

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**FARKLI YAPIDAKİ GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖZELLİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

İlker GÖKTAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

ŞUBAT 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**FARKLI YAPIDAKİ GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖZELLİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

İlker GÖKTAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

ŞUBAT 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**

**FARKLI YAPIDAKİ GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖZELLİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

İlker GÖKTAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

Bu tez 07/02/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Ramazan ŞAHİN (Danışman)

Dr.Öğr.Üyesi Deniz KAYA

Dr.Öğr.Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖZET

FARKLI YAPILARDAKİ GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

İlker GÖKTAŞ

Yüksek Lisans, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN

Şubat 2024; 61 sayfa

İnsanlığın var oluşundan beri enerji; barınma, gıda, sağlık gibi hep ihtiyaç halinde olmuştur. Enerji yüzünden tarihler boyunca medeniyetler birbirleri ile savaş halinde olmuşlardır. Fosil yakıtlar hem doğaya karşı zararlı bir yakıt hem de artan maliyetler yüzünden pahalılaşmıştır. Bu yüzden yenilenebilir enerji hayatımıza girmiş bulunmaktadır. Gün geçtikçe bilim insanları yenilenebilir enerjiden çeşitli yollarla enerji elde etme çalışmaları yürütmektedirler.

Güneş saniyede $3,8 \times 10^{23}$ kW oranında enerji yayar. Bu toplamın yalnızca küçük bir kısmı, yaklaşık $1,8 \times 10^{14}$ kW, güneşten yaklaşık 150 milyon km uzaklıkta bulunan dünyamız tarafından yakalanır. Bu miktarın yaklaşık %60'ı yani $1,08 \times 10^{14}$ 'ü yeryüzüne ulaşır. Gerisi uzaya geri yansıtılır ve atmosfer tarafından emilir. Bu enerjinin yalnızca %0,1'i yalnızca %10'luk bir verimlilikle dönüştürülebilseydi bile, dünyanın toplam üretim kapasitesi olan yaklaşık 3000 GW'ın dört katı olurdu (Anonim 23).

Bu tez çalışmasında farklı yapılardaki güneş pillerinin (hücrelerinin) çalışma prensipleri, IV eğrisi, kısa devre akımı ve açık devre voltajı gibi güneş pili parametrelerinin yanı sıra güneş pillerinin verimliliklerini etkileyen faktörler, güneş pillerinin karakterizasyonları ve güneş pillerinin üretim aşamaları gibi birçok yönden araştırmak planlanmıştır. Ayrıca tek bir kaynaktan derleyerek gelecek kaynaklara öncülük etmesi amaçlanmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Güneş Pili, Güneş Pili Çeşitleri, Güneş Pili Karakterizasyonu, Güneş Pili Parametreleri, İnce Film Bazlı Güneş Pilleri, Yonga Bazlı Güneş Pilleri,

JÜRİ: Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN

Dr. Öğr. Üyesi Deniz KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ABSTRACT

COMPARISON OF THE PROPERTIES OF SOLAR CELL DIFFERENT CONSTRUCTIONS

İlker GÖKTAŞ

MSc Thesis in Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ramazan SAHİN

February 2024; 61 pages

Since the existence of humanity, energy; It has always been in need such as shelter, food, health. Because of energy, civilizations have been at war with each other throughout history. Fossil fuels have become expensive because of both a harmful fuel to nature and increasing costs. Therefore, renewable energy has entered our lives. Day by day, scientists are working on obtaining energy from renewable energy in various ways.

The sun emits energy at a rate of $3,8 \times 10^{23}$ kW per second. Only a small part of this total, about $1,8 \times 10^{14}$ kW, is captured by our earth, which is located at a distance of about 150 million km from the sun. About 60% of this amount, ie 1.08×10^{14} , reaches the earth. The rest is reflected back into space and absorbed by the atmosphere. Even if only 0.1% of this energy could be converted with an efficiency of only 10%, it would be four times the world's total generating capacity of about 3000 GW (Anonim 23).

In this thesis, it is planned to investigate the working principles of solar cells (cells) in different structures, solar cell parameters such as IV curve, short circuit current and open circuit voltage, as well as factors affecting the efficiency of solar cells, characterization of solar cells and production stages of solar cells. In addition, it is aimed to lead future sources by compiling them in a single source.

KEYWORDS: Chip Based Solar Cells, Solar Cell, Solar Cell Characterization, Solar Cell Parameters, Thin Film Based Solar Cells, Types of Solar Cells

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ramazan ŞAHİN

Asst. Prof. Dr. Deniz KAYA

Asst. Prof. Dr. Yusuf ÖZTÜRK

ÖNSÖZ

Güneş'ten enerji elde etme konusunda güneş panelleri son yıllarda ön plana çıkmıştır. Temiz enerji için tarlalara, fabrikaların üzerlerine ve birçok yere kurulan güneş enerji santralleri sayesinde fosil yakıt kullanımı azaltılarak temiz bir çevre için adımlar atılmaktadır. Güneş panellerinin oluşturan güneş pilleri veya diğer adıyla güneş hücrelerinin çeşitleri, özellikleri, üretim aşamaları gibi birçok yönden incelenip karşılaştırma yapılmıştır.

Hem lisans eğitimim boyunca hem de yüksek lisans eğitim boyunca birçok konuda yardımını gördüğüm, bir danışmandan çok sevdiğim bir büyüğüm gibi desteğini hep hissettiğim, tez sürecinde yol gösterici yönüyle her zaman bana destek olan Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi olan danışmanım Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN'e saygılarımı ve sevgilerimi sunarım.

Lisans eğitimim süresince göstermiş olduğu rehberlik, bilgi ve tecrübeleriyle her daim yanımda olan Prof. Dr. Yusuf SUCU'a teşekkür ederim.

Üniversite eğitimim boyunca bana okulda aile gibi yaklaşım benimle ilgilendikleri için Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Dekanlığı personelleri olan manevi ablam Nazife ŞANLI ŞAHİN ve manevi abilerim Aydın ALKAN ve Süleyman ÇELİK'e çok teşekkür ederim.

Özel olarak, beni bu yaşa kadar her türlü fedakarlığı yaparak ellerinden gelenin en iyisi olması için varını yoğunu veren canım annem Fatma Seval GÖKTAŞ'a, canım babam Murat GÖKTAŞ'a ve canım kardeşim İlkey Ayşenur GÖKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın geri kalanı için aynı yola baş koyduğum sevgili nişanlım Hatice ATEŞ'e de çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Güneş'ten Enerji Tarihi	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Güneş Pilinin Yapısı.....	3
2.2. Güneş Hücrelerinin Çeşitleri ve Sınıflandırılması	6
2.2.1. Yonga tabanlı güneş hücreleri	7
2.2.1.1. Monokristal güneş hücresi.....	7
2.2.1.2. Multikristal güneş hücresi	9
2.2.1.3. Çok eklemli (multijunction) güneş hücresi	11
2.2.2. İnce film güneş hücreleri	13
2.2.2.1. Amorf silikon güneş hücresi.....	14
2.2.2.2. Hidrojenlenmiş amorf silikon güneş hücresi	15
2.2.2.3. Kadmiyum tellür (cdte) güneş hücreleri	15
2.2.2.4. Bakır çinko kalay sülfür (czts) güneş hücreleri	16
2.2.2.5. Bakır indiyum galyum diselenid (cigs) güneş hücreleri	18
2.2.2.6. Boyaya duyarlı (dye-sensitized solar cells – dssc) güneş hücreleri.....	19
2.2.2.7. Kollodial kuantum nokta (cqđ) güneş hücreleri	20
2.2.2.8. Perovskit güneş hücreleri	21
2.2.2.9. Organik (osc) güneş hücreleri	23
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Güneş Pillerinin Karakterizasyonu	25
3.1.1. Optik karakterizasyon	25
3.1.1.1. Yansıma (dağınık ve aynasal) ve geçirgenlik ölçümleri	25
3.1.1.2. Fotoiletkenlik ölçümleri	28
3.1.1.3. Film kalınlığı ölçümleri.....	28
3.1.1.4. Raman spektroskopisi.....	29
3.1.1.5. Elipsometri ölçümleri	32
3.1.2. Elektriksel karakterizasyon.....	32
3.1.2.1. Aydınlatma altında ideal güneş pilinin diyot denklemi.....	32
3.1.2.2. Aydınlatma altında ideal olmayan (gerçek) güneş pilinin diyot denklemi.....	34
3.1.2.3. Aydınlatma altında akım-voltaj karakteristiği ve güneş pili parametreleri ..	

.....	36
3.1.2.3.1. Açık devre gerilimi (V_{oc})	38
3.1.2.3.2. Kısa devre akımı (I_{sc})	39
3.1.2.3.3. Maksimum güç noktası (mpp)	39
3.1.2.3.4. Doldurma faktörü (ff).....	40
3.1.2.3.5. Verimlilik (η)	41
3.1.2.4. Karanlıkta (dark) akım-voltaj karakteristiği	44
3.1.2.5. Solar simülatörler (4" ve 6" aydınlatma)	45
3.1.2.6. Yaşam süresi (ömür) testi	46
3.1.2.7. Elektrolüminesans (el) testi	47
3.1.2.8. Termal görüntüleme	48
3.1.2.9. Hall efekti ölçümleri.....	49
3.1.2.10. Levha direnci (sheet resistance) ölçümleri	50
3.1.2.10.1. Dört noktalı prob (four-point probe).....	50
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
4.1.Farklı Yapılardaki Güneş Pillerinin Karşılaştırılması	52
5. SONUÇ.....	55
KAYNAKÇA	57
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Farklı Yapılardaki Güneş Pillerinin Özelliklerinin Karşılaştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

07/02/2024

İlker GÖKTAŞ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Işık hızı
dA	: Yüzey elemanı
E	: Fotonun enerjisi
E	: Toplam doğrudan normal güneş ışıınımı
E_g	: Bant aralığı
E_λ	: Spektral doğrudan normal güneş ışıınımı
FF	: Doldurma faktörü (the fill factor)
G	: Üretim hızı
h	: Planck sabiti
I	: Akım
I_0	: Diyot doyma akımı veya diyot doyma akım yoğunluğu
I_D	: Diyottan geçen akım
I_m	: Maksimum güç noktasında akım (I_{mp})
I_{ph}	: Fotoakım
I_{SC}	: Kısa devre akımı (the short circuit current)
J_{sc}	: Kısa devre akım yoğunluğu
k_B	: Boltzmann sabiti
kT/q	: Termal voltaj
L_n	: Elektron difüzyon uzunlukları
L_p	: Delik difüzyon uzunlukları
η	: Verimlilik (the efficiency)
N_A	: Doping konsantrasyonu
n_i	: Esas taşıyıcı konsantrasyonu
q	: Yük

R_p	: Paralel direnç
R_s	: Seri direnç
R_{specular}	: Spektral aynasal yansımaya
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
T	: Sıcaklık
t_f	: Film kalınlığı
T_λ	: Spektral dar açılı geçirgenlik
V	: Gerilim (Voltaj)
V_m	: Maksimum güç noktasında voltaj (V_{mp})
V_{OC}	: Açık devre gerilimi (the open circuit voltage)
Δn	: Fazlalık taşıyıcı konsantrasyonu
θ	: Geliş açısı
λ	: Tanecığın dalga boyu
ν	: Tanecığın frekansı
ρ	: Yüzey yansıtıcılığı ve öz direnç
ρ_λ	: Yüzeyin spektral yansıtıcılığı
τ_λ	: Ortamın spektral geçirgenliği
ϕ	: Azimut açısı
ω	: Katı açısı
ω_{acc}	: Katı açısı (acc-acceptance)
ω_{src}	: Katı açısı (src-source)

Kısaltmalar

$(CH_3)_3As$	: Trimetil arsenik
$(CH_3)_3Ga$	: Trimetil galyum
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit

AlInP	: Alüminyum indiyum fosfit
AM	: Hava kütlesi (Air Mass)
a-Si	: Amorf silikon
a-Si:H	: Hidrojenlenmiş amorf silikon güneş hücresi
AT	: Hızlandırılmış Test (Accelerated Test)
B	: Bor
CaTiO ₃	: Kalsiyum titan
CBD	: Kimyasal banyo biriktirme (chemical bath deposition)
CdS	: Kadmiyum sülfür
CdTe	: Kadmiyum tellür
CGS	: Bakır Galyum Diselenid
CH ₃ NH ₃ PbX ₃	: Metilamonyum kurşun trihalojenür
CIGS	: Bakır İndiyum Galyum Diselenid (Cu(In,Ga)Se ₂)
CIS	: Bakır İndiyum Diselenid
CO	: Karbonmonoksit
CPV	: Konsantre güneş pili
CQD	: Kollodial Kuantum Nokta
c-Si	: Kristal silikon güneş hücreleri
CSS	: Yakın aralıklı süblimasyon (close-spaced sublimation)
Cu ₂ S	: Bakır(I) Sülfür
CuInS	: Bakır indiyum diselenide (CIS)
CZ	: Czoschalski
CZTS	: Bakır Çinko Kalay Sülfür (Copper Zinc Tin Sulfide - Cu ₂ ZnSnS ₄)
DC	: Doğru akım
DSSC	: Boyaya Duyarlı güneş pilleri (Dye-Sensitized Solar Cells)
ED	: Elektro biriktirme (electro-deposition)

EHP	: Elektron-delik çifti (electron-hole pair)
EL	: Elektrolüminesans
ETL	: Elektron taşıma katmanı (Electron transporting layer)
eV	: Elektronvolt
GaAs	: Galyum arsenit
GaInAs	: İndiyum Galyum Arsenit
GaInP	: Galyum indiyum fosfit (InGaP)
GaSb	: Galyum antimonid
Ge	: Germanyum
HTL	: Delik taşıma katmanı (Hole transporting layer)
In	: İndiyum
InP	: İndiyum fosfit
IR	: Kızılötesi
mc-Si	: Multikristal silikon güneş hücreleri
MG	: Metalurjik sınıf (metallurgical grade)
MJ	: III-V çok eklemlı güneş hücreleri
MLPM	: Modül Düzeyinde Güç Yönetimi
MÖ	: Milattan önce
MPP	: Maksimum güç noktası
MPPT	: Maksimum Güç Noktası İzleme
OSC	: Organik güneş hücresi
P	: Fosfor
PbS	: Kurşun Sülfür
ppm	: milyonda bir birim (parts per million)
PSC	: Perovskit güneş hücreleri (Perovskite solar cells)

PV	: Fotovoltaik (Photovoltaic)
QD	: Kuantum Nokta
Si	: Silisyum (Silikon)
SiH ₄	: Silan gazı
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Sn	: Kalay
TFF	: Arıza süresi (Time-To-Failure)
TFSC	: İnce film güneş pilleri (Thin Film Solar Cell)
TiO ₂	: Titanyum dioksit
UV	: Ultraviyole
Zn	: Çinko
μm	: Mikrometre
Ω	: Ohm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	August Mouchet tarafından icat edilen parabolik çanak toplayıcılar (Puddicombe, 2008).....	1
Şekil 2.1.	p-n bağlantı yapısı.....	3
Şekil 2.2.	Yalıtkan, iletken ve yarıiletken malzemelerin bant enerjileri (“Solar Cells,” n.d.).....	4
Şekil 2.3.	Birincil aktif malzemeye göre güneş pillerinin sınıflandırılması (Ibn-Mohammed. T. vd. 2017)	6
Şekil 2.4.	Güneş Hücrelerinin Yonga ve İnce Film Teknolojisine Göre Ayrılması (Olaleru A. vd. 2022).....	7
Şekil 2.5.	Cz yönteminin prensibinin şeması (Müller G. ve Friedrich J. 2005)	8
Şekil 2.6.	Czochralski yöntemiyle büyütülen külçe silisyum kristali (Müller G. ve Friedrich J. 2005).....	9
Şekil 2.7.	Büyümeden sonra çok kristalli silikon levha (Yang Y. vd, 2015).....	10
Şekil 2.8.	Multikristal hücrelerde tane sınırları (Yang Y. vd, 2015)	10
Şekil 2.9.	Çok eklemli güneş pillerinin seri ve paralel bağlantı yapısı(“3. NESİL GÜNEŞ PİLLERİ” n.d.)	12
Şekil 2.10.	III-V yarı iletken malzemelerden yapılmış farklı çok eklemli güneş pilleri için örnek taslağı. Alt hücreler tünel diyotları ile birbirine bağlıdır. Her alt hücre, güneş spektrumunun farklı bir bölümünü kullanır (Philipps S. P. ve A. Bett W. 2014).....	12
Şekil 2.11.	İnce film güneş pilinin esnekliğini gösteren görsel (Crowell, 2016).....	14
Şekil 2.12.	Amorf silikon (Kang H, 2021).....	14
Şekil 2.13.	Amorf silikonun yapı modeli	15
Şekil 2.14.	CdTe güneş pili yapısı (Chopra K. L., vd. 2004).....	16
Şekil 2.15.	Tipik CZTS güneş hücresinin şematik yapısı (Jiang and Y, 2013)	17
Şekil 2.16.	Farklı PV teknolojilerinin 2008 hammadde maliyeti (Wadia vd, 2009)	18
Şekil 2.17.	I-III-VI ₂ kalkopirit malzeme yapısı.....	19
Şekil 2.18.	Boyaya duyarlı güneş hücrelerin yapısı (Mohammad Bagher A., 2015) ...	20
Şekil 2.19.	Kuantum nokta güneş hücreleri çalışma prensibi(Mohammad Bagher A., 2015)	21
Şekil 2.20.	Perovskit güneş hücresi yapısı (Mohammad Bagher A., 2015).....	22
Şekil 2.21.	Organik güneş pilleri: (A) tek katmanlı ve (B) çift katmanlı (Kesinro vd, 2021)	23
Şekil 2.22.	Organik fotovoltaiik hücre (“Organic solar cell,” 2023)	24
Şekil 3.1.	Yansıma türleri. A) Aynasal yansıma, B) Dağınık yansıma.....	26
Şekil 3.2.	Düz bir yüzey üzerinde gelen ve speküler yansıyan ışınların geometrisi (Good vd, 2016)	28
Şekil 3.3.	Bir güneş pilinin Raman mikroskobu ile analiz edilmesi	29
Şekil 3.4.	Yüksek kristalli (turuncu) ve kristalli olmayan (yeşil, camgöbeği, kırmızı) materyalin varlığını ortaya koyan bir silikon numunesinin bölgelerindenölçülen Raman spektrumları.	30
Şekil 3.5.	Silikon bir levhada lazerle delinmiş bir delikten ~520 cm ⁻¹ merkezli Raman tepe noktasının konumunu izleyerek oluşturulan bir stres haritası..	31

Şekil 3.6.	Alternatif güneş malzemelerinin Raman spektroskopisi (Anonim 1).....	31
Şekil 3.7.	İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresi.....	32
Şekil 3.8.	Karanlıkta (yıldızlar) ve $I_{ph} = 0,04 \text{ A/cm}^2$ 'de (daireler) aydınlatma altında $I_0 = 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ olan ideal bir güneş pilinin akım-voltaj özellikleri.....	33
Şekil 3.9.	İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresi (dolu çizgiler). İdeal olmayan güneş pili eşdeğer devresi bileşenleri noktalı çizgi ile gösterilmiştir.....	34
Şekil 3.10.	I_{02}/I_{01} oranının üç değeri için iki diyotlu modelde güneş pilinin IV karakteristiği.....	35
Şekil 3.11.	Seri (A) ve paralel (B) direncin güneş pilinin IV karakteristiğine etkisi.	36
Şekil 3.12.	Güneş pilinin aydınlık ve karanlık akım-gerilim özellikleri ve güneş pilinin verimini belirleyen parametreler	37
Şekil 3.13.	Akım-Voltaj karakteristiği (Lindholm vd., 1979)	38
Şekil 3.14.	Maksimum güç noktası karakteristiği (Ramos Hernanz vd, 2013)	40
Şekil 3.15.	Voltajın bir fonksiyonu olarak hücre çıkış akımı (kırmızı çizgi) ve gücün (mavi çizgi) grafiği (Green, 1981).....	41
Şekil 3.16.	1976'dan beri güneş pili enerji dönüşüm verimlilik araştırmalarının rapor edilen zaman çizelgesi	43
Şekil 3.17.	Lineer ölçekli dark IV eğrisi (Zhao et al., 1991)	44
Şekil 3.18.	Yukarıdaki aynı IV eğrisinin semilog grafiği, diyot hakkında çok daha fazla bilgi ortaya koyuyor. IV eğrisinin farklı bölgelerine farklı kayıp mekanizmaları hakimdir (Zhao et al., 1991).....	45
Şekil 3.19.	Hava kütlesi, ışığın Dünya'ya çarpmadan önce geçmesi gereken atmosferin hava yol uzunluğuna göre oranını temsil eder ve Y/X 'e eşittir.....	46
Şekil 3.20.	EL görüntüsü.....	48
Şekil 3.21.	Güneş panelinde termal görüntüleme	48
Şekil 3.22.	Hall efekti çalışma prensibi	49
Şekil 3.23.	Dört noktalı bir prob aracının şematik çizimi (Naftaly et al., 2021).....	50
Şekil 5.1.	Dört farklı CSP teknolojisi (Pheng et al., 2016).....	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1.	Farklı güneş pili türlerinin karşılaştırılması. Artı, ilgili kriterler için karşılaştırılabilir bir olumlu özelliği belirtirken eksi, ilgili kriterlerin karşılaştırılabilir derecede daha az karşılandığını belirtir.....	53
--------------	--	----

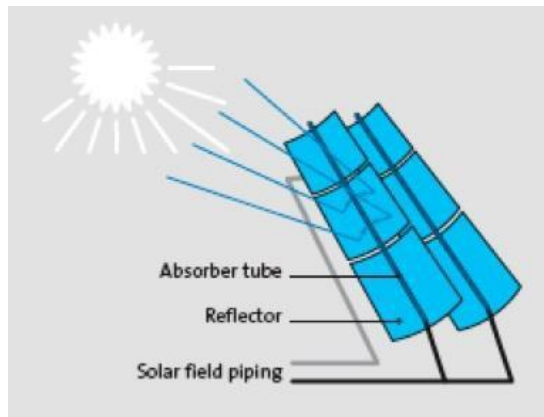


1. GİRİŞ

1.1. Güneş'ten Enerji Tarihi

Enerji ilk insanlıktan beri herkesin problemi olmuştur. Güneşten enerji sadece elektrik ile kısıtlı kalmayıp geçmişten beri kullanılmıştır. Tarihte bilinen ilk pasif güneş enerjisi MÖ 5. Yüzyılda antik Yunanlılar tarafından kışın evlerini ısıtacak şekilde güneşe göre tasarlamışlardır. MÖ 212 tarihinde Arşimet, Syracuse'u kuşatmaya gelen Roma İmparatorluğu'nun gemilerini yakmak için bronz kalkanlarla güneş ışığını odaklayarak gemileri ateşe vermiştir. Sonrasında Romalılar, güney tarafa bakan pencereleri cam gibi şeffaf malzemelerle yakalanan güneş ısısının kaçmasını önleyen güneş mimarisini geliştirmişlerdir ("Jones ve Bouamane - 'Power from Sunshine' A Business History of Solar.pdf," 2012). 18. yüzyılının ortalarında İsveçli bilim insanı Horace de Saussure, suyu ısıtmak için gün ısıların prototipini cam kapalı ve yalıtılmış bir kutu inşa etmiştir ("Solar Thermal History," n.d.).

Henüz 19 yaşında olan Fransız fizikçi Alexandre-Edmond Becquerel ya da bilinen adıyla Edmond Becquerel 1839 yılında iki metal elektrot kullanarak bir elektrolit hücre ile deney yaparak fotovoltaiik etkiyi keşfetmiştir. Bu sayede Becquerel ışığa maruz kalan bazı malzemelerin elektrik akımı üreteceğini bulmuştur (W. W. Anderson ve Y. G. Chai 1976). Willoughby Smith 1873 yılında selenyumun fotoiletkenliğini keşfetti. 1876 yılında William Grylls Adams ve Richard Evans Day, selenyum güneş pillerinin elektrikli cihazlara yeterli güneş ışığını dönüştüremese de ışığa maruz kaldığında elektrik ürettiğini keşfettiler. 1878 yılında Fransız matematikçi August Mouchet Fransız hükümetinden alternatif enerji kaynağı üzerinde çalışmak amacıyla fon aldıktan sonra güneş enerjisi ile çalışan buhar motoru icat edip (Şekil 1.1) parabolik çanak toplayıcılar kullanarak ilk güneş enerjisi ile çalışan buharlı tesisi oluşturmuştur. Bu yöntem güneşten enerji sağlamak için hâlen kullanılmaktadır (Puddicombe, 2008).



Şekil 1.1. August Mouchet tarafından icat edilen parabolik çanak toplayıcılar (Puddicombe, 2008)

Samuel P. Langley 1880 yılında güneşin ve sönük yıldızlardan gelen ışınları ölçmek için bolometre cihazını icat etmiştir. Bolometre bir elektrik devresine bağlı ince bir telden oluşmakta olup ışın telin üzerine geldiğinde tel çok az ısınır ve telin elektrik direnci artar. Amerikalı mucit Charles Fritts selenyum levhalardan yapılan ilk güneş pillerini 1883 yılında tanımlamıştır. 1891 yılında Clarence Kemp güneş ışınlarını hapseden Climax güneş enerjili su ısıtıcısını icat etmiştir. Wilhelm Hallwachs 1904'te bakır ve bakır oksidin ışığa duyarlı olduğunu keşfetti.

