



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUM TABANLI GÜNEŞ PİLLİ HÜCRELERİNİN
ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE BAZI TİCARİ
SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN TAYİNİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

Selin GÖRMEZ
172108006

2021

GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUM TABANLI GÜNEŞ PİLLİ HÜCRELERİNİN
ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE BAZI TİCARİ SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN TAYİNİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : **Selin GÖRMEZ**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : **13.08.2021**

Enstitü Anabilim Dalı : **Enerji Sistemleri Mühendisliği**

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Serdar KARADENİZ**

Ağustos 2021

GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUM TABANLI GÜNEŞ PİLLİ HÜCRELERİNİN
ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE BAZI TİCARİ SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN TAYİNİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selin GÖRMEZ

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 28/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

..... Dr.
.....
Jüri Başkanı

..... Dr.
.....
Üye
Doç. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü

.... Dr.
.....
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Selin GÖRMEZ

.....

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteğini, katkısını biran olsun eksiltmeyen, tüm kolaylıkları sağlayan en büyük teşekkürü borç bildiğim kıymetli hocam Prof. Dr. Serdar Karadeniz’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince bana güven veren, desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli meslektaşlarım, çalışma arkadaşlarım Ayşe AKIN ve Hüseyin TÜNAY’a teşekkür ederim.

Son süreçte çalışmalarımı tamamlamak için tüm desteğiyle yanımda olan değerli okul arkadaşım Damla Gül KELEŞ’e teşekkürü borç bilirim.

Eğitim ve öğretim hayatımın başından sonuna her türlü fedakârlığı gösteren, maddi manevi tüm destekleri için babam Zeynal GÖRMEZ, annem Nigar GÖRMEZ’e, kız kardeşlerim Yaprak, Burcu ve Fatma’ya, enerjileriyle hayatıma enerji katan yeğenlerim Emir ve Yiğit’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarında büyük, küçük yardımlarını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	II
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLOLAR LİSTESİ.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	VII
ABSTRACT.....	IX

BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
---------------------	---

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	11
2.1. Güneş Enerjisi Tarihçesi	11
2.2. Güneş Pilleri Çeşitleri	12
2.2.1. Birinci nesil güneş pilleri	13
2.2.2. İkinci nesil güneş pilleri	14
2.2.3. Üçüncü nesil güneş pilleri.....	14
2.3. Güneş Pilleri Yapısı ve Çalışma Prensibi	16
2.3.1. Yarıiletkenler.....	16
2.3.2. Yarıiletkenlerin yapısı.....	17
2.3.3. Yarıiletkenlerde iletim	18
2.3.4. Yarıiletken katkılama	20
2.4. Güneş Pili'nin Elektriksel Karakteristikleri	25
2.4.1. Akım-voltaj (I-V) karakteristiği.....	25
2.5. Güneş Pili Üretim Basamakları.....	29
2.5.1. Yüzey doku piramidi.....	30
2.5.2. Katkılama (Difüzyon)	32
2.5.3. Yansıma önleyici kaplama	34
2.5.4. Metal kontaklar	35

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
----------------------------------	----

BÖLÜM 4 ARAŞTIRMA BULGULARI.....	38
----------------------------------	----

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	50
---------------------------------	----

KAYNAKLAR	51
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	55
----------------	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması	4
Şekil 1.2. Enerji Kaynaklarının Zamana Göre Değişimi	5
Şekil 1.3. Enerji Kaynaklarının Dağılımı.....	6
Şekil 2. 1. Becquerel'inFotovoltaik Etki.....	11
Şekil 2. 2. NREL Yıllara Göre Güneş Pillerinin Gelişimi	12
Şekil 2. 3. Güneş Pili Çeşitleri	13
Şekil 2. 4. Periyodik tablo	17
Şekil 2. 5. Bir silikon kristal kafes içinde kovalent bağların şematik gösterim	18
Şekil 2. 6. İletkenler, yarıiletkenler ve dielektrikler için basit band diyagram	20
Şekil 2. 7. N Tipi Katkılama Gösterimi	21
Şekil 2. 8. P Tipi Katkılama Yöntemi	22
Şekil 2. 9. Elektron-Deşik Elektriksel Alan Oluşumu	23
Şekil 2. 10.Güneş Pili Şematik Gösterimi.....	24
Şekil 2. 11. Güneş Pili PN Elektriksel Gösterimi	25
Şekil 2. 12. Güneş Pili IV Grafiği.....	27
Şekil 2. 13. Güneş Pili Eş Değer Devresi.....	28
Şekil 2. 14. Güneş hücresi foton iletimi	29
Şekil 2. 15. Geleneksel Güneş Pili Üretim Akışı ve Güneş Pili Gösterimi	30
Şekil 2. 16. Optik yansıtma verilerinin temsili grafiği.....	31
Şekil 2. 17. Dokusuz düz silikon ile piramit silikon wafer yüzeyi arasındaki fark ve dokusuz düz silikon ile rasgele piramit dokulu silikon wafer yüzeyi arasındaki ışık yansıma farkının gösterimi	32
Şekil 2. 18. Katkılama Şematik Gösterimi.....	33
Şekil 2. 19. Difüzyon işleminin şematik gösterimi ve difüzyon ekipmanının temsili görüntüsü.....	33
Şekil 2. 20. PECVD sisteminin şeması	35
Şekil 3. 1. Akım-gerilim ölçümlerinde kullanılan Sciencetech marka filtre güneş simulatörü.....	37

Şekil 4. 1. Güneş pili hücrelerinin karanlık ortamda Monokristal ve Polikristal I-V eğrileri	39
Şekil 4. 2. Güneş pili hücrelerinin karanlık ortamda Monokristal ve Polikristal. yarı-logaritmik $\ln(I)$ -V eğrileri.....	40
Şekil 4. 3. Güneş pili hücrelerinin uygulanan voltaja bağlı karanlık ortam parazitik direnç karakteristikleri	41
Şekil 4. 4. Monokristal ve Polikristal güneş hücrelerinin fotovoltaiik, PN eklem ve düz beslem ölçüm yöntemleriyle elde edilmiş I –V karakteristikleri	44
Şekil 4. 5. Monokristal ve Polikristal güneş pili hücrelerinin fotovoltaiik ölçüm yöntemi ile iki farklı aydınlatma şiddetinde elde edilmiş I-V karakteristikleri	45
Şekil 4. 6.Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık altındaki I-V karakteristikleri	46
Şekil 4. 7. Monokristal ve polikristal Güneş pili hücrelerinin aydınlık altındaki yarı-logaritmik $\ln(I)$ -V eğrileri.....	48

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Şubat Ayında Ülkemizdeki Enerji Kurulu Güçleri	10
Tablo 2.2. Malzeme Bant Boşlukları	19
Tablo 4. 1. Güneş pili hücrelerinin karanlık ortam altındaki elektriksel parametreleri	40
Tablo 4. 2. Monokristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı performans parametreleri	47
Tablo 4. 3. Polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı performans parametreleri.	47
Tablo 4. 4. Monokristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı elektriksel parametreleri	49
Tablo 4. 5. Polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı elektriksel parametreleri	49

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a-Si	Amorf Silisyum
e^-	Elektron
eV	Elektronvolt
FF	Doluluk faktörü
Ge	Germanyum
I	Akım
I_{max}	Maksimum akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
n	Nötron
P_{max}	Maksimum güç
Se	Selenyum
SiO_2	Silisyum dioksit
V_{oc}	Açık Devre Gerilimi
V	Gerilim
I_0	Karanlık doyma akımı
I_d	Diyottan geçen akım
T	Sıcaklık
k	Boltzmann sabiti
η	Verimlilik
$P_{ışık}$	Işık Gücü

SİLİSYUM TABANLI GÜNEŞ PİLLİ HÜCRELERİNİN ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE BAZI TİCARİ SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN TAYİNİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında silisyum monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin elektriksel parametreleri incelenmiştir. Bunun için güneş pili hücrelerinin karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçümler yardımıyla her iki güneş pilinin de ideallik faktörü (η), doyma akımı (I_0) ve engel yüksekliği (Φ_B) gibi elektriksel parametrelerin yanında kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), güç dönüşüm verimliliği (η), maksimum güç (P_{max}) ve doluluk faktörü (FF) gibi performans parametreleri de hesaplanmıştır. Aygıtların seri direnç değerleri ise farklı yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve birbirleriyle kıyaslamalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik hücre, monokristal, polikristal, elektriksel karakteristikler

PRODUCTION TECHNOLOGIES OF SILICON BASED SOLAR CELLS AND DETERMINATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SOME COMMERCIAL SILICON SOLAR CELLS

ABSTRACT

In this thesis, the electrical parameters of silicon monocrystalline and polycrystalline solar cells were investigated. For this, the current-voltage (I-V) measurements of solar cells were carried out under dark and different light intensities. With the help of the obtained measurements, besides the electrical parameters such as ideality factor (n), saturation current (I_0), barrier height (Φ_B) and, the performance parameters such as short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), power conversion efficiency (η), maximum power ($P_{maks.}$) and fillfactor (FF) are also calculated for both solar cells. The series resistance values of devices were obtained using different methods. The obtained results were discussed and comparisons were made with each other.

