



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜLERİ  
ORTAK YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mahmut UÇMAN**

**FOTOVOLTAİK TERMAL (FV/T) VE  
BİNA ENTEGRELİ FV/T (BEFV/T)  
SİSTEMLERDE AKIŞKAN  
KULLANIMININ ELEKTRİKSEL  
KARAKTERİSTİK ÜZERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**OSMANIYE – 2017**

**T.C.  
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FOTOVOLTAİK TERMAL (FV/T) VE BİNA ENTEGRELİ  
FV/T (BEFV/T) SİSTEMLERDE AKIŞKAN  
KULLANIMININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİK  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Mahmut UÇMAN**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE  
ARALIK 2017**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ORTAK YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**FOTOVOLTAİK TERMAL (FV/T) VE BİNA ENTEGRELİ  
FV/T (BEFV/T) SİSTEMLERDE AKIŞKAN  
KULLANIMININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİK  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Mahmut UÇMAN**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE  
ARALIK 2017**

## TEZ ONAYI

### FOTOVOLTAİK TERMAL (FV/T) VE BİNA ENTEGRELİ FV/T (BEFV/T) SİSTEMLERDE AKIŞKAN KULLANIMININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİK ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mahmut UÇMAN tarafından 1. Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Halil EROL ve 2. Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Zehan KESİLMİŞ danışmanlıklarında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

- 1. Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Halil EROL .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ
- 2. Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Zehan KESİLMİŞ .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ
- Üye:** Prof. Dr. Elif Derya ÜBEYLİ .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ
- Üye:** Yrd. Doç. Dr. Kemal BALIKÇI .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ
- Üye:** Yrd. Doç. Dr. Ersin ÖZDEMİR .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İSTE

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .... / .... / ..... tarih ve ..... / ... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Coşkun ÖZALP .....  
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu Çalışma OKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: OKÜBAP-2017-PT3-004

*Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.*

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Mahmut UÇMAN



## ÖZET

### FOTOVOLTAİK TERMAL (FV/T) VE BİNA ENTEGRELİ FV/T (BEFV/T) SİSTEMLERDE AKIŞKAN KULLANIMININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİK ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mahmut UÇMAN

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışmanlar: Yrd.Doç.Dr. Halil EROL, Yrd.Doç.Dr. Zehan KESİLMİŞ

Aralık 2017, 95 sayfa

Foto Voltaik sistemler, üzerlerine düşen güneş ışımalarının %15-25'lik kısmını elektrik enerjisine çevirebilirler. FotoVoltaik paneller yarı iletken teknolojisiyle üretilen elemanlardır ve akım/voltaj (I/V) karakteristikleri doğrusal değildir. Bunun yanında I/V karakteristikleri sıcaklıkla da değişmektedir. Panelin soğutulması panelin elektriksel verimliliği açısından önem arz etmektedir.

FV paneli hem termal hem de elektriksel bir kaynak olarak kullanmak verimin artırılması için sık kullanılan bir yöntemdir. Burada amaç, ısınan panelin üzerinden ısı enerjisi uzaklaştırarak elektriksel karakteristiği iyileştirmek ve bunun yanında panelden ısı enerjisi elde etmektir. Bu amaçla FV/T (Foto Voltaic Thermal) paneller kullanılmaktadır. FV/T panellerin bina yüzeyine entegre edilmesi amacıyla üretilen çeşitlerine ise BEFV/T (Building Integrated FV/T) ismi verilmektedir. BEFV/T ile binaların güneş gören yüzeyleri kaplanarak binaların izolasyonu sağlandığı gibi elektrik ve ısı enerjisi de elde edilmektedir. BEFV/T sistemlerin içerisinde panelin soğutulması amacıyla hava ve/veya su gibi akışkanlar geçirilmektedir. Panel üzerindeki ısı enerjisi ile bu akışkanın sıcaklığı yükselmektedir. Yüksek sıcaklıklı akışkan (su veya hava) binanın sıcak su ve sıcak hava ihtiyacı için kullanılmakta böylece hem panel soğutulmakta hem de bina ısıtılmaktadır.

Tez sonucunda literatürde bulunmayan kapalı çevrim kontrole sahip BEFV/T panel uygulaması ile konvansiyonel BEFV/T ye göre elektriksel ve termal verim artışı hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** BEFV/T; FV/T Kollektör; Isıl Verim; Fotovoltaik; Fotovoltaik Termal

## ABSTRACT

### INVESTIGATION ON THE EFFECT OF FLUID USE ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS IN PHOTOVOLTAIC THERMAL (PV/T) AND BUILDING INTEGRATED PV/T (BIPV/T) SYSTEMS

Mahmut UÇMAN

M.Sc., Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisors: Assist.Prof.Dr. Halil EROL, Assist.Prof.Dr. Zehan KESİLMİŞ

December 2017, 95 pages

Photovoltaic (PV) systems can convert 15-25% of the solar energy to electrical energy. Photovoltaic panels are elements produced by semiconductor technology and the current/voltage (I/V) characteristics are not linear. The I/V characteristics vary with temperature. Cooling of the panel is important in terms of electrical efficiency of the panel.

Using PV panel as both a thermal and an electrical source is a commonly used method to increase the efficiency. The aim here is to improve the electrical characteristics by removing the thermal energy from the heated panel and to obtain thermal energy from the panel. PV/T (PhotoVoltaic/Thermal) panels are used for this purpose. Varieties produced for the integration of PV/T panels to the building surface is called BIPV/T (Building Integrated PV/T). With BIPV/T, the surfaces of the buildings are covered with solar insulation and the electrical and thermal energy is obtained as well as the insulation of the buildings. Fluids such as air and / or water are passed through the BIPV/T systems to cool the panel. With the heat energy on the panel, the temperature of this fluid rises. High temperature fluid (water or air) is used for the building's hot water and hot air needs so that both the panel is cooled and the building is heated.

**Key Words:** BIPV/T; PV/T collector; Thermal efficiency; Photovoltaic; Photovoltaic thermal hybrid



*Çok kıymetli aileme...*



## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Halil EROL ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Zehan KESİLMİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yanımdan hiç ayrılmayan, her zaman bana destek olan, yardımlarını, sabırlarını esirgemeyen ve bu zorlu maratonda beni hiç yalnız bırakmayan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak, her türlü desteği veren Osmaniye Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi mesai arkadaşlarıma, Osmaniye Korkut Ata Doğa, Gençlik ve Spor Klübü başkanı Murtaza ÇİL hocama desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma OKÜBAP-2017-PT3-004 no"lu BAP projesi kapsamında yapılmış olup, proje Üniversitemiz tarafından desteklenmiştir. Adı geçen kuruma teşekkür ederiz.

# İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. FV Tarihçesi.....	6
1.2. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminin Önemi.....	9
1.3. Güneş Hücrelerinin Yapısı ve Foto Voltaik (FV) Hücre Modeli.....	10
1.4. FotoVoltaik Model ve Panel'in Elde Edilmesi.....	17
1.5. FV Panellerin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler.....	26
1.6. FV Hücrenin Elektrik Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli.....	32
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	37
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	48
3.1. BEFV/T Sistemi.....	48
3.1.1. BEFV/T Sistemin Yapılmasının Nedenleri.....	49
3.2. Kullanılan Materyaller ve Yöntem.....	49
3.2.1. BEFV/T Sistemin Prototip Şeması.....	51
3.3. Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri.....	53
3.3.1. FV Panel.....	53
3.3.2. FV Panele Bakır Levha ve Bakır Boruların Yerleştirilmesi.....	54
3.3.3. Solar Power Metre.....	54
3.3.4. Lazer Termometre.....	55
3.3.5. Termal Kamera.....	56
3.3.6. DC/DC Dönüştürücü.....	57
3.4. Buck tipi DC/DC Dönüştürücü Tasarımı.....	57
3.5. Deney Düzenegi.....	67
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	69
4.1. Deney Tarihlerindeki Meteorolojik Değerler.....	69
4.2. FV Panelin Termal Görüntüleri.....	70

4.3. FV Panelin Deneysel Verileri.....	71
4.4. FV Panelin Bilgisayar Benzetimi .....	73
4.5. Deneysel Sonuçlarının Simulink Tabanlı Doğrulması .....	77
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	79
KAYNAKLAR .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	89
EKLER.....	91



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Foto voltaik teknoloji ile ilgili önemli tarihler .....	6
Çizelge 1.2. FV hücrelerin verimlilik tablosu.....	25
Çizelge 1.3. FV hücresinde kullanılan elementlerin dünyadaki miktarı ve üretimi .....	25
Çizelge 1.4. FV Panelin SR ve NOCT şartları .....	26
Çizelge 1.5. Bazı yarı iletken malzemelerin sıcaklıkla değişimi .....	29
Çizelge 1.6. Silisyum FV hücrenin sıcaklıkla değişim değerleri.....	29
Çizelge 1.7. Germanyum FV hücrenin sıcaklıkla değişim değerleri .....	30
Çizelge 1.8. FV hücresine ışık türlerinin renk etkisi .....	31
Çizelge 3.1. Kullanılan FV Modülün Katalog Değerleri .....	53
Çizelge 3.2. Temassız kızılötesi termometre teknik değerleri.....	55
Çizelge 4.1. Yapılan deneyler ve elde edilen değerler tablosu .....	72
Çizelge 4.2. Deneysel güç verilerinin Simulink ile karşılaştırılması.....	78
Çizelge 5.1. Güç ve kazanç karşılaştırma tablosu.....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Foto elektrik etki .....	3
Şekil 1.2. Güneş ışığının renk dağılımına göre, elektron koparma kabiliyeti.....	4
Şekil 1.3. Birleşim yüzeyi ve foton enerjisi ile iletkenlik temini.....	11
Şekil 1.4. Foto voltaik hücrenin yapısı .....	12
Şekil 1.5. FV Hücrenin temel devre yapısı .....	13
Şekil 1.6. FV hücresinin fiziki yapısı.....	15
Şekil 1.7. FV hücrenin çalışması.....	15
Şekil 1.8. Foto voltaik teknolojide a-hücre, b-modül ve c-dizi görünümü .....	18
Şekil 1.9. FV modellerin seri-paralel ve karışık bağlantıları .....	18
Şekil 1.10. Farklı ışınım değerlerinde I/V karakteristik eğrisi.....	27
Şekil 1.11. Foto-dönüşüm / Güneş radyasyon eğrisi.....	27
Şekil 1.12. FV panelin sıcaklık değişimli I/V karakteristik eğrisi .....	28
Şekil 1.13. FV panelin sıcaklık değişimi ile P/V karakteristik eğrisi .....	29
Şekil 1.14. Açısız faktörün FV panel üzerindeki etkisi .....	32
Şekil 1.15. FV panelin elektrik eşdeğer şeması .....	33
Şekil 1.16. FV panelin farklı ışınım değerleri için I/V değişim grafiği .....	36
Şekil 2.1. Nominal işletim sıcaklığı ile ışınım arasındaki bağıntı.....	40
Şekil 2.2. FV modüllerin yapı katının üzerine monte edilişi .....	40
Şekil 2.3. Standart hava soğutmalı FV/T sistemi, sistemin hava akış diyagramı ve panelin yan kesit görüntüsü.....	42
Şekil 2.4. Yapılan FV/T sistemin son hali .....	43
Şekil 2.5. Hava ventilasyonlu çatıya monteli BEFV/T prototip sistemi .....	45
Şekil 2.6. Değişik BEFV/T montaj yöntemleri.....	46
Şekil 2.7. Hibrid FV panel yapısı, hava akışı zorlamalı kontrolü .....	46
Şekil 2.8. Önerilen yapının perspektif görünümü, binanın çatısına monte FotoVoltaik Termal (BEFV/T) sistemin entegre şeması .....	47
Şekil 3.1. BEFV/T sistemin blok şeması .....	50
Şekil 3.2. Gerçekleştirilen BEFV/T sistemin prototipi .....	51
Şekil 3.3. Fan soğutmalı BEFV/T sistemin şematik gösterimi .....	52
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin yandan görünüşü .....	52
Şekil 3.5. Kullanılan FV modül .....	53

Şekil 3.6. Tasarlanan BEFV/T sistemin arkadan görünüşü .....	54
Şekil 3.7. Temassız kızılötesi termometre .....	55
Şekil 3.8. Testo 881 termal kamera.....	56
Şekil 3.9. Buck tipi DC/DC Dönüştürücü basit elektrik modeli .....	57
Şekil 3.10. Direnç üzerindeki gerilimin zamanla değişimi .....	59
Şekil 3.11. Buck tipi DC/DC Dönüştürücü devre şeması .....	59
Şekil 3.12. $T_{on}$ zamanında Buck tipi DC/DC Dönüştürücü şeması .....	59
Şekil 3.13. $T_{on}$ zamanında bobin akımı .....	60
Şekil 3.14. $T_{off}$ zamanında Buck tipi DC/DC Dönüştürücü şeması .....	60
Şekil 3.15. $T_{off}$ zamanında bobin akımı .....	60
Şekil 3.16. Bir periyot boyunca bobin akımı .....	61
Şekil 3.17. Buck dönüştürücünün FV panelle kullanımı .....	62
Şekil 3.18. FV panel ve DC yük doğruları.....	65
Şekil 3.19. Tasarlanan DC/DC buck tipi dönüştürücü.....	66
Şekil 3.20. DC/DC Otomatik yük kontrolü.....	66
Şekil 3.21. Buck dönüştürücü elektronik devre tasarımı .....	67
Şekil 3.22. Deney düzeneğinin genel görünümü .....	67
Şekil 4.1. Meteorolojik değerler grafiği .....	69
Şekil 4.2. BEFV/T Sistemin su sirkülasyonlu termal görüntüleri.....	70
Şekil 4.3. BEFV/T Sistemin fan sirkülasyonlu termal görüntüleri .....	71
Şekil 4.4. MATLAB/Simulink benzetim genel blok şeması.....	73
Şekil 4.5. MATLAB/Simulink PV bloğun alt bileşenleri .....	73
Şekil 4.6. MATLAB/Simulink sıcaklığın kelvine dönüştürülmesi.....	74
Şekil 4.7. MATLAB/Simulink foton akımı hesabı .....	74
Şekil 4.8. MATLAB/Simulink modülün doyma akımı hesabı .....	75
Şekil 4.9. MATLAB/Simulink ters doyma akımı hesabı.....	75
Şekil 4.10. MATLAB/Simulink çıkış akımı hesabı .....	76
Şekil 4.11. Farklı sıcaklık değerleri için I/V grafikleri .....	76
Şekil 4.12. Farklı sıcaklık değerleri için P/V grafikleri .....	77
Şekil 5.1. Deney verilerinin I/V karşılaştırma grafikleri.....	79
Şekil 5.2. Deney verilerinin P/V karşılaştırma grafikleri.....	80

## SİMGELER ve KISALTMALAR

ADC	Analog dijital çevirici	(-)
a-Si	Amorf Silisyum	(-)
BEFV/T	Bina Entegreli Foto Voltaik/Termal	(-)
C	Kapasite	(Farad)
cm	Santimetre	(-)
c-Si	Kristalli Silisyum	(-)
D	Doluluk oranı	(-)
DC	Doğru akım	(-)
DGM	Darbe genişlik modülasyonu	(-)
E	Foton enerjisi	(-)
eV	Elektron volt	(-)
FV	Foto Voltaik	(-)
FV/T	Foto Voltaik/Termal	(-)
f	Dalganın frekansı	(Hertz)
G	Güneş ışınım miktarı	(W/m <sup>2</sup> )
Ge	Germanyum	(-)
H	Uzaysal dağılım	(-)
h	Planck sabiti	(-)
I	Akım şiddeti	(Amper)
K	Boltzman sabiti	(J/K)
L	Bobin	(Henry)
MGNİ	Maksimum güç noktası izleme	(-)
mm	Milimetre	(-)
N	FV panel ideallik faktörü	(-)
NOCT	Nominal hücre işletim sıcaklığı	(-)
n	Hücre sayısı	(-)
nm	Dalga boyu	(nanometre)
R	Direnç	( $\Omega$ )
r	Yansıma katsayısı	(-)
Si	Silisyum	(-)
SNL	Ulusal laboratuvar sıcaklık tahmin modeli	(-)

SR	Standart değerlendirme	(-)
STC	Standart test koşulları	(-)
$\alpha$	Soğurma katsayısı	(-)
$\varphi$	Maddeye özgü bir sabit	(-)
$\theta$	Işının foton açısı	(Derece)
q	Elektron yükü	(C)
$E_k$	Elektronun kinetik enerjisi	(Joule)
$E_g$	Yarıiletken bandın enerjisi	(eV)
$G_r$	Referans güneş ışınım miktarı	(W/m <sup>2</sup> )
$I_{in}$	DC/DC dönüştürücünün giriş akımı	(Amper)
$I_L$	Yük direncinin akımı	(Amper)
$I_{out}$	DC/DC dönüştürücünün çıkış akımı	(Amper)
$I_{pv}$	FV dizisi çıkış akımı	(Amper)
$I_s$	Kavşak akımı	(Amper)
$I_{sc}$	Kısa devre akımı	(Amper)
$K_i$	Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı	(A <sup>0</sup> C)
$k_1, k_2$	Yok olma katsayıları	(-)
$n_1, n_2$	Kırıcılık indisleri	(-)
$P_{in}$	DC/DC dönüştürücünün giriş gücü	(Watt)
$P_L$	DC/DC yük direncinin gücü	(Watt)
$P_{out}$	DC/DC dönüştürücünün çıkış gücü	(Watt)
$R_i$	FV dizisi tarafından görülen direnç	( $\Omega$ )
$R_{load}$	Yük direnci	( $\Omega$ )
$R_o$	DC/DC dönüştürücünün çıkış direnci	( $\Omega$ )
$T_c$	FV panel hücre sıcaklığı	(Kelvin)
$T_{on}$	S anahtarının açık kaldığı süre	(Saniye)
$T_{off}$	S anahtarın kapalı kaldığı süre	(Saniye)
$T_r$	FV panel referans hücre sıcaklığı	(Kelvin)
$T_s$	S anahtarının açılıp-kapanma periyodu	(Saniye)
$V_{in}$	DC/DC dönüştürücünün giriş gerilimi	(Volt)
$V_{oc}$	Açık devre gerilimi	(Volat)
$V_{out}$	DC/DC dönüştürücünün çıkış gerilimi	(Volt)
$V_{pv}$	FV dizisi çıkış gerilimi	(Volt)



## 1. GİRİŞ

Güneş, dünyamızdaki yaşamın kaynağıdır ve doğal olarak enerjisinin büyük bölümünü sağlar. Güneşin çapı 1,4 milyon km'dir. Güneş dünyamızdan 151.106 milyon km uzaklıktadır. İçinde, sürekli olarak Hidrojen gazının Helyum gazına dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmektedir. Gazların dönüşümü sırasında, ortaya çıkan ısı enerjisi uzaya yayılmaktadır. Güneşten üretilen bu enerjinin küçük bir kısmı yeryüzüne ışınım yoluyla ulaşmaktadır. Dünya atmosferine ulaşan enerji miktarı 174 petawatt (PW) değerindeyken, yaklaşık olarak bu enerjinin %30'u tekrar uzaya yansır. Geri kalan enerji bulutlar, deniz ve karalar tarafından emilir. Dünya nüfusunun çoğu güneş ışınım miktarının 150-300 W/m<sup>2</sup> olduğu bölgelerde yaşamaktadır. Bu ışınım değeri güneş sabiti olarak kullanılmaktadır. Standart test koşulları olarak, dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınım miktarı metre kare başına 1000 W/m<sup>2</sup> olarak literatürde kabul edilmektedir [1].

Güneş enerjisinden yararlanmak için kullanılan termal uygulamalar, yüksek, orta ve düşük sıcaklık uygulamaları olarak üç gruba ayrılır. Düşük sıcaklık uygulamaları, çok çeşitli güneş ışığı toplayıcıları kullanılarak konut, sera ve su ısıtılması gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Orta sıcaklık uygulamalarında, güneş ışınımı, odaklı toplayıcılarla toplanarak, sanayi için gerekli sıcak su veya buhar elde etmek için kullanılır. Güneş ışınımının sürekliliği için bu tür toplayıcılarda, güneşi izleyen sisteme gerek duyulmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak Mersin ilinde kurulu bulunan Greenway firmasının CSP güneş kulesi tesisi verilebilir. Bu tesiste güneş enerjisiyle tuzlu su çözeltisi 440°C sıcaklık ve 45 bar basınca çıkartılmaktadır. Yüksek enerjili çözelti ile 1MW gücünde enerji çevrimi yapılabilmektedir. Bu sistemin avantajı ise çözeltinin ısı depolarında depolanmasıyla gece saatlerinde de enerji üretebilmesidir [2].

En yaygın uygulama türü, güneş hücreleri kullanılarak yapılan FotoVoltaik (FV) uygulamalarıdır. Güneş hücreleri, üzerine yansıyan ışınımını doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. Bu hücreleri, paralel ya da seri bağlayarak, ürettikleri akım ve gerilim değerleri istenilen seviyeye yükseltilebilir. Üretilen enerjiyi depolayabilmek için akümülatör gruplarına ihtiyaç duyulur.

FV güneş hücreleri, ilk olarak uzay sistemleri için geliştirilmeye başlanmıştır. İlerleyen yıllarda, elektrik iletim hatları ile elektrik enerjisinin iletilmesinin ekonomik olmadığı deniz evleri, yayla evleri, tekne, trafik levhaları gibi elektrik ihtiyacının olduğu yerlerde güneş hücreleri kullanılmaya başlanmıştır.

Güneş hücrelerinden en verimli bir şekilde faydalanmak için, hücre panelinin düzlemi ile güneş ışınımının düşme açısı birbirine dik olmalıdır. Kuzey-güney enlemleri arasında bulunan güneş kuşağı adı verilen bölgede olması verimi artırmaktadır.

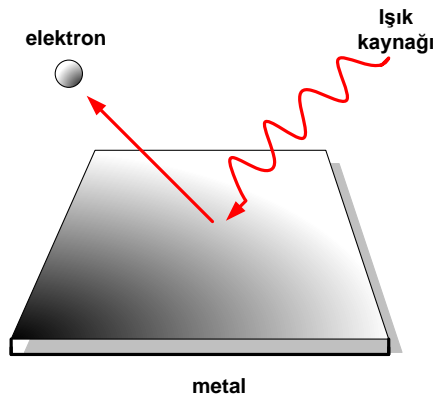
Güneşin bir yılda dünyaya gönderdiği enerji 120.000 TW'dir. Bu enerjinin yalnızca %0.02'si, fosil yakıtlarının ve nükleer enerji gibi enerji kaynaklarının yerini almaya yetecek kadardır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla büyük hız kazanan FV teknolojisi ile güneş ışığının fotoelektrik etki ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Mevcut FV teknolojisinin başlıca iki temel dezavantajı vardır. Bunlardan birincisi FV panellerin verimlerinin % 15-25 arasında olması ve ikincisi ise maliyetlerinin yüksek olmasıdır [3]. Fosil yakıtların çevre üzerine olumsuz etkileri gün geçtikçe artmaktadır. Bu konuda toplumsal bilinç hiç olmadığı kadar artmıştır. Bu doğrultuda temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına özellikle de FV sistemlere olan ilgi artmaktadır. Devletlerin enerji üretim tesislerine verdikleri teşvikler doğrultusunda üretim tesislerinin sayısı artmaktadır. Bu artışa paralel olarak da üretilen panel sayısı artarken birim maliyetleri yıldan yıla düşüş göstermektedir.

Yarı İletkenler; Maddenin en küçük yapı birimi olan atomlar, içerisinde nötronlar ve protonlar bulunan merkezindeki çekirdek ve onun etrafında kendi yörüngelerinde dönen elektronlardan oluşur. Atomun kütesinin büyük bir kısmını çekirdek oluşturur. Kuantum kanununa göre iki yük arasındaki çekme kuvveti yüklerin değeri ile doğru, aralarındaki uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. Atomun kütesinin büyük bir çoğunluğunu çekirdek oluşturduğundan ve proton (+) yüklü elektron (-) yüklü olduğundan çekirdek elektronlara çekim kuvveti uygular. Kuantum kanununa göre, çekirdek etrafın da dönen en yakın elektrona daha yüksek bir çekim kuvveti uygularken, en uzak yörüngede dönen elektrona ise çok daha zayıf bir çekim kuvveti uygulamış olur. Bunlardan dolayı, atomun en son yörüngesindeki elektronlar, atomun yörüngesinden çıkıp yer değiştirebilirler.

Atomun en son yörüngedeki elektron sayısı 4 'den büyük olan maddeler yalıtkan olurken, elektron sayısı 4 'den küçük olan maddeler de iletkenlerdir. Son yörüngedeki elektron sayısı 4 olan maddeler de yarı iletken madde olarak adlandırılır. Örneğin, germanyum ve silisyum elementlerini gösterebiliriz. Silisyum elementinin karakteristik özellikleri daha iyi olduğu için daha çok tercih edilmektedir.

Fotoelektrik Etki; 1905 yılında Einstein, kuantum kuramını genişleterek ışığın kendisinin foton değil, ışık kuantumlarından oluştuğunu ileri sürmüştü ve foto kimyanın temel işlemi olan fotoelektrik olayı açıklamıştır. Einstein'ın bu çalışması kuantum kuramına başlangıçta büyük bir destek sağladığı gibi, kendisine de 1921 yılında Nobel ödülünü kazandırmıştır. Latince'de kuantum, tanecik anlamına gelmektedir. Fizik'te ise, bu kelime atom ve atom altı seviyedeki tanecikleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Kuantum kuramı, bu tür parçacıkların yapısını ve birbiriyle olan etkilerini araştırır. 20. yüzyılda teknolojik devrim yapan görecelik kuramı değil, kuantum kuramıdır [4].

Fotoelektrik etki, bir kaynaktan yayılan yüksek enerjili elektromanyetik dalganın veya ışığın bir madde yüzeyine çarpması sonucunda, bu maddenin yüzeyinde elektron hareketi meydana getirmesidir. Maddedeki bu elektron hareketine de fotoelektron adı verilir. Şekil 1.1'de fotoelektrik etki oluşumu sembolize edilmiştir.



Şekil 1.1. Foto elektrik etki [4]

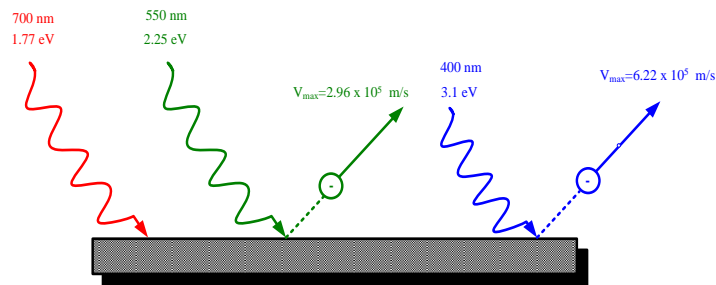
Heinrich Rudolf Hertz fotoelektrik olayını, elektromanyetik dalgaların varlığını göstermeye çalışırken gözlemlemiştir. Bu nedenle fotoelektrik olayına Hertz etkisi de denilmektedir. Deneysel olarak gözlemlenen bu olaya, Albert Einstein tarafından 1905 yılında açıklanana kadar klasik fizik kanunları ile bir anlam verilememiştir.

Maxwell'in temel dalga kuramına göre; çarpan ışığın şiddeti ile yayılan elektronların enerjisi doğru orantılı olmak durumundadır. Yapılan gözlemler sonucunda ise ortaya çıkan elektronların enerjisinin, ışık şiddetine bağımlı olmadığı belirlenmiştir. Ünlü fizikçi Einstein, Planck'ın kuramlarından foton kuramını dikkate alarak, bu foton kuramına bir açıklama daha getirmiştir. Buna göre, gelen ışık dalga değil, foton adında ve her biri aşağıdaki Denklem (1.1a) ile ifade edildiği gibi;

$$E = f \cdot h \quad (1.1a)$$

enerjisine sahip olan parçacıklardan meydana geldiğini açıklamıştır. Ünlü fizikçi Einstein'ın bu modeline göre, ışığın şiddeti ile birim zamanda yayılan foton sayısının doğru orantılı olduğu ortaya çıkmaktadır. Madde üzerine düşen foton,  $f \cdot h$  enerjisinin bir kısmını çarptığı elektronları madde yüzeyinden sökmek için harcar. Harcanan bu enerjiye maddenin iş fonksiyonu adı verilir ve  $\phi$  simgesi ile ifade edilir. Geri kalan foton enerjisi ise maddenin yüzeyinden sökülen elektronların kinetik enerjisi olarak harcanır.

Bu elektron yayılımının tam tersi de, benzer bir şekilde gözlemlenebilir. Bir elektron bir yüzeye çarptığında da, o yüzeyden elektromanyetik dalga yayılır. Bu fotoelektrik etki oluşumu Şekil 1.2'de gösterildiği gibi verilmiştir.



