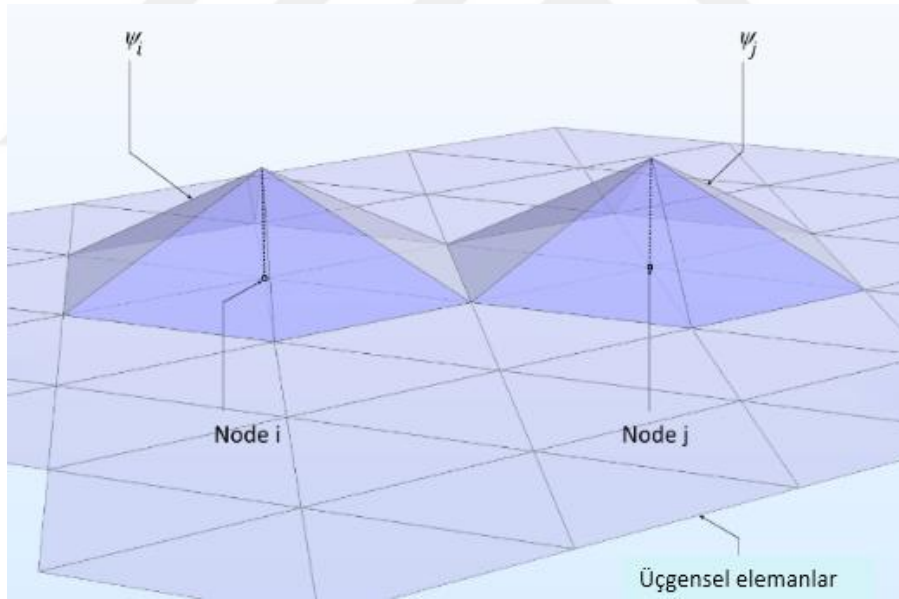
yapılarına bölünür ve her bir hücredeki değişken bazı özel şartları sağlayan fonksiyonlarla yaklaşık olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$u \approx u_h \quad (2.40)$$

$$u_h = \sum_i u_i \psi_i \quad (2.41)$$

Burada şekil fonksiyonu adı verilen özel fonksiyon her bir elemanın (hücrenin) köşelerindeki değişken değerleriyle çarpılıp yaklaşık olarak ayırık bir şekilde yazılabilir. Şekil 2.19’da hesaplama bölgesinde sonlu elemanlar kullanılarak yapılan bir ağ yapısı gösterilmektedir. Zamana bağlı problemlerde zamana bağlı terimlerin de ayrıklaştırılması aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} \approx \frac{T_{i,t} + \Delta t - T_{i,t}}{\Delta t} \quad (2.42)$$



Şekil 2.19. Hesaplama bölgesinde üçgensel elemanların kullanıldığı sonlu elemanlar gösterimi

Sıcaklığın aşağıdaki gibi yazıldığı

$$T_h(x) = \sum_i T_i \psi_i(x) \quad (2.43)$$

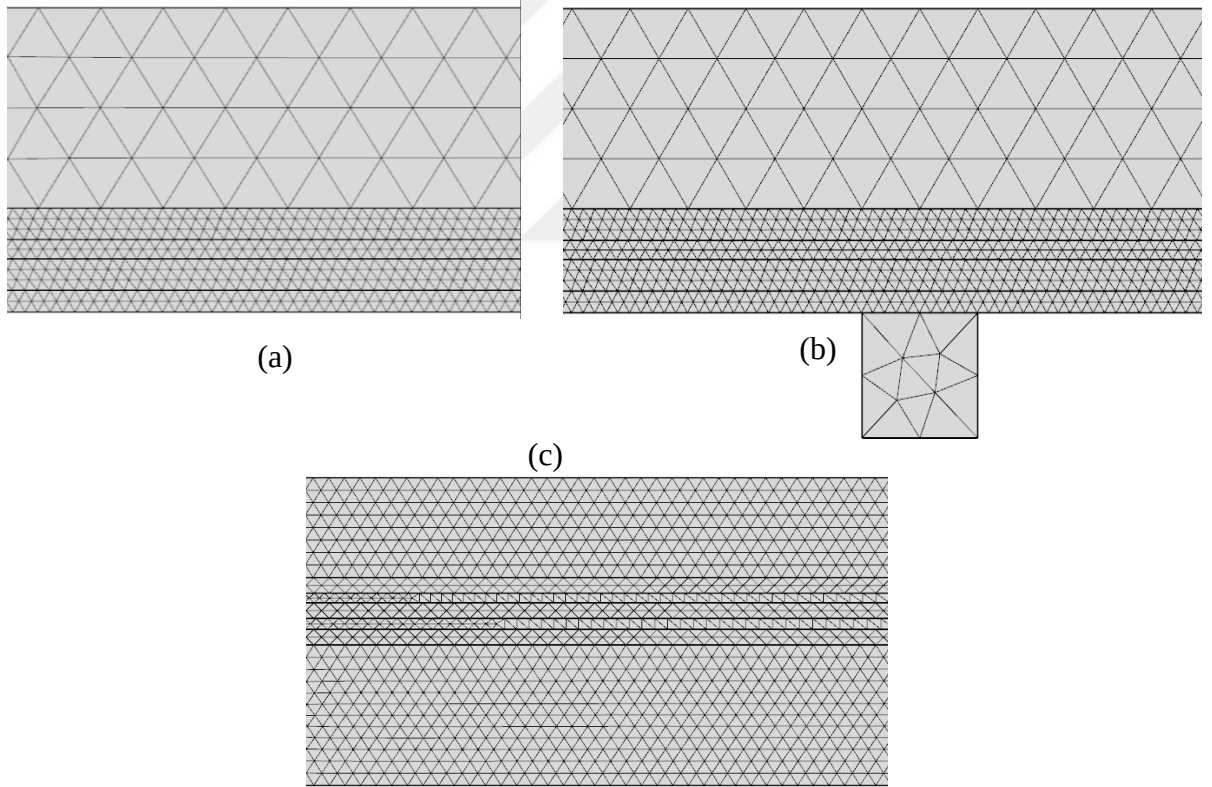
ve zamana bağlı ayrıklaştırmanın da Denklem (2.42) da yapıldığı durumda ısı iletim denkleminin ait sonlu eleman gösterimi aşağıdaki forma indirgenir:

$$\rho C_p \left(\frac{T_{i,t+\Delta t} - T_{i,t}}{\Delta t} \right) \sum_i \int_{\Omega} \psi_i \psi_j dV + \sum_i T_{i,t+\Delta t} \int_{\Omega} k \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j dV + \sum_i \int_{\partial\Omega} (-k T_{i,t+\Delta t} \nabla \psi_i \cdot \mathbf{n}) \psi_j dS = \int_{\Omega} g \left(\sum_i T_{i,t+\Delta t} \psi_i \right) \psi_j dV$$

(2.44)

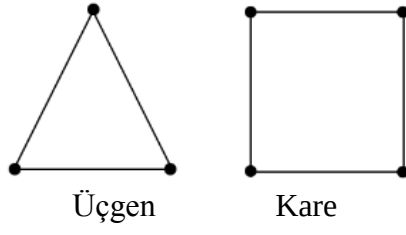
$$AT_h = b \quad (2.45)$$

Ele alınan problem ilgili diferansiyel denklem, sınır ve başlangıç koşullarıyla birlikte sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözüldü. Zamana bağlı problemde 4. mertebeden Runge-Kutta yöntemi kullanıldı ve zaman adımı değişken olarak çözücü tarafından otomatik olarak belirlendi. Ağ yapısına ait şematik gösterimler Şekil 2.20’de yer almaktadır. Ağ yapısının çözüm süresini çok uzatmaması ve doğru sonuç vermesi için uygun olan yapı seçilmiştir. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan çeşitli elemanlar Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

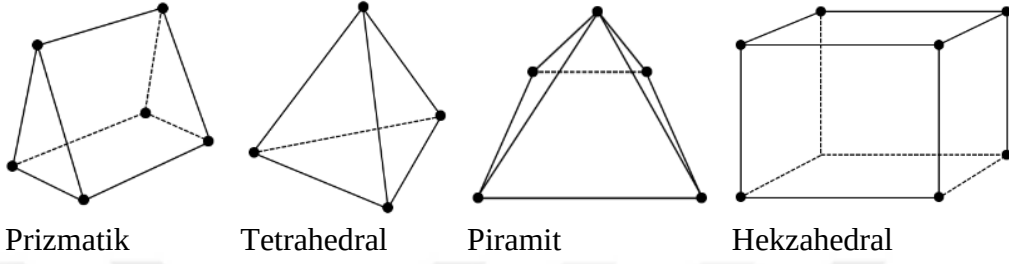


Şekil 2.20. Fotovoltaik sistemlerin ağ yapısına ait şematik şekiller (a) PV, (b) PV+kanatçık, (c) PV+FDM

(a)



(b)

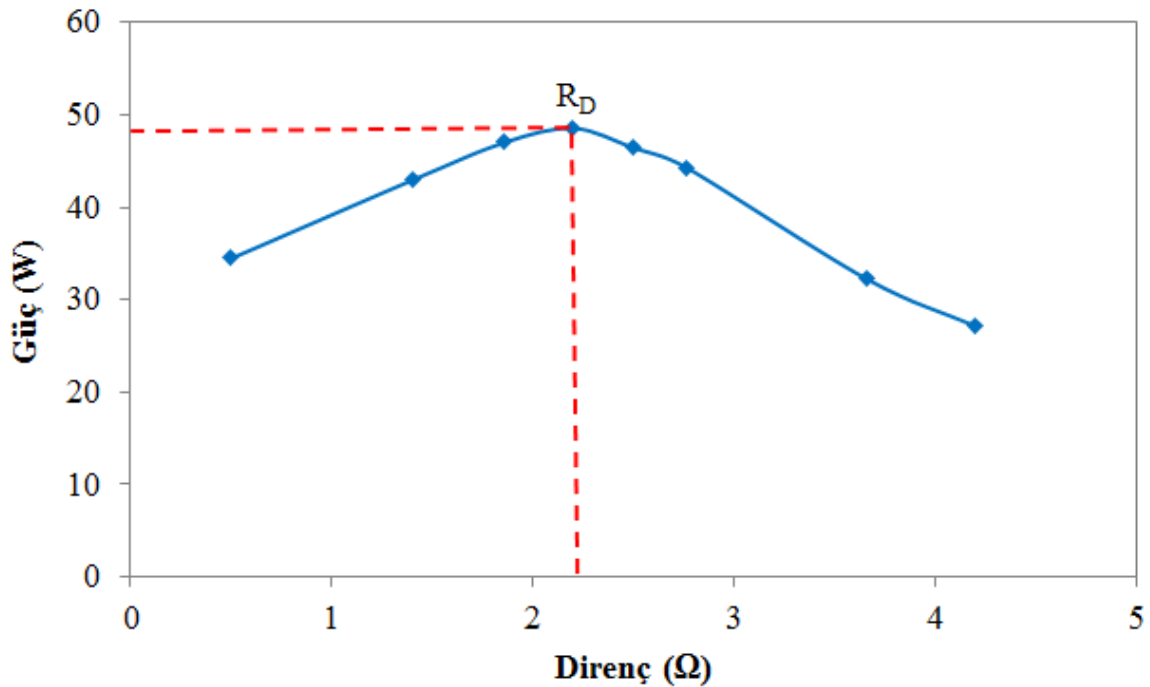


Şekil 2.21. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan çeşitli elemanlar (A) 2 boyutlu (b) 3 boyutlu

3. BULGULAR

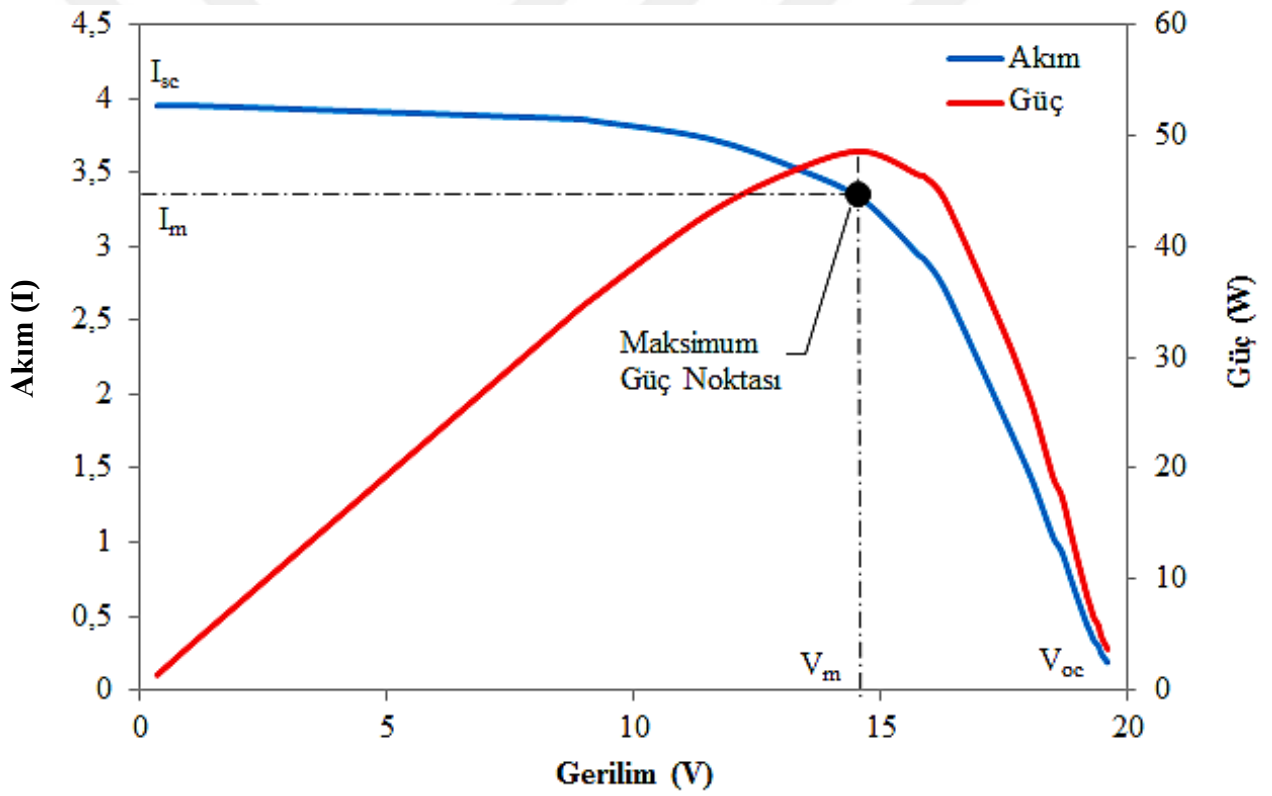
Fotovoltaik panellerin pasif yöntemlerle güç-sıcaklık ilişkisi ve enerji-ekserji verimliliklerinin analizleri yapılmadan önce deneylerde kullanılan 75 W'lık panelin Elazığ iklim şartlarındaki maksimum güç noktasının tespiti yapılmıştır.

Maksimum güç noktasının tespiti; fotovoltaik panellerin güçleri ve bağlanan sistemin iç (yük) direncine bağlı olarak değişim göstermektedir. Ekici ve Gülten [67] şebeke bağlantılı bir PV sistemin performans analizinde Elazığ ilinin yıllık optimum eğim açısının 30° ile 40° arasında olduğunu ifade etmişlerdir. Şenpınar [68] farklı illerin yıllık ve mevsimlik güneş açılarının gelişine bağlı olarak optimum PV modül açısının Elazığ ili için $34,82^\circ$ olduğunu ifade etmiştir. Yapılan araştırma ve hesaplamalar sonucunda 37° eğim açısına sahip konstrüksiyona fotovoltaik paneller monte edilmiştir. Ölçümler 955 W/m^2 ışınlam altında çevre sıcaklığı $37,98^\circ\text{C}$ 'de panelin güç-direnç ilişkisi 8 farklı yükte incelenmiştir. En yüksek gücün elde edildiği R_D direncinin değeri $2,2 \Omega$ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.1'de bir panelin farklı yükler altındaki güç değerleri mavi çizgi ile gösterilirken kırmızı kesikli çizgi ideal yük altındaki en yüksek güç çıkışını göstermektedir.

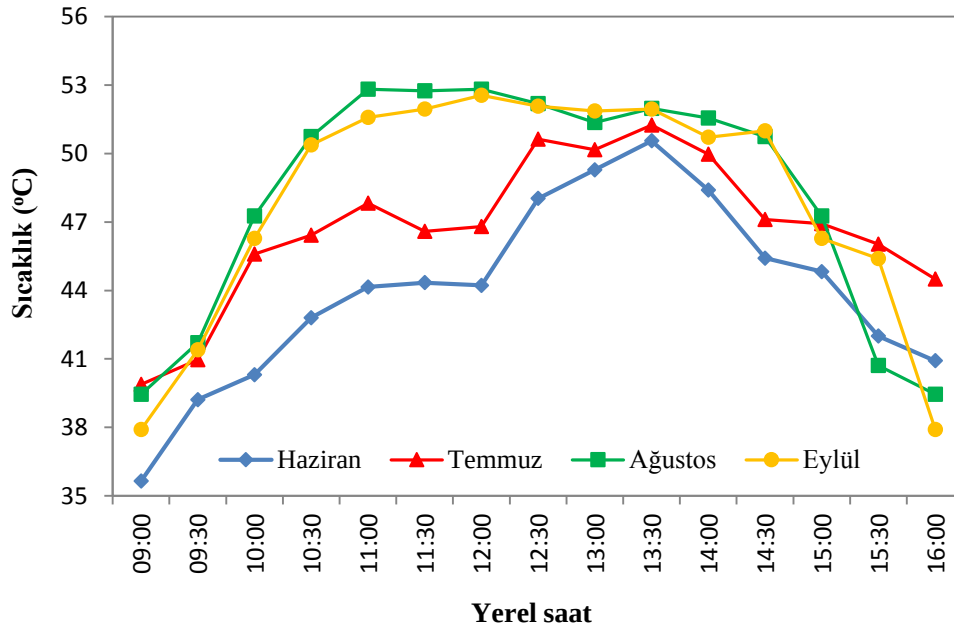


Şekil 3.1. Farklı direnç değerlerinde maksimum güç noktası

PV modülün optimum eğim açısı ve yük direncinin tespitinden sonra akım, gerilim ve güç ilişkisini ifade etmemiz gerekir. Bunun için sistemin I-V eğrisinin çizilerek, eğri üzerindeki maksimum güç noktası, kısa devre akımı son olarak da açık devre geriliminin tayini yapılmıştır. PV modül kısa devre durumunda akım üretir fakat gerilim üretmez. Açık devre durumunda ise, PV modül gerilim üretirken akım üretmez. Elektrik gücü, akım ve gerilimin çarpımına eşit olduğundan hem kısa devre hem de açık devre PV modülünde güç üretimi meydana gelmemektedir. Güneş ışınımının değerinin 955 W/m^2 olduğu bir anda deney gerçekleştirilmiştir. PV modülün $2,2 \Omega$ 'luk yük altındaki maksimum akım ve gerilim değerleri $3,31 \text{ A}$ ve $14,67 \text{ V}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.2'de fotovoltatik modülün maksimum güç noktası ve diğer parametreler gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel olarak kullanılan polikristal panelin I-V ve P-V eğrisi



Şekil 3.3. Pasif iyileştirme uygulanmamış PV modüllerin farklı aylardaki ortalama arka yüzey sıcaklıkları

Şekil 3.3’de fotovoltaik modüllerin aylara göre değişimini gösteren sıcaklık değerleri verilmiştir. Pasif PV soğutma teknikleri uygulanmamış modüllerin arka yüzey sıcaklıkları, çevre sıcaklığı, ışıınım ve güneş ışık şiddetinin geliş açısı gibi parametrelere bağlı olarak değişime uğramaktadır. Haziran ve Temmuz aylarındaki en yüksek sıcaklık değerleri saat 13:30’da 50,55 °C ve 51,24 °C ölçülürken, Ağustos ve Eylül aylarındaki en yüksek sıcaklık değerleri saat 12:00’de 52,81 °C ve 52,54 °C olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu maksimum sıcaklık değerleri panellerin verimini olumsuz yönde etkilendiğini örneklemek için; Standart test koşullarında 25 °C sıcaklığındaki 75 W gücündeki bir panelin verimi denklem (3.1) kullanılarak

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{IA} = \frac{75}{1000 \times 0,5159} \quad (3.1.)$$

$$\eta_{STC} = \%14,53 \quad (3.2.)$$

bulunurken, sistemin 45 °C sıcaklığındaki verimi

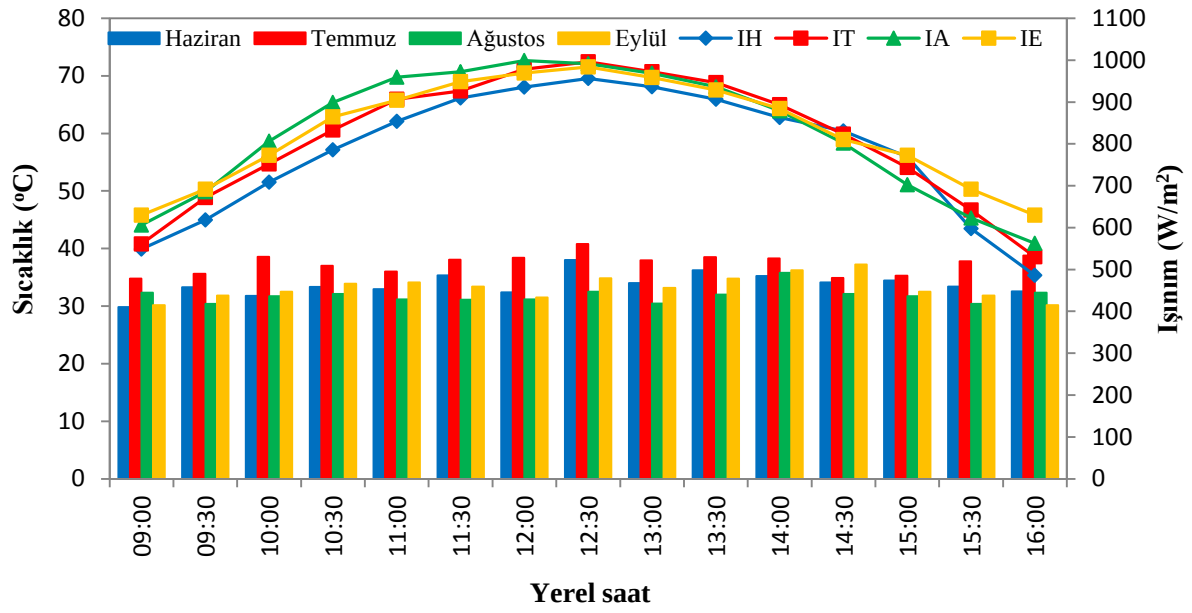
$$P_m = P_m^{STC} [1 + (T - 25) \alpha_p] \quad (3.3)$$

$$P_m = 75 [1 + (45 - 25) (-0,004)] \quad (3.4)$$

$$P_m = 69W \quad (3.5.)$$

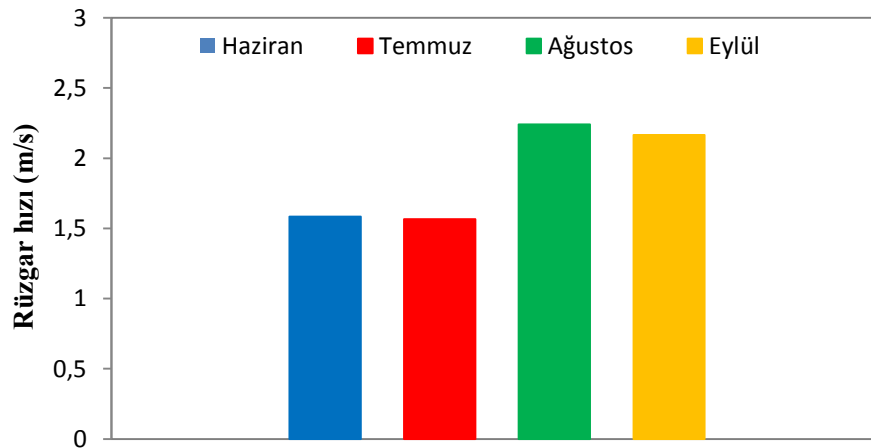
$$\eta_{STC} = \%13,37 \quad (3.6.)$$

bulunmaktadır.

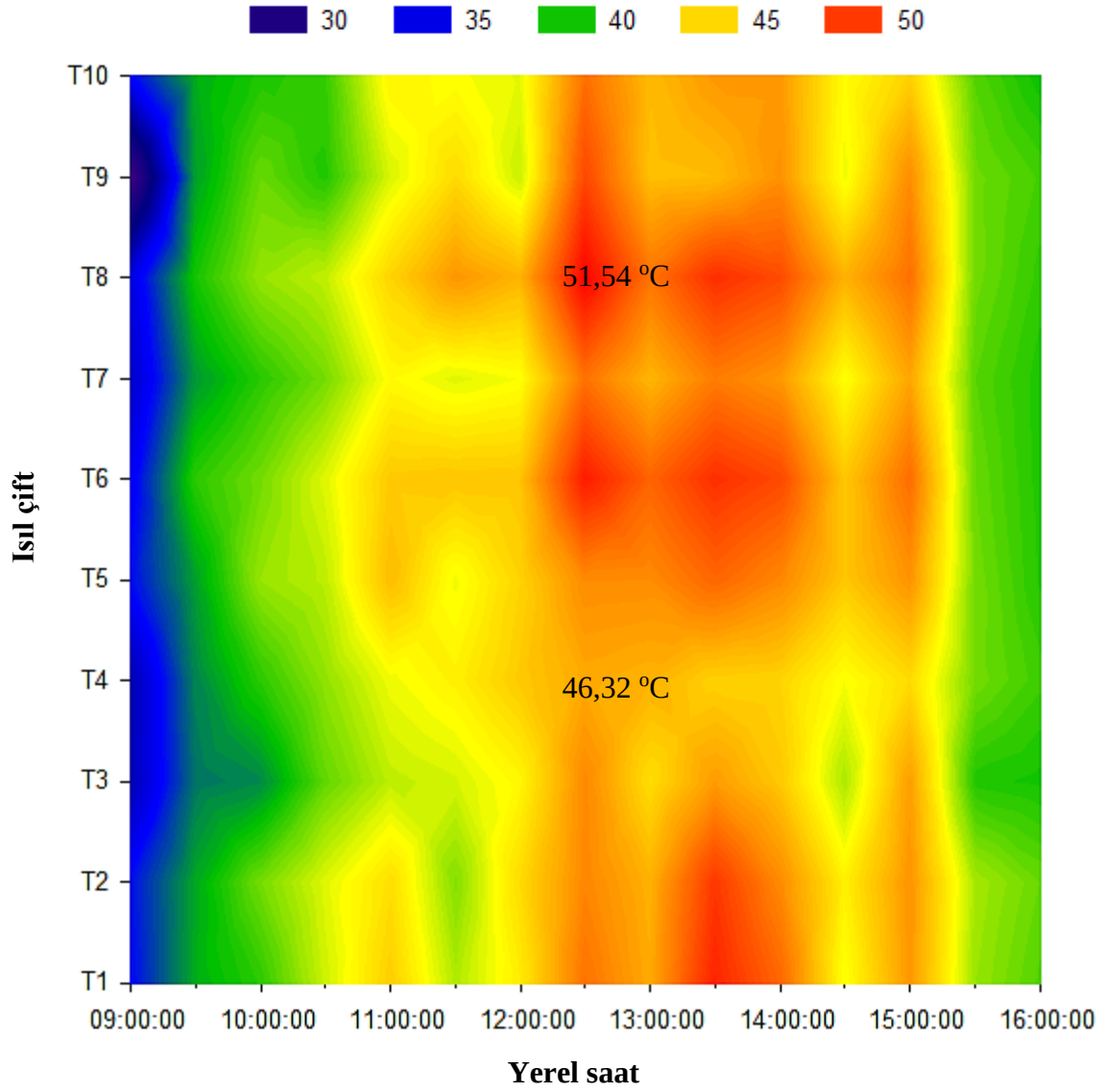


Şekil 3.4. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında alınan Işınım ve çevre sıcaklık değişimleri

Farklı aylarda alınan ışınım değerleri incelendiğinde tepe noktalarda birbirlerine yakınsama olurken, sıcaklık değerleri her bir ay için değişim göstermiştir. Haziran ve Temmuz aylarında çevre sıcaklık değerlerinin Ağustos ve Eylül aylarından daha yüksek olmasının sebebi rüzgar hızının düşük olmasıdır. Aynı zamanda Şekil 3.4’de verilen panel yüzey sıcaklıklarının Ağustos ve Eylül aylarında daha yüksek olması ise bu ayların ışınım değerlerinin yüksek olmasıdır. Fotovoltaik hücreler Ağustos ve Eylül aylarında ışıınımdan daha fazla yararlanarak elektrik üretimi yaparken bu enerjinin büyük bir çoğunluğu ısı enerjisine dönüşerek atık ısı meydana getirmektedir. Fotovoltaik paneller üzerindeki ısı değer düşürülerek performansları artırılırken ömürleri de uzatılmaktadır. Şekil 3.5’de aylara göre ölçülen rüzgar hızı ortalama değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Aylara göre ortalama rüzgar hızları



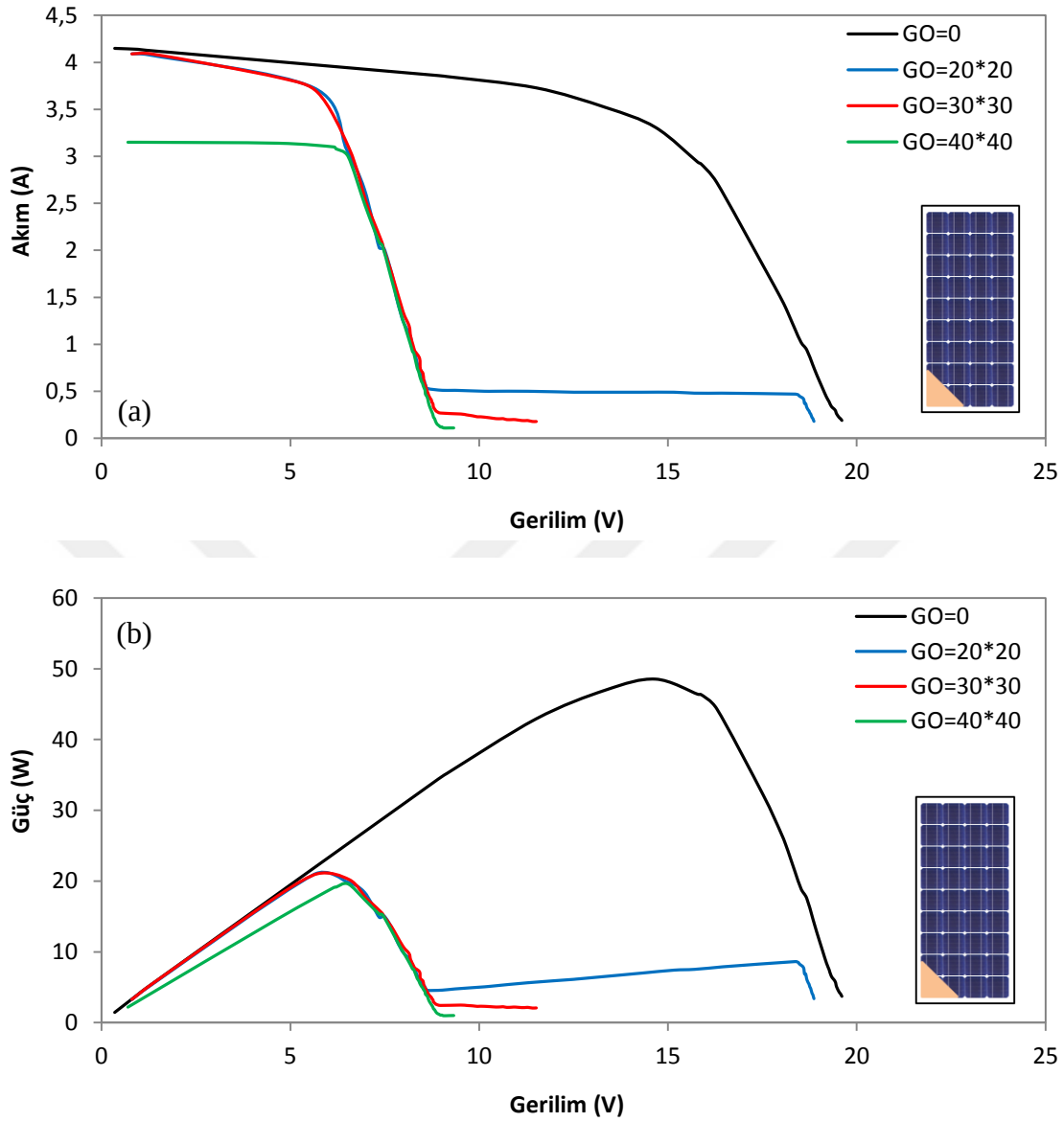
Şekil 3.6. Panel arka yüzeyindeki sıcaklık değişiminin zamanla değişimi (haziran ayı)

Şekil 3.6’da herhangi bir soğutma tekniği uygulanmamış veya gölgelenmeye maruz kalmayan bir fotovoltaik panelin arka yüzeyine yerleştirilen 10 adet ısılcıftın zamana göre değişimi verilmiştir. Deneyin yapıldığı sabah saatlerindeki en düşük sıcaklık değeri T₉’da 27,56 °C iken en yüksek sıcaklık değeri T₂’de 35,86 °C olarak ölçülmüştür. Işınım değerinin zamanın ilerlemesiyle yükselmesi, panel üzerindeki sıcaklık değerini arttırmış ve panel üzerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değeri saat 12:30’da 51,54 °C olmuştur. Güneş ışınımının değerinin en yüksek olduğu öğlen saatlerinde panel üzerindeki sıcaklık farkı (ΔT) 5,22 °C’ye ulaşmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere, hücrelerin çalışma sıcaklıkları farklılık göstermekte olup panel yüzeyine farklı etki etmektedir.