Keywords: Photovoltaic cell, monocrystalline, polycrystalline, electrical characteristics

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1.Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, doğa tarafından sürekli olarak yenilenen enerji kaynaklarını kullanır. Bunları güneş, rüzgâr, su, dünyanın ısı ve bitkiler olarak sıralamak mümkündür. Yenilenebilir enerji teknolojileri bu yakıtları kullanılabilir enerji formlarına dönüştürür. Dönüşen bu formlar genellikle elektrik, aynı zamanda ısı, kimyasallar veya mekanik güç olabilmektedir.

Bugün ısıtmak için öncelikle kömür, petrol ve doğal gaz fosil yakıtlarını kullanıyoruz, evlerimizde ve arabalarımızda enerji kaynağı olarak kullanıyoruz. Ancak bu tür yakıtları çok daha fazla ve hızlı tüketmekteyiz. Sonunda bitebilecek olmaları yenilenebilir enerjiye olan ilgiyi arttırmaktadır. Örneğin, güneş ışığı veya rüzgâr, kullanılabilirlikleri zamana ve hava durumuna bağlı olsa da parlamaya ve esmeye devam ederler. Bu yüzden çok sayıda fosil yakıt tedarik etsek bile yenilenebilir enerji kullanmak daha iyidir. Teknolojik olarak şuanda güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidro enerji, gelgit enerjisi ve jeotermal gibi enerjilerin kullanımı günden güne artmaktadır.

Rüzgâr enerjisi, rüzgârdan gelen kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüştürebilen enerji türüdür. Genel olarak rüzgar türbini kule, jeneratör, dişli kutularından oluşan hız dönüştürücüsü, elektrik ve elektronik ekipmanlar ve pervaneden oluşur. Bir rüzgâr türbini üzerindeki bıçakları çevirerek elektrik üretmek için rüzgâr kullanımına rüzgar enerjisi denir. Rüzgârdan yenilenebilir enerji yüzyıllardır buğdayı veya pompa suyunu değirmemek için yel değirmenlerine güç sağlamak için kullanılmıştır. Son zamanlarda elektrik üretmek için kullanılan büyük rüzgâr türbinleri tasarlanmıştır. Bu enerji kaynağı kirletici değildir ve birçok alanda serbestçe bulunur. Rüzgâr türbinleri daha verimli hale geliyor. Ürettikleri elektriğin maliyeti düşüyor.

Hidroelektrik enerjisi akan suyun gücünü elektriğe dönüştürülebilen enerji türüdür. En yaygın hidroelektrik santrali, bir rezervuarda su depolamak için nehir üzerinde bir

baraj kullanır. Rezervuardan salınan su, bir türbin içinden akar ve onu döndürür, bu da jeneratörü elektrik üretmek için harekete geçirir. Ancak hidroelektrik enerji mutlaka büyük bir baraj gerektirmez. Bazı hidroelektrik santraller nehir suyunu bir türbinden kanallara aktarmak için sadece küçük bir kanal kullanırlar. Pompalanan bir depolama tesisi adı verilen başka bir tür hidroelektrik santrali, gücü bile depolayabilir. Güç, bir güç şebekesinden elektrik jeneratörlerine gönderilir. Jeneratörler daha sonra türbinleri geriye doğru döndürür, bu da türbinlerin bir nehir veya alt rezervuardan gücün depolandığı bir üst rezervuara su pompalamasına neden olur. Gücü kullanmak için, su üst rezervuardan nehre veya alt rezervuara geri bırakılır. Bu, türbinleri ileri doğru döndürerek jeneratörleri elektrik üretmelerini sağlar.

Gelgit enerjisi, gelgit enerjisi, enerji üretiminin en eski biçimlerinden biridir. Bu yenilenebilir bir şekilde enerji olarak dönüştürür doğal yükseliş ve suyun enerjisinden faydalanılır. Gelgitler, Ay, Güneş ve Dünyanın dönmesi tarafından uygulanan yerçekimi kuvvetlerinin kombine etkilerinden oluşur. Kıyı şeritleri genellikle günlük olarak iki yüksek gelgit ve iki düşük gelgit yaşar. Elektrik üretmek için su seviyelerindeki farkın en az 5 metre yüksekliğinde olması gerekir. Gelgit elektriği, çeşitli teknolojilerden üretilebilir; bunların başlıcaları gelgit barajı, gelgit çiti ve gelgit türbinidir. Gelgit barajları en verimli gelgit enerji kaynaklarıdır. Gelgit barajı, yüksek ve alçak gelgitler arasındaki yükseklik değişikliğinden kaynaklanan potansiyel enerjiyi kullanan bir barajdır. Bu enerji bir türbini döndürür veya elektrik üreten havayı sıkıştırır. Gelgit çitleri dev turnikeler gibi çalışan türbinlerdir, gelgit türbinleri ise sadece su altındaki rüzgâr türbinlerine benzer. Her iki durumda da, gelgit akımlarının mekanik enerjisi bir jeneratöre bağlı türbinleri döndürdüğünde elektrik üretilir. Okyanus akıntıları hava akımlarından nispeten daha fazla enerji üretir, çünkü okyanus suyu havadan 832 kat daha yoğundur ve bu nedenle türbinlere daha fazla kuvvet uygular.

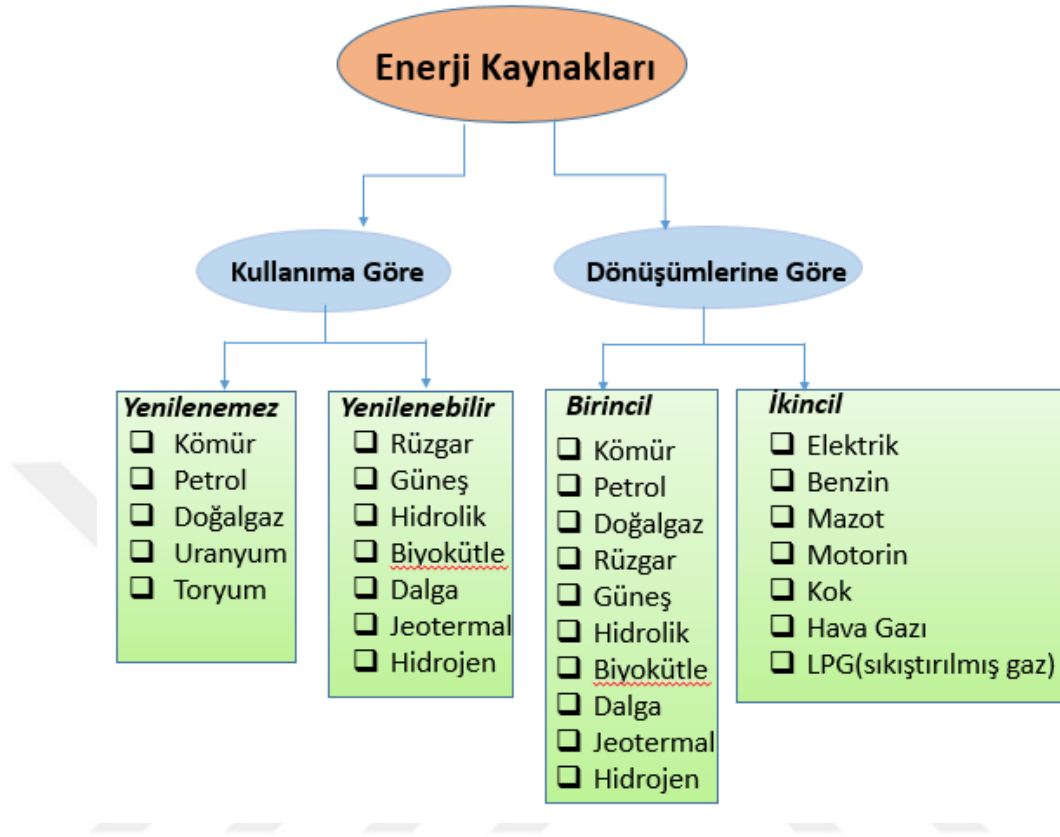
Jeotermal enerji, yer kabuğu derinliklerinde bulunan birikmiş ısıнын meydana getirdiği sıcaklıkların, yöresel atmosferik ortalama sıcaklığının üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla çözölmüş mineral,

çeşitli tuzlar ve belli basınç altındaki sıcak su ,buhar (akışkan) yolu ile yüzeye taşınan ısı olarak tanımlanabilir.