Albert Einstein'ın 1905'te fotoelektrik etkiyi açıklayana kadar ışığın nasıl elektrik ürettiği anlaşılamamıştır (Anonim 22) ve bu sayede 1921 yılında Nobel ödülüne layık görülmüştür (The Nobel Prize in Physics., 1921). William J. Bailey 1908'de Kaliforniya'da bakır bobinli bir termal güneş kollektörü icat etti. 1916'da Millikan, fotoelektrik etkiyi deneysel olarak kanıtlamıştır. Polonyalı bilim insanı Jan Czochralski 1918 yılında tek kristalli silikon geliştirmenin bir yöntemini geliştirdi. F. Bloch, tek kristal periyodik kafese dayalı bant teorisi 1928 yılında geliştirmiştir (Brock D.C. 2006). Audobert ve Stora 1932'de kadmiyum sülfürdeki (CdS) fotovoltaiik etkiyi keşfetmişlerdir. Gordon Teal ve John Little 1948'de tek kristalli germanyum ve sonrasında silisyum üretmek için Czochralski'nin kristal büyütme yöntemini uyarlamışlardır.

1954'te Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson, Bell Laboratuvarlarında önemli miktarda elektrik gücü üretebilen %6 verimlilikte tek kristalli silikon (sc-Si) PV hücresini elde ettiler. Galyum arsenit (GaAs) güneş pilleri 1956 yılında yapıldı. 1957 yılında Hoffman Electronics %8 verimli fotovoltaiik hücreleri üretti ve 1 yıl sonra Hoffman Electronics güneş pillerini NASA uydusu "Vanguard 1" ile uydularda kullanmaya başladı. Vanguard 1, telsizlerine enerji sağlamak için bir kilowatt'tan daha az bir güneş pili dizisi kullanmıştır (Flood, 2001). Hoffman Electronics yaklaşık iki yıl içinde %14 verimlilikte güneş pillerini üretmişlerdir.

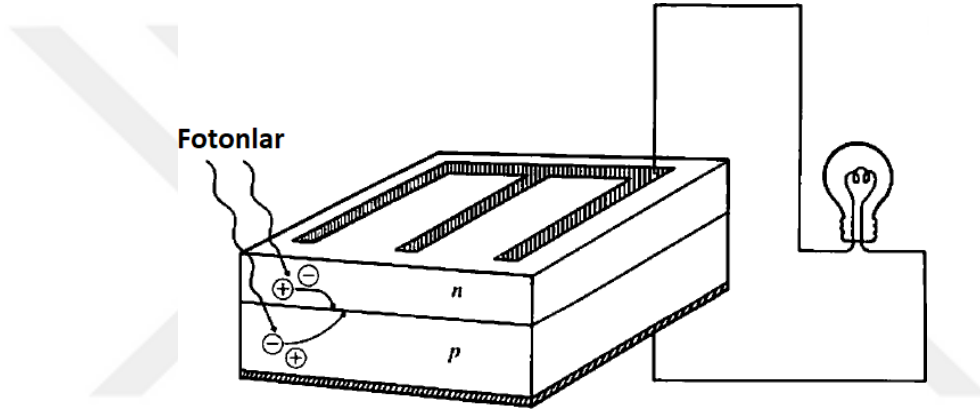
1972'de çok kristalli yongalardan oluşan silikon güneş hücresi (mc-Si) ve 1976'da amorf silikondan oluşan güneş pilleri (a-Si) yapılmıştır. Aynı sene içinde RCA Laboratuvarları'nda David Carlson ve Christopher Wronski, %1.1 verimliliğe sahip ilk amorf silikon PV hücrelerini oluşturdular (Carlson D. E. ve Wronski C. R. 1976). Delaware Üniversitesi'nde bulunan Enerji Dönüşüm Enstitüsü 1980 yılında Cu₂S/CdS teknolojisini kullanarak %10 verimliliği aşan ilk ince film güneş pilini geliştirmiştir.

L.Fraas ve R. Knechtli 1978 yılında yaklaşık %40 verimli InGaP/GaInAs/Ge üçlü bağlantı yoğunlaştırıcı hücresini tanımlamışlardır (Fraas L. M. ve Knechtli R. C. 1978). 1988'de Laboratuvar şartlarında %30'dan fazla hücre verimliliği veren tek kristalli GaAs silikon hücre üretilmiştir. L. Fraas, J. Gee, K. Emery ve diğerleri 1990 yılında %35 verimlilikte iki çipli yığın GaAs/GaSb yoğunlaştırıcı güneş hücresini açıklamışlardır (IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 21st, Kissimmee, FL, May 21-25, 1990, Conference Record. Vols. 1 & 2, 1990). Kuryla, Fraas ve Bigger, GaAs/GaSb yığılmış hücre devresini kullanan %25 verimli CPV 1992 yılında bildirmişlerdir. L. Fraas ve ekibi %33 verimlilikte çift odaklı yüksek yoğunluklu fotovoltaiik modülü gösterdi. Günümüzde her geçen gün güneş pilleri üzerine çalışmalar devam etmektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Güneş Pilinin Yapısı

Güç elde etmek için hem akıma hem de voltaja ihtiyaç vardır. Güneş hücrelerinden voltaj “fotovoltaik etki” ile üretilmektedir. Kısacası güneş pillerinin çalışma prensibi fotoelektrik etkiye dayanmaktadır. Fotoelektrik etki ya da diğer adıyla fotoelektrik olay, kısaca ışığın metalden elektron koparmasına denir. Kopan elektronlara, ışıkla koparıldığı için, fotoelektron denilmektedir. Fotoelektronların p-n bağlantısı ile toplanması, elektronların n-tipi tarafına ve deliklerin ise p-tipi tarafına hareket etmesine sebep olur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. p-n bağlantı yapısı

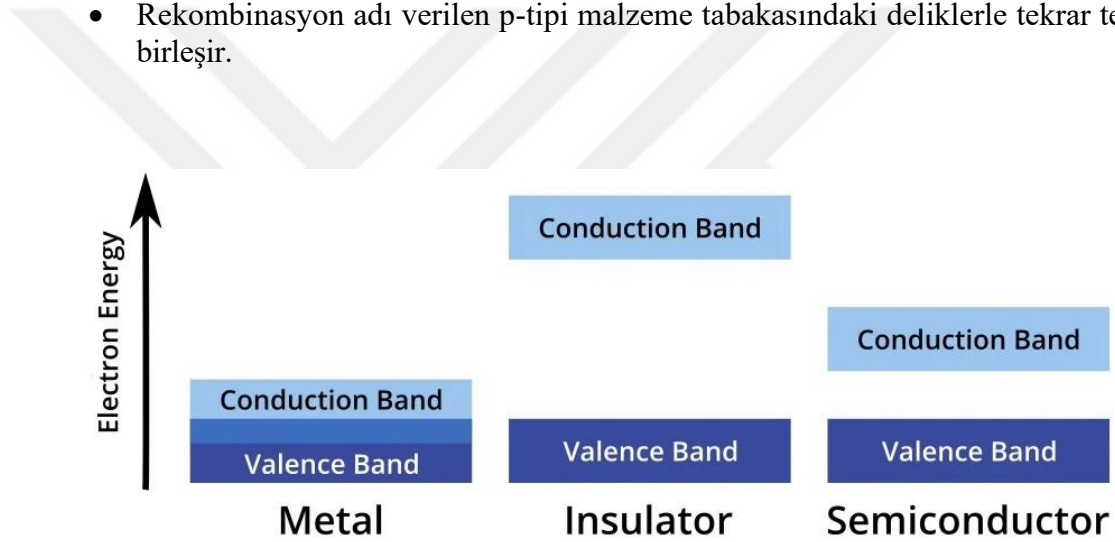
İlk olarak 1887 yılında Alman fizikçi Heinrich Hertz tarafından keşfedilmiştir. Elektrotlar üzerine ışık düşürüldüğünde elektrotlar arasında akımın güçlendiğini keşfetmiştir. 1905 yılında Albert Einstein, fotoelektrik olayı ışık ışınlarının foton olarak anılan enerji paketlerinden oluştuğunu öne süren bir makale yayınlamıştır. Her bir elektron metalden koparken tek bir foton soğurmaktadır. Devrede akım gözleyebilmek için her fotonun enerjisinin belirli bir eşik değerinin üzerinde olması gerekmektedir. Fotonun enerjisi,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

formülü ile verilir. Bir güneş hücresinin yüzeyine düşen güneş ışığının enerjisi yarıiletken malzemenin bant aralığı enerjisine (E_g) eşit ya da daha büyükse soğurulur. Az miktarda

foton ise yüzeyden geri yansır. Yarıiletken malzemenin üzerinde elektrik akımını toplamak için yerleştirilen metal ızgara çok az sayıda fotonun kristal yüzeye ulaşmasını engeller. Yüzeye gelen fotonun enerjisi E_g 'den küçükse güneş pilinden geçer ve ısı olarak yayılır. Sadece E_g 'ye eşit ve büyük olan fotonlar pn bağlantısının yakınına girdiğinde ve silikon atomlarına yaklaştığında oluşabilecek sonuçlar ("Solar energy technologies: principles and applications - ScienceDirect," 2021);

- Geride elektron-delik çifti (EHP, Electron-Hole Pair) olarak adlandırılan bir boşluk bırakarak elektronun değerlik bandından iletim bandına uyarılması.
- Oluşturulan taşıyıcılar, çoğunluk taşıyıcı olarak işlev gördüğü katmana hareket etme eğilimindedirler; elektronların n-tipi malzeme katmanına sürüklenme eğiliminde oldukları anlamına gelirken, deliklerin p-tipi malzeme katmanına doğru hareket etme eğilimleri vardır.
- Elektronlar, harici kapalı devrede elektrik akımı üretmek için yüzeydeki mikro metaller tarafından emilebilir ve sonra p-tipi malzemeye geri dönebilir.
- Rekombinasyon adı verilen p-tipi malzeme tabakasındaki deliklerle tekrar tekrar birleşir.



Şekil 2.2. Yalıtkan, iletken ve yarıiletken malzemelerin bant enerjileri ("Solar Cells," n.d.)

Yarıiletken hem iletim bandı hem de değerlik bandı arasında enerji aralığı (E_g) denilen, değerlik elektronlarına ve iletim elektronlarına bazı enerji değerlerinde izin verilen yasak bir enerji aralığına sahip katı fazda kristal bir malzemedir (Şekil 2.2). Fotonun sahip olduğu enerji elektronun sahip olduğu enerjisinden daha büyükse yani genellikle 0.5eV'den büyükse elektronu uyarabilir. En dıştaki orbitallerdeki elektronlar çekirdeğe uzak olduğu için bağlanma enerjisi diğer elektronlara göre daha düşüktür ve neredeyse serbesttir. İletim bandındaki elektronların sayısı, yarı iletken malzemelerde güneş radyasyonundaki enerji içeriği ve sıcaklık ile belirlenebilir. Si, doğada bol miktarda kuvars veya kum (SiO_2) şeklinde bulunduğu için, güneş pillerinde silikon (Si) bazlı yarı iletken kullanılır.

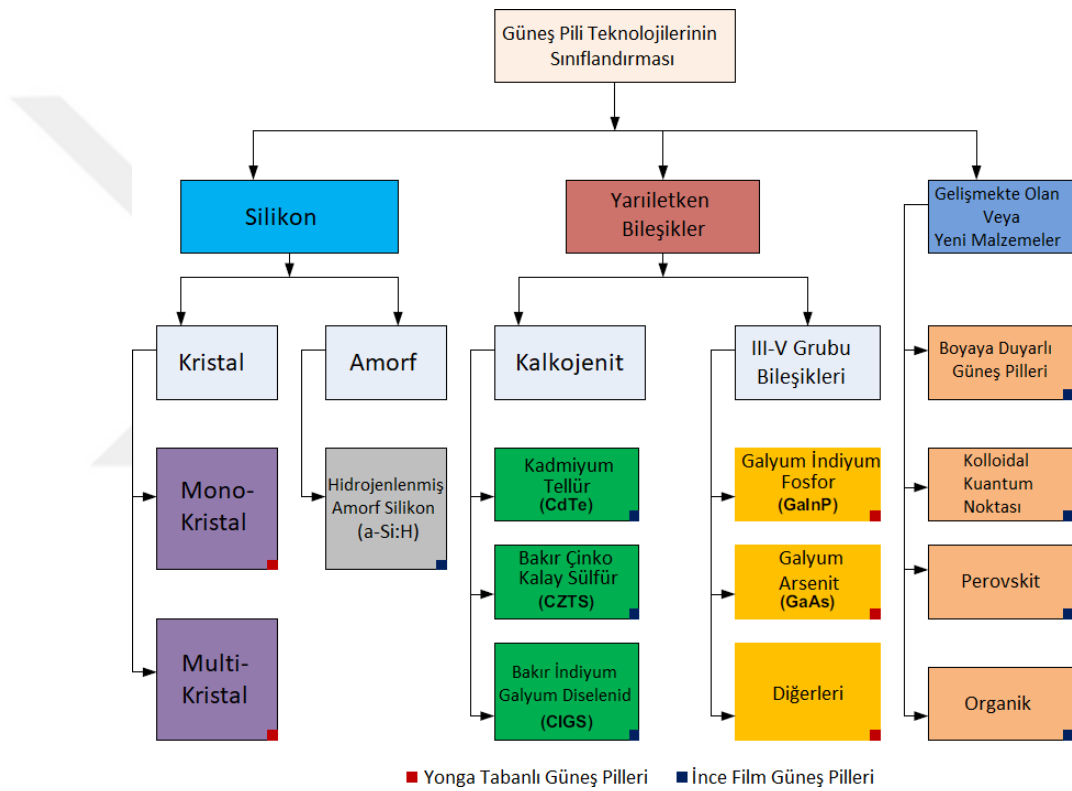
Doping, pn eklemesinin oluşumu için bu saf Si malzemesini n-tipi veya p-tipi malzemelere dönüştürmek için yabancı bir elementin eklenmesi işlemine denir. Kristalin

silisyum yapısındaki bir atomun, en dıştaki orbitallerde sırasıyla üç ve beş elektrona sahip III-grup elementi olan Bor (B) veya V-grubu elementi olan Fosfor (P) ile değiştirilmesi işlemi doping işlemidir. Çoğunluğu delikler ve azınlığı elektron olan p-tipi katman, çoğunluğu elektron ve azınlığı delikler olan n-tipi bir katman birleştirildiğinde serbest elektronların deliklerle birleştiği bağlantıyı (pn bağlantısı) oluşturur. Bu bölge tükenme bölgesi olarak da adlandırılır. Çünkü, bu tükenme bölgesinde tüm bağlar tamamen doludur ve elektrik için serbest elektronlar yoktur.

Pratik olarak, elektronların n-tipi katmanının iletim bandında olması nedeniyle, p-tipi katmanda deliklerden çok daha fazla sayıda elektron vardır. Dolayısıyla p-tipi katmanda negatif yüklü bir kısım ve n-tipi katmanda pozitif yüklü bir bölge bulunmaktadır. Bu sayede bu bölgede iki katmanın birleşimi boyunca voltaj veya potansiyel farkına neden olan bir elektrik alan oluşur. Bu pn bağlantısı aksi takdirde polarize olarak adlandırılır. Dolayısıyla bu n-tipi katmandan p-tipi katmandaki deliklere geçiş yapan serbest elektronları engeller, çünkü bariyer potansiyelini aşmaları gerekir (“Solar Cells,” n.d.).

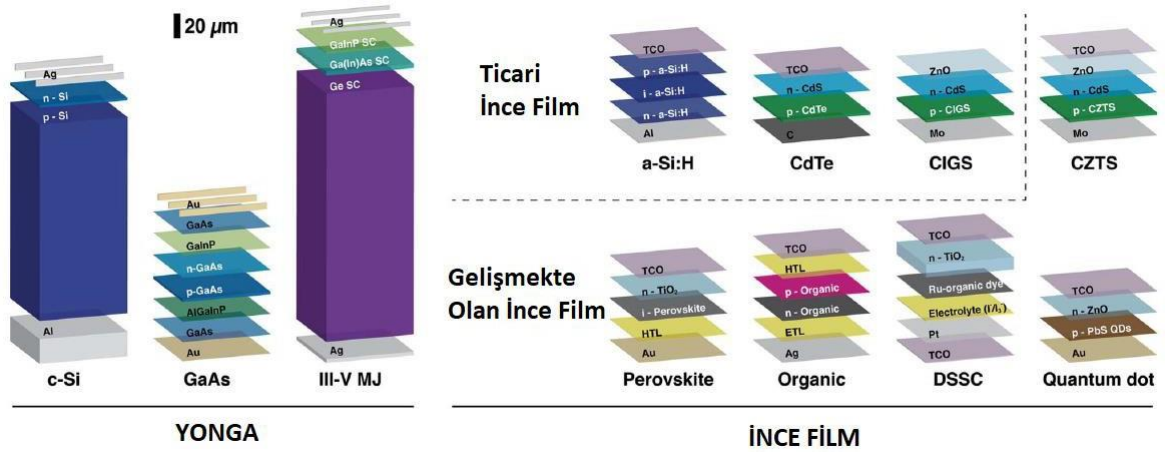
2.2. Güneş Hücrelerinin Çeşitleri ve Sınıflandırılması

Güneş hücreleri sınıflandırma, hücrenin malzemesine (örneğin silisyum, yarıiletken bileşikler, vs.), hücrenin boyutuna (hücre boyutu arttıkça üretilen voltaj ve akım miktarı artar.), ışık kaynağının yoğunluğuna ve kalitesine bakılarak yapılabilir. Bu nedenle, güneş pilleri genellikle güneş pilleri için kullanılan aktif malzemelere (yani birincil ışık emici malzemeler) veya genel cihaz yapılarına göre sınıflandırılır. Daha yakın zamanlarda, malzeme karmaşıklığına dayalı sınıflandırmalar önerilmiştir (Şekil 2.3) (*Solar energy technologies: Principles and applications—ScienceDirect.*, 2021), (Ibn-Mohammed. T. vd. 2017).



Şekil 2.3. Birincil aktif malzemeye göre güneş pillerinin sınıflandırılması (Ibn-Mohammed. T. vd. 2017)

Güneş hücreleri, cihaz yapısı ve mimari açısından yonga (wafer) tabanlı ve ince film (thin film) teknolojisi olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.4). Yonga bazlı güneş hücreleri üretilirken külçelerden türetilen yarıiletken yonga dilimlerinden (Zhou Y. 2015), ince film hücreleri ise cihaz oluşturacak olan yarıiletken malzeme katmanlarının biriktirilmesi için cam veya esnek plastikler gibi yalıtkan malzemelerin (substrat) kullanıldığı farklı bir yaklaşım ile üretilir (Kilner J. vd. 2012).



Şekil 2.4. Güneş Hücrelerinin Yonga ve İnce Film Teknolojisine Göre Ayrılması (Olaleru A. vd. 2022)

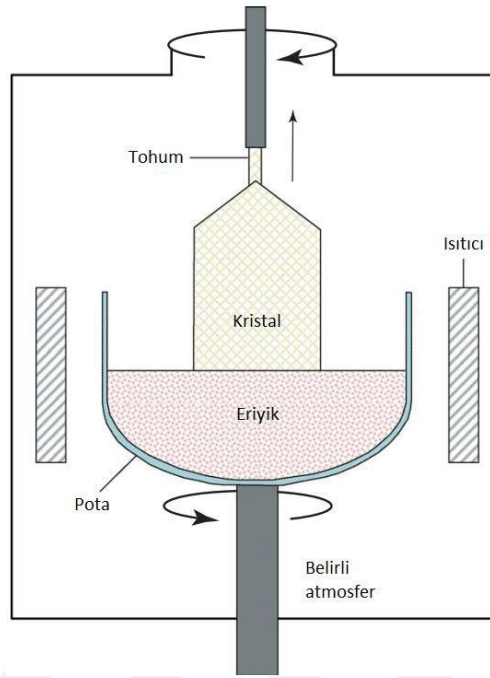
2.2.1. Yonga Tabanlı Güneş Hücreleri

Yonga tabanlı silikon güneş pilleri, külçelerden elde edilen silikon dilimlerinden üretilmektedir. Yonga tabanlı kristal silikonlar, kararlı foto-dönüşüm verimliliği ve olgunlaşmış teknolojisi nedeniyle solar PV teknolojisinin doğuşundan beri fotovoltaik malzemelere hâkim olmuştur. Şu anda var olan üç çeşit yonga tabanlı güneş hücresi bulunmaktadır:

- Kristal silikon güneş hücreleri (c-Si)
- Galyum Arsenit güneş hücreleri (GaAs)
- III-V çok eklemlili güneş hücreleri (MJ)

2.2.1.1. Monokristal Güneş Hücresi

Monokristal silikon yapmak için “kristal büyüme – crystal growth” olarak adlandırılan yığın tek kristalleri hazırlama ve üretme teknolojisinden yararlanılmaktadır (Müller G. ve Friedrich J. (2005)). Monokristal silikon üretiminde en yaygın kullanılan teknoloji Czochralski (CZ) yöntemidir. İşlemin başında besleme malzemesi silindirik şekilli bir genellikle kuvarstan yapılan potaya konur (Şekil 2.5). Rezistans veya radyofrekans ısıtıcılar ile 1.425 °C’de eritilir.



Şekil 2.5. Cz yönteminin prensibinin şeması (Müller G. ve Friedrich J. 2005)

Besleme malzemesi tamamen eritildikten sonra, tipik olarak birkaç milimetre çapında bir tohum kristali üstten serbest eriyik yüzeyine daldırılır ve bir eriyik menisküsü oluşturulur. Daha sonra, daldırılmış tohumun küçük bir kısmının yeniden eritilmesinden sonra tohum eriyikten genellikle rotasyon altında yavaşça çekilir ve eriyik yeni bir kristal kısım oluşturarak tohumun ara yüzeyinde kristalleşir (Müller G. ve Friedrich J. 2005). Sonraki büyüme işlemi esnasında kristalin şekli, kristalin ısıtma gücü, özellikle kristalin çapı, çekme ve dönme hızı çok dikkatli bir şekilde ayarlanarak kontrol edilir. Bu yüzden genellikle otomatik bir çap kontrolü uygulanmaktadır. Bu çap kontrolü, ya menisküs şeklinin kontrolüne (örn. silikon için) ya da kristalin (örn. GaAs, InP için) veya eriyiğin (oksitler için) ağırlığına dayanmaktadır. CZ yönteminin en önemli teknik uygulaması, 300 mm çapa ve 300 kg ağırlığa kadar çıkıksız silikon kristallerinin büyütülmesidir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Czochralski yöntemiyle büyütülen külçe silisyum kristali (Anonim 5)

Oluşan silisyum külçe bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu dilimleme işlemi iki aşamada gerçekleşir. İlk olarak dikdörtgen bloklar şeklinde kesilir ve daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak pil şeklinde işlenir.

Standart monokristal veya multikristal güneş hücreleri 150-300 μm kalınlığındaki p-tipi yarıiletken levhalardan üretilir. Endüstriyel PV hücrelerinin ön tarafı tipik olarak fosfor ile katkılıdır ve böylece 0,1-2 μm kalınlığında n-tipi bir alan ve tipik olarak kare başına 50 ile 65 Ω arası direnç oluşturur.

2.2.1.2. Multikristal Güneş Hücresi

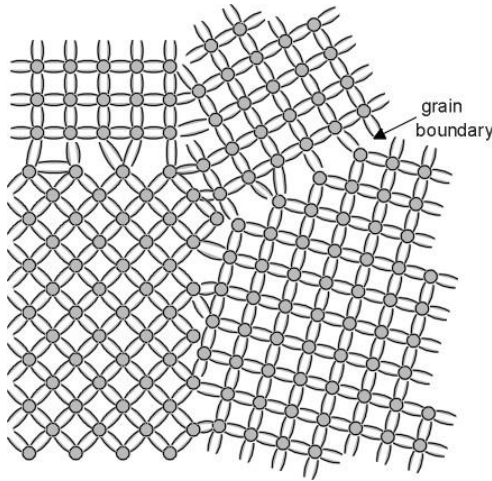
Multikristal (polikristal- çok kristalli) silikon hücreler, sınırları belirleyen çok sayıda daha küçük kristal veya taneciklerden oluşur. Tane sınırları, bant boşluğuna ekstra kusurlu enerji seviyelerinin eklenmesi nedeniyle yüksek lokalize rekombinasyon bölgeleri ortaya çıkarır, böylece malzemeden tüm azınlık taşıyıcıların ömrünü azaltır. Bu sınırlar elektron akışını engeller ve onları güneş pilinin güç çıkışını azaltmak için deliklerle yeniden birleşmeye teşvik eder. Bu yüzden çok kristalli silikon bazlı güneş pilleri genellikle daha az verimlidir. Fakat çok kristalli silikonun üretilmesi, tek kristalli silikondan çok daha ucuzdur ve daha basittir (Zhou Y. 2015).