Panellerin yüzey sıcaklıkları belirlenirken literatürde genellikle 3 adet ısı çifti (panelin orta ekseninin başında, ortasında ve sonunda) kullanarak hücre sıcaklıkları (T_h) belirlenip gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Sıcaklık farkının panel boyutu büyüdükçe daha da artacağı göz önünde bulundurulursa, ısı çifti sayılarının 3'den fazla olması elde edilecek analizlerin daha hassas yapılacağı unutulmamalıdır.

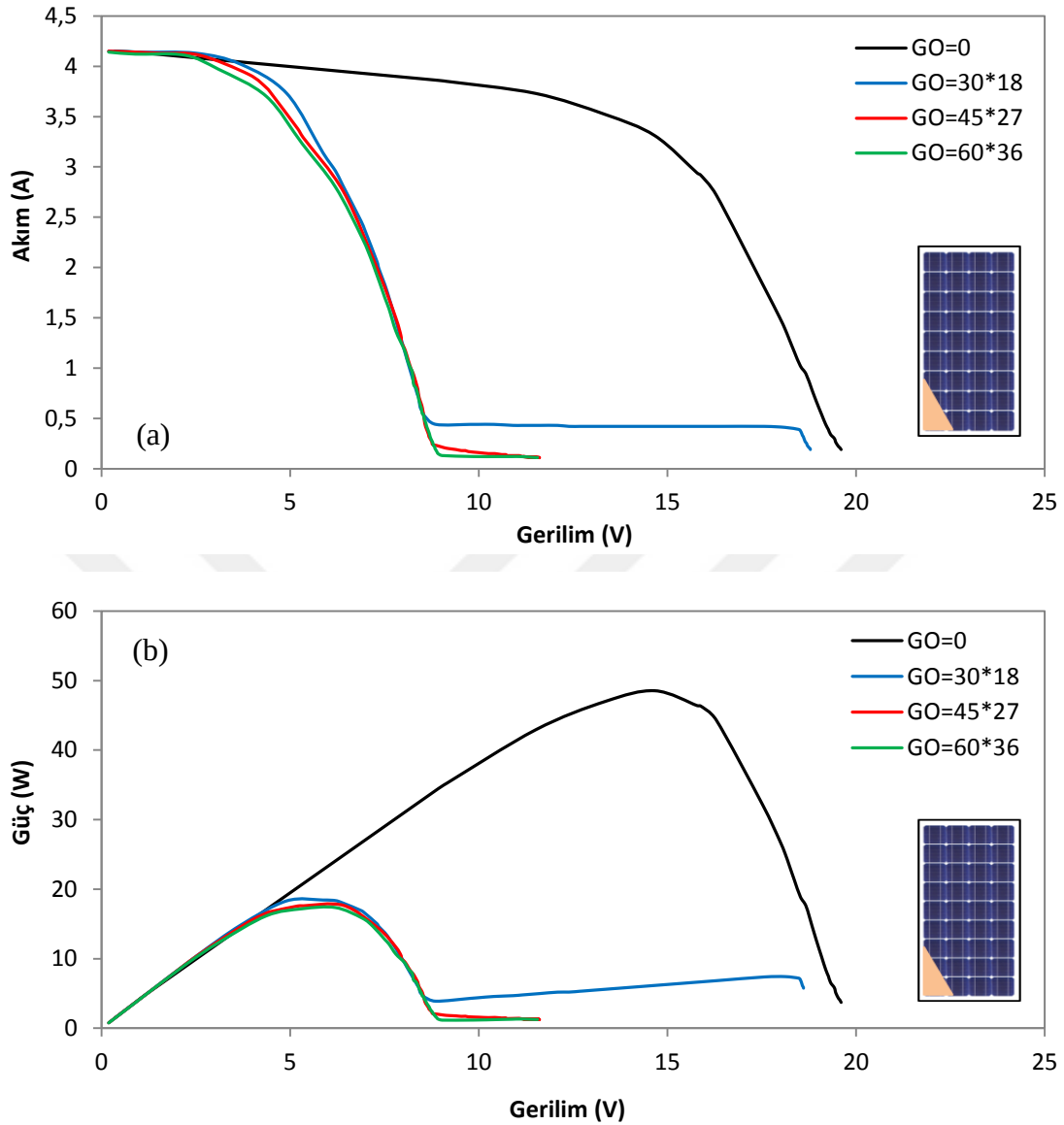
3.1. Gölgeleme parametrelerinin PV'ler üzerindeki etkilerinin analizi

Deneylerde kullanılacak PV panellerin analizleri yapıldıktan sonraki bölümlerde gölgelemenin ve sıcaklığın panel üzerindeki etkileri incelenmiştir. Grafikler üzerinde yer alan GO kısaltması hücre üzerine uygulanan gölgelemenin oranını tanımlamaktadır. Uygulanan her bir gölgeleme oranı (GO) ve gölgeleme şekilleri için fotovoltaik panelin akım, gerilim, sıcaklık değerleri ile ışınım, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı değerleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerden faydalanan sistemlerin akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) eğrileri ile enerji-ekserji grafikleri çizdirilmiştir.



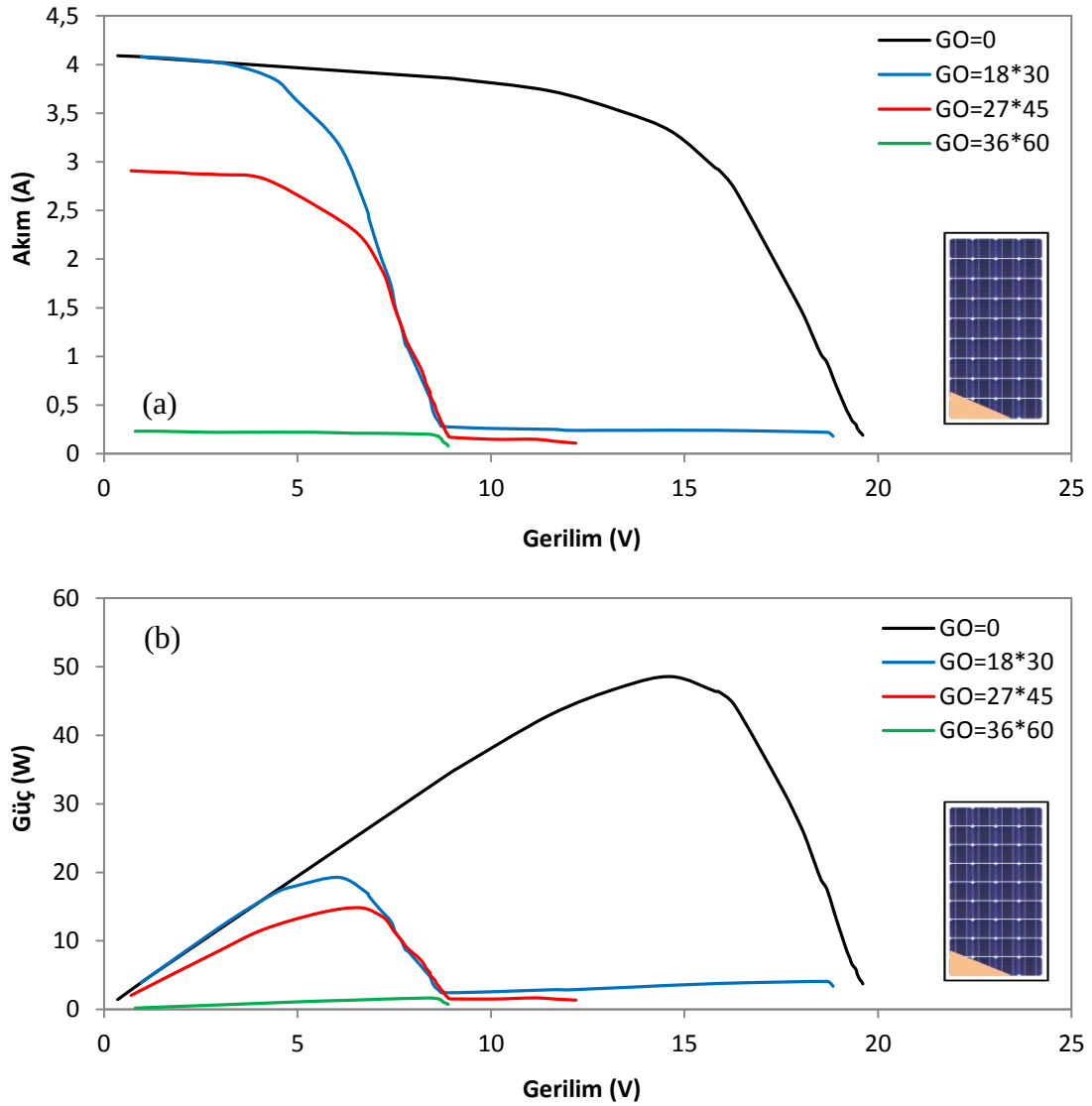
Şekil 3.7. Diagonal gölgelenme altında PV panelin (a) I-V, (b) P-V eğrileri

Şekil 3.7’de farklı gölgelenme oranları için sistemlerin I-V ve P-V eğrileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde gölgelenme oranının artmasıyla açık devre geriliminde (V_{oc}) küçük azalmalar meydana gelmiştir. Gerçekte olması gereken V_{oc} değerinde bir değişikliğin olmamasıdır. Bunun nedeni kullanılan diyotların yetersizliği veya ölçüm sırasındaki belirsizliklerdir. Ayrıca, GO uygulanmasıyla her bir parametrenin maksimum güç noktasında (P_m) kritik azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalmalar, I_m ve V_m değerlerindeki azalmalardan kaynaklanmaktadır. Gölgelenme oranlarına göre elde edilen maksimum güçler, GO=%0 için 48,55 W, GO=20*20 için 20,92 W, GO=30*30 için 20,20 W ve GO=40*40 için 19,59 W’tır.



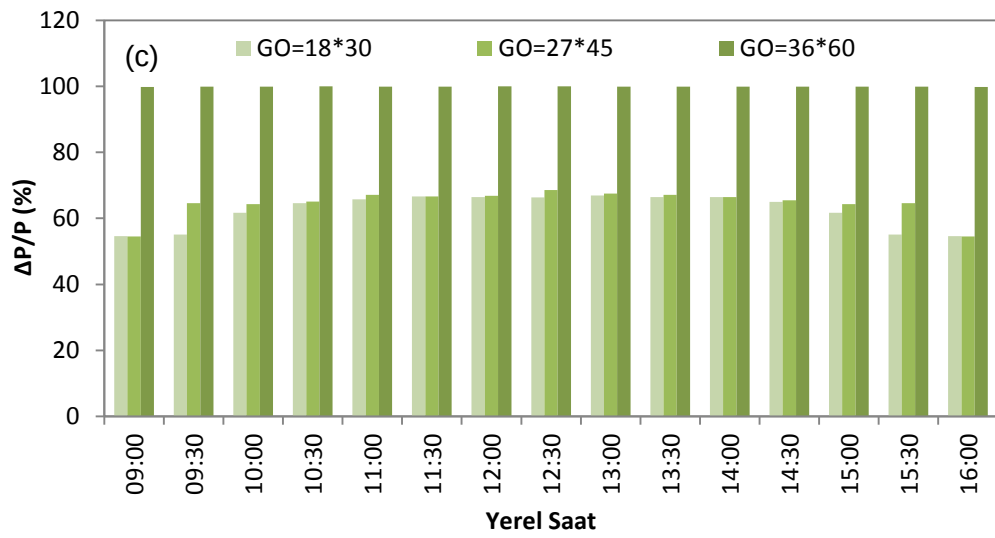
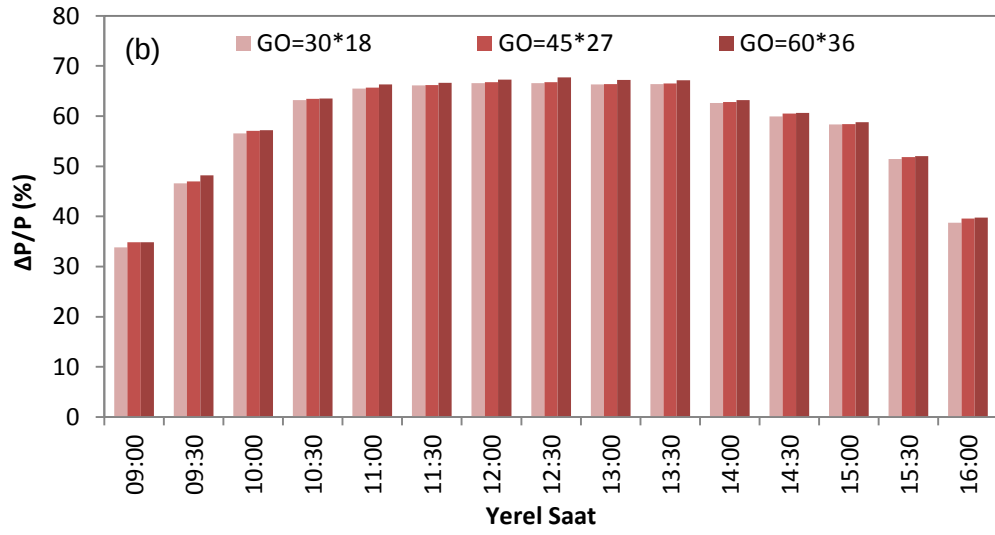
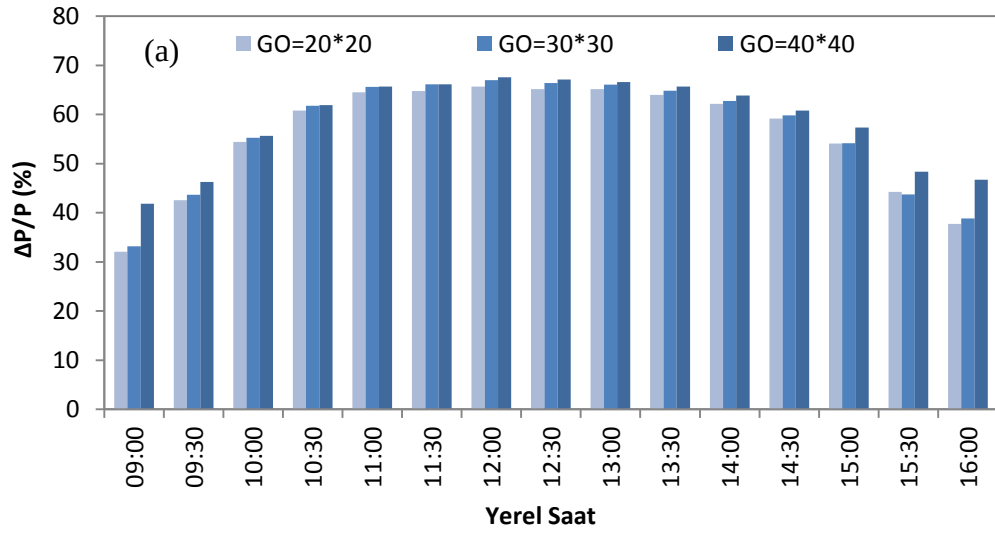
Şekil 3.8. Diagonal gölgelenme altında PV panelin (a) I-V, (b) P-V eğrileri

Şekil 3.8’de panelin kısmi gölgelenme altındaki elektriksel eğrileri gösterilmiştir. Kısa devre akımı gölgeli ve gölgesiz panellerin her biri için yaklaşık 4,15 A değeri ile başlamıştır. Direnç değerindeki küçük değişiklikler yük altındaki akım değerini kısa devre akımından uzaklaştırarak I_m değerini azaltmıştır. Panelde, hücresel gölgelenmede olduğu gibi tek bir diyot devre dışı kalmış olup diğer diyot sistemin normal çalışmasını sağlamıştır. Kısmi gölgelenmenin maruz olmadığı sistemden elde edilen en yüksek akım ve gerilim değerleri 3,31 A ve 14,67 V’dir. Gölgelenme oranı 30*18 olan panelin maksimum akım ve gerilim değerleri 3,14 A ve 5,87 V, GO 45*27 olan panelin akım ve gerilim değerleri 2,75 A ve 6,42 V, GO 60*36 olan panelin akım ve gerilim değerleri 3,23 A ve 5,32 V’tur.



Şekil 3.9. Diagonal gölgelenme altında PV panelin (a) I-V, (b) P-V eğrileri

Şekil 3.9’da diagonal gölgelenme altındaki panelin akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri verilmiştir. Bypass diyota ait dizide kısmi gölgelenme meydana geldiğinde diyot devreye girer ve diğer dizi normal şartlarda çalışmaya devam eder. Gölgelenme tüm dizileri kapsadığında diyotların anlamı kalmaz ve çıkış gücü ciddi bir şekilde etkilenir. Grafik incelendiğinde ilk gözlemlenen, akım değerlerinin her bir GO’da kritik seviyelerde düşüş göstermesidir. Kısmi gölgelenmenin uygulanmadığı panelde maksimum güç 48,57 W, GO=18*30 olduğunda çıkış gücü 19,27 W, GO=27*45 olduğunda ise çıkış gücü 14,82 W, GO=36*60 olduğunda çıkış gücü 1,67 W olarak hesaplanmıştır. Bu gölgelenme tipi diğer gölgelenme tipleri ile kıyaslandığında diyotların daha fazla devre dışı kalması, güç kaybının daha fazla olmasını sağlamıştır.



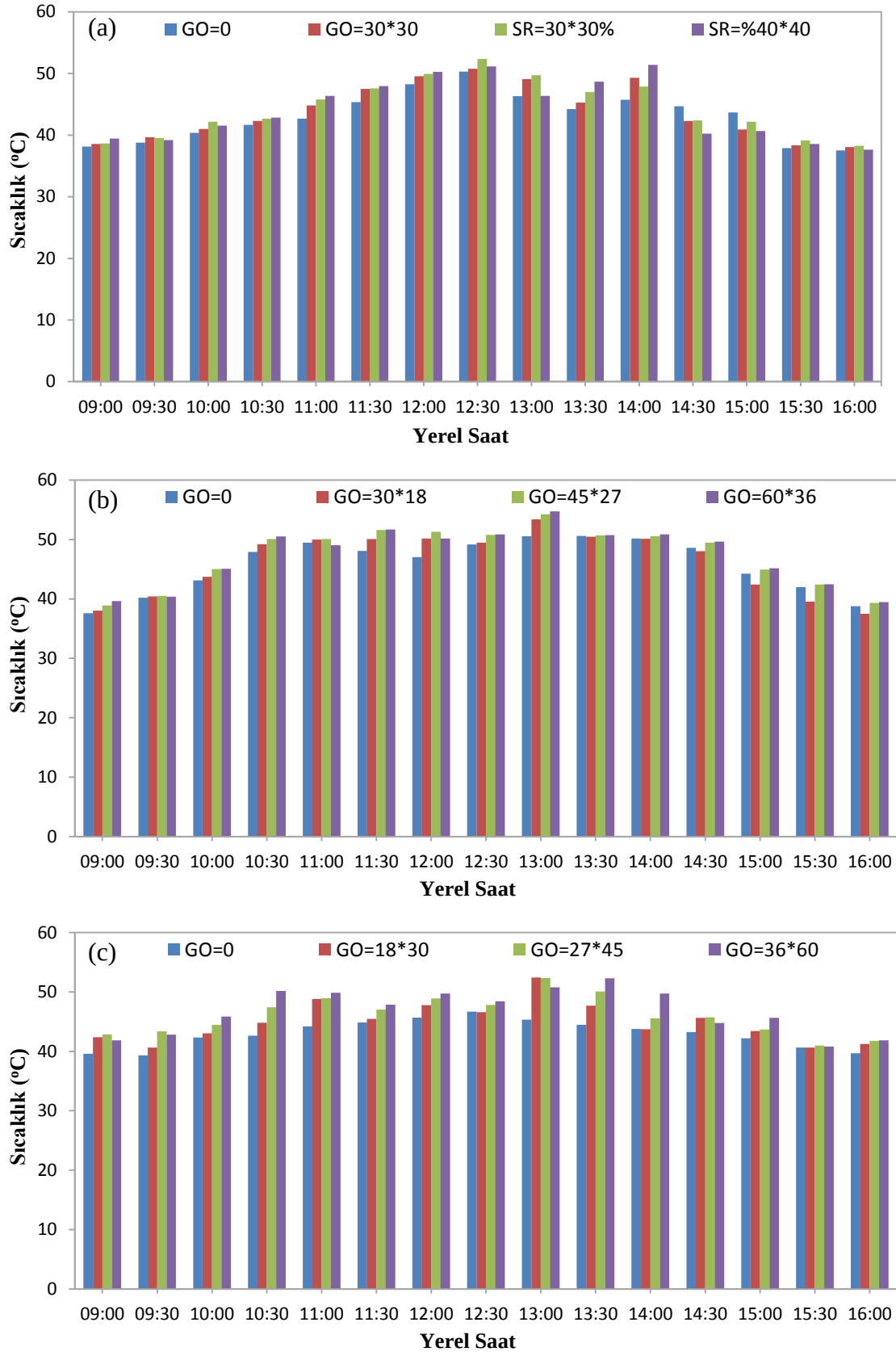
Şekil 3.10. Kısmi gölgelenmeye maruz kalan PV panellerin güç kayıp oranları (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

Farklı gölgelenme şekillerinde ve boyutlarındaki fotovoltaik panellerin zamana göre güç kayıp oranları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Şekil 3.10 (a)'da aynı şekilde fakat farklı boyutlardaki gölgelenme durumunun fotovoltaik panellere etkisi gözlemlenmiştir. Her bir değişkenin güç kayıp oranları farklı zamanlarda verilmiştir. Bunun sebebi PV modüllerin aynı güneş ışıınımlı altında farklı gölgelendirme durumlardan kaynaklanmaktadır. Zamana göre değişimlerinin sebebi ise hem güneş ışıınımlı hem de gölgelendirme durumuna göre olan modül yüzey sıcaklıklarıdır. En yüksek güç kaybı % 67,56 ile saat 12:00'de gerçekleşmiştir. Paneller arasındaki en yüksek güç kayıp farkı saat 09:00'da % 9,79 olarak ölçülmüştür. Şekil 3.10 (b)'de aynı şeklin farklı boyutlarındaki diagonal gölgelendirme durumunun güç kayıp oranları incelenmiştir. En yüksek güç kaybı saat 12:30'da % 67,75, paneller arası en yüksek kayıp ise saat 09:30'da % 1,58 olmuştur. Şekil 3.10 (c)'de bir önceki gölgelendirme durumunun tersi ele alınarak paneller üzerindeki güç kaybı gösterilmiştir. Üç gölgelendirme durumunun analizi yapıldığında GO=36*60 olan panelde güç üretimi çok düşük olduğundan en fazla kayıp bu durumda gerçekleşmiştir. Paneller üzerindeki bypass diyotların devre dışı kalması güç üretimini etkilemektedir. Gölgelendirme türleri, şekilleri ve boyutları paneller üzerindeki hücresel dizileri etkilemektedir.

Genel olarak PV modüller 36 ya da 72 hücreden oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan PV modül 36 hücreden ve 4 hücresel diziden oluşmaktadır. Bu PV modülün her iki hücresel dizisine bir bypass diyot kullanıldığından, son gölgelendirme durumu iki diyotu da etkisiz hale getirmiş ve geri kalan hücrelerde en düşük hücre performansına göre çalışmışlardır.

Şekil 3.10'da gölgelenme şekillerine ve gölgelenme oranlarına göre PV panellerin güç kayıp oranları verilmiş ve şekiller denklem (3.1) kullanılarak elde edilmiştir.

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

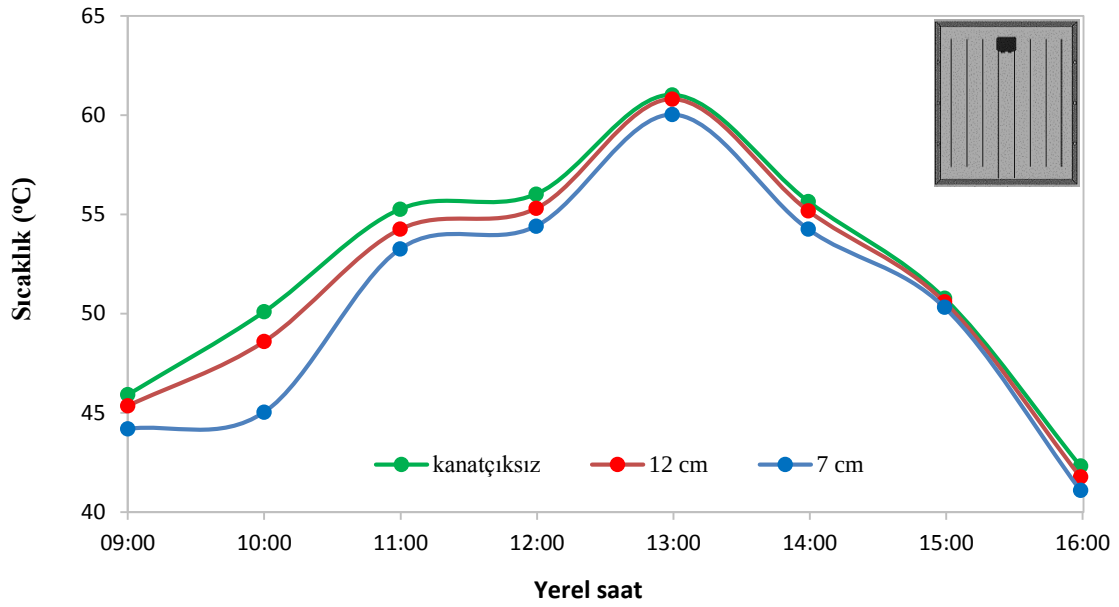


Şekil 3.11. Kısmi gölgelenmeye maruz kalan PV panellerin yüzey sıcaklıkları (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

Şekil 3.11’de farklı gölgelenme türlerine maruz kalmış PV modüllerin yüzey sıcaklıklarındaki değişim gösterilmiştir. Genel olarak incelendiğinde gölgelenme olmayan PV modüller ile gölgelenmeye maruz kalan PV modüller arasında gözle görülebilecek sıcaklık farkları olduğu görülmüştür. Gölgelenme oranının artmasıyla sıcaklık değerlerinde yükselmeler gerçekleşmiştir. Şekil 3.11 (a)’da en yüksek yüzey sıcaklığı saat 12:30’da sırasıyla 50,31 °C, 50,77 °C 52,35°C ve 51,13 °C’dir. Fotovoltaik paneller arasındaki en yüksek sıcaklık farkı saat 14:00’de gölgesiz panel ile GO=40*40’da 5,67 °C olmuştur. Şekil 3.11 (b)’de en yüksek yüzey sıcaklığı saat 13:00’de sırasıyla 50,56 °C, 53,39 °C, 54,26 °C ve 54,71 °C olarak ölçülmüştür. Fotovoltaik paneller arasındaki en yüksek sıcaklık farkı saat 12:00’de gölgesiz panel ile GO=45*27’de 4,26 °C olmuştur. Şekil 3.11 (c)’de en yüksek yüzey sıcaklığı saat 13:00 ve 13:30’da gerçekleşmiş, panel yüzey sıcaklığı 52 °C kadar çıkmıştır. Fotovoltaik paneller arasındaki en yüksek sıcaklık farkı saat 13:30’da gölgesiz panel ile GO=36*60’da 7,8 °C olmuştur.

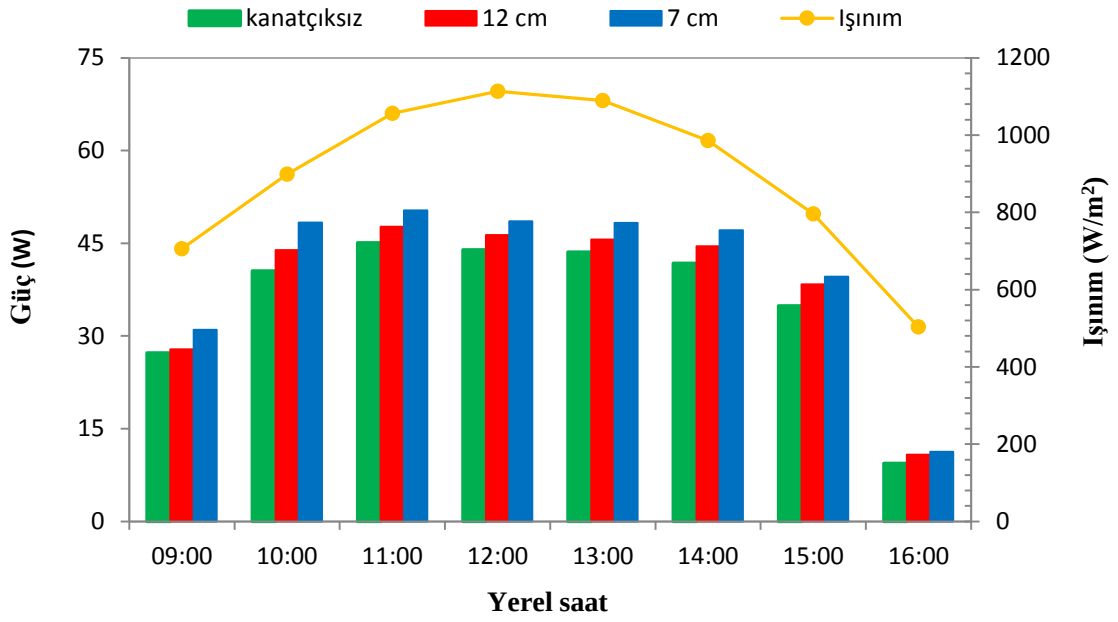
3.2. Fotovoltaik panellerin alüminyum kanatçıklarla soğutulmasının analizi

Tezin bu bölüme kadar olan kısmı; fotovoltaik panellerin farklı ışınlam altındaki performansları, gölgelenme şekillerinin ve oranlarının PV’ler üzerindeki etkileri, panel yüzey sıcaklığının ve sıcak nokta oluşumlarının panel verimlerine etkisi incelenerek fotovoltaik sistemler hakkında detaylı bilgi sahibi olunmuştur. Tezin bundan sonraki kısımlarında pasif soğutma teknikleri uygulanarak panellerin verim kontrolü incelemiştir. İlk olarak alüminyum kanatçıklarının diziliş, sayı, en ve boy parametrelerinin etkileri ele alınmıştır. Elde edilen en uygun kanatçık durumuna göre kapalı hücreli alüminyum köpük kullanılarak deneyler devam ettirilmiştir. Daha sonra farklı erime sıcaklıklarındaki FDM’ler kullanılarak panellerin yüzey sıcaklıkları azaltılarak çıkış güçleri arttırılmıştır. Panellerin arka yüzeylerindeki atık ısıdan tekrar elektrik üretimi için TE modüller kullanılarak hem sıcaklık kontrolü sağlanmış hem de takviye güç üretimi elde edilmiştir. Son olarak en iyi sonuç veren FDM ve TE modül sistemleri ile hibrit PV sistemi oluşturularak performansları kıyaslanmıştır.