Jeotermal enerji genellikle yeraltından yeryüzüne kadar ulaşan çatlak ve kırıkların oluşturduğu zayıf zonları kullanarak yüzeyleyen sulardan ya da özel olarak açılan sondaj kuyularından elde edilmektedir. Jeotermal enerjinin kaynağı su, buhar, sıcak kayalar ve yeryüzüne yakın katmanlardaki magma olarak görülebilir. Isı kaynaklarının aşırı ısıttığı akışkan, normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içermektedir. Bu yüzden jeotermal enerji kaynağı en önemli enerji kaynaklarından biridir [1].

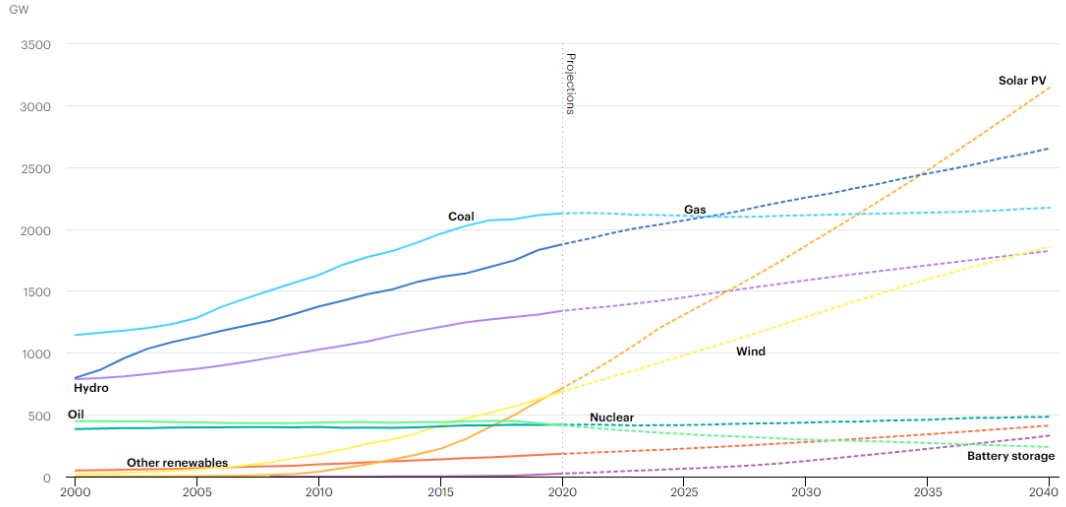
1.2. Dünyada Enerji Durumu

Günümüzde sanayileşme ve teknolojinin yanı sıra dünya nüfusundaki artışla beraber enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Enerji iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Mekanik (kinetik ve potansiyel), nükleer, ısı, elektrik ve kimyasal gibi farklı türlerde bulunabilmektedir. Kullanılabilecek farklı yöntemler ile bir türden bir diğer türe dönüşümü de mümkün olabilmektedir. Enerji kaynakları genelde kullanılışlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılır. Kullanılışlarına göre sınıflandırma yapıldıklarında yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları adını alırlar. Dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırıldıklarında ise Şekil1.1.'de ki gibi birincil ve ikincil enerji kaynakları adını alırlar [2].



Şekil 1.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

Dünya üzerinde teknolojinin her geçen gün daha da ileri gitmesiyle beraber yenilenebilir enerji maliyetleri azalmaktadır ancak arz-talep dengesindeki belirsizlikler fosil yakıtların fiyatlarında değişkenliğe neden oluyor. Dünya üzerindeki savaşlar bu enerji güvenliğini ciddi bir şekilde tehdit ederek sektörü önemli oranda etkilemektedir. 2050 yılına gelindiğinde 1,7 milyarlık ek nüfus olacağı ve buna bağlı olarak küresel enerji ihtiyacının %50 artması öngörülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı(IEA)'nın "2018 Enerji Görünüm Raporu"na göre 2000 yılındaki enerji talebinin %40'ını Avrupa ile Kuzey Amerika, % 20'sini de Asya'daki gelişmekte olan ekonomiler oluşturmaktaydı. Ancak 2040 yılında bunun tam aksine evrileceği öngörülmektedir. Şekil 1.2.'de enerji kaynaklarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Grafikte en dikkat çekici artış olarak solar sektör göze çarpmaktadır[3].



Şekil 1.2. Enerji Kaynaklarının Zamana Göre Değişimi[4]

Küresel rüzgar kapasitesi şu anda 564 GW'da, güneş kapasitesi 480 GW'da ve hızla artıyor. Çin ve ABD liderliğindeki rüzgar kapasitesi 49 GW artarken, 2018'de güneş dünya çapında% 24 artışla 94 GW kapasite ekledi. Yenilenebilir kapasite önemli ölçüde artarken, yenilenemez üretim kapasitesi de son birkaç on yılda artmıştır. 2000 yılından bu yana, yenilenemez enerji kaynakları yılda yaklaşık 115 GW artmıştır. 2010 yılından bu yana, Avrupa, Kuzey Amerika ve Okyanusya'da yenilenemeyen kapasite düşüşleri, Asya ve Orta Doğu'daki eşdeğer kazanımlarla küresel olarak dengelenmiştir. Bir Uluslararası Enerji Ajansı'ndan son raporunda dünya çapında enerji talebi 2018 yılında% 2,3 arttı ve emisyon bu kadar hızlı tempoda ile birlikte bir rekor ulaştı kaydetti. Tüm yakıtlara olan talep küresel olarak arttı ve doğal gaz enerji tüketimindeki artışın% 45'ini oluşturdu [5].

Isıtma, soğutma ve taşımacılıktaki büyüme oranı son zamanlarda her ne kadar düşük olsa da yenilenebilir enerji sektörünün total durumu bunun tam aksi yönündedir ve enerji sektörü yönünü daha çok bu yöne çevirmiş görünmektedir. 2018 yılında 181 gigawatt yenilenebilir enerji eklenmiş oldu. Küresel elektrik tüketimi incelendiğinde bunun yaklaşık %26'sının yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılandığı görülecektir. Kürese yenilenebilir enerji kapasitesi 2018 itibari ile 2.378 gigawatta yükselmiş oldu. Yaklaşık 100 GW güneş paneli kuruldu ve bu yenilenebilir enerjinin

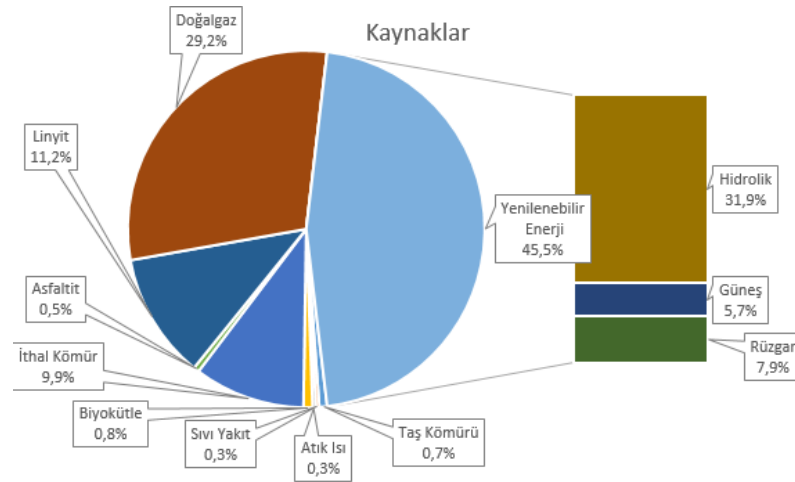
%55'ine karşılık gelmektedir. İkinci sırayı %28 ile rüzgâr enerjisi alırken, hidroelektrik %11 ile üçüncü sırada bulunmaktadır.

1.3. Politika Ortamı

Yenilenebilir enerjiyi destekleyen politikalar neredeyse bütün dünya ülkelerinde mevcuttur. Bu desteklerin artmasını sağlayan nedenlerin başında; kirliliğin azalması ile toplum sağlığının korunması ve yeni iş imkanları oluşturulması gelmektedir. Avrupa yenilenebilir ısı teknolojilerinde en büyük destekçi konumundadır. 2050 yılına kadar birçok büyük belediyenin binalarında net sıfır karbon emisyonuna ulaşma hedefi vardır.

1.4. Türkiye’de Enerji Kaynakları

Ülkemizde birincil enerji kaynaklarının dağılımı Şekil 1.3.’te görüldüğü gibidir. Toplam kurulu güç 91370 MW olup grafiğe bakıldığında yenilenebilir enerji kaynakları %45,5 seviyelerindedir [6].



Şekil 1.3. Enerji Kaynaklarının Dağılımı

Türkiye 126,9 milyon TEP miktarı ile dünya enerji tüketiminin %1’lik dilimini kapsamaktadır. Türkiye gelişmekte olan bir ülke olduğundan dolayı enerji tüketimi

sürekli olarak artmaktadır. Mevcut enerji üretimi bu tüketim değerini karşılamamaktadır. Bundan dolayı petrol, taş kömürü ve doğalgaz ithalatına ödenen para toplam ithalatta önemli bir paya karşılık gelmektedir. Öte yandan tükenmeyen doğal kaynaklardan olan hidrolik, rüzgar ve güneş enerjisi henüz arzu edilen seviyede değildir.