Daha büyük kristaller daha az tane sınırı anlamına geldiğinden, büyük taneli kristallerin çok kristalli silikon güneş pilleri için en uygun olduğu düşünülmektedir. Şu anda, güneş pilleri için çoğu çok kristalli silikon, büyümenin daha küçük taneler üretmek için tohumlandığı bir süreç kullanılarak büyütülmektedir. Büyümeden sonra çok kristalli silikon levha daha sonra tuğlalara bölünür ve ardından tuğlalar yongalar halinde dilimlenir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Büyümeden sonra çok kristalli silikon levha (Yang Y. vd, 2015)

Tane sınırlarında önemli rekombinasyon kayıplarını önlemek için, en az birkaç milimetre mertebesinde tane boyutları gereklidir (Card H. C. ve Yang E. S. 1977). İki kristal tane arasındaki sınırda, bağlar gerilir ve elektronik özellikler bozulmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Multikristal hücrelerde tane sınırları (Yang Y. vd, 2015)

Güneş pilleri için uygun silikon üretmede ilk adım, 1900°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bir fırında gerçekleşen $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ reaksiyonu yoluyla yüksek saflıkta silis kumunun silikona dönüştürülmesidir. Karbon genellikle kok şeklinde verilir ve karışım SiC oluşumunun engellemesine yardımcı olmak için SiO_2 bakımından zengin tutulur. SiC'yi üründen tamamen ortadan kaldırmak için daha fazla kimya yapılmaktadır.

Elde edilen "metalurjik sınıf" (metallurgical grade, MG) silikonun çoğu, alüminyum döküm veya kimya endüstrisinde kullanılmaktadır. Geriye kalan kısım (şu anlık sadece yüzde birkaçı) güneş pilleri üretmek için daha da rafine edilmektedir. Neredeyse ihmal edilebilir bir oran elektronik endüstrisi için yonga imalatına gitmektedir. MG silikonunun üretiminden sonra güneş pilleri için uygun malzeme üretmenin bir sonraki adımı, tipik olarak $10^6 - 10^9$ faktörü ile saflaştırma işlemidir (Cowern N. E. B, 2012).

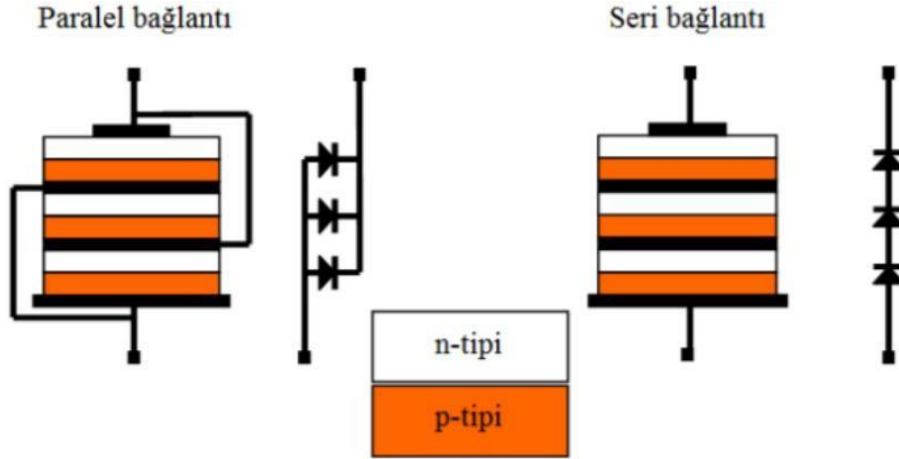
2.1.2.3. Çok Eklemlili (Multijunction) Güneş Hücresi

Çok eklemlili (MJ) güneş hücreleri, III-V malzemelerine (galyum arsenit (GaAs), alüminyum indiyum fosfit (AlInP), alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP), galyum indiyum fosfit (GaInP) ve indiyum fosfit (InP) vb) dayanan farklı yarı iletken malzemelerden yapılmış çoklu p-n bağlantılarına sahip güneş hücreleridir (Sundaram S. vd, 2016) Her malzemenin p-n bağlantısı, ışığın farklı dalga boylarına tepki olarak elektrik akımı üretmektedir. Çoklu yarı iletken malzemelerin kullanımı, daha geniş bir dalga boyu aralığının emilmesine izin vererek hücrenin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme verimini iyileştirir. Geleneksel tek eklemlili hücreler, teorik olarak maksimum %34 verime sahiptir. Teorik olarak, sonsuz sayıda bağlantı, yüksek konsantrasyonlu güneş ışığı altında %86,8'lik bir sınırlayıcı verimliliğe sahip olmaktadır (Mohammad Bagher A, 2015).

Şu anda, geleneksel kristal silikon güneş pillerinin en iyi laboratuvar örnekleri %20 ile %25 arasında verimliliğe sahipken, çok eklemlili hücrelerin laboratuvar örnekleri %43'ün üzerinde performans göstermiştir (Brown, 2011)

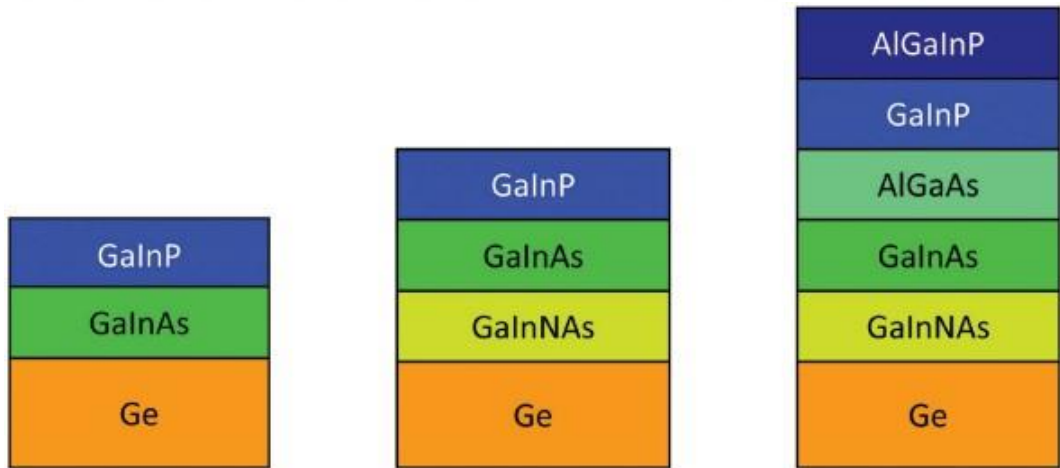
Tandem, iki katmanlı, hücrelerin ticari örnekleri, tek güneş ışığı altında %30 oranında yaygın olarak bulunmaktadır ve konsantre güneş ışığı altında yaklaşık %40'a yükselmektedir. Ancak bu verimliliğin yanında artan karmaşıklık ve üretim fiyatı oldukça yüksektir.

Katmanlar organik, inorganik veya hem organik hem de inorganik (hibrit) olabilir. Paralel ve seri olmak üzere iki farklı biçimde bağlantı yapılabilir. Paralel bağlantılarda, ara elektrotlar her münferit (tek) pilden yük toplanmasını sağlarlar. Bu elektrotlar foton kayıplarını en aza indirmek için saydam, yük taşıyıcılarının toplanmasını sağlamak için de yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Seri bağlantılarda ise münferit pilleri ayırmak için ince, kesintisiz, ışığı soğurmeyen metalik katmanlara gerek duyulmaz (Şekil 2.9) (Anonim 3).



Şekil 2.9. Çok eklemlı güneş pillerinin seri ve paralel bağlantı yapısı (Anonim 3)

Çok eklemlı güneş pilleri, cihaz yapılarında yoğun olarak GaAs kullanır (Şekil 2.10). Konsantre güneş pili (CPV) teknolojisi GaAs güneş pillerini kullanır. GaAs kristallerinin üretimi, galyum ve arsenik saf elementlerinin bir kombinasyonu yoluyla veya trimetil galyum ((CH₃)₃Ga) ve trimetil arsenik ((CH₃)₃As) gazları kullanılarak olabilir.



Şekil 2.10. III-V yarı iletken malzemelerden yapılmış farklı çok eklemlı güneş pilleri için örnek taslağı. Alt hücreler tünel diyotları ile birbirine bağlıdır. Her alt hücre, güneş spektrumunun farklı bir bölümünü kullanır (Philipps S. P. ve A. Bett W. 2014)

2.2.2. İnce Film Güneş Hücreleri

İnce film güneş pilleri (TFSC), çok sayıda PV malzeme katmanına sahip ikinci nesil güneş pilleridir. Bu güneş pilleri, geleneksel p-n bağlantılı güneş pillerine kıyasla yaklaşık 300-350 kat daha ince bir kalınlık katmanına (yaklaşık birkaç nanometre) sahiptir.

Tipik olarak, bu güneş pilleri, plastik, cam veya metal dahil olmak üzere bir substrat üzerine birkaç foton emici malzeme katmanlarının yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kristal hücrelerle karşılaştırıldığında, ince filmler daha esnek ve daha hafiftir. İnce film güneş pilleri, güneş ışığından elektrik üretmek için diğer güneş pillerinden daha verimli yollar sağlamaktadır. Amorf güneş pillerinden oluşur ve basit üretim süreci, hafifliği ve uygulamalarda esnekliği ile karakterize edilmektedir (insiders vd, 2019).

Özellikleri:

- İnce film güneş panellerinin kurulum süreci, geleneksel silikon panellere göre çok daha kolaydır ve daha az çaba gerektirir.
- İnce film güneş panelleri hafif ve esnektir ve bu nedenle geleneksel güneş panellerinin kurulumadığı alanlarda uygulanabilir.
- Bu güneş pilleri önemli ölçüde daha az miktarda silikon içerir ve bu nedenle üretimleri sırasındaki emisyonlar da standart güneş panellerinin üretimine kıyasla oldukça düşüktür.

Tipik bir ince film güneş pili çoğu monokristal hücrenin aksine elektrik iletimi için metal bir ızgaraya sahip değildir. Bunun yerine hücreler, kalay oksit gibi ince bir şeffaf iletken oksit tabakasına sahiptir. Bu oksitler oldukça şeffaftır ve elektriği oldukça kolay iletir.

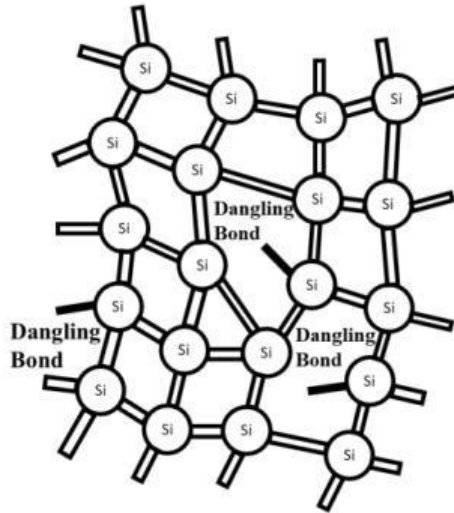
İnce film güneş pilleri seri üretim için maksimum potansiyele sahip, kullanımı kolay ve geleneksel güneş pillerinden daha esnek olmasının (Şekil 2.11) avantajları varken daha az verimli (yaklaşık %20-30) olması ve verimliliğin az olmasının yanında geleneksel güneş pilleriyle aynı miktarda elektrik için daha fazla alana ihtiyaç duyulması, üretim maliyetinin yüksek ve ince film güneş pillerinin genellikle doğrudan bir yüzeye uygulanması ve daha fazla ısı tutmasından dolayı ısı tutma oranının yüksek olması da dezavantajları olarak bilinmektedir.



Şekil 2.11. İnce film güneş pilinin esnekliğini gösteren görsel

2.2.2.1. Amorf Silikon Güneş Hücresi

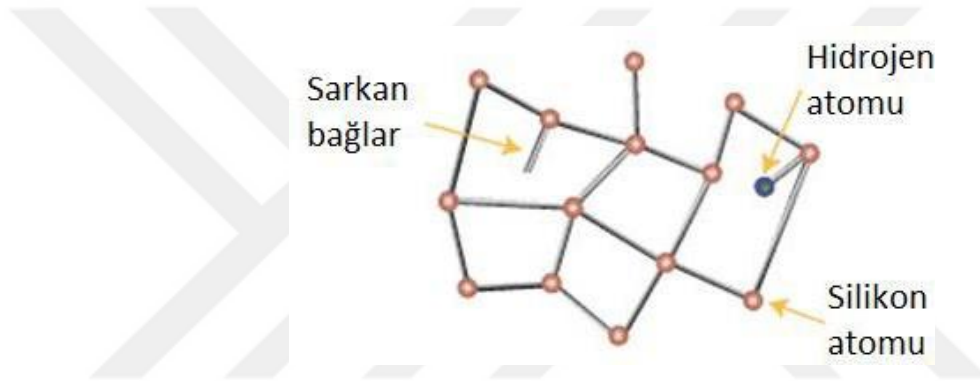
Amorf silikonun yapısı şekil 2.12’de görüldüğü gibi kristalden bariz bir şekilde farklıdır. Uzun menzillerde belirli bir düzenin olmadığı görülmektedir. Elde edilen sarkan bağlar, sabitleştirilmiş bir silikon atomu üzerinde yetersiz valanslar, $10^{19}/\text{cm}^3$ mertebesinde bulunmaktadır. Bu sarkan bağların sayısı fazla olmasından dolayı taşıyıcı ömrünü ciddi şekilde azaltmaktadır. Bu kusurlar Fermi enerjisi seviyesini sabitler, böylece amorf silikon ne p tipine ne de n tipine katkılanamaz. Bu yüzden elektronik cihazların üretiminde az kullanılan bir yarıiletkenlerdir (Kang H, 2021).



Şekil 2.12. Amorf silikon (Kang H, 2021)

2.2.2.2. Hidrojenlenmiş Amorf Silikon Güneş Hücresi

Chittick, Alexander ve Sterling etkili bir çözüm olarak kızdırma deşarj tekniğini kullanmışlardır (Chittick R. C, 1969). İçerdiği gazın bir plazmasını oluşturmak için bir cam tüpün her iki ucundaki iki elektrot arasına bir voltaj uygulayarak ısıtılmış yüzeyler üzerinde ayrılmış silan gazını (SiH_4) kullanmışlardır. Biriktirme sırasında %10 hidrojen eklenmesiyle kusur yoğunluğunun büyük ölçüde $10^{16}/\text{cm}^3$ 'e düştüğü kanıtlanmıştır (Chopra K. L. vd. 2004). Her hidrojen atomu, şekil 2.13'de gösterildiği gibi, daha önce amorf silikonda bulunan sarkan bir bağ ile birleşerek verimli bir egzotik bir malzeme olan hidrojene amorf silikon (a-Si:H) oluşturur. Kusur yoğunluğundaki azalma, sonunda hidrojene amorf silikonun katkılanmasına izin verir ve bağlantı cihazlarında yaygın olarak kullanılabilir.

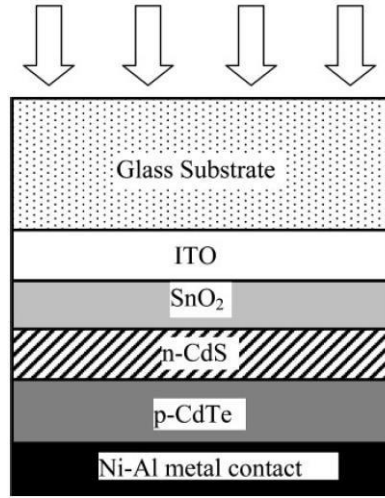


Şekil 2.13. Amorf silikonun yapı modeli (Anonim 21)

2.2.2.3. Kadmiyum Tellür (CdTe) Güneş Hücreleri

Kadmiyum (Cd), çinko madenciliği ve pillerin yan ürünü olan toksik bir elementtir. Azınlık elementi olan tellür (Te) ise bakır, kurşun ve altın madenciliğinin bir yan ürünüdür. Yüksek optik absorpsiyon kalitesi ve yüksek kimyasal stabilitesi ile kadmiyum tellür (CdTe) güneş hücreleri 1.5 eV ideal bant aralığına sahip uygun malzemelerden biridir. Uygun malzeme özelliklerinin yanında CdTe, uygun maliyetli güneş hücresi yapmak için önde gelen malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir.

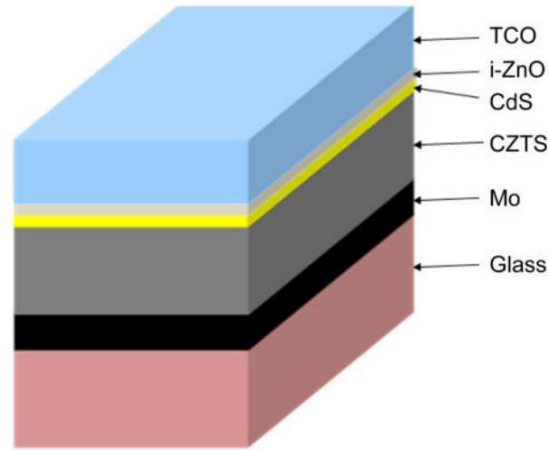
CdTe ince film güneş pillerinin teorik veriminin %28-30 olması beklenmektedir. CdTe güneş panellerinde CdTe ve kadmiyum sülfür (CdS) katmanlarını kullanır (Şekil 2.14). Bu katmanlar, radyo frekansı püskürtme, yakın aralıklı süblimasyon (close-spaced sublimation - CSS), kimyasal banyo biriktirme (chemical bath deposition - CBD), elektro biriktirme (electro-deposition - ED) ve serigrafi gibi farklı kimyasal ve fiziksel biriktirme yöntemleriyle yapılmaktadır (Sundaram S., vd. 2016).



Şekil 2.14. CdTe güneş pili yapısı (Chopra K. L., vd. 2004)

2.2.2.4. Bakır Çinko Kalay Sülfür (CZTS) Güneş Hücreleri

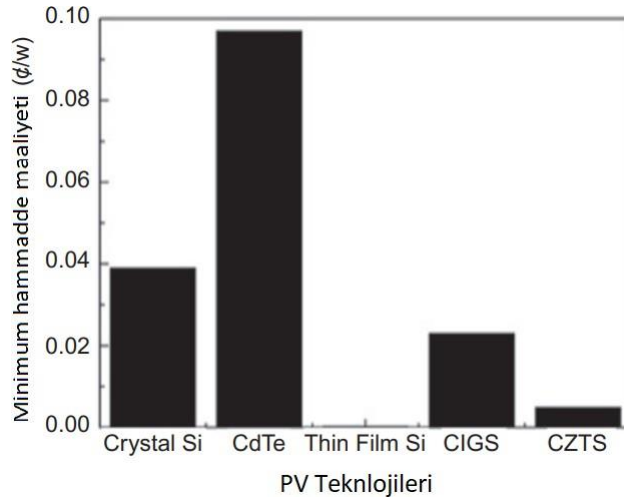
1977'de Wagner ve Bridenbaugh bir n-tipi CdS ince filmi p-n birleşimini oluşturmak için buharla taşınan $\text{Cu}_2\text{CdSnS}_4$ tek kristal substrat üzerinde buharlaştırma ile kaplayarak ilk $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (Bakır Çinko Kalay Sülfür – CZTS) geliştirilmiştir. Kentaro Ito Nakazawa, kadmiyum kalay oksit şeffaf iletken film ve CZTS (Copper Zinc Tin Sulfide) ince filmden oluşan heterodiyottaki fotovoltaiik etkiyi ilk kez bildirmiştir (Nakazawa K. I. 1988). CZTS, teorik olarak bakır indiyum diselenide (CuInS_2 - CIS) bir Zn ve bir Sn atomu için iki In atomunun ikame edilmesiyle elde edilmektedir. Bu izoelektronik yer değiştirme, temel bileşikle aynı özelliklerin çoğuna sahip, ancak önemli ölçüde nadir veya pahalı elementler içermeyen bir malzeme üretmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Tipik CZTS güneş hücresinin şematik yapısı (Jiang and Y, 2013)

CZTS, $(I)_2(II)(IV)(VI)_4$ 'ün bileşik yarıiletkenidir. 10^4 cm^{-1} den büyük yüksek absorpsiyon katsayısı ve $\sim 1.45 \text{ eV}$ ile istenen bant aralığı sayesinde CZTS ince filmi mükemmel bir PV malzemesi olarak kabul edilmiştir. Teorik hesaplamalar, birkaç mikrometrelik bir CZTS katmanına sahip CZTS ince film güneş hücreleri için %32'ye kadar yüksek dönüşüm verimliliğinin mümkün olduğunu göstermiştir. Wadia ve çalışma arkadaşları ayrıca mevcut PV teknolojileri ve ortaya çıkan PV teknolojileri için minimum hammadde maliyetini de hesaplamıştır (Nkuissi and Hartiti, 2018).

Şekil 2.16'da CIGS, CdTe ve CZTS fotovoltaiik teknolojilerinde kullanılan elementlerin toprak bolluğunu göstermektedir. Yerkabuğundaki Zn içeriği (79 ppm) ve Sn içeriği (2.2 ppm), In'inkinden sırasıyla yaklaşık 1500 ve 45 kat daha fazla bulunmaktadır.



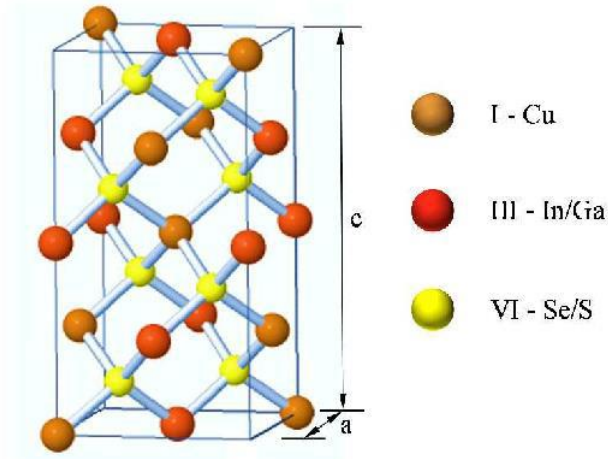
Şekil 2.16. Farklı PV teknolojilerinin 2008 hammadde maliyeti (Wadia vd, 2 009)

CZTS daha verimli, düşük maliyetli ve doğa dostu olma potansiyeli sayesinde bu teknolojinin daha önemli olduğunu göstermektedir. CZTS güneş pillerini imal etmek için hem vakum bazlı hem de vakum bazlı olmayan yöntemler başarıyla araştırılmıştır. Vakum temelli yöntemlerden buharlaştırma ve püskürtme, verimlilik açısından uygun biriktirme teknikleridir. Bu araştırmalar sonucunda gelecekte ince film güneş hücreleri ailesi için olgunlaşmış bir CZTS PV teknolojisi beklenmektedir.

2.2.2.5. Bakır İndiyum Galyum Diselenid (CIGS) Güneş Hücreleri

Periyodik tablonun I-III-VI₂ sütunundaki bakır indiyum diselenid (CIS) ve bakır galyum diselenid (CGS) gibi çoklu yarı iletkenler, genel bir $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ formülüyle bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) olarak birleştirilmektedir. Her elementten istenilen miktarda içeren erimiş karışım hazırlanarak sentezlenen tetragonal kristal yapısından dolayı kalkopirit formundadır (Şekil 2.17). Bakır indiyum galyum diselenid ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ - CIGS) güneş pilleri, hem küçük cihazlarda hem de modül seviyesinde %20'nin üzerinde daha yüksek dönüşüm verimliliği göstermiştir (Wadia vd., 2009), (Repins vd., 2008).

CIGS'de bant genişliği, bileşikteki elemanların fraksiyonuna bağlı olarak 1.0-1.7 eV'ye ulaşmak için In:Ga ve Se:S arasındaki oranları değiştirerek ayarlanabilmektedir ve mevcut verimli hücreler 1,20 ile 1,25 eV aralığında bir bant genişliği ile üretilmektedir. Malzemenin yüksek bir emme katsayısına sahip olması ve güneş ışığını güçlü bir şekilde emmesi nedeniyle, diğer yarı iletken malzemelerden çok daha ince bir film gereklidir.



Şekil 2.17. I-III-VI₂ kalkopirit malzeme yapısı (Anonim 12)

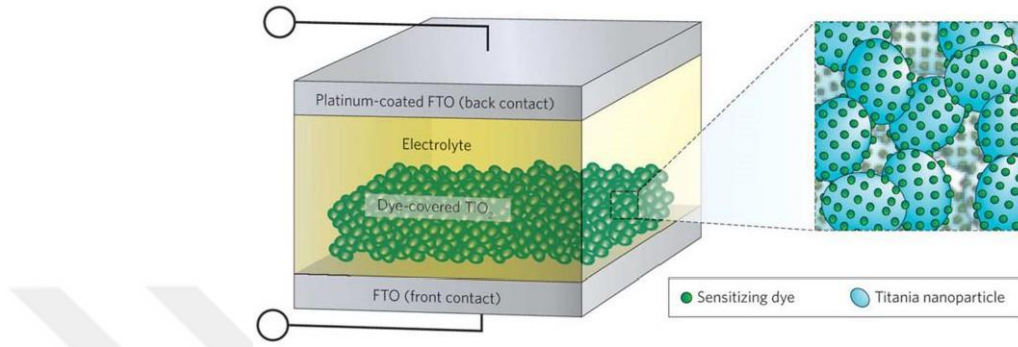
Üretmek için “Üç aşamalı” birlikte buharlaştırma işlemi ve iki aşamalı vakumsuz kimyasal yöntemler gibi yöntemleri bulunmaktadır [36]. Fakat üç aşamalı bir büyüme sürecinde çeşitli parametrelerin kontrol edilebilirliği üretimi karmaşıklık hale getirebilmektedir. Yani yüksek işlem sıcaklığı (500–600°C), yüksek vakum (10^{-6} – 10^{-5} mbar) ve karmaşık kontrol edilebilirliği üretimi zorlaştırmaktadır. Daha az karmaşık olan iki aşamalı işlemler ise daha az verimli hücrelere yol açmaktadır.