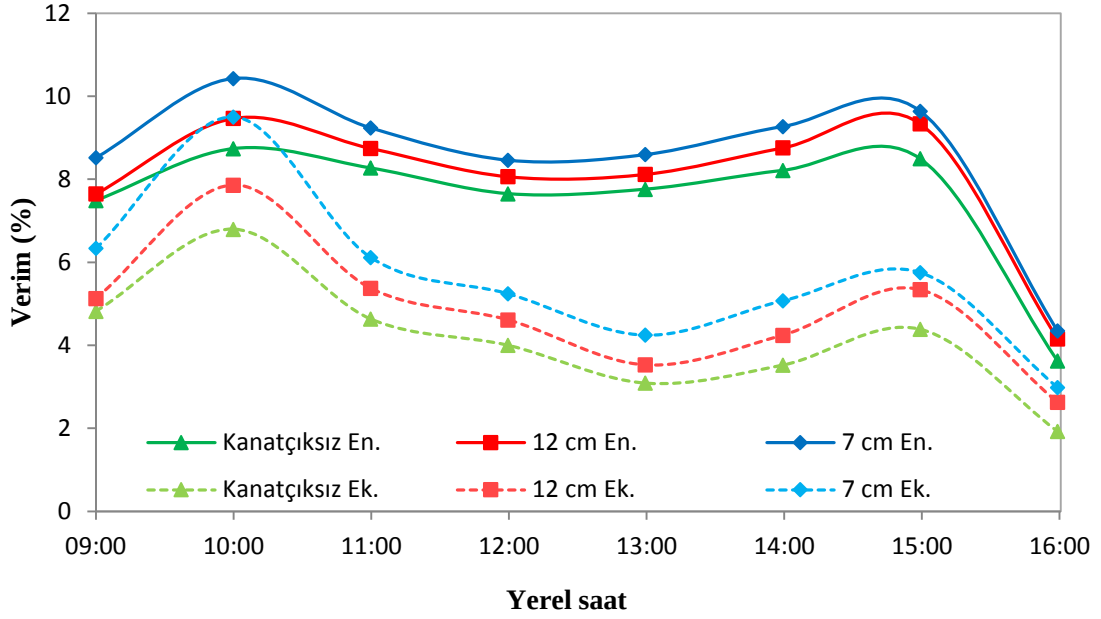
Şekil 3.15. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A1 ve A2)

Şekil 3.15’de farklı uzunluklardaki alüminyum kanatçıklar panelin arkasına yine aynı panelin uzun kenarına paralel olacak şekilde 9’ar adet ve 60 cm boyunda yerleştirilmiştir. Bir panelin arkasındaki toplam kanatçık uzunluğu 540 cm’dir. Ölçümlerin başlangıcından öğlen saatlerine doğru paneller arasındaki sıcaklık farkı açık bir şekilde görülürken saat 13:00’den sonra bu fark azalmıştır. Öğlen saatlerinden sonra güneş ışıınının azalmasıyla beraber panellerin sıcaklık farklarının da azalmasının sebebi fotovoltaik hücrelerin hala ışıından dolayı elektrik üretimine devam etmesidir. Bu durum kanatçıklarında ısınmasına neden olduğundan belli bir saatten sonra panellerin yüzey sıcaklıkları birbirlerine çok yaklaşmıştır. Başka bir ifadeyle kanatçıklar ısındığından sistemde soğutma görevi yapılamamaktadır. Işınının 1088 W/m^2 olduğu saat 13:00’de çevre sıcaklığı $27,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iken kanatçıksız panelin yüzey sıcaklığının $61,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 12 cm kanatçık uzunluğundaki panelin (A2) yüzey sıcaklığı $60,81 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 7 cm kanatçık uzunluğundaki panelin (A1) yüzey sıcaklığının ise $60,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmüştür. Sonuç olarak A1 ve A2 sistemlerinin genel değerlendirmesi yapıldığında A1 durumunun A2’ye göre başarılı olduğu söylenebilir.



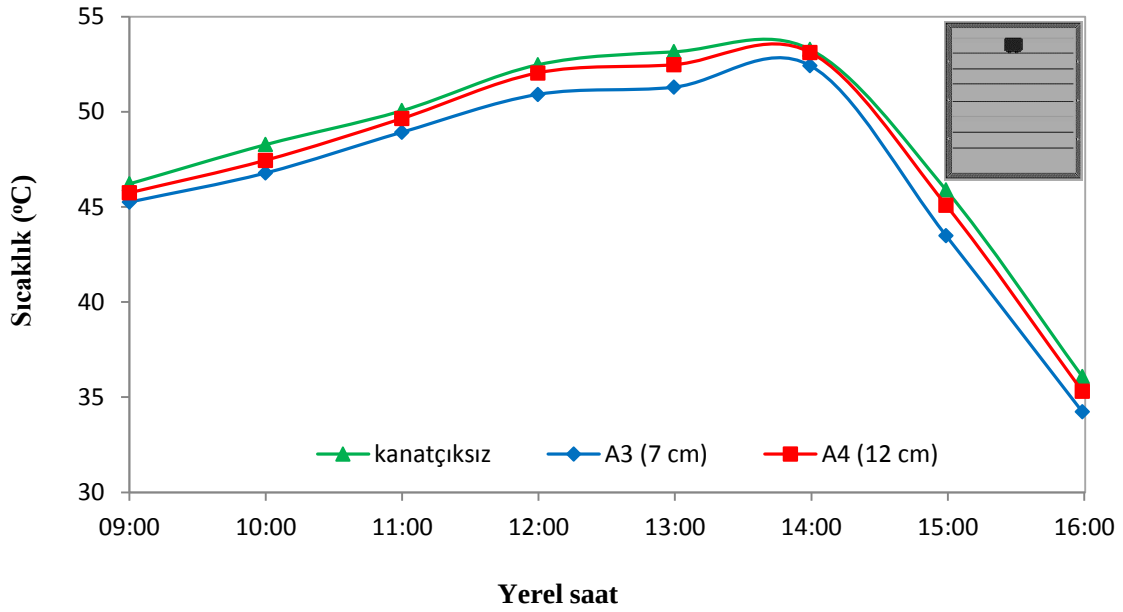
Şekil 3.16. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ışıma göre güç değişimi (A1 ve A2)

Şekil 3.16’ da kanatçıklı ve kanatçıksız panellerin zaman ve ışıma değişimine göre güç grafiği gösterilmiştir. Deneyler havanın açık olduğu bir günde gerçekleştirilmiş ve deneylerde kullanılan paneller üzerinde herhangi bir gölgelenme veya kirlilik oluşmamıştır. Güneş ışımasının eğilimi sabah saatlerinde düşük, öğlen saatlerine doğru maksimum değere ulaşmış ve saatin ilerlemesiyle ışıma değeri azalmıştır. Paneller üzerindeki sıcaklık değerleri Şekil 3.15 göz önünde bulundurulduğunda sıcaklık farkının en fazla olduğu saat 10:00’da güç grafiğinde de maksimum değerler elde edilmiştir. Bu saatteki panellerin çıkış güçleri sırasıyla 40,52W, 43,90 W, 48,35 W olup güç farkı (ΔP) 7,83 W olmuştur. Paneller üzerindeki sıcaklık farkının azaldığı saat 13:00’de ise güç grafiğindeki ΔP değerinde 2,84 W azalma meydana gelip bu değer 4,99 W olmuştur. Sıcaklık ve güç grafiklerindeki değerler beraber analiz edildiğinde soğutma yapılan fotovoltaik (PV) panellerde gözle görülebilir sıcaklık düşüşleri gözlemlenirken bu durum panel çıkış gücünü pozitif etkileyerek katkıda bulunmuştur. En yüksek çıkış gücü 50,33 W ile saat 11:00’de 7 mm kanatçıklı (A1) panelden elde edilmiştir.



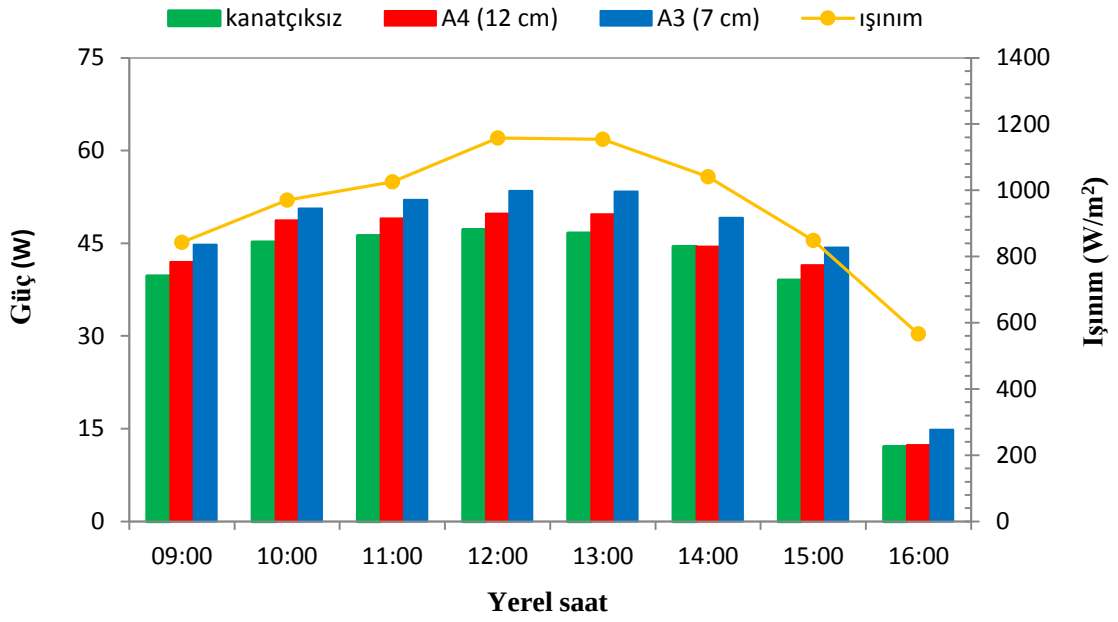
Şekil 3.17. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A1 ve A2)

Şekil 3.17’de kanatçıklı paneller ile kanatçksız panelin enerji ve ekserji verimlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Paneller üzerindeki sıcaklıkların çıkış güçlerini olumsuz etkilemesi ve elde edilen bu maksimum güçlerin metrekareye düşen ışıınım değerine bölünmesiyle elde edilen enerji verimi öğlen saatlerinde azalma göstermiştir. Bu durum panel alanına gelen ışıınım değerinin üretilen çıkış değerinden yüksek olmasıdır. Grafik de ki yerel saat 10:00’da ki ışıınım değeri 898 W/m^2 değerlerine ulaştığında 7 mm kanatçıklı panelin (A1) çıkış gücü 48,35 W olmuştur. Bununla beraber ışıınım değerinin en yüksek olduğu (1113 W/m^2) zamanda yine A1 panelin çıkış gücü 48,58 W olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere ışıınım değerinin artmasıyla panellerinde çıkış gücünün her zaman artmadığı aksine sistem üzerindeki ısınmalar yüzünden verim değerlerini de olumsuz etkilediği görülmektedir. Ekserji verimindeki azalmaların sebebi, ölçülen andaki termal ve elektriksel ekserji değerlerinin elde edilen çıkış ekserjisinin giriş ekserjine bölümüdür. Termal ekserji içerisindeki en önemli fonksiyonlar rüzgar hızı ve panel sıcaklıkları oluşturmaktadır. Sistemlerin enerji ve ekserji verim değerleri; kanatçksız panelin %8,73 ve %6,79, 12 mm kanatçıklı panelin (A2) %9,46 ve %7,85, 7 mm kanatçıklı panelin (A1) %10,42 ve %9,50’dir.



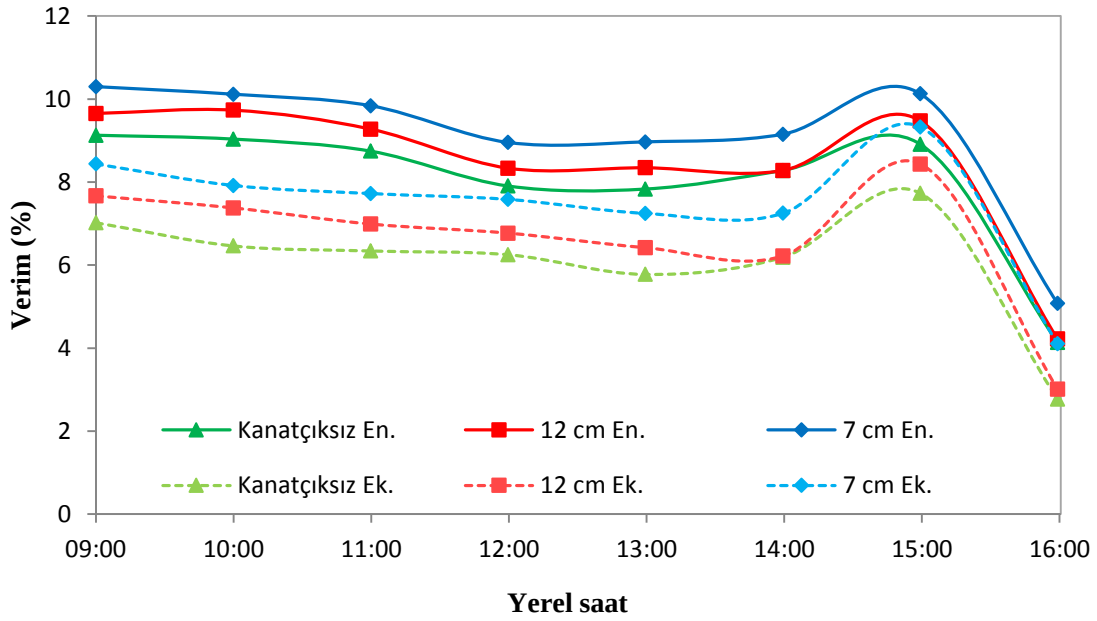
Şekil 3.18. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A3 ve A4)

Şekil 3.18’de panel sıcaklıklarının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Farklı uzunluklardaki (7 ve 12 cm) alüminyum kanatçıklar panelin uzun kenarına 90° olacak şekilde (yatay) yerleştirilmiştir. Kanatçıklarının sayısı 9 olup bir tanesinin boyu 60 cm’dir. Bir panel üzerindeki kanatçıkların toplam uzunluğu 540 cm’dir. Yatay kanatçıklı panellerin arka yüzey sıcaklıkları, dikey kanatçıklı panellerin arka yüzey sıcaklıkları ile karşılaştırıldığında ciddi sıcaklık farklılıkları oluşmamıştır. Bunun nedeni; ölçüm yapılan günlerdeki ısıtım şiddetinin ve çevre sıcaklığının değişimidir. Isıtım değerinin en yüksek 1157 W/m^2 olduğu saat 12:00’de çevre sıcaklığı da $25,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile maksimum değere ulaşmıştır. Bu saatte kanatçıksız panelin yüzey sıcaklığı $52,48 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iken 12 cm uzunluğundaki kanatçıklı panelin (A4) yüzey sıcaklığı $52,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 cm uzunluğundaki kanatçıklı panelin (A3) yüzey sıcaklığı ise $50,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Panellerdeki en yüksek sıcaklık farkları ise saat 13:00’de $1,87 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile A3 ve kanatçıksız paneller arasında olmuştur. Saat 14:00’de ki kanatçıksız ve A4 panellerinin sıcaklık değerleri arasındaki fark $0,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi çok düşük bir değer olduğundan güç, enerji ve ekserji grafiklerindeki değerlerde birbirine çok yakın çıkmıştır. Sonuç olarak, panellere yerleştirilen yatay kanatçıklar panellerin soğutulmasında başarılı olmuş ve farklı uzunluklardaki kanatçıklar kıyaslandığında 7 cm uzunluğundaki kanatçıklı panel (A3) bu kıyaslamada en iyi sonucu vermiştir.



Şekil 3.19. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ışıma göre güç değişimi (A3 ve A4)

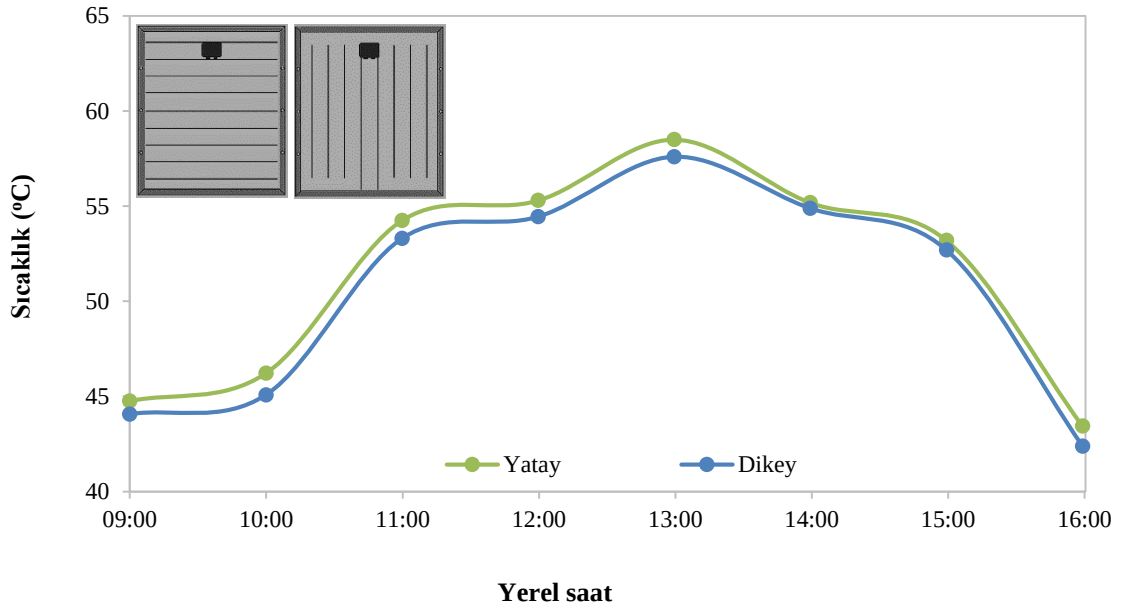
Pasif soğutma teknikleri uygulanmış ve uygulanmamış panellerin ışıma değerinin değişimine göre çıkış güçleri Şekil 3.19’da verilmiştir. Işıma değerinin 600 W/m^2 altına düştüğü zamanlarda deneylerde kullanılan panellerin çıkış gücü olumsuz etkilenmiştir. Bunun sebebi fotovoltaiik hücreler yeterli ışıma alamadığından elektron sürkülasyonu azalmakta ve üretilen güç azalmaktadır. Saat 14:00’de ışımanın aynı olmasına rağmen panel sıcaklıkları aynı olan iki panelin çıkış güçleri 44,48W olarak elde edilmiştir. Gün boyunca ölçülen değerler arasında en düşük güç farkı 2,73 W ile saat 16:00’da elde edilirken en yüksek güç farkı 6,74 W ile saat 13:00’de elde edilmiştir. Bu saatteki sıcaklık farkının da en yüksek olduğu göz önünde bulundurulursa; sıcaklığın, panellerin çıkış gücünü önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Deneylerdeki panellerden alınan 8 ölçüm anındaki güç değerleri toplamı kanatçıksız panelin 320,62 W, A4 panelinin 337,51 W ve A3 panelinin 362,58 W’tır. Soğutma tekniği uygulanan A3 paneli ile soğutma tekniği uygulanmayan panel arasındaki güç farkları 41,96 W’tır. Bu değer, deneylerde kullanılan panelin maksimum güç değerine çok yakın bir değerdir.



Şekil 3.20. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A3 ve A4)

Fotovoltaik sistemlerin enerji-ekserji verimlerinin karşılaştırılması Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Işınımın zamanla artması çevre ve panel yüzey sıcaklığının yükselmesine neden olmuştur. Verim değerlerinin azalan bir eğilim göstermesi bu nedenden kaynaklanmaktadır. Saat 15:00’de ki yükselişin sebebi üretilen elektriksel ekserjinin termal ekserji değerinden daha önceki ölçüm noktalarından büyük olmasıdır. Kanatçiksız panelin, A3 ve A4 sistemlerinin en yüksek ekserji verim değerleri sırasıyla %7,73, %9,32 ve %8,43’tür. Sistemlerin en yüksek enerji verimleri ise sırasıyla %8,91, %10,12 ve %9,47’dir.

Kanatçıklarla pasif soğutma tekniği uygulanan panellerden; 60 cm boyunda, 7 ve 12 cm uzunluklarındaki kanatçıkların yatay ve dikey durumları kanatçiksız panel ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonunda 7 cm kanat uzunluğuna sahip A1 ve A3 sistemleri, dikey ve yatay durumlar için en yüksek çıkış güçlerini ve enerji-ekserji verim değerlerini vermiştir. Bu iki sistem arasından hangisinin daha iyi sonuç verdiğini görebilmek için A1 ve A3 sistemleri kendi içerisinde kıyaslanmıştır. Bu sistemlere ait sıcaklık, güç ve verim grafikleri Şekil 3.21-3.23’de gösterilmiştir.

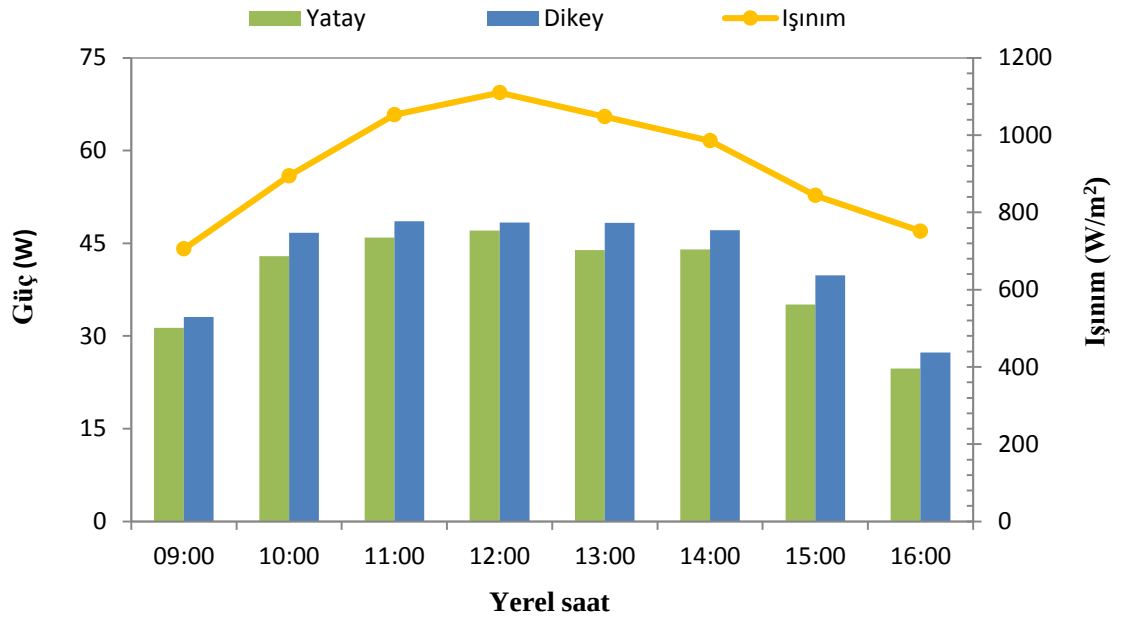


Şekil 3.21. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A1 ve A3)

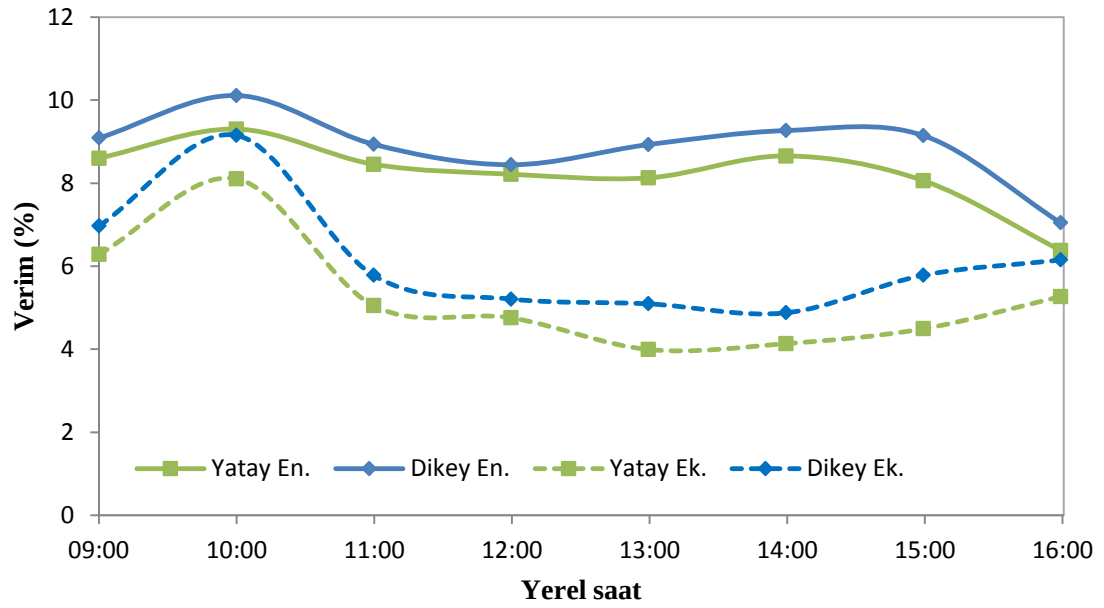
Şekil 3.21’de yatay ve dikey olarak yerleştirilen kanatçıklı panellerin yüzey sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Deneylerin başladığı andan saat 14:00’a kadar paneller arasında belirli bir sıcaklık farkı meydana gelirken bu saatten sonra kanatçıkların ısınmasından dolayı sıcaklık farkı azalmıştır. Paneller üzerinde ölçülen en yüksek yüzey sıcaklıkları saat 13:00’de yatay kanatçıklı panelde 58,50 °C, dikey kanatçıklı panelde ise 57,59 °C’dir. İki panel arasındaki en yüksek sıcaklık farkı ise saat 10:00’da 1,14 °C olarak ölçülmüştür. Yine bu saatte Şekil 3.22’de ısıtım eğrisine göre güç değişim grafiği incelendiğinde yatay ve dikey kanatçıklı panellerin güç farkları en fazla 3,76 W olmuştur. Diğer ölçüm noktalarındaki güç farkları ise bu değerden küçük çıkmıştır. Sistemlerin en yüksek ürettikleri güç ise saat 11:00’de dikey kanatçıklı panelde 48,55 W, yatay kanatçıklı panelde ise 45,91 W’tır.

Şekil 3.23’de sistemlerin enerji ve ekserji verimleri gösterilmiştir. Dikey kanatçıklı panelin verim değerleri %10,11 ve %9,30, yatay kanatçıklı panelin verim değerleri %9,15 ve %8,10 olarak hesaplanmıştır.

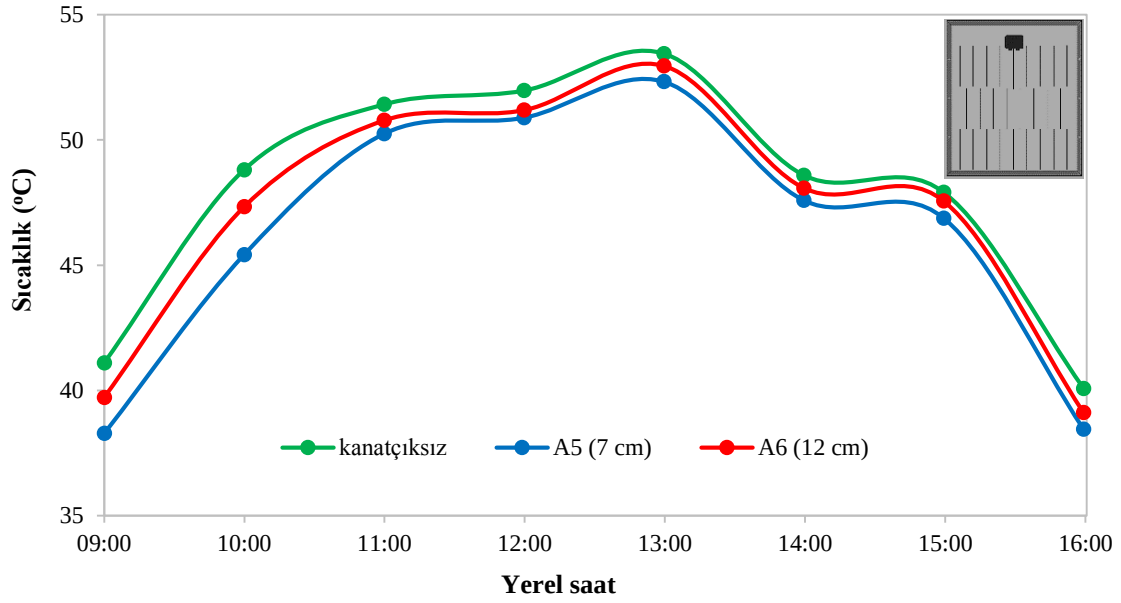
Yatay ve dikey kanatçıklı paneller kendi içerisinde kıyaslanmış ve panellerin arkasına yerleştirilen kanatçıkların panel sıcaklığına, çıkış gücüne ve verim değerlerine olumlu yönde etki etmektedir. A1 ve A3 sistemleri kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise dikey kanatçıklı (A1) paneli Elazığ iklim şartlarında doğal taşınım etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 3.22. Kanatçıklı panellerin ışıma göre güç değişimi (A1 ve A3)

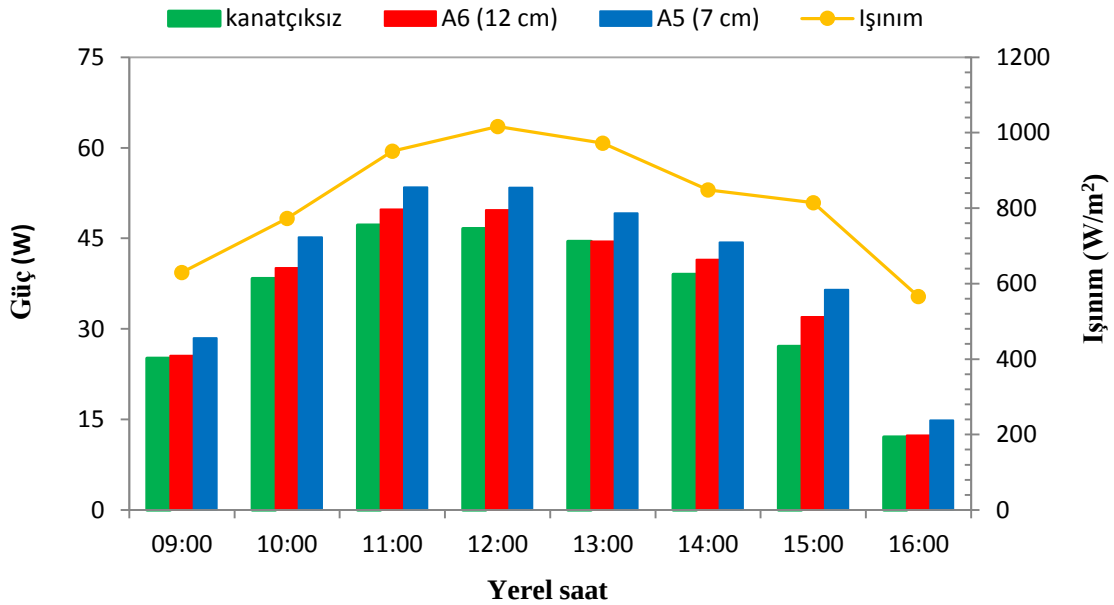


Şekil 3.23. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A1 ve A3)

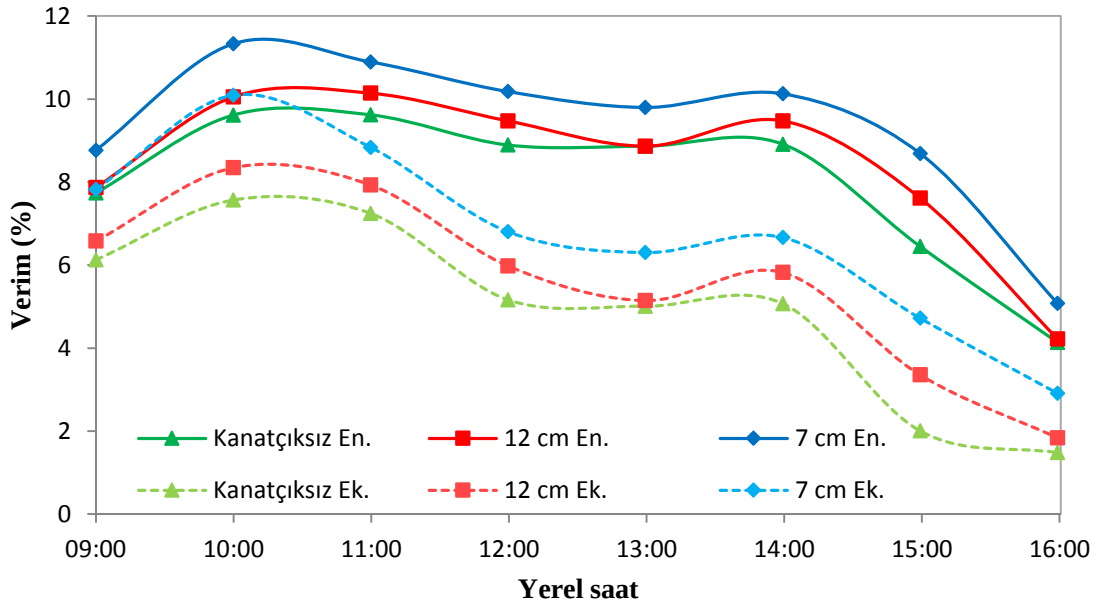


Şekil 3.24. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A5 ve A6)

Şekil 3.24’de farklı uzunluklardaki ve 20 cm boyundaki alüminyum kanatçıklar panelin arkasına yerleştirilmiştir. Bir panelin arkasına 20 cm boyundaki kanatçıklardan 26 adet kullanılmıştır. Toplam kanatçık uzunluğu 520 cm’dir. Deneyin ilk başladığı saatteki paneller arasındaki sıcaklık farkı 2,82 °C, kanatçıklı paneller arasındaki sıcaklık farkı ise 1,44 °C’dir. Gün boyunca elde edilen en yüksek sıcaklık farkı saat 10:00’da 772,83 W/m² ışıınım altında ve 26,8 °C çevre sıcaklığında 3,39 °C olmuştur.