1.4.1. Taşkömürü

Büyük bir bölümü Batı Karadeniz’de bulunmaktadır. Zonguldak ve Kastamonu arası taş kömürünün en yoğun bulunduğu alandır. Bu bölgeden çıkarılan kömürün bir bölümü bölgedeki fabrikaların enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılırken bir kısmı elektrik enerjisi üretiminde, bir kısmı ise mesken ısıtmalarında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra çıkarılan kömür miktarı yetersiz kaldığı için ihtiyacın bir kısmı ithal edilmektedir.

1.4.2. Linyit

Türkiye linyit bakımından yeterli zenginliğe sahip bir ülkedir. Bu nedenle kendi tüketim ihtiyacını karşılayabilmektedir. Ülkemizde linyit yataklarının en çok bulunduğu bölgeler; Yatağan (Muğla), Soma (Manisa), Tavşanlı, Tunçbilek, Seyitömer (Kütahya), Nallıhan (Ankara), Dodurga (Çorum), Çelteki (Amasya), Aşkale (Erzurum), Kangal (Sivas), Orhaneli (Bursa), Çan (Çanakkale) ve Afşin-Elbistan’da (Kahramanmaraş) olarak sıralanabilir.

1.4.3. Petrol

Türkiye’de ilk petrol yatağına 1940’ta Raman Dağı’nda rastlanmıştır. İlerleyen süreçte sayı giderek artmıştır. Petrol yataklarının en yoğun olduğu yerler; Adıyaman, Diyarbakır, Batman ve Siirt’tir. Petrolün işlendiği rafineriler ise Batman, İzmir (Aliağa), İzmit (Tüpraş) ve Kırıkkale’de (Orta Anadolu) bulunmaktadır. Ancak

Ülkemizde ki petrol üretimi tüketimin ancak yaklaşık % 10'unu karşılayabilmektedir. Bu da tüketimin karşılanabilmesi için ithalat yoluna gidilmesine sebep olmaktadır.

1.4.4. Doğalgaz

Türkiye doğalgaz yatakları açısından fakir bir ülkedir. Hamitabat (Kırklareli) ve Mardin doğalgaz kaynaklarımızın bulunduğu yerlerdir. Üretilen doğalgaz tüketilen doğalgazın ancak %2'sini karşılayabilmektedir. Ülkemizin elektrik üretimine bakılırsa bu üretimin yaklaşık %37'sinin doğalgaz ile karşılandığı görülecektir. İthalatımızın büyük çoğunluğu; Rusya, İran, Azerbaycan, Cezayir ve Nijerya'dan karşılanmaktadır.

1.4.5. Hidrolik enerji

Türkiye hidrolik enerji potansiyeli açısından Avrupa kıtasında Norveç' in ardından 2. Sırada bulunmaktadır. Akarsu sayısının ve ortalama yükseltinin fazla olması hidrolik enerji potansiyelimizi arttırmıştır ancak bu potansiyelin sınırlı bir kısmı kullanılmaktadır.

1.4.6. Rüzgâr enerjisi

Türkiye önemli ölçüde rüzgâr gücü potansiyeline sahiptir. Rüzgâr enerjisinden faydalanabilmek; rüzgârın hızına ve sürekliliğine bağlıdır. Bu nedenle ülkemizde rüzgâr potansiyelinin en yüksek olduğu bölgeler; Marmara ve Ege bölgeleridir. Ülkemizde ticari amaçla ilk rüzgâr santrali, 1998'de İzmir'in eşme ilçesine bağlı Alaçatı'da kurulmuştur[7].

1.4.7. Jeotermal enerji

Fay hatlarının yoğun olduğu ÷lkemizde çok sayıda sıcak su kaynağı bulunmaktadır. MTA verileri ÷lkemizde 198 adet jeotermal alan göstermektedir. Bu jeotermal alanların büyük bir kısmı Batı Anadolu bölgesindedir. İç Anadolu ve Marmara da jeotermal potansiyeli yüksek diğ er bölgelerdir. ÷lkemizde işletmeye açılan ilk jeotermal santral, 1984'te hizmete giren Denizli Kızıldere-Sarayköy santralidir.

1.4.8. Güneş enerjisi

Güneş enerjisi elektrik enerjisi üretmek ve ısınmak amacıyla kullanılmaktadır. ÷lkemizde günlük güneşlenme süresi yaklaşık olarak 7.5 saattir. Özellikle Güneydoğı Anadolu, Ege ve Akdeniz'in kıyı kesimi bu alanda ilk sırada olan bölgelerimizdir. ÷lkemizde 2020 Şubat ayı sonu itibari ile kurulu güneş enerjisi gücü Tablo 1.1. 'deki gibi 6042 MW civarındadır[7].

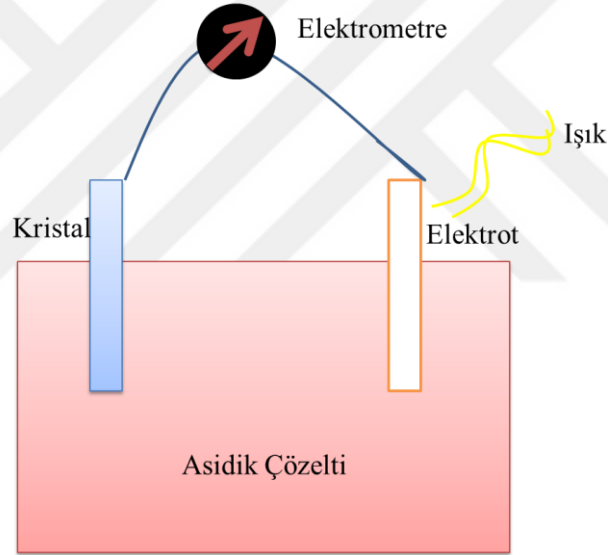
Tablo 1.1. Şubat Ayında Ülkemizdeki Enerji Kurulu Güçleri [8]

Kaynaklar	2020 Şubat Ayı Sonu Üretimler (GWh)	2020 Şubat Ayı Sonu KuruluGüç (MW)
Sıvı Yakıtlar	53	314
Taşkömürü	392	811
Linyit	6141	10101
İthal Kömür	11703	8967
Asfaltit	425	405
Doğal Gaz	12283	25902
Hidrolik	12611	28525
Jeotermal	1628	1515
Rüzgar	4635	7609
Güneş	1217	6042
Atık ve Çöp	820	1177
Toplam	51908	91370

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Güneş Enerjisi Tarihçesi

Fotovoltaik enerji de güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme söz konusudur. Bu etkinin tarihi MÖ 7.yy'a dayanmaktadır. Bu etkiyi ilk olarak 1839'lu yıllarda Fransız bilim adamı Edmond Becquerel, elektrik ileten bir çözelti içine yerleştirilmiş iki metal elektrottan oluşan bir elektrolitik hücre Şekil 2.1.'i denerken fotovoltaik etkiyi keşfetti ve bu düzeneği ışığa maruz kaldığında elektrik üretiminin arttığını gözlemledi.



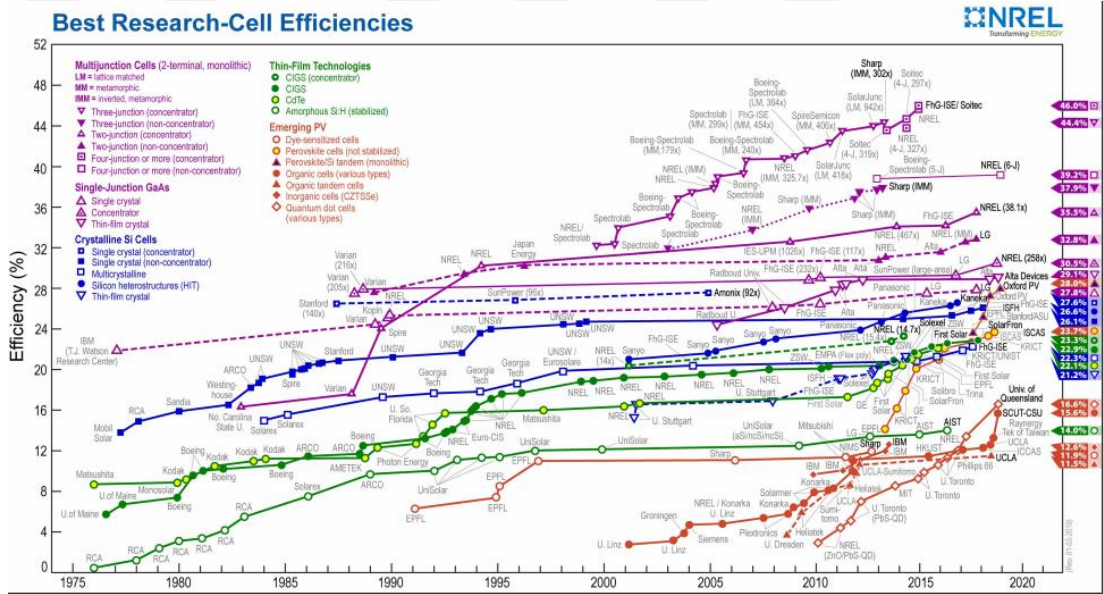
Şekil 2. 1. Becquerel'in Fotovoltaik Etki

Daha sonra 1876 yılında W. G. Adams ve ark. Selenyumun ışığa maruz bırakıldığında elektrik ürettiğini keşfetmişlerdir. Selenyum güneş pilleri elektrikli ekipmana güç sağlamak için yeterli güneş ışığını dönüştürememiş olsa da, katı bir malzemenin ışığı ısı veya hareketli parça olmadan elektriğe dönüştürebileceğini kanıtladılar.