Şekil 1.2. Güneş ışığının renk dağılımına göre, elektron koparma kabiliyeti [5]

Enerjinin korunumu yasası bu fotoelektrik olaya uygulanırsa, aşağıdaki ilişkiler yazılabilir:

Önce meydana gelen toplam enerji = Sonradan meydana gelen toplam enerji

Bu ilişki, aşağıdaki Denklem (1.1b) ile tanımlanabilir.

$$E_k = f \cdot h - \varphi \quad (1.1b)$$

Denklem (1.1b)'de kullanılan,  $\varphi$  maddeye ait sabit,  $E_k$  elektronun kinetik enerjisini,  $h$  planck sabiti değerini,  $f$  frekansı ifade etmektedir.  $\varphi$  sabiti elektronu maddeden dışarı çıkarmak için gereken enerji olarak da ifade edilebilir. Bu değer, çok küçük olması dolayısı ile çoğu kez ihmal edilebilir. Denklem (1.1c) ile,

$$E_k = f \cdot h \quad (1.1c)$$

yeniden düzenlenerek yazılabilir. Bu eşitlik ile elektronun maddeye çarpması sonucu, dalga frekansını veya dalganın kinetik enerjisini kolaylıkla bulabiliriz. Işığın kinetik enerjisi sadece ışığın frekansı ile doğrusallık gösterir. Metalin eşik frekansı,  $\varphi$  fonksiyonu ile aşağıdaki Denklem (1.2a) ve Denklem (1.2b) gibi belirlenir.

$$f = \frac{\varphi}{h} \quad (1.2a)$$

Eşik frekansı veya iş fonksiyonu biriminden;

$$f \cdot h < \varphi \quad (1.2b)$$

olması durumunda, elektron koparmak mümkün olmayacaktır. Bu durumda, eşik frekansı doğrulanmış olacaktır. Elektron koparma işlemi ancak, Denklem (1.3a) ve Denklem (1.3b)'deki gibi,

$$f \cdot h > \varphi \quad (1.3a)$$

Eşitliğin durumunda mümkün olabilecektir. Böylece,

$$f \cdot h - \varphi > 0 \quad (1.3b)$$

olacağından, burada meydana gelen enerji elektronun kinetik enerjisi olarak adlandırılacaktır. Einstein tarafından adlandırılarak verilen bu olay, Millikan'ın yaptığı deneylerle ispatlanmıştır [5].

### 1.1. FV Tarihçesi

FV tarihi, fizikçi Alexandre Edmund Becquerel'in "elektrik akımlarının kimyasal tepkimelerin indüklendiği ışıklardan meydana geldiğini" ve benzer etkilerin diğer bilim adamları tarafından birkaç çeyrek yüzyıl sonra selenyum gibi katılarda gözlemlenmesi ile başlar. Bununla birlikte, gerçek önemli gelişme, 1940'lı yılların sonlarına doğru, ilk silikon güneş hücrelerinin geliştirilerek, %6 verimle endüstride kullanımını kolaylaştıran ilk cihazların tasarlanmasıyla başlamıştır.

FV güneş enerji teknolojisinin gelişimiyle ilgili önemli tarihler Çizelge 1.1'de verilmiştir. İlk silikon güneş hücresi tasarımı, bir FV sistemin pratik eklemelerle güç dönüşüm ünitesi olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tasarımı silisyum (Si) hücreleri, bağımsız olarak kullanılmışlar ve modüler bir tasarım olarak geliştirilmişlerdir.

Çizelge 1.1. Foto voltaik teknoloji ile ilgili önemli tarihler [6]

<b>Kronolojik gelişmeler</b>	<b>Yıl</b>
Edmund Becquerel tarafından FotoVoltaik etkinin keşfedilmesi	1839
Adams ve Day tarafından selenyumda FotoVoltaik etkinin bildirilmesi	1876
Planck tarafından ışığın kuantum yapısının ileri sürülmesi	1900
Wilson tarafından katıların kuantum teorisinin öngörülmesi	1930
Mott ve Schoctky tarafından katı durum teorisinin geliştirilmesi	1940
Barden, Brattain ve Schoctky tarafından transistör' ün keşfedilmesi	1949
Charpin, Puller ve Pearson silisyum FV verimini % 6 olarak belirlemesi	1954
Reynolds ve arkadaşları tarafından kadmiyum sülfid hücresi tasarımı	1954
Vanguard 1 isimli yörüngeli uyduda hücrelerin ilk kez kullanımı	1958

Günümüzde, birçok tip güneş hücresi endüstriyel tasarımla üretilmekte olup, güneş hücresi uygulamalarının yaygınlaştırılması ve geliştirilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Bu tip teknolojilerin gelişimi, FV malzeme çeşidine ve yapı tasarımına bağlıdır.

FV teknolojisindeki gelişmelerin temel amacı, her zaman en az maliyetle en fazla güç elde etmektir. Herhangi bir yapıda, gerilim ve akım seviyelerini istenen duruma getirebilmek için, seri veya paralel bağlı güneş hücreleri bir FV panelinin ana yarı iletken bileşenini oluştururlar.

İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek FotoVoltaik (FV) etkiyi bulmuştur.

1876 yılında, G.W. Adams ve R.E. Day tarafından katılardaki benzer bir olay, ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde gösterilmiştir.

1914 yılında, FotoVoltaik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmıştır.

1954 yılında, gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektriğe dönüştüren FotoVoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında, Chapin ve çalışma arkadaşları tarafından, silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu tarih, FotoVoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilmektedir.

1970 yılına kadar, güneş hücresi uygulamaları çok küçük ölçekte kalmıştır.

Güneş hücrelerinin elektriksel güç sistemi olarak kullanılmasına yönelik araştırma ve geliştirme çabaları, 1954'ler de başlamış olmasına karşın, birinci petrol bunalımı neticesinde gerçek anlamda, 1973 yılı ve sonrasında ilgi oluşmaya başlamıştır. Uzay çalışmalarında elektrik enerjisi üretiminde, kendini ispatlamış silikon kristalinden daha fazla verimliliğe sahip güneş hücreleri üretimi ve araştırmaları devam etmiştir. Diğer taraftan, alternatif olarak daha az yarı iletken malzeme kullanılarak daha ucuza üretilebilecek ince film güneş hücreleri üzerindeki çalışmalar arttırılmıştır [7].

1980 yılında, Delaware Üniversitesi'nde ilk ince film güneş hücreleri %10 verimliliği aşmak için bakır sülfür-kadmium sülfür kullanmaya başlamıştır.

1994 yılında, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, %30 dönüştürme verimliliğini aşan ilk galyum indiyum fosfit ve galyum arsenikten yapılmış bir FV güneş hücresi geliştirmiştir.

1999 yılında, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, ince film FotoVoltaik güneş hücreleri için yeni bir verimlilik rekoru elde etmiştir. Prototip güneş hücreleri için yüzde 18,8'lik bir verimlilik ölçümü, bir önceki rekora % 1 oranında üstün gelmiştir. 2000 yılında, BP Solarex tarafından geliştirilen iki yeni ince film güneş modülü önceki performans rekorlarını kırıyordu. Bu durum da şirketin 0.5m<sup>2</sup>'lik modülü, %10.8 dönüşüm verimliliğine ulaşmıştır. Türünün ince film modülleri için dünyanın en yüksek seviyesi olan 0.9 m<sup>2</sup> modülü %10.6 dönüşüm verimi ve 91.5 Watt güç çıkışını elde etmiştir. Bu gücün dünyanın şu an ulaşabildiği en yüksek güç olduğu belirtilmektedir.

2001 yılında, Japonya Ulusal Uzay Kalkınma Ajansı (NASDA), enerjiyi dünya'ya geri gönderen bir uydu tabanlı güneş enerjisi sistemi geliştirmeyi planladığını duyurmuştu. Büyük güneş panelleri taşıyan bir uydu, enerjiyi yaklaşık 12 mil yükseklikte bir hava gemisine iletmek için bir lazer kullanarak gücünü dünya'ya iletmıştır [8].

2015 yılında, kâğıt kadar ince güneş hücreleri artık endüstriyel bir yazıcıyla üretilebilir hale gelmiştir. %20 güç dönüştürme verimliliğine sahip olan tek şerit ince güneş hücreleri metrekaşe başına 50 watt üretebilir hale gelmiştir. Şeritlerin üretilmesinin esnek ve ucuz olması nedeniyle, gelişmekte olan ülkelerdeki 1.3 milyar kişi için bu durum önemli bir gelişme olarak görülmektedir [9].

Ülkemizde güneş enerjisiyle elektrik enerjisi üretimi çalışmaları 1980'li yılların başında başlamıştır. Ülkemizde bu konudaki ilk çalışma olarak Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Laboratuvarında kurulan, FV hücreler kullanılarak çalıştırılan ısı pompasını örnek olarak gösterebiliriz. 1983 yılından itibaren Elektrik İşleri Etüt idaresi tarafından başlatılan çalışmalar sonucunda, 1998 yılı Haziran ayında Aydın ili Didim ilçesinde ülkemizin ilk FV güneş hücreleriyle çalışan laboratuvar ölçekli güç santrali kurulmuştur. Bu tarihten itibaren güneş enerjisi kullanarak elektrik enerjisi üretimi üzerine çalışmalar hız kazanmış ve yakın zamanda toplam kurulu gücü



50 KW olan dört adet güneş enerji sistemi telekomünikasyon sektöründe kullanılmak üzere Uşak, Kahramanmaraş, Afyonkarahisar ve Muğla'da kurulmuştur.

Ülkemizde güneş hücrelerinin kullanımı büyük bir hızla yaygınlaşmaktadır. Özellikle özel sektörün bu konudaki girişimleriyle ülkemizin birçok yerine güneş enerji santralleri kurulmakta, güneş enerjili trafik ışıkları ve uyarı levhaları üretilmekte, tarım da ve yayla sektöründe geniş kullanım alanları bularak, güneş enerjisi kullanımı her alanda hızla yaygınlaşmaktadır.

Türkiye sahip olduğu coğrafi konumundan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi bakımından oldukça zengindir. Ülkemiz, yıl da 2640 saat güneş ışınımı almakta olup, ortalama güneş enerjisi miktarı ise  $290 \text{ W/m}^2$  civarındadır.

Ülkemizin hemen hemen her bölgesinde güneş enerjisi kullanılarak evlerde sıcak su ihtiyacı karşılanmakta, yine güneş enerjisi; seralarda ısıtma, sıcak su elde etme, konutların soğutulması ve ısıtılması, tünel ve işyeri aydınlatılması, tarımda sulama yapılması, elektrik enerjisi üretimi ve daha birçok sektörde enerjiyle ilgili alanlarda kullanım alanı bulmaktadır.

## **1.2. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminin Önemi**

Güneş, geçmişten günümüze yaşam için en önemli kaynak olarak bilinmektedir. Bilim ve endüstri devrimlerinin gerçekleşmesiyle birlikte, güneşin bir enerji kaynağı olduğu anlaşılmıştır. Enerji üretimi için, gezegenimizin çevre sıcaklığını etkilediği ispatlanmış olan fosil yakıtların yaygın olarak kullanıldığı günümüzde, böyle bir keşfin önemi en üst seviyeye ulaşmıştır. Dünya üzerinde ihtiyaç duyulan enerjinin 10.000 katını, güneş her gün yaymaktadır. Su, biyoenerji veya rüzgâr daha önceki toplumlarda kullanılan enerji kaynaklarıdır ve hepsi bir şekilde güneşin gücünden türetilmiştir. Güneşin enerjisi gücünden yararlanan teknolojiler, endüstri devriminin ilk yıllarında oldukça hızlı bir şekilde gelişmeye devam etmiştir. Bu zamana kadar, toplumların etkinliklerinin artmasıyla, karbondioksit gibi sera gazları artarak,  $0,6^{\circ}\text{C}$  sıcaklık artışı etkisiyle küresel ısınmaya neden olmuştur. Önlem alınmaması durumunda, ileriye yönelik tahminlerde, yüzey sıcaklıklarının  $1,4^{\circ}\text{C}$  ile  $5,8^{\circ}\text{C}$  arasında artacağı öngörülmektedir [10].

Bu tip gelişmeler; muhtemelen kuraklıkla, taşkınlara, deniz seviyesinin yükselmesine, buzulların erimesine ve doğal ekosisteme ve tarımsal üretim için önemli zararlara neden olabilir. Bu nedenle, bu tip emisyonların azaltılması için geleneksel enerji uygulamalarından, yenilenebilir enerji teknolojilerine acilen geçiş yapılmalıdır.

**Güneş Hücrelerinin Özellikleri;** Güneş hücreleri, yarı iletken malzemeden üretilmiş olup algılama yüzeyine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler. Algılama yüzeyleri yuvarlak, kare veya dikdörtgen şeklinde olabilen güneş hücreleri istenilen genişliklerde üretilebildiği gibi en yaygın 0,2 – 0,4 mm kalınlıkta olan silisyum (Si) FV güneş hücreleri kullanılmaktadır [11].

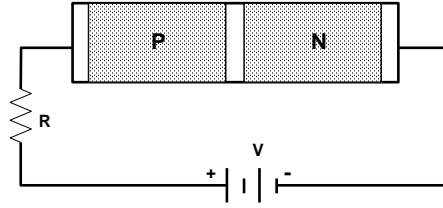
FotoVoltaik ilkeye göre çalışan güneş hücreleri, yüzeyine güneş ışığı düştüğü zaman uçlarında elektrik enerjisi oluştururlar. Güneş hücrelerinin ürettiği elektrik enerjisinin kaynağı, algılama yüzeyine düşen güneş ışığıdır. Bulutsuz ve parlak hava da deniz seviyesinde yeryüzüne düşen ışınım şiddetinin miktarı en fazla  $1000\text{W/m}^2$  civarındadır. Bölgelere göre yılda  $1\text{m}^2$ 'ye 800 KWh ile 2600 KWh arası değerde düşen güneş enerjisi, %5 ile %20 arası verimle elektrik enerjisine dönüştürülebilir [12].

İstenilen değerde güç çıkışı elde etmek için çok sayıda güneş hücresi biri birine seri veya paralel bağlanır, bağlantısı yapılan hücreler düzgün bir yüzeye monte edilir. Elde edilen bu ürüne FotoVoltaik (FV) modül veya güneş hücresi modülü adı verilir. Bu modüller seri veya paralel bağlanıp FotoVoltaik seri oluşturularak, akım ve gerilim seviyeleri de elde edilmiş olur.

### **1.3. Güneş Hücrelerinin Yapısı ve Foto Voltaik (FV) Hücre Modeli**

Yarı iletken teknolojiyle üretilen FV hücreler, genellikle yük taşıyıcıları elektronlardan oluşan N tipi ile yük taşıyıcıları oyuklardan oluşan P tipi yarı iletken maddenin yan yana getirilmesi ile oluşur. Güneş ışınları bu birleşme noktasına düşürülürse dış devreden bir akım geçer. N-P yarı iletken kavşağında, elektronlar P tipi bölgeye geçerek birleşme yüzeyine en yakın bölgelerde boşluk yük taşıyıcısındaki elektron eksikliğini tamamlayıp (-) iyonlar oluştururken N tipi bölgede de (+) iyon duvarı oluşturacaktır. Dış etken olmazsa bu enerji duvarı akımın geçmesini

önleyecektir. Güneş ışın demeti bahsedilen bu bölgeye düşerse, yük taşıyıcı elektronlar çok az oranlarda olduğundan, muhtemelen bir valans elektrona enerjisini bırakacak ve onu P tipi bölgeye doğru itmeye zorlayacaktır. Dolayısı ile dış devrede meydana gelecek olan akım ise P'den N'ye doğru gerçekleşecektir. Birleşim yüzeyi ve kavşağa düşen foton enerjisi ile iletkenlik temini Şekil 1.3'te sembolik olarak verilmiştir.



Şekil 1.3. P – N Birleşim yüzeyi ve foton enerjisi ile iletkenlik temini [11]

Foto voltaik hücrenin yapısı Şekil 1.4'te görüldüğü gibi, foton ışık enerjisini belli nicelikte emmesi ile yük taşıyıcılar çoğunlukta oldukları bölgelere doğru sürüklenirler. Bu durumda kavşaktan  $I_s$  akımı geçer ve N(-), P'de (+) yüklenmiş olur.

$I_s$  akımı, kavşağın ileri yönde kutuplaşmasına ve kavşak potansiyel duvarının alçalmasına sebep olur. Dış devre açık ise P'den N'ye akım geçer ve kavşak potansiyel duvarı tekrar yükselir, P bölgesi (-), N bölgesi (+) yüklenir. Sonra tekrar foton ışık enerjisini belli nicelikte emmesi ile olay devam eder. Bu durumda Denklem (1.4a)'daki gibi;

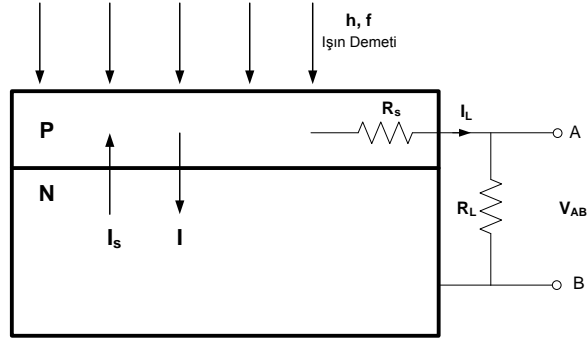
$$I_s = I \quad (1.4a)$$

eşitlik ile olur.

Şekil 1.4'ten  $I_s$  akımının değeri Denklem (1.4b)'de ifade edildiği gibi olur.

$$I_s = I - I_L \quad (1.4b)$$

Bu durumda dış devreye elektrik enerjisi alınır.



Şekil 1.4. Foto voltaik hücrenin yapısı [11]

Yeşil ışık için en büyük foton enerjisi yaklaşık olarak Denklem (1.5)'te ifade edildiği gibi olur.

$$f \cdot h = 2,5 \text{ eV} \quad (1.5)$$

FV hücrenin çalışma prensibi; FV hücrelerin çalışma ilkesi FotoVoltaik olayına dayanır. Üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. FV hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir.

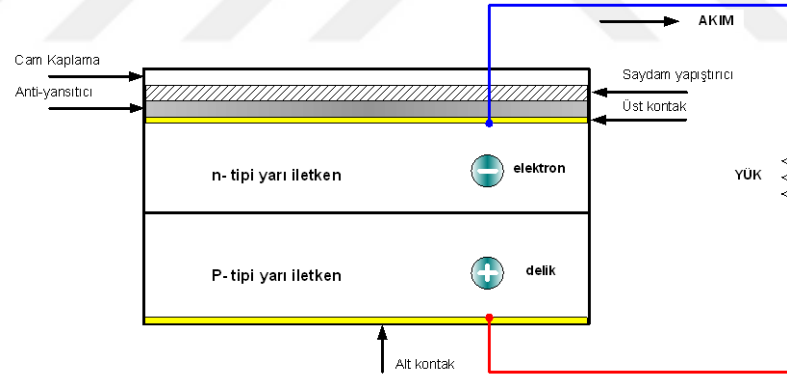
FV hücrenin çalışma ilkesi, p-n jonksiyon diyotla benzerlik gösterir. Işık p-n jonksiyon yüzeyi tarafından soğurulunca, foton enerjisi FV hücreni oluşturan silisyum kristalinin elektron yapısına aktarılır ve jonksiyon etrafında oluşan boşluk alanında, birbirinden ayrılan yük taşıyıcıları meydana gelir.

Jonksiyon alanındaki elektrik yükü taşıyıcıları kendi aralarında bir potansiyel oluşturur ve harici bir devre bağlandığın da yükler arasında akım akışı meydana gelir. Bu durumda  $I^2 \cdot R$  formülü elektrik enerjisine dönüşen güç olup, kullanılmayan ve elektrik enerjisine çevrilemeyen foton gücü ise FV hücrenin sıcaklığını artırır. Bu da istenilmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bir FV hücrenin temel devre yapısı Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, meydana gelen foton akımlarını elde etmek için jonksiyonun her iki tarafına da metal kontaklar monte edilmiştir. FV hücrenin ön yüzü, yansıtmayı en az seviyede tutacak ve mümkün olduğunca çok miktarda ışığı emecek, yansıtma katsayısı en az

olan malzeme ile kaplıdır. FV hücresinin mekanik koruması için en dış yüzeye yansıtma katsayısı az olan bir cam yapıştırıcı ile sisteme monte edilmiştir. Delikler elektronlardan kütleye çok daha ağır olduğundan, dış devreye bağlanan iletkenlerden sadece elektronlar dış devre boyunca hareket eder. N-kontağında biriken elektronlar iletkenler aracılığı ile n-kontağından p-kontağına doğru hareket edip deliklere ulaşarak devreyi tamamlar.

FV hücresinde enerji elde edebilmek için, güneş ışığını soğuracak maddeler, yasak enerji aralığındaki güneş spektrumu ile uyumlu ve istenilen seviyede enerji üretimine izin verebilecek özellikte bir yarı iletken olmalıdır. Bu yarı iletkenler Silisyum (Si), Galyum arsenik (GaAs), Kadmiyum tellür (CdTe) gibi sayılabilir. Bir FV hücresi yarı iletken, p-tipi ve n-tipi bölgeler oluşturularak meydana getirilir. Bu p ve n-tipi birleşim bölgesindeki n-p temas noktasında, kendiliğinden bir elektrik alanı meydana gelir. FV hücresinin elektrik enerjisi üretebilmesi için üretim de kullanılan yarı iletken malzemenin n-p birleşim bölgesinde FV olayın gerçekleşmesi gerekmektedir.



Şekil 1.5. FV Hücresinin temel devre yapısı [13]

FV olayı iki basamakta ortaya çıkar. Bunlar;

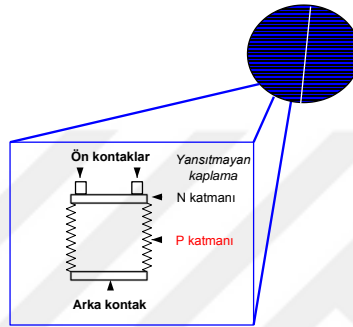
1. n-p birleşim bölgesine güneş ışığı düşürülerek elektron-hol çiftleri meydana getirilir.
2. Oluşturulan elektron-hol çiftleri birleşim bölgesindeki elektrik alanı aracılığı ile birbirinden ayrılır.

Bu şekilde uyarılarak birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, FV hücrenin çıkış uçlarında potansiyel çıkış gücü meydana getirirler. Güneş ışığı alan FV hücrelerinde elektrik alanı kuvveti oluşur. Bu birleşim bölgesinde ışıkla uyarılmış elektronlardan, FV hücresi bir devreye bağlandığında elektrik akımı meydana gelmektedir.

Günümüzde, silisyum malzemesi daha kararlı olduğundan, FV hücreleri genellikle silisyum elementinden yapılmaktadırlar. Işık foton adı verilen enerji parçacıklarından meydana gelir. Fotonları saf enerjiden meydana gelmiş bilardo toplarına benzetebiliriz. Fotonlar bir atoma çarptıklarında zincirleme olarak bütün atomlar enerjilenir. Atomların son yörüngesindeki bir etki ile en kolay kopabilecek durumdaki, atomun son yörüngedeki valans elektronu yörüngesinden çıkarak serbest kalır. Serbest kalan elektronların toplanması ile elektriksel basınç gibi adlandırabileceğimiz potansiyel enerji meydana gelir. Meydana gelen elektrik enerjisi, bir elektriksel yükü çalıştırmak, akü veya akü gruplarını şarj etmek için kullanılabilir. Bu serbest elektronları hücre dışına alabilmek için üretim esnasında FV hücresinin ön yüzeyinde iç elektrostatik bölge oluşturulur. FV hücresinde oluşan bu elektronlar iç elektrostatik bölge yardımı ile serbest duruma geçmesi sağlanmış olur. Silisyum kristalinin elektriksel olarak dengede olmasını önlemek için kristalin içine diğer elementler yerleştirilmiştir. Işıkla karşılaşan silisyum kristalin de, atomlar dengeyi bozar, atomlardan serbest kalan elektronlar diğer hücre veya yüke gitmeleri için FV hücrenin yüzeyine doğru itilirler. FV hücresi yüzeyine ulaşan fotonlar FV hücresi içine doğru akarak, elektrik enerjisine dönüşüp bir üst seviyeye çıkar. Yarı iletkenlerden kopan serbest elektronlar FV hücresi yüzeyine yakın olan elektrostatik bölgeye, bu bölgeden de hücre dışına akarlar. Fotonların ve elektronların bu eyleminden oluşan elektron akışına elektrik akımı denir.

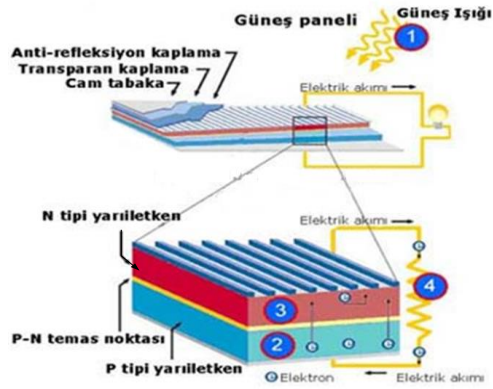
Tek kristalli silisyum FV hücresinin ağırlığı 10 gram civarında olup, rengi mavidir. FV hücrenin ön yüzeyinde de, üretilen akımı toplayacak genellikle bakırdan yapılmış ön kontaklar bulunmaktadır. Bu kontaklara negatif kontaklar adı verilir. Bu kontakların alt kısmında yansıma özelliği olmayan 150mm<sup>2</sup> kalınlığında, bir kaplama tabakası mevcuttur. Bu tabaka olmasaydı, silisyum yüzeyine gelen ışınımın %30'a yakın bir kısmını geri yansıtacaktır. FV hücre yüzeyinde olan bu kaplama tabakası, yansımayı en aza indirmektedir. FV hücrenin ön kısmı, silisyum kristalinden yansıyan ışığın bir kısmını daha kullanabilmek amacıyla, çok küçük konik ve piramit

yüzeylerden tasarlanarak imal edilmiştir. Yansıtıcılığı az olan kaplamanın altında, iki farklı katman halinde FV hücresinin elektrik akımının meydana geldiği yapı bulunur. Bu katmanlar N-katmanı ve P-katmanı olarak adlandırılır. Bu katmanlardan N-katmanı hücrenin negatif tarafını oluşturur, yapısında fosfor atomları eklenmiş silisyum bulunur. Hücrenin pozitif tarafını ise P-katmanı oluşturur, yapısında da bor atomları eklenmiş silisyum bulunur. Bu duruma ait FV hücresinin fiziki yapısı Şekil 1.6'da verilmiştir. FV hücresinin arka yüzeyinde ise, elektronların FV hücresine ulaştığı pozitif kontak adı verilen arka kontak bulunur [13].



Şekil 1.6. FV hücresinin fiziki yapısı [13]

Güneş panelleri, barındırdığı silikon hücreler sayesinde üzerine düşen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren modüler yapılardır. FotoVoltaik prensibine göre çalışan güneş panellerinin üzerine güneş ışığı düştüğünde panel uçlarında doğru akım (DC) üretilir. FV hücresinin çalışması Şekil 1.7'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 1.7. FV hücresinin çalışması [14]

Şekil 1.7'den FV hücrenin çalışması aşağıdaki gibi açıklanabilir;

1. Güneş ışığı FV hücrenin üzerine düşer ve FotoVoltaik hücreler tarafından soğurulur. FV hücrelerden çok elektrona sahip P tipi yarıiletken madde ve az elektrona sahip N tipi yarıiletken madde bulunur.
2. Güneş ışığı P tipi yarıiletken maddeden elektron koparır.
3. Enerji kazanan elektronlar N tipi yarı iletken maddeye doğru akarlar.
4. Bu sabit tek yönlü elektron akışı doğru akımı (DC) meydana getirir. Elektronlar kurulan devreler boyunca akarak hücrelerin şarj edilmesinde ya da farklı alanlarda kullanılır ve P tipi yarıiletken maddeye geri döner.

Üretilen FV hücreler, ortam sıcaklığı  $25^{\circ}\text{C}$ , ortalama ışınım şiddeti  $1000\text{ W/m}^2$  ve hava kütle oranı 1,5 olan standart test koşullarında STC (Standard Test Conditions) test edilerek tüketiciye sunulmaktadır. Buradaki hava kütle oranı, atmosferin güneş ışığını geçirme oranıdır. Güneş tam tepedeki iken diğer bir deyişle güneş ışınlarının dünya yüzeyine düşme açısı  $90^{\circ}$  olduğunda bu oran 1 olarak alınmaktadır. Atmosferde soğurulan ve yansıtılan ışınım miktarı arttıkça hava kütle oranı da artacaktır. Buna bağlı olarak FV hücrenin ürettiği enerji miktarı da bu oranda azalacaktır. Bu nedenle bu değer son derece önem arz etmektedir.

Bir silisyum FV güneş hücresi normalde 0.5 volt civarında elektrik üretir. FV hücrelerini seri bağlayarak istenilen değerde gerilim elde edilebilir. 15-17 Voltluk güneş paneli elde etmek için 30 ile 36 arası FV hücrelerini seri bağlamak gerekir. Bu değerdeki güneş paneli 12 voltluk bir aküyü şarj etmek için ve genel kullanımlar için yeterli sayılabilir. Akım değerlerini artırmak için aynı türden FV hücreli güneş panelleri paralel bağlanabilir. Farklı akım ve gerilim değerlerinde güneş panellerini bulmak günümüzde çok kolaydır. Yarı iletken silisyum hücrelerin seri bağlanmasıyla modüller, bu modüllerin seri yada paralel bağlanmasıyla örgüler oluşturulur.

FV paneller seri ve paralel bağlanabilecek şekilde uygun bağlantı aparatlarıyla birlikte üretilmektedir. Bu durum Şekil 1.9'da ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.



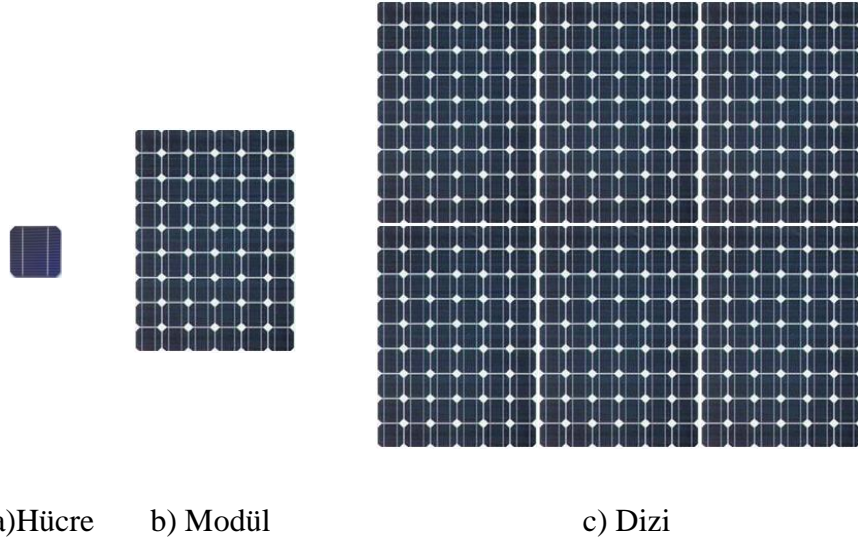
#### 1.4. FotoVoltaik Model ve Panel'in Elde Edilmesi

FotoVoltaik Yunanca, ışık anlamına gelen photo ve elektrik akımını geliştiren makineyi tasarlayan Alessandra Volt'tan esinlenerek gerilim anlamına gelen voltaic kelimelerinin birleşmesinden oluşur. Güneş hücreleri ( fotovoltaik hücreler ), ilk kez 1839 yılında Becquerel tarafından araştırılmıştır. Güneş hücreleri, güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürebilen, hareketli mekanik parçaları olmayan, bakımı kolay ve ömürleri uzun olan elektronik sistemlerdir.