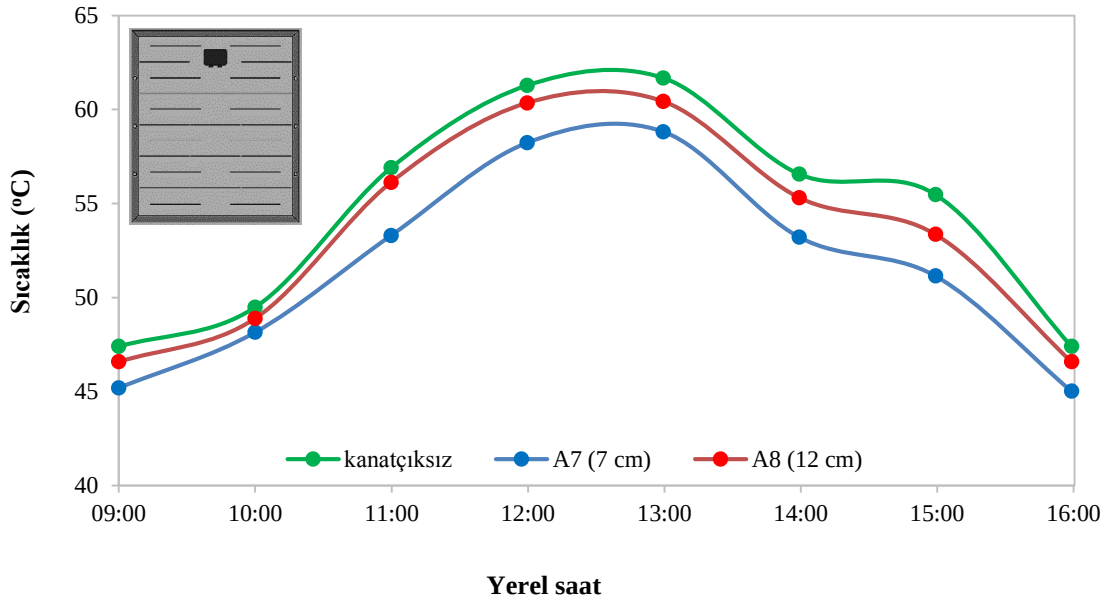
Şekil 3.25. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ışıınıma göre güç değişimi (A5 ve A6)



Şekil 3.26. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A5 ve A6)

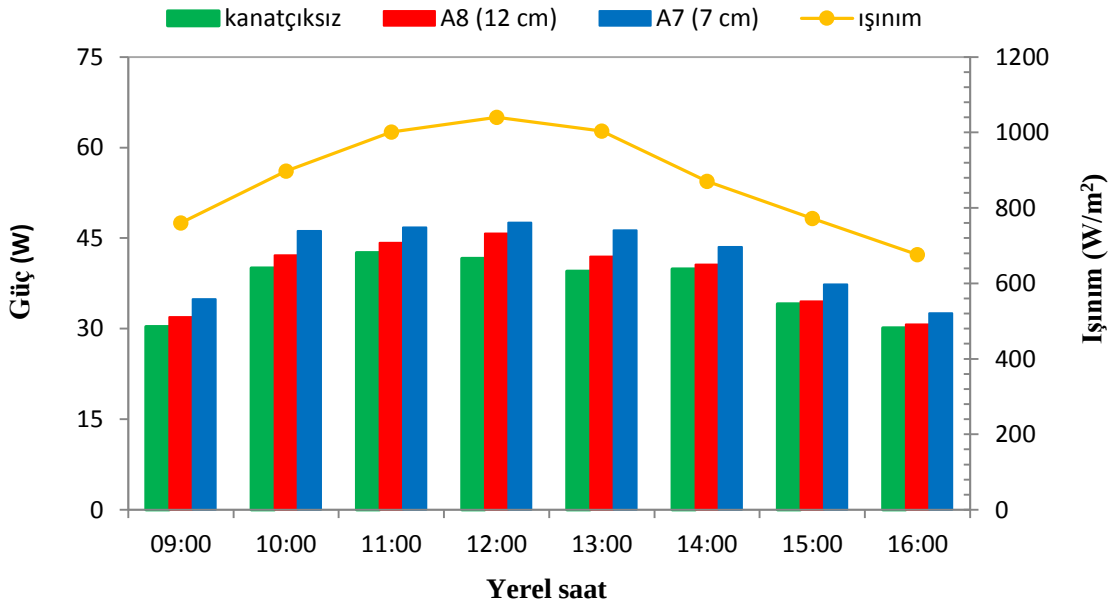
Şekil 3.25’ da kanatçıklı ve kanatçıksız panellerin zaman ve ışınlım değişimine göre güç grafiği gösterilmiştir. Deneylerin yapıldığı günde yer yer küçük bölgesel bulutlanmalar meydana gelmiştir. Güneş ışınlım eğilimi istenilen eğilime yakınlık göstermiştir. Sıcaklık farkının (ΔT) en yüksek olduğu zamanda güç farkı (ΔP) 6,84 W, kanatçıklı iki panel arasındaki güç farkı ise 5,10 W’tır. Gün boyunca en yüksek güç farkı saat 15:00’de kanatçıksız panel ile A5 sistemi (7 cm) arasında 9,40 W olmuştur. Deney süresince sistemlerden ölçülen toplam güç değerleri kanatçıksız panelde 280,04 W, A5 sisteminde (7 cm kanatçık) 325,33 W ve A6 sisteminde (12 cm kanatçık) 295,40 W’tır. Sıcaklık ve güç grafikleri beraber incelendiğinde 7 cm kanatçıklı panelin (A5) sıcaklık ve çıkış güçleri en iyi sonuçları vermiştir.

Şekil 3.26’da panellerin enerji ve ekserji verimleri karşılaştırılmıştır. Farklı uzunluklardaki kanatçıklı paneller (A5 ve A6) ile kanatçıksız panelin enerji verim değerleri sırasıyla %11,33, %10,05 ve %9,61 olarak hesaplanırken ekserji değerleri ise sırasıyla %10,08, %8,34 ve %7,56 hesaplanmıştır.

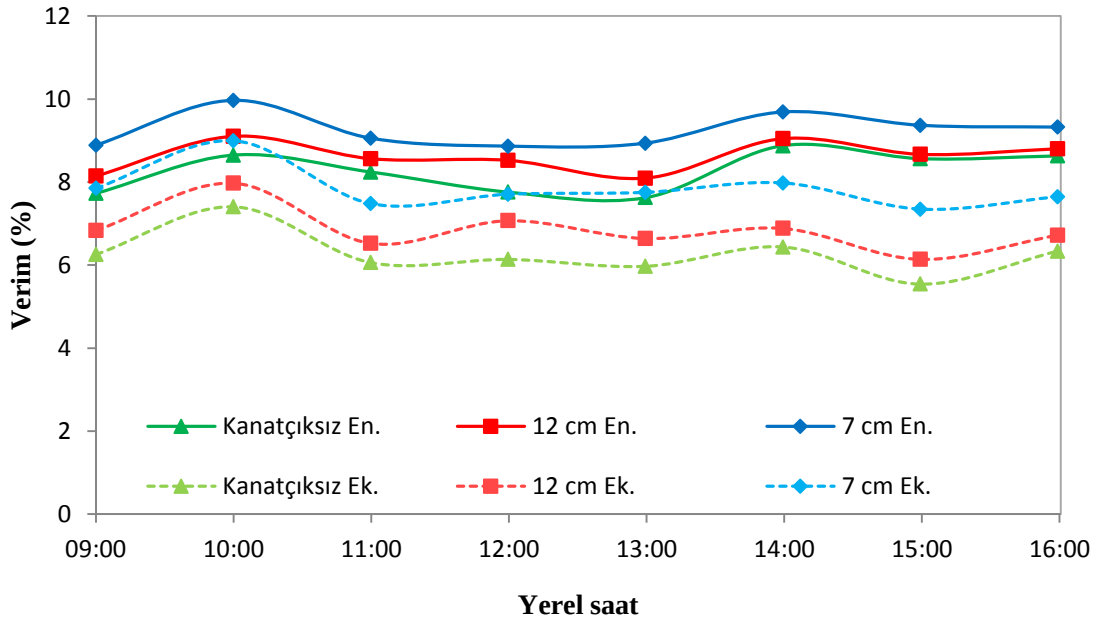


Şekil 3.27. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A7 ve A8)

Şekil 3.27’de kanatçıklı ve kanatçıksız panellerin zamana göre sıcaklık değişimleri verilmiştir. Panellerden birinin arkasına 7 cm diğ erinin arkasına 12 cm uzunluğ unda kanatçıklar eklenirken üçüncü panele herhangi bir pasif soğ utma ya da kanatçık eklemesi yapılmamıştır. Kanatçıkların sayısı bir panelde dikey ş aş ırtmalıda oldu ğ u gibi 26 adet kullanılmış tır. Toplam kanat uzunluğ u 520 cm’dir. Deney süresince ölç ülen en yüksek sıcaklık fark ı (ΔT) 4,33 °C’dir.



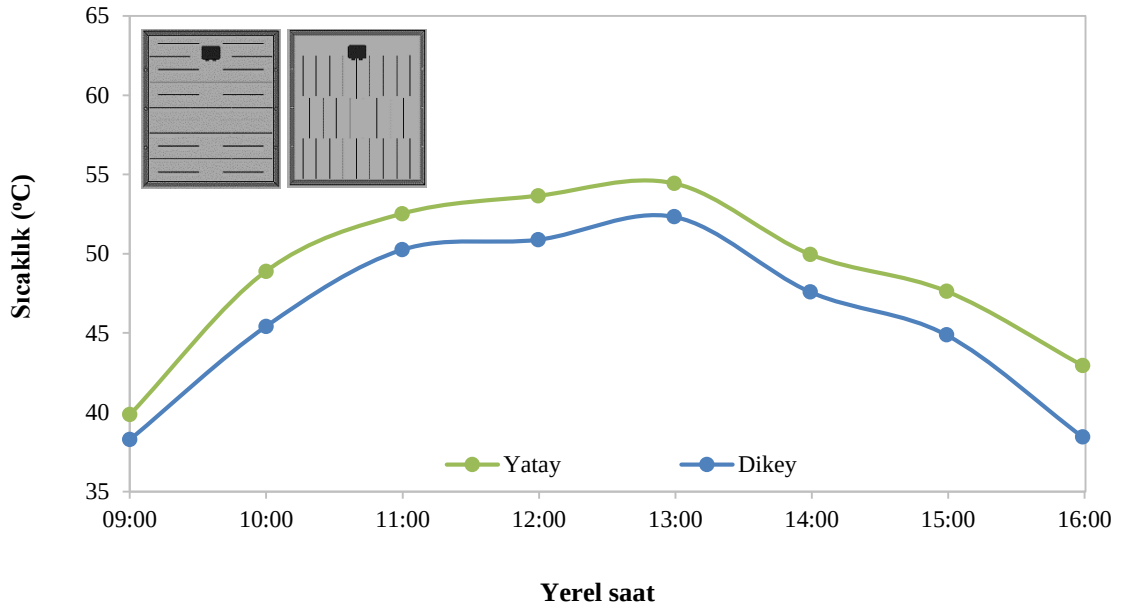
Şekil 3.28. Kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin ışı nıma göre güç değ iş imi (A7 ve A8)



Şekil 3.29. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A7 ve A8)

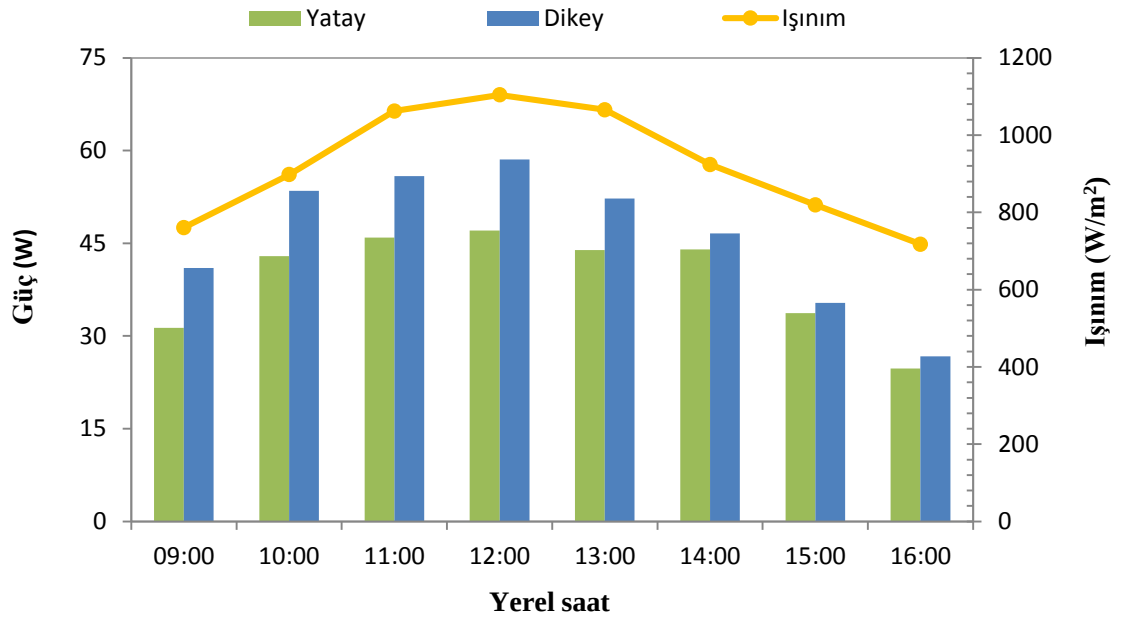
Şekil 3.28’de panellerin ışıınım değerlerine göre güç kıyaslaması yapılmıştır. Saat 12:00’de en yüksek çıkış üretilmiştir. A7 sisteminin ürettiği akım ve gerilim değerleri 3,29 A ve 14,46 V’tur. A8 sisteminin ürettiği elektriksel değerler 3,24 A ile 14,12 V, kanatçksız panelin ise bu değerleri 3,12 A ve 13,35 V’tur. Elektriksel değerler göz önünde bulundurulduğunda akım değerlerinde maksimum 0,17 amperlik bir güç kazancı olurken gerilim değerinde 1,11 voltluk bir artış meydana gelmiştir. Deney süresince elde edilen güç değerlerinin toplamı A7 sisteminde 335,04 W, kanatçksız panelde ise 298,19 W olmuştur.

Şekil 3.29’da sistemlerin enerji ve ekserji değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Güç grafiğinde saat 12:00’de ki değerlerin maksimum çıkmasına karşın enerji-ekserji grafiği incelendiğinde maksimum değerler saat 10:00’da gerçekleşmiştir. Bunun sebebi üretilen enerjinin (çıkan enerji) giren enerji değerine oranının bir sonucudur. Yatay şaşırtmalı kanatçık sisteminde en yüksek güç, enerji ve ekserji değerlerinin veren A7 sisteminin verim değerleri %9,96 ve %8,89’dur.

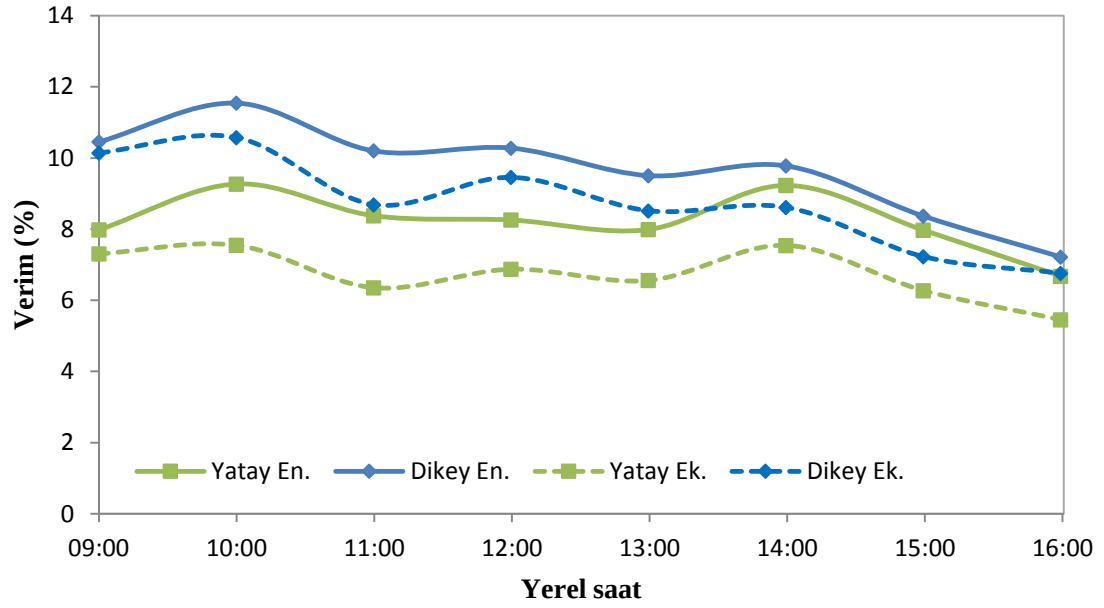


Şekil 3.30. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A5 ve A7)

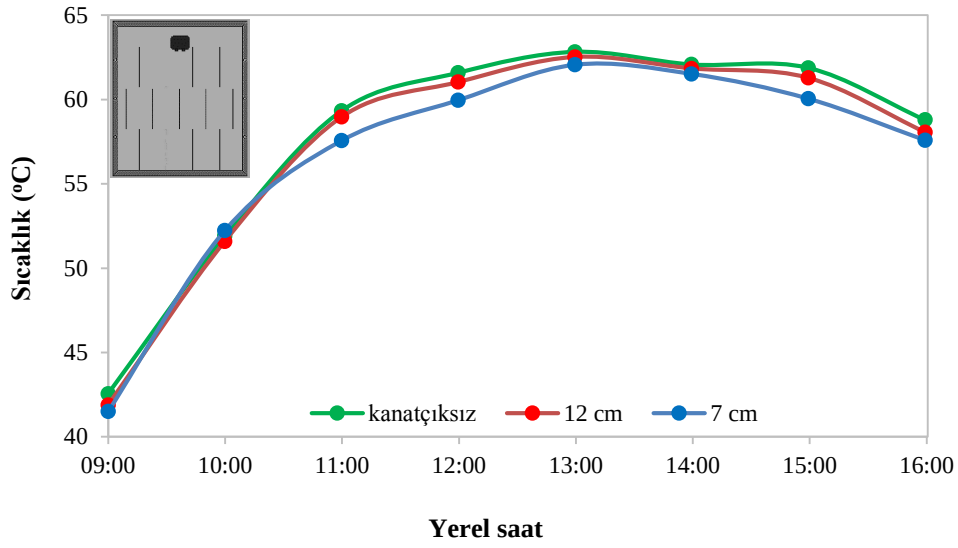
Kanatçık soğutmalı fotovoltaiik paneller (A5, A6, A7 ve A8) arasından en iyi sonuçları veren dikey ve yatay dizilimli sistemlerin yüzey sıcaklık değişimleri Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Her iki panelde de 7 cm uzunluğunda, 20 cm boyunda 26'şar adet alüminyum kanatçık kullanılmıştır. Dikey kanatçık ilaveli fotovoltaiik panelin yüzey sıcaklığı diğer panele göre daha iyi soğutma gerçekleştirdiği görülmektedir. Paneller arasındaki en yüksek sıcaklık farkı (ΔT) saat 16:00'da 4,5 °C olarak ölçülürken güneş ışıınım değerinin en yüksek olduğu (1104 W/m²) saat 12:00'de çevre sıcaklığı 32,88 °C, yatay dizilimli kanatçıklı panelin yüzey sıcaklığı 53,65 °C, dikey dizilimli kanatçıklı panelin yüzey sıcaklığı 52,33 °C olarak ölçülmüştür. Bu sistemlerin zamana göre güç, enerji ve ekserji değerlerinin değişimi Şekil 3.31 ve 3.32'de verilmiştir. Sıcaklık farkının en fazla olduğu saatte güç farkı 1.98 W olmuştur. Bunun sebebi ışıınım değerinin de azalmış olmasıdır. Güç farkının en fazla olduğu saat 12:00'de gerçekleşmiş ve bu fark 11,51 W bulunmuştur. Bu saat aralığı paneller arasındaki sıcaklık farkının en yüksek olduğu ikinci değerdir. Sistemlerin enerji ve ekserji verim değerlerindeki en yüksek değerler ise saat 10:00'da % 11,54 ve %10,57 ile dikey dizilimli kanatçıklı panelde meydana gelmiştir.



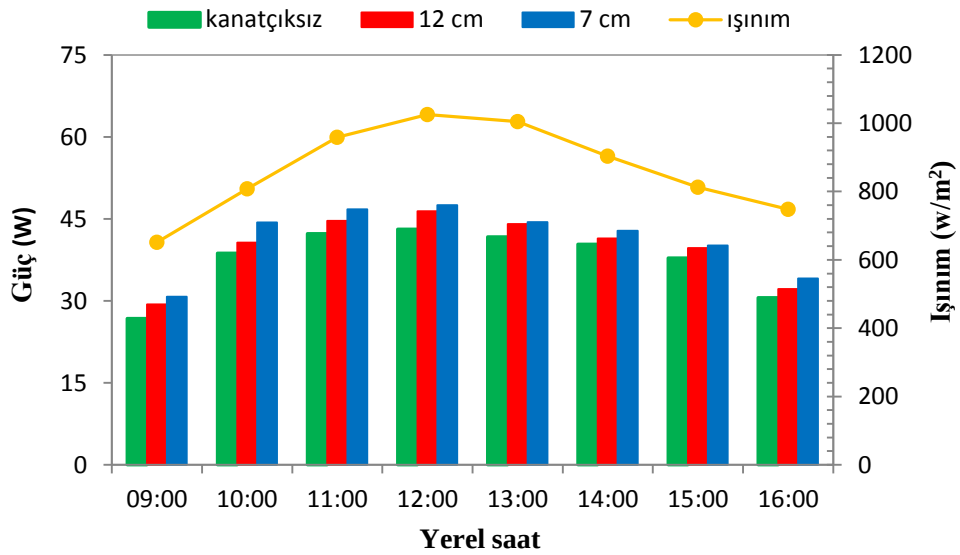
Şekil 3.31. Kanatçıklı panellerin ışınlıma göre güç değışimi (A5 ve A7)



Şekil 3.32. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değışimi (A5 ve A7)

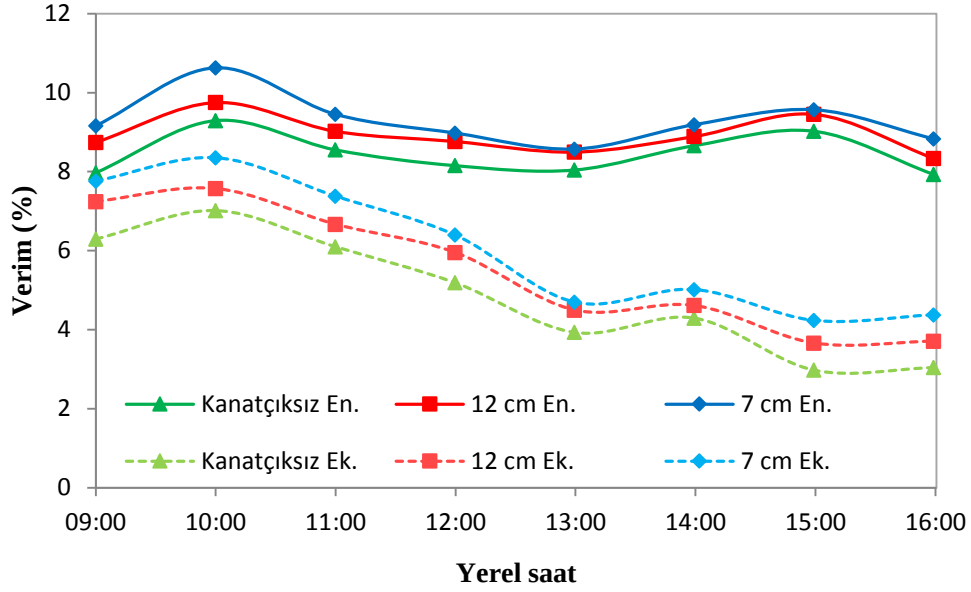


Şekil 3.33. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A9 ve A10)



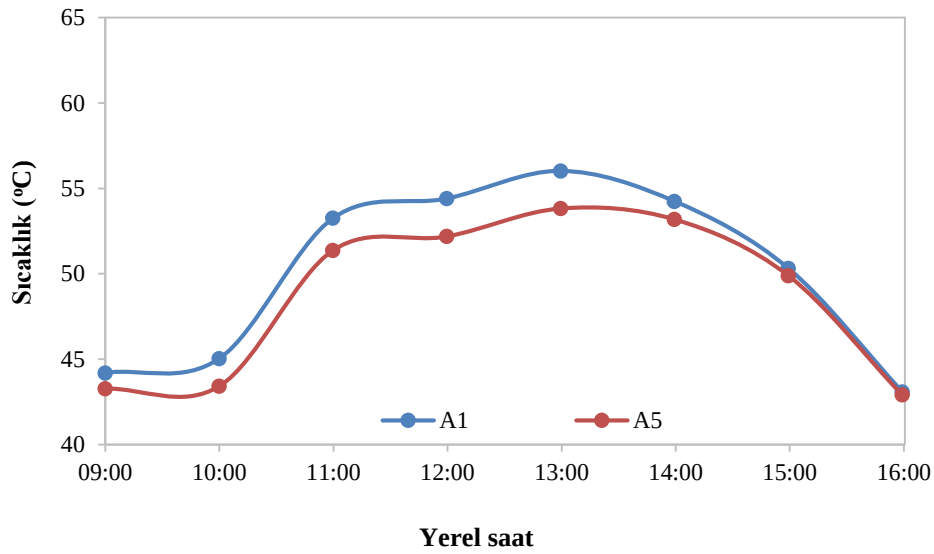
Şekil 3.34. Kanatçıklı panellerin ışınlıma göre güç değişimi (A9 ve A10)

Farklı kanatçık uzunluklarındaki alüminyum kanatçıklar iki panele 13'er adet şaşırtmalı bir şekilde monte edilmiştir. Kanatçıklı ve kanatçıksız PV modüllerin yüzey sıcaklıkları Şekil 3.33'de güç üretimleri ise 3.34'de verilmiştir. Sistemlerin sıcaklık grafiği incelendiğinde sıcaklık farkının birbirlerine çok yakın olması ilk gözlemlenen bulgudur. Modüllere eklenen kanatçık sayısının yetersiz olduğu açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Sıcaklık farkı maksimum saat 15:00'de 1,83 °C olmuştur. Saat 12:00'de ki sıcaklık farkı 1,63 °C ve sistemlerin sırasıyla güç üretimleri ise 43,13 W, 46,37 W, 47,48 W olmuştur. Fotovoltaik sistemlerin verim değerlerinin değişimi ise Şekil 3.35'de gösterilmiştir.

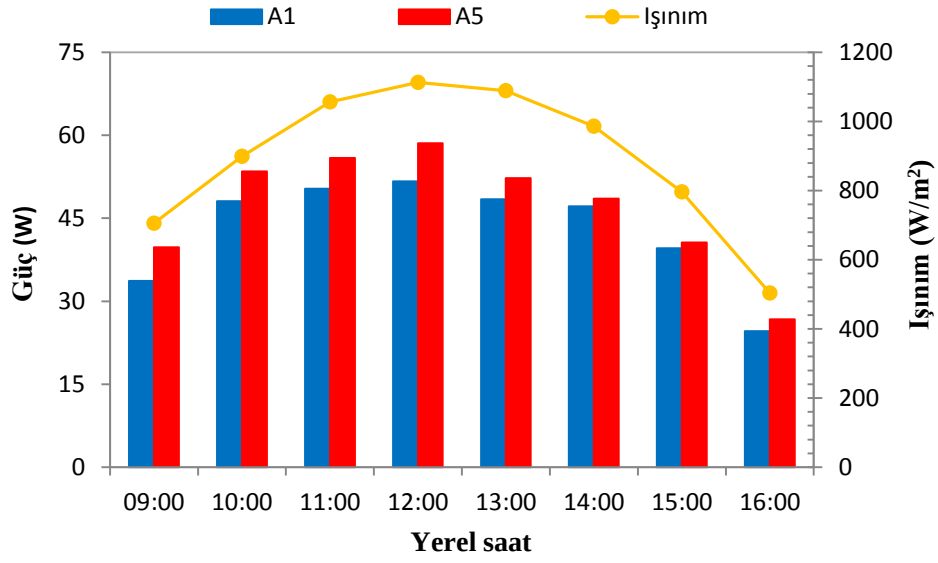


Şekil 3.35. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A9 ve A10)

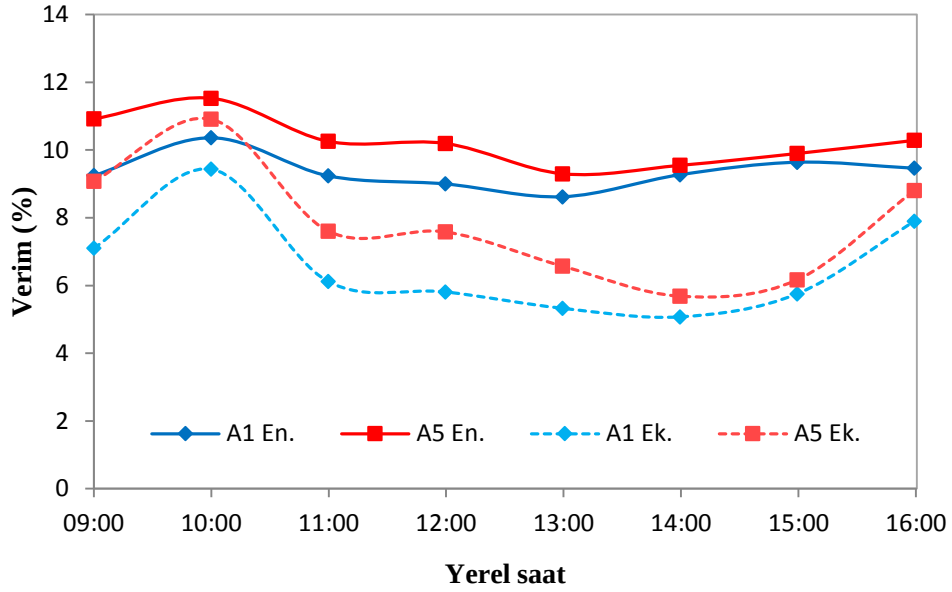
Şekil 3.36'da A1 ve A5 panellerinin zamana göre sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. A1 paneli 9 adet 60 cm boyutlarındaki dikey dizilimli kanatçıklarla soğutulurken A5 paneli 26 adet 20 cm boyutlarındaki dikey şaşırtmalı dizilimli kanatçıklarla soğutulmuştur. Sıcaklık farkı 0,92 °C ile başlamış öğlen saatlerinde 2,22 °C'ya kadar çıkmıştır. Saat 14:00'da ise 0,18 °C ile en düşük değer elde edilmiştir.



Şekil 3.36. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A1 ve A5)

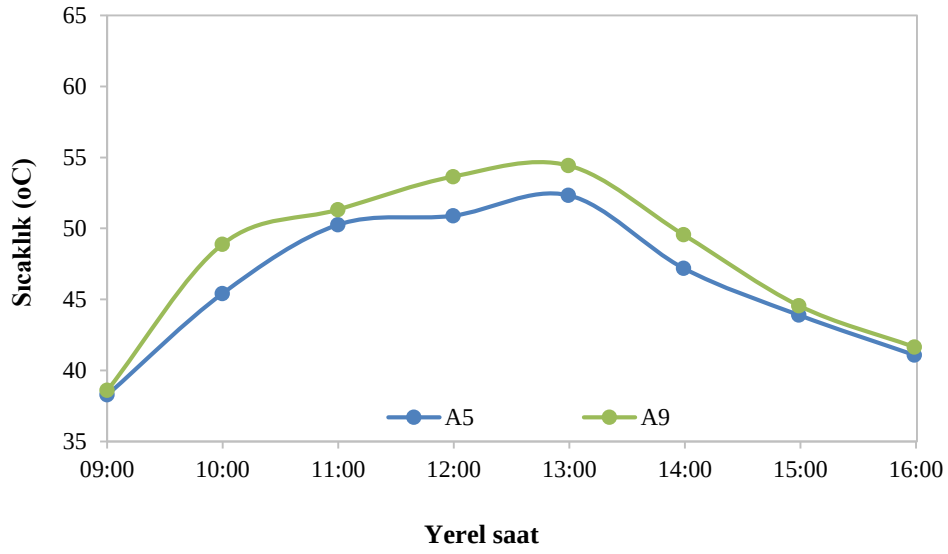


Şekil 3.37. Kanatçıklı panellerin ışınlama göre güç değışimi (A1 ve A5)

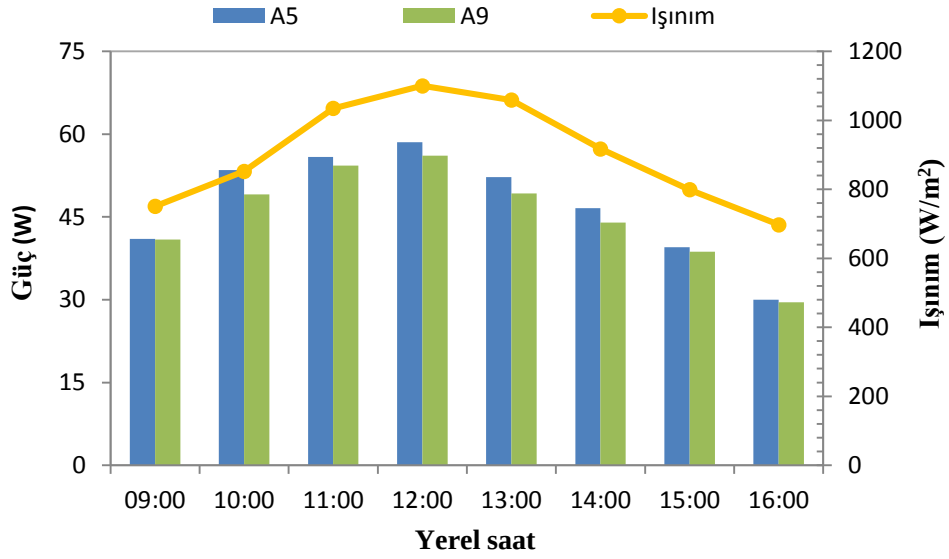


Şekil 3.38. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değışimi (A9 ve A10)

Dikey, düz ve şaşırtmalı kanatçık dizilimlerine sahip panellerin ürettikleri güç değışimleri Şekil 3.37’de enerji-ekserji verimlerinin değışimleri ise Şekil 3.38’de gösterilmiştir. Sistemlerin ürettikleri en yüksek güç saat 12:00’de A1 için 51,68 W ve A5 için 58,54 W’tır. Aynı zamanda en fazla güç farkı 6,86 W ile bu zamanda gerçekleşmiştir. Sıcaklık farklarının azaldığı zamanlarda ise sistemlerden elde edilen güç farkı (ΔP) 1 W’a kadar düşmüştür. Sistemlerden elde edilen en yüksek enerji ve ekserji verimleri A1 için % 10,36 ve % 9,43, A5 modülü için % 11,52 ve % 10,91’dir.