CIGS katmanları esnek olacak kadar incedir ve esnek alt tabakaları üzerinde biriktirilmelerine olanak tanımaktadır. İnce film teknolojisinin tümü normalde yüksek sıcaklıkta biriktirme tekniklerini kullandığından, en iyi performans normalde cam üzerine yerleştirilen hücrelerden gelmektedir. CIGS hücrelerinin düşük sıcaklıkta biriktirilmesindeki gelişmeler, bu performans farkının çoğunu silmiştir. Fotovoltaik endüstrisinde kullanılan CIGS güneş pilleri en iyi malzeme olarak bilinir. Bu rolde, CIGS, oldukça esnek, hafif güneş panelleri üreterek, esnek alt tabaka malzemeleri üzerine yerleştirilebilme avantajına sahiptir. Verimlilikteki gelişmeler, CIGS'yi alternatif hücre malzemeleri arasında yerleşik bir teknoloji haline getirmiştir.

2.2.2.6. Boyaya Duyarlı (Dye-Sensitized Solar Cells – DSSC) Güneş Hücreleri

Boyaya Duyarlı güneş pilleri (DSSC), herhangi bir görünür ışığı elektrik enerjisine dönüştüren üçüncü nesil bir güneş hücresidir. Bu yeni gelişmiş güneş pili, doğanın ışık enerjisi Emilimini taklit etme biçiminden dolayı yapay fotosenteze benzetilebilir. Boyaya Duyarlı güneş pilleri (DSSC), 1991 yılında Profesör Michael Graetzel ve Dr Brian O'Regan tarafından Lozan'daki Federal Teknoloji Enstitüsü'nde (École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)) icat edilmiştir ve genellikle Grätzel hücresi olarak adlandırılır. DSSC, iç ve dış mekanlarda çok çeşitli ışık koşullarında elektrik üretmek için kullanılabilen ve kullanıcının çok çeşitli elektronik cihazlara güç sağlamak için hem yapay hem de doğal ışığı enerjiye dönüştürmesini sağlayan bir teknolojidir (Mohammad Bagher A., 2015).

Bir DSSC'de fotonlar, anot üzerine yerleştirilmiş ince bir nanokristal yarı iletken tabakası üzerinde emilen bir ışığa duyarlılaştırıcı tarafından yakalanır (Şekil 2.18). Diğer PV teknolojileri, fotoelektrik etkilerin üretilmesi için elektron transferi için katı hallerinde yarı iletkenler kullanırken, DSSC'ler bir elektrik akımı üreterek iyonları bir karşı elektrota aktarmak için sıvı elektrolitleri (foto-elektrokimyasal hücre) kullanmaktadır.



Şekil 2.18. Boyaya duyarlı güneş hücrelerinin yapısı (Mohammad Bagher A., 2015)

DSSC'ler %12,3'e varan verimlilik elde etmektedirler. Çok yönlülükleri ve umut verici düşük üretim maliyetleri; Hazır malzemelerin kullanımı ve kanıtlanmış işlemlerle üretilmiş az miktarda düşük maliyetli; basit montaj ve esnek modüller; baskı teknikleri ile uyumluluk; çeşitli yüzeylerde biriktirme ve çok çeşitli yüzeylerle entegrasyon gibi yönleriyle avantaj sağlamaktadır (Jean vd., 2015).

2.2.2.7. Kollodial Kuantum Nokta (CQD) Güneş Hücreleri

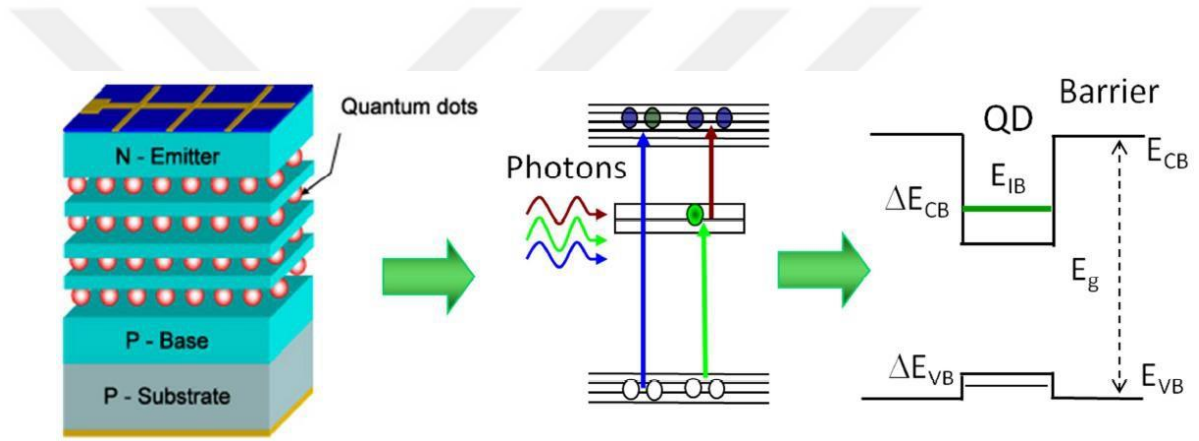
Kuantum nokta (QD) güneş pili, emici fotovoltaiik malzeme olarak kuantum noktaları kullanan bir güneş pili tasarımıdır. Silikon, bakır indiyum galyum selenit (CIGS) veya CdTe gibi yığın (bulk) malzemelerin yerini almaya çalışmaktadır. Kuantum noktaları, noktaların boyutunu değiştirerek çok çeşitli enerji seviyelerinde ayarlanabilen bant aralıklarına sahiptir. Yığın malzemelerde bant aralığı malzeme(ler) seçimi ile sabitlenmektedir. Bu özellik, güneş spektrumunun birden fazla bölümünü toplayarak verimliliği artırmak için çeşitli malzemelerin kullanıldığı çok eklemli güneş pilleri için kuantum noktalarını daha kullanışlı yapmaktadır. Kuantum noktalarına "yapay atomlar" denir.

Bu enerji seviyeleri, boyutları değiştirilerek ayarlanabilir ve bu da bant aralığını tanımlar (Şekil 2.19). Kuantum noktalar, temel malzemeyi veya yapım tekniklerini değiştirmeden çeşitli bant aralıklarını ifade etmelerine izin vererek çeşitli boyutlarda büyütülebilir [38]. Bant aralığını ayarlama özelliği, kuantum nokta güneş hücrelerini diğer güneş hücrelerine göre daha çekici hale getirir. 2019 yılından itibaren kuantum

nokta güneş pili verimliliği %18'i aşmış durumdadır (Anonim 8).

Kurşun sülfür (PbS) CQD'leri kullanan tek bağlantı uygulamaları, geleneksel olarak elde edilmesi tipik olarak zor olan uzak kızılötesi frekanslara ayarlanabilen bant aralıklarına sahiptir. Dünya'ya ulaşan güneş enerjisinin yarısı kızılötesi ve hatta çoğu yakın kızılötesi bölgededir. Kuantum nokta güneş pili, kızılötesi enerjiyi spektrumdaki diğer enerjiler kadar erişilebilir kılmaktadır (H. Sargent, 2005).

CQD'ler hem kolay sentezlenmektedirler hem de kolay hazırlanmaktadır. CQD'ler tipik olarak küçük partiler halinde sentezlenir, ancak toplu olarak üretilebilir. Noktalar, elle veya otomatik bir işlemle döndürmeli kaplama ile bir alt tabaka üzerine dağıtılabilir. Büyük ölçekli üretim, püskürtme veya rulo baskı sistemlerini kullanabilir ve modül yapım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Bunlar ıslak kimyayı (koloidal kuantum noktaları – CQD'ler) ve ardından çözelti işlemeyi kullanmaktadır (Mohammad Bagher A., 2015).

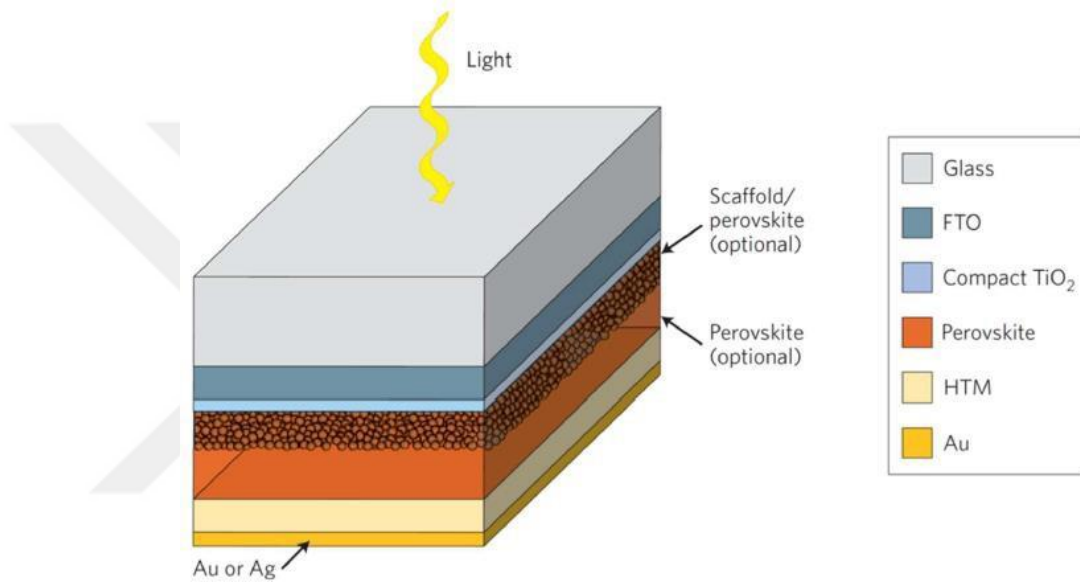


Şekil 2.19. Kuantum nokta güneş hücreleri çalışma prensibi (Mohammad Bagher A., 2015)

2.2.2.8. Perovskit Güneş Hücreleri

Perovskite güneş pili adı, perovskit yapı olarak adlandırılan emici malzemelerin ABX_3 kristal yapısından türetilmiştir. 1839 yılında Alman mineralog Gustav Rose tarafından keşfedilen ve Rus mineralog Lev Perovski tarafından adlandırılan perovskit güneş hücreleri (PSC) kalsiyum titanatın ($CaTiO_3$) kristal yapısıdır. Perovskite güneş pilleri, güneşten enerji dönüşüm verimliliğindeki kısa bir süre içinde %20'nin üzerinde ani artış nedeniyle büyük ilgi görmüştür. En yaygın olarak çalışılan perovskit emici, halojenür içeriğine bağlı olarak 2,3 eV ile 1,6 eV arasında bir optik bant aralığı ile metilamonyum kurşun trihalojenürdür ($CH_3NH_3PbX_3$, burada X, bir halojen iyonudur). İnorganik-organik bazlı hibrit perovskit güneş pilleri en yaygın olarak uygun bir bant aralığı (1.55 eV), yüksek absorpsiyon katsayısı, uzun delik-elektron difüzyon uzunluğu (100 nm) ve mükemmel taşıyıcı taşınımı olan $CH_3NH_3PbI_3$ malzemelerinden oluşur.

Perovskit güneş pilleri en yaygın olarak çözelti işlemi (döndürerek kaplama) ve termal buharlaştırma yöntemleri gibi farklı tekniklerle hazırlanır. Biriktirme için düşük oluşum enerjilerine sahiptir ve toplu üretim teknikleri için çok uygundur. PSC'ler, bir elektron taşıma katmanı (Electron Transporting Layer - ETL) ve bir delik taşıma katmanı (Hole Transporting Layer - HTL) arasına sıkıştırılmış aktif bir perovskit katmanından oluşmaktadır (Şekil 2.20). Işık eğer ETL'ye nüfuz edip geçtiyse ETL'nin önüne n-i-p ve p-i-n yapısında şeffaf iletken katman adı verilen başka bir katman yerleştirilir. n-i-p ve p-i-n gibi farklı konfigürasyonlara dayanan mezoskopik ve düzlemsel yapılar olmak üzere iki temel yapı vardır.



Şekil 2.20. Perovskit güneş hücresi yapısı (Mohammad Bagher A., 2015)

Mezoskopik yapı genellikle bir n-i-p konfigürasyonuna sahiptir ve düzlemsel yapılar ayrıca iki alt konfigürasyona, yani n-i-p düzlemsel ve p-i-n düzlemsel olarak kategorize edilmektedir (Kim et al., 2018). n-i-p yapısı genellikle, perovskit malzemesinin ince bir titanyum oksit (TiO_2) tabakası ve mezogözenekli TiO_2 veya Al_2O_3 çerçeve tabakasıyla korunan şeffaf bir alt tabaka üzerine yerleştirilmesini içerir (Ma et al., 2018). p-i-n yapısı, bir HTL ile çevrelenmiş şeffaf bir alt tabaka üzerine perovskit malzemesinin bırakılmasını kapsar.

Perovskite güneş pilleri, işlenmelerinin basitliği açısından geleneksel silikon güneş pillerine göre bir avantaja sahiptir. Geleneksel silikon hücreler, yüksek saflıkta silikon gofretler üretmek için özel temiz oda tesislerinde yüksek sıcaklıklar ($1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar) ve vakumlar gerektiren pahalı, çok aşamalı işlemler gerektirirken bu teknikleri büyütmek daha zordur ve organik-inorganik perovskit malzeme ise geleneksel

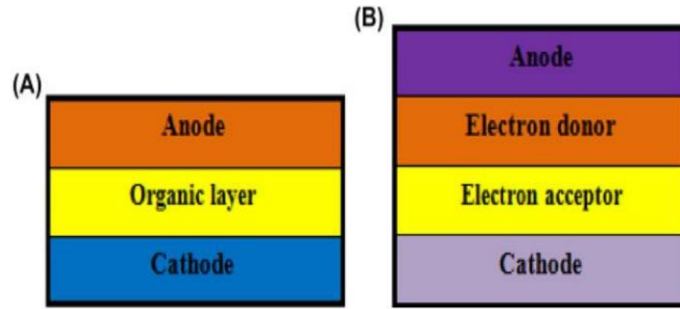
laboratuvar ortamında daha basit ıslak kimya ve işleme teknikleri ile üretilmektedir (Anonim 16).

2.2.2.9. Organik (OSC) Güneş Hücreleri

İnorganik (Silikon) güneş hücrelerinde verim her ne kadar yüksek olsa da üretim maliyetleri de bir o kadar yüksektir. Bu yüzden daha düşük maliyetlerle elde edilebilen organik güneş hücreleri üzerindeki çalışmalar son dönemlerde oldukça hız kazanmış ve buna bağlı olarak organik güneş hücrelerinin verimleri de gün geçtikçe artış göstermiştir. Güneş hücresi yapımında kullanılan malzemeler iletken polimerleri, boyaları, pigmentleri ve sıvı kristalleri içermekle birlikte fotofiziksel özellikleri en iyi bilinenler iletken polimerlerdir (Sariciftci vd., 1992).

Organik güneş hücrelerinde verim henüz inorganik güneş hücreleriyle karşılaştırılabilecek seviyede olmasa da üretimi esnasında daha az toksik madde açığa çıkarması, modüllerin hafif ve esnek olması, maliyetlerinin düşük olması gibi avantajlarından dolayı geleceğin güneş hücreleri olarak görülmektedir (Anonim 24).

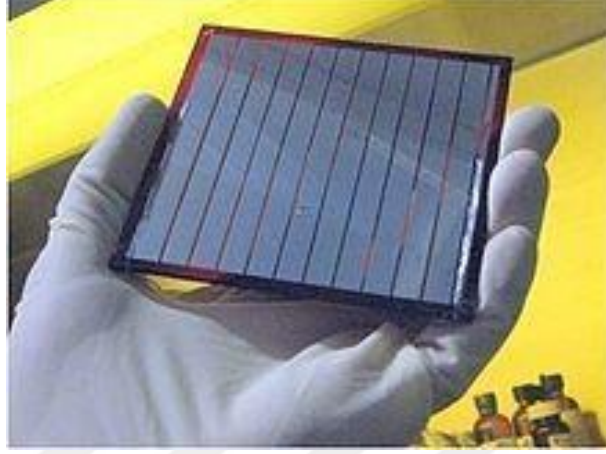
Organik güneş pilleri, organik yarı iletkenlerin eksitonlara bağlı elektronlar ve delikler üretebileceği, elektron ve deliğin ayrılması arayüzde (elektrotların ve iletken polimerlerin birleşimi) meydana geldiği çalışma prensibini izleyen organik yarı iletkenlerle yapılır.



Şekil 2.21. Organik güneş pilleri: (A) tek katmanlı ve (B) çift katmanlı (Kesinro vd., 2021)

Son yıllarda, organik güneş pillerindeki en büyük ilerleme, 2002 yılında California Üniversitesi'ndeki (Berkeley) bilim adamları tarafından plastik nanoteknoloji ile geliştirilen ilk nesil plastik güneş pilleri olmuştur. Bu hücreler, 0,7 V voltaj sağlamak için çeşitli taşınabilir cihazlara ve giyilebilir elektronik cihazlara kurulabilir. Organik güneş pilleri, düşük fiyat, kolay şekillendirme ve kimyasal modifikasyon ile performans

kontrolü ile karakterize edilir. Organik güneş pillerinde en önemli tip, aslında organik ve inorganik bir kompleks olan boyaya duyarlı hale getirilmiş nanokristal güneş pilidir (Shi vd., 2015).



Şekil 2.22. Organik fotovoltaiik hücre (“Organic solar cell,” 2023)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

Güneş hücrelerinin bireysel parametrelerini ölçmek ve bunların karmaşık ilişkilerini belirlemek, güneş pillerinin gelişmesi ve ilerlemesi için temel bir şarttır. Bu ilişkiler ve bağımlılıklar kesin olarak ne kadar iyi belirlenebilirse parametrelerin iyileştirilmesine yönelik kavramlar o kadar kesin olarak uygulanabilmektedir. Bilinen maliyet durumu nedeniyle iki yol gösterici ilke izlenmelidir. Bir taraftan güneş pili verimliliğini mümkün olduğunca yüksek hale getirmek; öte yandan ise daha uygun maliyetli teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir (Goetzberger vd., 2014).

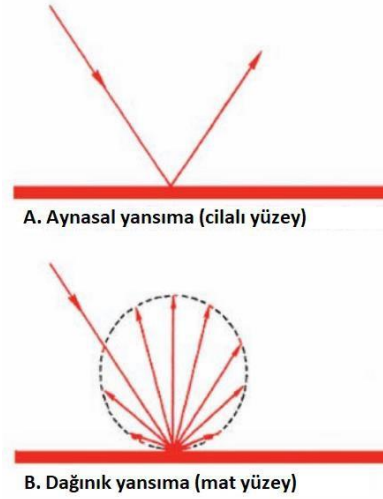
Maliyet azaltma ve verimlilik artırma arasında bir uzlaşma sağlanmalıdır. Bu nedenle analiz çok önemlidir. Üretim sırasında ve sonrasında tüm güneş pilleri optik ve elektriksel karakterizasyon laboratuvarlarında test edilmektedir (Anonim 10).

3.1.1. Optik Karakterizasyon

3.1.1.1. Yansıma (Dağınık ve Aynasal) ve Geçirgenlik Ölçümleri

Günümüzde güneş enerjisi endüstrisi tarafından yapılan en yaygın ölçümlerden biri, bir malzemenin yüzey yansımasının nicelleştirilmesidir. Yansıma ölçümleri en yaygın olarak güneş pilinin güneşten gelen enerjiye yanıt verdiği 300 nm ile 1500 nm arasında yapılmaktadır. Yansıma, aynasal ve dağınık olmak üzere iki çeşittir. Ne yazık ki birçok malzeme hem aynasal hem de dağınık yansımanın bir kombinasyonunu göstermektedir. Bu, en iyi yansıtma aksesuarının seçiminde bir sorun yaratabilir.

Aynasal yansıma (Şekil 3.1-A), pürüzsüz bir yüzey tarafından oluşturulur. Işık ışınının gelme açısı yansıma açısına eşittir; bu nedenle, aynasal malzemeler sıklıkla yüzeylerinde (ayna) görüntüler üretir. Aynasal yansıma, bir dizi farklı aksesuar türüyle ölçülür.



Şekil 3.1. Yansıma türleri. A) Aynasal yansıma, B) Dağınık yansıma (Anonim 17)

Dağınık yansıma (Şekil 3.1-B), pürüzlü bir yüzey tarafından oluşturulur. Bu durumda, ışık ışınının geliş açısı çok sayıda yansıma açısına yol açar; bu nedenle, görüntüler üretilmez. Dağınık yansıma, dünyadaki nesnelerin büyük çoğunluğu dağınık yansıtıcılar olduğundan, insanların dünyayı nasıl gördükleridir. Dağınık yansıma, kürelerin entegre edilmesiyle ölçülür, küçük (60 mm çap) ve büyük (150 mm çap) olmak üzere iki boyut mevcuttur (Anonim 17).

Optik geçirgenlik, fotovoltaiik (PV) kapsülleme malzemeleri için önemli bir performans özelliğidir. Kapsüllemenin renginin bozulması, geçirgenlikte azalmaya neden olurken sahaya yerleştirilmiş PV modüllerinin de uzun vadeli performans düşüşüne önemli bir katkıda bulunan olarak tanımlanmıştır (Jordan vd.,2012). Belirli bir geliş açısında (θ) ve azimut açısında (ϕ) spektral aynasal yansıma ($R_{\text{specular},\lambda}$), katı bir açı (ω_{acc} -acceptance) içinde aynasal yönde yansıtılan katı bir (ω_{src} -source) açısından bir yüzey elemanı olan dA üzerine gelen spektral ışımaya akışının fraksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Nicodemus vd., 1977).

$$R_{\text{specular},\lambda}(\lambda, \theta, \phi, \omega_{\text{acc}}, \omega_{\text{src}}) \equiv \frac{d\Phi_{r,\lambda}(\lambda, \theta, \phi, \omega_{\text{acc}})}{d\Phi_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi, \omega_{\text{src}})} = \frac{\int_{\omega_{\text{acc}}} \int_{\omega_{\text{src}}} BRDF(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cos\theta_i d\omega_i \cos\theta_r d\omega_r}{\int_{\omega_{\text{src}}} \cos\theta_i d\omega_i} \quad (3.1)$$

burada yansıma, güneş yansıtıcı malzemelerin genellikle birkaç katmandan oluştuğunu belirtmek için R ile gösterilir. Bu nedenle, ölçülen yansıtma, tek bir yüzeyin yansıtıcılığı

(ρ) gibi yoğun bir özellikten ziyade, optik arayüzlerle ışığın çoklu etkileşimlerinden kaynaklanan genel kapsamlı bir özelliktir.

$$R_{\text{specular},\text{solar}} = \frac{\int R_{\text{specular},\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{E} \quad (3.2)$$

Burada E_{λ} ve E sırasıyla spektral ve toplam doğrudan normal güneş ışıınıdır. Sayısal entegrasyon, ağırlıklı ordinat yöntemi (Wadia vd., 2009) kullanılarak 300–2500 nm spektral aralığında gerçekleştirilir. Spektral dar açılı geçirgenlik T_{λ} , yarı saydam bir ortam tabakasının bir yüzey elemanı (dA) üzerinde katı bir açıdan (ω_{src}) gelen spektral radyan akının fraksiyonu olarak tanımlanır ve ortam katı bir (ω_{acc}) açısı içinde olay yönü boyunca iletilir (Şekil 3.2),

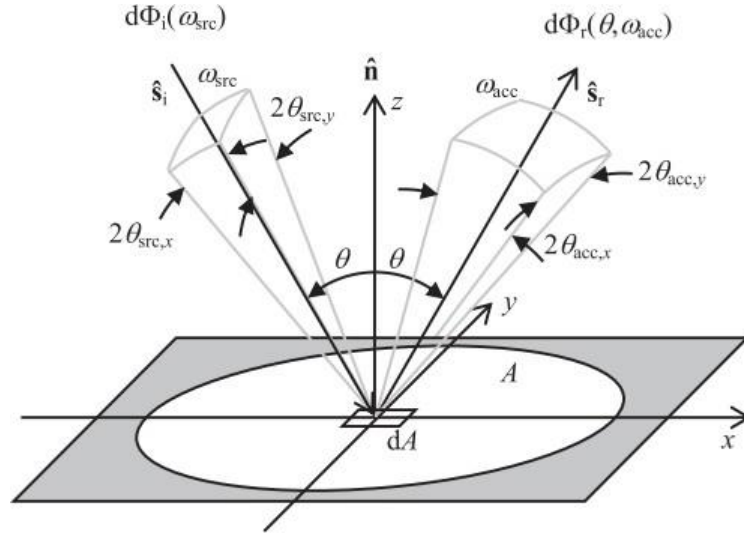
$$T_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, \omega_{\text{src}}, \omega_{\text{acc}}) \equiv \frac{d\Phi_{t,\lambda}(\lambda, \theta, \phi, \omega_{\text{acc}})}{d\Phi_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi, \omega_{\text{src}})} \quad (3.3)$$

Düz, tek katmanlı ve saçılmayan yarı saydam bir ortam için, spektral geçirgenlik T_{λ} , yüzeyinin spektral yansıtıcılığı ρ_{λ} ve ortamın spektral geçirgenliği τ_{λ} cinsinden verilir:

$$T_{\lambda} = \frac{\tau_{\lambda}(1-\rho_{\lambda})^2}{1-\rho_{\lambda}^2\tau_{\lambda}^2} \quad (3.4)$$

Güneş ağırlıklı dar açılı geçirgenlik ise aşağıdaki denklemle verilir (Good vd., 2016).

$$T_{\text{solar}} = \frac{\int T_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{E} \quad (3.5)$$



Şekil 3.2. Düz bir yüzey üzerinde gelen ve spekül yansıyan ışınların geometrisi (Good vd., 2016)

3.1.1.2. Fotoiletkenlik Ölçümleri

Fotoiletkenlik, bu malzemelerdeki iç süreçleri anlamak için bir araç olarak hizmet eder ve ayrıca ışığa duyarlı cihazlarda ışığın varlığını tespit etmek ve yoğunluğunu ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Fotoiletkenlik, elektromanyetik radyasyon, özellikle ışık, bir yarı iletken tarafından absorbe edildiğinde ve iletkenliğini değiştirdiğinde ortaya çıkan bir olgudur. Bu fenomenin teorisi literatürde iyi bir şekilde oluşturulmuştur (Bube and Rice, 1961).