1883 de Amerikalı bir mucit olan Charles Fritts, selenyum waferlardan yapılan ilk güneş hücrelerini keşfetti[9].

1954 Fotovoltaik teknoloji, Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson, günlük elektrikli ekipmanı çalıştırmak için güneş enerjisini dönüştürebilen ilk güneş pili olan silikon fotovoltaik (PV) hücresini Amerika Birleşik Devletleri'nde Bell Labs'ta keşfetti. Bell Telephone Laboratories,% 4 verimlilik ile silikon güneş pili üretti ve daha sonra% 11 verimlilik sağladı [10].

1990 lı yıllarda artık güneş enerjisi elektrikli aletlerde tesislerde, kullanımı yaygınlaştı ve popüler güç kaynağı haline geldi.1954 de %4 lük verimle başlanan fotovoltaik yolculuğu bugün %44 lerde çok eklemli güneş pillerinde rekora imza atmıştır. Şekil 2.2. de günümüzde kullanılan güneş pilleri ve verimlilikleri yer almaktadır.

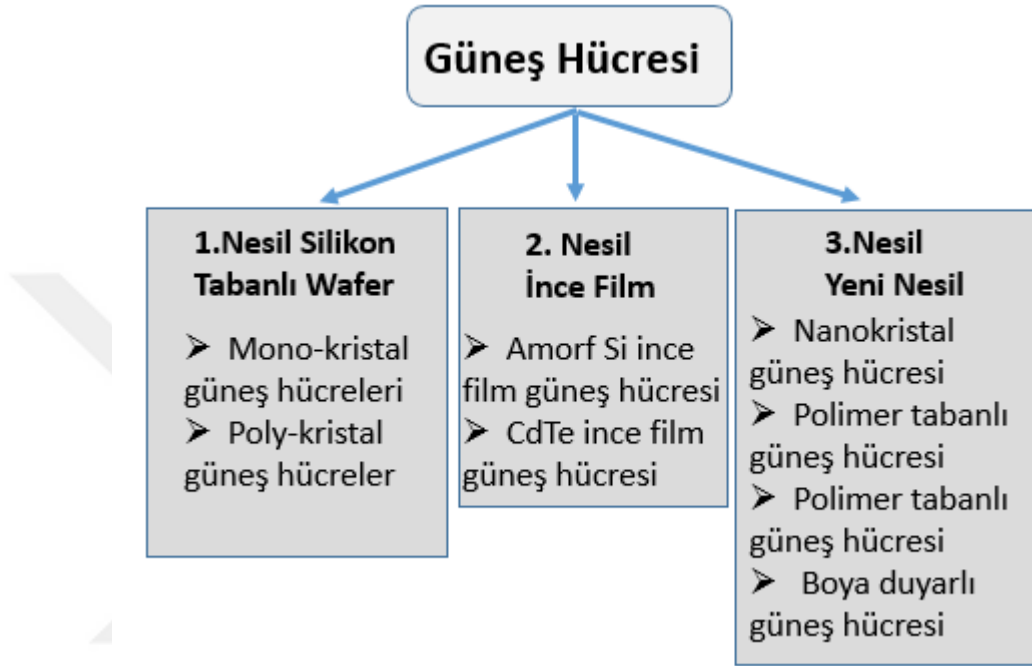


Şekil 2. 2. NREL Yıllara Göre Güneş Pillerinin Gelişimi [11]

2.2. Güneş Pilleri Çeşitleri

Güneş pilleri çeşitli şekillerde yapılabilir kare, dikdörtgen, piramit veya daire gibi şekiller verilebilir. Kalınlıkları verim optimizasyona bağlı olup 0,2-0,4 mm arasında değişebilmektedir. Güneş pili üretim aşamasında kullanılan malzemeye göre %5 ila %30 arasında verimliliğe sahip olabilmektedir. Verim iyileştirme çabalarında

beraberinde yeni güneş pillerinin meydana gelmesine etki etmiştir. Şekil 2.3.'de çeşitli güneş pillerinin sınıflandırılması yer almaktadır.



Şekil 2. 3. Güneş Pili Çeşitleri

2.2.1. Birinci nesil güneş pilleri

İlk nesil güneş pilleri silikon waferlar üzerinde üretilmektedir. Yüksek güç verimliliği nedeniyle en eski ve en popüler teknolojidir. Silikon wafer tabanlı teknoloji iki alt gruba ayrılmıştır:

- Tek / Mono-kristal silikon güneş pili.
- Poli / Çok Kristal Silikon Güneş Pili

Mono kristal güneş pili, adından da anlaşılacağı gibi, Czochralski süreci adı verilen bir işlemle tek silikon kristallerinden üretilmektedir. Üretim sürecinde, Si kristalleri büyük boy külçelerden dilimlenir. Bu büyük tekli kristal üretimleri hücrenin yeniden kristalleştirilmesi işlemi olup, pahalı ve çok aşamalı olduğundan hassas işlemler

gerektirir. Mono-kristalin tek kristalli silikon güneş pillerinin verimi% 17-18 arasındadır.

Polikristalin PV modülleri genellikle tek bir hücrede birbirine bağlanmış birkaç farklı kristalden oluşur. Polikristalin Si güneş pillerinin işlenmesi daha ekonomiktir ve erimiş silikon içeren bir grafit kalıbın soğutulmasıyla üretilir. Monokristal silikon güneş panellerine kıyasla biraz daha ucuz olmalarına rağmen, daha az verimlidir. Verimleri yaklaşık olarak % 12 ila % 14 arasındadır.

2.2.2. İkinci nesil güneş pilleri

İnce film güneş pillerinin ve a-Si'nin çoğu ikinci nesil güneş pilleridir ve birinci nesil silikon wafer güneş pillerine kıyasla daha ekonomiktir. Silikon wafer hücreleri 350 µm kalınlığa kadar ışık emici katmanlara sahipken, ince film güneş pilleri genellikle 1 µm mertebesinde çok ince bir ışık emici katmana sahiptir. İnce film güneş pilleri;

- a-Si.
 - CdTe
 - CIGS (bakır indiyum galyum di-selenid)
- şeklinde sıralanabilir.

2.2.3. Üçüncü nesil güneş pilleri

Üçüncü nesil hücreler yeni gelecek vaat eden teknolojilerdir, ancak ticari olarak ayrıntılı olarak araştırılmamaktadır. Geliştirilen 3. nesil güneş pili tiplerinin çoğu;

- Nano kristal esaslı güneş pilleri
- Polimer esaslı güneş pilleri
- Boya duyarlı güneş pilleri
- Konsantre güneş pilleri

şeklindedir.

Nano kristal güneş pilleri yarıiletken nanokristaller veya kuantum noktaları, güneş hücre maliyetleri düşürmek ve fotovoltaiik cihazların verimliliğini artırmak için ideal yöntemlerden biridir. Silikon bir alt tabakakanın nanokristal bir çözelti ile katman oluşturulmasıyla elde edilen güneş pilleridir.

Polimer esaslı güneş pilleri teknolojisinin en önemli avantajlarından biri düşük maliyetli, basit ve yüksek verimli bir üretim sürecine sahip olmasıdır. Bu kavram ilk olarak G. Yu ve arkadaşları tarafından gösterilmiştir [12]. Polimer bazlı bu güneş pilinin aktif katmanları elektron veren polimerler ve elektron kabul eden malzemelerdir. Harmanlanmış olan aktif katmanlar, spin-kaplama, sprej kaplama, mürekkep baskı gibi teknikler kullanılarak elde edilebilir.