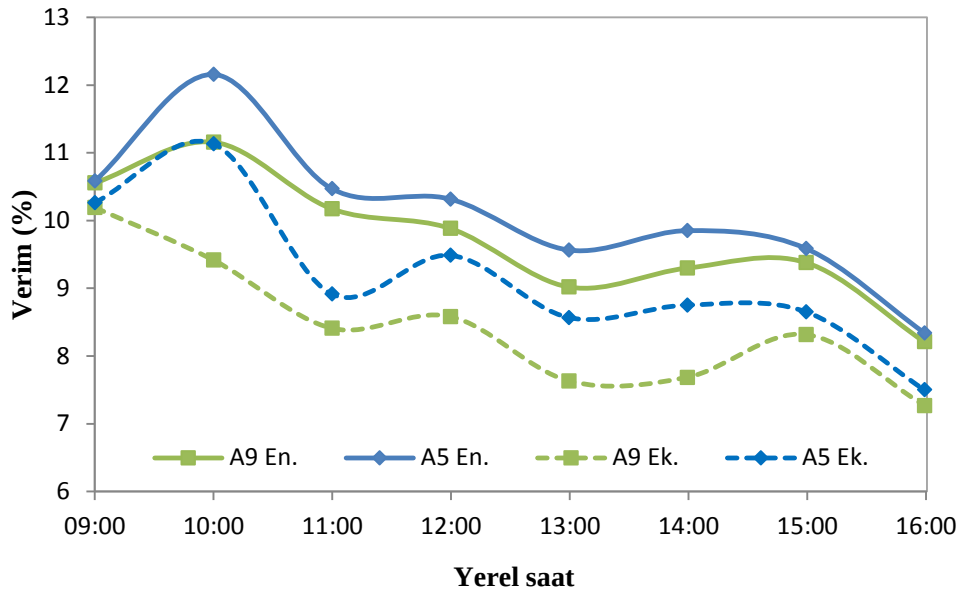


Şekil 3.39. Kanatçıklı panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri (A5 ve A9)



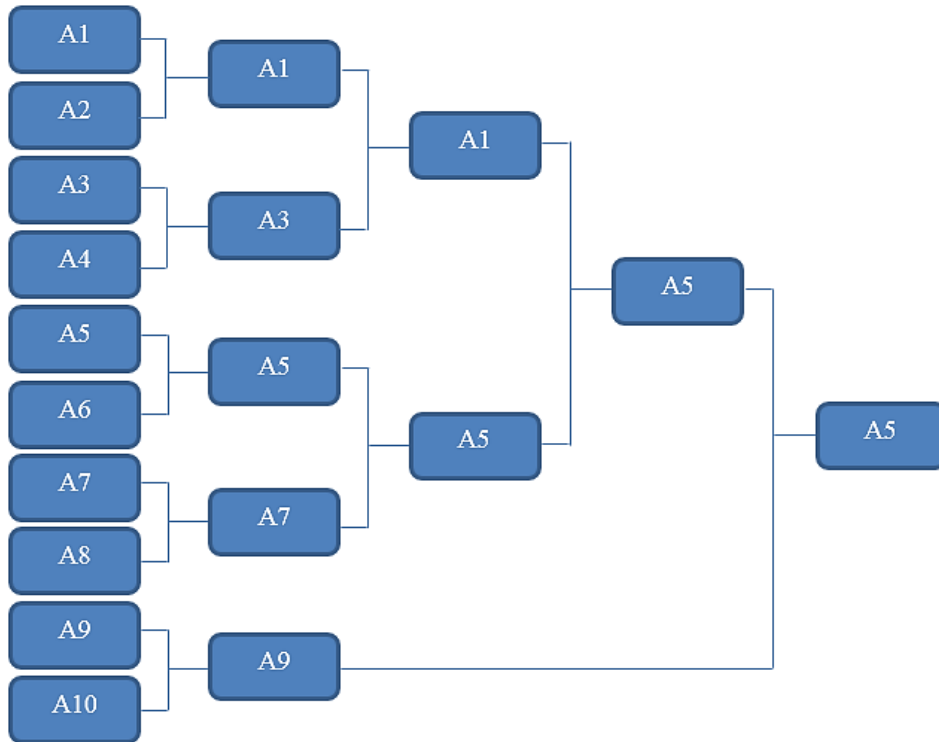
Şekil 3.40. Kanatçıklı panellerin ışıma göre güç değişimi (A5 ve A9)

Alüminyum kanatçıklı fotovoltaik panellerin son parametrelerinin sıcaklık, güç ve verim karşılaştırmaları Şekil 3.39 – 3.41’de gösterilmiştir. İki sistem arasındaki en yüksek sıcaklık farkı 3,47 °C ile saat 10:00’da gerçekleşmiştir. Panellerde ölçülen en yüksek sıcaklık A9 modülünde 54,43 °C’dir. Deneyin son saatlerine doğru kanatçıklar ısındığından panellerin sıcaklıkları birbirine çok yaklaşmıştır. Bu durum, panellerden elde edilen güç değerlerini de etkileyerek yakınsamıştır. Panellerden üretilen maksimum güç saat 12:00’de A5 modülü için 58,54 W, A9 modülü için 56,09 W’tır. İki modülün güçleri arasındaki en yüksek fark saat 10:00’da 4,39 W olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.41. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (A5 ve A9)

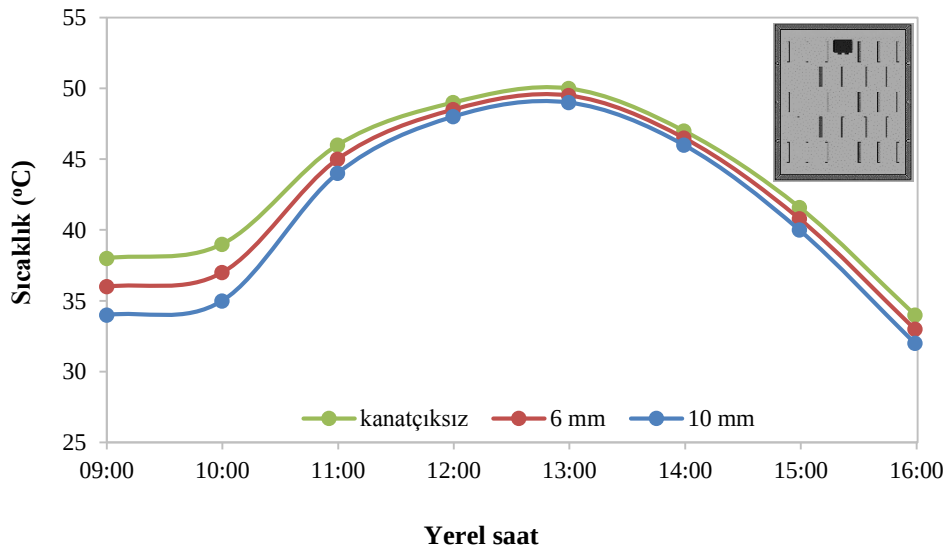
Fotovoltaik panellerin 7 cm ve 12 cm boylarında 60 cm ve 20 cm uzunluklarında dikey ve şaşırtmalı dizilimli parametrelerinin eşleştirilmelerinin sonucunda A5 modülü tüm alüminyum kanatçıklı soğutmalı paneller arasında en iyi değerleri veren tasarım olmuştur. Sistemlerin eşleştirilmesi ve eleme çizelgesi Şekil 3.42’de verilmiştir.



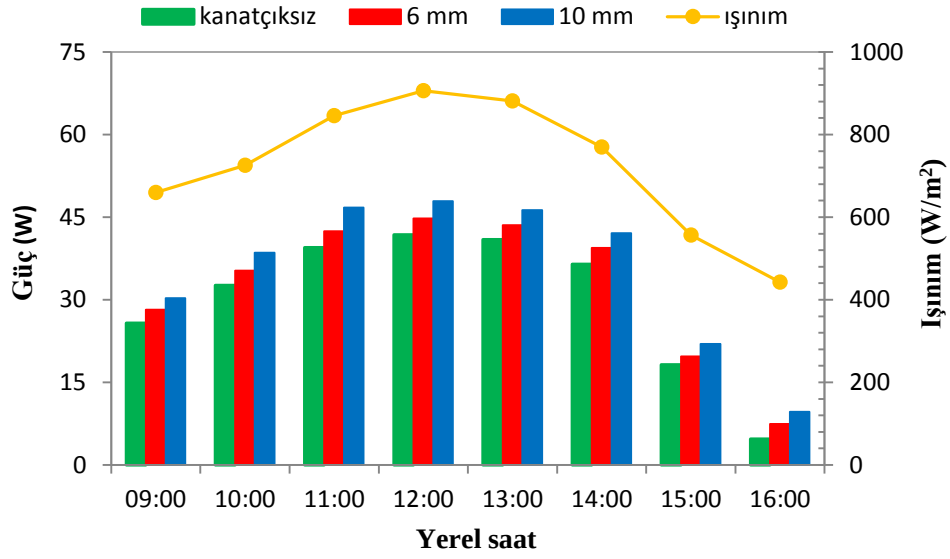
Şekil 3.42. Test edilen kanatçık soğutmalı fotovoltaik panellerin sınıflandırılması

3.3. Fotovoltaik panellerin alüminyum köpük kanatçıklarla soğutulmasının analizi

Alüminyum malzemeden üretilmiş kanatçıkların PV'ler üzerindeki olumlu etkileri incelendikten sonra farklı mühendislik işlemlerinden geçirilerek elde edilen alüminyum köpükler panellerin arkasına monte edilerek karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.43'de farklı uzunluklardaki kapalı hücreli alüminyum köpük kanatçıklar panelin arkasına yerleştirilmiştir. Bir panelin arkasında 28 adet kanatçık bulunmaktadır, toplam kanatçık uzunluğu ise 540 cm'dir. Ölçümlerin başlangıcından öğlen saatlerine doğru paneller arasındaki sıcaklık farkı açık bir şekilde görülürken saat 13:00'den sonra bu fark azalmıştır. Öğlen saatlerinden sonra güneş ışınımının azalmasıyla beraber panellerin sıcaklık farklarının da azalmasının sebebi fotovoltaik hücrelerin hala ışıınımdan dolayı elektrik üretimine devam etmesidir. Bu durum kanatçıklarında ısınmasına neden olduğundan belli bir saatten sonra panellerin yüzey sıcaklıkları birbirlerine çok yaklaşmıştır. Başka bir ifadeyle kanatçıklar ısındığından sistemde soğutma görevi yapılamamaktadır. Işınımın 906 W/m^2 olduğu saat 12:00'de çevre sıcaklığı $23,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iken kanatçıksız panelin yüzey sıcaklığı $49 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 mm kalınlığındaki kanatçıklı panelin yüzey sıcaklığı $48,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 10 mm kalınlığındaki kanatçıklı panelin yüzey sıcaklığı $48 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sonuç olarak B1 ve B2 sistemlerinin genel değerlendirmesi yapıldığında B2 durumunun B1'e göre daha başarılı olduğu söylenebilir.

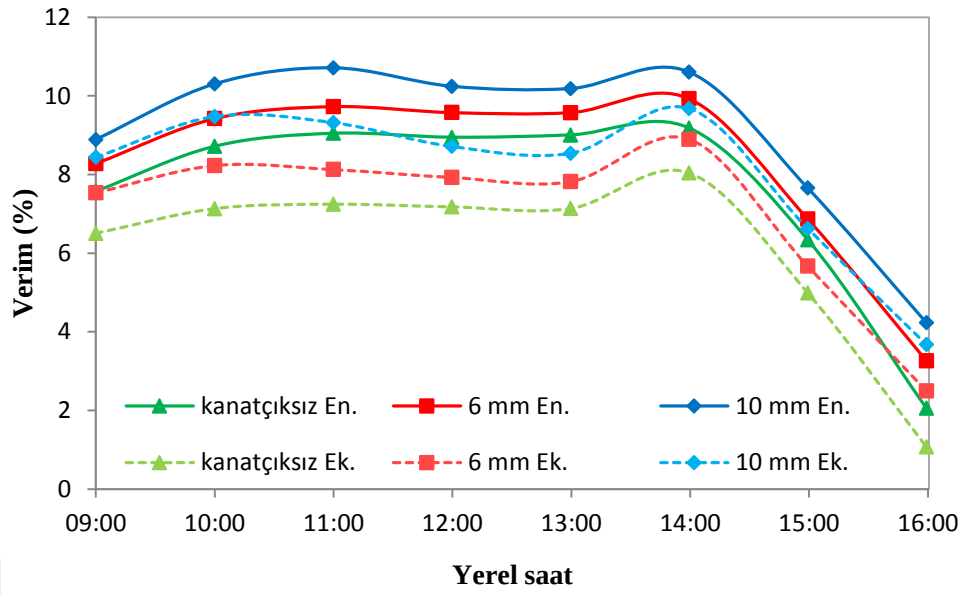


Şekil 3.43. Gözenekli kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin arka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri



Şekil 3.44. Gözenekli kanatçıklı panellerin ve kanatçıksız panelin ışınlama göre güç değişimi (B1 ve B2)

Şekil 3.44’de kanatçıklı ve kanatçıksız panellerin zaman ve ışınlama değişimine göre güç grafiği gösterilmiştir. Deneyler havanın açık olduğu bir günde gerçekleştirilmiş ve deneylerde kullanılan paneller üzerinde herhangi bir gölgelenme veya kirlilik oluşmamıştır. Güneş ışınlamının eğilimi sabah saatlerinde düşük, öğlen saatlerine doğru maksimum değere ulaşmış ve saatin ilerlemesiyle ışınlama değeri azalmıştır. Saat 12:00’de ki panellerin çıkış güçleri sırasıyla 41,82 W, 44,74 W, 47,88 W olup en fazla güç farkı saat 11:00’de 7,26 W olarak gerçekleşmiştir. Sıcaklık ve güç grafiklerindeki değerler beraber analiz edildiğinde soğutma yapılan fotovoltaik (PV) panellerde gözle görülebilir sıcaklık düşüşleri gözlemlenirken bu durum panel çıkış gücüne pozitif katkıda bulunmuştur.

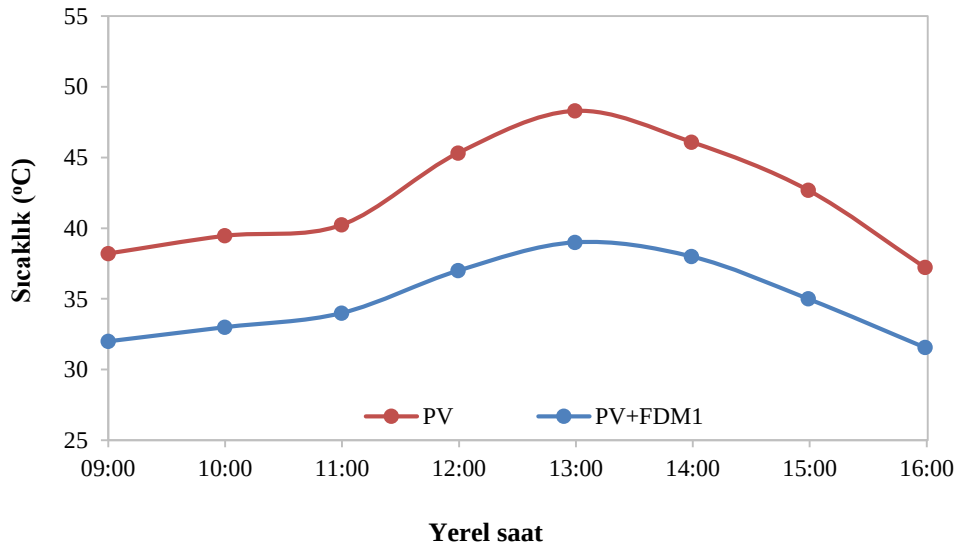


Şekil 3.45. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimlerinin zamana göre değişimi (B1 ve B2)

Şekil 3.45’de kanatçıklı paneller ile kanatçıksız panelin enerji ve ekserji verimlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Paneller üzerindeki sıcaklıkların çıkış güçlerini olumsuz etkilemesi ve elde edilen bu maksimum güçlerin metrekareye düşen ışıınım değerine bölünmesiyle elde edilen enerji verimi öğlen saatlerinde azalma göstermiştir. Bu durum panel alanına gelen ışıınım değerinin üretilen çıkış değerinden yüksek olması ile açıklanabilir. Grafikde yerel saat 10:00’da ki ışıınım değeri 725 W/m^2 değerine ulaştığında 6 mm kanatçıklı panelin verimi % 9,72 ve 10 mm kanatçıklı panelin verimi % 10,30 olmuştur. Bununla beraber ışıınım değerinin en yüksek olduğu (906 W/m^2) zamanda yine A1 panelinin verimi %9,57 ve A2 panelinin verimi % 10,24 olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere ışıınım değerinin artmasıyla panellerin verim değerleri her zaman artmadığı aksine sistem üzerindeki ısınmalar yüzünden verim değerlerini de olumsuz etkilendiği görülmektedir. Ekserji verimindeki azalmaların sebebi, ölçülen andaki termal ekserjinin elektriksel ekserjinin değerini azalması ve elde edilen çıkış ekserjisinin giriş ekserjine bölümüdür. Termal ekserji içerisindeki en önemli fonksiyonlar rüzgar hızı ve panel sıcaklıklarıdır.

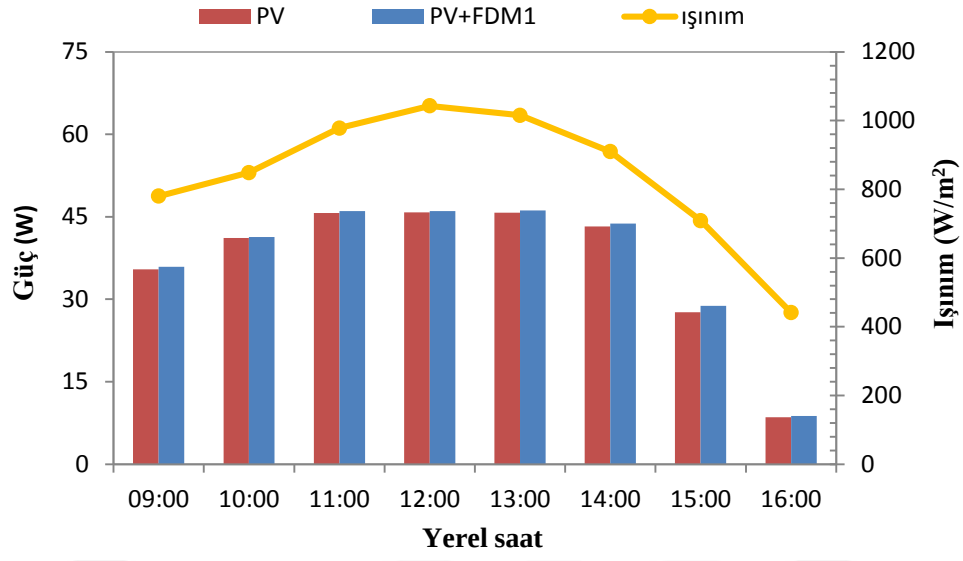
3.4. Fotovoltaik panellerde kullanılan faz değiştiren malzemeler sistem verimine etkisinin incelenmesi

Literatür incelendiğinde, fotovoltaik panellerin çıkış güçlerini arttırmada faz değiştiren malzemeler kullanılarak panel üzerindeki atık ısı bu kimyasalların gizli ısı depolama özellikleri ile yüzey sıcaklıkları düşürülmüştür. Birinci bölümde belirtildiği üzere bu tip çalışmalarda faz değiştiren malzemelerin optimum faz değişim sıcaklığı 25-35 C arasındadır. Deneylerde 3 farklı erime sıcaklığına sahip FDM seçilmiştir. Seçilen FDM’ler literatürde belirtilen sıcaklık aralığının altında, diğeri üstünde son FDM ise optimum aralıktadır.

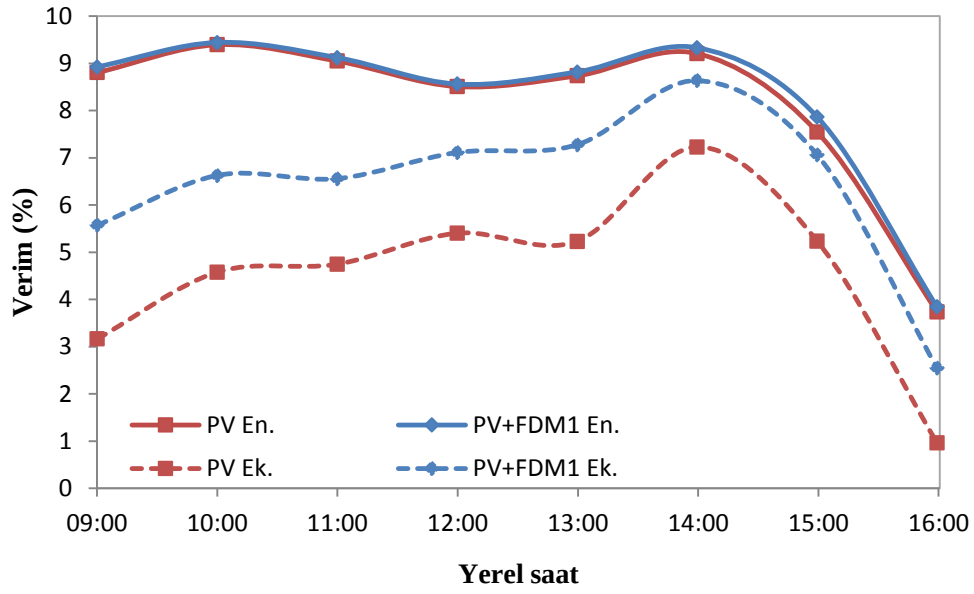


şekil 3.46. FDM’li ve FDM’siz fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri (Oleik asit)

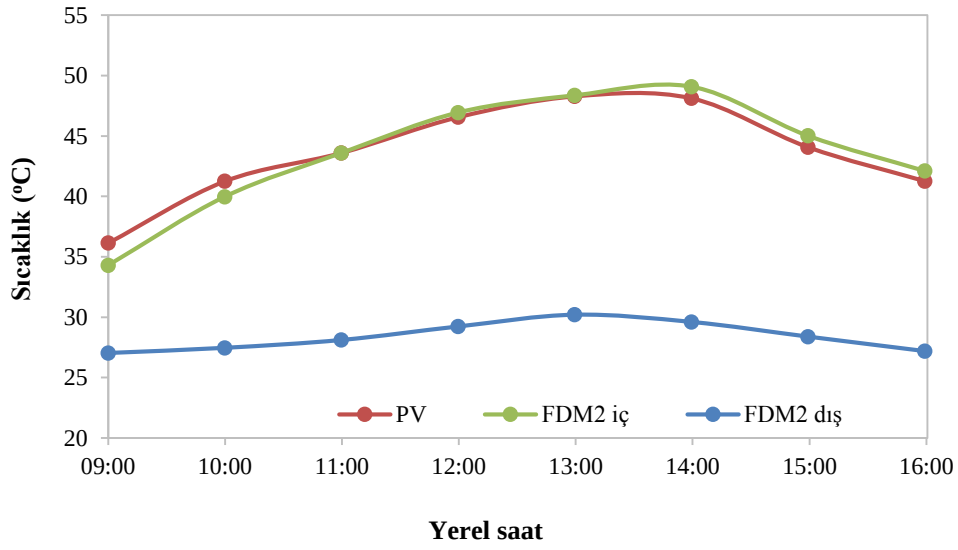
Fotovoltaik panellerde ilk uygulanan faz değiştiren malzeme oleik asit olmuştur. şekil 3,46’da PV panelin ve PV+FDM panelinin zamana göre sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. PV panelin yüzey sıcaklıkları 38,21 C’den başlayıp 48,29 C’ye kadar çıkmıştır. PV+FDM panelinin yüzey sıcaklığı ise 32,06 C’den başlayıp 39 C’ye kadar çıkmıştır. FDM’li panelin yüzey sıcaklıkları deponun üzerinden ölçülmüştür. Tankın içindeki kimyasalın sıcaklığı ise 48-49 C arasındadır. Sistemlerden elde edilen g ve verim değerleri şekil 3.47 ve 3.48’de gösterilmiştir. PV panelden elde edilen maksimum güç 45,78 W iken PV+FDM panelinden üretilen maksimum güç değeri 46,17 W olmuştur. Sistemlerden elde edilen güç değerlerinin birbirine yakın olmasının sebebi FDM tankının içindeki sıcaklığın PV panelinin sıcaklığına yakın bir değer olmasıdır.



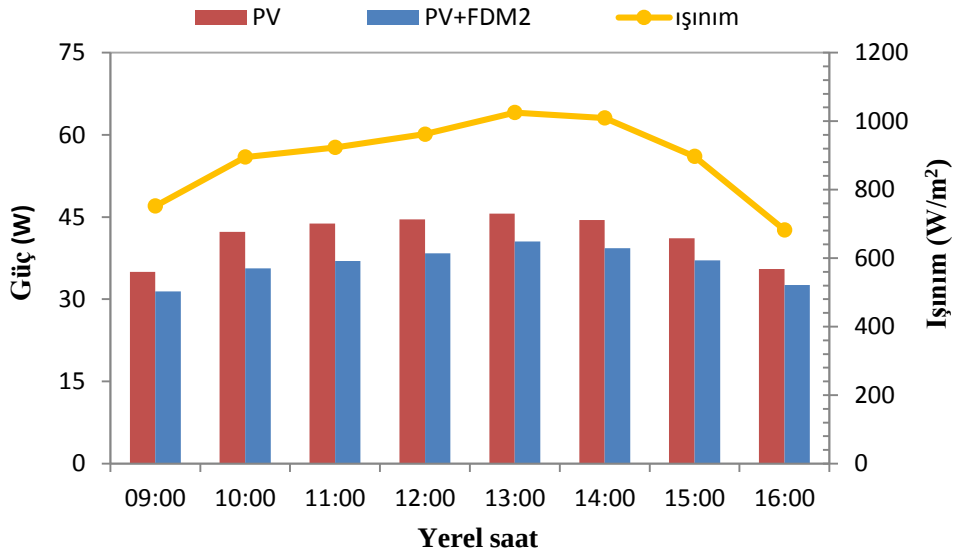
Şekil 3.47. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaiik panellerin güç değışiklikleri (Oleik asit)



Şekil 3.48. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaiik panellerin enerji ve ekserji verimleri (Oleik asit)



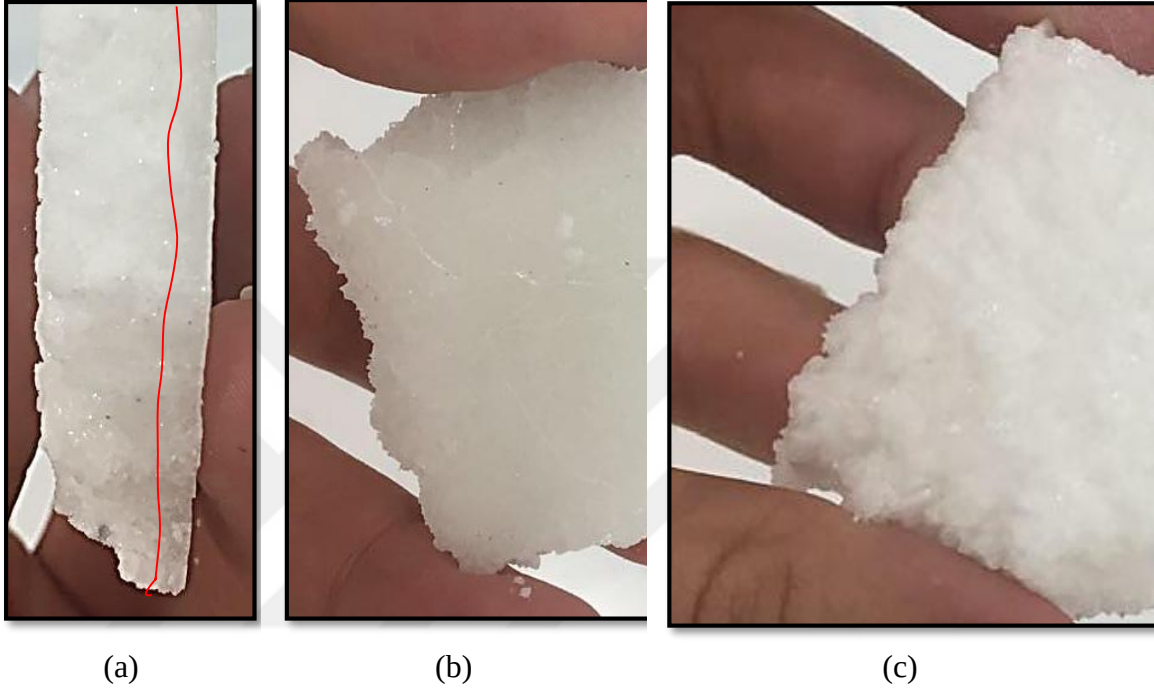
Şekil 3.49. FDM’li ve FDM’siz fotovoltaiik panellerin sıcaklık değişimleri (Biphenyl)



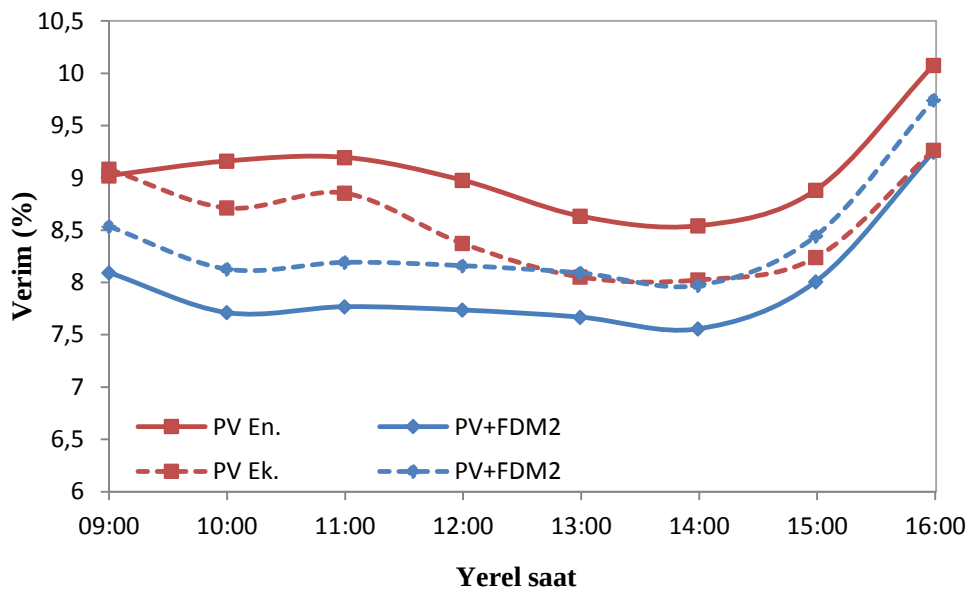
Şekil 3.50. FDM’li ve FDM’siz fotovoltaiik panellerin güç değişiklikleri (Biphenyl)

Şekil 3.49’da farklı bir FDM kullanılarak fotovoltaiik panelin yüzey sıcaklığındaki değişimler gösterilmiştir. FDM içindeki ısı çiftlerinden ölçülen değerler ile düz fotovoltaiik panelin arkasından ölçülen sıcaklık değerleri birbirine çok yakındır. Saat 13:00’dan sonraki değerlere bakıldığında ise FDM’den ölçülen değerler daha yüksek çıkmıştır. Deneyler bitirilip tankın içi açıldığında faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığına tam gelmediği, faz değişiminin tamamlanmadığı için de sisteme yalıtım özelliği katmasından dolayı olumsuz katkıda bulunmuştur. Şekil 3.51’de tankın içinden alınan bir parça FDM’nin farklı bakış açılarından görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.51 (a) kırmızı çizgi ile çizilen yer sıvı ve katı bölgelerinin ayıran hat olarak gösterilmiştir. 3.51 (b) ve (c)’de fotovoltaiik panelin arka