Güneş hücreleri, genel olarak yüzeylerine düşen güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken maddelerden tasarlanarak üretilmiştir. Yüzeyleri; kare, dikdörtgen veya daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücrelerinin alanları, genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarındadır. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak %5 ile %20 arasında bir verimle elektriğe dönüştürülebilir. Verimi %10'un altında olan güneş hücreleri, uygulamada verimli ve ekonomik değildir. Yarı iletken güneş hücrelerinin verimi; laboratuvar koşullarında %10-%30, uygulamada ise %5-%20 arasında değişir. Uygulama koşullarında verimi %15 olan güneş hücresi iyi olarak değerlendirilir [15].

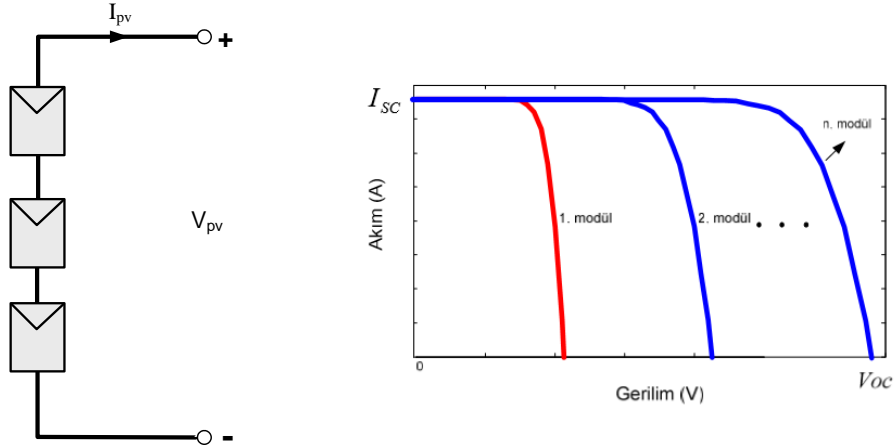
Tek bir FV hücreden elde edilen enerji oldukça azdır. Güç çıkışını arttırmak amacıyla, çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel veya seri bir durumda bağlanarak modülleri oluştururlar. Bu yapıya güneş hücresi modülü veya FotoVoltaik modül adı verilir. Şekil 1.8'de FotoVoltaik teknolojiye kullanılan hücre, modül ve dizi ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

Güç ihtiyacına bağlı olarak FV modülleri birbirine paralel yada seri bağlayabiliriz. Seri olarak bağlanan FV hücreler, güneş panelinin terminal gerilimini; paralel bağlanan FV hücreleri ise panelden çekilebilecek akımı artırır. Dolayısı ile büyük miktarda elektrik üretmek için paneller birbirine seri-paralel bağlanarak solar FV dizisini meydana getirirler. Bu durum, Şekil 1.9'da FotoVoltaik modüllerin seri, paralel ve karışık bağlantıları ayrı ayrı verilmiştir. Böylece, güçleri birkaç Watt'tan (W) Mega Watt (MW) düzeyine kadar değişen büyüklükte sistemler oluşturulabilir.



Şekil 1.8. Foto voltaik teknolojide a-hücre, b-modül ve c-dizi görünümü

Hücrelerin Seri Bağlanması; Modül gerilimlerinin artırılması için hücrelerin seri bağlanması gerekmektedir. Hücrelerin seri bağlantıları ile ilgili devre şeması ve akım-gerilim karakteristik eğrileri Şekil 1.9(a)'da ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. FV Hücrelerin seri bağlanmasıyla modül gerilimi Denklem (1.6a) ve Denklem (1.6b)'deki gibi hesaplanmaktadır.

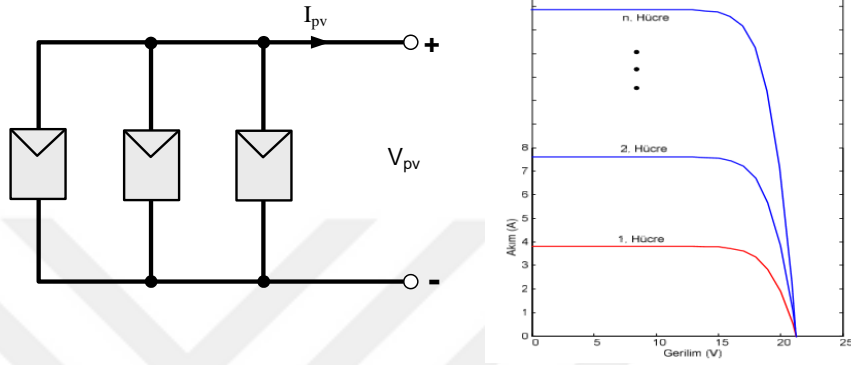


Şekil 1.9(a). FotoVoltaik modellerin seri bağlantısı

$$V_{Modül} = n \cdot V \quad (1.6a)$$

$$V_{Modül} = n \cdot (V_d - I \cdot R_s) \quad (1.6b)$$

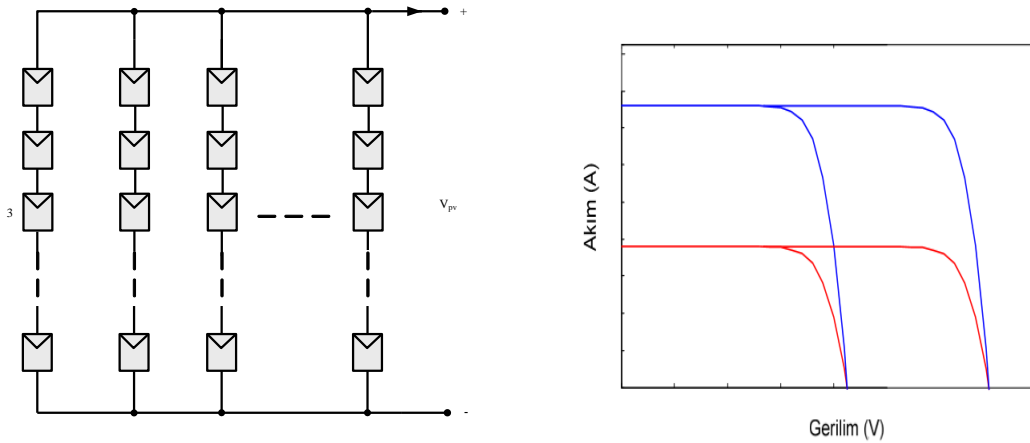
Hücrelerin Paralel Bağlanması; Modüllerden yüksek akım almak için FV hücrelerin, paralel bağlanması gerekmektedir. FV hücrelerin paralel bağlanması ile ilgili devre bağlantı şeması ve akım-gerilim arasındaki bağıntı Şekil 1.9(b)'de gösterilmiştir. Modüllerin sağlayacağı akım miktarı, modüllerin paralel bağlanması ile doğrudan ilgilidir. Bu durum ile ilgili bağlantıdan elde edilecek akım miktarı Denklem (1.7)'de gösterildiği gibi olur.



Şekil 1.9(b). FotoVoltaik modellerin paralel bağlantısı

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (1.7)$$

Hücrelerin Seri-Paralel Bağlanması; FV modüllerden istenilen seviye de güç elde edebilmek için, FV hücrelerin seri ve paralel bağlantıları birlikte yapılmak zorundadır. Seri ve paralel bağlantıların bir arada olduğu devre şemalarına karışık bağlantı da denilmektedir. FV hücrelerin seri ve paralel bağlantıları ile ilgili devre bağlantı şeması ve akım-gerilim arasındaki bağıntı Şekil 1.9(c)'de gösterilmiştir.



Şekil 1.9(c). FotoVoltaik modellerin seri-paralel (karışık) bağlantısı

Şekil 1.9(c)'deki seri ve paralel devre modellerinden panel çıkış akımını Denklem (1.8)'deki gibi ifade etmek mümkün olur.

$$I_{Panel} = \sum_{i=1}^{n_p} I_{i(Modül)} \quad (1.8)$$

FV hücrelerin seri bağlanması durumunda meydana gelecek olan modüllerin aynı ve modül üzerine yansıyan ışınımın miktarının da aynı olduğu varsayılarak, genel akım ifadesi Denklem (1.9)'da verildiği gibi yazılır.

$$I_{Panel} = n \cdot I_{i(Modül)} \quad (1.9)$$

FV hücre çeşitleri; FV teknolojisinin, yapım çeşitleri ve kullandıkları maddeler açısından oldukça zengindir. FV hücresi yapımı için kullanılmakta olan birçok madde mevcuttur. FV güneş hücrelerinin yapımında yaygın olarak kullanılan bazı malzemeler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 1- Kristal silisyum (c-Si)
- 2- Amorf silisyum (a-Si)
- 3- Galyum arsenik (GaAs)
- 4- Kadmiyum tellür (CdTe)
- 5- Bakır indiyum diselenid (CuInSe<sub>2</sub> – CIS)
- 6- Optik yoğunlaştırıcı hücreler

Ayrıca literatürde yüzlerce maddenin üzerinde de çalışmalar devam etmektedir [16]. Aşağıda literatürde bilinen bazı FV hücrenin çeşitlerine kısaca değinilmektedir.

1. Kristal silisyum FV hücreleri (c-Si); FV hücre yapımında en çok kullanılan maddelerden biridir. Silisyum FV hücreler ekonomik olması ile birlikte ayrıca teknolojinin üstünlüğü dolayısı ile de çok tercih edilmektedir.

Kristal silikon FV hücreleri, dünya'daki güneş panellerin neredeyse %90'nını oluşturmaktadır. FV panellerde kullanılan silikonun birçok formları benzerdir. Bunlardaki ana fark, silikonun saf olmasıdır. Saf silikon, daha mükemmel silikon molekülleridir, hizalanması daha doğrusaldır. Güneş panellerinin verimliliği; saflık ile paralellik gösterirken, silikonun bu saflığını arttırmak için kullanılan işlemler

oldukça pahalıdır. Kristal silisyum, mono ve polikristal silisyum güneş hücrelerinin temelini oluştururlar.

2. Mono kristal silisyum FV hücreler; Mono kristal güneş hücrelerinde malzemenin atomik yapısı homojendir. Mono kristal güneş hücreleri verimlilik kapasitesi diğer hücrelere göre en yüksek olan güneş hücresi çeşididir.

Avantajları; Mono kristal silisyum FV hücreler yüksek dereceli silikondan yapılmıştır. Bu sebeple mono kristal FV hücreler en yüksek verimlilik oranlarına ulaşabilirler. Mono kristal güneş panelleri verimlilik oranları genellikle %15-%20 oranındadır. Mono kristal güneş panelleri, daha az güneşte daha çok üretim sağlayabilir. Akım, volt değerleri orantılaması farklıdır. Mono kristal ve polykristal güneş panelleri uzun ömürlüdür. Çoğu güneş paneli üreticileri mono kristal güneş panelleri üzerinde 25 yıl garanti sunmaktadır. Düşük ışık koşullarında benzer durumlardaki polikristal güneş panellerine göre daha iyi bir performans göstermektedirler.

Dezavantajları; Mono kristal güneş panelleri iyi bir performans göstermesine karşın pahalı bir malzemedir. FV panel kısmen gölge veya kar ile kapalı ise, bu olumsuz durum tüm paneli üst düzeyde etkiler. Dolayısı ile tüm paneli yıkamak gerekebilir. Mono kristal FV güneş panelleri, sıcak havalarda daha verimli olmaktadır.

3. Polikristal FV hücreler; Polikristal güneş hücrelerinde malzeme birçok mono kristalden oluşur ve atomik yapısı homojen değildir. Polikristal güneş hücrelerinin verimlilik kapasitesi yaklaşık %16 olup mono kristal FV güneş hücrelerine göre daha düşük, CIS güneş hücrelerine göre ise daha yüksektir. Polikristal FV güneş hücrelerinin maliyeti mono kristal FV güneş hücrelerinden daha düşük olduğu ve verimlilik kapasitelerinin maliyete oranı yüksek olduğu için bu tip güneş hücreleri en sık üretilen güneş hücreleridir.

Avantajları; Polikristal silisyum yapmak için kullanılan yöntem daha basit ve daha az maliyetlidir. Atık silikon tutarı mono kristal ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Polikristal FV güneş panelleri; mono kristal FV güneş panellerine göre daha düşük ısı toleransı göstermektedir.

Dezavantajları; Polikristal tabanlı güneş panelleri verimliliği genellikle %13 ile %16 aralığında olmaktadır. Düşük saflı silikon, polikristal güneş panelleri mono kristal güneş panelleri gibi oldukça verimli değildir. Monokristal güneş panellerine göre aynı güç üreten sistem alanı daha büyüktür. Bu durum malzeme kalitesi ve markaya göre değişkenlik göstermektedir.

4. Amorf silikon FV hücreler; Amorf silisyum FV hücreleri, İnce film FV hücre teknolojisinin en önde gelen örneklerinden birisidir. Amorf silikon FV hücreleri kristal yapılmayan güneş hücreleridir. Amorf FV güneş hücrelerinin yapısı nedeniyle verimlilik kapasiteleri %5 ile %8 aralığında olup, diğer FV güneş hücrelerine göre düşük olan değerlere sahiptir. Bu FV hücreler, çok kısa sürede özelliğini kaybederek çıkışlarında azalmalar görülmektedir.

Son yıllardan itibaren, amorf maddeler ve daha çok yarı iletken olan amorf maddeler, optik, elektronik ve manyetik özellikleri yönünden çok büyük önem kazanmış durumdadır. Çünkü amorf yarı iletkenler, başta FV hücreler olmak üzere, ince film transistörler, dedektörler, gösteri cihazları, hafıza kartları ve anahtarlama devreleri gibi bir çok yerde geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Bir çok araştırmacı da dolayısı ile bu yarıiletken maddenin özelliklerini kavrayabilmek ve yeni projeler geliştirmek için büyük çalışmalar sarf etmektedirler.

Kristal yapılmı FV hücrelerinin aksine, amorf yarıiletkenli atomlardan yapılmı FV hücrelerinde uzun mesafelerde düzensizlik olmasına karşın kısa mesafelerde düzenlilik mevcuttur. Kristal atomları için geliştirilen ve atomlar arasındaki periyodik potansiyel kavramını geliştiren Bloch teoremi [17-18] ve geliştirilen diğer modellemeler amorf yarı iletken yapıların elektronik band yapısının açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Farklı enerji bant modellemeleri ve çalışmalarla bu tür yarı iletkenlerin optik özellikleri ve elektriksel iletkenlikleri anlatılmaya çalışılmıştır. Gerçekleştirilen tüm bu modellemeler Anderson teorisine dayanılarak yapılmıştır. Anderson teorisi enerji bant uçlarındaki yerel enerji miktarlarını dikkate alır [19]. Yapılan bu çalışmalar da değişik modellerin kullanılması, farklı amorf yarı iletkenlerin değişik yapısından kaynaklanmaktadır. Yapılarındaki alışmışlığın dışında ki düzenden dolayı, amorf yarıiletkenlerin elektronik yapısı tam olarak

anlaşılammış olup, amorf yarı iletkenlere bağı bir çok kullanım alanı belirsizliğini sürdürmektedir.

Kristal yarı iletkenlere göre Amorf yarıiletkenlerin en büyük avantajı, geniş yüzeyli amorf yarı iletken ince filmlerin üretilmesi, kristal filmlere göre daha ucuz olmasıdır. Güneşten gelen, enerji kaynağımız olan güneş ışınlarından yeterli miktar da faydalanmak için mümkün olduğunca geniş yüzeyli FV hücrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Geniş yüzeyli FV hücrelerinin üretmenin zorluğundan ve maliyetinin artmasından dolayı, amorf yarı iletken FV hücrelerinin ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Kristal yarı iletken FV hücreler, amorf yarı iletkenli FV hücrelerinden daha verimlidir. Yapılan deneyler ve teorik çalışmalarla bir çok FV hücrelerle çalışan elektronik cihazlar daha ucuza mal edilmektedir.

5. Semikristal (yarı kristal) silisyum FV hücreler; Bu hücrelerin, silisyum kristalleri sıvı silisyumun soğutulmasıyla bir araya gelen küçük silisyum kristallerinden meydana gelir. Semikristal hücrelerin verimleri %14'e yakın olup, bu FV hücrelerin verimliliklerini bir araya gelmiş silisyum taneciklerinin temas yüzeyindeki iletim kayıpları belirler.

6. Ribbon silisyum FV hücreler; Bu FV hücreler, malzeme sarfiyatının az olması amacıyla ince levhalar halinde silisyum katmanlarından yapılırlar. Bu FV hücrelerin rengi ise koyu mavi olup ağırlığı 10gr'dan azdır. Çeşitli üretim yöntemleri ile elde edilen ribbon silisyum FV hücreleri, halen teknolojik geliştirme seviyesinde bulunmaktadır. Laboratuar şartlarında verimleri %13 ile %14 arasında olduğu bilinmektedir.

7. İnce film FV hücreler; Bu teknikte, FV hücreleri soğurma özelliği daha yüksek olan maddeler kullanılarak daha ince FV hücreleri yapılır. İnce film FV hücreler, tek kristal hücrelerin 1/500'ü kalınlığında olabilir. Örneğin Kristal silisyum FV hücrelerinin soğurma katsayısı, amorf silisyum FV hücrelerinin soğurma katsayısından daha azdır. Güneş ışınımının dalga boyu katsayısı 0.7 mikrondan küçük olan bir bölgedeki güneş ışınımını 1 mikron inceliğinde amorf silisyum FV hücresi soğrulabilirken, aynı bölgedeki kristal silisyum FV hücresi ise aynı ışınımı soğurabilmesi için 500 mikron kalınlığında olması gerekmektedir. Tüm bunların

ışığında, amorf yapılı FV hücrelerin kullanılması, daha az malzeme kullanımı ve montaj kolaylığı gibi avantajlar sağlamaktadır.

8. Bakır indiyum diselenid ( $CuInSe_2$ ) FV hücreler; Periyodik tabloyu oluşturan elementlerden 1. 3. ve 6. gruptaki elementlerden üç veya daha fazlasından oluşan bu bileşiğin, yarı iletkenleri soğurma katsayıları oldukça yüksektir. Güneşin spektrumu ile yasak enerji aralıkları uyuşacak bir şekilde ayarlanabilir. Selenyum, indiyum ve bakır elementlerinden oluşan bileşik yarı iletkenle başlayan bu grup CIS güneş hücreleri olarak bilinmektedir. CIS güneş hücreleri, kadmiyum tellur ( $CdTe$ ) güneş hücrelerine en kuvvetli rakip olarak görülmektedir. Galyum ( $Ga$ ) elementinin CIS ince film hücrelerinin içerisine katılması ile verimlilikleri yükseltilmektedir. Kullanılan yarı iletkeni meydana getiren element sayısı çoğaldıkça gereken malzeme özelliklerinin denetimi ve üretim teknolojisi oldukça karmaşık duruma gelmektedir. Bu hücrelerin laboratuvar ortamındaki küçük alan hücre verimliliği %18'e kadar çıkarken, yüzey alanı  $900cm^2$  olan modüllerin verimlilikleri ise %15 civarında olmaktadır. CIS hücrelerinin üretiminde kullanılan teknolojilerden iki tanesi ön plana çıkmaktadır. Bunlardan biri, kullanılan elementlerin aynı anda vakumda buharlaştırılmasıdır. İkinci yöntem ise, herhangi bir teknoloji kullanılarak büyütülen bakır indiyum ince film alaşımının selenyumla tepkimeye girmesidir. İki üretim yönteminde de soğurucu olarak CIS yarı iletken kullanılmaktadır. CIS yarı iletken ile kadmiyum sülfür ( $CdS$ ) bir araya getirilerek çok çeşitli eklem diyot meydana getirilir. Bu yöntem güneş hücresi üreten bir çok firma tarafından tercih edilmektedir. CIS güneş hücrelerinin test altındaki uzun süreli modül verimlilikleri %10'un altında kalmaktadır.

CIS güneş hücrelerinin ince yapıli olması ile montaj kolaylığı, maliyetinin düşmesi, geniş yüzeylerde uygulamasının kolaylaşması, hafiflik gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Mono kristal güneş hücrelerinin üretimleri teknik bakımdan diğer hücrelere göre daha zor ve daha çok zaman aldığından mono kristal FV hücrelere göre maliyeti daha fazladır. Ancak sistemin uzun süreli kullanımlarında mono kristal FV güneş hücreleri verimlilik ve dayanıklılık açısından daha çok tercih sebebi olmaktadır.



FV hücre güç verimlilikleri; FV hücrelerin verimlilikle ilgili tabloları teknolojinin hızla gelişmesi ile geçerlilikleri oldukça kısa sürede yok olmaktadır. Ancak, Fraunhofer Enstitüsü tarafından yapılan özet bir çalışma, karşılaştırma yapmak ve ön bilgi olması nedeni ile FV hücrelerin verimlilikleri gösteren tablo Çizelge 1.2'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 1.2. FV hücrelerin verimlilik tablosu [20]

<b>FV Hücrenin Cinsi</b>	<b>Alan(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Verim (%)</b>	<b>Üretilen Yer</b>
Tek Kristalli Silisyum	4.00	24	UNSW Üniversitesi Sidney- Avustralya
Çok Kristalli Silisyum	21,2	17,4	ISE, Freiburg, Almanya
Amorf Silisyum	1	14,7	United Solar Firması
(Cu/In, Ga) Se <sub>2</sub>	0,4	17,7	ABD-Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
CdTe / CdS		15,8	Amerika Birleşik Devletleri
GaAS Tek Kristal	1	23,9	K.Üniv. Nijmegen Hollanda

Güneş hücresi üretiminde kullanılan elementlerin dünyadaki rezerv durumları oldukça çok değişkenlik göstermektedir. Bunlardan silisyum doğada en çok bulunan element olduğundan dünya rezervi konusunda gelecek ile ilgili herhangi bir sıkıntısı görülmemektedir. Silisyum dışındaki diğer malzemelerin rezerv durumları dünya genelinde yıllık üretimi ve 500MW güç üretimi için gerekli olan miktarları gösteren tablo Çizelge 1.3'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 1.3. FV hücresinde kullanılan elementlerin dünyadaki miktarı ve üretimi [20]

<b>Element</b>	<b>Dünya Rezervleri</b>	<b>Dünya Yıllık Üretimi</b>	<b>500 MW Güç için gereken miktar ( Ton )</b>
CD	970 000	20 000	25
Te	39 000	404	28
In	5 700	180	25
Se	130 000	2 000	60
Ga	1 000 000	35	5

FV Modüle ait teknik bilgiler; FV modüllerin performans değerleri yazılırken iki farklı standart durumu göz önünde bulundurmak gerekir. Bunlar, nominal hücre işletim sıcaklığı NOCT ve diğeri standart değerlendirme denilen SR şartlarıdır. SR ve NOCT şartları aşağıdaki Çizelge 1.4’te verilmiştir [21].

Çizelge 1.4. FV Panelin SR ve NOCT şartları [21]

<b>SR Şartları</b>	Güneş Işınımı	$G_{SR}$	1000 w/m <sup>2</sup>
	Hücre sıcaklığı	$T_{Hücre}$	25 °C
<b>NOCT Şartları</b>	Güneş Işınımı	$G_{NOCT}$	800 w/m <sup>2</sup>
	Ortam sıcaklığı	$T_{Ortam}$	25 °C
	Rüzgâr hızı	$V_{NOCT}$	1m/s

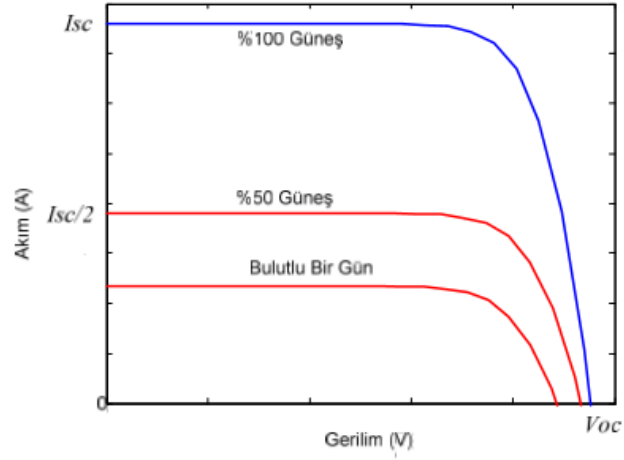
### 1.5. FV Panellerin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler

FV sistemlerinin güç verimini etkileyen faktörler arasında; sistemin bulunduğu ortamın çevre sıcaklığı, kısmi gölgelenme durumu, rüzgar hızı, panel karakteristikleri, panel yüzey alanı, panelin üretildiği malzeme, ışınım şiddeti, panelin yerleştirme açısı ve panel karakteristikleri gibi değerler sayılabilir. FV panellerin parametreleri, beslediği yükün iç direncine bağlı olarak doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir. Doğrusal olmayan bu değişim, FV sistemlerinin tasarım ve uyum sağlama sürecinde karşılaşılan en önemli sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [22]. Bu bahsettiğimiz faktörler aşağıda özetlenmiştir.

1. Güneş Işınım Faktörü; Birimi W/m<sup>2</sup> olan güneş ışınımı, güneş yoğunluğu veya güneş radyasyonu olarak da ifade edilir. Foto-akım (FV kısa devre akımı) genliği güneş yoğunluğu ile doğru orantılı olarak değişir. Örneğin %100 güneş ışığı altındaki yani güneş ışınımının 1000 W/m<sup>2</sup> olduğu durumda kısa devre akımı, %50 güneş yoğunluğu yani ışınımın 500 W/m<sup>2</sup> olduğu durumdaki kısa devre akımının iki katı olmaktadır.

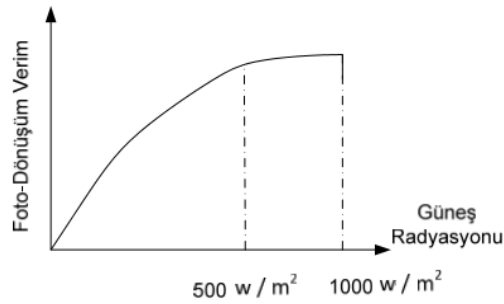
Işınım miktarı ile açık devre gerilimi arasında da doğrusal bir ilişki söz konusu olmasına rağmen ışınımına göre açık devre geriliminin değişimi oldukça küçüktür. Bu

açıklamalar ışığında farklı ışınım değerlerinde akım/gerilim (I/V) karakteristik eğrisi Şekil 1.10' da gösterildiği gibi değişiklik göstermektedir.



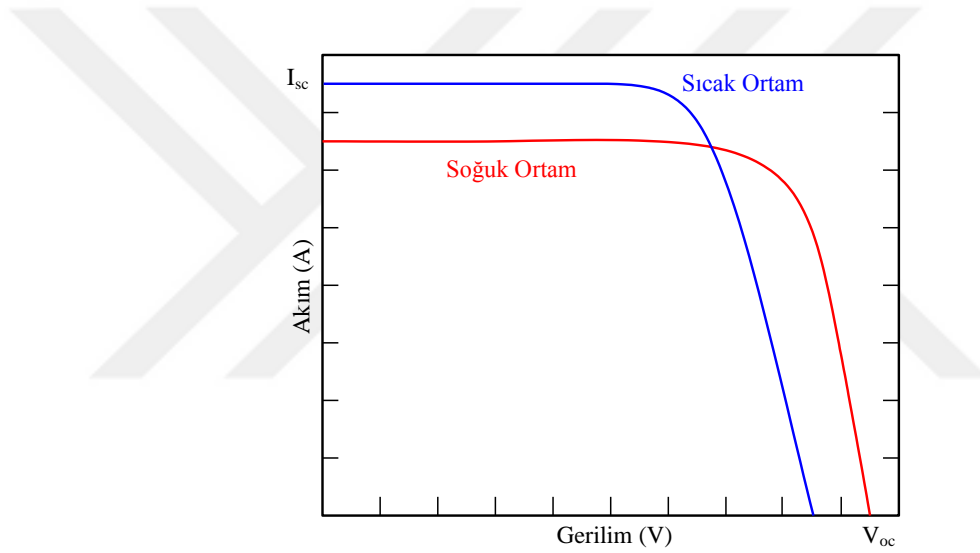
Şekil 1.10. Farklı ışınım değerlerinde I/V karakteristik eğrisi [22]

Grafikteki  $I_{sc}$  kısa devre akımını,  $V_{oc}$  açık devre voltajını ifade etmektedir. FV hücrenin normal çalışma durumlarındaki fotonun dönüştürme verimi, güneş ışınımındaki değişimlerden çok fazla etkilenmemektedir. Örneğin Şekil 1.11'de görüldüğü gibi foton dönüştürme verimleri  $500 \text{ W/m}^2$  ve  $1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımında hemen hemen yaklaşık eşitmiş gibi görülmektedir. Ancak bu durumlarda, yani  $500 \text{ W/m}^2$  ve  $1000 \text{ W/m}^2$  ışınım değerlerinde aynı gücü elde edeceğimiz anlamına gelmemektedir. Çünkü havanın bulutlu olduğu bir günde FV hücresinin topladığı enerjide az olacağından, yani giriş enerjisi azalacağından (verimin sabit olma durumu) çıkış gücünde de bir düşüş gözlenecektir. Bu güç değişimi Şekil 1.13'de görüldüğü gibi bir karakteristik eğriye sahip olacaktır.