Fotoiletkenlik, malzeme, değerlik ve iletim bantları arasında yasak bir bölge olan bant aralığı boyunca elektronları yükseltmek için yeterli enerjiye sahip fotonlarla bombardıman edildiğinde ortaya çıkar. Kadmiyum sülfürde bu enerji, görünür yeşil ışık olan 512 nanometre dalga boyundaki bir fotona karşılık gelen 2.42 elektron voltur (eV). Kurşun sülfürde boşluk enerjisi 0,41 eV'dir ve bu malzemeyi kızılötesi ışığa duyarlı hale getirir.

Yapılması önerilen fotoiletkenlik ölçümleri, numune tarafından üretilen sinyali ölçmek için gerekli spektral aralıkta bir radyasyon kaynağı, el-kromatörü, bir yoğunluk modülatörü, bir iletkenlik hücresi, gerekli aletlerin gerekli olduğu deneysel bir teknikle yapılmaktadır (Ago, 2018).

3.1.1.3. Film kalınlığı ölçümleri

İnce filmlerin kalınlıkları birkaç nanometreden onlarca mikrona kadar değişmektedir. Farklı tip ve kalınlıktaki filmler için farklı ölçüm yöntemleri vardır. Örneğin, opak bir substrat üzerinde optik olarak şeffaf bir ince film ölçülecekse, elipsometri gibi optik kalınlık ölçüm tekniklerinden biri kullanılabilir. Numune, optik

olarak saydam değilse ve yüzeyde basamaklar varsa, kalınlığı ölçmenin en iyi yolu taramalı elektron mikroskobudur (SEM - Scanning Electron Microscope). Bu tür numuneler için kalınlık ölçmek için başka bir yöntem de profilometredir. Her ölçüm yönteminin bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin ince film optik olarak şeffaf değilse, elipsometri kullanılamaz veya film üzerinde herhangi bir adım yoksa, atomik kuvvet mikroskobu veya profilometre ölçüm için uygun bir araç değildir.

Farklı yöntemler için ölçüm limitleri farklıdır. Optik teknikler diğer tekniklerden daha hassastır. Belirli bir dalga boyunda, LAZER ışını numune üzerinde saptırılır ve kaplamanın yüzeyinden ve kaplama ile substratın arayüzünden yansıyan ışın, dedektör üzerinde girişim oluşturur ve arayüzlenen ışık, kalınlık tespiti için analiz edilmektedir (Anonim 9).

3.1.1.4. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, gelen fotonların bir numunedeki titreşen moleküller ile etkileşimler yoluyla enerji kaybettiği veya kazandığı bir fenomen olan Raman saçılmasına dayanmaktadır. Bu enerji kaymaları, numunenin moleküler bileşimi hakkında çok yüksek doğrulukla bilgi elde etmek için kullanılabilir (Shipp vd., 2017).

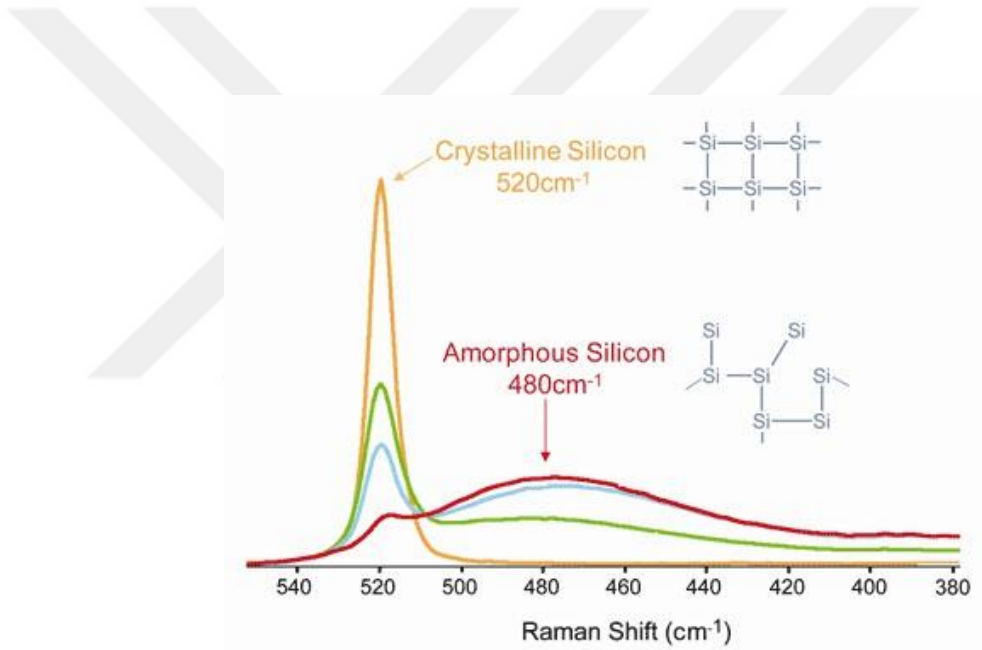


Şekil 3.3. Bir güneş pilinin Raman mikroskobu ile analiz edilmesi (Anonim 14)

Raman spektroskopisi, Si bazlı, CIGS, CdTe, organikler ve III-V'ler dahil tüm fotovoltaiik malzemelerin kalitesini izlemek için güneş pili endüstrisinde karakterize etmek için kullanılan bir araçtır. Aşağıdakiler gibi önemli malzeme özellikleri incelenebilmektedir:

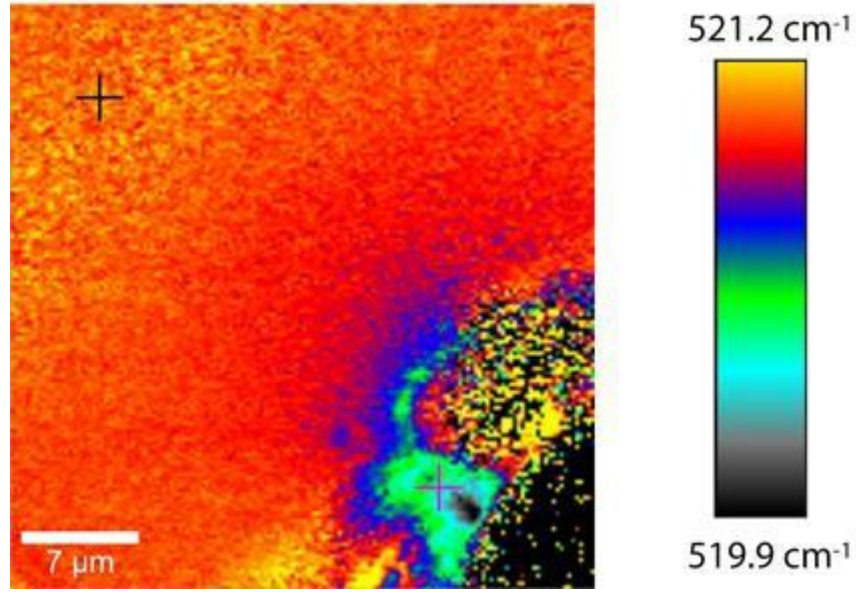
- Alaşım oranı
- Elektronik verimlilik
- Gerginlik/gerilme
- İnce film kalınlığı
- Kristal yapı tipi ve yönü
- Kristal kalitesi
- Numune tekdüzeliği ve saflığı (örn. kusurlar ve kirletici maddeler)

Malzeme kristalliliğini anlamak, monokristal silikondan güneş pillerinin üretimi için kritiktir. Çünkü kristal olmayan silikonun (amorf) varlığı düşük dönüşüm verimliliğine yol açar. Raman spektroskopisi, silikondaki kristalliliği ayırt etmek ve ölçmek için mükemmel bir araçtır. Kristal silisyumda bağ açıları, bağ kuvveti ve bağ enerjisi çok düzgün ve düzenlidir. Sonuç olarak, yüksek kristalli silikon, yaklaşık olarak 520 cm^{-1} 'de ortalanmış gibi çok keskin tepe noktalarına sahiptir (Şekil 3.4). Kristal olmayan silikonda bağ açıları, bağ kuvveti ve bağ enerjisi değişmektedir ve bu da 480 cm^{-1} civarında geniş dağınık spektral özelliklere yol açar (Anonim 13).



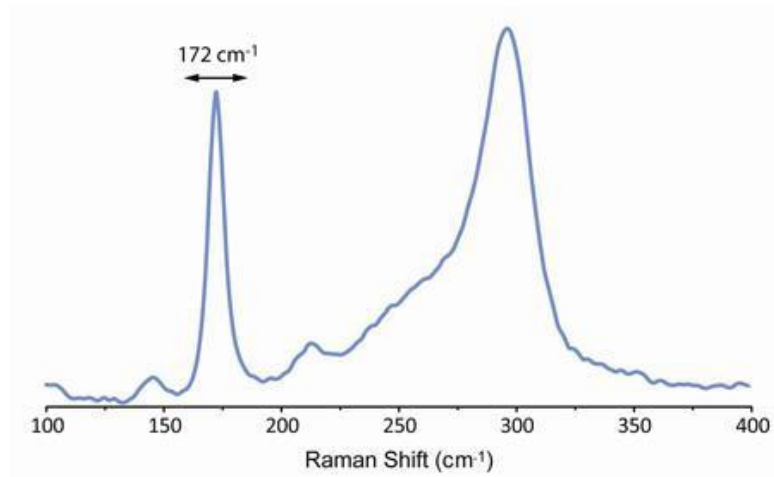
Şekil 3.4. Yüksek kristalli (turuncu) ve kristalli olmayan (yeşil, camgöbeği, kırmızı) materyalin varlığını ortaya koyan bir silikon numunesinin bölgelerinden ölçülen Raman spektrumları (Anonim 1)

Raman spektroskopisi, numune üzerindeki 520 cm^{-1} tepe noktasının spektral konumunu izleyerek silikon bazlı güneş pillerinde doğrudan bir stres (veya gerinim) ölçümü sağlar ve bundan mikrometre altı uzamsal çözünürlükle bir stres haritası oluşturulabilir (Şekil 3.5). Sonuç olarak Raman spektroskopisi, güneş pili işleme hakkında doğrudan bilgi sağlar ve daha az verimli hücrelerin üretimden çıkmasını önler.



Şekil 3.5. Silikon bir levhada lazerle delinmiş bir delikten $\sim 520 \text{ cm}^{-1}$ merkezli Raman tepe noktasının konumunu izleyerek oluşturulan bir stres haritası (Anonim 1)

Güneş pilleri için alternatif ve oldukça araştırılmış malzemeler olan silikon karbür ve bakır indiyum galyum diselenid veya CIGS'dir. Dik kenarlı ve küçük geçiş genişlikli filtreler kullanan yüksek performanslı Raman spektroskopisi, lazer çizgisine silikondan 520 cm^{-1} tepe noktasına göre çok daha yakın olan ($<190 \text{ cm}^{-1}$) düşük enerjili titreşim modlarının tespit edilmesini sağlar. Raman zirvesini 172 cm^{-1} civarında izleyerek indiyum ve galyum konsantrasyonlarını ölçmek ve CIGS filmi boyunca alaşım heterojenlik haritaları oluşturmak mümkündür (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Alternatif güneş malzemelerinin Raman spektroskopisi (Anonim 1)

3.1.1.5. Elipsometri Ölçümleri

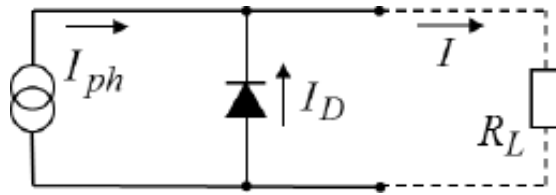
Elipsometri, numunelerden ışık yansımısını (veya iletimini) karakterize eden bir optik ölçüm tekniğidir (Azzam and Bashara, 1977). Elipsometrinin temel özelliği, bir numune üzerinde ışık yansımaları (veya bir numune tarafından ışık iletimi) üzerine polarize ışıktaki değişimi ölçmesidir. 'Elipsometri' adı, polarize ışığın genellikle ışık yansımaları üzerine 'eliptik' hale gelmesi gerçeğinden gelmektedir. Elipsometri iki değeri (ψ, Δ) ölçmektedir. Spektroskopik elipsometride, spektrumlar ışığın dalga boyunu değiştirerek ölçülür. Genel olarak, spektroskopik elipsometri ölçümü ultraviyole/görünür bölgede yapılır, ancak kızılötesi bölgede de ölçüm yaygın olarak yapılmaktadır.

Elipsometri ölçümünde iki genel kısıtlama vardır; (1) numunelerin yüzey pürüzlülüğü oldukça küçük olmalı ve (2) ölçüm eğik gelişte yapılmalıdır. Yüzey pürüzlülüğü ile ışık saçılması yansıyan ışık yoğunluğunu ciddi şekilde azalttığından, elipsometri ışık yoğunluğundan bir polarizasyon durumu belirlediğinden elipsometri ölçümü zorlaşır. Yüzey pürüzlülüğünün boyutu bir ölçüm dalga boyunun $\sim 30\%$ 'unu aşarsa, bu etki tamamen cihazın tipine bağlı olmasına rağmen, ölçüm hataları genellikle artar.

3.1.2. Elektriksel Karakterizasyon

3.1.2.1. Aydınlatma Altında İdeal Güneş Pilinin Diyot Denklemi

Bir güneş pilinin iki temel işlevi, ideal bir güneş pilinin eşdeğer devresindeki iki farklı eleman tarafından ifade edilir (Şekil 3.7). İlk eleman, aydınlatma tarafından yönlendirilen bir akım kaynağıdır, yani fotoakım üretici. İkinci eleman, yük ayırma koşulunu yerine getirmelidir, yani akım elemandan bir yönde geçebilir, ancak diğer yönde geçemez. Bu, ideal bir güneş pilinin eşdeğer devresindeki ikinci eleman olan diyotun karakteristik özelliğidir.



Şekil 3.7. İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresi (“Basic Characteristics and Characterization of Solar Cells,” 2018)

Bir diyot (I_D) boyunca bir akım, diyot denklemi ile tanımlanır (Denklem 3.6).

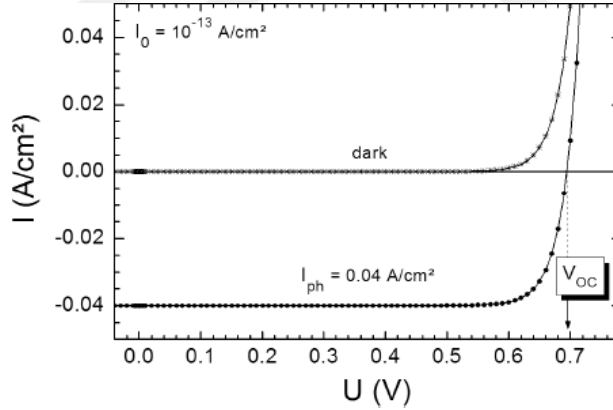
$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot U}{k_B \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

Diyot denklemi, diyot doyma akımı veya diyot doyma akım yoğunluğu (I_0) olarak adlandırılan orantı faktörünü içerir. Diyot doygunluk akımı, soğurucu ve temas malzemeleri ile bunların geometrisine bağlı olarak her bir güneş pilinin kendine özgü bir özelliğidir. Diyot doyma akımı, gerilimin üstel değeri ile çarpılırken gerilim q ile çarpılır ve k_B ve T 'nin çarpımına bölünür. Diyot akımı, artan pozitif voltajla (ileri yön veya ileri ön gerilim) katlanarak artar. Sıfır voltajda, diyot akımı sıfıra eşit olmalıdır. Bu nedenle, diyot denklemindeki üstel uçtan 1 çıkarılmalıdır. Negatif voltajda, diyot akımı çok düşük negatif I_0 'a (ters yön veya ters ön gerilim) düşer.

İdeal bir diyotun direnci ileri yönde son derece düşük ve ters yönde çok büyüktür. Fotoakım R_L 'den akar, yani fotoakım diyot tarafından yolu değiştirilmez. Bu nedenle fotoakım bir ters akımdır ve diyot akımından çıkarılması gerekir. Bu, ideal güneş pilinin diyot denklemiyle sonuçlanır (Denklem 3.7).

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot U}{k_B \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (3.7)$$

Şekil 3.8, karanlıkta ve aydınlatma altında ($I_{ph} = 0.04 \text{ A/cm}^2$) $I_0 = 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ ile ideal bir güneş pilinin I-V özelliklerini göstermektedir.



Şekil 3.8. Karanlıkta (yıldızlar) ve $I_{ph} = 0,04 \text{ A/cm}^2$ 'de (daireler) aydınlatma altında $I_0 = 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ olan ideal bir güneş pilinin akım-voltaj özellikleri (“Basic Characteristics and Characterization of Solar Cells,” 2018).

Denklem (3.8), I_{ph} 'yi I_{sc} 'ye eşitleyerek aydınlatılmış güneş pillerinin I-V özelliklerinin analizi için kullanılır. I_{sc} 'nin tipik değerleri, AM1.5'te onlarca mA/cm^2 mertebesinde. Aydınlatma altındaki güneş pillerinin I - V özellikleri, kolaylık sağlamak için genellikle ilk çeyrekte çizilir. Bu amaçla, negatif akım bir güneş pilinin I-V karakteristiğinde çizilir. Kural olarak, negatif I_{ph} , I_{sc} 'ye karşılık gelir ("Basic Characteristics and Characterization of Solar Cells," 2018).

$$-I = I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot U}{k_B \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{sc} \quad (3.8)$$

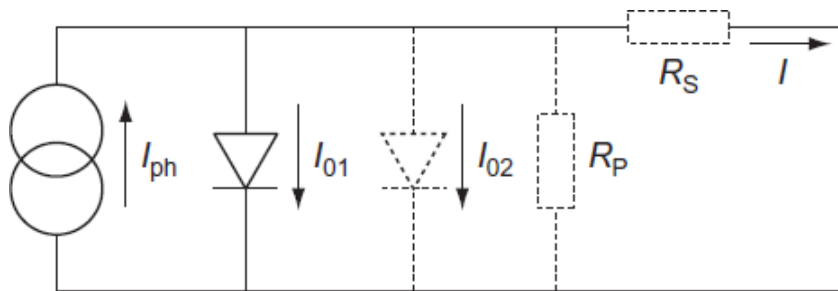
3.1.2.2. Aydınlatma Altında İdeal Olmayan (Gerçek) Güneş Piliin Diyot Denklemi

Uygulamada bir güneş pilinin I-V karakteristiği genellikle ideal karakteristiktan bir dereceye kadar farklılık gösterir. İki diyotlu bir model genellikle gözlemlenen bir eğriye uyması için üstel terim argümanının paydasında 2'lik bir "ideallik faktörü" içeren ikinci bir diyot kullanılır.

Güneş pili (veya devresi), denklem (3.9)'deki formun bir özelliğine yol açan seri (R_s) ve paralel (veya şönt, R_p) dirençler de içerebilir.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{k_B T} \right) \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{2k_B T} \right) - 1 - \frac{V + IR_s}{R_p} \right\} \quad (3.9)$$

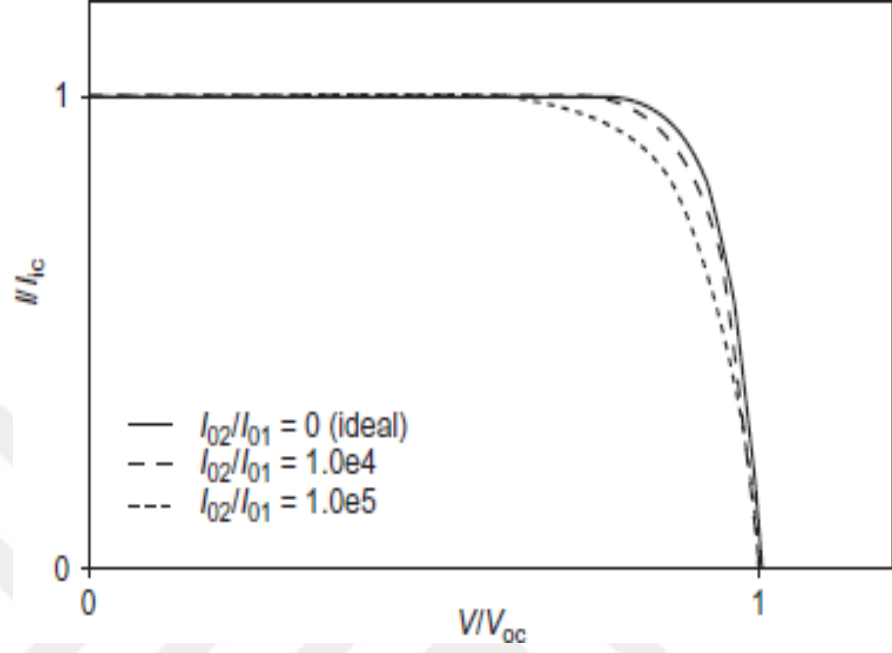
burada I_{ph} ışık tarafından üretilen akımdır. Bazı durumlarda gerilime bağlı olabilir. Bu özellikler, Şekil 3.9'daki eşdeğer devrede noktalı çizgilerle gösterilmiştir.



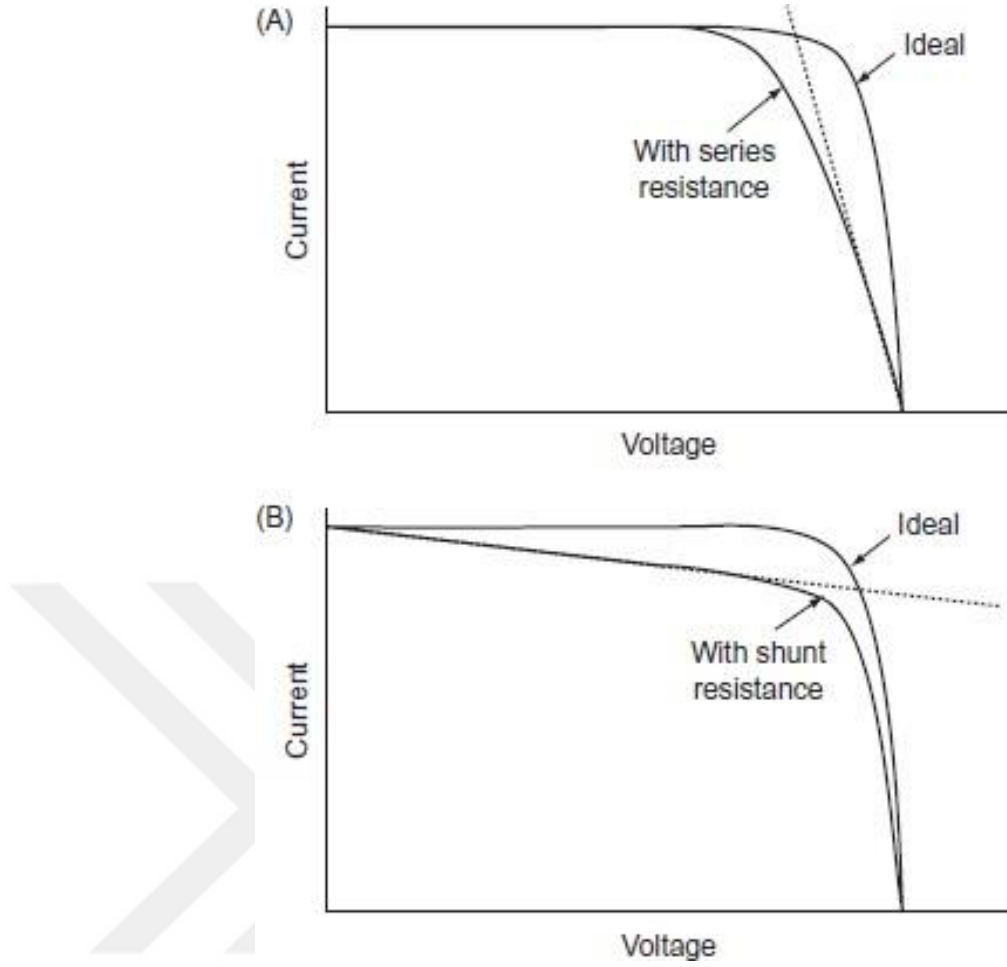
Şekil 3.9. İdeal bir güneş pilinin eşdeğer devresi (dolu çizgiler). İdeal olmayan güneş pili eşdeğer devresi bileşenleri noktalı çizgi ile gösterilmiştir ("Principles of Solar Cell Operation - ScienceDirect," 2012).