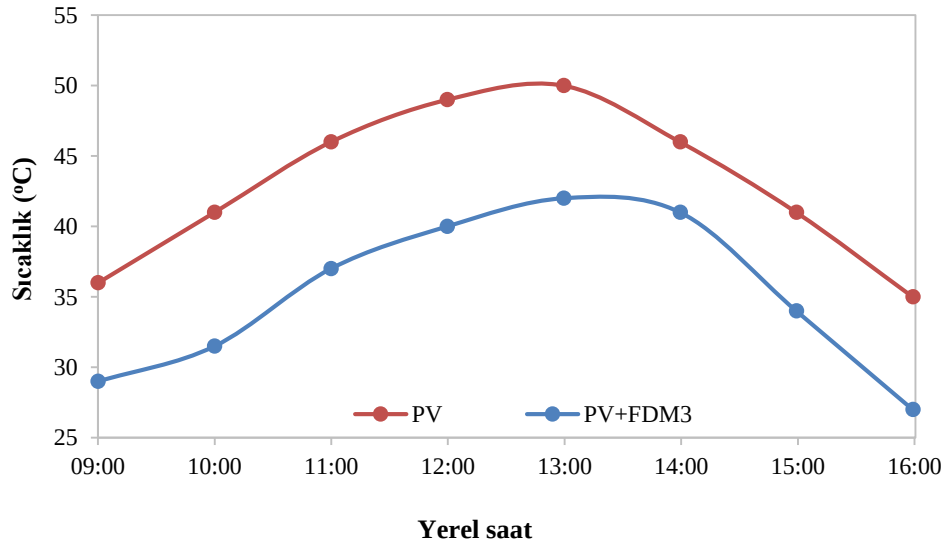
yüzeyine temas eden ve etmeyen bölgelerin erime ve katılaşma durumları gösterilmiştir. Bu soğutma sistemi FDM depolu fotovoltaik panele negatif etki ederek PV panelin ürettiği güçten daha az güç üretmiştir. Şekil 3.52'deki enerji ve ekserji verimleri incelendiğinde de fotovoltaik panelin (PV) enerji veriminin % 10,07, ekserji veriminin ise % 9,26 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.51. Faz değiştiren malzemenin (a) yandan (b) panel arka yüzeyine temas eden (c) depoya temas eden bölümlerinin görünüşleri

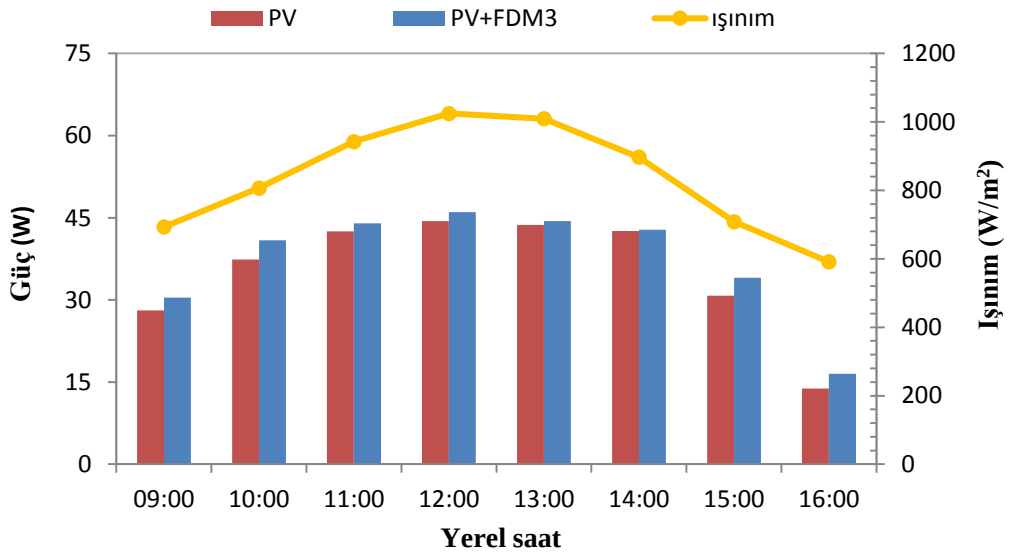


Şekil 3.52. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimleri (Biphenyl)



Şekil 3.53. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri (Kalsiyum klorür heksahidrat)

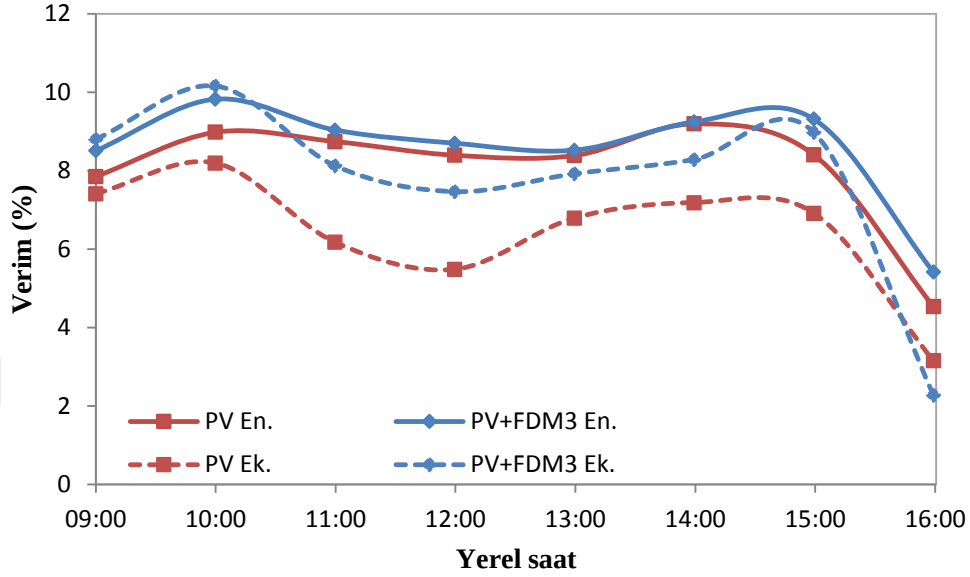
Şekil 3.53'de fotovoltaik panele yerleştirilmiş FDM depolu sistem ile PV panelin yüzey sıcaklıklarının değişimi gösterilmiştir. FDM erime sıcaklığı 30 °C olduğundan FDM'li panelde daha düşük sıcaklıkla ölçümlere başlanmıştır. Saat 13:00'da FDM'li panelin yüzey sıcaklığı 42 °C FDM'siz panelin yüzey sıcaklığı ise 50 °C'ye ulaşmıştır.



Şekil 3.54. FDM'li ve FDM'siz fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri (Kalsiyum klorür heksahidrat)

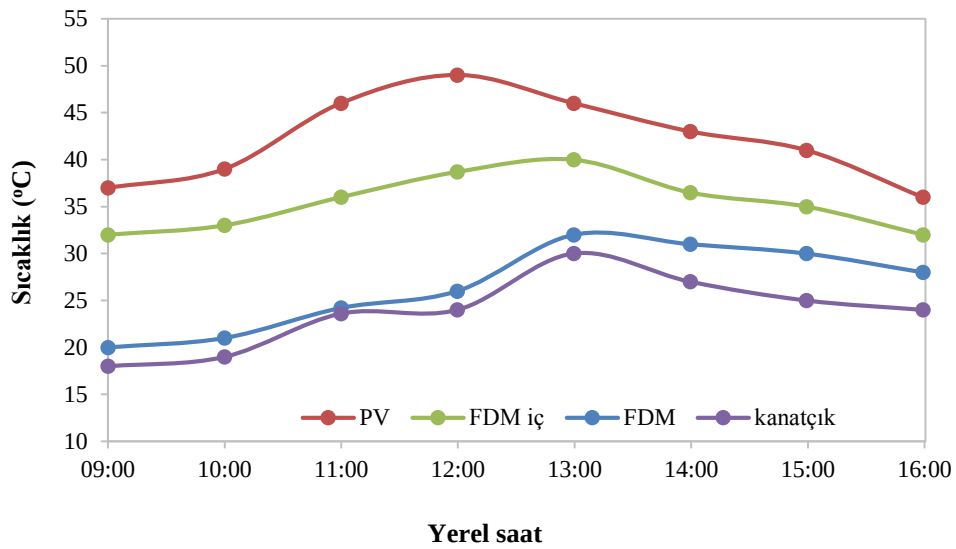
Şekil 3.54'de faz değiştiren malzeme kullanılarak pasif soğutma tekniği uygulanmış ve uygulanmamış panellerin güç değişim grafiği zamana karşı gösterilmiştir. Şekilde pasif soğutma uygulanan panelin yüzey sıcaklığı, pasif soğutma uygulanmayan panelin yüzey sıcaklığından daha düşük olduğundan ısı yük hafifletilmiştir. Bu durum FDM'li panelin güç

üretimini pozitif etkilemiştir. Gün boyunca panellerden üretilen güç farkları en düşük 0,2 W en fazla 3,5 W olmuştur. Şekil 3.55’de de bu sistemin verim değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

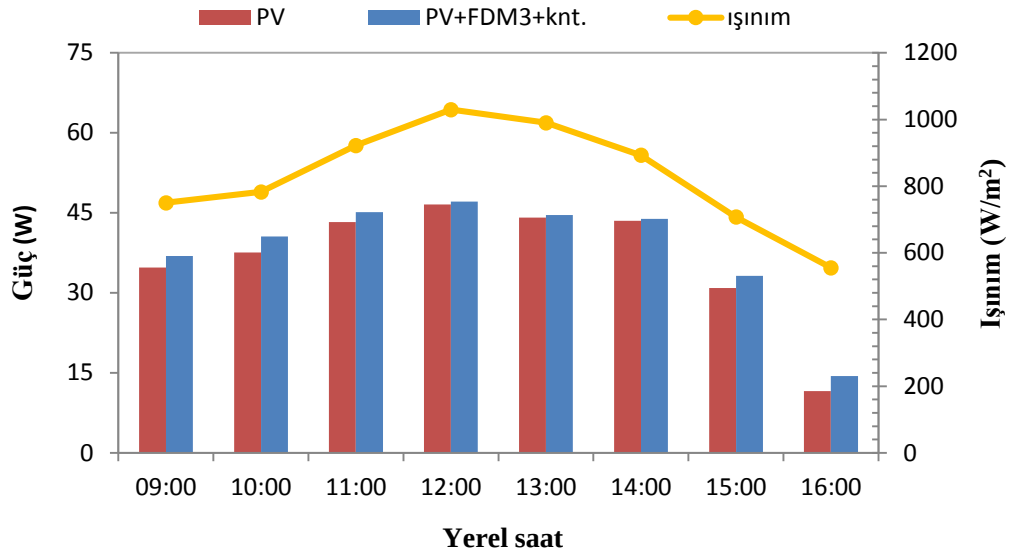


Şekil 3.55. FDM’li ve FDM’siz fotovoltaiik panellerin enerji ve ekserji verimleri (Kalsiyum klorür hekzahidrat)

FDM3’den elde edilen olumlu sonuçlar doğrultusunda tankın dışına alüminyum kanatçık profil yerleştirilmiştir. Buradaki amaç, ısınan FDM’nin kanatçık ile soğutulurken daha fazla ısı absorbe etmesidir. Şekil 3.56’da bu sistemin yüzey ve FDM içindeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.56. Fotovoltaiik panellerin sıcaklık değişimleri (Kalsiyum klorür hekzahidrat + kanatçık)

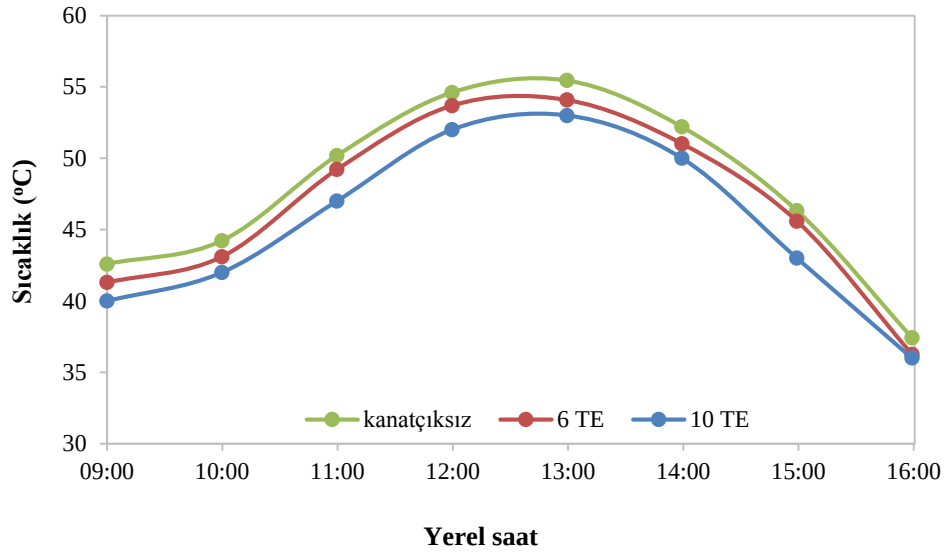


Şekil 3.57. Fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri (Kalsiyum klorür heksahidrat + kanatçık)

Şekil 3.57’de fotovoltaik panel (PV) ile PV+FDM3+kanatçık sisteminden üretilen güç değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Sekiz ölçüm zamanından alınan veriler doğrultusunda PV sistemden elde edilen güç 292,24 W iken diğer sistemden elde edilen güç 305,77 W’tır. PV+FDM3 ile PV+FDM3+kanatçık sistemlerinin ΔP_{mak} değerleri birbirine yakın olduğundan, PV+FDM+kanatçıklı sistemin ek maliyet, işçilik, ağırlık vb. nedenlerden dolayı PV+FDM kullanımı daha ekonomik olacaktır.

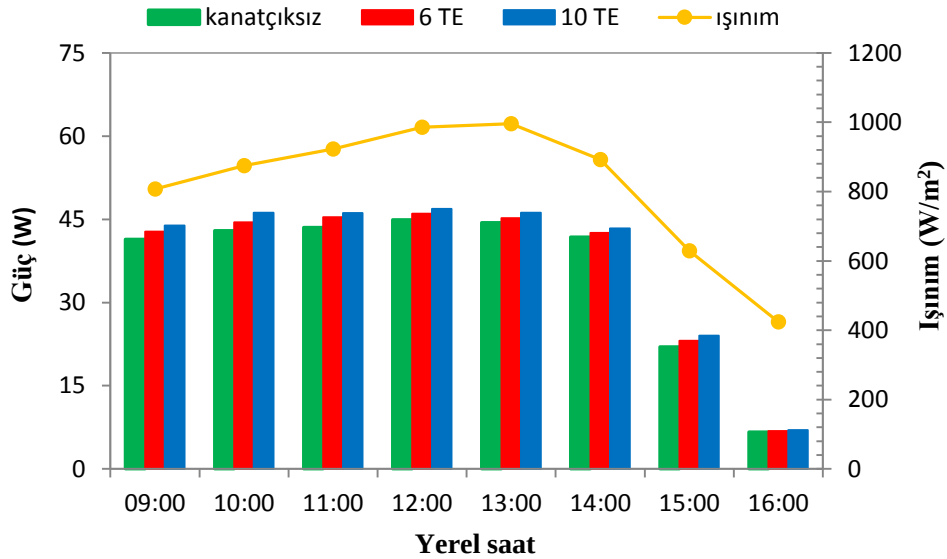
3.5. Fotovoltaik panellerde termoelektrik (TE) modüller kullanarak sistem verimine etkisinin incelenmesi

Fotovoltaik ve termoelektrik modül (TEM) sistemlerinin performansı deneysel olarak bu bölümde incelenmiştir. TEM olarak bizmut tellür (Bi_2Te_3) seçilmiş ve TEM direkt olarak PV’nin arka yüzeyine termal macun ile birleştirilmiştir. TE modüllerin sıcak yüzeyi fotovoltaik panelin arka yüzeyine (sıcak yüzey,) soğuk kısmına ise alüminyum profil kanatçık yerleştirilerek sabitlenmiştir. Deneylerde aynı model ve güçte TE modül kullanılarak farklı sayılarda (6 ve 10 adet) PV sistemlere bağlanarak oluşacak etki deneysel olarak incelenmiştir.



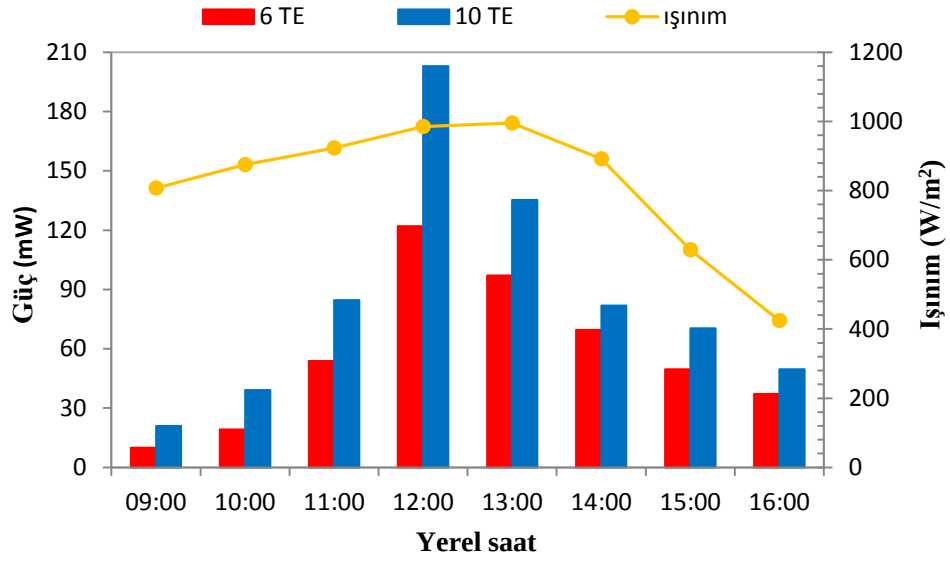
Şekil 3.58. Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri

Şekil 3.58’de termoelektrik modüller kullanılarak fotovoltaik panellerin arka yüzeylerindeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Güneş ışınım değerinin 995 W/m^2 olduğu zamanda fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığının 55.45°C , 6 TE modüllü PV sisteminin yüzey sıcaklığının 54.08°C ve 10 TE modüllü sistemin yüzey sıcaklığının ise 53°C olduğu görülmüştür. Panel üzerindeki en yüksek sıcaklık farkı (ΔT) saat 15:00’de 3.32°C olmuştur.



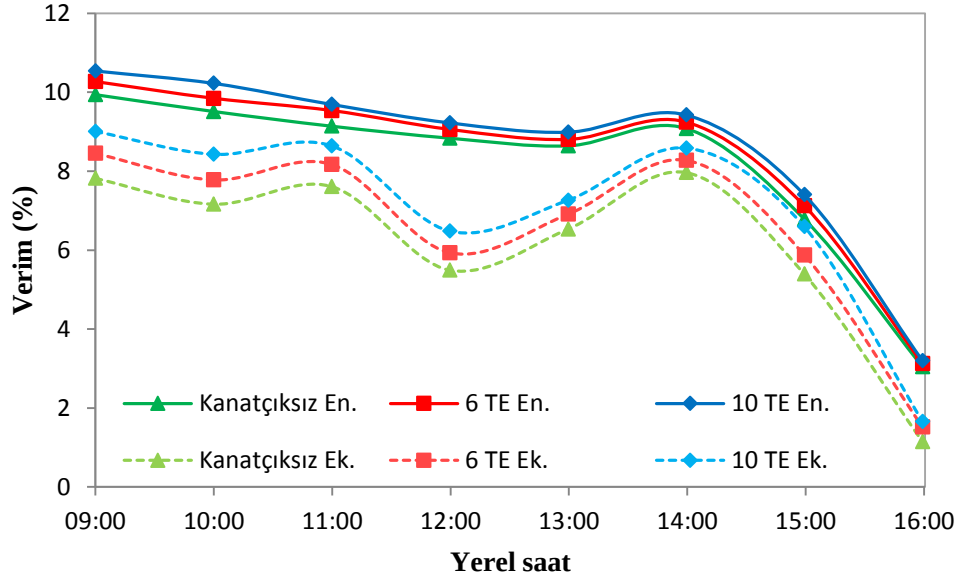
Şekil 3.59. Fotovoltaik panellerin güç değişiklikleri

Şekil 3.59’da TE modüllü ve termoelektriksiz fotovoltaik panellerin zaman bağımlı güç değişimlerini göstermektedir. Termoelektriksiz, 6 TE ve 10 TE panellerden elde edilen en yüksek çıkış güçleri $44,91 \text{ W}$, $46,04 \text{ W}$ ve $46,89 \text{ W}$ ’tır.



Şekil 3.60. Termoelektrik modüllerden elde edilen çıkış güçleri

Şekil 3.60'da farklı sayılardaki TE modülünden elde edilen güç değişimleri gösterilmektedir. TE modüllerden elde edilen en yüksek çıkış güçleri 6 TE sistemde 122 mW 10 TE sistemde ise 203 mW'tır.

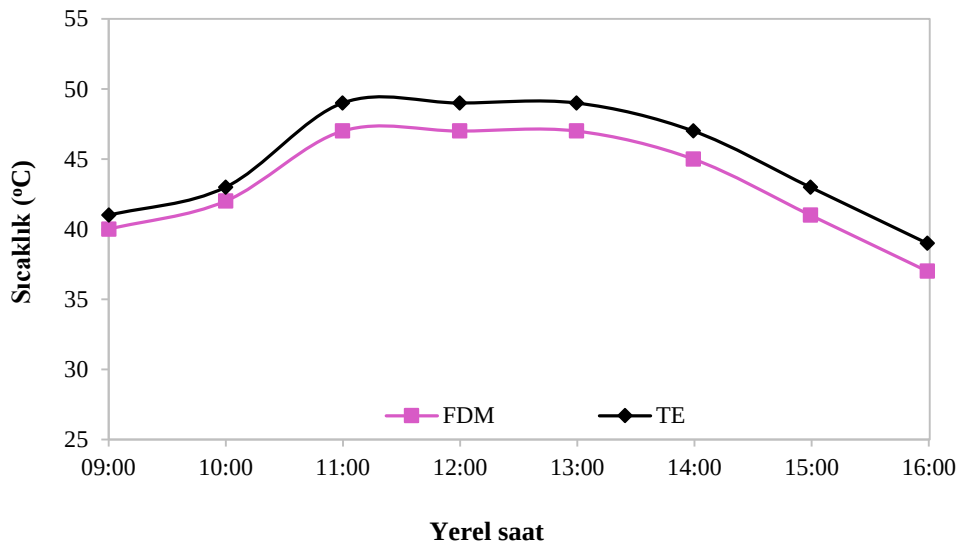


Şekil 3.61. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimliliği

Şekil 3.61'de fotovoltaik sistemlerin enerji ve ekserji verim değerleri karşılaştırılmıştır. Termoelektrik modüllere sahip olan 6 TE ve 10 TE fotovoltaik panellerin enerji verimliliği değerleri sırasıyla % 10.26 ve % 10.54 ve ekserji verimleri ise % 8.54 ve % 9'dur.

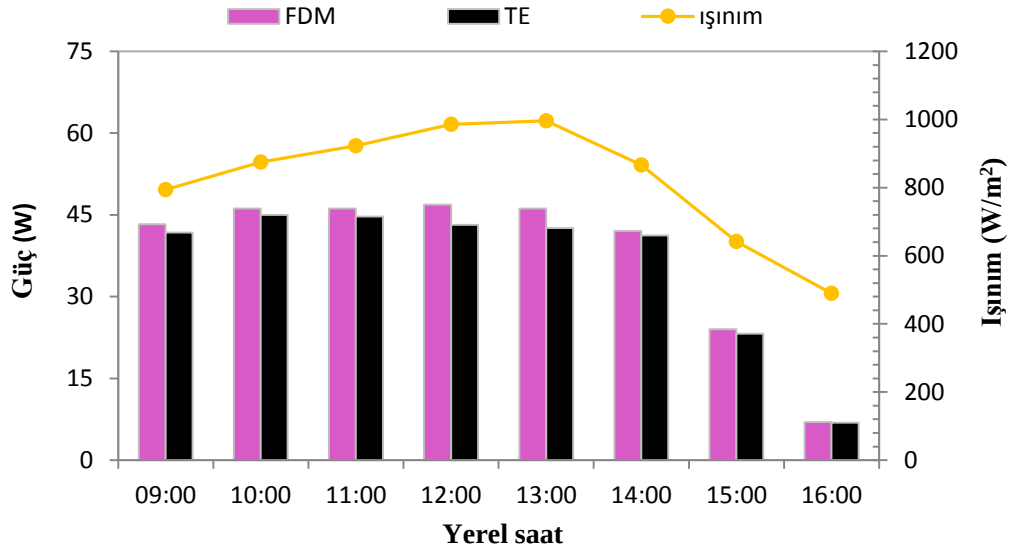
3.6. Hibrit sistemlerin fotovoltaik paneller üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Bu bölümde öncelikle kalsiyum klorür hekzahidrat (tuz hidrat) ile TE modüllü fotovoltaik sistemlerinin karşılaştırılması yapılarak hangisinin performansı daha iyi arttırdığı belirlenecektir. Daha sonra kendi aralarında en olumlu etki yaratan sistemler aynı güneş ışınımı altında araştırılacaktır. Bu sistem; 10 mm kalınlıktaki şaşırtmalı dizilimdeki gözenekli kanatçık, alüminyum düz kanatçık (A5) ve hibrit (PV+FDM+TE) sistemlerinden oluşmaktadır.

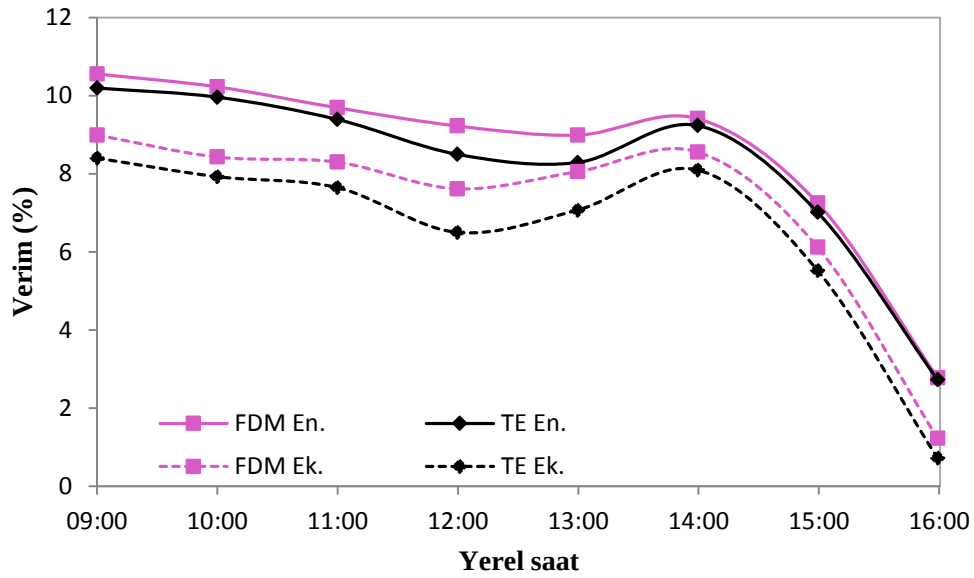


Şekil 3.62. Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri

Şekil 3.62’de FDM’li ve TE modüllü fotovoltaik panellerin zamana karşı sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Deneylerde faz değiştiren malzeme olarak kalsiyum klorür hekzahidrat, TE modül sayısı ise 6 olarak alınmıştır. Şekildeki sıcaklık değişimleri her iki panel içinde zamana karşı paralel bir eğilim göstermiştir. Gün içerisinde en fazla sıcaklık farkı 2 °C olmuştur. Sistemlerden elde edilen güç grafiği kıyaslaması ise Şekil 3.63’de gösterilmiştir. FDM’li panelin daha düşük yüzey sıcaklığına sahip olması güç grafiğinde daha yüksek elektrik üretmesine sebep olmuştur. Sistemler saat 12:00’de en yüksek güç üretim seviyesine ulaşmışlardır ve güç farkı 3,7 W olmuştur. Sistemlerin enerji ve ekserji verimlerinin değişimleri ise Şekil 3.64’de gösterilmiştir.

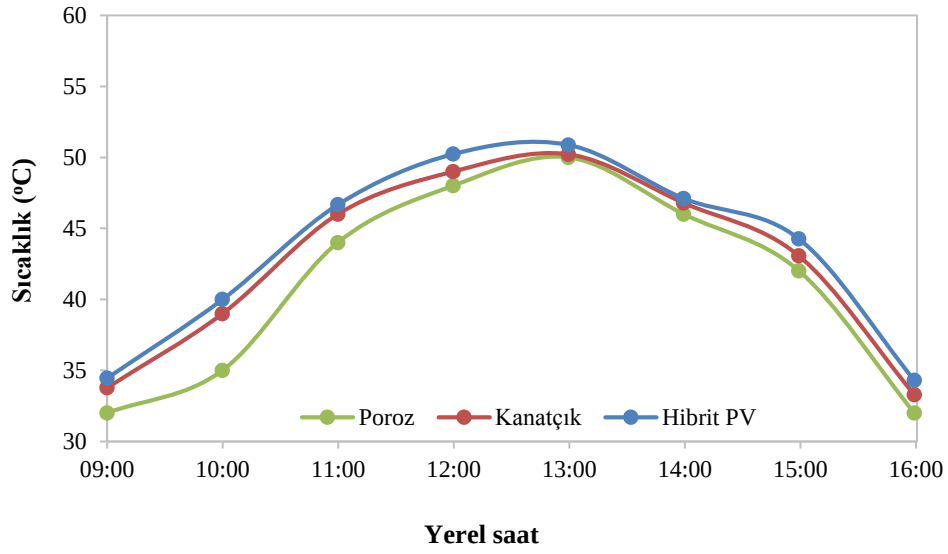


Şekil 3.63. Fotovoltaik panellerin güç değişimleri

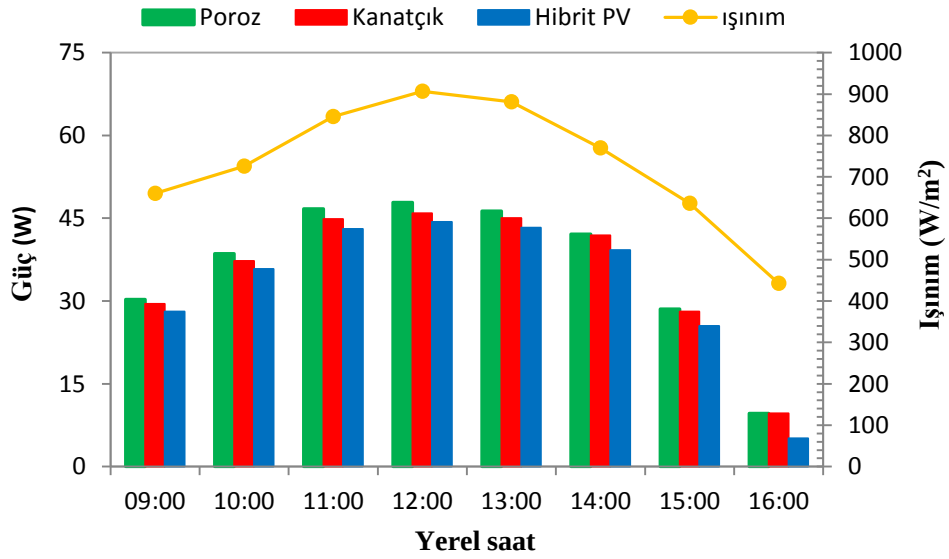


Şekil 3.64. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimleri

Kendi kategorilerinde en iyi sonuçları veren sistemler aynı güneş ışınımı altındaki sıcaklık ve güç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3.65 ve 3.66’da verilmiştir. Sıcaklık dağılımları göz önünde bulundurulduğunda, panel üzerindeki atık ısıyı en iyi uzaklaştıran ya da en iyi soğutman sistem gözenekli yapıya sahip kanatçıklı sistem olmuştur. Sistemlerin başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 32 °C, 33,78 °C ve 34,46 °C’dir. Saat 10:00’da gün boyunca 5 °C ile en yüksek sıcaklık farkı meydana gelmiştir. Sistemlerden üretilen güçlere bakıldığında sıcaklık değerleri ile ters orantılıdır. En yüksek sıcaklık değerlerine sahip olan hibrit sistem en düşük güç üretimini sağlamıştır.