Şekil 1.11. Foto-dönüşüm / Güneş radyasyon eğrisi [22]

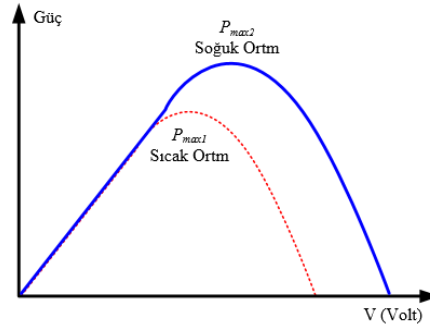
2. Sıcaklık Faktörü; FV panellerin çalışmasında sıcaklığın çok önemli bir faktörü vardır. FV panel üzerinde ki sıcaklık artışı ile FV hücrenin kısa devre akımında ( $I_{sc}$ ) artış olurken, açık devre voltajında da ( $V_{oc}$ ) biraz azalma meydana gelmektedir. Bu durumun I/V karakteristik eğrisi Şekil 1.12’de verildiği gibi olmaktadır. FV panel üzerindeki sıcaklığın doğrusal bir şekilde artış göstermesi ile FV hücrelerinin kısa devre akımları da yükselme eğilimi gösterir. Sıcaklığın azalması ile birlikte yarı iletken enerji bant aralıkları azalırken buna bağlı olarak dolun faktörü ve açık devre gerilimi de azalma eğilimi göstermektedir. Yarı iletken enerji bant aralıkları oda sıcaklıkların da doğrusal olarak değişim eğilimi gösterirken, düşük sıcaklıklarda ise, doğrusal olmayan bir değişim özelliği göstermektedir.



Şekil 1.12. FV panelin sıcaklık değişimli I/V karakteristik eğrisi [23]

FV hücre sistemleri, yüksek çalışma sıcaklıkları altında güç ve verim değerleri düşük olmaktadır. Kısaca çalışma sıcaklığı arttıkça buna bağlı olarak da FV hücresinin verimi düşüş göstermektedir. Verim düşümü ince film hücrelere göre, mono ve polikristal silikon hücrelerde daha belirgindir. Çalışma sıcaklığının  $1^{\circ}\text{C}$ 'lik artması ile kristal silikon hücreli FV modüllerden elde edilen güç % 0.5 oranında azalırken, amorf silikon hücreli FV modüllerden ise elde edilen bu güç % 0.2 oranında azalma eğilimi göstermektedir [23].

FV modül üzerindeki sıcaklık değişimi ile güç/voltaj (P/V) arasındaki ilişkisinin karakteristik değerleri ile çizim yapılırsa, Şekil 1.13'teki gibi P/V karakteristik eğrisini elde etmiş oluruz.



Şekil 1.13. FV Panelin sıcaklık değişimi ile P/V karakteristik eğrisi [23]

Güneş hücrelerinin üretiminde kullanılan yarı iletken elementlerin ve yarı iletken bileşiklerin sıcaklık faktörü ile parametrelerin değişimi aşağıdaki Çizelge 1.5, Çizelge 1.6 ve Çizelge 1.7’de ayrıntılı bir şekilde ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 1.5. Bazı yarıiletken malzemelerin sıcaklıkla değişimi [24]

Malzemenin Cinsi	T = 300 <sup>0</sup> K	T = 0 <sup>0</sup> K
Silisyum	1.12 eV	1.17 eV
Germanyum	0.67 eV	0.75 eV
Kurşun Sülfür	0.37 eV	0.29 eV
PbTe	0.29 eV	0.19 eV
InSb	0.16 eV	0.23 eV
GaSb	0.69 eV	0.79 eV

Çizelge 1.6. Silisyum FV hücrenin sıcaklıkla değişim değerleri [24]

T ( <sup>0</sup> K )	eV	V	%η
273	1.1312	0.750	26.83
300	1.1245	0.699	24.67
323	1.1185	0.654	22.80
353	1.1104	0.595	20.33
373	1.1048	0.555	18.67

Çizelge 1.7. Germanyum FV hücrenin sıcaklıkla değişim değerleri [25]

T (°K)	eV	V	%η
273	0.67366	0.302	13.88
300	0.66339	0.248	10.60
323	0.65444	0.201	7.89
353	0.64253	0.139	4.62
373	0.63446	0.099	2.79

3. Yüzey Parametresi Faktörü; Işığın yansımalarını azaltmada kullanılan yaklaşımlardan biri de özel yapılı yüzeylerdir. Özel yapılı yüzeyler ve silisyum ince tabakaların kullanımı artış göstermektedir. Silisyum tabakaların yüzeylerinde küçük piramitler seçici dağlama yöntemi kullanılarak elde edilirler. Bu piramitlerin yüzeylerinden yansıyan ışık, diğer piramitlerden de yansıyarak hücrenin içine girer. Güneş hücrelerinde anti yansıtıcı kaplama kullanılmasıyla yansımaları azaltılmış olur. Işığın yüzeye düştüğü her noktadaki toplam yansımaya, silisyuma dik gelen ışıkta olduğu gibidir. Yüzeydeki toplam yansımaya %0.33 ile %11 seviyeleri arasındadır. Yüzeyleri piramitleştirme tekniği kullanılarak yansımaları önleyici kaplama olmaksızın yüksek performanslar elde edilebilir.

4. Spektral Faktör; Monokromatik ışık, yarı iletken içinde elektron-oyuk çiftinin oluşmasına neden olur. Elektron-oyuk oluşumunun uzaysal dağılımı Denklem (1.10)'daki gibi ifade edilir.

$$H = (1 - r) \cdot \alpha \cdot \theta^{-\alpha x} \quad (1.10)$$

Denklem (1.10)'da kullanılan  $r$  yansımaya katsayısını,  $\theta$  gelen ışığın foton açısını,  $\alpha$  ise soğurma katsayısını ifade eder. Kısa dalga için  $\alpha$  büyük bir değere sahiptir. Bu nedenle kısa dalga ışık yarı iletken malzemeler içerisinde de hızlı bir şekilde emilir. Hücrelerde emilen bu fotonların enerjilerinin tamamı kullanılmaz. Verim, görünür dalga boylarında en yüksek değerini alırken, kızılötesi sınırlar içerisinde ise en düşük değere sahiptir. Bu durumda FV hücreye ışık türlerinin etkisi renk bazında Çizelge 1.8'de gösterildiği gibi olacaktır.

Çizelge 1.8. FV hücresine ışık türlerinin renk etkisi [25]

Renk	Dalga Boyu (nm)	Gerilim (volt)
Mor	410	3.11
Kırmızı	725	3.20
Turuncu	650	3.22
Mavi	470	3.34
Sarı	590	3.44
Yeşil	520	3.52

5. Foto Açılal Faktör; Yarı iletkenlerden yapılmış olan FV hücresine gelen foton ışınları, yüzey kısma çarptığında ışığın belli bir kısmı hücre yüzeyi tarafından yansıtılırken, geriye kalan diğer kısımları ise, yarı iletken malzemeler tarafından soğurulur. Bu yüzey tarafından yansıtılan ifadenin katsayısı Denklem (1.11)'de verilmiştir.

$$r = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_2 - n_1)^2 + k_2^2} \quad (1.11)$$

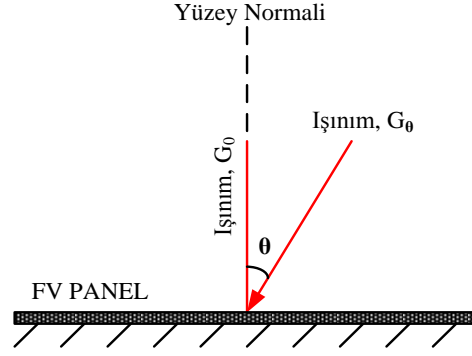
Denklem (1.11)'de verilen  $n_1$  -  $n_2$  kırıcılık indislerini,  $k_1$  -  $k_2$  ise yok olma katsayılarını ifade etmektedir.

Yarı iletken FV hücresi tarafından emilen fotonların ve yansıtılan fotonlardan sonra ışık şiddetinin azalarak geçmesi ve azalan bu ışık şiddetinin ifadesi Denklem (1.12)'de verildiği gibi bulunur.

$$T = \frac{(1-r)^2 \cdot e^{-\alpha x}}{(1-r)^2 \cdot e^{-2\alpha x}} \quad (1.12)$$

Denklem (1.12)'de verilen  $r$  yansıtma katsayısını,  $\alpha$  soğurma katsayısını ifade etmektedir [26].

FV panelin çıkış akımının  $I_0$ , panel yüzeyine dik gelen güneş ışınımının başka bir deyişle ışının yüzeyin normali ile yaptığı açının sıfır derece olduğu durumdaki akım olduğunu varsayarak Şekil 1.14'te gösterildiği gibi bir şekil elde ederiz.



Şekil 1.14. Açısal faktörün FV panel üzerindeki etkisi [26]

Güneş ışınımının yüzeyin normali ile yaptığı açının  $\theta$  olması durumunda FV panelden alınacak çıkış akımı  $I_{\theta}$ 'a bağımlı olarak Denklem(1.13)'teki eşitlik ile elde edilebilir.

$$I_{\theta} = I_0 \cdot \cos\theta \quad (1.13)$$

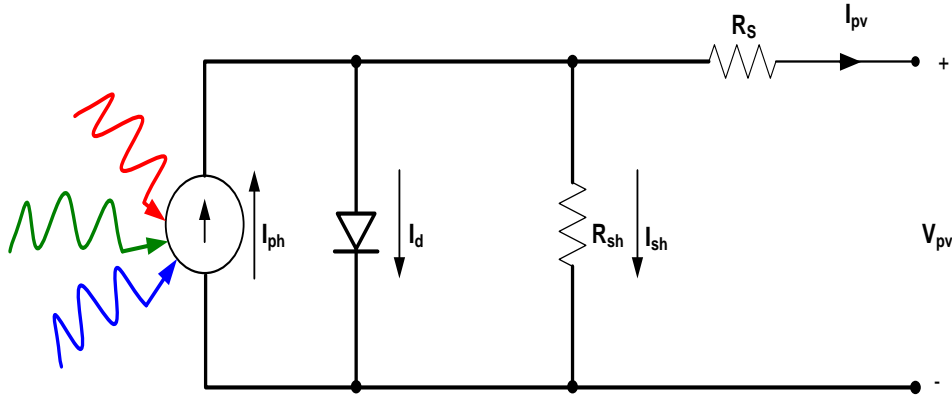
Burada güneş ışınımından en iyi sonuçları elde edebilmek için, yüzeyin normali ile yaptığı açının“  $0^{\circ}$  ile  $50^{\circ}$ “ arasında olması gerektiği görülmektedir.

Işınımın, yüzeyin normali ile yaptığı açının  $50^{\circ}$  nin üzerinde olması durumun da elektriksel olarak çıkış akımı, kosinüs teoremine göre çıkışta önemli bir derece sapma gösterir. FV hücre, yüzey açısı  $\theta$ 'nın,  $85^{\circ}$ 'den sonraki durumların da ise neredeyse hiç güç üretmez olur.

### 1.6. FV Hücrenin Elektrik Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli

FV panellerden elde edilen elektrik enerjisinin incelenebilmesi için FV hücrenin eşdeğer devresinin çıkarılması gerekmektedir. FV güneş hücreleri yarı iletken malzemelerden yapıldığı için diyotla modellenmiştir. Güneş hücresi güneş ışınımı almadığında akım-gerilim karakteristiği diyota benzemektedir. Güneş hücresinin elektrik üretimi akım kaynağı ile sembolize edilirken, FV hücrelerde kayıplar ise seri ve paralel direnç ile gösterilmektedir. FV panelleri iki değişik yöntemle modelleyebiliriz. Bunlar, tek diyot modeli ve çift diyot modelleri olmak üzere literatürde sıklıkla anılmaktadır. Kendi çalışmamızda tek diyot modelini referans olarak, eşdeğer devre ve matematiksel modelleri kullanılarak analiz yapılacaktır. Tek diyot modele ait FV hücresinin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1.15'de gösterilmiştir.





Şekil 1.15. FV Panelin elektrik eşdeğer şeması [27]

Yukarıda verilen elektrik eşdeğer devresindeki,  $R_s$  seri direnci,  $R_{sh}$  paralel direnci,  $I_{ph}$  güneşten üretilen elektrik akımını,  $I_d$  diyot akımını,  $I_{pv}$  çıkış akımını ifade eder. Hücre üzerine düşen ışınımlar arttıkça  $I_{ph}$  akımı da artmaktadır. Güneş hücresinin gövdesi yarı iletken malzeme olması sebebiyle diyotla modellenmiştir. Eklemede üretilen enerjinin kutuplara iletilmesi sırasında oluşan kayıplar, seri direnç ile gösterilir. Bu seri direnç hücre verimini doğrudan etkilemektedir.

FV hücrenin FotoVoltaik akımı ( $I_{ph}$ ), hücre üzerine düşen güneş ışınım miktarı ( $G$ ) ile doğru orantılıdır [27].

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot \Delta T] \cdot \frac{G}{G_r} \quad (1.14)$$

Denklem (1.14) ifadesindeki  $\Delta T$  yerine Denklem (1.15) yerine yazılarak,

$$\Delta T = T_c - T_r \quad (1.15)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T_c - T_r)] \cdot \frac{G}{G_r} \quad (1.16)$$

Denklem (1.16)'da kullanılan  $I_{sc}$  25<sup>0</sup>C ve 1000 W/m<sup>2</sup> deki kısa devre akımını,  $K_i$  kısa devre akımının sıcaklık katsayısını (0,0017 A/°C),  $T_c$  Kelvin cinsinden FV hücre sıcaklığını,  $T_r$  referans sıcaklığını (25°C için 298,15 °K alınmaktadır),  $G$  güneş ışınım miktarını ( W/m<sup>2</sup>),  $G_r$  referans güneş ışınım miktarını (1000 W/m<sup>2</sup>) ifade etmektedir.

Diyot akımı ( $I_d$ ), gerilime ve ters sızıntı akımına ( $I_s$ ) bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim Denklem (1.17)'de verilmiştir.

$$I_d = I_s \cdot (e^{\frac{q.V_d}{NKT}} - 1) \quad (1.17)$$

Burada kullanılan  $q$  elektron yükünü ( $1,0602 \cdot 10^{-19}$  C),  $K$  Boltzman sabitini ( $1,3806505 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $N$  diyotun ideallik (kalite) faktörünü,  $T$  Kelvin cinsinden hücre sıcaklığını ifade etmektedir.

25 °C jonksiyon sıcaklığı için Denklem (1.17) 'deki katsayı tekrar düzenlenerek, Denklem (1.18a), Denklem (1.18b) ve Denklem (1.18c)'de yerine yazılarak;

$$\frac{q.V_d}{K.T} \quad (1.18a)$$

$$\frac{q.V_d}{K.T} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19}}{1,381 \cdot 10^{-23}} \cdot \frac{V_d}{(273+25)} = 38,9 \cdot V_d \quad (1.18b)$$

$$I_d = I_s \cdot (e^{38,9.V_d} - 1) \quad (1.18c)$$

ifadesi elde edilir.

Diyotun doyum akımı  $I_s$  ve sıcaklığa olan bağımlılığı, aşağıdaki Denklem (1.19)'da gösterildiği gibidir [28-31].

$$I_s = I_{s,n} \left(\frac{T_r}{T_c}\right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{NK} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (1.19)$$

burada  $E_g$ , yarı iletken bandın enerjisi olup, 25 °C'de polikristalin Si için  $E_g = 1.12$  eV ve  $I_{s,n}$  nominal doyma akımını ifade etmektedir [28,32].

$$I_{s,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{NV_{t,n}}\right) - 1} \quad (1.20)$$

Denklem (1.20)'deki  $V_{t,n}$  FV hücresinin sıcaklığının ( $T_c$ ) seriye bağlı termal voltajını ifade etmektedir.

Paralel dirençten geçen akımın ifadesi Denklem (1.21)'deki gibi eşdeğer devreden faydalanılarak yazılırsa;

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.21)$$

FV hücrenin çıkış akımı ve gerilimi Denklem (1.22) ve Denklem (1.23)'te olduğu gibidir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.22)$$

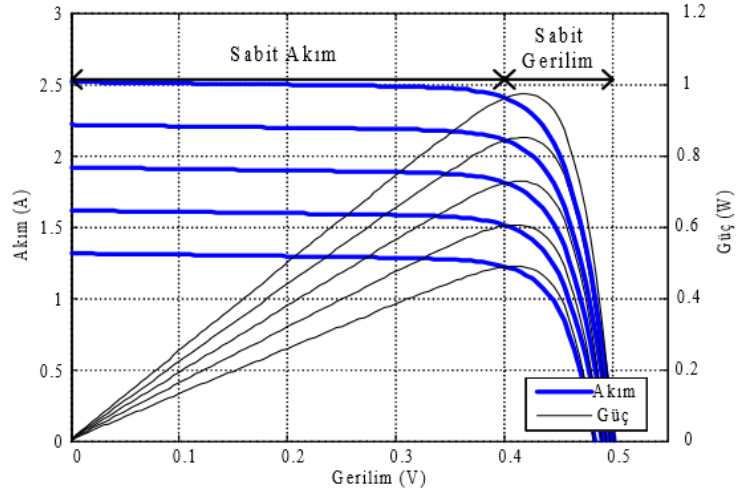
$$V_{pv} = V_d - I_{pv} \cdot R_s \quad (1.23)$$

Yukarıdaki Denklem (1.17) ve Denklem (1.21)'deki ifadeler Denklem (1.23)'te yerine yazılacak olursa,

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{NKT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \quad (1.24)$$

FV hücre modelinin çıkış akımı matematiksel modeli ( $I_{pv}$ ) Denklem (1.24)'teki gibi tanımlanabilir. Denklem (1.24)'te ;  $I_{ph}$  ışımaya bağlı akım kaynağı,  $I_s$  diyot doyum akımını,  $q$  elektron yükünü,  $V_{pv}$  terminal gerilimini,  $K$  Boltzman sabitini,  $T$  Kelvin cinsinden hücre sıcaklığını,  $N$  diyotun ideallik faktörünü,  $R_{sh}$  paralel direnci ve  $R_s$  seri direnci temsil etmektedir. Denklem (1.24) kullanılarak farklı ışımaya değerleri için yapılan Matlab benzetim sonuçları Şekil 1.16'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere FV hücre doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir.

Şekil 1.16'daki I/V karakteristiği sabit akım ve sabit gerilim olmak üzere iki bölgede incelenebilir. FV hücrenin çıkış gerilimi belli bir gerilimin altında kaldığı sürece çıkış akımı sabit kabul edilebilir. Bu gerilim aşıldığı zaman yapısal diyot iletime geçmekte ve  $I_{ph}$  akımı diyot üzerinden akma eğilimi göstermektedir. Böylece FV hücresi sabit gerilim bölgesinde çalışmaya başlamış olur. Hücrenin I/V karakteristiğinden P/V değerleri türetilebilir. Şekil 1.16'da verilen farklı ışımaya değerleri için P/V karakteristikleri incelenirse her grafiğin bir adet tepe değeri olduğu görülür. Bu tepe değerine de Maksimum Güç Noktası (MGN) adı verilmektedir [33].



Şekil 1.16. FV panelin farklı ışınma değerleri için I/V değişim grafiği [33]

FV sistemler, uygun güneş ışınımı altında, yapılarına göre belirli bir akım ve gerilim üretirler. Dolayısı ile istenen akım ve gerilim miktarını elde edebilmek için, uygun miktarda FV hücreleri paralel veya seri bağlamak gerekmektedir. Böylece istenen güç miktarında FV paneller elde edilir.

Şekil 1.15'de eşdeğer devre şeması verilen FV hücre modelinin elektrik eşdeğer devresinden çıkış akım şiddeti  $I_{pv}$  ve çıkış uçlarındaki gerilim  $V_{pv}$  değerleri ölçülebilir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

FotoVoltaik panellerin soğutulması ve binaya montaj edilmesi konusunda yapılan uygulamalar oldukça azdır. Bunun başlıca nedeni FV/T sistemlerinin yeni bir uygulama ve maliyetinin şu an için çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmaların yetersiz olmasından dolayı FV sistemlerinde soğutmanın önemi dikkate alınmamıştır. Bu tezdeki en önemli katkı, FV sistemlerde meydana gelen sıcaklık faktörü dikkate alınarak soğutmanın FV panel üzerindeki verimlilik ve kararlılık analizlerinin yapılmasıdır. FV/T ve BEFV/T yenilenebilir enerji sistemlerinin modellenmesi ile ilgili çok sayıda yayın ve makale incelenmiştir. Özellikle Avrupa Birliğinin sıfır emisyonlu yapılar yönetmeliği kapsamında Avrupa ülkelerinde bu konuya eğilim giderek artmaktadır. Bunun yanında konu üzerine bilimsel çalışmalar da giderek artmaktadır. Aşağıda konu üzerine yapılmış güncel bilimsel çalışmaları içeren bir literatür çalışması sunulmuştur.

Jie ve diğerleri 2007 yılında, BEFV/T duvar tipi olarak Trombe sistemini kullanarak deneysel sonuçlar ile matematiksel sonuçların simülasyonunu karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçlarının birbirine çok yakın olduğunu karşılaştırmalı bir şekilde ispatlamışlardır [34].

FotoVoltaik (FV) teknolojilerin gelişmesi ve pazar paylarının artması ile birçok üretici FV/T ve BEFV/T ürünlerini piyasaya sürmüşlerdir. Böylece solar termal yapılarla birleştirilmiş FotoVoltaik panellerin BEFV/T üretimi hız kazanmaya başlamıştır. SunDrum firması 2008 verilerine göre, hibrit FV/T paneli FV panele göre %4-%10 daha fazla güç ürettiğini bildirmiştir [35].

Bloem 2008 yılında yaptığı çalışmalarında, deney verilerini kullanarak BEFV/T sistemin termal ve elektriksel performansını incelemiştir. FV modül için değişik malzemeler kullanarak FV modül sisteminin elektriksel performansına ne kadar etkisi olduğunu araştırmıştır ve sayısal analiz yapmıştır [36].

Fung ve Yang arkadaşlar 2008 yılında, yarı iletken BEFV termal modül için periyodik olarak bir boyutlu ısı aktarma modeli geliştirerek uygulamalı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sistem üzerinde değişik değerlerin etkilerini inceleyerek, toplam

ısısal verimin en önemli etkisinin güneş ısısına bağlı olduğunu yaptığı deneysel çalışmalar ile ispatlamışlardır [37].

Anderson ve diğerleri 2009 yılında, kullanılacak olan BEFV/T sistemin çatı uygulamasının teorik analizi için Hottel-Whillier sistemini kullanarak modelleme gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçları birbirleri ile kıyaslayarak modelin ne kadar güvenli ve doğru olduğunu ortaya çıkararak açıklamalarda bulunmuşlardır. Ayrıca sonuçlar, verimlilik, FV hücreleri ile destekleyici yapıları arasındaki ısı iletkenlik ve laminasyon yöntemi gibi kilit tasarım parametrelerinin, BEFV/T'nin hem elektriksel hem de termal etkinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Dahası, BEFV/T'nin, önceden kaplanmış renkli çelik gibi düşük maliyetli malzemelerden verimlilikte önemli düşüşler olmadan yapılabileceğini göstermiştir [38].

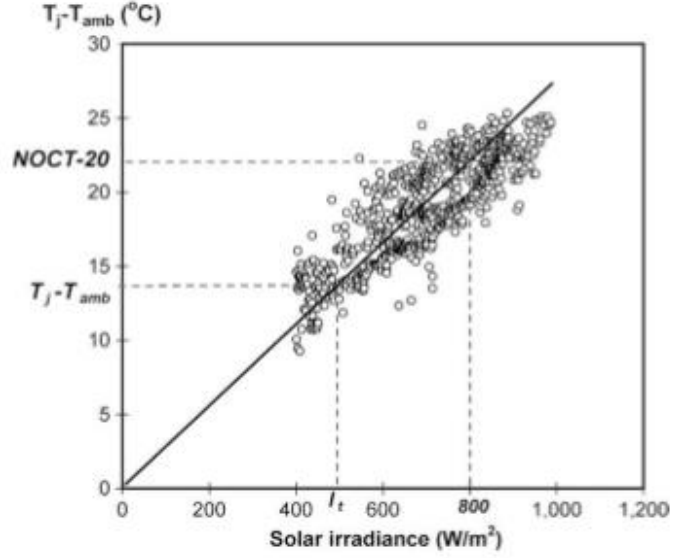
Cheng ve diğerleri 2009 yılında, sistemde kullanılan BEFV/T için en iyi açının olduğu arazide yer aldığı enlem açısı arasında bir düzenleme yaparak geliştirmeler yapmışlardır. Sonuç itibari ile kuzey bölgelerde BEFV/T sistemlerin en yüksek ışınımı alabilmesi için sistemin güney istikametli ve panel açısının arazinin genişliğine denk olması gerektiğini ortaya çıkarmışlardır. Bu çalışmada, sabit bir Bina Entegre FotoVoltaik sistem için uygun açı ile yapılan tahminlere göre derece cinsinden ölçülen sistemin bulunduğu alan arasındaki doğrusal ilişki analiz edilmiştir. Hesaplamalar, kuzey yarımkürede  $0^\circ$  ile  $85^\circ$  arasında değişen 14 ülkede 20 farklı yerde BEFV/T güney yönlü eğimli çatı için yapılmıştır. Enlem açısını eğik panel açısı olarak kullanmanın güvenilirliğini ispatlamak için sistemle en uygun açı ve sistemin konum açısı ile elde edilen performans arasında ilişki kurulmuştur. Sonuçlar, eğik panel için enlem açısı kullanılarak en uygun açıyla bir sistemin ortalama performansının % 98.6'sının elde edilebileceğini göstermektedir [39].

Villalva ve arkadaşları 2009 yılında, FotoVoltaik dizilerin modellenmesi ve simülasyonu için bir yöntem önermektedirler. Temel amaç doğrusal olmayan I/V denkleminin parametrelerini bulmaktır. Bunlar açık devre gerilimi, maksimum güç ve kısa devre akımıdır. Gerçekleştirdikleri yöntem ile tek diyotlu FotoVoltaik (FV) model için serinin ve paralel dirençlerin etkisini de içeren en iyi I/V denklemini ve

maksimum gücünün modellenerek gerçek dizinin maksimum gücü ile eşleştirmesini yapmışlardır. Ayarlanan I/V denkleminin parametreleri ile temel matematiksel blokları kullanarak herhangi bir devre simülatörüyle bir FV devre modeli oluşturulmuşlardır. Önerilen devre modelinin modelleme yöntemi, FV sistemlerinin simülasyonlarını basit, hızlı, doğru ve kolay kullanımlı yöntemlerle ihtiyaç duyan güç elektroniği tasarımcıları için yararlı olabileceğini bildirmişlerdir [27].

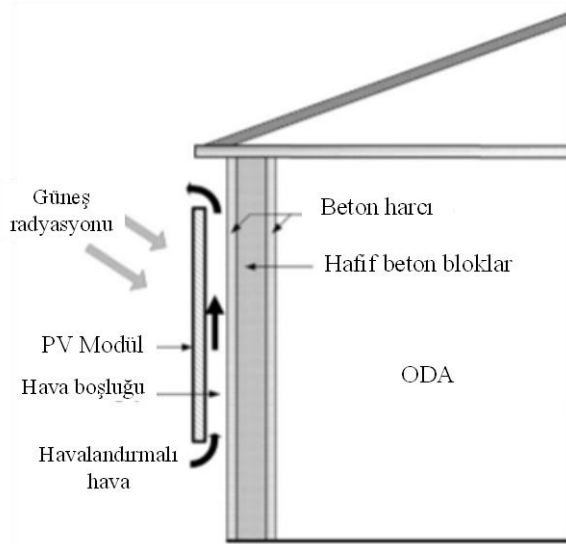
Trinuruk ve arkadaşları 2009 yılında, Tayland bölgesinin iklim şartları için BEFV/T uygulamalarındaki FV modülün sıcaklıkları için iki adet olasılık modeli geliştirmiş ve denemişlerdir. Bu iki modeli karşılaştırarak sıcaklık tahmini için en iyi olan modeli belirlemişlerdir. Doğrudan her bir FV modülünün performansını etkilediğinden, FotoVoltaik modüllerin çalışma hücresi sıcaklıklarını tahmin etmek için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmada, en sık kullanılan iki tahmini model olan nominal işletim hücre sıcaklığı (NOCT) modeli ve Sandia Ulusal Laboratuvar sıcaklık tahmin modeli olan (SNL), FV modülünün sıcaklıkların BEFV/T yapımı için tahmin edilmesinde uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Genel olarak, SNL modelinin NOCT modelinden daha iyi sıcaklık tahmin sonuçları verme eğiliminde olduğu ispatlanmıştır. Bununla birlikte, her iki model de sıcaklık tahminlerinde aşırı derecede önyargılı olduğu görülmektedir.

Tahminlerin tutarsızlıklarının temel olarak iklim koşullarının ılıman ve tropikal bölgeler arasındaki farklılıkların etkisinden ziyade, BEFV/T tesisatının ve modellerin belirttiği standart kurulumun benzer olmamasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. En kötü durumda, ortalama yanılğı hatasının en yüksek değerinin  $+8^{\circ}\text{C}$  veya ortalama gözlenen sıcaklığın  $+21\%$ 'ine eşdeğer olduğu ve kök karede ortalama hatanın  $\pm 10$  olduğu bulunmuş, ortalama gözlemlenen sıcaklığın  $\pm 24\%$ 'üne eşit olduğunu görmüşlerdir. Güneş ışınımının artmasıyla ilgili olarak FV hücresinin sıcaklığının ortam seviyesinin üstünde yükselmesi, nominal işletim sıcaklığı ile ışıma arasındaki bağıntı Şekil 2.1'de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir [40].