İkinci diyotun, seri ve paralel dirençlerin güneş pilinin IV karakteristiği üzerindeki etkisi sırasıyla Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilmektedir; bu parametreler hakkında daha

fazla bilgi karanlık karakteristiktan elde edilebilir (“Principles of Solar Cell Operation - ScienceDirect,” 2012).



Şekil 3.10. I_{02}/I_{01} oranının üç değeri için iki diyotlu modelde güneş pilinin IV karakteristiği (“Principles of Solar Cell Operation - ScienceDirect,” 2012).

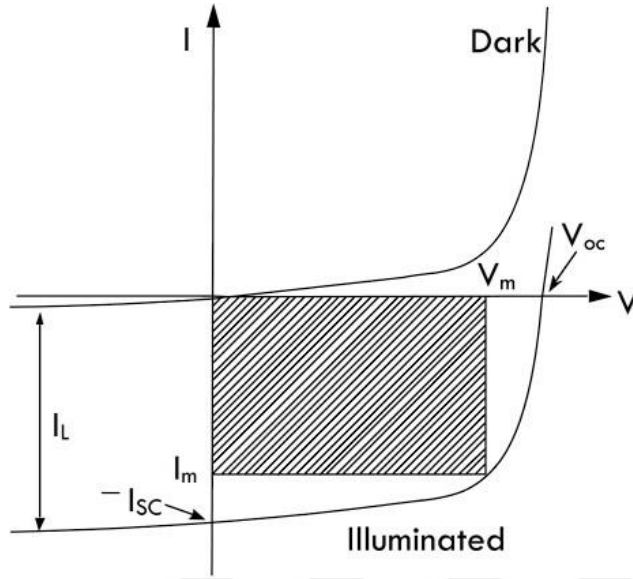


Şekil 3.11. Seri (A) ve paralel (B) direnci güneş pilinin IV karakteristiğine etkisi (“Principles of Solar Cell Operation - ScienceDirect,” 2012).

3.1.2.3. Aydınlatma Altında Akım-Voltaj Karakteristiği ve Güneş Pili Parametreleri

Güneş pillerinin temel özelliklerinin belirlenmesi akım-gerilim özelliklerinin incelenmesiyle elde edilir (Şekil 3.12). Bir fotovoltaiik dizinin elektriksel özellikleri, çıkış akımı ve gerilim arasındaki ilişkiyle özetlenir.

Güneş ışınlarının (güneş ışınımı) miktarı ve yoğunluğu, çıkış akımının (I) miktarını kontrol eder ve güneş pillerinin çalışma sıcaklığı, PV dizisinin çıkış voltajını (V) etkiler.



Şekil 3.12. Güneş pilinin aydınlık ve karanlık akım-gerilim özellikleri ve güneş pilinin verimini belirleyen parametreler (Goetzberger et al., 2014)(“Principles of Solar Cell Operation - ScienceDirect,” 2012)

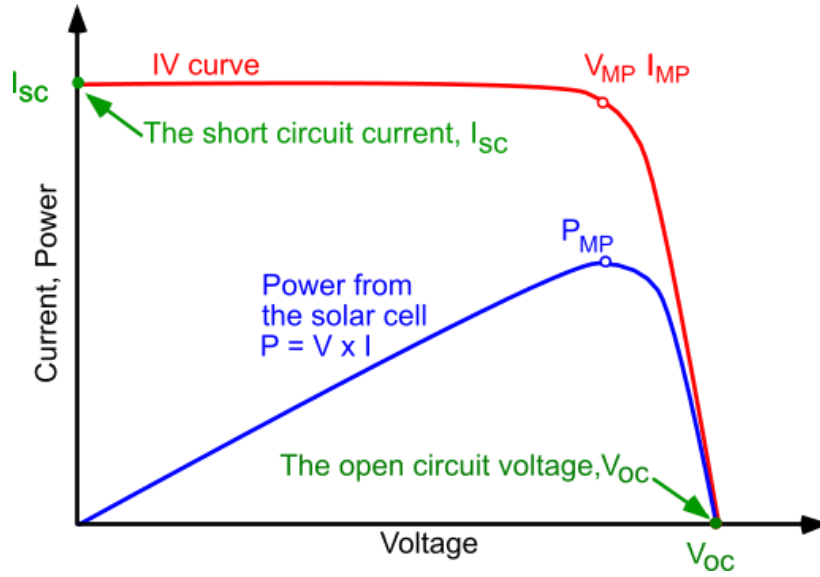
Akım-gerilim karakteristiği, bir elektrik yük regülatörü kullanılarak güneş pilinden gelen akımın sıfırdan kısa devre akımına kadar nokta nokta izlenmesiyle ölçülür. Ölçülen akım ve gerilim verilerinden bilgisayar şunları hesaplar:

- Açık devre gerilimi (the open circuit voltage) V_{oc} ,
- Kısa devre akımı (the short circuit current) I_{sc} ,
- Maksimum güç noktasında akım (current) I_m ve voltaj (voltage) V_m ,
- Doldurma faktörü (the fill factor) FF,
- Verimlilik (the efficiency) η .

Böylece, hücrenin kalitesinin değerlendirilmesi için gerekli olan ve kullanıcının ihtiyaç duyduğu tüm hücre parametreleri mevcuttur. Gerçek analiz, güneş pili parametrelerinden sorumlu olan fiziksel değişkenlerin belirlenmesi ile başlar. Bunlar şunlara bağlıdır:

- Emitör ve tabandaki karanlık akımlar veya doyumluk akımları,
- Yük taşıyıcıların difüzyon uzunlukları,
- Ön ve arka yüzeydeki yüzey rekombinasyon hızları ve
- Seri ve paralel dirençler.

Ayrıca kontaklar, yüzey yansımaları ve uzun absorbe edilmeyen dalga boyu radyasyonu da belirlenmelidir (Goetzberger vd., 2014).



Şekil 3.13. Akım-Voltaj karakteristiği (Lindholm vd., 1979)

3.1.2.3.1. Açık devre gerilimi (V_{oc})

Açık devre voltajı V_{oc} , bir güneş pilinden elde edilebilen maksimum voltajdır ve bu akım sıfır olduğunda gerçekleşir. Açık devre voltajı, güneş pili bağlantısının ışıkla üretilen akımla bias nedeniyle güneş pili üzerindeki ileri yönlü bias miktarına karşılık gelir. Güneş pili denkleminde net akımı sıfıra eşitleyerek V_{oc} için bir denklem bulunur:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklem, V_{oc} 'un güneş pilinin doyma akımına ve ışık tarafından üretilen akıma bağlı olduğunu göstermektedir. Doyma akımı I_0 , güneş pilindeki rekombinasyona bağlıdır. Açık devre voltajı, cihazdaki rekombinasyon miktarının bir ölçüsüdür.

Yüksek kaliteli tek kristal malzeme üzerindeki silikon güneş pilleri, standart koşullarda 730 mV'a kadar açık devre gerilimlerine sahipken, çok kristalli silikon üzerindeki ticari cihazlar tipik olarak 600 mV civarında açık devre gerilimlerine sahiptir. V_{oc} ayrıca taşıyıcı konsantrasyonundan da belirlenebilir:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(N_A + \Delta n) \Delta n}{n_i^2} \right] \quad (3.11)$$

burada kT/q termal voltajdır, N_A doping konsantrasyonudur, Δn fazlalık taşıyıcı konsantrasyonudur ve n_i esas taşıyıcı konsantrasyonudur (Anonim 7).

3.1.2.3.2. Kısa devre akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı, güneş pili üzerindeki voltaj sıfır olduğunda (yani, güneş pili kısa devre olduğunda) güneş pilinden geçen akımdır (Şekil 3.13). Kısa devre akımı, ışıkla üretilen taşıyıcıların üretilmesi ve toplanmasından kaynaklanır. İdeal bir güneş pili için kısa devre akımı ve üretilen ışık akımı aynıdır. Bu nedenle kısa devre akımı, güneş pilinden çekilebilecek en büyük akımdır (Anonim 7).

Kısa devre akımı bir dizi faktöre bağlıdır:

- güneş pilinin alanı
- foton sayısı
- gelen ışığın spektrumu.
- optik özellikler
- toplama olasılığı

Aynı malzeme tipindeki güneş pillerini karşılaştırırken, en kritik malzeme parametresi difüzyon uzunluğu ve yüzey pasivasyonudur. Mükemmel şekilde pasifleştirilmiş yüzeye ve tekdüze üretime sahip bir hücrede, kısa devre akımının denklemi şu şekilde tahmin edilebilir:

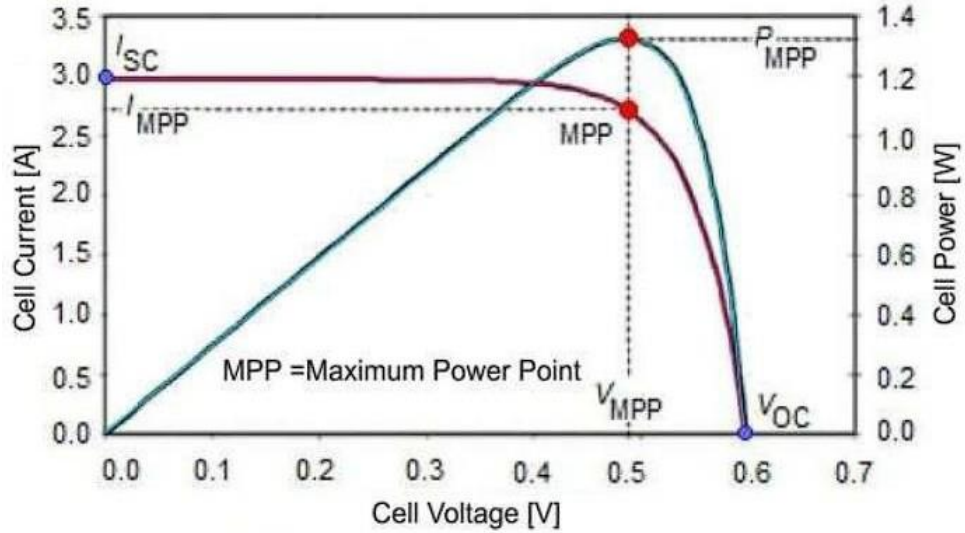
$$J_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (3.12)$$

burada G , üretim hızıdır ve L_n ve L_p , sırasıyla elektron ve delik difüzyon uzunluklarıdır. Güneş pili alanına bağımlılığı ortadan kaldırmak için, kısa devre akımı yerine mA/cm^2 birimlerinde kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} kullanılmaktadır.

3.1.2.3.3. Maksimum güç noktası (MPP)

Maksimum Güç Noktası (MPP), güneş pillerinin karakteristik bir değeridir. Bir güneş pilinin maksimum gücünü sağladığı çalışma noktasıdır. Teorik olarak güç, güneş pilinin kısa devre akımı ve açık devre voltajından kaynaklanır ve MPP değerinden büyüktür.

$$P_{mpp} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (3.13)$$



Şekil 3.14. Maksimum güç noktası karakteristiği (Ramos Hernanz vd., 2013)

Bir güneş pilinin gücü, güneş ışınımına ve hücre sıcaklığına bağlı olan çıkış voltajına bağlı olduğundan, maksimum güç noktasının konumu ışınım ve sıcaklıkla sürekli olarak değişir. Güneş pilinin aşağı akışına bağlı inverter veya şebeke besleme cihazı veya alternatif olarak Micro Inverter sürekli olarak P_{MPP} değerini belirler ve yük direncini değiştirerek güneş modülünün çalışma noktasını düzenler. Modül Düzeyinde Güç Yönetiminin (MLPM) bu işlevine Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) adı verilir.

3.1.2.3.4. Doldurma faktörü (FF)

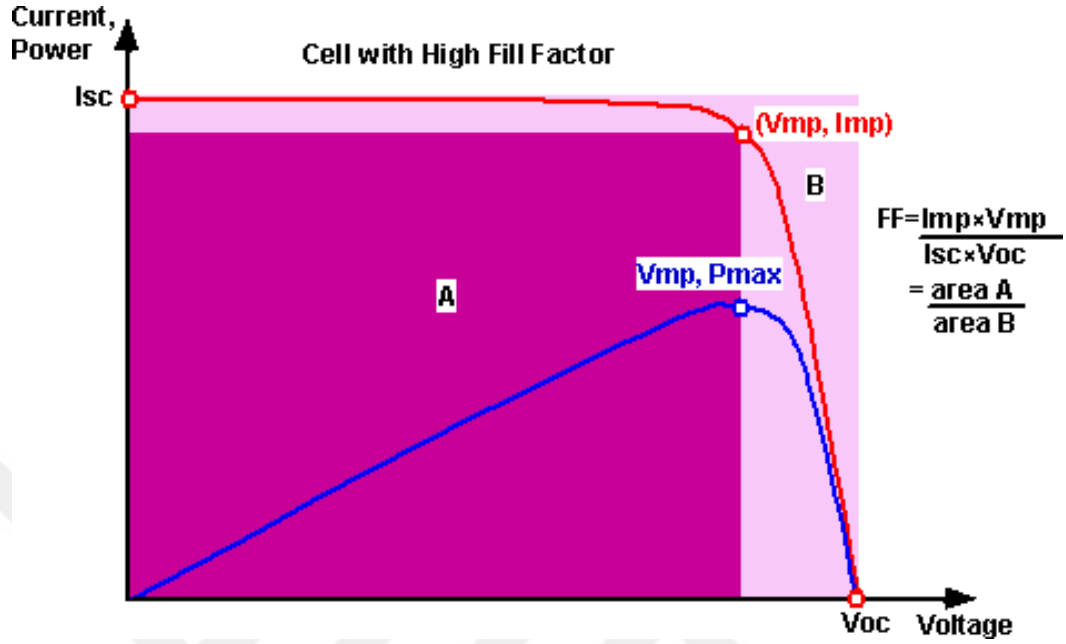
Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi, sırasıyla bir güneş pilinden gelen maksimum akım ve gerilimdir. Ancak her iki çalışma noktasında da güneş pilinden gelen güç sıfırdır. Daha yaygın olarak "FF" kısaltmasıyla bilinen "doldurma faktörü", V_{oc} ve I_{sc} ile birlikte bir güneş pilinden maksimum gücü belirleyen bir parametredir. FF, güneş pilinden gelen maksimum gücün V_{oc} ve I_{sc} ürününe oranı olarak tanımlanır, böylece:

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.14)$$

Grafiksel olarak FF, güneş pilinin "kareliğinin" bir ölçüsüdür ve aynı zamanda IV eğrisine sığacak en büyük dikdörtgenin alanıdır (Şekil 3.15).

Daha yüksek voltaj, daha yüksek bir olası FF ile sonuçlanacaktır. Mükemmel bir hücre için FF 1'e eşittir. Ancak parazit direnci FF'yi pratikte $0.7 < FF < 0.95$ değerleri

arasına düşürür. En küçük seri direnç (R_s) ve en büyük şönt direnci (R_{sh}) için maksimum FF görülebilir ve iyi güneş pilleri için değeri 0,7'den yüksektir (Green, 1981).



Şekil 3.15. Voltajın bir fonksiyonu olarak hücre çıkış akımı (kırmızı çizgi) ve gücün (mavi çizgi) grafiği (Green, 1981).

3.1.2.3.5. Verimlilik (η)

Verimlilik, bir güneş pilinin performansını bir başkasıyla karşılaştırmak için en sık kullanılan parametredir. Verimlilik, güneş pilinden çıkan enerjinin güneşten gelen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Verimlilik, güneş pilinin kendi performansını yansıtmamasının yanı sıra gelen güneş ışığının spektrumuna ve yoğunluğuna ve güneş pilinin sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle, bir cihazın performansını diğeriyle karşılaştırmak için verimliliğin ölçüldüğü koşullar dikkatle kontrol edilmelidir. Karasal güneş pilleri, AM1.5 koşulları altında ve 25°C sıcaklıkta ölçülür. Alan kullanımına yönelik güneş pilleri, AM0 koşulları altında ölçülür.

Bir güneş pilinin verimliliği, gelen gücün elektriğe dönüştürülen kısmı olarak belirlenir ve şu şekilde tanımlanır (Anonim 7), (Anonim 19):

$$P_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (3.15)$$

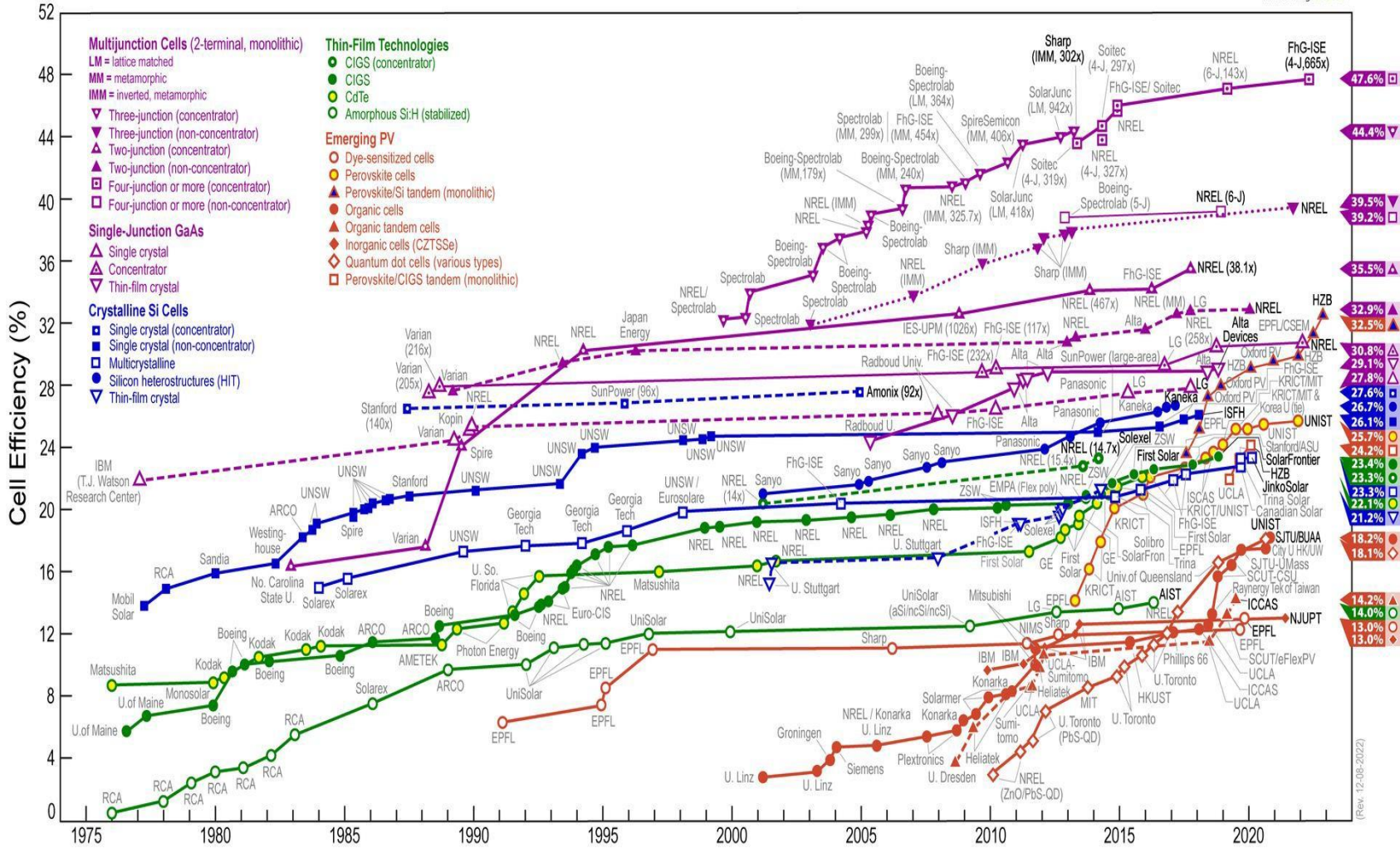
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (3.16)$$

Bir fotovoltaik sistemde kullanılan güneş hücrelerinin verimliliği, enlem ve iklim ile birlikte, sistemin yıllık enerji çıktısını belirler. Örneğin, % 20 verimliliğe ve 1 m^2 alana sahip bir güneş paneli, 1000 W/m^2 Standart Test Koşulu altında günde 2,74 saat güneş ışınlamına maruz kalırsa, Standart Test Koşullarında 200 kWh/yıl enerji üretecektir. Genellikle güneş panelleri belirli bir günde bundan daha uzun süre güneş ışığına maruz kalır, ancak güneş ışınlamı günün büyük bir kısmında 1000 W/m^2 'den azdır. Bir güneş paneli, güneş gökyüzünde yüksekte olduğunda ışık daha dik açıyla ulaştığı için daha fazla enerji üretebilirken, bulutlu havalarda veya güneş gökyüzünde ufuk çizgilerine yakinken daha az enerji üretir.

PV hücrelerinin verimliliğini artırmanın yolları vardır ve bunların tümü daha yüksek bir maliyetle birlikte gelir. Bunun bir yolu, yarı iletken safsızlıkların ve kristal yapı deformasyonlarının sayısını azaltmaktır. Bu "tek kristalli" hücrelerin üretilmesiyle elde edilebilir. Daha saf ve tek biçimli bir hücrenin gelen fotonlarla etkileşime girme şansı daha yüksektir. Başka bir yöntem, Galyum Arsenit gibi daha verimli bir yarı iletken malzeme kullanmaktır. Silikondan çok daha nadir ve pahalı olmasına rağmen, galyum arsenitin optimal bant aralığı $1,4 \text{ eV}$ olup Güneş enerjisinin daha yüksek bir yüzdesinin kullanılmasına olanak tanır.

Hücre verimliliğini artırmak için p-n bağlantıları adı verilen çok sayıda yarı iletken malzeme katmanı da kullanılabilir. Bu çok bağlantılı hücreler, her bir bağlantı noktası farklı bir bant aralığı enerjisine sahip olduğundan, güneş spektrumunun birden çok bölümünden gelen enerjiyi kullanır (Anonim 20).

Best Research-Cell Efficiencies

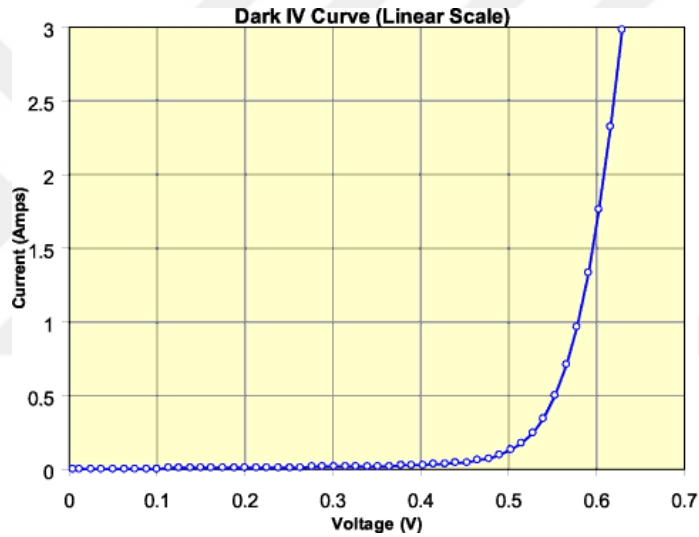


Şekil 3.16. 1976'dan beri güneş pili enerji dönüşüm verimlilik araştırmalarının rapor edilen zaman çizelgesi ("Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart," n.d.)