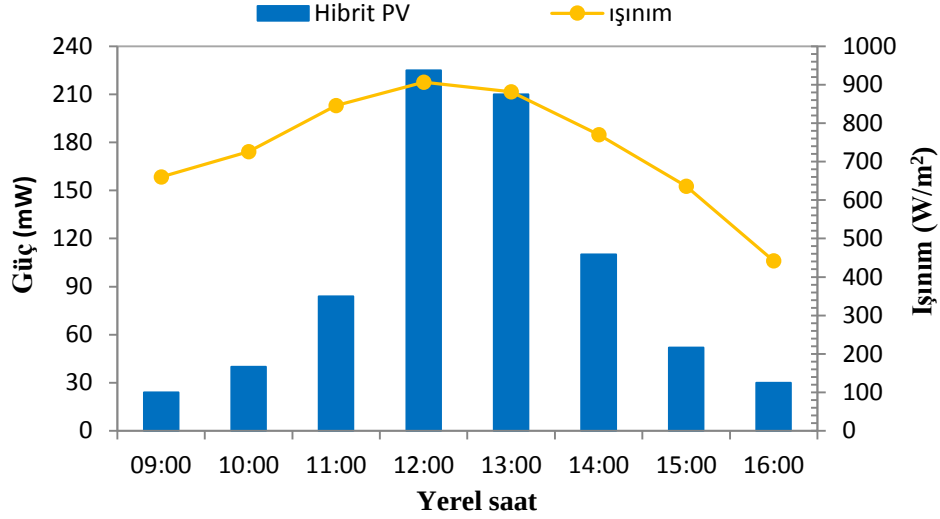
Şekil 3.65. Fotovoltaik panellerin sıcaklık değişimleri



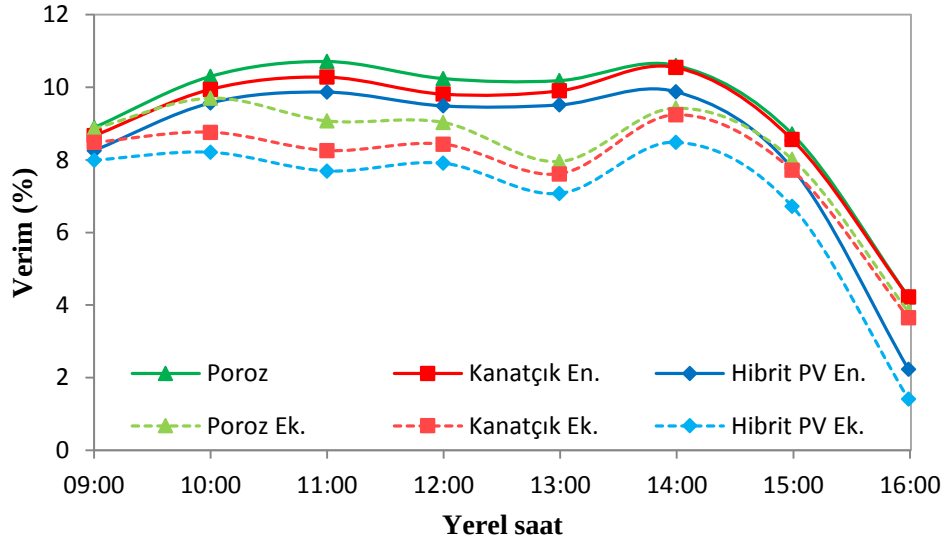
Şekil 3.66. Fotovoltaik panellerin güç değişimleri

Termoelektrik modüllerden elde edilen güç fotovoltaik panellerle kıyaslandığında çok küçük kalmaktadır. PV modüllerin aksine TE modüller sıcaklık arttıkça güç üretimi maksimum olmuştur. Güneş ışınımının azalmasıyla panel üzerindeki atık ısı miktarı azaldığından üretilen güç değeri de azalmıştır. Şekil 3.67’de TE modüllerden elde edilen çıkış güçlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.68’de gözenekli kanatçık, alüminyum kanatçık ve hibrit sistemlerin enerji-ekserji verimleri verilmiştir. Bu grafikte de tüm verim değerleri için 10 mm kalınlıktaki şaşırtmalı dizilimli PV panel en iyi sonuçları vererek tüm

sistemler arasından başarılı olmuştur. Deneylerde ölçülen değerlerin ve hesaplamalardan kaynaklanan belirsizlik analizi Tablo 3.1’de verilmiştir



Şekil 3.67. Termoelektrik modüllerden elde edilen çıkış güçleri



Şekil 3.68. Fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimliliği

Table 3.1. Ölçülen değerlerin belirsizlik analizi

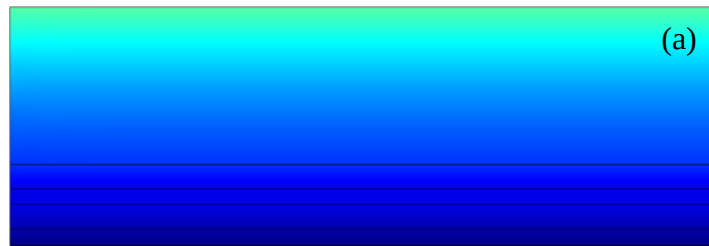
Tanımlama	Birim	Toplam Belirsizlik (%)
Sıcaklık	°C	±0.776
Hız	m/s	±0.03

Işınım	W/m^2	± 0.02
Akım	A	± 0.85
Güç	W	± 1.52
Enerji verimi	-	± 1.29
Ekserji verimi	-	$\pm 17,54$

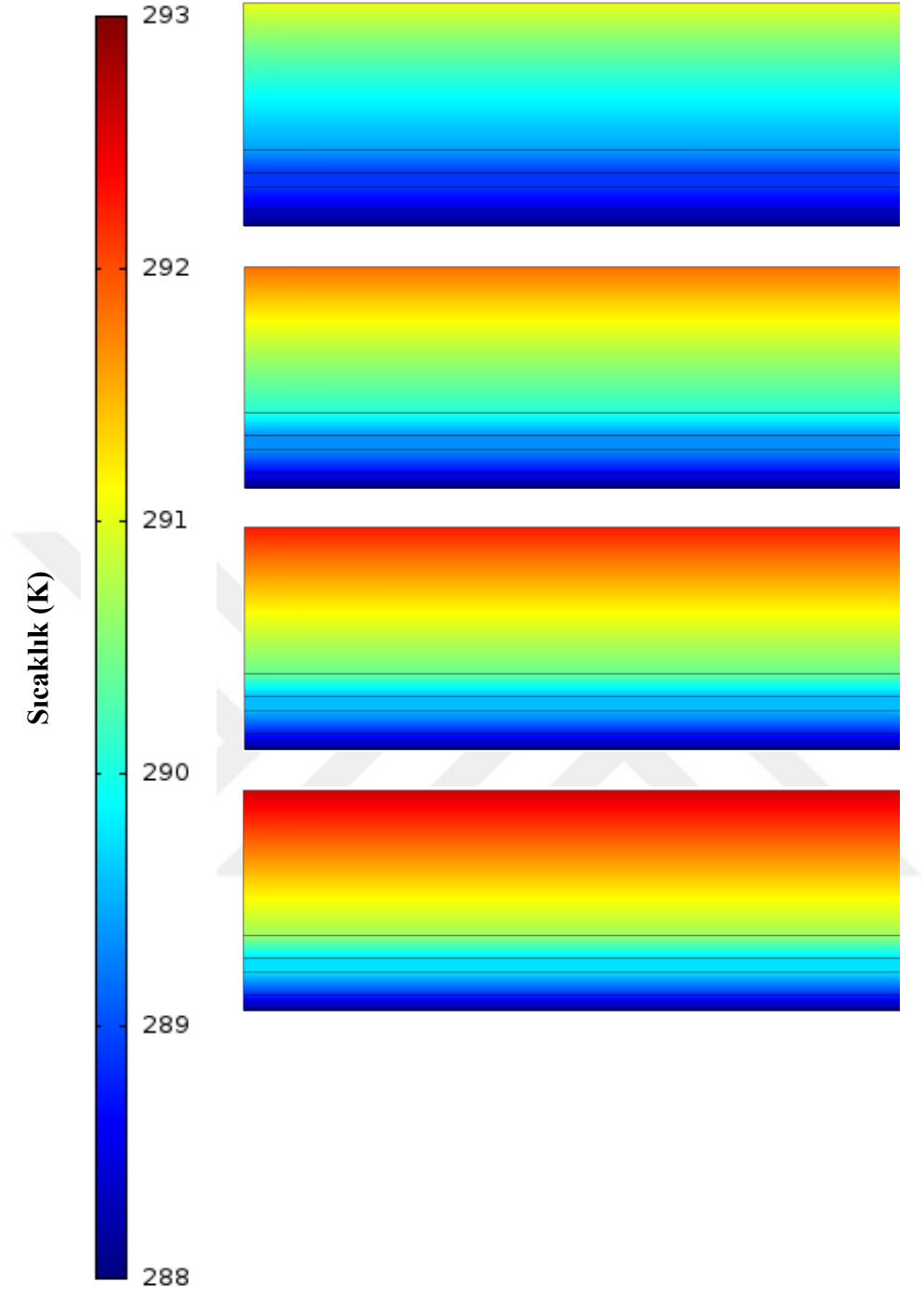
3.7. Sayısal analiz sonuçları

Şekil 3.69 ve 3.70 te, $450 W/m^2$ ve $900 W/m^2$ ışıınım durumunda PV modülün katmanları arasında sıcaklık dağılımı farklı zaman adımları için gösterilmektedir. Zaman adımları 20, 40, 60, 80 ve 100 sn olarak alınmıştır. Işıınım miktarı arttığında üst yüzeyde maksimum sıcaklıkta $18^\circ C$ 'lik bir artış meydana gelmektedir. PV modülün farklı malzemeden oluşması ve malzemelerin farklı termofiziksel özelliklerinden dolayı katmanlar arasında farklı sıcaklık gradyanları meydana gelmektedir.

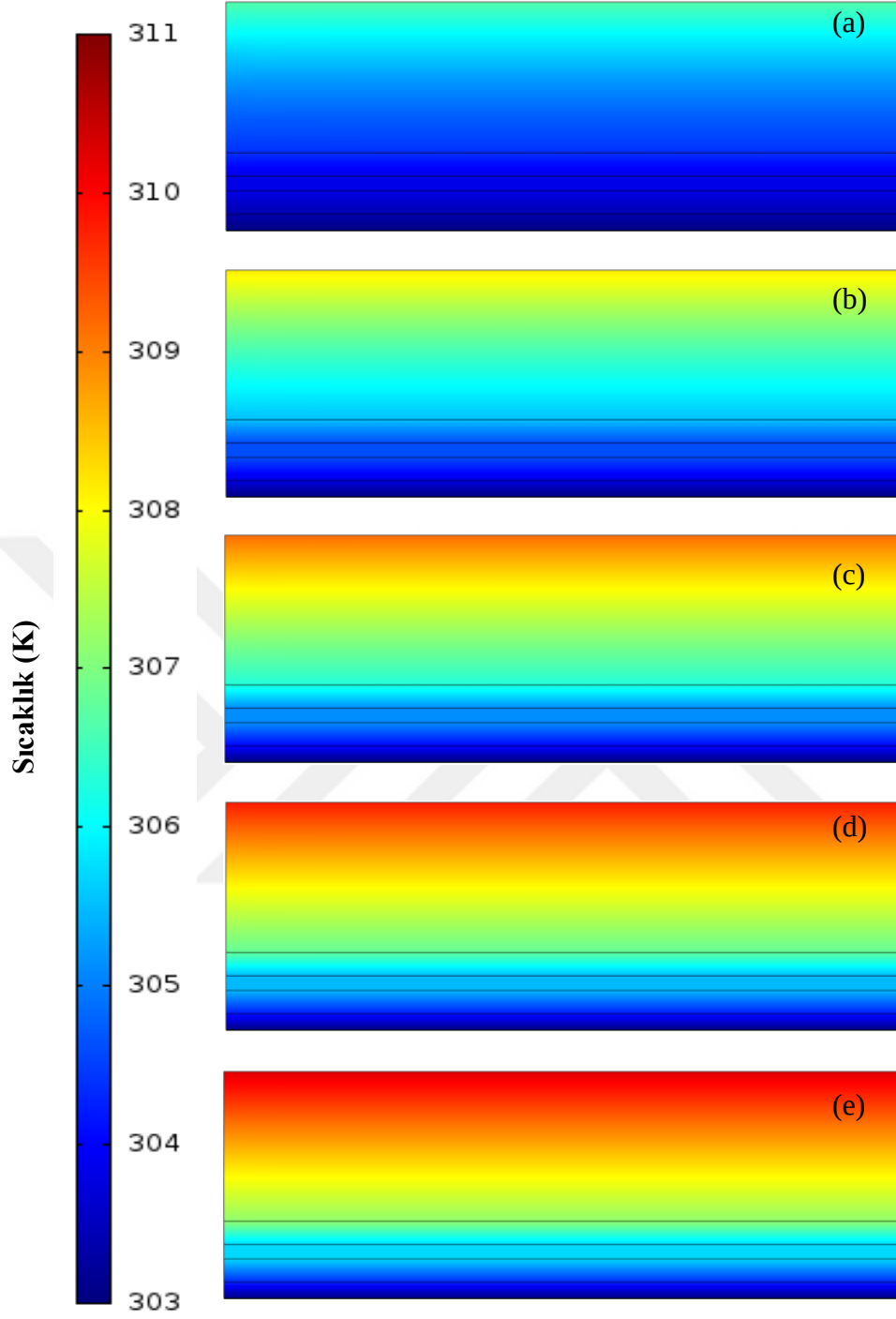
Şekil 3.71 ve 3.72'da kanatçık eklendiği zaman ve Şekil 3.73-3.74 de ise sadece FDM ve FDM+kanat birlikte kullanıldığı zaman PV modülde meydana gelen sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil 3.74'de özellikle kanatçık eklendiğinde FDM'de meydana gelen katı-sıvı ara-yüzeyi belirgin bir şekilde eğrisel olmaktadır. Burada doğal taşınım etkilerinin önemli olduğu ve meydana gelen sıcaklık gradyanının uzunluk boyunca homojen olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.73'de sadece FDM uygulandığı zaman bu ara yüzey düz olmaktadır.



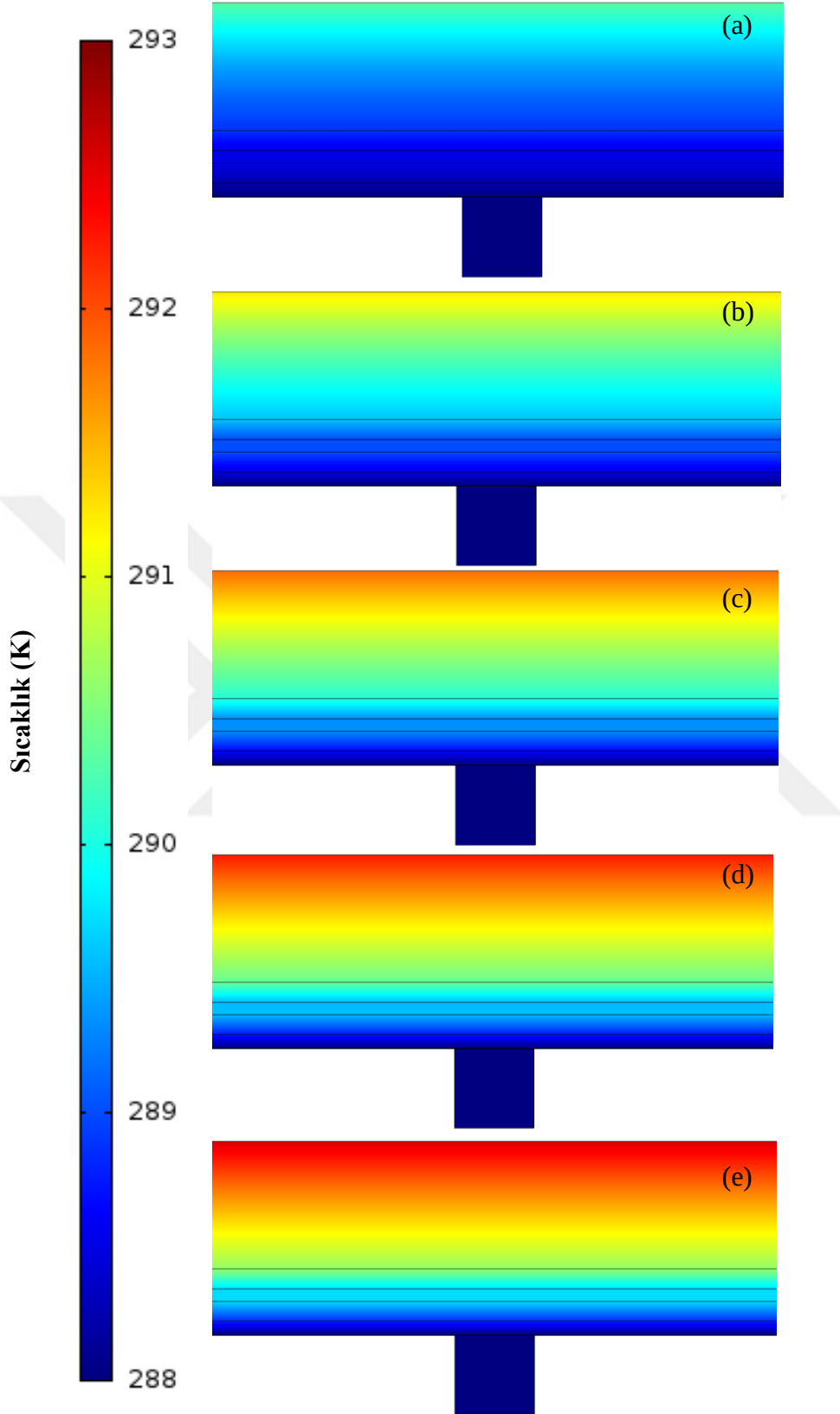
(b)



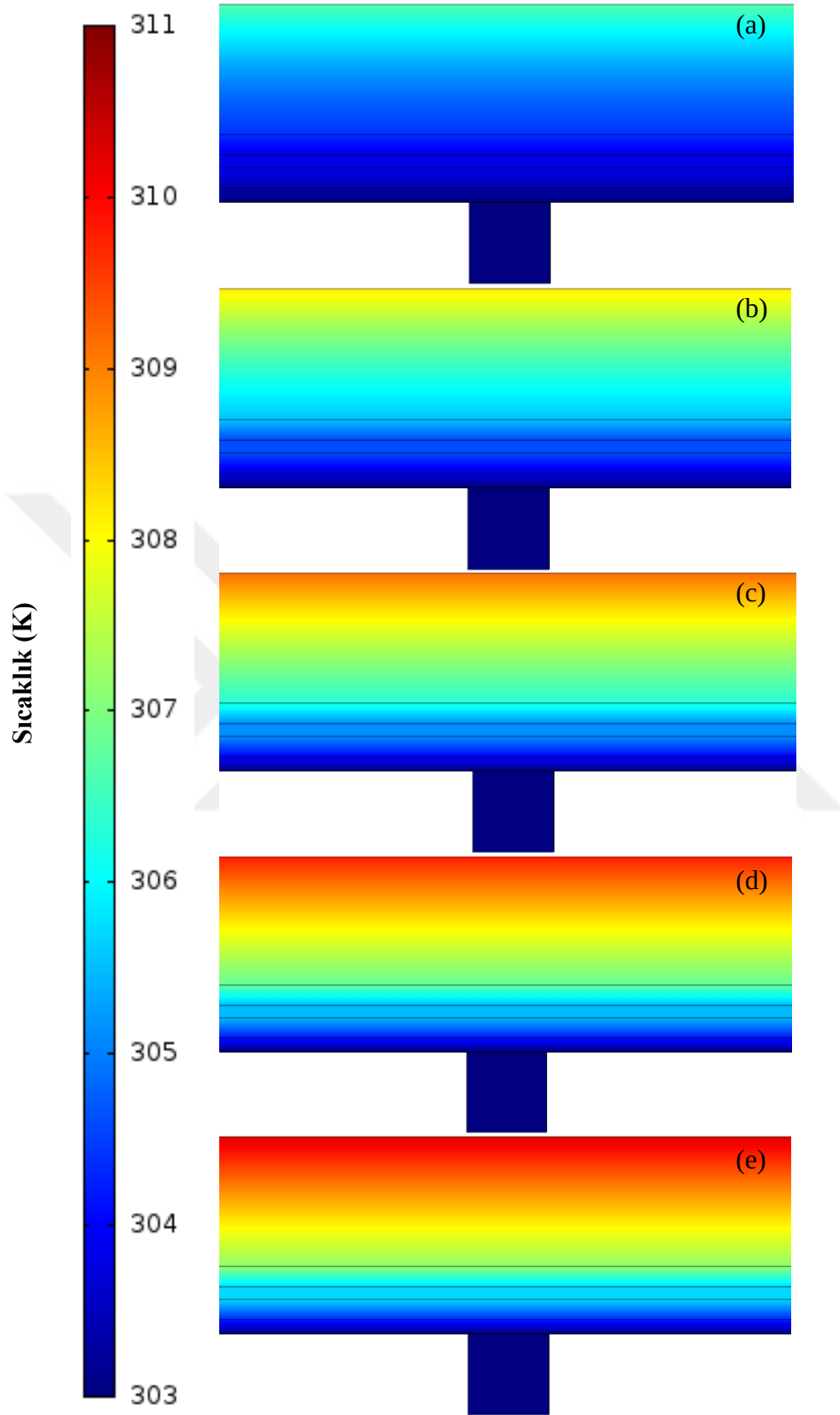
Şekil 3.69. 450 W/m² ışınlm altındaki bir fotovoltaiik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn



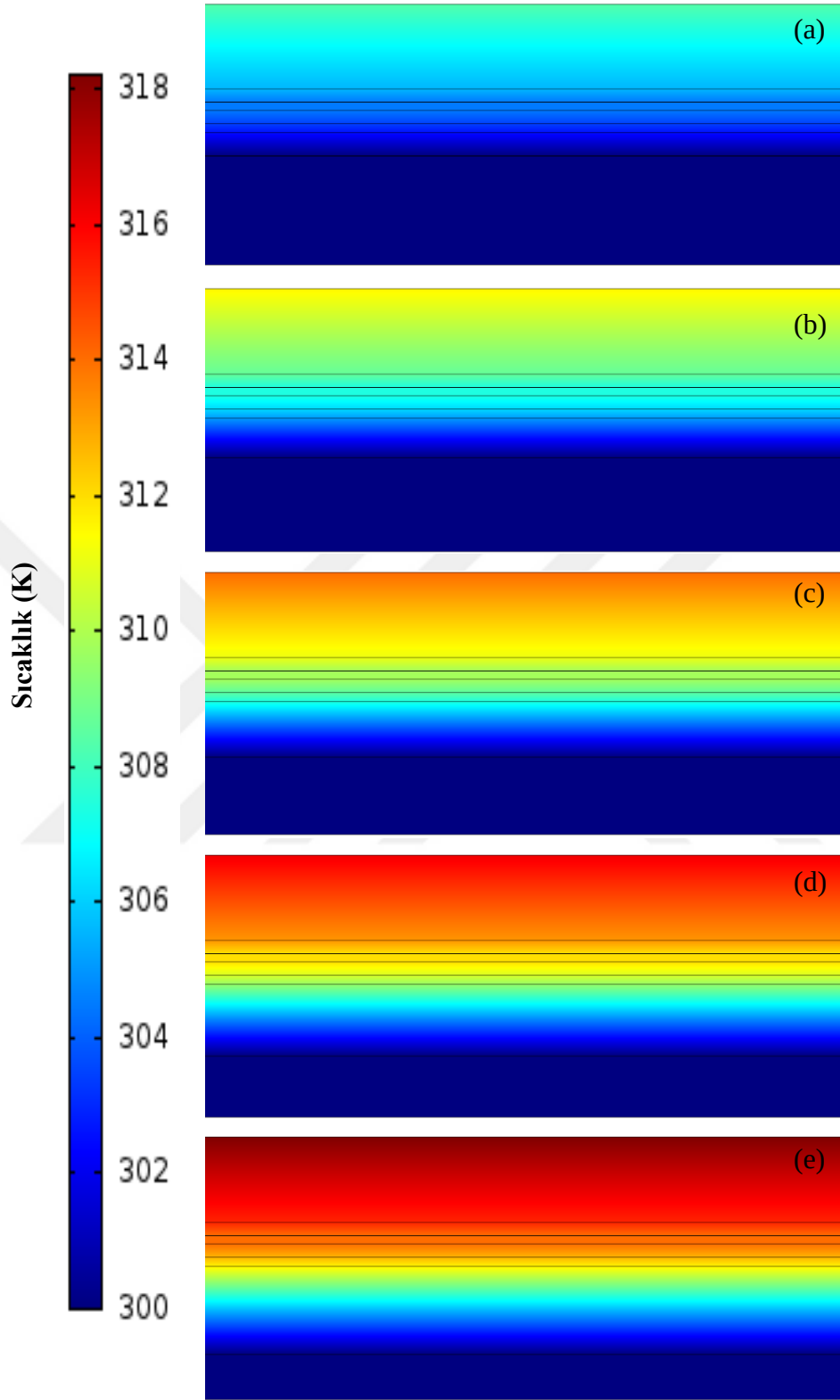
Şekil 3.70. 900 W/m² ışınlm altındaki bir fotovoltaiik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn



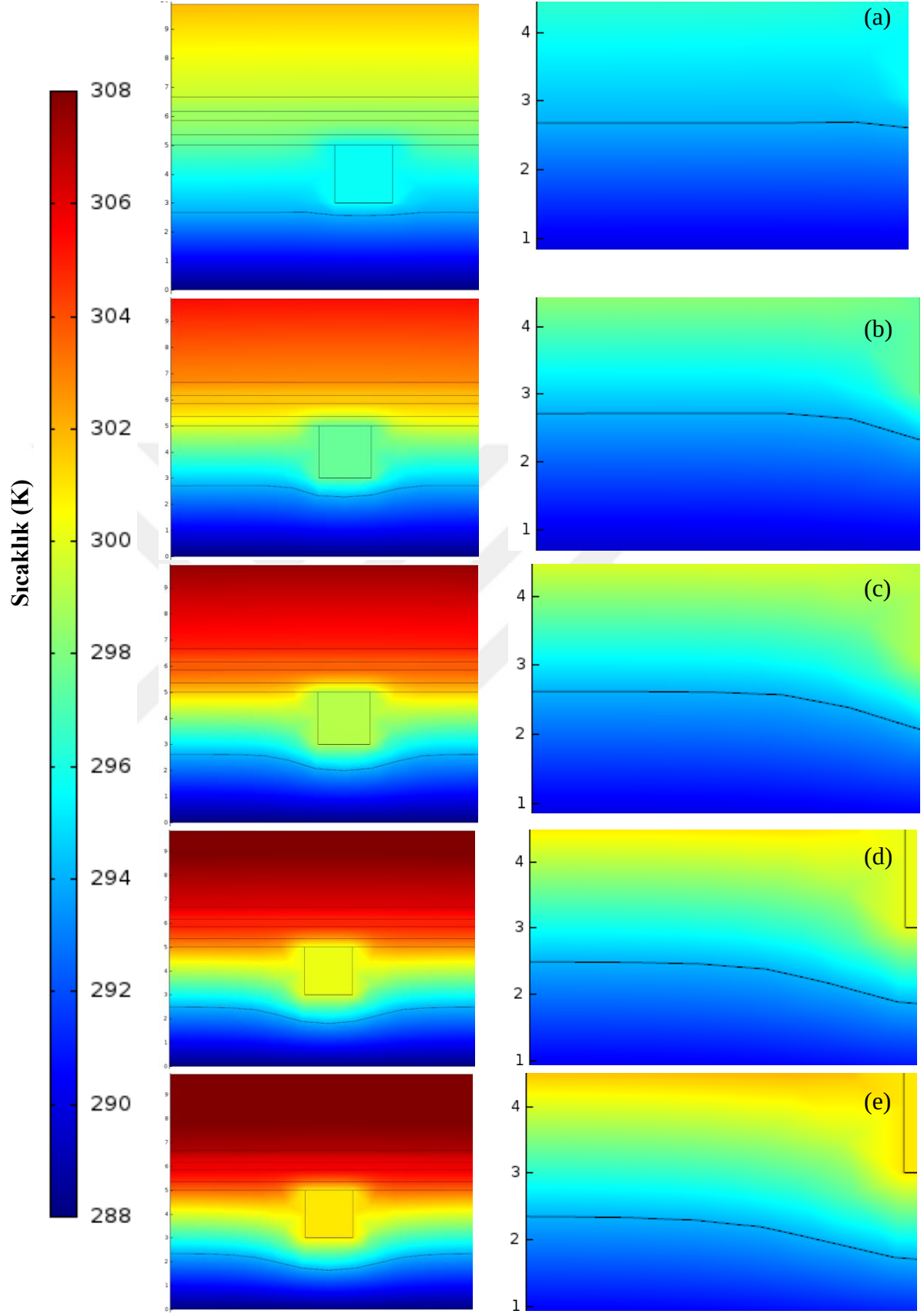
Şekil 3.71. 450 W/m² ışınlm altındaki alüminyum kanatçıklı fotovoltaiik panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn



Şekil 3.72. 900 W/m^2 ışınlm altındaki alüminyum kanatçıklı fotovoltak panelin zamana göre sıcaklık dağılımı (a) 20.sn (b) 40.sn (c) 60.sn (d) 80.sn (e)100.sn

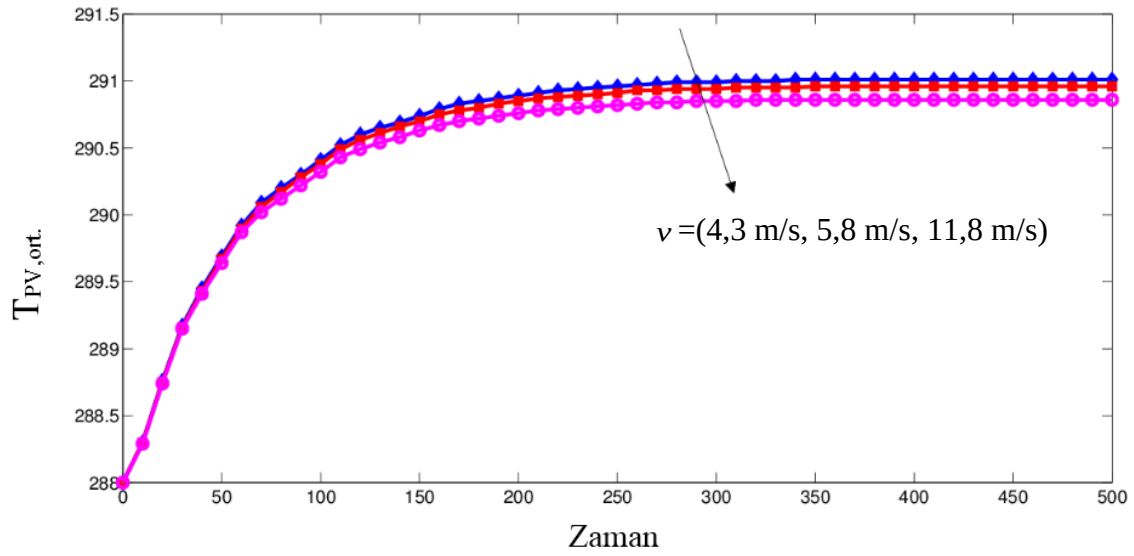


Şekil 3.73. 900 W/m² ışınlm altındaki FDM depolu fotovoltaiik panelin yüzey sıcaklık dağılığı
(a) 0.sn (b) 100. sn (c) 200.sn (d) 300.sn (e) 400.sn (f) 500. sn

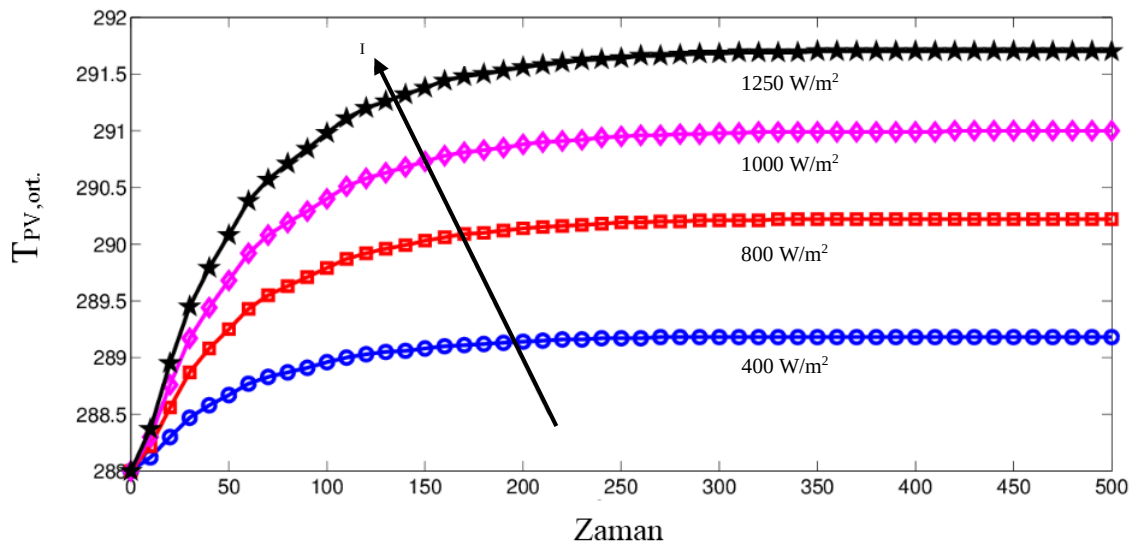


Şekil 3.74. 1000 W/m² ışınlm altındaki PV+FDM+kanatçık (hibrit) sistemin yüzey sıcaklık dağılımı
(a) 120.sn (b) 200.sn (c) 290.sn (d) 370.sn (e) 450.sn

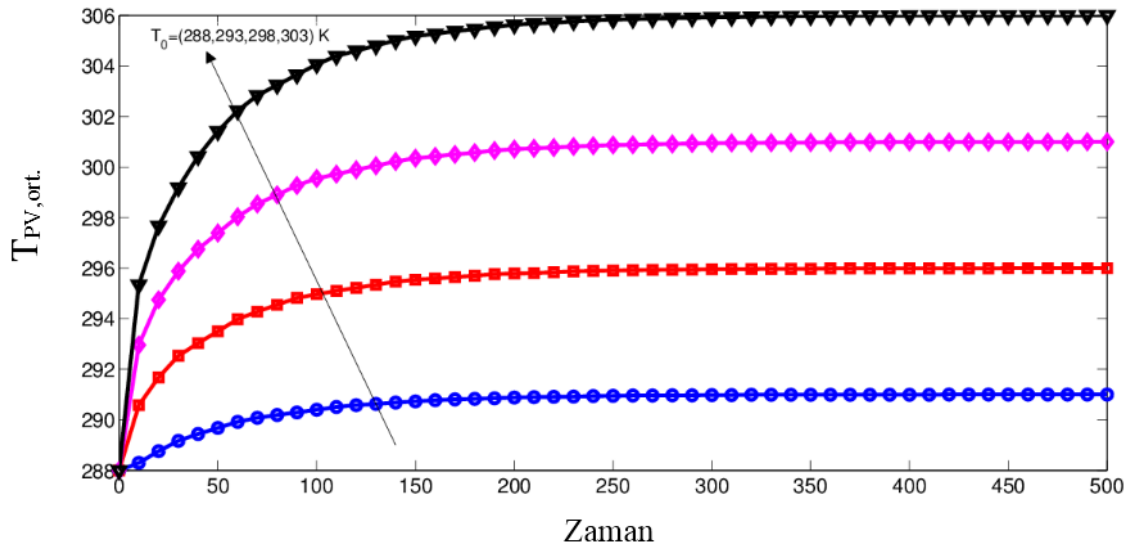
PV ünitadaki ortalama sıcaklık modülün verimiyle doğru orantılıdır. Dolayısıyla burada ortalama yüzey sıcaklığının düşük olması istenmektedir. Kanatçık eklenmeden ve FDM uygulanmadan sadece PV modül için sayısal çalışmanın verdiği sonuçlar arasında rüzgar hızının, ısı akısının ve ortama sıcaklığının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına olan etkileri Şekil 3.75, Şekil 3.76 ve Şekil 3.77’de gösterilmektedir. Rüzgar hızı arttığında, yüzey ısı akısı azaldığında ve ortam sıcaklığı düştüğünde yüzeyin ortalama sıcaklığı azalmaktadır. Ancak bu azalmada en az etkili olan parametre rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı 3 kata yakın bir değerde değiştiğinde ortalama yüzey sıcaklığı sadece yarım derece kadar azalmaktadır.