Şekil 2.1. Nominal işletim sıcaklığı ile ışığa arasındaki bağıntı [40]

Bununla birlikte, bu hatalar büyük olmasına rağmen, FV modülü tarafından uzun bir süre üretilen elektrik gücü çıktısının kesin tahmini doğruluğu üzerindeki etkilerinin büyük olmayacağını bildirmişlerdir. Beklenen enerji çıktısının hatası, çoğu uygulama için kabul edilebilir olan ortalama gerçek enerji çıktısının %6'sından fazla olmayacağını açıklamışlardır [40]. Trinuruk ve arkadaşlarının yaptığı bu FV modüllerin yapı katının üzerine monte edilişi Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.2. FV modüllerin yapı katının üzerine monte edilişi [40]



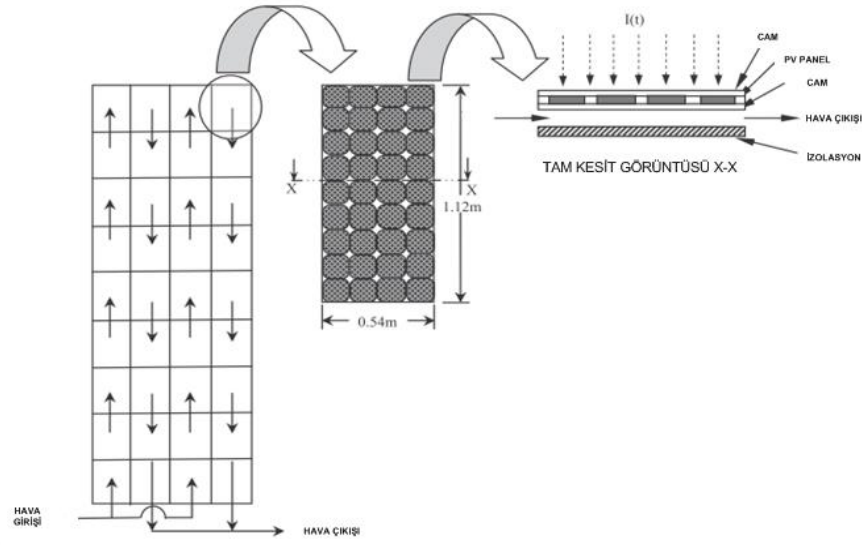
Tiwari ve Agrawal, 2010 yılında BEFV/T modelini çatı uygulaması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Hindistan'ın iklim şartlarına uyumlu sistemi belirlemek için periyodik rejimde tek boyutlu model üzerinde çalışma yapmışlardır. Isı iletimi formülleri kullanılarak tek boyutlu geçici model geliştirmişlerdir.

Bu modelin temelinde, Hindistan bölgesinin iklim şartlarına uygun bir BEFV/T sistemini uygulamak için bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Binanın FV performansları, net enerji kazanımı ve ekserji belirlenmiştir. Sonuçlar, sabit bir kütle akış hızı havasında sistemin seri bağlı olmasının daha iyi bir performans verdiğini, buna karşın sabit bir hava akışı hızı için sistemin paralel bağlandığının daha iyi bir performans verdiğini göstermektedir. Çatıda 65 m<sup>2</sup>'lik etkili bir alana yerleştirilen BEFV/T sistemi, yılda sırasıyla 16.209 kWh ve 1531 kWh'lik net elektriksel ve termal verimleri %53,7'lik genel bir termal enerji elde ettiklerini açıklamaktadırlar [41].

SolVar Systems firmasının 2011 verilerine göre hibrit FV/T panelin toplam %65 verimle çalıştığını bildirmişlerdir. Bu verimin %15'inin elektriksel ve %50'sinin termal verim olduğunu bildirmiştir [42]. Diğer taraftan Meyer Burger firmasının 2013 verilerine göre ise, %17,4 elektriksel ve %60 termal verimle çalışan panel ürettiğini bildirmiştir [43].

O. Zogou ve arkadaşları, 2011 yılında BEFV/T üzerine yaptıkları çalışmada; binaların güneş alan dış cephelerini FV panellerle kaplamışlar, hava sirkülasyonu ile ısınan havanın binada kullanıma sunulabileceğini incelemişlerdir. Bu sistemde soğutucu akışkan olarak sadece hava kullanılmıştır [44].

Rajoria CS, Agrawal S, Tiwari GN. 2012 yılında standart hava soğutmalı FV/T sistem yapmayı başarmış, panelin yan kesit görüntüsü Şekil 2.3'de gösterilmiştir [45].

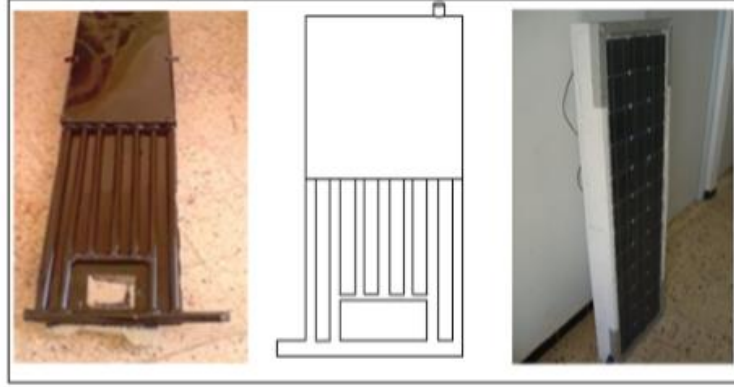


Şekil 2.3. Standart hava soğutmalı FV/T sistemi, sistemin hava akış diyagramı ve panelin yan kesit görüntüsü [45]

K.A. Moharram ve arkadaşları, 2013 yılında FV panelin üstten yağmurlama ile soğutulmasını sağlamışlar, 2012 yılının Temmuz ve Ağustos aylarında aldıkları deneysel verileri kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmada su panelin ışık gören yüzeyi ile temas etmesinin panelin temizlenmesini sağladığını belirtilmişlerdir. Fakat buharlaşma nedeniyle yüksek miktarda su kaybının yanında zamanla kireç tortu vb. etmenlerle panelin ışık alma kabiliyetinin azaldığı görülmektedir. Bu şekilde açık sıvı teması uygulanabilir bir yöntem değildir [46].

K. Touafek ve arkadaşları, 2013 yılında FV panelin arka kısmını dikey metal su boruları ile kaplamış ve bu şekilde soğutma yapmışlardır. Bu çalışmada, sıcak su için yeni bir hibrid FotoVoltaik/termal kollektör FV/T'nin deneysel bir çalışmasını sunmuşlardır. Bu kollektörün bir prototipini yaparak test etmişlerdir. Bu çalışmanın amacı ilk önce elektrik performansını (I/V - P/V karakteristikleri) karşılamak ve daha sonra FV panelin üzerindeki ısıyı alarak soğutma işlemi yapmışlardır. Bu yeni tasarım diğer FV/T hibrid konfigürasyonlara göre, uygulamasının basit oluşu ve düşük maliyetinden dolayı avantaj sağlamıştır. Bu yeni prototiple ilgili deneysel çalışmanın bazı sonuçları sunulmuştur. Depo üst kısmında panele bitişik

konumlanmıştır. Yapılan çalışma Şekil 2.4'te görülmektedir. Akışkanın panel ile olan temas yüzeyi sınırlı kaldığı için ısı değişimi beklenildiği kadar iyi olamamıştır [47].



Şekil 2.4. Yapılan FV/T sistemin son hali [47]

Karima ve arkadaşları, 2014 yılında yaptığı çalışmaya göre FV/T sistemin soğutulması için panelin altına fan motoru yerleştirerek soğutma işlemi yaparak, sıcaklık – verim incelemeleri gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, Irak iklim koşulları için farklı hibrid fotovoltaik/termal panel tasarımları deneyerek FV panellerin termal ve elektriksel performansı için karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Dört farklı hava bazlı hibrid FV/T kollektör tipi üretilmiş ve test edilmiştir. Bu sistem üç panel, dört ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar kanal, cam kapak, havanın sirkülasyonu için aksenal fan ve paralel bağlantılı iki FV paneldir. FV panellerin üst ve alt yüzeylerinin sıcaklığı, toplayıcı boyunca hava sıcaklığı, hava akışı hızı, basınç düşümü, güneş pilinin ürettiği güç ve rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve ortam gibi değerler iklim koşulları dikkate alınarak ölçümler yapılmıştır. Bu modelleme ile FV panelin termal ve hidrolik performansları teorik olarak enerji dengesine göre analiz edilmiştir. Önerilen matematiksel modeli çözmek için bir Matlab bilgisayar programı geliştirmişlerdir.

Elde edilen sonuçlar, çift kanallı, tek geçişli kombine verimliliğinin, tek kanallı çift geçişli ve tek kanallı tek geçişliye göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Tek kanallı tek geçişli modelin daha iyi elektrik verimliliğine sahip olduğunu göstermiştir. FV çıkış sıcaklığı yüzdesel sapmaların ortalama karesi ve modelin termal verimi sırasıyla % 3.22 ve % 18.04 olarak bulunmuştur [48].

F. Shan ve arkadaşları, 2014 yılında BEFV/T panelin arka kısmından suyu değişik şekillerde dolaştırarak soğutma sağlanmış ve ısınan su bir depoda tekrar soğutularak panele verilmiştir. Ayrıca ısınan su değerlendirilerek depoda biriktirilmiştir. Birçok makaleden alıntı yapılarak yapılan çalışmaların tamamı özetlenmiştir [49].

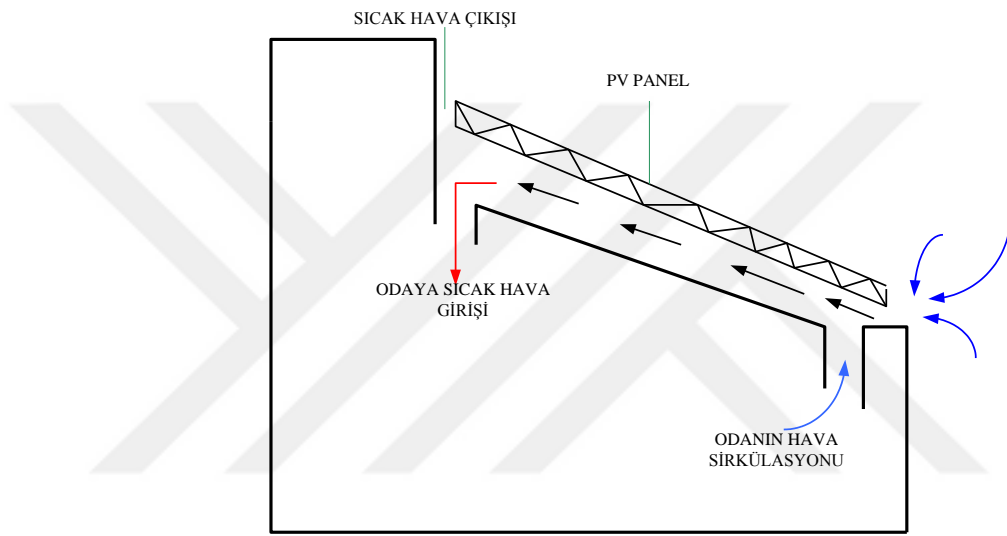
M.J. M. Pathak ve arkadaşları, 2014 yılında güneş ışımasını eşit alan FV, FV/T sistemler için karşılaştırmalı analizler yapmışlar ve sistem verimlilikleri incelenmiştir [50].

M. Hajji ve arkadaşları, 2015 yılında sulu soğutma üzerine yaptıkları çalışmada panelin alt kısmından su dolaştırarak soğutma sağlarken ısınan su depoda biriktirilip kullanıma sunulmuştur. Çalışmanın genel gidişatı FV/T sistemin matematik modeli üzerine yapılmıştır. Kullanıcılar taleplerine göre çalışma modunu kolaylıkla değiştirebilmektedirler. FV/T sisteme, FV modülü ve ısı emme birimleri birlikte monte edilmekte olup, bu modelde FV modülün sıcaklığından daha düşük bir sirkülasyon sıvısının kullanılması ile soğutulma işlemi yapmışlardır. Bu çalışmanın amacı güneş enerjisi sisteminin bir parçası olarak FV/T kolektörünün performansını değerlendirmektir. Geliştirilen FV/T sistem modeline dayanarak, FV/T sisteminin termal performansları, su akış oranları, rüzgâr hızı, çeşitli güneş radyasyonu seviyeleri ve farklı sayıda cam kapakları gibi farklı parametrik koşullar altında incelenmiş olup, sonuçlar kütle akış hızı 0.01kg/s'den 0.1kg/s'ye yükseldiğinde, farklı hibrid FV/T kolektörleri katmanlarındaki sıcaklık dağılımının aynı anda düştüğünü göstermişlerdir. Termal ve elektriksel verimliliklerin, incelenen parametrelere önemli ölçüde bağlı olduğu da bulunmuştur [51].

J. Yazdanpanahi ve arkadaşları, 2015 yılında FV panelin alttan su ile soğutulmasını sağlamışlar. Bu çalışmada soğuk su deposu altta olup, su sirkülasyonunu sağlamak için bir pompa kullanıldığından verim düşük görülmektedir. Similasyonlarla çalışma desteklenmiştir [52].

C.S. Rajoria ve arkadaşları, 2016 yılında BEFV/T sisteminin evlerin çatılarına monte edileceğini ve hava sirkülasyonu ile doğal soğutma sağlayacağını, ayrıca bu ısınan havanın kullanımını inceleyerek çalışmalar yapmıştır [53].

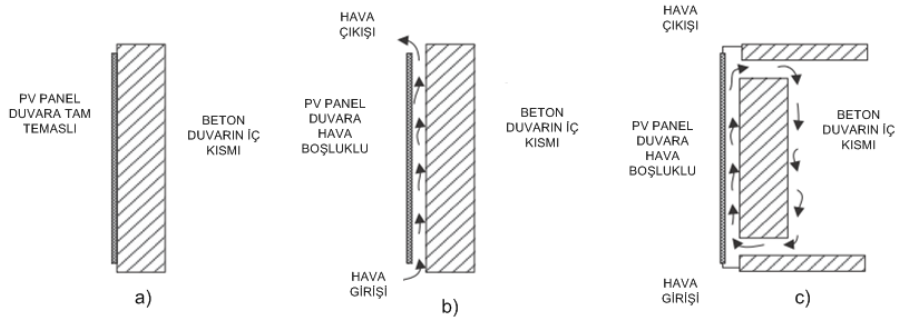
S.S.S. Baljit, 2016 yılında BEFV/T sistemde ısıtılan havanın ortam ısıtması amacı ile kullanılmasını konu edinmiş ve bu konuda çalışmalar yapmıştır. S.S.S. Balji'in yaptığı bu çalışmasının, çatıya monteli prototip çalışma projesi Şekil 2.5' de gösterildiği gibi sunulmuştur [54].



Şekil 2.5. Hava ventilasyonlu çatıya monteli BEFV/T prototip sistemi [54]

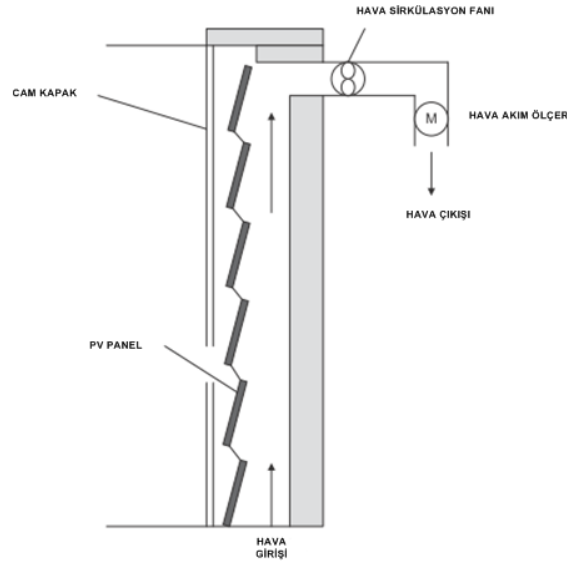
S.S.S. Baljit, 2016 yılında BEFV/T sistemlerin duvara montajını genel olarak üç farklı şekilde yaptığını bildirmektedir. Bunlar Şekil 2.6'te gösterildiği gibi, hava boşluğu olmadan FV panelin direkt montajı Şekil 2.6-a'da, hava boşluklu FV panelin montajı Şekil 2.6-b'de ve hava boşluklu FV panelin hava sirkülasyonlu montajı ise Şekil 2.6 -c'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.6 -c' deki sistemde olduğu gibi FV 'yi soğutma havası ihtiyaca göre iç ortamdan veya dışarıdan kontrollü bir şekilde alınabileceğini incelemiştir [55].



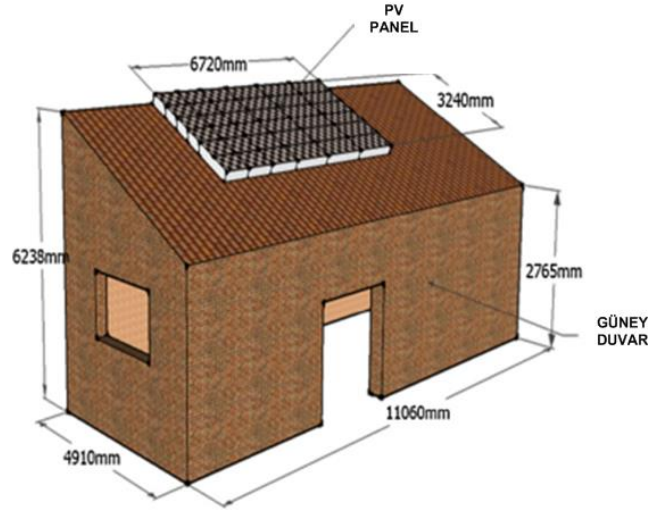
Şekil 2.6. Değişik BEFV/T montaj yöntemleri; a) Hava boşluğu olmadan bina duvarına bağlanmış BEFV/T sistem b) Hava boşluklu BEFV/T c) Hava sirkülasyonlu BEFV / T sistemi [55]

S.S.S. Baljit, 2016 yılında binanın dış cephesini FV panel ile kaplayıp, hava sirkülasyonu için düşük güçlü fan kullanarak (zorlamalı hava) hibrid FV panel gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın prototip çizimi Şekil 2.7’te gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Hibrid FV panel yapısı, hava akışı zorlamalı kontrolü [54]

C.S. Rajoria, Sanjay Agrawal, Subhash Chandra, G.N. Tiwari, D.S. Chauhan 2016 yılında bina çatısına BEFVT sistemi gerçekleştirmişlerdir. Bina çatısına yapılan bu çalışma Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Önerilen yapının perspektif görünümü, binanın çatısına monte FotoVoltaik Termal (BEFV/T) sistemin entegre şeması [56]

Haitham M., S. Bahaidarah ve arkadaşları, 2016 yılında FV panelin soğutulmasının verimi üzerine etkisini incelemişlerdir. Panelin arka kısmından değişik akış şekillerinde su kanalları denenerek en iyi verim elde edilmeye çalışılmıştır. Düşük ortalama hücre sıcaklığı ve üniform sıcaklık dağılımı ile soğutma teknikleri analiz edilmiştir. FV sistemlerin soğutulmasının önemi üzerine ekonomik ve çevresel etki tartışılmış üniform, üniform olmayan soğutma yöntemleri arasındaki karşılaştırma için deneysel bir vaka çalışması sunulmuştur. Daldırma soğutma, üniform soğutma için daha iyi bir çözüm olacağı ve FV/T sistemleri için hücre sıcaklığının 20-45°C'ye düşürüldüğünü bildirilmişlerdir. Isı alıcıları tarafından pasif soğutmanın, yüksek konsantrasyonlar için hücre sıcaklığını 37°C'ye kadar düşürdüğünü ancak geniş ısı emici olan bu sistemin yüksek maliyetli olduğu ifade edilmiştir. Mikro kanallar ile aktif soğutma, çarpma soğutma ve hibrit mikro kanal darbe soğutmasının, FV panel yüzeyinden gelen yüksek ısı akışını dağıtmada en etkili bir yöntem olduğu bulunmuştur. Hibrid soğutma için, 0.46°C'lik yüzey sıcaklığında sapma elde edilmiştir. Kullanılan malzemenin panelin sıcaklığını 28°C ile 65°C arasında kontrol ederken, eşanjör tasarımlarının optimizasyonu da yüzey boyunca düşük ve eşit sıcaklık gösterdiği vurgulanmaktadır. Düzensizliğin etkisi, tüm FV sistemleri için belirgin olarak bulunduğu ifade edilmektedir [57].

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. BEFV/T Sistemi

Bina entegreli fotovoltaik termal (BEFV/T) sistemi hem elektrik hem de sıcak su üretmek üzere tasarlanmış ve daha sonra bina ile bütünleştirilmiştir. FotoVoltaik termal (FV/T) sistem, BEFV/T uygulaması için yüksek verimli bir çoklu kristal FotoVoltaik (FV) modül ve spiral akışlı soğurucu (bakır plaka) içerir. Bu çalışmada, emicinin polikristal silikon FV modülünün düz plakalı tekli cam levhasının altına bağlandığı ve suyun soğurucuda bir ısı transfer ortamı olarak kullanılmıştır.

Bu bölümde, Binaya Entegre FotoVoltaik/Termal (BEFV/T) sistemlerin genel yapısı ve sistemi oluşturan alt bileşenlerin tanımları ve blok diyagramı verilmiştir. Ayrıca sıcaklığın, akım/gerilim (I/V) ve güç/gerilim (P/V) karakteristiği üzerine etkisi incelenmiştir.

Türkiye’de, üretilen enerjisinin büyük bir bölümü binaların genellikle soğutulması ve ısıtılması için tüketilmektedir. Bu sebeple, binalarda soğutma ve ısıtma gibi kullanılan yükler, iklimsel şartları gerçekleştirmek için en aza indirilmelidir. Bina gibi yapılarda enerji tasarrufu, enerjinin korunumu yöntemleri dikkate alınarak gerçekleştirilebilmektedir. BEFV/T sistemin uygulaması, bu metotlardan biridir.

Binaya Entegreli FV/T sistem teknolojisi son zamanlarda hızla gelişmeye başlamıştır. BEFV/T teknoloji, bina enerji üretimini binanın dış cephesinin diğer özellikleri ile beraber birleştirmesi dolayısıyla hızla gelişmeye başlamıştır.

BEFV/T sistemleri genel olarak iki ayrı grupta inceleyebiliriz. Bunlardan ilki çatıya entegreli FV/T sistemler, ikincisi ise binanın dış cephesine entegreli FV/T sistemlerdir. Bunlardan ilki olan çatıya entegreli FV/T sistemler, yüksek yalıtım sağlarken, binanın dış cephesine entegreli FV/T sistemler ise pahalı olan dış cephe kaplama malzemelerinin yerini almaktadır.

Bina entegreli FV/T modülü [58-60] ve Trombe’li duvar sistemi [61-63] üzerine yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bizim kullandığımız BEFV/T sistemin havalandırması da trombe duvarlıdır. Dolayısıyla ile enerjinin en az maliyetle sürekli olarak sağlanmasına olanak vermektedir.



### 3.1.1. BEFV/T Sistemin Yapılmasının Nedenleri

FV/T'ti sistemin kurulum maliyeti oldukça yüksek olup, endüstriyel ve bina sahiplerine göre hesaplanamaz. FV/T hava veya su bazlı kolektörlerin en yaygın uygulamalardan biri olan, Bina Entegreli FotoVoltaik Termal (BEFV/T) sistem son yıllarda hızlı bir gelişme göstermektedir. BEFV/T sistemi, daha düşük çevre etkisi ile daha yüksek güvenilirlik sistemi nedeniyle her iki enerjiyi de üretmek için çok ideal bir sistem olduğu görülmektedir. Genellikle, BEFV/T sistemi FV modülünü, tüplerden oluşan emici, şeffaf cam kapağı ve yalıtılmış kaplardan oluşur. Önümüzdeki birkaç yıl içinde BEFV/T sistemi ve ürünlerinde hızlı bir büyüme olacağı beklenmektedir [64-66].

BEFV/T sistem, binaların genel olarak güney yönüne bakan kısımlarına uygulanmaktadır. Uygulanan sistem ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada, Şekil 3.2'de prototip şeması verilen sistemin çalışmasının, bina entegreli FV/T sistemin enerji analizi uygulamalı olarak yapılmıştır.

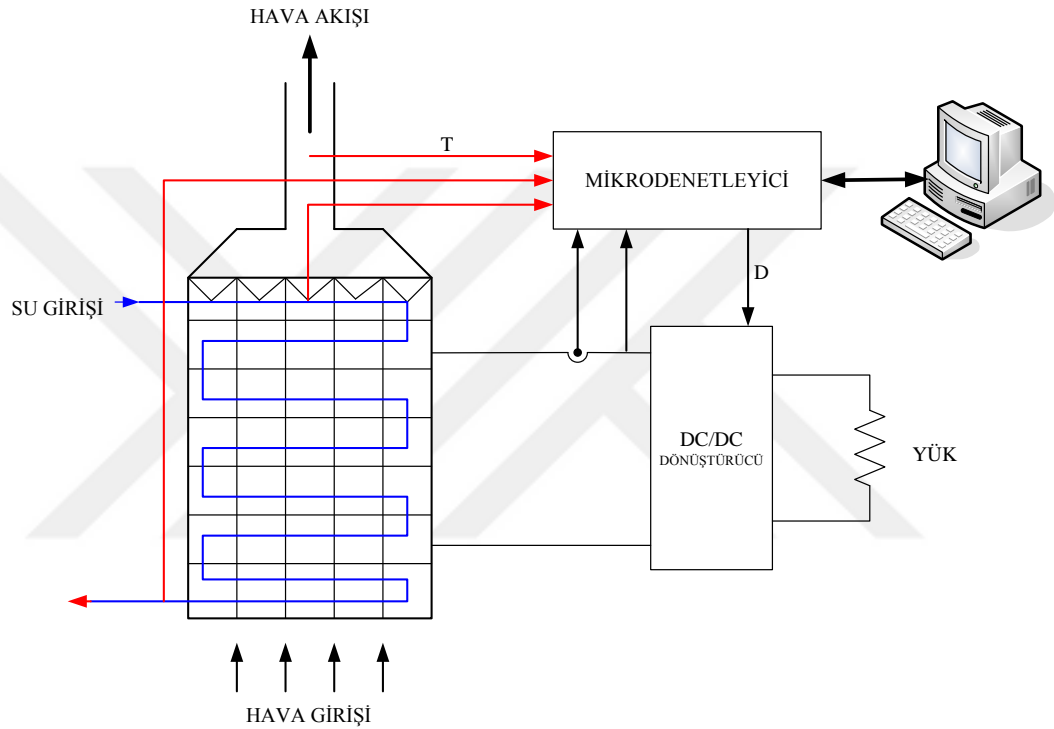
BEFV/T sistemin kullanımının hızlı bir şekilde yaygınlaşması, elektrik üretimi ve ısıtma ihtiyacı sistemleri için kullanılan fosil yakıtların miktarının kullanımının azalmasına neden olacaktır. Dolayısıyla fosil yakıtların kullanımının azalması ile de hava kirliliğinin azaltılmasına büyük oranda katkı sağlayacak ve sürdürülebilir bir çevre oluşturmak için büyük bir avantaj sağlayacaktır.

### 3.2. Kullanılan Materyaller ve Yöntem

Bu çalışmada, deneysel yöntemlerle sıcaklığın BEFV/T üzerine etkisi deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Deney düzeneğinin basitleştirilmiş blok şeması Şekil 3.1'de verilmiştir. Deney düzeneğinin temel bileşenleri aşağıda sunulmuştur.

- Mikrodenetleyici
- BEFV/T panel
- DC/DC dönüştürücü

- Akım, gerilim ve sıcaklık algılayıcıları
- Su ve hava akışı kontrolü için eyleyiciler
- Termal kamera
- Lazer tipi termometre
- Solar powermetre
- Programlama ve veri görselleştirme için kişisel bilgisayar

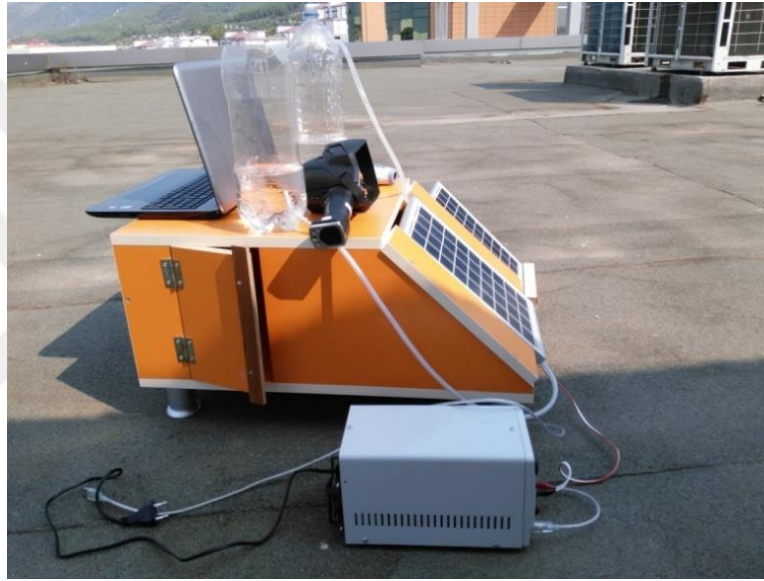


Şekil 3.1. BEFV/T sistemin blok şeması

Sistemin ana kumandasını mikrodnetleyici gerçekleştirmektedir. mikrodnetleyicinin proje kapsamındaki görevi sistemin elektriksel ve termal verilerini toplayıp bilgisayara yollamaktır. FV sistemlerin termal karakteristiklerini iyileştirmek için panel sıcaklığının 25°C'ye yakın bir değerde tutulması gerekir. Bu sıcaklık değeri panellerin anma güçlerinin elde edilebileceği değerdir ve üreticiler tarafından STC (Standard Test Condition) standart test koşulları olarak isimlendirilmektedir. BEFV/T kullanımı ile FV panellerin STC ye yakın çalışma değerleri sağlaması planlanmaktadır.