3.1.2.4. Karanlıkta (Dark) Akım-Voltaj Karakteristiği

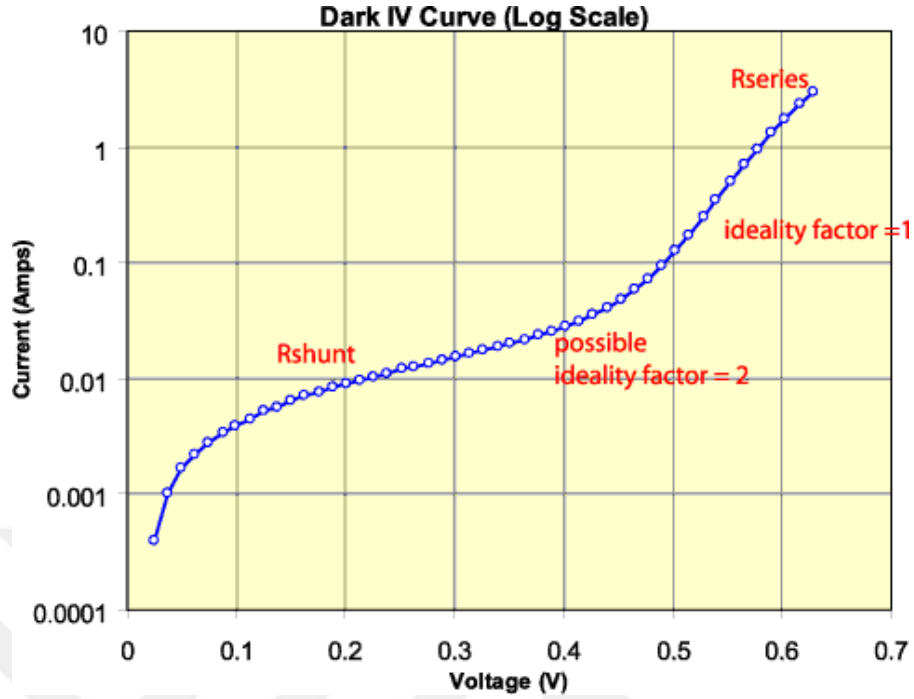
Güneş pilleri ışığı elektriğe çevirdiğinden, fotovoltaiik pilleri karanlıkta ölçmek garip gelebilir. Bununla birlikte, diyot özelliklerinin incelenmesinde karanlık IV ölçümleri çok değerlidir. Aydınlatma altında, ışık yoğunluğundaki küçük dalgalanmalar sisteme önemli ölçüde gürültü ekleyerek yeniden üretmeyi zorlaştırır.

Dark IV ölçümleri, ışıkla üretilen taşıyıcılar yerine elektrik araçlarıyla devreye taşıyıcılar enjekte eder. Çoğu durumda ikisi eşdeğerdir ve Dark IV ölçümleri, teşhis amacıyla hücre hakkında ek bilgi verir. Gürültü olmadığında bile aydınlatılmış ve karanlık IV eğrilerinin karşılaştırılmasında zengin bir bilgi vardır. Karanlıkta bir güneş pili büyük bir düz diyottur. Basit bir karanlık IV ölçümü, bir diyotun karakteristik özelliği olan üstel eğriyi üretir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Lineer ölçekli dark IV eğrisi (Zhao vd., 1991).

Akıma karşı voltajın doğrusal grafiği, diyot hakkında çok az bilgi verir, semilog grafiğinden çok daha fazla bilgi ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.18) (Zhao vd., 1991).



Şekil 3.18. Yukarıdaki aynı IV eğrisinin semilog grafiği, diyot hakkında çok daha fazla bilgi ortaya koyuyor. IV eğrisinin farklı bölgelerine farklı kayıp mekanizmaları hakimdir (Zhao vd., 1991).

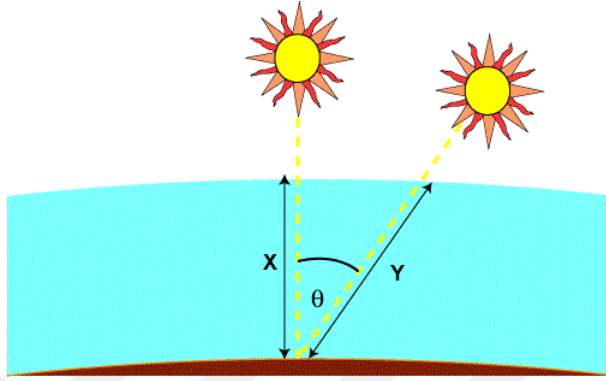
3.1.2.5. Solar Simülatörler (4" ve 6" aydınlatma)

Doğal olmayan ışık ve doğal güneş ışığı arasındaki temel fark, spektral bileşen ve yoğunluktur. Bu sorun, güneş ışığının doğal spektrumunu elde etmek için ksenon lambanın filtreler yardımıyla değiştirilmesiyle aşılabilmektedir (Novičkovas et al., 2015). NASA ve ERDA tarafından yapılan çalışmalar, PV panellerin karasal uygulaması için test kriterleri oluşturmuştur. Güneş simülatörlerinin kapsamlı bir tanımı ve karasal PV ölçümü için standart prosedürler, 1975 ve 1977'deki çalışmalardan sonra yayınlanmıştır (Wang and Laumert, 2014). Bu araştırmada, standart test koşulu olarak radyasyon değeri 1000 W/m^2 , spektral bileşen AM 1.5, atmosfer sıcaklığı 25°C seçilmiştir, ancak ticari güneş simülatörleri ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) standartlarına uygundur (Villalva vd., 2009), (Meng vd., 2012).

Dünya yüzeyine gelen güneş enerjisinin miktarı boylam, enlem, gündüz ve yıla bağlıdır. Hava Kütlesi, ışığın mümkün olan en kısa yol uzunluğuna (yani, güneş doğrudan tepedeyken) normalize edilmiş atmosfer boyunca aldığı yol uzunluğudur. Hava Kütlesi, atmosferden geçerken ve hava ve toz tarafından emilirken ışığın gücündeki azalmayı ölçer. Hava kütlesi şu şekilde tanımlanır:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.17)$$

burada θ , güneş tam tepede olduğunda yüzey normali ile arasındaki açıdır (zenit açısı). Güneş tam tepedeyken Hava kütlesi 1'dir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Hava kütlesi, ışığın Dünya'ya çarpmadan önce geçmesi gereken atmosferin hava yol uzunluğuna göre oranını temsil eder ve Y/X'e eşittir (Anonim 2)

Bir güneş simülatörü, doğal güneş ışığına yakın bir aydınlatma sağlayan bir cihazdır. Solar simülatörün amacı, laboratuvar koşullarında kontrol edilebilir bir iç mekân test olanağı sağlamaktır. Güneş spektrumu genellikle üç bölüme ayrılır: UV (ultraviyole), görünür ve IR (kızılötesi) ve karşılık gelen dalga boyu aralığı sırasıyla <400nm, 400-760nm ve >760nm (Farage vd., 2010).

3.1.2.6. Yaşam Süresi (Ömür) Testi

Ömür, bir güneş pilinin verimliliğinin bir göstergesidir ve bu nedenle güneş pilleri için malzeme seçiminde önemli bir husustur. PV modüllerinin ömrü, sıcaklık, nem, UV ışığı ve sistem voltajı gibi birkaç önemli alan stresinin bir fonksiyonudur. Hızlanma faktörü, saha (veya kullanım) testindeki süre ile hızlandırılmış testteki süre arasındaki orandır. PV modülleri için hızlandırılmış testlerin amacı, gerçek saha çalışma koşullarından çok daha şiddetli simüle edilmiş test koşulları kullanarak ancak gerçek alan arıza mekanizmalarını değiştirmeden test süresini kısaltmaktır.

AT (Accelerated Test) programlarında, PV modüllerinin stres testleri, alan/kullanım stres seviyelerinden daha yüksek seviyelerde, malzeme ve modüllerin güvenilirlik, dayanıklılık ve güvenlik perspektiflerinden ön ve son karakterizasyonu ile gerçekleştirilir.

Arıza süresi (Time-To-Failure - TTF) dahil olmak üzere bir ürünün yaşam özellikleri, geleneksel olarak gerçek bozulma alanı verileri kullanılarak elde edilir. PV

modülleri söz konusu olduğunda, kullanım ömrünün sonu (örneğin, nominal güçten %20'lik düşüşe kadar geçen süre), yıllık alan bozulma oranına (örneğin, yılda %0,8 P_{max} düşüşü) dayalı basit bir doğrusal ekstrapolasyon kullanılarak tahmin edilebilir. Ancak üreticiler ve diğer paydaşlar, sahadaki bozulma verilerini elde etmek için yeterince beklemekte zorlanacaklar. Bu zorluğun nedenleri arasında, çok küçük yıllık bozulma oranı ve tasarım ile sürüm arasındaki kısa süre sayılabilir. AT'de ürün, kullanım koşullarında olduğundan daha hızlı arızalanmaya zorlanır.

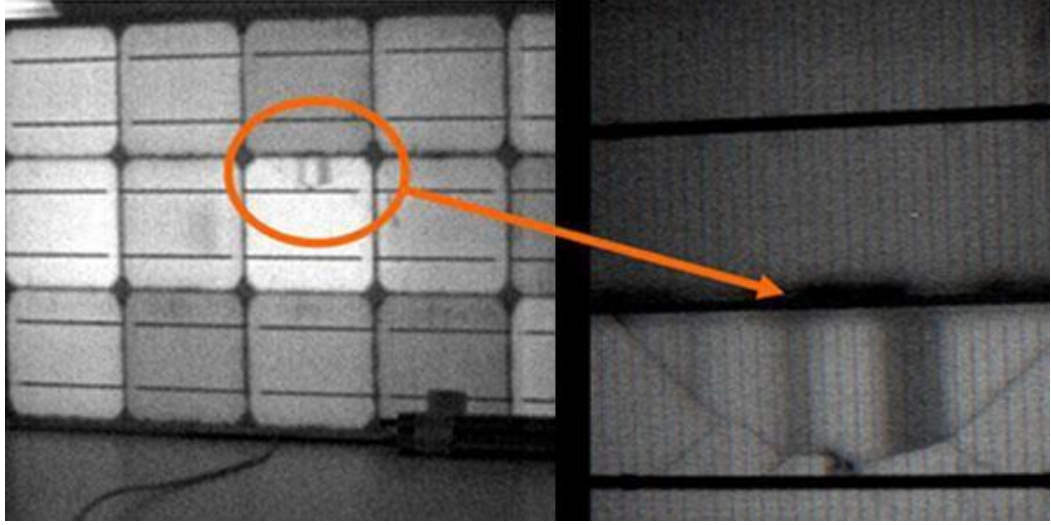
Bir AT programının tek amacı, test edilen ürünün yaşam özelliklerini elde etmektir. Herhangi bir AT'de genel yaklaşım, normalde sahada meydana gelebilecek arızaları indüklemek için kısa bir süre boyunca gerçek kullanım koşullarından daha yüksek stres seviyeleri uygulamaktır. AT, hem sert arızaları (güvenilirlik) hem de yumuşak kayıpları (dayanıklılık veya bozulma) sağlamak için kullanılabilir (Anonim 4).

3.1.2.7. Elektrolüminesans (EL) Testi

Akım PV hücrelerden geçtiğinde ışık emisyonu meydana gelir. Bu fenomene Elektrolüminesans denir. Elektrolüminesans testi, tipik olarak fotovoltaiik hücrenin davranışını doğrulamak ve bütünlüğünü niteliksel olarak kontrol etmek için kullanılan bir testtir. Fotovoltaiik hücreyi doğrudan polarize bir diyot olarak çalıştırarak çalışır. Bu fenomeni kullanan modüllerin test edilmesi, PV hücrelerinin yapısındaki gizli kusurları tespit edebilir. Bu yöntem, akım dağılımını PV modülünde görünür kılar ve kusurların tespit edilmesine yardımcı olur. Bir EL testinin yardımıyla, bir PV üreticisi, PV hücrelerinin yapısal kalitesini veya kullanım sırasında oluşan diğer kusurları değerlendirebilir. EL'den bulunabilecek kusurlar aşağıda verilmiştir (Anonim 6):

- Mikro çatlaklar
- Hücre çatlakları
- Lehimleme kusurları
- PID kusurları
- Diyot arızası
- Ölü hücre
- Arka tabaka çizikleri
- Yonga kusurları

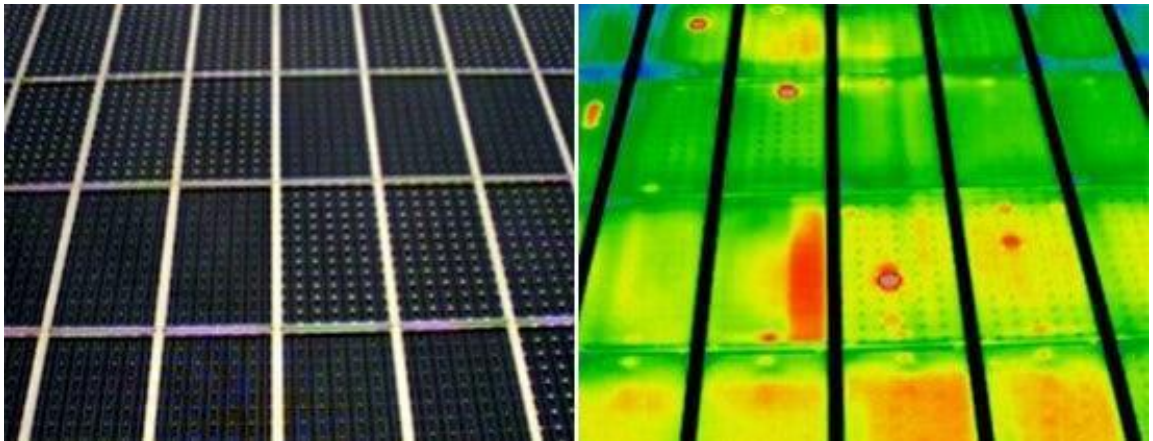
Elektrolüminesans tekniğine dayalı testler yapmak için, bu amaç için özel olarak bir kara kutu yapılmıştır. Karanlık bir ortamın gerekliliği, test edilen fotovoltaiik hücrelerin ışık emisyonunun görünür spektrumda ancak düşük yoğunlukta gerçekleşmesi gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, test sonuçlarını doğru bir şekilde gözlemlemek ve değerlendirmek için karanlık bir ortama ihtiyaç vardır (Fontani vd., 2018).



Şekil 3.20. EL görüntüsü (Anonim 11)

3.1.2.8. Termal Görüntüleme

Termal görüntüleme, nesnenin kızılötesi görüntüsünü üretmek için Termografik kamera kullanır. Görünür ışık kullanarak bir nesnenin görüntüsünü oluşturan sıradan yaygın kameraya benzer. Görünür ışık kamerasının 400-700 nanometre aralığı yerine, kızılötesi kameralar 14.000 nm (14 μ m) kadar uzun dalga boylarında çalışır. Tüm canlılardan, nesnelerden ve malzemelerden bir miktar termal enerji yayılır. Kızılötesi teknoloji, bu enerjiyi yakalamak ve onu görüntü olarak algılanabilen bir termo gram biçiminde temsil etmek için yaygın olarak kullanılabilir. Ayrıca Termal görüntülemenin özelliklerinden biri de duman, hafif sis, kar, yağmur ve aşırı karanlık gibi ortamlara başarıyla nüfuz edebilmesidir.



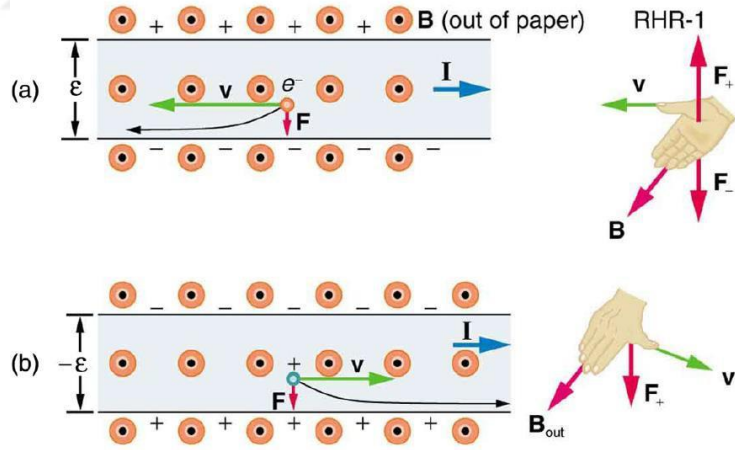
Şekil 3.21. Güneş panelinde termal görüntüleme (Department of Electrical Engineering, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino Km. 6, Gowa 92171, Indonesia vd., 2019)

Çizik, çatlak, hasar, nem, kırık hücre, kuş pisliği ve bazı üretim hatalarından oluşan sebeplerle sıcak noktaların oluşmasına Hot spot denir. Hot spot ısınması, hücrenin elektrik enerjisi üretmek yerine negatif olarak kutuplanıp dağıtılan enerjinin ısı olarak açığa çıkması durumunda ortaya çıkmaktadır.

IR termografinin, özellikle sıcak hücrelerin varlığını, hücreler üzerindeki sıcak noktaları ve daha soğuk kabarcıklar biçimindeki optik bozulmayı (delaminasyon) ortaya çıkaran, meydana gelen ve yayılan kusurların teşhisi için etkili ve güvenilir bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Gallardo-Saavedra vd, 2019). Farklı arızaları sınıflandırmak, karakterize etmek ve analiz etmek, davranışlarını ve çıktı üretimi üzerindeki etkilerini ve ayrıca bakım görevlerinin programlanması için amaçlanmaktadır (Gallardo-Saavedra vd., 2019).

3.1.2.9. Hall Efeki Ölçümleri

Hall etkisi ile p ve n tipi yarı iletkenleri ayırt etmek mümkündür. Bir elektrik akımı bir manyetik alanda bir iletkenin akıyorsa, manyetik alan hareketli yük taşıyıcılarına onları iletkenin bir tarafına itme eğiliminde olan enine bir kuvvet uygular. Bu, gösterildiği gibi ince bir düz iletkenin en belirgindir. İletkenlerin kenarlarında oluşan bir yük iletkenin iki tarafı arasında Hall gerilimi adı verilen ölçülebilir bir gerilim üretecektir. Bu Hall voltajının varlığına **Hall etkisi** denir.



Şekil 3.22. Hall efekti çalışma prensibi (Anonim 18)

Yukarıdaki deneyde (Şekil 3.22) mıknatısı (B'nin kaynağı) hareket ettirirsek, Hall voltajı değişecektir. Mıknatısın konumunu algılamak ve dolayısıyla mıknatıs içeren herhangi bir hareketli nesnenin konumunu algılamak için kullanılabilir. Konum verilerini kullanarak, örneğin motorlarda hız, frekans ve dönüş hızı tespit edilebilir. Hall etkisi sensörlerinin bilgisayarlarda (örn. güvenilir klavye anahtarları, yani klavyenizdeki bir düğmeye basıp

basmadığınızı algılama) ve arabalarda (yakıt seviyesi göstergeleri olarak) birçok uygulaması vardır.

Hall efekti ölçümlerinde doğru sonuçların elde edilmesi için numunelerin iyi tanımlanmış geometrilere ve iyi omik kontaklara sahip olması gerekir. Numuneler vdP (Van der Pauw) geometrisine sahip olmalıdır.

3.1.2.10. Levha Direnci (Sheet Resistance) Ölçümleri

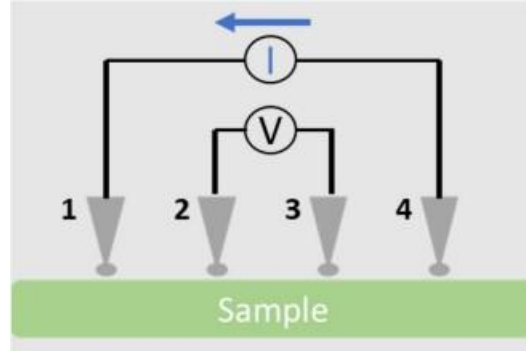
Kritik bir elektriksel özellik olan levha direnci (R_s), yarı iletken ve iletken malzemelerin filmlerini karakterize etmek için kullanılmaktadır. Tek tip kalınlığa sahip bir filmin kare alanı başına yanal direncin bir ölçüsüdür ve elektrik yükünün film düzleminde hareket etme yeteneğini ölçmektedir. Levha direncini ölçmek için standart teknik, dört noktalı probdur; bununla birlikte, film ile fiziksel temas gerektirmektedir ve nispeten yavaştır. Bu nedenle, bir üretim hattında hat içi proses kontrolü için uygun değildir (Naftaly vd., 2021).

3.1.2.10.1. Dört Noktalı Prob (Four-Point Probe)

“Dört noktalı prob” (4pp) yöntemi, ince filmlerin levha direncini (R_s) ölçmek için en yaygın ve en basit tekniktir (Miccoli et al., 2015). Tipik bir dört noktalı prob aleti (Şekil 3.23), karakterize edilecek malzeme ile elektriksel temas kurmak için kullanılan, eşit aralıklı dört ortak doğrusal proba sahiptir. R_s 'yi hesaplamak için, iki iç prob boyunca bir voltaj indükleyen dış problardan bir DC akımı uygulanır. Bu voltaj düşüşünü ölçerek, levha direnci denklem (3.18) (Smits, 1958) kullanılarak hesaplanabilir:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{\Delta V}{I} = 4.53236 \frac{\Delta V}{I} \quad (3.18)$$

burada R_s levha direncidir (Ω/square olarak ifade edilir), ΔV iç proplar boyunca ölçülen voltaj düşüşü ve I dış problara uygulanan akımdır.



Şekil 3.23. Dört noktalı bir prob aracının şematik çizimi (Naftaly vd., 2021)

Denklem (3.18)'deki $\pi/\ln(2)$ faktörüne ek olarak, numuneden geçen mevcut yolların sınırlandırılmasını ve problemlerin konumunu açıklayan bir geometrik düzeltme faktörü gereklidir ve bu faktör numune boyutuna, şekline ve kalınlığına dayanmaktadır. Ölçülen malzemenin kalınlığı biliniyorsa, aşağıdaki denklem (3.19) kullanılarak direncini hesaplamak için levha direnci kullanılabilir:

$$R_s = \frac{\rho}{t_f} \quad (3.19)$$

burada, ρ öz direnç ve t_f film kalınlığıdır.

Levha direncini ölçmek için Microwave Resonator (Mikrodalga Rezonatör) ve Terahertz Time-Domain Spectroscopy (Terahertz Zaman Alanı Spektroskopisi) yöntemleri de bulunmaktadır. Fakat en çok tercih edilen yöntem Four-Point Probe (Dört Noktalı Prob) yöntemidir (Naftaly vd., 2021).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Farklı Yapılardaki Güneş Pillerinin Karşılaştırılması

Tablo 4.1’de farklı güneş pili teknolojilerine ait genel bir bakış göstermektedir (Heinrich, 2020). C-Si, kalkojenit ve III-V gibi teknolojiler zaten iyi kurulmuş ve bu alanda güvenilirlik göstermiş olsada, perovskit hücreler ve perovskit tandem hücreler gibi daha yeni teknolojiler henüz piyasada değil ve uzun vadeli deneyimler sınırlı ve yetersizdir. Bu nedenle, maliyet ve uzun vadeli istikrar gibi belirli kriterlerin yerleşik teknolojiler için zaten kanıtlanmış olması, yeni teknolojilerin ise hala sahada performans göstermesi gerektiğinden, karşılaştırmanın çok dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Burada her bir karşılaştırma 3 kriter grubu (LCOE, Tasarım, Gelecek potansiyeli) dikkate alınarak genel bir karşılaştırma yapılmaktadır.

Karşılaştırma kriterleri şu şekilde kategorize edilmiştir: seviyelendirilmiş elektrik maliyetini (LCOE-the levelized cost of electricity) etkileyen kriterler, her teknolojinin yaratıcı hareket alanına genel bir bakış sağlayan tasarım kriterleri ve gelişme perspektifinin yanı sıra pazar büyüklüğü ve araştırma ilgisiyle tanımlanan gelecekteki potansiyel.

Verimlilik: III-V güneş pilleri araştırmada ve endüstride en yüksek verimliliği göstermektedir [68]. Perovskite-(Si)tandem konseptleri aynı zamanda çok yüksek verimlilik sağlama potansiyelini de göstermektedir. Organik güneş pilleri ise oldukça güçlü bir potansiyele sahip ancak mevcut diğer teknolojilerle benzer verimlilik sağlayan bir malzeme kombinasyonunun bulunup bulunamayacağı henüz bilinmemektedir.

Maaliyet: C-Si ve kalkojenit güneş pillerinin maliyeti en düşük seviyededir ve potansiyel olarak bunu organik güneş pilleri takip etmektedir.

Boyut değişkenliği: Yonga bazlı güneş pili türleri (c-Si, III-V, perovskit tandem hücreler), sağlanan standart hücre boyutundan (III-V için en küçük olan) dolayı içsel bir dezavantaja sahiptir. İnce film bazlı teknolojiler prensipte herhangi bir boyutu kolayca sağlayabilmektedir, ancak pratik nedenler (biriktirme odaları) yine de makul maliyetler için değişkenliği sınırlayabilmektedir.