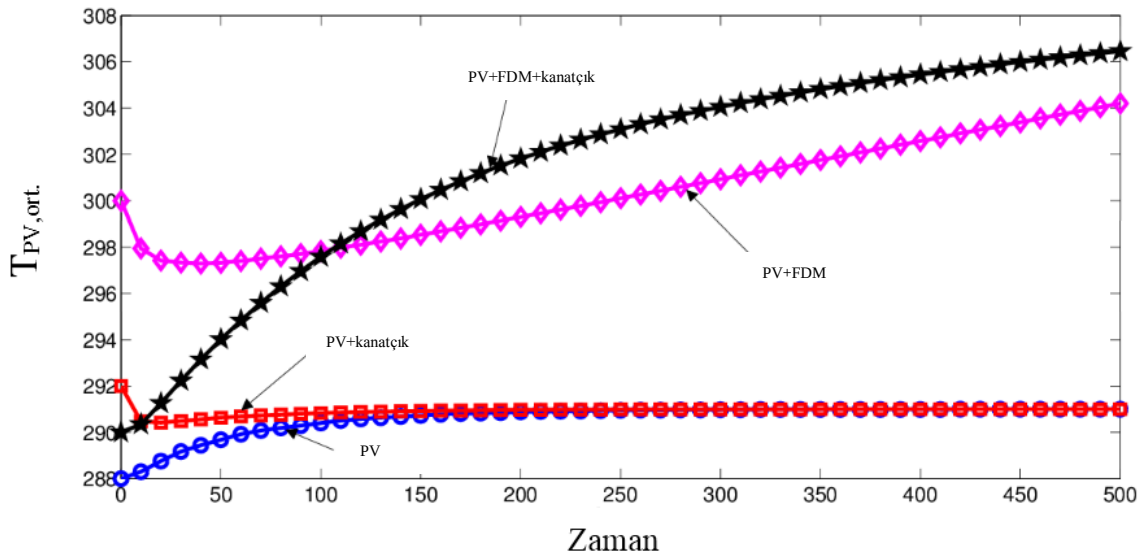
Şekil 3.75. Rüzgar hızının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi ($q=1000$ W/m²)



Şekil 3.76. Isı akısının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi ($v=4,3$ m/s)



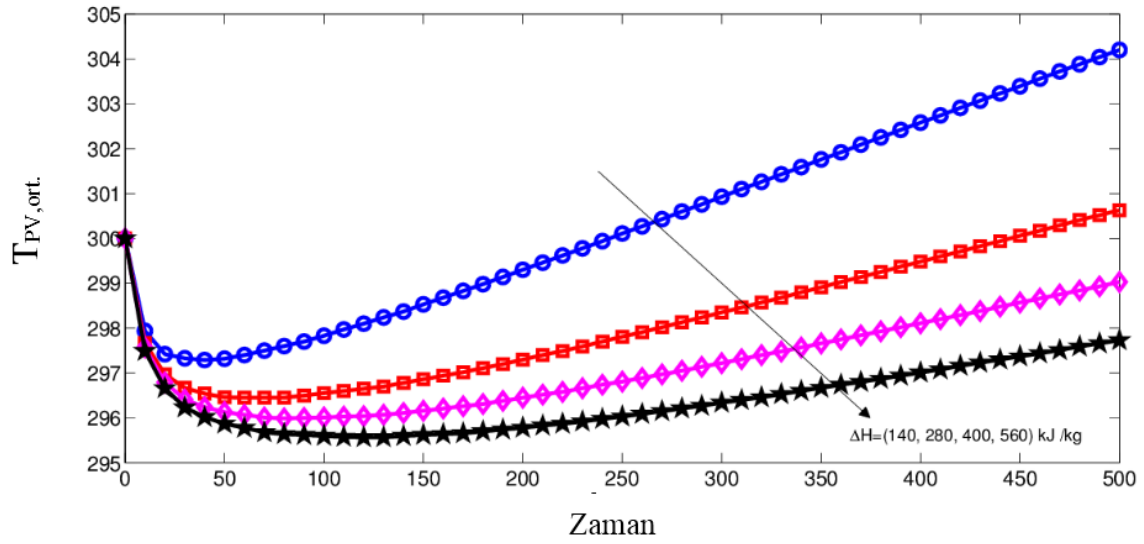
Şekil 3.77. Ortam sıcaklığının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi ($q=1000 \text{ W/m}^2$, $v=4.3 \text{ m/s}$)



Şekil 3.78. Çeşitli yapıların (kanatçık, FDM) PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi ($q=1000 \text{ W/m}^2$, $V_{\text{wind}}=4.3 \text{ m/s}$)

PV modüle kanatçık eklendiğinde, FDM ve FDM+kanatçıkla uygulandığında yüzeydeki ortalama sıcaklık Şekil 3.78'deki gibi verilmektedir. Burada sistemin başlangıç zamandan rejime oturma zamanı sade bir PV modül için beklenildiği gibi kısa olmaktadır. En geç rejime girme durumu FDM kanatçıkla beraber uygulandığında gerçekleşmektedir. Ele alınan konfigürasyonlarda sadece kanatçık uygulandığında sade PV modüle göre geçici rejimdeki ısı transferi dinamikleri haricinde ortalama sıcaklıkta değişim olmamıştır. FDM kanatçiksız ve kanatçıklı halde uygulandığında ise ortalama sıcaklık artmaktadır. Burada ele alınan FDM ve kanatçık durumunda optimum değerler kullanılmadığından böyle bir sonuç olasıdır.

Şekil 3.79’de ise FDM’nin uygulandığı bir durumda FDM malzemesinin gizli erime ısısının yüzeydeki ortalama sıcaklığa olan etkisi gösterilmektedir. Gizli erime ısısının artması yüzey sıcaklığını önemli ölçüde düşürmektedir. Sistem rejime ulaştığında en yüksek erime ısısında en düşük erime ısısındaki değere göre 7-8 °C’lık bir azalma meydana gelmektedir.



Şekil 3.79. FDM gizli erime ısısının PV hücredeki ortalama yüzey sıcaklığına etkisi ($q=1000 \text{ W/m}^2$, $v=4.3 \text{ m/s}$)

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Fotovoltaik paneller standart test koşullarında (STK) 25 °C'de 1000 W/m² güneş ışınımında ve 1,5 AM (Air Mass, hava kütlesi) test edilirler. Bu şartlar altında fotovoltaik panellerin güç ve verim değerleri hesaplanır. Bir panel üzerine güneş ışınımı geldiğinde güneş hücrelerindeki elektronlar harekete geçerek elektrik üretmeye başlarlar. Fakat üretilen gücün yanında sistemdeki ısınmalar bu yenilenebilir enerji türünün tüm performans değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Isınmadan kaynaklanan bu olumsuz sebebin başlıca kaynağı, güneş hücrelerinin ısınmasıyla akım değerinin artması ve gerilim değerinin azalmasıdır. Gerilimdeki azalmaların, akımdaki yükselmelerden daha fazla olması ise çıkış gücünü azaltmaktadır. Fotovoltaik panellerin enerji çıktısı ise akım (I_m) ve gerilim (V_m) değerlerinin çarpımı olduğundan enerji ve ekserji verimleri de bu durumdan olumsuz etkilenmektedir.

Fotovoltaik panellerden daha fazla yararlanabilmek için literatürde PV/T_{hava}, PV/T_{sıvı} gibi hem elektrik hem de termal kazanç sağlayan farklı çalışmalar yapılmıştır. PV/T kollektörlerin ilk yatırım maliyetinin ekonomik olmaması, sistemi ağırlaştırması ya da kullanıcıların termal gereksinimlerinin olmaması gibi durumlardan ticarileşmesi tam olarak gerçekleşmemiştir. Araştırmacıların bazıları yeni nesil güneş hücresi üretim teknikleri ile ilgilenirken diğer araştırmacılar ise mevcut güneş hücrelerinin ya da fotovoltaik panellerin soğutulması üzerine yoğunlaşmışlardır.

Bu doktora tezi çalışmasında da, fotovoltaik panellere bütünleştirilmiş farklı pasif yöntemlerin sistem verimliliğine etkisi araştırılmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 215M892 numaralı proje kapsamında alınan cihaz ve ekipmanlar Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne kurulmuştur. Deneylerden elde edilen veriler;

- Fotovoltaik panellerin her biri aynı güneş ışınımı altında tek bir yük direncinde test edilmiş ve aralarındaki en yüksek güç farkı 0,37 W olmuştur. Bu durum deneysel çalışmalarda ihmal edilebilir bir değerdir.
- Fotovoltaik panellere ayarlanabilir direnç (reosta) bağlanarak optimum yük direnci 2,2 Ω olarak ölçülmüştür.
- Optimum yük direncinde PV panelin akım değeri 3,31 A ve gerilim değeri 14,67 V elde edilmiştir.

- Fotovoltaik panelin arka yüzeyine yerleştirilen 10 adet ısıl çiftlerden ölçülen değerlerde, fotovoltaik sistemlerin homojen bir yüzey sıcaklığına sahip olmadığı ve panelin arka yüzey alanındaki sıcaklık dağılımının 5,26 °C kadar çıktığı görülmüştür.
- Farklı gölgelenme şekilleri ve oranları altında PV modüllerin performansı ile sıcaklık analizi incelenmiştir. Her bir gölgelenme şekli ve gölgelenme oranında sistemlerin akım-gerilim ile güç-gerilim eğrileri çizdirilmiştir. Gölgelenme şekline bağlı olarak gölgelenme oranı arttıkça PV modüllerin çıkış güçlerinde düşüşler gerçekleşirken bazı durumların çıkış güçlerinde kritik seviyelerde azalmalar meydana gelmiştir.
- Gölgelenme şekli 20*20 olan ve farklı oranlarda uygulanan sistemlerde tek bypass diyot etkilenecek diğer iki hücresel dizinin verimli çalışmasını sağlamıştır. Maksimum güç noktaları incelendiğinde yarı yarıya bir düşüş gerçekleşmiştir.
- Gölgelenme şekli 30*18 olan ve farklı oranlarda uygulanan sistemlerde daha fazla güneş hücresi gölgelenmeye maruz kaldığından çıkış gücü bir önceki sistemin gücünden daha az olmuştur.
- Gölgelenme şekli 18*30 olan ve farklı oranlarda uygulanan sistemlerde iki bypass diyot da devre dışı kaldığından panelden enerji üretilmemiştir. Bu durum uygulanan gölgelenme durumlarında en ciddi negatif etkiyi meydana getirmiştir.
- Kısmi gölgelenmeye maruz kalan fotovoltaik panellerin genel olarak yüzey sıcaklıklarının da arttığı görülmüştür. Sıcaklıkların artması ise sıcak nokta oluşumları ile açıklanmıştır.
- Fotovoltaik panellerde en kritik gölgelenme durumu tüm bypass diyotları devre dışı bırakacak olan yatayda bir hücre sırasının tamamen kapanması durumudur. PV sistemlerden maksimum performansı elde etmek istiyorsak bu gölgelenme şekline dikkat edilmelidir.
- PV sistemlerin üzerindeki sıcaklığını düşürmek için alüminyum düz ve %85 gözenekliliğe sahip alüminyum köpük kanatçıklar kullanılmıştır. Alüminyum düz kanatçıklar 7 ve 12 cm boylarında, 20 ve 60 cm uzunluklarında toplam 4 değişken kullanılmıştır. Bu değişkenlere ek olarak kanatçıkların panel arkasına düz ve şaşırtmalı olarak dizilimi ise diğer 2 parametredir.
- Alüminyum düz kanatçıklar kendi içerisinde karşılaştırılarak en ideal sistem araştırılmıştır. Eliminasyon sonunda 7 cm boyunda, 20 cm uzunluğunda, toplam kanatçık sayısı 26 adet olan A5 paneli en iyi performans değerlerini vermiştir.

- Kapalı hücreli alüminyum köpük kanatçıklarda en iyi sonuç 10 mm kalınlığındaki panelde gerçekleşmiştir. Fotovoltaik panelden üretilen güç 41,82 W, 6 mm kalınlığındaki kanatçıklı panelden elde edilen güç 44,74 W ve 10 mm kalınlığındaki kanatçıklı panelde meydana gelen güç 47,88 W olmuştur. Sistemler arasındaki en yüksek güç farkı yine 10 mm kanatçıklı panel ile PV panel arasındadır ve 7,26 W değerindedir.
- Fotovoltaik modüllerin performansını arttırmak için kullanılan diğer bir yöntem olan faz değiştiren malzemeler, uygun erime sıcaklıklarında seçilmediğinde yalıtım malzemesi görevi üstlenip sistem üzerinde negatif etki yaratabilmektedir.
- Literatürde belirtildiği üzere FDM'lerin erime sıcaklığı 25-35 °C arasındadır. Bununla beraber deneylerin gerçekleştirileceği ilin iklim şartları, panelin boyutları ve panelin üretim tekniği gibi etkenler göz önünde bulundurularak FDM seçimi yapıldığında pozitif etki görülecektir.
- Deneylerde kullanılan 3 farklı FDM türünden en iyi sonuçları veren Kalsiyum klorür heksahidrat (tuz hidrat-FDM3) olmuştur. Tuz hidratın erime sıcaklığı 29,17 °C'dir.
- PV sistemin maksimum çıkış gücü 44,36 W, PV+FDM3 maksimum çıkış gücü 46,01 W'tır. Sistemlerin enerji verimleri sırasıyla % 8,98 ve % 9,82, ekserji verimleri ise % 8,19 ve % 10,16'dır.
- Fotovoltaik paneller termoelektrik (TE) modüller ile soğutulduğunda kullanılan TE sayısı performans arttırmada önemli bir parametre olmuştur.
- TE modül sayısı arttıkça panel yüzey sıcaklıklarında azalma meydana gelirken, PV panelden üretilen güç ve verim değerleri de artmaktadır. Ayrıca, TE modül sayısı arttıkça, TE modüllerden elde edilen güç değerinde de artış meydana gelmektedir.
- FDM (Kalsiyum klorür heksahidrat) ile TE modüllü fotovoltaik panellerin performansları karşılaştırıldığında, FDM'li sistemin hem güç üretim değerleri hem de verim değerleri PV+TE sisteminin değerlerinden yüksek çıkmıştır.
- Fotovoltaik modüllerin performansını en iyi arttıran A5 sistemi (alüminyum kanatçık), B2 sistemi (gözenekli kanatçık) ve hibrit sistemler aynı güneş ışınlamı altında karşılaştırıldığında gözenekli kanatçıklı PV panelin yüzey sıcaklığı diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, üretilen güç miktarları ve verim

değerleri de diğer pasif soğutmalı PV panellerin performanslarından yüksek çıkmıştır.

- PV hücrelerinin soğutulmasına yardımcı olmak için hava, kanatçık, FDM ve termoelektrik modülleri kullanan çeşitli tasarımlar, sistem performansını etkileyen parametrelerle birlikte tartışılmıştır.
- PV panelleri soğutulmasında; optimum soğutma çözümünün seçimi, sistem düzeni, kullanılan PV teknolojisi ve sistemin kurulduğu hava koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.
- PV sisteminin kanatçık ile soğutulması, diğer PV soğutma teknolojileri arasında malzeme kullanımının az ve ekonomik olması nedeniyle PV hücrelerinin sıcaklığını termal olarak kontrol etmek için basit ve en iyi tekniktir.
- Bununla birlikte FDM'ler, gizli ısı depolama özellikleriyle ısı soğurması sunar ve bu da onları PV hücreleri soğutma uygulaması için çekici hale getirir. Fakat çoğu FDM'nin yurt dışından getirilmesi ve yurt dışı para birimine bağlı olması olumsuz taraflarıdır. Ayrıca, FDM'lerin paneller üzerinde depolama sıkıntıları olmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmanın ileriki aşamalarında yapılması önerilenler aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Kanatçıkların; en, boy ve kalınlık parametreleri değiştirilerek deneyler ya da sayısal çalışmalar tekrarlanabilir.
- Kanatçıkların dizilim şekilleri panel üzerine farklı açılarda yerleştirilerek çalışmalar tekrarlanabilir.
- İletim katsayısı yüksek olan farklı bir köpük metal üretilerek PV panellerin soğutması yapılabilir.
- Kapalı hücreli alüminyum köpük yerine açık hücreli alüminyum köpük kanatçık etkisi incelenebilir.
- Farklı inorganik, organik FDM türlerinin farklı erime sıcaklıklarındaki türleri incelenebilir.
- Ötektik faz değiştiren malzemelerin PV modüller üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Bir FDM türü ve aynı FDM türünün ısı iletim katsayısı arttırılmış şekli PV panellere uygulanabilir.
- Aynı sayıdaki ve aynı güçteki TE modüller, TE soğutucular ve TE jeneratörler monte edilerek fotovoltaik panellerin hangisinin daha iyi soğutarak performans arttırdığı tespit edilebilir. Ayrıca, bu sistemle beraber hangisinin daha iyi atık ısıdan elektrik ürettiğinin tayini yapılabilir.
- Fotovoltaik panellerin optimum performansı için gerekli olan TE sayısı araştırılabilir.
- Aynı güçteki monokristal, polikristal, ince film modüller üzerinde bu çalışmaların her biri uygulanarak, farklı üretim teknolojilerindeki panellerin tepkileri karşılaştırılabilir.
- Aynı güçteki ve aynı soğutma sistemi uygulanmış paneller, farklı illerde aynı anda ölçümler alınarak iklim koşullarının paneller üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Öztürk, H.H. ve Kaya, D.,** 2013. Güneş enerjisinden elektrik üretimi: Fotovoltaik teknoloji, Umuttepe Yayınları, Kocaeli.
- [2] **Leque, A. ve Hegedus, S.,** 2003. Handbook of photovoltaic science and engineering, John Wiley and Sons Ltd., England.
- [3] **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.
- [4] **Sprachdienste, D.,** 2012. Fotovoltaik sistemler, Çataklı enerji yayıncılık, 1. Baskı, Türkiye.
- [5] **Deniz, E.,** 2013. Güneş enerji santrallerinde kayıplar, *III. Elektrik tesisat ulusal kongre ve sergisi*.
http://www.emo.org.tr/etkinlikler/etuk/etkinlik_bildirileri_detay.php?etkinlikkod=189&bilkod=5414, 27 Aralık 2016.
- [6] http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/0e1fb22d2fcf933_ek.pdf, 27 Aralık 2016.
- [7] **Akgün, M.,** 2006. Parafinle gizli ısı depolamada depo geometrisi optimizasyonu üzerine deneysel bir çalışma, *Doktora Tezi*, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [8] **Beyhan, B.,** 2010. Sera uygulamaları için faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [9] **Öztürk, H.H.,** 2013. Yenilenebilir enerji kaynakları, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [10] **Aslan, O.,** 2014. Faz değiştiren malzemelerle güneş enerjisinin depolanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [11] **Yılmaz, M.Ö.,** 2012. Atık ısının değerlendirilebilmesi için termal enerji depolama sistemleri, *Doktora tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [12] **Sarı, A.,** 2000. Bazı yağ asitleri ve ötektik karışımlarının enerji depolayıcı madde olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- [13] **Tyagi, V.V., Buddhi, D.,** 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1146–1166.

- [14] **Sharma, S.D., Sagara, K.**, 2005. Latent heat storage materials and systems: A review, *International Journal of Green Energy*, **2**, 1-56.
- [15] **Browne, M.C., Norton, B., McCormack, S.J.**, 2015. Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **47**, 762–782.
- [16] **Azman, M.**, 2006. Gizli ısı depolama ve uygulamaları, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [17] **Dincer, I., Rosen, M.A.**, 2002. Thermal energy storage, Systems and applications, John Wiley & Sons. Chicheser, England.
- [18] **Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H.**, 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, **23**, 251–283.
- [19] **Kaya, M.**, 2016. Termoelektrik üreteç sistemi ile atık egzoz gazından elektrik üretiminin deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [20] **Zheng, X.F., Liu, C.X., Yan, Y.Y., Wang, Q.**, 2014. A review of thermoelectrics research- Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **32**, 486–503.
- [21] **Maciá-Barber M.**, 2015. Thermoelectric materials, advances and applications, Taylor & Francis Group.
- [22] **Malik, A.Q. ve Damit, S.J.B.H.**, 2003. Outdoor Testing of Single Crystal Silicon Solar Cells, *Renewable Energy*, **28**, 1433-1445.
- [23] **Radziemska, E., Klugmann, E.**, 2002. Thermally affected parameters of the current-voltage characteristics of silicon photocell, *Energy Conversion and Management*, **43**, 1889-2000.
- [24] **Radziemska, E.**, 2003. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renewable Energy*, **28**, 1-12.
- [25] **Cuce, E., Cuce, P.M., Bali, T.**, 2013. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters, *Applied Energy*, **111**, 374-382.

- [26] **Oğuz, Y., Karakan, A., Uslu, B.,** 2015. Afyonkarahisar’da kurulu olan monokristal, polikristal ve ince film güneş panellerinin verimliliğinin incelenmesi, *Tesisat Mühendisliği*, **149**, 47-58.
- [27] **Sudhakar, K., Srivastava, T.,** 2014. Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic modüle, *International Journal of Ambient Energy*, **35**, 51–57.
- [28] **Eke, R.,** 2000. Fotovoltaik güç sistemlerinde performansın modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, M. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [29] **Dişçigil, M.,** 2007. Güneş panellerinde kojenerasyon ve ekserji analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, M. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [30] **Mastar, E.,** 2011. Güneş panelleri için güneş takip mekanizmasının tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [31] **Sarioğlu, G.,** 2012. Güneş gözelerinde gölgelenme etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, M. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [32] **Kaplan, Z.,** 2012. Fotovoltaik sistem tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [33] **Kaymak, M.K.,** 2011. İstanbul iklim şartlarında rüzgar ve güneş sistemlerinin modellenmesi ve ekserji analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Bakır, C.,** 2012. Fotovoltaik/ısı sistemlerde performans iyileştirmesi ve termoeconomik analiz, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [35] **Öztürk, E.,** 2014. Fotovoltaik panellerin verimine modül sıcaklığının deneysel olarak araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [36] **Keskin, E.,** 2012. Türkiye iklim koşullarında fotovoltaik güç sistemlerinin tasarım ve maliyet analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [37] **Tuna, Ö.,** 2014. Fotovoltaik etki kullanılarak farklı açık alanlardaki dinlenme yerlerinin serinletilmesinin çevresel ve ekonomik faydalarının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [38] **Machniewicz, A., Knera, D., Heim, D.,** 2015. Effect of transition temperature on efficiency of PV/PCM panels, *Energy Procedia*, **78**, 1684-1689.
- [39] **Stropnik, R., Stritih, U.** 2016. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM, *Renewable Energy*, **97**, 671-679.

- [40] **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.
- [41] **Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., Norton, B.,** 2010. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics, *Solar Energy*, **84**, 1601–1612.
- [42] **Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B., Hewitt, N.J.,** 2011. Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 1598–1603.
- [43] **Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., Norton, B.,** 2015. Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates, *Solar Energy*, **115**, 264–276.
- [44] **Hasan, A., Alnoman, H., Rashid, Y.,** 2016. Impact of integrated photovoltaic phase change material system on building energy efficiency in hot climate, *Energy and Buildings*, **130**, 495–505.
- [45] **Huang, M.J.,** 2011. The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 957–963.
- [46] **Björk, R., Nielsen, K.K.,** 2015. The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system, *Solar Energy*, **120**, 187–194.
- [47] **Makki, A., Omer, S., Su, Y., Sabir, H.,** 2016. Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic–thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system, *Energy Conversion and Management*, **112**, 274–287.
- [48] **Benghanem, M., Al-Mashraqi, A.A., Daffall, K.O.,** 2016. Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites, *Renewable Energy*, **89**, 51–59.
- [49] **Kane, A., Verma, V.,** 2013. Performance Enhancement of Building Integrated Photovoltaic Module using Thermoelectric Cooling, *International Journal of Renewable Energy Research*, **3**, 320–324.
- [50] **Lin, W., Shih, T.M., Zheng, J.C., Zhang, Y., Chen, J.,** 2014. Coupling of temperatures and power outputs in hybrid photovoltaic and thermoelectric modules, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **74**, 121–127.

- [51] **Yang, D., Yin, H.**, 2011. Energy conversion efficiency of a novel hybrid solar system for photovoltaic, thermoelectric and heat utilization, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **26**, (2), 662-670.
- [52] **Najafi, H., Woodbury, K.A.**, 2013. Modeling and Analysis of a Combined Photovoltaic-Thermoelectric Power Generation System, *Journal of Solar Energy Engineering*, **135**, 1-8.
- [53] **Rezania, A., Sera, D., Rosendahl, L.A.**, 2016. Coupled thermal model of photovoltaic-thermoelectric hybrid panel for sample cities in Europe, *Renewable Energy*, **99**, 127-135
- [54] **Makki, A., Omer, S., Sabir, H.**, 2015. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 658–684.
- [55] **Ballı, Ö.**, 2008. Kojenerasyon sistemlerin enerji, ekserji ve ekserjiekonomik analiz yöntemleri kullanılarak performansının değerlendirilmesi, *Doktora tezi*, E.O.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [56] **Söğüt, M.Z.**, 2009. Çimento sektöründe döner fırın prosesinin eksergoekonomik optimizasyonu, *Doktora Tezi*, B.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [57] **Karakaslı, E.**, 2012. Değişik iklim bölgelerindeki binaların performansının ekserjetik açıdan değerlendirilmesi, *Yüksek lisans tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [58] **Bayrak, F.**, 2014. Güneş enerjisi ile ısıtılan bir binanın ısıl performansının ekserjetik açıdan değerlendirilmesi, *Doktora Semineri*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [59] **Rosen, M.A., Dincer, I., Kanoglu, M.**, 2008. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact, *Energy Policy*, **36**, 128–37.
- [60] **Hepbaslı, A.**, 2008. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 593-661.
- [61] **Kilkis, B.**, 2012. Exergy metrication of radiant panel heating and cooling with heat pumps, *Energy Conversion and Management*, **63**, 218-224.
- [62] **Skoplaki, E., Palyvos, JA.**, 2009. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations, *Renewable Energy*, **34**, 23–29.

- [63] **Petela, R.**, 2008. An Approach to the Exergy Analysis of Photosynthesis, *Solar Energy*, **82**, 311–28.
- [64] **Petela, P.**, 2003. Exergy of Undiluted Thermal Radiation, *Solar Energy*, **74**, 469-488.
- [65] **Duffie, J.A., Beckman, W.A.**, 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, (Second Ed.), John Wiley and Sons Inc, New York.
- [66] **Holman, J.P.**, 1994. Experimental methods for engineers, 6th ed. Singapore: McGraw-Hill.
- [67] **Esen, H.**, 2008. Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates, *Building and Environment*, **43**, 1046-1054.
- [68] **Ekici, B.B., Gülten, A.**, 2015. Performance analysis of a network-connected photovoltaic system for Elazig, *II. International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara.
- [69] **Şenpınar, A.**, 2006. Güneş açılarına bağlı olarak optimum sabit güneş panelinin açısının hesaplanması, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırması.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Fatih BAYRAK

Doğum Yeri ve Tarihi : Kocaeli/İzmit - 18.07.1985

Lisans : F.Ü. Otomotiv Öğretmenliği

Lisans : F.Ü. Makine Mühendisliği (devam)

Y.Lisans : F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Bilimdalı

SCI kapsamındaki yayım listesi

- 1) Bayrak, F., Oztop, H.F., Hepbasli, A., Energy and exergy analyses of porous baffles inserted solar air heaters for building applications, *Energy and Buildings*, 57, 338-345, **2013**.
- 2) Oztop, H.F., Bayrak, F., Hepbasli, A., Energetic and exergetic aspects of solar air heating (solar collector) systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 21, 59-83, **2013**.
- 3) Bayrak, F., Oztop, H.F., Experimental analysis of thermal performance of solar air collectors with aluminum foam obstacles, *Journal of Thermal Science and Technology*, 35, 11-20, **2015**.
- 4) Bayrak, F., Abu-Hamdeh, N., Alnefaie, K.A., Oztop, H.F., A review on exergy analysis of solar electricity production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 755-770, **2017**.
- 5) Bouchoucha, AM, Bessaïh, R, Oztop, HF, Al-Salem, K, Bayrak, F. Natural convection and entropy generation in a nanofluid filled cavity with thick bottom wall: Effects of non-isothermal heating, *International Journal of Mechanical Sciences*, 126, 95-105, **2017**.

Uluslararası Konferans ve Sempozyumlar

- 1) Bayrak F., Öztıp H.F., Hepbasli A. Energy and exergy analysis of porous baffle inserted solar air collectors, *6th International Ege Energy Symposium and Exhibition*, 142-150, Turkey, Izmir, 28-30 June, **2012**.
- 2) Bayrak, F., Öztıp H.F., Hepbasli A. Comparative energy and exergy analyses of a building using different heating systems with solar collectors, *2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 93-99, Turkey, Istanbul, 10-13 May, **2016**.

- 3) Bayrak, F., Öztop 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**.
- 4) Bayrak F., Selimefendigil, F., Oztop H.F., the analyses of temperatures and power outputs in hybrid Photovoltaic-Thermoelectric (PV/TE) systems, *International Conference on Energy and Thermal Engineering*, Turkey, Istanbul, 25-28 April, 461-465, **2017**.
- 5) Bayrak F., Oztop H.F., Selimefendigil F., Control of efficiency of photovoltaic panels by using aluminum foams, *16th Internatioanl Conferenece on Sustainable Energy Technologies*, Italy, Bologna 17-20 July, Accepted, **2017**.

Projeler

- 1) İçerisinde gözenekli engeller bulunan hava ısıtmalı güneş kollektörünün performans analizi, FÜBAP, TEKF.10.01, **2011**.
- 2) Evsel ya da Endüstriyel Baca gazı atık ısısından termoelektrik jeneratör kullanarak elektrik enerjisi üretimi, FÜBAP, TEKF.15.07, **2015**.
- 3) Enerji depolamalı Fotovoltaik-Termoelektrik hibrid güç üretim cihazının tasarım ve performans karakteristiklerinin incelenmesi, TÜBİTAK 1001, 215M892, **2016**.

Hakemlikler

- 1) Energy and Buildings – 6 adet
- 2) Renewable and Sustainable Energy Reviews – 1 adet
- 3) Journal of Renewable and Sustainable Energy – 1 adet

Ödüller

- 1) “Energy and Buildings” dergisi Ağustos ayı hakemlik ödülü, **2015**.