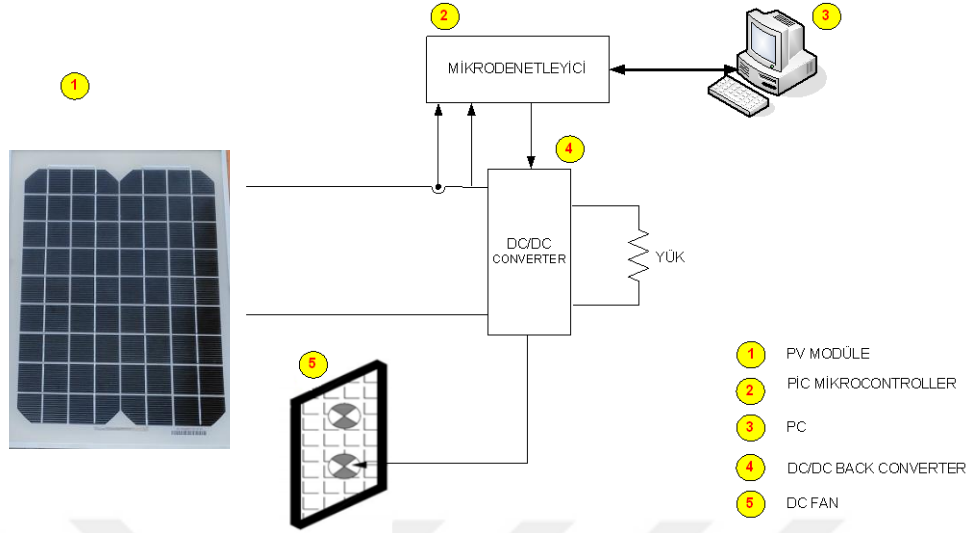
DC/DC dönüştürücünün görevi ise paneli elektriksel olarak yükleyip akım/voltaj karakteristiğini elde etmek olacaktır. DC/DC dönüştürücü maksimum güç aktarımı ve akım/voltaj karakteristiğinin türetilmesi için çok önemli bir elektronik ekipmandır. Bu ekipmanın kontrolü de mikrodenetleyici tarafından gerçekleştirilecektir. Bu sayede elektriksel olarak da en yüksek verimin elde edilmesi sağlanacaktır. Gerçekleştirilen bu BEFV/T sistemin prototip uygulama deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.2’de verilmiştir.

### 3.2.1. BEFV/T Sistemin Prototip Şeması



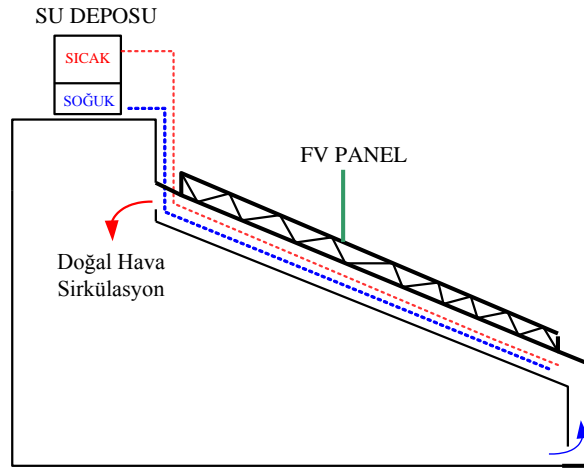
Şekil 3.2. Gerçekleştirilen BEFV/T sistemin prototipi

Ayrıca BEFV/T sistemin hava sirkülasyonlu FV sistemin FV/T hava soğutmalı ( $FV/T_{(hava)}$ ) şematik gösterimi Şekil 3.3’ te ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Sistem FV panel, DC fan, DC/DC buck tipi çevirici ve bilgisayar kısımlardan oluşmaktadır. FV panele zorlamalı hava sirkülasyonu uygulanmıştır.



Şekil 3.3. Fan soğutmalı BEFV/T sistemin şematik gösterimi

Tez çalışmasında kullanılan sistemin şematik (yandan)gösterimi ise Şekil 3.4'te verilmiştir. FV panelin hava sirkülasyonlu soğutması için kullanılan zorlamalı hava, aşağıdan yukarı doğru ısınan hava bina içerisine verilmiştir. Sulu sistemde ise, hava doğal hali ile aşağıdan yukarıya doğru ısınan hava yukarı çıkar prensibi ile istenildiğinde bina içerisine alınmıştır.



Şekil 3.4. Deney düzeneğinin yandan görünüşü

### 3.3. Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri

#### 3.3.1. FV Panel

Deneyleerde TOMMATECH firmasının TT10-36P Polycrystal FV paneli kullanılmıştır. Kullanılan FV panelin görüntüsü Şekil 3.5'te, modülün katalog bilgisi Çizelge 3.1 'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 3.5. Kullanılan FV modül

Çizelge 3.1. Kullanılan FV Modülün Katalog Değerleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Güneş ışıması	S	1000	W/m <sup>2</sup>
Sıcaklık	T	25	°C
Maksimum Güç	P	10	W
Nominal Açık Devre Voltajı	V <sub>ocn</sub>	21.5	V
Maksimum Güç Gerilimi	V <sub>mp</sub>	17.3	V
Nominal Kısa Devre Akımı	I <sub>scn</sub>	0.71	A
Maksimum Güç akımı	I <sub>mp</sub>	0.57	A

### 3.3.2. FV Panel Bakır Levha ve Bakır Boruların Yerleştirilmesi

Bu çalışmada, FV panel ile BEFV/T panelin ısıl ve elektriksel karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. BEFV/T panellerde bulunan ısı değiştirici tertibatın etkisini ortaya koyabilmek için iki adet panele ihtiyaç vardır. Bunlar (panellerin FV panel kısmı özdeş olmak üzere), bir adet standart FV panel ve bir adet BEFV/T paneldir. Fakat yurt içi piyasada bu şekilde özdeş iki panel bulmak mümkün olmadığından iki adet özdeş FV panel alınıp bir tanesine BEFV/T özelliği kazandırılmıştır. FV panele BEFV/T özelliği kazandırılma işlemleri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

FV modülün ölçülerine uygun bakır bir levha panelin arka yüzeyine Şekil 3.6' daki gibi monte edilmiştir. Bakır levhanın üzerine de 5mm çapında bakır boru kaynak yoluyla sabitlenmiştir. Böylece standart bir FV panele bakır boru ve levha monte edilecek bir BEFV/T elde edilmiştir. Bakır boruya sıvı giriş ve çıkışları için plastik borular eklenmiştir.



Şekil 3.6. Tasarlanan BEFV/T sistemin arkadan görünüşü

### 3.3.3. Solar Power Metre

Deneyler esnasında güneş ışınmasının ölçümleri, SM206 modeli olan solar power metre ile yapılmıştır. Solar power metre cihazının katalog bilgisi incelendiğinde doğruluk payının  $\pm 10 \text{ W/m}^2$  olduğu görülmektedir. Cihaz ile ilgili ayrıntılı bilgi ve cihazın resmi üretici firmanın katalogunda EK-4' teki gibi verilmiştir.

### 3.3.4. Lazer Termometre

Deneylemiz esnasında panel sıcaklığının ve sıvı sıcaklığının ölçümünde, GİVOX DT-8806 marka temassız kızılötesi termometre kullanılmıştır. Kullanılan termometrenin teknik özellikleri Çizelge 3.2’te ve cihazın resmi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Temassız kızılötesi termometre [67]

Çizelge 3.2. Temassız kızılötesi termometre teknik değerleri [67]

Ölçüm Aralığı Modları	Değerler
Vücut sıcaklık fonksiyonu	32.0°C - 42,5°C arası
Yüzey sıcaklık fonksiyonu	0°C - 60°C arası
Doğruluk derecesi	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
Ölçüm mesafesi	5cm ile 15 cm arasında
Otomatik durma	7 saniye
Nemlilik oranı	$\leq \%85$
Ekran	0.1°C

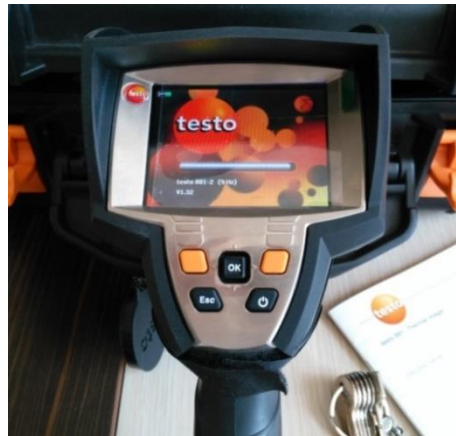
### 3.3.5. Termal Kamera

Sıcaklık dağılımının panel üzerindeki görüntülerini net görmek için kullandığımız termal kamera TESTO 881 olup, termal kameranın önemli teknik özellikleri aşağıdaki gibi verilmiştir. Kullanılan termal kameranın resmi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Termal kameranın özellikleri:

- Algılayıcı tipi 160x120
- Görüntü kalitesi NETD < 50mK
- Standart lensler 32° x 23°
- Güçlü LED içeren dahili kamera
- Otomatik sıcak/soğuk nokta belirleme
- Motor sistemli merkezleme
- Sıcaklık ölçüm aralığı -20 .....+350°C
- Yüzeyin nem dağılımını görüntüleme
- Eş sıcaklık özelliği
- Ortamdaki maksimum / minimum görüntü alma

Deney sırasında termal kameradan alınan görüntülerden bazıları Bölüm 4’te Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 3.8. Testo 881 termal kamera



### 3.3.6. DC/DC Dönüştürücü

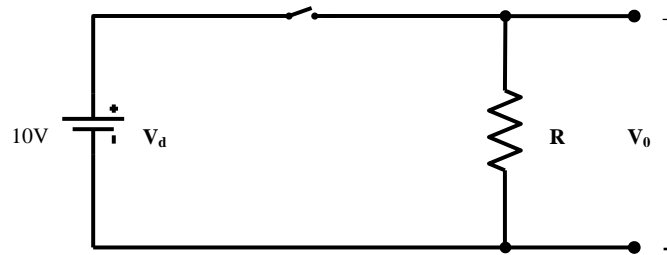
DC/DC dönüştürücülerin ayarlı direnç (reosta) gibi çalışma mantığı vardır. Ayrıca büyük transformatörlere de ihtiyaç duymazlar. Buradaki amacımız, gerilimi değiştirmek değil, reostayı ortadan kaldırmaktır.

Bu çalışmada buck tipi DC/DC dönüştürücü kullanılmıştır. Kullanılan buck tipi dönüştürücü 2 adet N kanal MOSFET ( IRF 540), 100 $\mu$ H toroid bobin ve yarı köprü MOSFET sürücünden (IR2104) oluşmaktadır. Akım ve gerilim değerlerini örnekleme, gerekli  $D$  değerini üretme ve bilgisayar ile haberleşmek amacıyla da ATMEGA 328p mikroişlemciye sahip ARDUİNO UNO R3 kullanılmıştır. FV dizisinin çıkış akımını ( $I_{pv}$ ) ölçmek için  $\pm 5A$  ölçüm aralığına sahip ACS712 akım sensörü kullanılmıştır. FV dizi gerilimini ( $V_{pv}$ ) ADC ölçüm aralığı olan 0-5V 'a dönüştürmek için gerilim bölücü kullanılmıştır.

Buck DC/DC dönüştürücülerin çıkış gerilimleri, uygulanan DGM (darbe genişlik modülasyonu) işaretinin doluluk oranıyla (Duty Cycle =  $D$ ) kontrol edilmekte ve 0 ile giriş gerilimi arasında değişmektedir. Giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki matematiksel ifadeler Denklem (3.14)' te verilmiştir.

### 3.4. Buck tipi DC/DC Dönüştürücü Tasarımı

Şekil 3.9'da görülen DC devre buck dönüştürücünün çalışmasını özetlemek için oluşturulmuş basit bir elektrik devresidir. Bu elektrik devresindeki DC kaynak anahtarla  $R$  direnci üzerine güç aktarmaktadır. Buradaki  $S$  anahtarının açılıp kapanma periyodu  $T_s$  olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.9. Buck tipi DC/DC Dönüştürücü basit elektrik modeli

Anahtarın kapalı olduğu süre  $T_{on}$ , açık olduğu süre ise  $T_{off}$ ' tur.  $T_{on}+T_{off} = T_s$  olarak vermektedir. Denklem (3.1)  $R$  direnci üzerinde oluşacak olan gerilimin ortalama değerinin hesabını vermektedir. Bu eşitlikten de görüldüğü üzere, direncin üzerindeki gerilimin periyot ( $T_s$ ) ve anahtarın kapalı olduğu süre ( $T_{on}$ ) ile doğrudan ilişkisi vardır.

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} V_o(t) \cdot dt = \frac{1}{T_s} \cdot \left( \int_0^{T_{on}} V_d \cdot dt + \int_{T_{on}}^{T_s} \theta \cdot dt \right) = \frac{T_{on}}{T_s} \cdot V_d \quad (3.1)$$

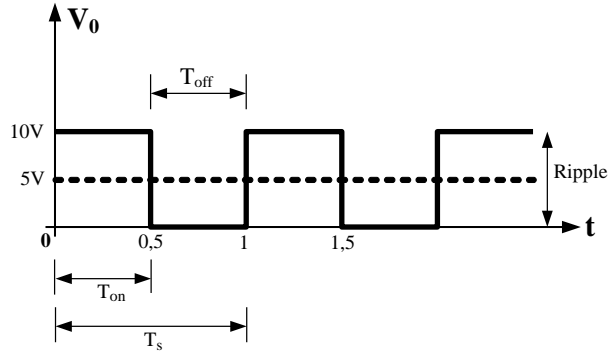
Anahtarın kapalı olduğu süre ( $T_{on}$ ) ve periyot arasındaki ilişkiye duty cycle ( $D$ ) ismi verilmektedir ve  $D$  ile ilgili eşitlik Denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$\frac{T_{on}}{T_s} = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = D \quad (3.2)$$

Denklem (3.3) ise, yukarda basit elektrik modeli verilen buck dönüştürücünün  $D$ 'ye bağlı olarak voltaj transfer karakteristiğini göstermektedir. Denklem (3.3)'ten anlaşıldığı üzere, doluluk oranının değiştirilmesi ile direncin üzerine aktarılacak olan gerilim değeri kontrol edilebilmektedir. Bu durum buck dönüştürücüyü  $D$  ile kontrol edilebilir bir ayarlı gerilim kaynağı olarak kullanılabilceğini ispat etmektedir.

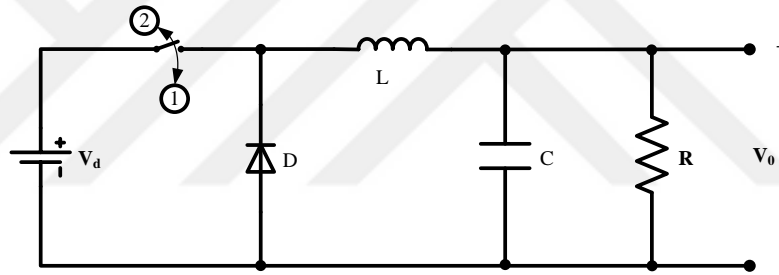
$$V_0 = D \cdot V_d \quad (3.3)$$

Şekil 3.10 direnç üzerindeki gerilimin zamana göre grafiğini vermektedir. Grafikte görüldüğü üzere ortalama değer  $D$  ile kontrol edilebilse de direnç üzerindeki gerilimin çok büyük bir dalgalanma (ripple) değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın azaltılabilmesi için alçak geçiren bir filtreye ihtiyaç vardır. Burada kullanılacak olan alçak geçiren filtre (Low Pass Filter) bobin ve kapasiteden (L,C) oluşmaktadır.



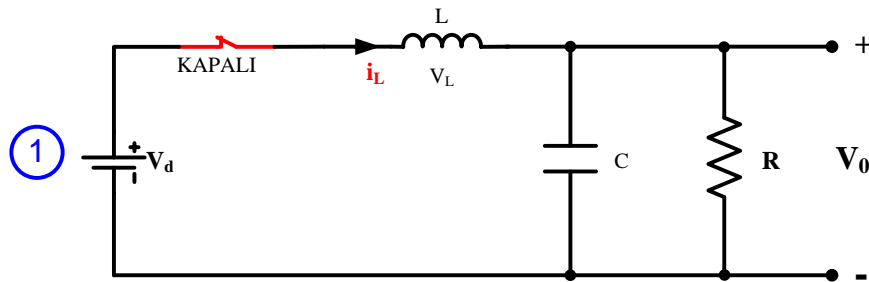
Şekil 3.10. Direnç üzerindeki gerilimin zamanla değişimi

Buck dönüştürücünün anahtar, diyot, bobin ve kapasiteden oluşan şekli Şekil (3.11)'de verilmiştir. Buradaki anahtarın açılıp kapanması ile bobin üzerinde enerji indüklenmektedir. Bu çalışmada anahtarlama görevini üstlenen anahtar ve diyot elemanları yerine iki adet NMOS transistor kullanılmıştır.



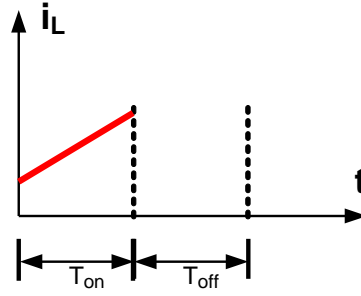
Şekil 3.11. Buck tipi DC/DC Dönüştürücü devre şeması

Anahtarın açılıp kapanma periyodu ile ilgili durumlar Şekil 3.12 ve Şekil 3.14'te ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.



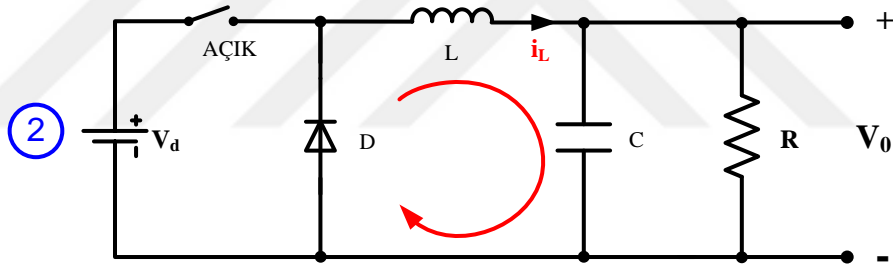
Şekil 3.12.  $T_{on}$  zamanında Buck tipi DC/DC Dönüştürücü şeması

Ayrıca  $T_{on}$  ve  $T_{off}$  durumlarındaki bobin akımının zamana bağlı karakteristikleri eğrileri Şekil 3.13 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.

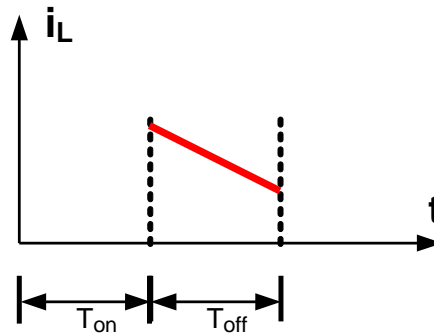


Şekil 3.13.  $T_{on}$  zamanında bobin akımı

Yukarıdaki şekillerde kullanılan bobin  $T_{on}$  zamanında enerji depolayıp  $T_{off}$  zamanında ise bu enerjiyi sisteme aktarmaktadır.  $T_{off}$  zamanı boyunca bobin akımının zamana bağlı grafiği Şekil 3.15'te verilmiştir.

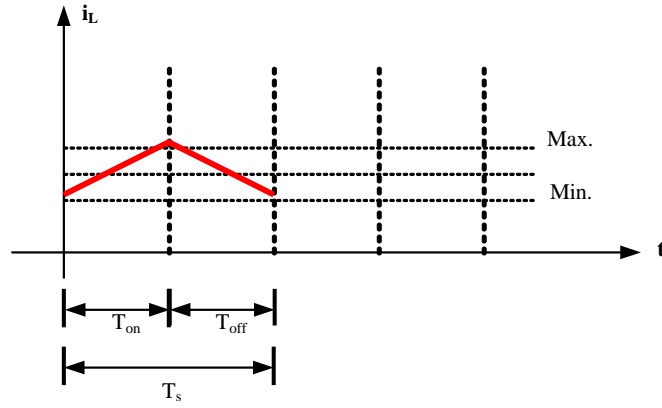


Şekil 3.14.  $T_{off}$  zamanında Buck tipi DC/DC Dönüştürücü şeması



Şekil 3.15.  $T_{off}$  zamanında bobin akımı

$T_s$  zamanı boyunca bobin akımının zamana bağlı değişimi Şekil 3.16' da verilmiştir.



Şekil 3.16. Bir periyot ( $T_s$ ) boyunca bobin akımı

Şekil 3.16'da verilen bobin akımından kaynakla buck tipi dönüştürücünün doluluk oranının tespitine yönelik matematiksel eşitlikler Denklem 3.4-3.12'de verilmiştir.

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (3.4)$$

$$i_L = \int \frac{V_L}{L} \cdot dt \quad (3.5)$$

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{T_{on}} \frac{V_L}{L} \cdot dt = \frac{V_d - V_0}{L} \cdot T_{on} \quad (3.6)$$

$$\Delta I_{Loft} = \int_0^{T_{off}} \frac{V_L}{L} \cdot dt = \frac{-V_0}{L} \cdot T_{off} \quad (3.7)$$

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loft} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{V_d - V_0}{L} \cdot T_{on} - \frac{V_0}{L} \cdot T_{off} = 0 \quad (3.9)$$

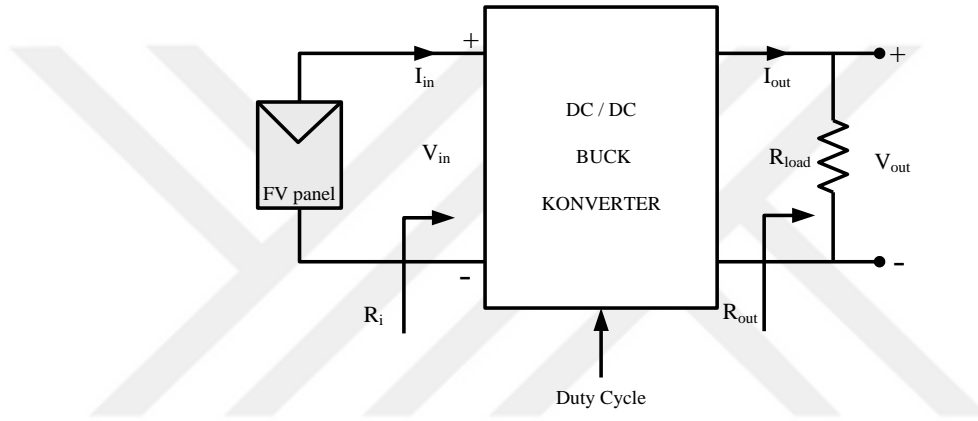
$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = D \quad (3.10)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de  $T_{on}$  ve  $T_{off}$  yerine bunların toplamı olan  $T_s$  yazılırsa,

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (3.12)$$

Buck tipi dönüştürücünün doluluk oranı (D) Denklem 3.12’de verildiği gibi elde edilir. D ifadesi 0–1 ( %0 - %100 ) arasında değişen reel sayıları ifade eder. Tez çalışmasında kullanılan elektronik düzeneğin blok şeması Şekil 3.17’de verilmiştir. Şekil 3.17’deki devre; FV panel, DC/DC dönüştürücü ve sabit dirençten oluşmaktadır.



Şekil 3.17. Buck dönüştürücünün FV panelle kullanımı

DC/DC dönüştürücünün giriş gerilimi  $V_{in}$ , çıkış gerilimi ise  $V_{out}$  olarak Denklem 3.13’te verilmiştir. DC/DC dönüştürücünün girişi ve çıkışı arasındaki ilişki ise, Denklem 3.14’te verildiği gibidir

$$V_0 = D \cdot V_d \quad (3.13)$$

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (3.14)$$

Buck dönüştürücülerin verimleri %90-%99 arasındadır. Bu durumda dönüştürücünün giriş gücü ile çıkış gücü Denklem 3.15’teki gibi eşit kabul edilebilir.

$$P_{in} = P_{out} \quad (3.15)$$

Dönüştürücünün giriş gücü ile çıkış gücünün açık hali Denklem 3.16'da verilmiştir.

$$I_{in} \cdot V_{in} = I_{out} \cdot V_{out} \quad (3.16)$$

ifadesinde  $V_{out}$  yerine Denklem (3.14)'teki değer yerine yazılırsa;

$$I_{in} \cdot V_{in} = I_{out} \cdot D \cdot V_{in} \quad (3.17)$$

Buck tipi DC/DC dönüştürücüde giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişki Denklem (3.18)'de verilmiştir.

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{D} \quad (3.18)$$

FV dizisi tarafından görülen direncin ( $R_i$ ) ve yük direncinin ( $R_{load}$ ) ifadeleri Denklem (3.19a) ve (3.19b)'de verilmiştir.

$$R_{load} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (3.19a)$$

$$R_i = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{out}/D}{I_{out} \cdot D} \quad (3.19b)$$

Denklem (3.19a)'daki  $V_{out}$  Denklem (3.19b) 'de yerine yazılırsa,

$$R_i = \frac{V_{out}}{I_{out}} \cdot \frac{1}{D^2} \quad (3.19c)$$

Denklem (3.20),  $R_{load}$ 'ın sabit olması durumunda  $R_{in}$ 'in D ile kontrol edilebileceğini ve DC/DC dönüştürücünün D işareti ile kontrol edilebilen bir ayarlı dirence dönüşmesi anlamına gelmektedir. Bu özellik dönüştürücüleri Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNI) donanımı olarak kullanılabilir kılmaktadır. Bu çalışmada dönüştürücü, panelin I/V-P/V karakteristiklerini elde etmek amacı ile kullanılmıştır.

$$R_i = \frac{R_{load}}{D^2} \quad (3.20)$$

D=1 için, Denklem (3.20)'de yerine yazılarak giriş ve çıkış dirençleri Denklem (3.21a)'da olduğu gibi hesaplanır.

$$R_i = R_{load} \quad (3.21a)$$

Bölüm 4.2'deki deney verilerinden faydalanarak FV panelin

$$R_i = \frac{20,04}{0,39} = 51,38 \Omega = R_{load} \quad (3.21b)$$

maksimum güç için FV panelin etiket değerlerinden  $R_i$  ;

$$R_i = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{17,3}{0,57} = 30,35 \Omega \quad (3.21c)$$

olarak elde edilir. Doluluk oranı değerini bulmak için  $R_i$  ve  $R_{load}$  değerleri Denklem (3.20) 'de yerine yazılırsa;

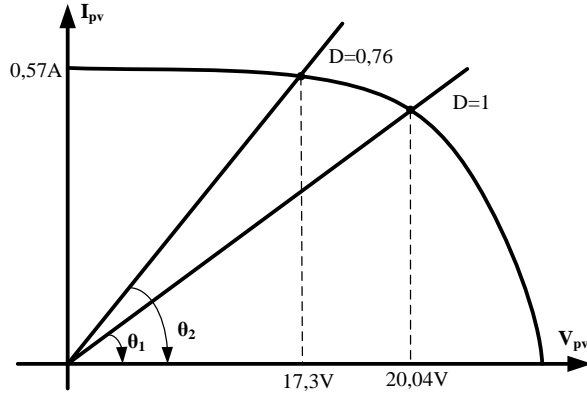
$$51,38 = \frac{30,35}{D^2} \quad (3.22a)$$

$$D = 0,76 \quad (3.22b)$$

olduğu görülür. Bulunan bu değerler FV panelin DC yük doğrularını meydana getirirler. Bu durumun karakteristik eğrileri Şekil 3.18'de olduğu gibi çizilir.

Bu çalışmada çıkış direncinin büyüklüğü  $R_o = 51,38\Omega$  ve gücü  $P_L = 5,55W$  olarak seçilmiştir. Yük direncinin gücü FV dizisinin üretebileceği tüm gücü soğurabilecek büyüklüktedir.





Şekil 3.18. FV panel ve DC yük doğruları

Mikrodenetleyici 62kHz frekansta 8bit çözünürlüğünde DGM üretecek şekilde programlanmıştır. Bu durumda  $D$ 'nin değeri 1/255'lik adımlarla ilerler ve 8 bit için  $D$ 'nin aralığı Denklem (3.23)'te yazıldığı gibi;

$$\frac{1}{255} \leq D \leq 1 \quad (3.23)$$

aralıklarında seçilmesi mümkün olur.

$D$ 'nin değişim aralığı Denklem (3.20)'ye uygulanırsa,  $R_i$  ifadesinin aralığı;

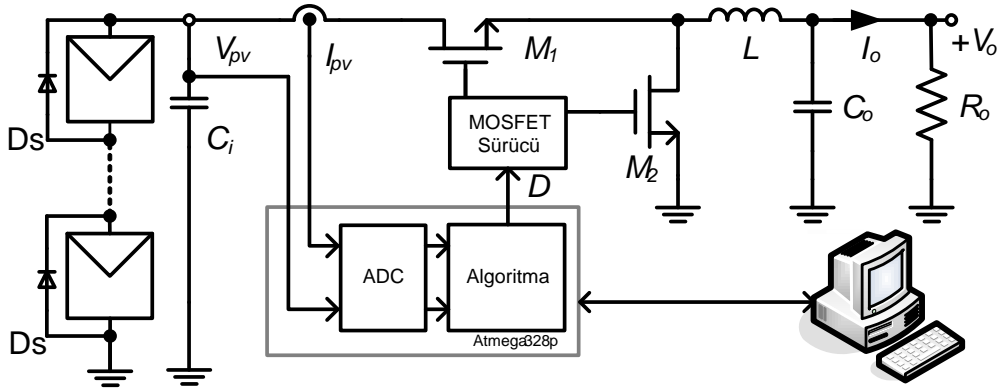
$$30,35 \Omega \leq R_i \leq 51,38 \Omega \quad (3.24)$$

olarak bulunur. Yapılan hesaplamalar ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki,  $R_i$ 'nin bu aralığı FV dizisini  $V_{oc}$  ile  $I_{sc}$  arasında tarayabilmektedir. Darbe genişlik modülasyonunun (DGM) doluluk oranının sınır değerlerinin belirlenmesi için Denklem (3.25a) ve (3.25b)'den faydalanılır.

$$D_{max} = \sqrt{\frac{R_{load}}{R_{i_{min}}}} \quad (3.25a)$$

$$D_{min} = \sqrt{\frac{R_{load}}{R_{i_{max}}}} \quad (3.25b)$$

Burada kullandığımız diyot ve anahtar görevini otomatik olarak yapacak olan MOS transistörler (IRF540) kullanılarak Şekil 3.19' daki devre tasarlanarak sunulmuştur.