Son yıllarda polimer tabanlı güneş pillerinin verimliliklerini hesaplamak için çok sayıda model oluşturulmuştur. Bu modellerin çoğu, polimer güneş pillerindeki malzeme çalışmalarına öncü olacak şekilde verici ve alıcı polimerin enerji seviyelerinin optimize edilmiş konumunu aramaya odaklanmıştır. Öte yandan polimer güneş pillerinin verimliliği silikon ve CIGS gibi inorganik malzeme bazlı güneş pillerinden daha düşüktür. Yakın zamanda polimer bazlı güneş pillerinin verimlerinin iyileştirilmesi konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Örneğin, poli3-heksiltifen (P3HT) sisteminde % 4 ila 5 civarı verimlilikler elde edilmiştir [13]. Temel olarak, farklı yapı türlerine sahip iki tip polimer güneş pili mevcuttur. Birincisi elektron verici ve alıcı çift katmanlı hücreler, ikincisi ise yığın heteroeklem hücreleridir [14]. Polimer güneş pillerinde optimize edilmiş cihaz performansını geliştirmek için daha büyük ara yüz alanı oluşturulur. Elektron-deşik çiftlerinin difüzyon limiti tipik olarak 5-10 nm olduğundan daha geniş ara yüz alanlarındaki daha etkili yük taşıyıcı yolları oluşacaktır. Böylece hem çift katmanlı hem de gövde heteroeklem güneş pilleri için daha yüksek bir verim elde edilecektir [14].

Boya duyarlı güneş pilleri ilk olarak B. O'Regan ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [15]. Boya duyarlı güneş pilleri yüksek derecede saflaştırılmış malzemelere ihtiyaç duymaması, toksik olmaması ve ucuz olması nedeniyle büyük ilgi görmüştür.

Bu yapılarda, elektron taşınması, ışık Emilimi ve Deşik taşınması farklı malzemelerle gerçekleştirilir [16]. Boyalar çoğunlukla TiO_2 veya ZnO gibi yarıiletkenlere tutturulur ve bağlanır. Boyalar, ışık toplama ve daha sonra da elektron taşınması işlemlerinden sorumludur. Foto-uyarılmış boyalar bol miktarda elektron üretir ve üretilmiş bu elektronları hızlıca bağlı bulunan yarıiletkene enjekte ederler. Bu elektronlar daha sonra anot elektrotlarına taşınır [17].Redox çiftleri daha sonra uyarılmış boyaları nötralize eder ve yeniden birleşmeyi tamamlamak için bunları taban durumuna geri döndürür [16]. Günümüzde en popüler boyalar ve redoks çiftleri rutenyum bazlı boyalar ve iyodür/triiyodür redoks çiftleridir.

2.3.Güneş Pilleri Yapısı ve Çalışma Prensibi

2.3.1. Yarıiletkenler

Yarıiletken malzemeler periyodik tablodaki farklı gruplardan gelmekte olup, belirli benzerlikleri paylaşır. Yarıiletken malzemenin özellikleri atom özellikleri ile ilişkilidir ve gruptan gruba değişir. Fotovoltaik uygulamalarda uygun malzemeyi seçebilmek için bu özelliklerden yararlanılır.

Güneş pilleri çoğunlukla silikon kristallerden, polikristallerden ve şekilsiz olmak üzere bir dizi yarıiletken malzemenin imal edilebilir. Güneş pilleri aynı zamanda GaAs, GaInP, Cu (InGa) Se_2 ve CdTe gibi diğer yarıiletken malzemelerden de üretilir.

Güneş pili malzemeleri büyük ölçüde emme özelliklerinin güneş spektrumuna ne kadar iyi uyduğuna ve üretim maliyetlerine dayanarak seçilmektedir. Silikon malzemenin soğurma özelliklerinin güneş spektrumuna oldukça iyi uyması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarıiletken elektronik endüstrisindeki bu yaygınlığının bir sonucu olarak da silikon imalat teknolojisi iyi gelişmiştir [18].Daha yaygın olarak, yarıiletken materyaller Si veya Ge gibi tek bir eleman, GaAs, InP veya CdTe gibi bir bileşik veya Si_xGe veya Al_xGa gibi bir alaşım olabilir. Burada x "Alkil" belirli bir elementin fraksiyonudur ve 0 ila 1 arasındadır [19]. Şekil 2.4.'de periyodik tablo içerisinde en çok kullanılan elementler verilmektedir.

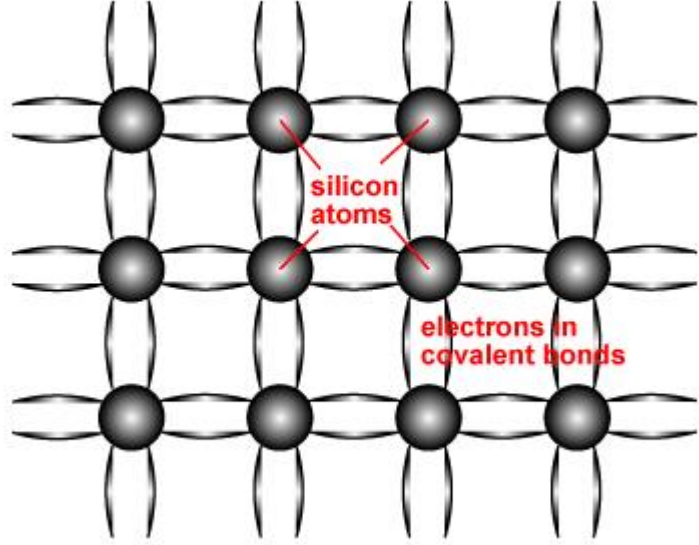
										VIIIA
										² He 4.003
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA				
		5	6	7	8	9	10			
		B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.183			
		13	14	15	16	17	18			
		Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.064	Cl 35.453	Ar 39.948			
IB	IIB									
29	30	31	32	33	34	35	36			
Cu 63.54	Zn 65.37	Ga 69.72	Ge 72.59	As 74.922	Se 78.96	Br 79.909	Kr 83.80			
47	48	49	50	51	52	53	54			
Ag 107.870	Cd 112.40	In 114.82	Sn 118.69	Sb 121.75	Te 127.60	I 126.904	Xe 131.30			
79	80	81	82	83	84	85	86			
Au 196.967	Hg 200.59	Tl 204.37	Pb 207.19	Bi 208.980	Po (210)	At (210)	Rn (222)			

Şekil 2. 4. Periyodik tablo

2.3.2. Yarıiletkenlerin yapısı

Yarıiletkenler, düzgün bir yapı oluşturmak için birbirine bağlanmış atomlardan oluşur. Her silikon atomu, paylaşılan dört değerlik elektrona sahip olup, diğer atomlarla kovalent bağlar oluşturur.

Silikon gibi yarıiletkenler her atomun 8 elektronla çevrili olduğu bir düzenleme oluşturmak için düzenli periyodik bir yapıda birbirine bağlanmış ayrı atomlardan oluşur. Tek bir atom, bir proton (pozitif yüklü parçacıklar) çekirdeğinden ve elektronlarla çevrili nötronlardan (yüksüz parçacıklar) oluşan bir çekirdekten meydana gelir. Elektron ve proton sayıları eşit olup, elektriksel olarak nötrdür. Bir yarıiletken içindeki her atomu çevreleyen elektronlar bir kovalent bağın parçasıdır. Bir kovalent bağ bir çift elektronu paylaşan iki atomdan oluşur. Her atom 4 çevre atomla 4 kovalent bağ oluşturur. Bu nedenle, her atom ile onun çevresindeki 4 atom arasında 8 elektron paylaşılmaktadır. Yarıiletkenin yapısı aşağıdaki Şekil 2.5.'de gösterilmektedir[20].



Şekil 2. 5. Bir silikon kristal kafes içinde kovalent bağların şematik gösterim

2.3.3. Yarıiletkenlerde iletim

Bir elektron iletme katılmak için yeterli enerji kazandığında (serbest), yüksek enerji durumundadır. Elektron bağlandığında ve dolayısıyla iletme katılamadığında ise düşük enerji durumundadır. Bu nedenle, iki atom arasındaki bağın varlığı elektronlar için iki ayrı enerji durumu getirir. Elektron bu iki seviyeye kadar enerji değerlerine ulaşamaz; ya bağda düşük bir enerji konumundadır ya da serbest bırakmak için yeterli enerji kazanmıştır ve bu nedenle belirli bir minimum enerjiye sahiptir. Bu minimum enerjiye bir yarıiletkenin "bant aralığı" denir [19].

Metallerde, yarıiletkenlerde ve izolatörlerde elektronlar atom kuvvetleri tarafından sadece birkaç enerji bandıyla sınırlıdır ve diğer bölgelerde kalıcı olarak bulunamazlar. "Bant boşluğu" terimi, değerlik (dış elektron) bandının üstü ile iletim (serbest elektron akışı) bandının altı arasındaki enerji farkını ifade eder.