Uzun vadeli stabilite: Kanıtlanmış uzun vadeli stabilite, en zorlu koşullar altında bile c-Si ve III-V güneş pili konseptleri tarafından sağlanmaktadır. Kalkojenik hücreler kanıtlanmış uzun vadeli stabiliteyle yakından takip edilir. Ancak bu alanda henüz uzun vadeli istikrar göstermesi gereken perovskit için durum böyle değil. Perovskit hücreler için uzun vadeli deneyim gerekmektedir.

Düşük ışınlama altında performans: Hücre tipleri arasındaki farklar küçüktür. Organik ve III-V güneş pilleri, düşük ışık koşullarında kendine özgü bir malzeme avantajına sahiptir, ancak kalkojenik güneş pillerinin (CIGS) c-Si'den biraz daha kötü performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Yüksek sıcaklıkta performans: Hücre tipleri arasındaki fark yine marjinaldir. Bazı c-Si hücre teknolojileri sıcaklıktan etkilenirken diğer materyaller, özellikle perovskit, III-V ve organik materyaller biraz daha düşük sıcaklık katsayısı göstermektedir.

Çizelge 4.1. Farklı güneş pili türlerinin karşılaştırılması. Artı, ilgili kriterler için karşılaştırılabilir bir olumlu özelliği belirtirken eksi, ilgili kriterlerin karşılaştırılabilir derecede daha az karşılandığını belirtir (Heinrich, 2020).

Criteria	c-Si	Chalco- genide	Organic	III-V/III- V Tandem	Perovskite	Perovskite- Si Tandem
LCOE criteria						
Efficiency	+	o	- (o)	+++	(o)	(+ to ++)
Cost	++	++	+(++)	--- (o)	(o to ++)	(- to ++)
Long term stability	++	+	o	++	- (o)	- (o)
Performance under lower irradiation	o	-	+	+	o	o
Performance under elevated temperature	o	o	+	+	+	o
Design criteria						
Size variability	o	+	+	+	+	o
Adjustability of electric parameters	o	+	+	++	+	o
Variability in shape	-	+	+	+	+	-
Mechanical flexibility of the technology	-	++	++	+	+	-
Homogeneous appearance	+	++	++	+	++	+
Transparency	o	+	++	o	+	o
Hazardous materials	+	o	++	o	o	o
Future potential						
Market penetration	+++	+	o	o	-	-
Research activity	++	o	+	o	++	+

Elektrik parametrelerinin ayarlanabilirliği: III-V hücreleri, farklı voltajlar üretmek için kullanılacak çok sayıda substratın mevcut olması ve akımın hücre boyutuna göre kolayca değiştirilebilmesi nedeniyle bu karakteristik açısından en büyük avantajı göstermektedir. III-V hücrelerinin yanı sıra, ince film bazlı teknolojiler, hücreler arasındaki ara bağlantının kolayca ayarlanabilmesi nedeniyle, levha bazlı teknolojilere kıyasla benzersiz bir avantaj sunmaktadır.

Şekilde değişkenlik: Yine levha bazlı ve ince film bazlı teknolojiler için aynı prensip geçerlidir. İnce film bazlı teknolojiler daha kolay ayarlanabildiğinden, teknolojiler arasındaki farklar daha da belirgindir. III-V hücreleri, daha küçük standart hücre boyutu nedeniyle c-Si ve önerilen perovskit tandem teknolojisine kıyasla hafif bir avantaja sahiptir.

Teknolojinin mekanik esnekliği: İnce film bazlı teknolojiler prensipte daha esnektir ve güneş piline zarar vermeden düzenli olarak bükülebilir. Organik tip güneş pilleri için rulodan ruloya üretim sırasında bile bu bir standarttır. Ek olarak III-V hücre tipinde halihazırda esnek substratlar da mevcut bulunmaktadır

Homojen görünüm: Makul bir ek çaba ile tüm teknolojiler, homojen bir görünümü mümkün kılacak şekilde yapılabilir. Yine homojen görünümün standart bir tasarım olması nedeniyle ince film bazlı teknolojilerin avantajı bulunmaktadır.

Şeffaflık: Verimlilik pahasına, tüm güneş pili türleri için, malzeme kalınlığını azaltan veya aktif alanı azaltan bir düzeyde şeffaflık mümkündür. Organik güneş pilleri burada benzersiz bir avantaj sunuyor; kızılötesi dalga boyu aralığını toplayan malzemeler kullanılabilir, dolayısıyla şeffaflık ve verimlilik yüksek olabilir. Şeffaflık etkisini elde etmek amacıyla levha bazlı hücrelerin kesilmesinden daha kolay olan ince film bazlı teknolojiler için şeffaflık, ince film kalınlığının azaltılmasıyla elde edilir.

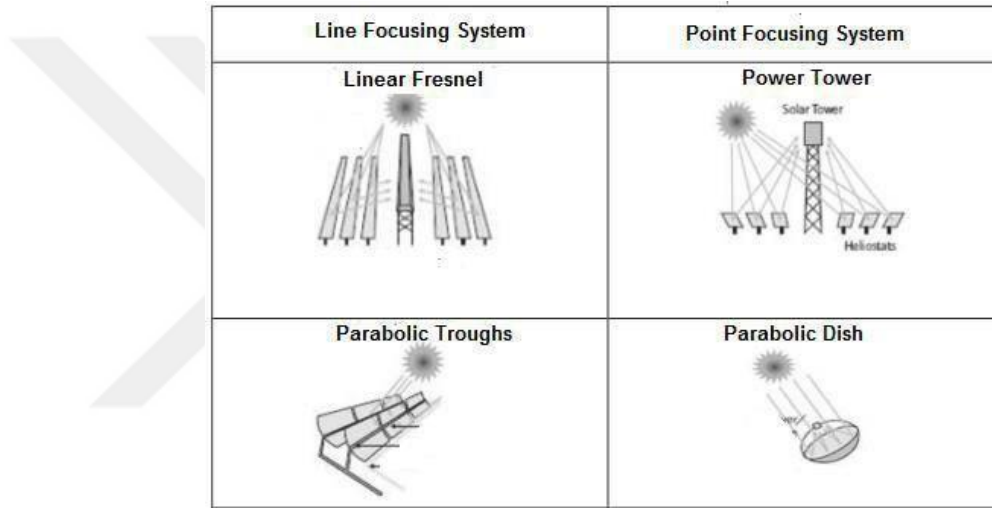
Tehlikeli maddeler: Tüm hücre türleri için, tehlikeli maddeler yalnızca küçük miktarlarda kullanılır. Çevre ve insanlar için potansiyel risk, neredeyse tüm diğer enerji üretim ve güç depolama teknolojilerine göre önemli ölçüde daha düşüktür. Kurşun, c-Si güneş pilleri ve perovskit hücrelerinde bulunur. Perovskitteki kurşun suda çözünür ve potansiyel olarak daha yüksek bir risk sağlar. Selenyum ve Kadmiyum kalkojenik güneş pillerinin bir parçasıdır ve Arsenit III-V güneş pillerinin bir parçasıdır. Organik güneş pilleri ise tehlikeli maddeler olmadan kullanılabilir.

Pazara nüfuz etme: Piyasaya nüfuz etme, c-Si güneş pilleri için açık ara en yüksek düzeydedir ve şu anda perovskit ve perovskit tandem teknolojileri için mevcut değildir.

Araştırma faaliyeti: C-Si'ye yönelik araştırma faaliyeti en yüksek düzeydedir ve şu anda çoğunlukla araştırma enstitüleri ve şirketler tarafından yürütülmektedir. Perovskit güneş pilleri de yüksek bir araştırma faaliyeti göstermektedir, ancak çoğunlukla akademik çevrelerde bu durum organik güneş pilleri için de görülebilir (Heinrich, 2020).

5. SONUÇ

Artan insan sayısı ve azalan doğal kaynaklar doğrultusunda insanlık uzun yıllardır enerji arayışını devam ettirmektedir. Doğal enerji kaynaklarından birisi de Güneş enerjisidir. Güneş enerjisi genel olarak büyük potansiyele sahip, temiz ve yeryüzünde açık ara en bol bulunan enerji kaynaklarından biridir.(Pheng vd., 2016) Güneşten enerjisi ile elektrik elde etmenin iki yolu vardır; fotovoltaik (PV) sistem ve CSP sistemi. PV ve CSP, güneş kaynağının farklı kısımlarını toplar ve enerji santrallerini geliştirmek için farklı bölgelerin yanı sıra farklı üretim yeteneklerine de sahiptir. Bu iki sistem elektrik üretmek için farklı teknolojiler kullanmaktadır. Genel olarak Şekil 5.1'de gösterildiği gibi dört tür CSP teknolojisi vardır; Parabolik Oluk sistemi, Lineer Fresnel sistemi, Parabolik Çanak Sistemi ve Güç Kulesi sistemi (Quaschnig, 2004).



Şekil 5.1. Dört farklı CSP teknolojisi .(Pheng vd., 2016)

Bu tez çalışmasında fotovoltaik güneş panellerini oluşturan güneş pilleri(hücreleri) ele alınıp üretim aşamaları, çeşitleri, yapısı, karakterizasyon yöntemleri ve farklı yapılarıdaki güneş pillerinin çeşitleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılırken verimlilik, maliyet, boyut değişkenliği, uzun vadeli stabilite, düşük ışınlama altında performans, yüksek sıcaklıkta performans, elektrik parametrelerinin ayarlanabilirliği, şekilde değişkenlik, teknolojinin mekanik esnekliği, homojen görünüm, şeffaflık, tehlikeli maddeler, pazara nüfuz etme ve araştırma faaliyeti yönünden karşılaştırma yapılmıştır.

Günümüzde güneş enerjisi santrallerinde en çok kullanılan güneş pili çeşidi monokristal güneş pillerinden yapılan güneş panelleridir. Maliyet yönünden ve verim yönünden kıyaslandığında fiyat/performans olarak daha seçilebilir olmasını sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında amaç farklı yapılarıdaki güneş pillerinin karşılaştırması olmasına rağmen üretim aşamaları ve karakterizasyon yönleri gibi güneş pillerinin farklı yönlerine de değinilmiştir ve bu sayede literatürde güneş pilleri ile ilgili hem Türkçe hem de toparlayıcı bir bilgi kaynağı olması sağlanmaktadır. Bu sayede güneş panellerini oluşturan güneş pillerinin hangi aşamalardan geçerek ve ne tür güneş pilleri olduğunu ve aralarındaki farkların ne olduğuna dair bilgiye kolay bir şekilde ulaşması sağlanmaktadır.



KAYNAKÇA

- Ago, K. #steemstem • 4 Y., 2018. Procedure for the measurement of photoconductivity in semiconductor materials [WWW Document]. Steemit. URL <https://steemit.com/steemstem/@katiuskagomez/procedure-for-the-measurement-of-photoconductivity-in-semiconductor-materials> (accessed 11.15.21).
- Anonim 1: 宏惠光電 - 太陽能電池檢測 [WWW Document]. 宏惠光電股份有限公司. URL <https://www.unice-eo.com/news/知識/太陽能電池檢測> (Son erişim Tarihi: 02.15.2024).
- Anonim 2: 에어매스 (Air Mass) | PVEducation [WWW Document], URL <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/%EC%97%90%EC%96%B4%EB%A7%A4%EC%8A%A4-air-mass> (Son erişim Tarihi: 03.05.2024).
- Anonim 3: 3. NESİL GÜNEŞ PİLLERİ. 16, (Son erişim Tarihi: 08.10.2021)
- Anonim 4: Accelerated Reliability Evaluations | Photovoltaic Reliability Laboratory [WWW Document]. URL <https://pvreliability.asu.edu/content/accelerated-reliability-evaluations> (Son erişim Tarihi: 12.10.2021).
- Anonim 5: Solor Monokristalin Külçe [WWW Document]. URL <http://www.lotuseurope.net/product/view/113/Solor+Monocrystalline+Ingot> (Son erişim Tarihi: 02.13.2024).
- Anonim 6: All you want to know about Electroluminescence(EL) testing of Solar Modules. - Teqo [WWW Document]. URL <https://www.mahindrateqo.com/portfolio/all-you-want-to-know-about-electroluminescenceel-testing-of-solar-modules/> (Son erişim Tarihi: 12.10.2021).
- Anonim 7: Baghzouz, Y., 4.1 Solar Cell Operation, (Son erişim Tarihi: 10.11.2021)
- Anonim 8: Best Research-Cell Efficiency Chart [WWW Document], URL <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (Son erişim Tarihi: 11.1.2021).
- Anonim 9: Canli, S., MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY 93. (Son erişim Tarihi: 06.25.2022)
- Anonim 10: Characterization Lab – GUNAM, URL <http://gunam.metu.edu.tr/facilities/characterization-lab/> (Son erişim Tarihi: 11.10.2021).
- Anonim 11: Electroluminescence For PV Cells With SWIR | Sensors Unlimited [WWW Document], URL <https://www.sensorsinc.com/applications/photovoltaics/electroluminescence-for-pv-cells> (Son erişim Tarihi: 03.05.2024).
- Anonim 12: Fig 1: Unit cell of I-III-VI₂ parent ternary chalcopyrite structured. [WWW Document], ResearchGate. URL https://www.researchgate.net/figure/Unit-cell-of-I-III-VI2-parent-ternary-chalcopyrite-structured-materials_fig1_303597289 (Son erişim Tarihi: 02.14.2024).
- Anonim 13: Green Photonics - Raman Spectroscopy - Semrock [WWW Document], URL <https://www.semrock.com/green-photonics-raman-spectroscopy.aspx> (Son erişim Tarihi: 11.24.2021).
- Anonim 14: plc, R., Renishaw: Photovoltaics [WWW Document]. Renishaw. URL <http://www.renishaw.com.tr/tr/photovoltaics--25882> (Son erişim Tarihi: 02.15.24).
- Anonim 15: Solar Thermal History, URL <http://californiasolarcenter.org/old-pages-with-inbound-links/history-solarthermal/> (Son erişim Tarihi: 01.10.2024).
- Anonim 16: Rahim, H., Perovskite solar cell. (Son erişim Tarihi: 10.20.2023)
- Anonim 17: Reflectance Measurements of Materials Used in the Solar Industry, (Son erişim

- Tarihi: 01.15.2022)
- Anonim 18: Salon Etkisi | Fizik [WWW Document], URL <https://www.collegesidekick.com/study-guides/physics/22-6-the-hall-effect> (Son erişim Tarihi: 03.05.2024).
- Anonim 19: Solar Cell Efficiency | PVEducation [WWW Document], URL <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-efficiency> (Son erişim Tarihi: 03.01.2023).
- Anonim 20: Solar cell efficiency – Energy Education [WWW Document], URL https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_cell_efficiency#cite_ref-peake_5-0 (Son erişim Tarihi: 03.06.2023).
- Anonim 21: Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement [WWW Document], Ossila. URL <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory> (Son erişim Tarihi: 01.10.2024).
- Anonim 22: Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 (English translation supplement) Page 119 (133 of 416) [WWW Document], URL <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/133> (Son erişim Tarihi: 04.29.2024).
- Anonim 23: World Energy Resources: Solar, (Son erişim Tarihi: 02.24.2023).
- Anonim 24: Güneş-Elektrik dönüşümleri : fotovoltaiik güneş gözeleri ve güç sistemleri (Book, 2001) [WorldCat.org] [WWW Document], URL <https://www.worldcat.org/title/gunes-elektrik-donusumleri-fotovoltaiik-gunes-gozeleri-ve-guc-sistemleri/oclc/50021401> (Son Erişim Tarihi: 11.01.2021).
- Azzam, R.M.A., Bashara, N.M., 1977. Ellipsometry and polarized light [by] R.M.A. Azzam and N.M. Bashara. Amsterdam, New York, North-Holland Pub. Co.
- Basic Characteristics and Characterization of Solar Cells, 2018. , in: Materials Concepts for Solar Cells. WORLD SCIENTIFIC (EUROPE), pp. 3–43. https://doi.org/10.1142/9781786344496_0001
- Brown, N., 2011. Solar Junction Breaks Concentrated Solar World Record with 43.5% Efficiency [WWW Document]. CleanTechnica. URL <https://cleantechnica.com/2011/04/19/solar-junction-breaks-concentrated-solar-world-record-with-43-5-efficiency/> (accessed 4.29.24).
- Bube, R.H., Rice, S.A., 1961. Photoconductivity of Solids. Physics Today 14, 54–54. <https://doi.org/10.1063/1.3057560>
- Department of Electrical Engineering, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino Km. 6, Gowa 92171, Indonesia, Syafaruddin, X., Zinger, D.S., Department of Electrical Engineering, Northern Illinois University, 1425 W. Lincoln Hwy., DeKalb, Illinois 60115, USA, 2019. Review on Methods of Fault Diagnosis in Photovoltaic System Applications. JESTR 12, 53–66. <https://doi.org/10.25103/jestr.125.07>
- Farage, M., Miller, K., Maibach, H., 2010. Textbook of Aging Skin. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89656-2>
- Flood, D.J., 2001. SPACE PHOTOVOLTAICS – History, PROGRESS AND PROMISE. Mod. Phys. Lett. B 15, 561–570. <https://doi.org/10.1142/S0217984901002038>
- Fontani, D., Sansoni, P., Francini, F., Messeri, M., Pierucci, G., DeLucia, M., Jafrancesco, D., 2018. Electroluminescence Test to Investigate the Humidity Effect on Solar Cells Operation. Energies 11, 2659. <https://doi.org/10.3390/en11102659>
- Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, Ó., 2019. Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia 92–104.

- Goetzberger, A., Knobloch, J., Voß, B., 2014. Analysis and Measuring Techniques, in: Crystalline Silicon Solar Cells. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 201–229. <https://doi.org/10.1002/9781119033769.ch9>
- Good, P., Cooper, T., Querci, M., Wiik, N., Ambrosetti, G., Steinfeld, A., 2016. Spectral reflectance, transmittance, and angular scattering of materials for solar concentrators. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 144, 509–522. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.057>
- Green, 1981. Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions. *Solid-State Electronics* 24, 788–789. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90062-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90062-9)
- H. Sargent, E., 2005. Infrared Quantum Dots. *Adv. Mater.* 17, 515–522. <https://doi.org/10.1002/adma.200401552>
- Heinrich, M., 2020. A comparison of different solar cell technologies for integrated photovoltaics.
- IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 21st, Kissimmee, FL, May 21-25, 1990, Conference Record. Vols. 1 & 2, 1990. , 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- insiders, S.E.T.T.E.T. at S. is made up of knowledgeable solar industry, Valuable, E.W.H. a P. to S., helpful, solar, educational information A. at becoming the best place to learn, Leaders, T.P.P. with I.T., journalists, Magazine, influencers I. you want to publish your articles on S., Twitter, click here L., 2019. Thin-film Solar Overview | Cost, types, application, efficiency. *SolarFeeds Magazine*. URL <https://www.solarfeeds.com/mag/wiki/thin-film-solar/> (accessed 4.29.24).
- Jean, J., Brown, P.R., Jaffe, R.L., Buonassisi, T., Bulović, V., 2015. Pathways for solar photovoltaics. *Energy Environ. Sci.* 8, 1200–1219. <https://doi.org/10.1039/C4EE04073B>
- Jiang, M., Y, X., 2013. Cu₂ZnSnS₄ Thin Film Solar Cells: Present Status and Future Prospects, in: Morales-Acevedo, A. (Ed.), *Solar Cells - Research and Application Perspectives*. InTech. <https://doi.org/10.5772/50702>
- Jones G. and Bouamane L., 2012. “Power from Sunshine” A Business History of Solar.pdf.
- Jordan, D.C., Wohlgemuth, J.H., Kurtz, S.R., 2012. Technology and Climate Trends in PV Module Degradation: Preprint 9.
- Kesinro, R.O., Boyo, A.O., Akinyemi, M.L., Emetere, M.E., Aizebeokhai, A.P., 2021. Progress on Organic Solar Cells: A Short Review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 665, 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/665/1/012036>
- Kim, B.J., Lee, S., Jung, H.S., 2018. Recent progressive efforts in perovskite solar cells toward commercialization. *J. Mater. Chem. A* 6, 12215–12236. <https://doi.org/10.1039/C8TA02159G>
- Lindholm, Fossum, J.G., Burgess, E.L., 1979. Application of the superposition principle to solar-cell analysis. *IEEE Transactions on Electron Devices* 26, 165–171.
- Ma, J., Chang, J., Lin, Z., Guo, X., Zhou, L., Liu, Z., Xi, H., Chen, D., Zhang, C., Hao, Y., 2018. Elucidating the Roles of TiCl₄ and PCBM Fullerene Treatment on TiO₂ Electron Transporting Layer for Highly Efficient Planar Perovskite Solar Cells. *J. Phys. Chem. C* 122, 1044–1053. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09537>
- Meng, H., Xiong, L., He, Y., Liu, D., Zhang, J., Li, W., 2012. Uncertainty analysis of solar simulator’s spectral irradiance measurement, in: Jiang, Y., Yu, J., Wang, Z. (Eds.), . Presented at the 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2012), Xiamen, China, p. 84193A. <https://doi.org/10.1117/12.971190>

- Miccoli, I., Edler, F., Pfnür, H., Tegenkamp, C., 2015. The 100th anniversary of the four-point probe technique: The role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. *Journal of Physics Condensed Matter* 27. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/22/223201>
- Naftaly, M., Das, S., Gallop, J.C., Pan, K., Alkhalil, F., Kariyapperuma, D., Constant, S., Ramsdale, C., Hao, L., 2021. Sheet Resistance Measurements of Conductive Thin Films: A Comparison of Techniques. *Electronics* 10, 960. <https://doi.org/10.3390/electronics10080960>
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W., Limperis, T., 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance (No. NBS MONO 160). National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD. <https://doi.org/10.6028/NBS.MONO.160>
- Nkuissi, H.J.T., Hartiti, B., 2018. Cu₂ZnSnS₄ Thin-Film Solar Cells, in: *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Elsevier, pp. 799–828. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00046-8>
- Novičkovas, A., Baguckis, A., Mekys, A., Tamošiūnas, V., 2015. Compact Light-Emitting Diode-Based AAA Class Solar Simulator: Design and Application Peculiarities. *IEEE Journal of Photovoltaics* 5, 1137–1142. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2430013>
- Organic solar cell, 2023. . Wikipedia.
- Pheng, L.G., Affandi, R., Ab Ghani, M.R., Kim, G.C., Zano, Z., 2016. Study the feasibility of Parabolic Dish (PD) from several prospective criteria in Malaysia environment 11, 3929–3937.
- Principles of Solar Cell Operation – ScienceDirect, 2012. [WWW Document], 2012. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012809921600001X>
- Puddicombe, J., 2008. SOLAR THERMAL ELECTRIC POWER | SCQ [WWW Document]. URL <https://www.scq.ubc.ca/solar-thermal-electric-power/>
- Quaschnig, V., 2004. Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation. *Solar energy*.
- Ramos Hernanz, J.A., Campayo, J.J., Zulueta, E., Barambones, O., Eguía, P., Zamora, I., 2013. Obtaining the characteristics curves of a photocell by different methods. *REPQJ* 814–819. <https://doi.org/10.24084/repqj11.455>
- Repins, I., Contreras, M.A., Egaas, B., DeHart, C., Scharf, J., Perkins, C.L., To, B., Noufi, R., 2008. 19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81.2% fill factor. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16, 235–239. <https://doi.org/10.1002/pip.822>
- Sariciftci, N.S., Smilowitz, L., Heeger, A.J., Wudl, F., 1992. Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene. *Science* 258, 1474–1476. <https://doi.org/10.1126/science.258.5087.1474>
- Shi, D., Guo, Z., Bedford, N., 2015. Nanoenergy Materials, in: *Nanomaterials and Devices*. Elsevier, pp. 255–291. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7754-9.00010-X>
- Shipp, D.W., Sinjab, F., Notingham, I., 2017. Raman spectroscopy: techniques and applications in the life sciences. *Adv. Opt. Photon.* 9, 315. <https://doi.org/10.1364/AOP.9.000315>
- Smits, F.M., 1958. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *The Bell System Technical Journal* 37, 711–718. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x>

- Solar energy technologies: principles and applications - ScienceDirect [WWW Document], 2021 URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205396000017> (accessed 10.9.21).
- The Nobel Prize in Physics 1921 [WWW Document], n.d. . NobelPrize.org. URL <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/> (accessed 1.10.24).
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Trans. Power Electron. 24, 1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
- Wadia, C., Alivisatos, A.P., Kammen, D.M., 2009. Materials Availability Expands the Opportunity for Large-Scale Photovoltaics Deployment. Environ. Sci. Technol. 43, 2072–2077. <https://doi.org/10.1021/es8019534>
- Wang, W., Laumert, B., 2014. Simulate a ‘Sun’ for Solar Research : A Literature Review of Solar Simulator Technology. undefined.
- Zhao, A., W., Dai, X., Green, M.A., Wenham, S.R., 1991. Improvements in Silicon Solar Cell Performance [WWW Document]

ÖZGEÇMİŞ

İLKER GÖKTAŞ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
20016-2020	Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Kalite Kontrol Personeli	CW Enerji
2021-2022	AOSB, Döşemealtı, Antalya
Fizik Öğretmeni	Özel Antalya Özbilgi Öğretim Kursu
2020-2021	Muratpaşa, Antalya