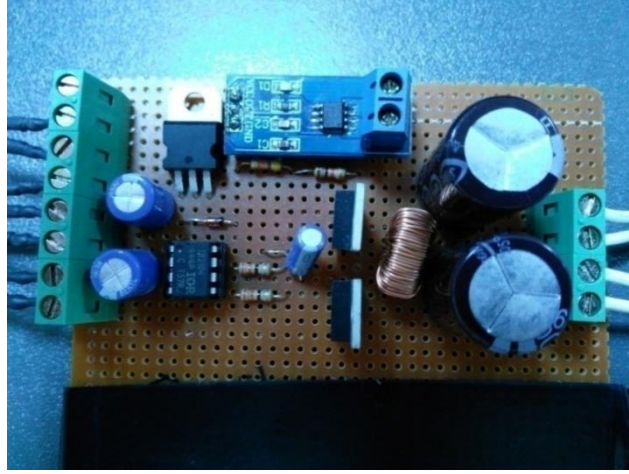


Şekil 3.19. Tasarlanan DC/DC buck tipi dönüştürücü

Yaptığımız DC/DC Buck tipi dönüştürücü içinde ACS712 akım sensörü (5A), IRF540 N kanal mosfet ( M1-M2 ), IR2104 yarı köprü mosfet sürücüsü, ATMEGA 328P mikroişlemcisi olan ARDUİNO UNO R3'ün PC ile haberleşmesi ve I/V-P/V değerlerini örnekleme, ADC ölçüm aralığı 0-5V gerilim bölücü kullanılmıştır. Yapılan buck tipi dönüştürücünün otomatik yük kontrol cihazı Şekil 3.20'de, elektronik devre tasarımı ise Şekil 3.21'de verilmiştir. Ayrıca dönüştürücü tasarım çalışması ile ilgili genel bir resim EK-2'de sunulmuştur.



Şekil 3.20. DC/DC Otomatik yük kontrolü



Şekil 3.21. Buck dönüştürücü elektronik devre tasarımı

### 3.5. Deney Düzenegi

BEFV/T sistemin deney düzeneginin genel görünümü Şekil 3.22’de görüldüğü gibi doğal hali, hava sirkülasyonlu ve su sirkülasyonlu hali olmak üzere üç şekilde tasarlanmıştır. Yapılan prototip 1/10 ölçeğinde hazırlanmıştır.



Şekil 3.22. Deney düzeneginin genel görünümü

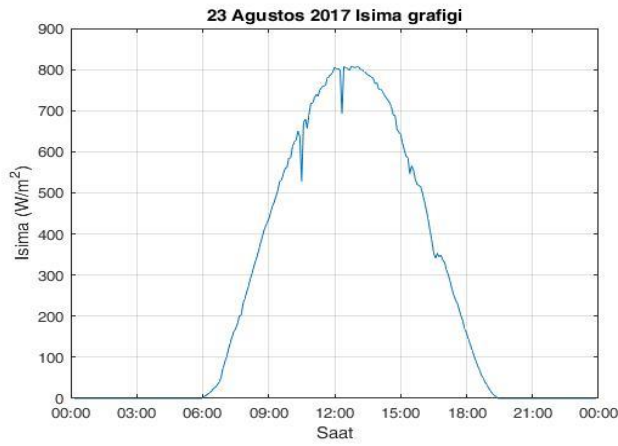
Güneş hücrelerinden en verimli bir şekilde faydalanmak için, hücre panelinin düzlemi ile güneş ışınımının düşme açısı birbirine dik olması gerektiğinden, deney düzeneği hazırlanırken, panelimizin açısı ortalama bir değer olan 45°'lik eğimle ayarlanmıştır. Panelin duvara montajında Trombe (bina cephelerinde kullanılan yalıtım malzemesi konum biçimi) sistemi kullanılmıştır. Kullanılan FV panelin teknik özellikleri 3.3 Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri bölümünde 3.3.1 FV Panel alt başlığı altında Şekil 3.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Su sirkülasyonu doğal olarak sağlanırken, hava sirkülasyonu DC fan ile zorlamalı olarak sağlanmıştır. Sistem üzerinde su sirkülasyonu için 2.5 litrelik depolar kullanılmıştır. Deney düzeneğinde akım-gerilim ve gerilim-güç karakteristiklerinin elde edilebilmesi için otomatik yük kontrollü DC-DC dönüştürücü ve bu verilerin alınıp işlenmesi için bilgisayar donanımı kullanılmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Deney Tarihlerindeki Meteorolojik Değerler

Bu çalışmada, yaz mevsimi boyunca değişik zamanlarda veriler alınmıştır. Ortalama değerleri yansıtan 23 Ağustos 2017 tarihindeki veriler örnek değerler olarak FV panelin karakteristik incelemesini yapmak amacıyla kullanılmıştır. Söz konusu tarih için Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Meteoroloji gözlem sisteminden alınan veriler MATLAB ortamında çizilmiş ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Meteorolojik değerler grafiği; a) 23 Ağustos 2017 ışıma grafiği

b) 23 Ağustos 2017 sıcaklık grafiği

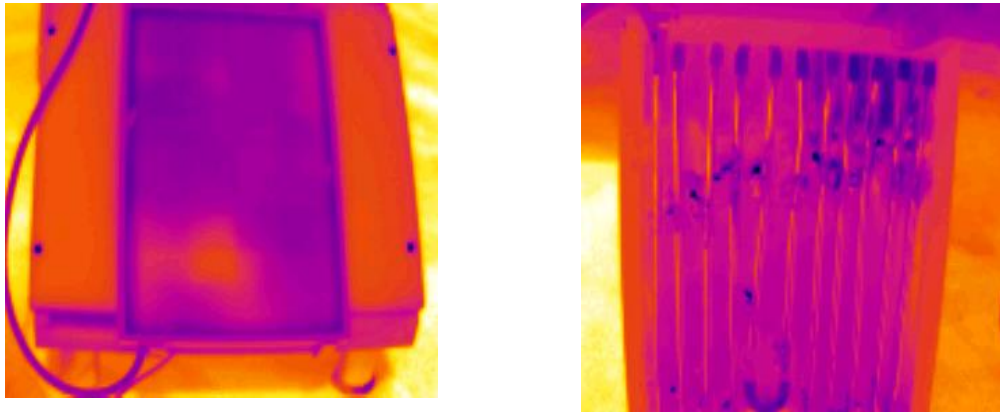
Değişik tarihlerde yapılan örnek ölçümlerde sıcaklığın 27°C ile 32°C – güneş ışınım miktarının 750 W/m<sup>2</sup> ile 950 W/m<sup>2</sup> aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerlerin ve deney sonucunda alınan elektriksel değerler ile akım/gerilim, güç/gerilim grafikleri MATLAB ortamında çizilerek, Bölüm 5'te Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Deney tarihindeki gün ışınması ve sıcaklık gibi değerler [68]'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bu veriler ve yukarıdaki Bölüm 1.6' da formülasyon kullanılarak elde edilen veriler doğrultusunda MATLAB Simulink programı ile çizilen akım/gerilim, güç/gerilim karakteristik eğrileri ise Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

#### 4.2. FV Panelin Termal Görüntüleri

Deney sırasında karakteristik değerler alınırken, sistem termal olarak da incelenmiştir. Isısal görseller termal kamera ile yapılmış ve alınan resimler Şekil 4.2' ve Şekil 4.3'de gösterildiği gibi verilmiştir.

Şekillerden anlaşılabilir olduğu üzere, su borularının geçtiği yerlerde panel ısısının daha düşük olduğu görülmektedir. Renk tonlaması, mavi en soğuk, kırmızı en sıcak bölgeyi temsil etmektedir.

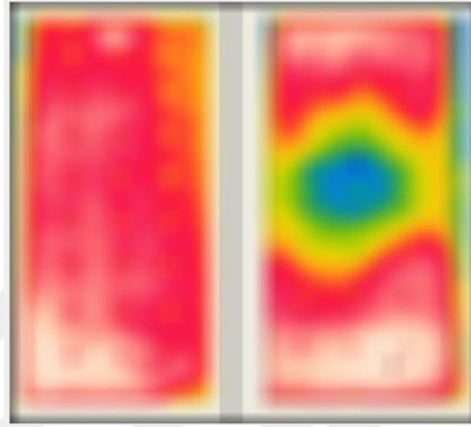


Şekil 4.2. BEFV/T Sistemin su sirkülasyonlu termal görüntüleri

Su ile soğutulan panelde, panelin klemens kısmından su geçirilemediği için o bölgenin diğer bölgelere göre daha sıcak kaldığı Şekil 4.2'de net bir şekilde

görülmektedir. Ayrıca, soğutmada kullanılan suyun ısısı ilk çevrimde çok düşmediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle aynı suyun bazı durumlarda soğutma için bir çevrim daha kullanılması gerektiği gözlemlenmiştir.

Hava ile soğutmada kullanılan FV panelin ise, sadece DC fan rüzgârına direkt maruz kalan bölgenin kısmi olarak soğuduğu, diğer bölgelerin ısılarının fan rüzgârına direkt maruz kalan bölgeden ısısının daha yüksek olduğu Şekil 4.3’de olduğu gibi termal görüntü ile gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. BEFV/T Sistemin fan sirkülasyonlu termal görüntüleri

### 4.3. FV Panelin Deneysel Verileri

Deney çalışması sırasında 10W’lık FV panelin; FV panel deneyi, FV panel hava sirkülasyonlu deneyi ve FV panel su sirkülasyonlu deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1’deki veriler kullanılarak; FV panellerin doğal hali, fan ile hava sirkülasyonu ve su sirkülasyonu durumları için güç verimlilikleri sırası ile  $P_{Fark.1}$ ,  $P_{Fark.2}$ ,  $P_{Fark.3}$  hesaplanarak karşılaştırılacak olursa, aşağıdaki Denklem (4.1) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanır.

$$\%P_{Fark} = \left( \frac{P_{max.panel} - P_{max.ölçülen}}{P_{max.ölçülen}} \right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1. Yapılan deneyler ve elde edilen değerler tablosu

	Yapılan Deney	Ortam Sıcaklığı	Panel Sıcaklığı	Işıma Miktarı (W/m <sup>2</sup> )	P <sub>max</sub>
<b>15.06.2017</b>	FV Panel	27°C	40°C	950	7,10W
	FV/T(hava)	27°C	36°C	950	7,38W
	FV/T(su)	27°C	31°C	950	7,71W
<b>27.07.2017</b>	FV Panel	32°C	47°C	800	5,90W
	FV/T(hava)	32°C	43°C	800	6,11W
	FV/T(su)	32°C	37°C	800	6,41W
<b>23.08.2017</b>	FV Panel	31°C	46°C	750	5,55W
	FV/T(hava)	31°C	41°C	750	5,75W
	FV/T(su)	31°C	36°C	750	6,03W

FV panelin doğal hali ile panelin nominal güç değerine göre farkı, yüzdelik olarak Denklem (4.2a)'da görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$\%P_{Fark.1} = \left( \frac{10-5.55}{5.55} \right) \cdot 100 = \%80 \quad (4.2a)$$

FV panelin fan motorlu hava sirkülasyonu ile panelin nominal güç değerine göre farkı, yüzdelik olarak Denklem (4.2b)'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$\%P_{Fark.2} = \left( \frac{10-5.75}{5.75} \right) \cdot 100 = \%73 \quad (4.2b)$$

FV panelin su sirkülasyonu ile panelin nominal güç değerine göre farkı, yüzdelik olarak Denklem (4.2c)'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$\%P_{Fark.3} = \left( \frac{10-6.03}{6.03} \right) \cdot 100 = \%65 \quad (4.2c)$$

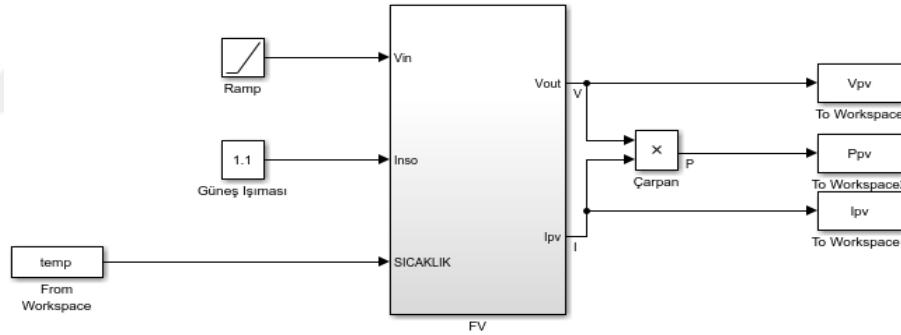
FV panelin STC şartlarında çalıştırılması durumunda yüzdelik fark değeri sıfır olması gerekmektedir. Yaptığımız uygulamalar arasında sıcaklığın 31°C ve güneş



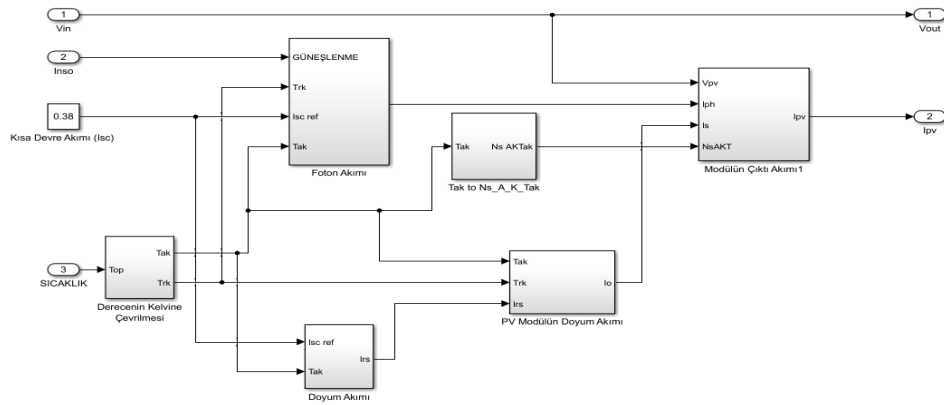
ışımının yaklaşık  $750 \text{ W/m}^2$  olduğu durum için yüzdelik fark değeri en düşük olarak  $FV/T_{(sulu)}$  sistemi ile elde edilmiştir.

#### 4.4. FV Panelin Bilgisayar Benzetimi

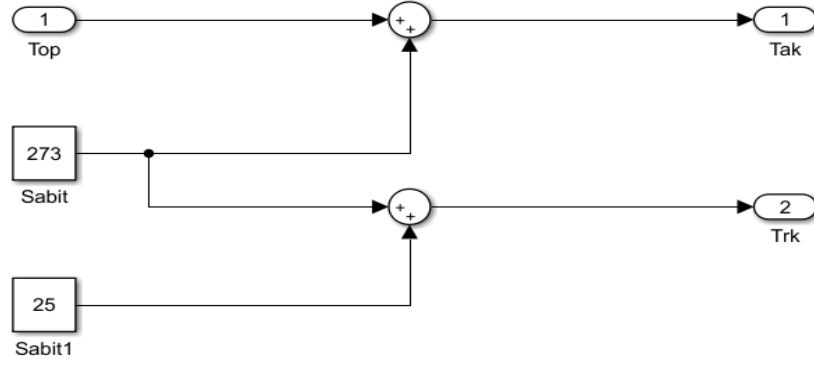
FV panelin bilgisayar ortamında modellenebilmesi amacıyla Bölüm 1.6'da verilen eşitliklerle MATLAB-Simulink ortamında bilgisayar benzetimleri yapılmıştır. Bu bilgisayar benzetim modelinin genel blok şeması Şekil 4.4'te verildiği gibidir. Genel blok şeması içerisindeki FV bloğunun alt bileşenleri ise Şekil 4.5'de sunulmuştur. Ayrıca PV blok içerisindeki alt bloklar; derecenin kelvine çevrilmesi, foton akımı hesabı, doyum akımı, ters doyum akımı ve çıkış akımı hesaplarını yapan alt fonksiyon bloklarından oluşmaktadır. Bunlar ile ilgili fonksiyon bloklarından panel sıcaklığı derecenin kelvine çevrilmesi Şekil 4.6'da, foton akımının hesabı Şekil 4.7'de, modülün doyma akımı hesabı Şekil 4.8'de, ters doyum akımı hesabı Şekil 4.9'da ve çıkış akımı hesabı ise Şekil 4.10'de verilmiştir.



Şekil 4.4. MATLAB/Simulink benzetim genel blok şeması



Şekil 4.5. MATLAB/Simulink PV bloğunun alt bileşenleri

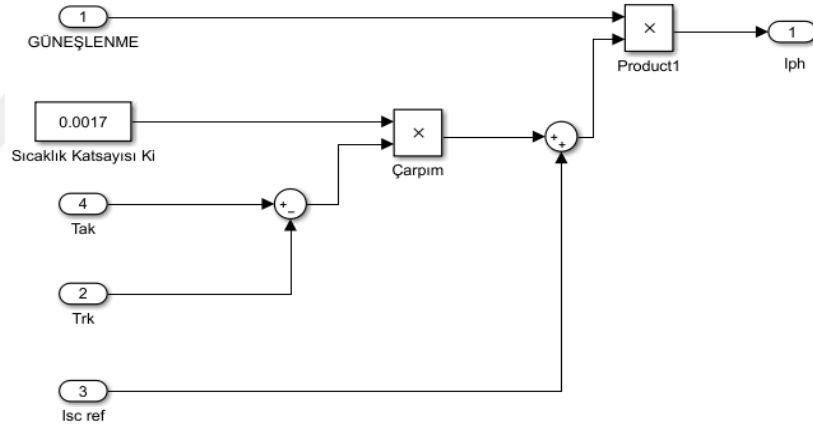


Operasyon sıcaklığını dönüştürmek için: santigrattan kelvine dönüşüm

**Denklemler**

1.  $Trk = 273 + 25$  (ref sıcaklığı)
2.  $Tak = 273 + Top$  (çalışma sıcaklığı)

Şekil 4.6. MATLAB/Simulink sıcaklığın kelvine dönüştürülmesi

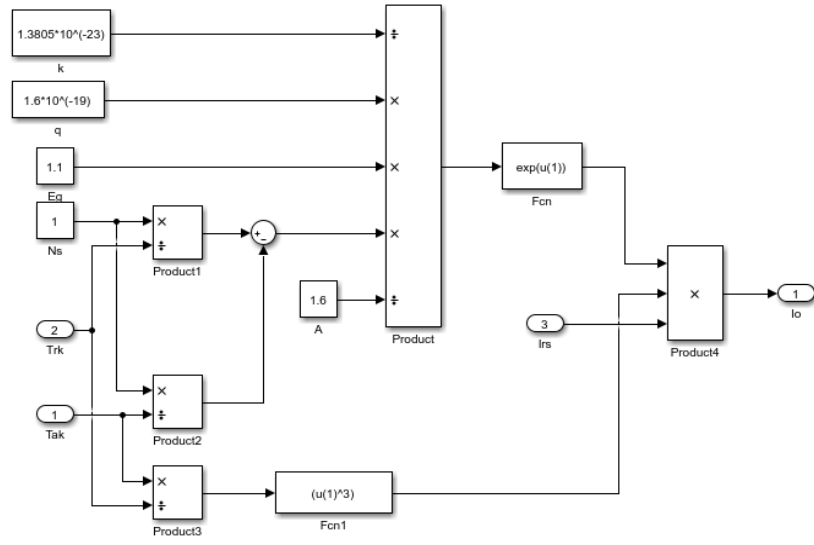


**Fonksiyon** = PV modülünün ışıktan üretilen foton akımını bulmak için

Denklemler:

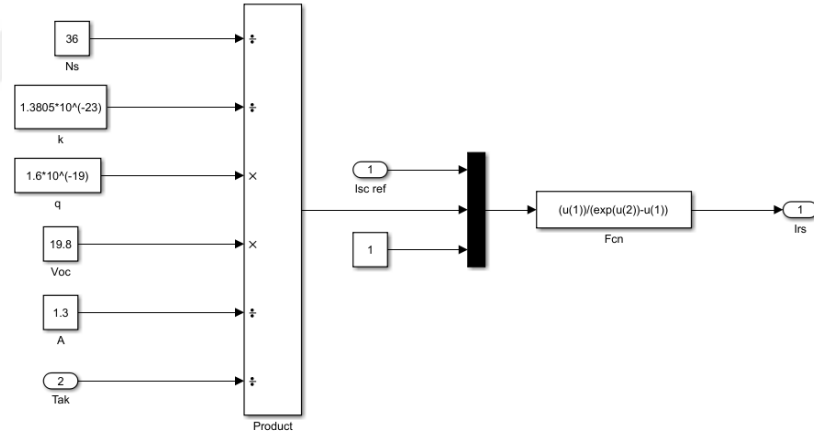
$$I_{ph} = [ I_{sc} + k_i ( T_{ak} - T_{rk} ) ] ( G/G_r )$$

Şekil 4.7. MATLAB/Simulink foton akımı hesabı



PV modülünün doyma akımı

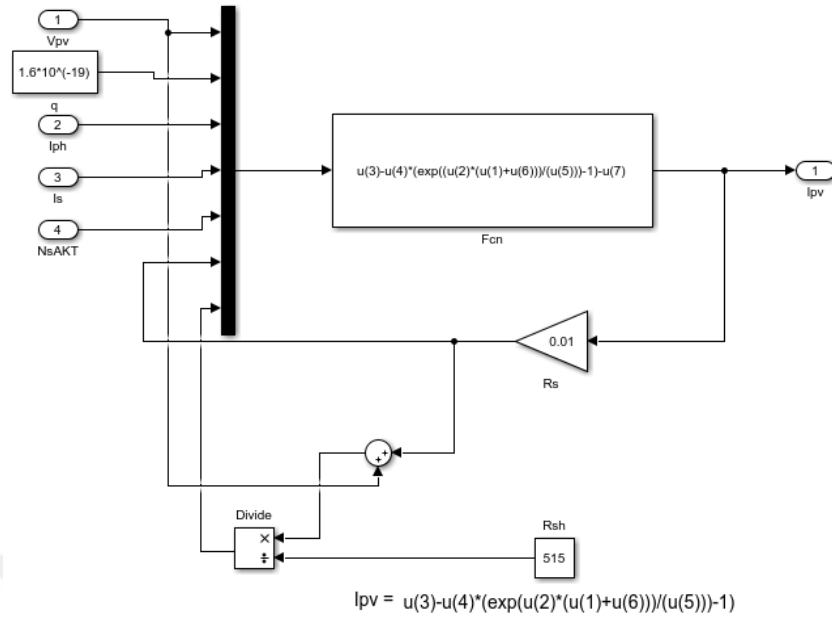
Şekil 4.8. MATLAB/Simulink modülün doyma akımı hesabı



FCN : TERS DOYMA AKIMI

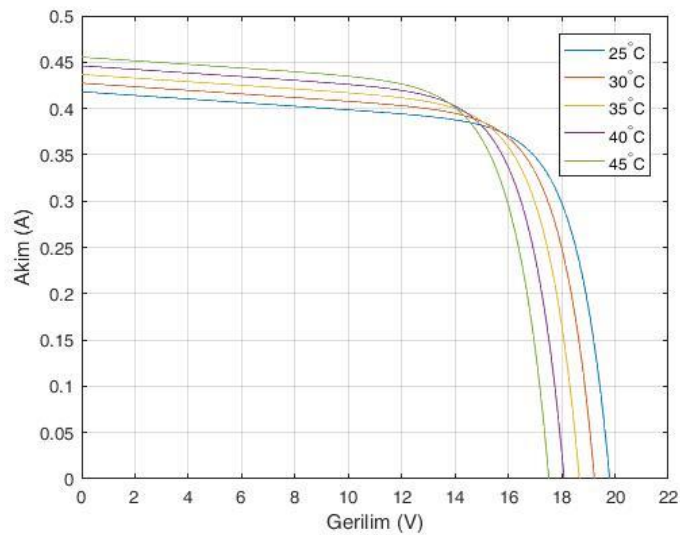
$$\text{DENKLEM : } I_{sc} / [\exp(q \text{ Voc} / N_s \cdot k \cdot A \cdot \text{Tak}) - 1]$$

Şekil 4.9. MATLAB/Simulink ters doyma akımı hesabı



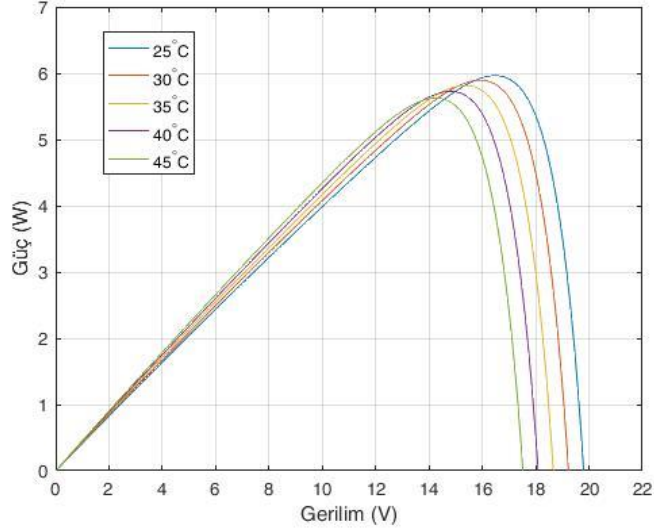
Şekil 4.10. MATLAB/Simulink çıkış akımı hesabı

Yukarıda blok şemaları verilen Simulink modelleriyle FV panelin farklı sıcaklık şartları altında I/V ve P/V grafikleri çizdirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.11. Farklı sıcaklık değerleri için I/V grafikleri

Şekil 4.11’den de görüldüğü üzere sıcaklığın artışıyla FV panelin açık devre gerilimi  $V_{oc}$  azalmakta, bununla beraber kısa devre akımı  $I_{sc}$  ise artmaktadır. Bu durum MGN’sinin sıcaklıkla değişeceğine işaret etmektedir. Aynı sıcaklık değişimlerinden elde edilen P/V verilerin grafiği ise Şekil 4.12’de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Farklı sıcaklık değerleri için P/V grafikleri

Yukarıda belirtildiği üzere sıcaklık değişimi ile FV panelin MGN’sinin (Maksimum Güç Noktası) büyüklüğü ve yerinin sıcaklıkla değiştiği Şekil4.12’den açıkça görülmektedir. Bu durum sıcaklığı artan bir FV panelde MGNİ ( Maksimum Güç Noktası İzleme) sistemine düşecek olan yükün daha da artacağı anlamına gelmektedir.

#### 4.5. Deney Sonuçlarının Simulink Tabanlı Doğrulanması

FV panelin bilgisayar benzetim ve deneysel I/V ve P/V grafikleri karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel güç verilerinin Simulink karşılaştırması Çizelge4.2’de verilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki FV panelin bilgisayar modeli panelin gerçek karakteristiğini yüksek başarıyla yansıtmaktadır.

Çizelge 4.2. Deneysel güç verilerinin Simulink ile karşılaştırması

FV Panel Sıcaklığı	Maksimum Güç Değerleri (W)		Hata Oranı (%)
	Simulink	Deney	
36°C	5,9	6,03	2,20
41°C	5,7	5,75	0,87
46°C	5,6	5,55	0,90

Çizelge 4.2'nin son kolonundaki hata değerleri, deneyden elde edilen  $P_{max}$  çıkış gücünün benzetim sonucu (Simulink) ile yüzdelik farkının değerleri Denklem (4.3)'e göre hesap edilmiştir.

$$\%P_{Fark} = \left( \frac{P_{max.ölçülen} - P_{max.hesap}}{P_{max.hesap}} \right) \cdot 100 \quad (4.3)$$

Denklem (4.3) ile hesaplanan maksimum güç hesaplarının hata miktarları oldukça düşük olup, toleranslar çerçevesindedir.