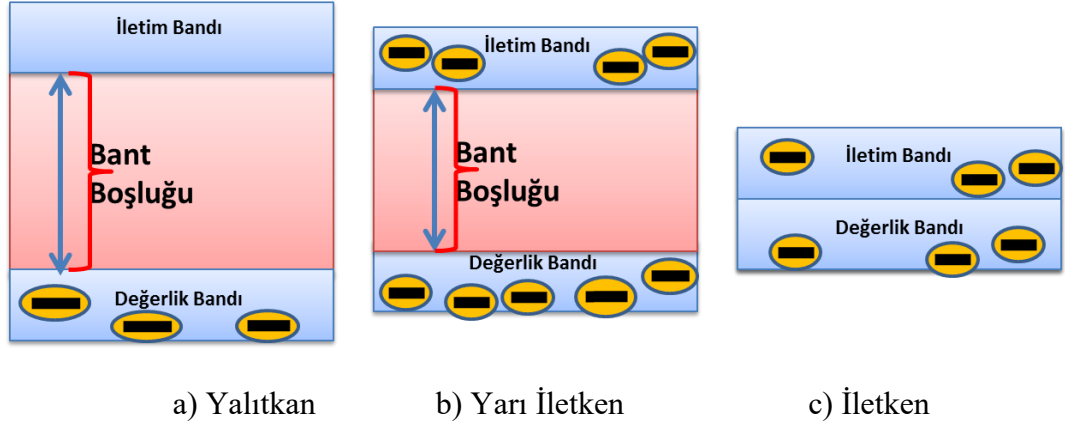
Bir elektronun değerlik bandından iletim bandına sıçraması için, bant boşluğu enerjisinin arttırılması gerekir. Elektronlar, bir fonon (ısı) veya en az bant boşluk enerjisine sahip bir foton (ışık) absorbe ederek iletim bandına atlamak için yeterli

enerji kazanabilirler. Bant boşluğundan daha az enerjiye sahip fotonlar elektron çiftlerini ayırmayacak ve sadece güneş pilinden geçmeyecektir. Bir elektron çiftini ayırmak için gerekenden daha fazla enerjiye sahip olan fotonlar, enerjilerinin dengesinin ısı şeklinde dağıldığı bir elektron ve bir deşik üretir. Bant aralığı enerjisi bir malzemedan diğerine farklılık gösterir. Yarıiletken bir kristalde bant aralığı, sürekli bir kristal yapıdaki (silikon gibi) sabit enerji seviyeleri nedeniyle değişmez. Tablo 2.2.'de bant boşlukları, standart 300K sıcaklıkta ölçülen elektron volt (eV) cinsindendir. Bir voltluk bir elektrik alan farkı ile hızlandığında serbest bir elektron tarafından kazanılan enerji miktarına bir elektron volt denir.

Tablo 2.2. Malzeme Bant Boşlukları

Malzeme	Sembol	Bant Boşluğu(eV)
Silikon	Si	1.11
Kadmiyum Tellür	CdTe	1.49
Kadmiyum Selenid	CdSe	1.73
Bakır Oksit	Cuo	1,20
GaryumArsenit	GaAs	1,43
İndiyum Fosfit	InP	1,35
Selenyum	Se	1,74

Şekil 2.6. 'da malzemelerin elektrik iletkenliklerinin bant boşluğu ilişkisi incelenmiştir.



Şekil 2. 6. İletkenler, yarıiletkenler ve dielektrikler için basit band diyagram

Yalıtkan değerlik bandı ve iletim bandı arasındaki bant boşluğu büyüktür. Bu yüzden akım iletmez. Bir yarıiletkendeki bant boşluğu bir yalıtkanla karşılaştırıldığında daha küçüktür ve değerlik bandındaki değerlik elektronlarının harici enerji alırsa iletim bandına atlamasına izin verir. Bakır gibi bir iletkende bant boşluğu olmayıp, iletim bandı ve değerlik bandı çakışır. Bu da elektronların iletim bandına serbestçe hareket edebileceği anlamına gelir [21].

2.3.4. Yarıiletken katkılama

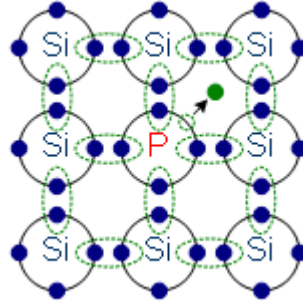
Gerçek silikonlar ve germanyumlar kendiliğinden yarıiletkenler olarak sınıflandırılırlar, yani kimyasal olarak saftırlar ve yarıiletken malzemelerden başka bir şey içermezler. Ancak bu gerçek yarıiletken malzemeye eklenen safsızlıkların miktarı kontrol edilerek iletkenliklerini değiştirmek mümkündür. Sırasıyla serbest elektronlar veya deşikler üretmek için bu doğal malzemeye donörler veya alıcılar adı verilen çeşitli safsızlıklar ilave edilebilir.

Yarıiletken atomlara verici veya alıcı atom ekleme sürecine doping(katkılama) denir. Katkılı silikon artık saf olmadığı için, bu donör ve alıcı atomlar topluca "safsızlıklar" olarak adlandırılır ve bu silikon malzeme, yeterli sayıda safsızlıkla katkılanarak N tipi veya P yarıiletken malzeme tipine dönüştürülebilir [22].

Katkılama, yarıiletkenlerdeki elektron ve deşik sayısını değiştirmek için kullanılan bir tekniktir. Katkılama, periyodik tablonun IV. grubundaki yarıiletken malzemeler V. grup atomlarıyla katkılılandırıldığında N-tipi malzeme elde edilir. P-tipi malzemeler ise, grup IV'teki yarıiletken malzemelerin grup III atomları ile katkılılandırıldığında oluşturulur.

N-tipi malzemelerde mevcut elektronların sayısı artırılarak yarıiletkenin iletkenliği artırılır; P-tipi malzemelerde ise mevcut deşik sayısı artırılarak iletkenlikleri artırılır.

N Tipi Katkılama işleminde saf silikona arsenik, fosfor ilavesi ile kristal, N tipi bir malzeme haline gelir. Arsenik atomu, kovalent bağlanma sürecine katılmayan ek elektronlara veya negatif yüklere sahiptir. Beş değerli katkı maddesi silikon atomlarından daha fazla bir dış elektrona sahiptir. Beş dış elektron bir silikon atomu ile birleşirken, beşinci elektron hareket etmekte serbesttir ve şarj taşıyıcı görevi görür. Bu serbest elektron, silikonun iç iletkenliğine neden olan elektronlardan daha fazla değerlik bandından iletim bandına kaldırılmasını gerektirir. Bir elektron yayan katkı maddesi, bir elektron vericisi (dopant) olarak bilinir.

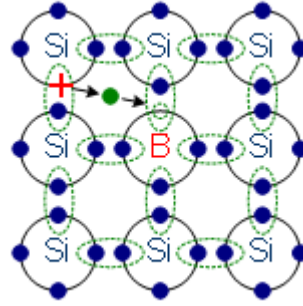


Şekil 2. 7. N Tipi Katkılama Gösterimi

Dopantlar, negatif yük taşıyıcılarının kaybı ile pozitif olarak yüklenir ve kafes içine yerleştirilir, sadece negatif elektronlar hareket edebilir. İletkenliği serbest (negatif) elektronlara dayanan katkılı yarı-metaller n tipi veya n katkılıdır. Şekil 2.7.'de atomların bağlanmasıyla oluşan N tipi bir malzeme gösterilmiştir. Bunlar daha fazla sayıda serbest elektron nedeniyle çoğunluk yük taşıyıcıları olarak adlandırılırken, serbest mobil deşikler azınlık yük taşıyıcıları olarak adlandırılır.

P-Tipi katkılama işleminde saf silisyuma indiyum (In) veya galyum (Ga) eklendiğinde, P tipi bir malzeme oluşur. Bu tip katkı malzemesi üç değerlik elektronuna sahip olup, dördüncü bir elektron ile bağ yapmaya çalışır. Bu nedenle değerlik bandındaki elektronlar hareketli hale gelir. Deşikler elektronların hareketine zıt yönde hareket eder.

Bir elektronun dahil edilmesiyle, katkı maddesi negatif yüklenir, bu katkılara alıcılar denir. Yine, katkı maddesi kristal kafes içine sabitlenir, sadece pozitif yükler hareket edebilir. Şekil 2.8.'de de gösterilen pozitif deşikler nedeniyle bu yarıiletkenlere p-iletken veya p-katkılı denir. N-katkılı yarıiletkenlere, deşikler çoğunluk yük taşıyıcıları, serbest elektronlar azınlık yük taşıyıcılarıdır [23].