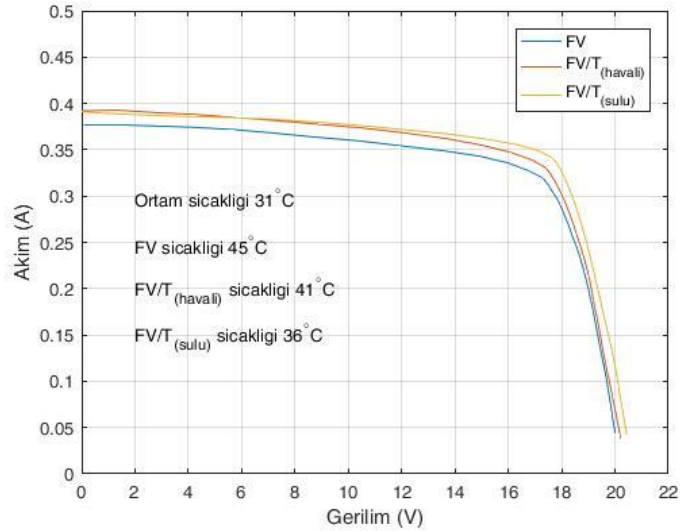
Yukarıdaki yapılan hesaplamalardan anlaşılacağı üzere, gerçekleştirilen matematiksel modelinin büyük başarı ile FV panelin karakteristiğini yansıttığı görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

FV panellerin elektriksel karakteristiği, ısı artışı ile olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Isı artışı panelin verimliliğini düşürmektedir. Tasarlanan prototip model ile FV panelin sıcaklık artışı engellenirken, panel üzerindeki ısı enerjisi binanın ısıtılmasında veya binanın sıcak su temininde kullanılabilir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Foto Voltaik panellerin verimliliğinin artırılması, FV/T ve binaya entegreli BEFV/T sistemin avantajlarının incelenmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda tasarlanan hava ve su soğutmalı FV/T sistemlerin elektriksel olarak özdeş FV panellerle karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar şu şekilde özetlenebilir;

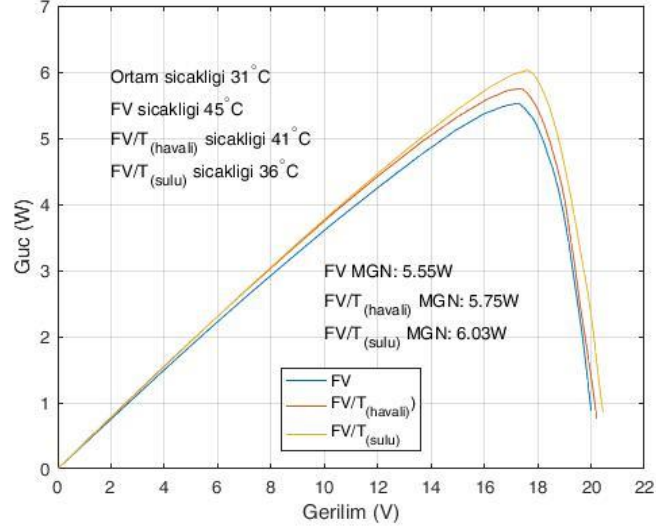
Aşağıda grafikleri çizilen örnek olarak seçilen değerler, 23 Ağustos 2017 tarihine aittir. Deneyler sırasında güneş ışımalarının  $750 \text{ W/m}^2$  ve ortam sıcaklığının  $31^\circ\text{C}$  olduğu ölçülmüştür. Deney boyunca ortam sıcaklığı ve ışıma bu değerlerde sabit kalmıştır. Paneller belirtilen ortam şartlarında 15 dk bırakılıp bu sürenin sonunda I/V ve P/V grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ayrıntılı bir biçimde Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Deney verilerinin I/V karşılaştırma grafikleri

Şekil 5.1'de 3 farklı panel tipi için I/V karşılaştırması verilmektedir. İncelenen 3 tip panelin FV, FV/T<sub>(hava)</sub> ve FV/T<sub>(sulu)</sub> deney sonunda sıcaklıklarının, sırasıyla

45°C,41°C ve 36°C'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Elde edilen I/V verilerinden güç analizi yapılmak amacıyla P/V verileri türetilmiş ve Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2. Deney verilerinin P/V karşılaştırma grafikleri

Şekil 5.2'i deneylerde kullanılan panellerden elde edilen P/V grafiklerini vermektedir. Bu grafikteki MGN değerleri ve FV panel referans alınarak bulunan güç kazanç farkları Çizelge 5.1'de hesaplanarak verilmiştir.

Çizelge 5.1. Güç ve kazanç karşılaştırma tablosu

	Yapılan Deneyle	Maksimum Güç (W)	Kazanç(%)
<b>15.06.2017</b>	FV	7,10	<b>Referans</b>
	FV/T (havalı)	7,38	3,94
	FV/T (sulu)	7,71	8,59
<b>27.07.2017</b>	FV	5,90	<b>Referans</b>
	FV/T (havalı)	6,11	3,55
	FV/T (sulu)	6,41	8,64
<b>23.08.2017</b>	FV	5,55	<b>Referans</b>
	FV/T (havalı)	5,75	3,6
	FV/T (sulu)	6,03	8,65



Değişik tarihlerde yapılan ölçümlerden elde edilen panel çıkış gücü ışımayla doğru orantılı olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Panel çıkış güçlerinin farklı zamanlarda farklı çıkış gücü vermesi sistemin verimliliği üzerinde ciddi bir fark oluşturmamıştır. Çıkış güçleri değişik de olsa verim yüzdelik yaklaşık olarak aynı düzeyde seyretmektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında hava sirkülasyonlu panelin normal panele göre verimi %3,60 arttığı hesaplanmıştır [69]. Ayrıca, su sirkülasyonlu panelin, normal panele göre çıkış gücü karşılaştırıldığında ise verimin %9 civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda su sirkülasyonlu panelin hava sirkülasyonlu panele göre veriminin %150 civarında arttığı görülmektedir. Ayrıca, su sirkülasyonlu panel ile hava sirkülasyonlu panelin güç verimliliği karşılaştırıldığında ise, %5 kadar ilave ek verim kazandırdığı gözlenmiştir.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, FV panellerden en yüksek verimi almak için panelin üzerindeki sıcaklığın 25°C – 30°C arasında olması gerektiği tespit edilmiştir. Panel üzerindeki sıcaklığın 30°C'nin üzerine çıktığında, FV panelin veriminin de sıcaklığa bağlı olarak düştüğü Şekil 5.2 'de açıkça görülmektedir.

Deneysel ve benzetim sonuçları, göstermektedir ki yüksek sıcaklık sistem dinamiğini olumsuz şekilde etkilemektedir. Bu nedenle, verim ve tasarım değerlerinin belirlenmesinde sıcaklık değerleri kesinlikle dikkate alınmalıdır.

Deneysel sırasında FV,  $FV/T_{(hava)}$ ,  $FV/T_{(su)}$  panellerin elektriksel karakteristikleri kaydedilmiştir. Bu karakteristikler üzerinde yapılan inceleme sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1- FV panelin sıcaklığının 45°C'ye kadar yükseldiği gözlenmiştir. Bu sıcaklık değişiminin P/V karakteristikleri üzerinde olumsuz etkiler gösterdiği gözlenmiştir.
- 2- FV panelin su sirkülasyonluya göre 0.48W güç daha düşük çıkış gücü sağladığı gözlemlenmiştir.
- 3- FV panelin hava sirkülasyonluya göre 0.20W daha düşük çıkış gücü sağladığı gözlemlenmiştir.
- 4- FV Panel soğutmasında kullanılan suyun sıcaklığının 37°C kadar yükseldiği gözlemlenmiş olup bu suyun sıcak su temininde kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak,  $FV/T_{(sulu)}$  sistemin diğer deney gruplarına göre termal ve elektriksel olarak daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Literatürde sıklıkla önerilen  $FV/T_{(hava)}$ 'lı sistem yerine,  $FV/T_{(sulu)}$  sistemin kullanımı çok daha iyi sonuçlar vermektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Kantaroğlu, F.,“Fotovoltaik Sistemler”, Ağustos 2010, Erişim Adresi: <http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/gunespilleri/giris.html>, Erişim Tarihi: 05.10.2017.
- [2] “CSP Solar Tower” Erişim Adresi: <http://www.greenwaycsp.com/>, Erişim Tarihi: 09.10.2017.
- [3] “Boya Uyarımlı Güneş Pili Uygulamaları İçin Tio<sub>2</sub>-poli (alkilendioksitiyofen) Nano Yapılarının Üretimi” Erişim Adresi: <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/14220>, Erişim Tarihi: 17.10.2017.
- [4] Öztürk, H.H.,Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, Türkiye, 978-605-5100-00-1, 2013.
- [5] “Güneş Işığı Dalgaları” Erişim Adresi: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Dalga-par%C3%A7ac%C4%B1k\\_ikili%C4%9Fi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Dalga-par%C3%A7ac%C4%B1k_ikili%C4%9Fi), Erişim Tarihi: 10.10.2017.
- [6] “Güneş Enerjisinin Tarihi” Erişim Adresi: <http://bodrumetamuhendislik.com/pdf/solarenerji.pdf>, Erişim Tarihi: 10.10.2017
- [7] Öztürk, H.H.,Güneş Enerjisi ve Uygulamaları. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, ISBN 978-975-511-502-3, 2008.
- [8] “The History of Solar” Erişim Adresi: [https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf), Erişim Tarihi: 13.10.2017.
- [9] “Solar Power Authority”, Haziran, 2016,Erişim Adresi: <https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/>, Erişim Tarihi: 13.10.2017.
- [10] Öztürk, H.H., Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2004.
- [11] “Güneş Hücrelerinin Özellikleri” Erişim Adresi: [http://myo.mersin.edu.tr/UZAK/TP/Bilgisayar/bp-109\(temel-elk\)/te-08.pdf](http://myo.mersin.edu.tr/UZAK/TP/Bilgisayar/bp-109(temel-elk)/te-08.pdf), Erişim Tarihi: 21.06.2017
- [12] Karamanav, M., “Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, Türkiye, Mayıs 2007.
- [13] “Güneş Hücrelerinin Çalışması” Erişim Adresi: [http://www.ezincmetal.com/tr/urunler\\_gunes\\_pilleri.php](http://www.ezincmetal.com/tr/urunler_gunes_pilleri.php), Erişim Tarihi: 13.06.2017.
- [14] “Güneş Pilleri”, Erişim Adresi: [http://www.robotiksistem.com/gunes\\_pilleri\\_nedir.html](http://www.robotiksistem.com/gunes_pilleri_nedir.html), Erişim Tarihi: 9.11.2017.

- [15] Köse, S., Zor, M., Atay, F., Bilgin, V., Akyüz, İ., Yarı iletken güneş pillerinin verimliliğine etki eden doğal ve teknolojik etmenler, VI. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu-UTES'2006, Isparta, Türkiye, Bildiri Kitabı: 76-83, 25-27, Mayıs 2006.
- [16] Günkaya, E., “Güneş Enerjisinden Yararlanarak Elektrik Üretimi”, S.D.Ü., Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Ödevi, Isparta, Türkiye, 2001.
- [17] Bloch F., Z. Phys., Synthesis and thermal decomposition of 1,3-dithietane and its S-oxides, 52, s.555, New York at Albany, June, 1982.
- [18] Elliott R.S., Physics of Amorphous Materials, Longmann, University of Cambridge, Lensfield Road, Cambridge, 1984.
- [19] Mott N.F., Davis E.A., Elektronik Processes in Non-Crystalline Materials, Clarendon Press, Verlag Theodor Steinkopff, 1971.
- [20] “Güneş Pili ve Verimlilikleri” Erişim Adresi: [www.youthforhab.org.tr/tryayinlar/enerjigunespillerigunes%20pili%20verimlilikleri.html](http://www.youthforhab.org.tr/tryayinlar/enerjigunespillerigunes%20pili%20verimlilikleri.html), Erişim Tarihi: 10.09.2017.
- [21] “FV Modüllerde SR ve NOCT Şartları” Erişim Adresi: <http://www.unienerji.com/arsivler/436>, Erişim Tarihi: 23.10.2017.
- [22] Fıratoğlu, Z.A., Yesilata, B., New approaches on the optimization of directly-coupled photovoltaic water-pumping systems, Solar Energy, 77, (1), 81-93, Şanlıurfa, Türkiye, 2004.
- [23] Kaldellis, J.K., Kapsali, M., Kavadias, K.A., Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece, Renewable Energy, 66, 612e624, Athens, Greece, 2014.
- [24] Baljit, S.S.S., Chan, H.Y., Sopian, K., Solar Energy Research Institute(SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia, 2016.
- [25] Chauhan, D.S., Tiwari, G.N., Rajoria, C.S., Chandra, S., Agrawal, S., A Novel investigation of building integrated photovoltaic thermal (BiPVT) system, New Delhi, India, 2016.
- [26] Bayrak, E.Ş., Saltık, M., Kaymak, M., Güneş Pillerinin Çalışmasında Foto Açılmal Etki ve Optimal Verimin Sağlanması, Elektrik Enerjisi ve Teknolojisi Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 1994.

- [27] Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho E.R., Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, *IEEE Transactions on, Power Electronics*, 24(5), 1198-1208, *Comput. Eng., Univ. of Campinas, Campinas, Brazil*, 2009.
- [28] DeSoto, W., Klein, S.A., Beckman, W.A., Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Solar Energy*, 80(1), 78–88, *Engineering Drive, Madison, WI 53706, USA*, Jan. 2006.
- [29] Kou, Q., Klein, S.A., Beckman, W.A., A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems, *Solar Energy*, 64(1), 1–3, pp. 33–40, Sep., *Madison, WI 53706, U.S.A.*, 1998.
- [30] Messenger and, R.A., Ventre, J., *Photovoltaic Systems Engineering*”, *taylor-Francis Group, Boca Raton, FL: CRC Press*, 2004.
- [31] Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T., Osakada, M., Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, in *Proc. IEE Proc.-Generation, Transmiss. Distrib.*, vol. 142, 59–64., Jan. 1995
- [32] Walker, G., “Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model,” *J. Elect. Electron. Eng.*, 21(1), pp. 45–55, *Australia*, 2001.
- [33] Kesilmiş Z., Karabacak M.A., Kısmi Gölgelemede Stokastik Işın Araması Algoritmasının Başarı İncelemesi, *Eleco Sempozyum Bildirgesi, Bursa, Türkiye*, 2016.
- [34] Ji, J., Hua, Y., Gang, P., Bin, P., Wei, H., Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, *Building and Environment, University of Science and Technology of China*, 42, 3529–3539, *Hefei, China*, 2007.
- [35] “SunDrum Solar” Erişim Adresi: <http://www.sundrumsolar.com/commercial-solutions.html>, 2008, Erişim Tarihi: 09.05.2016.
- [36] Bloem, J.J., Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment, *Building and Environment*, 43(2), 205–216, *Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy*, 2008.
- [37] Fung, T.Y.Y., Yang, H., Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings, *Energy and Buildings*, 40(3), 341–350, *Hong Hom, Hong Kong*, 2008.
- [38] Anderson, T.N., Duke, M., Morrison, G.L., Carson, J.K., Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) solar collector, *Solar Energy, University of New South Wales, Sydney, Australia*, 83(4), 445–455, 2009.

- [39] Cheng, C.L., Jimenez, C.S.S., Lee, M., Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for South orientated plans, *Renewable Energy*, 34(6), 1644–1650, Keelung Rd., Taipei, Taiwan ROC, 2009.
- [40] Trinuruk, P., Sorapipatana, C., Chenvidhya, D., Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, *Renewable Energy*, 34, 2515–2523, Bangkok, Thailand, 2009.
- [41] Agrawal, B., Tiwari, G.N., Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) systems under cold climatic conditions, *Applied Energy*, 87(2), 417-426, New Delhi, India, 2010.
- [42] “SolVarSystems”, 2011, “Hybrid Photovoltaic and Thermal (PV/T) System” Erişim Adresi: <http://solvarsystems.com/company/index/items/12>, Erişim Tarihi: 10.05.2016.
- [43] “Burger, Meyer”, 2013, Hybrid. “The Intelligent Combination of solar Thermal Energy and Photovoltaics. Availablefrom”, Erişim Adresi: <http://energysystems.meyerburger.com/en/products/hybrid/hybrid/>, Erişim tarihi 10.05.16.
- [44] Zogou, O., Stapountzis, H., Experimental validation of an improved concept of building integrated photovoltaic panels, *Renewable Energy* 36, 3488e3498., University of Thessaly, Mechanical Engineering Department, Volos, Greece, 2011.
- [45] Rajoria, C.S., Agrawal S., Tiwari G.N., Overall thermal energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal array, *Solar Energy*, 86,1531–1538., New Delhi, India, 2012.
- [46] Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S.,Kandil, H.A., El-Sherif, H., Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, *Ain Shams Engineering*, 4, 869–877., Beni-Suief University, Beni-Suief, Egypt, Journal, 2013.
- [47] Touafek, K., Khelifa, A., Adouane, M., Khettaf, E.H., Embarek, A., Experimental Study on a New Conception of Hybrid PV/T Collector, international conference on Sciences and Techniques of Automatic control ,& computer engineering - STA'2013, Sousse, Tunisia, December, 20-22, 2013.
- [48] Amori, K.E., Abd-ALRaheem, M.A., Field study of various air based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors, *Renewable Energy*, 63, 402-414., Baghdad, Iraq, 2014.

- [49] Shan, F., Tang, F., Cao, L., Fang G., Performance evaluations and applications of photovoltaic–thermal collectors and systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 467–483., Nanjing, China, 2014.
- [50] Pathak, M.J.M., Sanders, P.G., Pearce, J.M., Optimizing limited solar roof access by exergy analysis of solar thermal, photovoltaic, and hybrid photovoltaic thermal systems, *Applied Energy* 120 115–124., Houghton, MI, USA, 2014.
- [51] Hajji, M., Naimi, S.E., Hajji, B., El Mehdi, A., El Hafyani, M.L., Performance analysis of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector, 978-1-4673-7894, ENSA-UMP, Morocco BP , Oujda, 2015.
- [52] Yazdanpanahi, J., Sarhaddi, F., Adeli M.M., Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses, *Solar Energy* 118, 197–208., Zahedan, Iran, 2015.
- [53] Rajoria, C.S., Agrawal, S., Chandra, S., Tiwari, G.N., Chauhan D.S., A Novel investigation of building integrated photovoltaic thermal (BiPVT) system: A comparative study, *Solar Energy* 131, 107–118., Mathura, India, 2016.
- [54] Baljit, S.S.S., Chan, H.Y., Sopian K., Solar Energy Research Institute(SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia, 2016.
- [55] Baljit, S.S.S., Chan, H.Y., Sopian K., Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia, 2016.
- [56] Chauhan, D.S., Tiwari, G.N., Chandra, S., Agrawal, Rajoria, C.S., A Novel investigation of building integrated photovoltaic thermal (BiPVT) system, A comparative study, Bangi, Selangor, Malaysia, 2016.
- [57] Haitham, M.S., Bahaidarah, Ahmer, A.B., Gandhidasan, P., Uniform cooling of photovoltaic panels: A review *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 1520–1544., Dhahran, Saudi Arabia, 2016.
- [58] Tiwari, A., Sodha, M.S., Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation, *Solar Energy*, 80, 751–759, New Delhi, India, 2006.
- [59] Dubey, S., Sandhu, G.S., Tiwari, G.N., Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector, *Applied Energy*, 86, 697–705, New Delhi , India, 2009.
- [60] Kalogirou, S.A., Tripanagnostopoulos, Y ., Industrial application of PV/T solar energy systems, *Applied Thermal Engineering*, 27, 1259–1270, Patra, Greece, 2007.

- [61] Gan, G., A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings, *Energy and Buildings*, 27(1), 37-43, Park, Nottingham, UK, 1998.
- [62] Chen, B., Chen, X., Ding, Y .H., Jia, X., Shading effects on the winter thermal performance of the Trombe wall air gap: An experimental study in Dalian, *Renewable Energy*, 31(12), 1961-1971, Liaoning , PR China, 2006.
- [63] Yilmaz, Z., Kundakci, B., An approach for energy conscious renovation of residential buildings in Istanbul by Trombe wall system, *Building and Environment*, 43(4), 508-517, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [64] Daghigh, R., Ibrahim, A., Jin, GL., Ruslan, M.H., Sopain, K., Predicting the performance of amorphous and crystalline silicon based photovoltaic solar thermal collectors, *Energy Convers Manage*; 52; 1741–1747, Bangi, Selangor, Malaysia, 2011.
- [65] Touafek, K., Haddadi, M., Malek, A., Design and modeling of a photovoltaic thermal collector for domestic air heating and electricity production, *Energy Build*, 59; 21–28, Algiers, Algeria, 2013.
- [66] Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S., Sopain, K., Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors, *Renew Sustain Energy, Rev*; 15:352-65., Bangi, Selangor, Malaysia, 2011.
- [67] “Temassız Kızılötesi Termometre” Erişim Adresi: [www.loobex.com/wp-content/uploads/2013/.../DT-8806-TR\\_kullanimkilavuzu1.pdf](http://www.loobex.com/wp-content/uploads/2013/.../DT-8806-TR_kullanimkilavuzu1.pdf), Erişim Tarihi: 25.08.2017.
- [68] “Meterolojik Veriler Tablosu” Erişim Adresi: <https://goo.gl/9oBrqQ>, Erişim Tarihi: 08.12.2017.
- [69] Erol, H., Uçman, M., Kesilmiş, Z., “The effect of fan cooling on Photovoltaic Efficiency of PV panels in Osmaniye Environment”, IAREC 2017, Osmaniye, Türkiye, 16-18.11. 2017.



## ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı :Mahmut UÇMAN  
2. Doğum Tarihi :01.01.1973  
3. Ünvanı :Teknik Öğretmen  
4. Öğrenim Durumu :

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lise	Matematik Bilimleri	Kırıkhan Gazi Lisesi	1987-1990
Lisans-1	Elektrik-Elektronik A.B.D.	İstanbul Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim	1990 - 1994
Lisans-2	Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D.	İskenderun Teknik Üniversitesi	2014 - 2015
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D.	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2016 -

### 5.Akademik Ünvanlar:

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl

### 6.İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Teknik Öğretmen	Düzce Mesleki Eğitim Merkezi	1994-1999
Atölye Şefi	Osmaniye Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Elk.Elo.	2008-2012
Koordinatör Şef	Osmaniye Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Elk.Elo.	2012-2015
Alan Şefi	Osmaniye Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Elk.Elo.	2015-

## **7. Yayınlar**

### **7.1. Uluslararası ScienceCitation Index (SCI) ve Social Citation Index (SSCI) Tarafından Taranan Dergilerde Yayınlanmış Makaleler**

### **7.2. Diğer Bilimsel Dergilerde Yayınlanmış Makaleler (SCI veya SSCI'ya Girmeyen)**

#### **7.3. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Yayınlanmış Bildiriler**

1. Kesilmiş, Z., Erol, H. and Uçman, M., "Performance Analysis Of Stochastic Beam And Variable Neighborhood Search Under Partially Shaded Photovoltaic System", ICAA, Kırşehir, **12-15.07.2016**.

2. Erol, H., Uçman M. and Kesilmiş, Z., "The effect of fan cooling on Photovoltaic Efficiency of PV panels in Osmaniye Environment", IAREC 2017, Osmaniye, **16-18.11. 2017** .

3. Erol, H., Uçman M. and Kesilmiş, Z., "Power optimization in partially shaded photovoltaic systems", IAREC 2017, Osmaniye, **16-18.11. 2017**.

#### **7.4. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Yayınlanmış Bildiriler**

### **8. Yazılan uluslar arası kitaplar veya kitaplarda bölümler:**

### **9. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:**

### **10. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:**

### **11. Diğer yayınlar:**

### **12. Projeler:**

1. *OKÜBAP-2017-PT3-004 nolu BAP Projesi*

### **13. Bilimsel Kuruluşlara Üyelikler:**

### **14. Ödüller:**


1. ÖSYM – Milli Eğitim Bakanlığı Bursu İstanbul **1990**.

2. MEB- Erkek Teknik Öğretim Genel Müd - PLC Kontrollü Maket Asansör. Osmaniye İl 2. si **2006**.

3. MEB- Osmaniye Milli Eğitim Müdürlüğü Teşekkür Belgesi **2007**.

## EKLER

### EK-1 DENEYDE KULLANDIĞIMIZ FV PANELİN KATALOG BİLGİSİ





## TOMMATECH

### POLYCRYSTALLINE SOLAR MODULE


Model No	: TT10-36P
Rated Maximum Power (Pmax)	: 10WP
Tolerance	: 0±3
Voltage at Maximum Power(Vmp)	: 17.3V
Current at Maximum Power (Imp)	: 0.57A
Open Circuit Voltage(Voc)	: 21.5V
Short Circuit Current(Isc)	: 0.71A
Maximum System Voltage	: 1000 V
Maximum Series Fuse Rating	: 15A
Application Class	: A
Size	: 350X255X17
Weight	: 1.1KG
Cells	: 36PCS,52X31.2

All Technicall data at Standard Test Condition  
AM=1.5 E=1000 Tc=25 °C  
IEC61215, IEC61730

**CAUTION!**

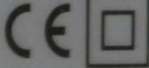


- The Solar module produces under sunlight high voltage and is life threatening!
- Please read the instructions of installation before using.

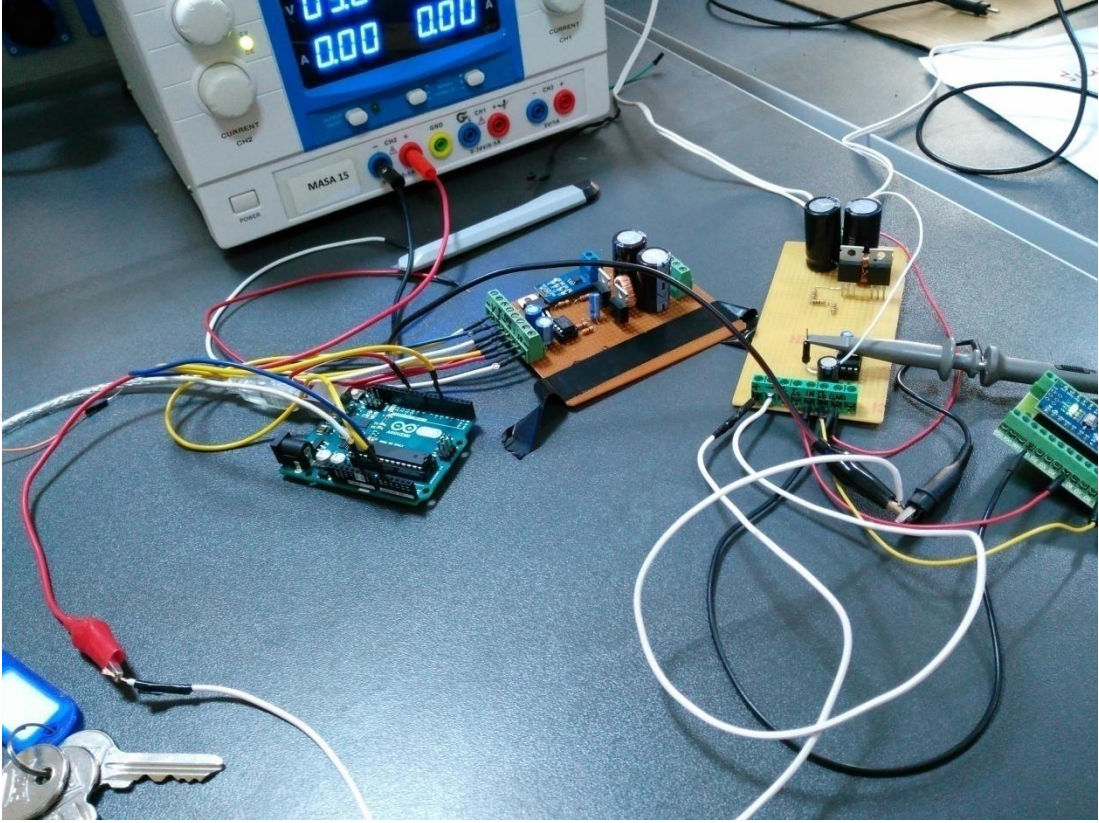


TommaTech UG  
address: Garching Munchen GERMANY  
Email: info@tommatech.de  
www.tommatech.de

Designed in Germany  
Made in CHINA



## EK-2 DC/DC KONVERTER TASARIM ÇALIŞMASI



### EK-3 FV PANELİN MATLAB/SİMULİNK TABANLI SİMÜLASYONU

%Fotovoltaik Hücrenin MATLAB / Simulink Tabanlı Modellemesi

```
clc;
clear;

Isc=0.38;
Ki=1.7e-3;
beta=1000;
Ti=300;
T=300;
Rsh=515.3;
Rs=0.01;
Is=2.42e-8;
q=1.6e-19;
N=1;
k=1.381e-23;
I=0;
index=0;
% for beta=200:200:1000
for T=300:10:320
    index=index+1;
    V=0:0.005:0.7;
    Iph=(Isc+Ki*(Ti-298))*(beta/1000);
    I=Iph-(Is*exp(q*(V+Rs*I)/(N*k*T))-1)-(V+Rs*I)/Rsh;
    P=I.*V;

    xlabel('Gerilim (V)')

    if mod(index,2)>0
        plot(V,I,'-b');
```

```
end
hold on;
%plot(V,P.*2.5,'-k');

legend('Akım','Güç');
grid on;
xlabel('Gerilim (V)');
ylabel('Akım (A)');
end

axis([0 .7 0 3]);
```



**DIGITAL SOLAR POWER METER**

**Glentest**

**SM206 DIGITAL SOLAR POWER METER**

**Features:**

- 3 3/4 digit LCD display
- Selectable unit: W/m<sup>2</sup> and Btu
- Manual ranging
- Peak hold function
- Data hold function
- Low battery indication



SM206 solar power meter

**Applications:**

M206 solar power meter is a precision instrument for measuring solar irradiance. It is used in solar research, physical and optical experiments, meteorology, and agriculture, etc.

**Specifications**

<b>Resolution:</b>	0.1W/m <sup>2</sup> , 0.1Btu/(ft <sup>2</sup> -h)
<b>Accuracy:</b>	+/-10W/m <sup>2</sup> , +/-3Btu/(ft <sup>2</sup> -h) or +/-5% of measured value Temperature induced error: +/-0.38W/m <sup>2</sup> /°C, +/-0.12Btu/(ft <sup>2</sup> -h)/°C deviation at 25°C
<b>Drift:</b>	+/-3% /year
<b>Measurement Range:</b>	0.1~399.9W/m <sup>2</sup> , 1~3999W/m <sup>2</sup> 0.1~399.9Btu/(ft <sup>2</sup> -h), 1~3999Btu/(ft <sup>2</sup> -h)
<b>Sampling Rate:</b>	0.25s
<b>Operating Environment:</b>	0°C ~ 50°C, <80%RH
<b>Storage Environment:</b>	-10°C ~ 60°C, 70%RH
<b>Battery:</b>	9V 6F22 x 1

Specialized silicon cell sensor