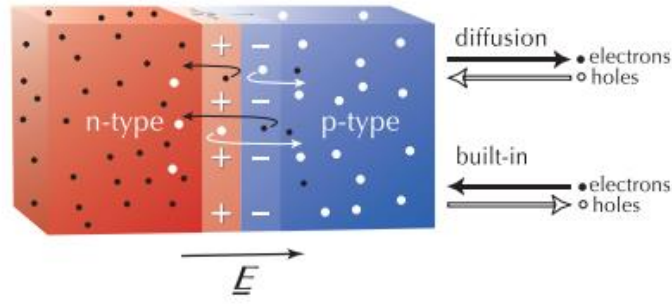


Şekil 2. 8.P Tipi Katkılama Yöntemi

2.3.5. PN eklem oluşumu

Silikon kristalinin katkısı nedeniyle, n tipi tarafta çok sayıda mobil elektron, ancak p tipi tarafta çok az hareketli elektron vardır. Serbest elektronların rastgele termal hareketi nedeniyle, n-tipi taraftaki elektronlar p-tipi tarafa yayılmaya başlar. Benzer şekilde, silikonun katkısı nedeniyle, p tipi tarafta çok sayıda hareketli deşik vardır, ancak n tipi tarafta çok az hareketli deşik vardır. Bu nedenle p-tipi taraftaki deşikler n-tipi tarafa yayılmaya başlar. Bu sabit iyonlar, n-tipi ve p-tipi malzeme arasındaki eklemde bir elektrik alanı oluştururlar. Bu elektrik alanı, n tipi malzemedeki pozitif yüklü iyonlardan p tipi malzemedeki negatif yüklü iyonlara doğrudur. Serbest elektronlar ve deşikler, elektronlar pozitif fosfor iyonlarına ve deşikler negatif bor

iyonlarına doğru çekilirken bu "yerleşik" elektrik alanından etkilenir. Böylece, bu alan, bazı elektron ve deşiklerin difüzyonun neden olduğu akışa zıt yönde akmasına neden olur. Bu zıt akışlar, nihayetinde, elektrik alanı nedeniyle geri akan elektron sayısını tam olarak dengeleyen difüzyon nedeniyle akan elektron sayısı ile kararlı bir dengeye ulaşır. Eklem boyunca elektronların net akışı sıfırdır ve eklem boyunca deşiklerin net akışı da sıfırdır. Eklem boyunca net bir akım akışı olmamasına rağmen, eklemde bir elektrik alanı oluşturulmuştur. Diyotların, transistörlerin ve güneş pillerinin çalışmasının temeli bu elektrik alanıdır. Şekil 2.9.'da bu elektriksel alanın elektron ve deşikler ile nasıl oluştuğu gösterilmiştir.

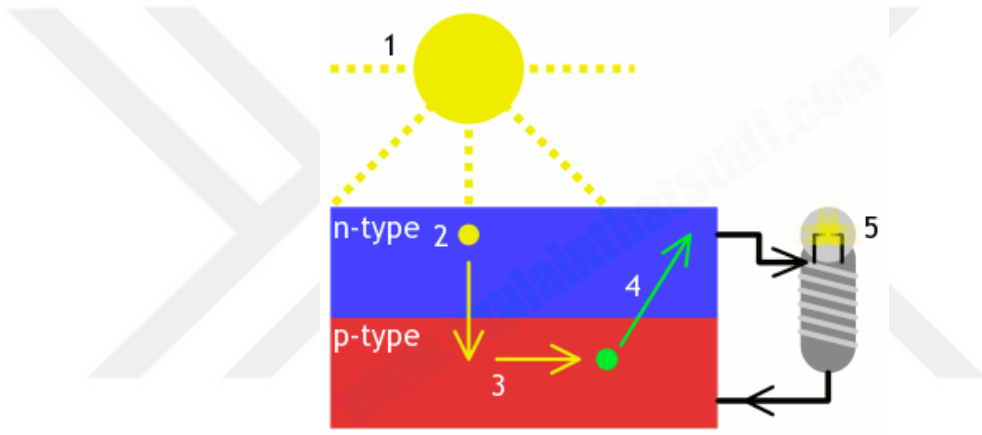


Şekil 2. 9. Elektron-Deşik Elektriksel Alan Oluşumu [24]

Güneş pilleri genellikle PN eklemli olup sadece ışığı emecek şekilde optimize edilmiş büyük diyotlardır. Güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürerek hem akım hem de voltaj üretir. Bu işlem, eklem bölgesine yasak enerji bant aralığına eşit ya da daha büyük enerjili bir fotonun gelmesi ve bu fotonun yarıiletken tarafından soğurulmasıyla başlar. Fotonun soğurulan bu enerjisi valans bandındaki bir elektron tarafından alınır. Elektron, soğurduğu bu enerjiyle geride bir elektron boşluğu bırakarak iletkenlik bandına doğru çıkar. Bu durum sonucunda bir elektron-deşik çifti meydana gelir. PN eklemli bir güneş pilinde oluşmuş olan bu elektron-deşik çiftleri, eklem bölgesinde meydana gelmiş olan bir elektrik alan tarafından elektronların N tarafına deşiklerin ise P tarafına doğru itilmesiyle birbirlerinden ayrılır. Birbirlerinden ayrılmış olan bu elektron-deşik çiftleri PN yapısının çıkış

terminallerinde bir fotovoltaiik voltaj meydana getirirler. Bu döngü başka fotonlarında eklem bölgesine girmesiyle devam eder.

Güneş pilinin çıkış terminallerini terkeden elektron daha sonra enerjisini harici devrede dağıtır ve güneş piline geri döner. Çeşitli materyaller ve süreçler potansiyel olarak fotovoltaiik enerji dönüşümü için gereklilikleri karşılayabilir, ancak pratikte neredeyse tüm fotovoltaiik enerji dönüşümü bir pn bağlantısı şeklinde yarıiletken malzemeler kullanır. Şekil 2.10.'da PN eklemli bir güneş pilinin şematik olarak yük altındaki çalışma prensibi verilmiştir [19].



Şekil 2. 10. Güneş Pili Şematik Gösterimi

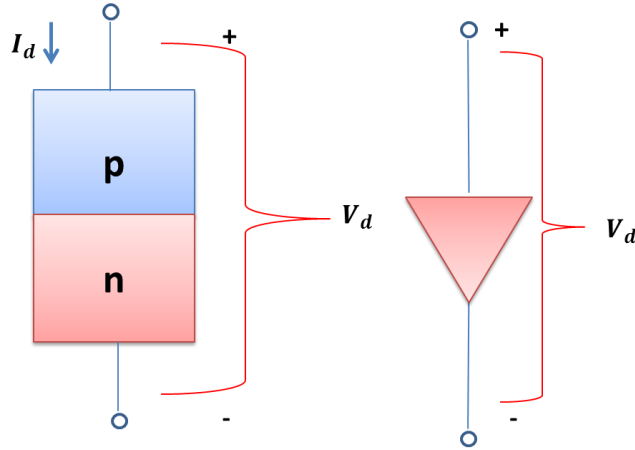
1. Güneş ışığı hücre üzerinde parladığında, fotonlar (hafif parçacıklar) üst yüzeye çarpar.
2. Fotonlar (sarı lekeler) enerjilerini hücre içinden aşağı taşırlar.
3. Fotonlar enerjilerini alt p tipi tabakadaki elektronlara (yeşil lekeler) bırakırlar.
4. Elektronlar bu enerjiyi bariyer boyunca üst n-tipi tabakaya atlamak ve devreye ulaşmak için kullanırlar.
5. Devre etrafından akan elektronlar lambayı yakar.

2.4. Güneş Piliin Elektriksel Karakteristikleri

2.4.1. Akım-voltaj (I-V) karakteristiği

Güneş pili karakterizasyonu için en yaygın kullanılan yöntem, akım-voltaj veya diğer adıyla I-V ölçümü yöntemidir. Bu yöntem güneş pili hücrelerinin çok önemli elektriksel özelliklerini verir. Böylece güneş ışığı altında daha yüksek verimlilik elde edebilmek için hücre parametrelerinin nasıl değiştirilmesi gerektiği hakkında bilgi edinilmesini sağlar. I-V karakteristiği, malzemelerin ve ara yüzlerin iletkenliği, eksiton veya yük taşıyıcı difüzyon uzunlukları, tuzaklar ve rekombinasyondan etkilenir.

Güneş pilleri Şekil 2.11.'de de görüldüğü gibi pratikte diyotlardır ve aydınlatma altında çıkış elektrotlarında potansiyel bir fark oluşur. Güneş pili hücresinin elektrotlarına bir direnç bağlanırsa akım akar. Diyot terminalleri boyunca bir düz beslem (V_d) uygulandığında akım diyodun p bölgesinden n bölgesine doğru kolayca akacaktır.



Şekil 2. 11. Güneş Pili PN Elektriksel Gösterimi

Ayığta ters besleme uygulayıp akımın ters yönde akmasını sağlamak sadece nano amper ve piko amper mertebesinde çok küçük ters doyma akımlarına (I_0) sebep olacaktır. Bu doyma akımına “karanlık doyma akımı” adı verilir. Bu akım termal

olarak üretilen taşıyıcıların sonucundadeşiklerin p tarafına, elektronların ise n tarafına akması sonucu oluşur.

Fotovoltaik güneş pilleri temel olarak bir p-n eklemdir. Buna göre ideal diyot akım-gerilim ilişkisi 2.1denklemleri ile verilir.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

I_0 : Karanlık doyma akımı

V: Kontaklar arasına uygulanan voltaj

I_d : Diyottan geçen akım

T: Sıcaklık (Kelvin cinsinden)

q: Elektronik yük

k: Boltzmann sabiti

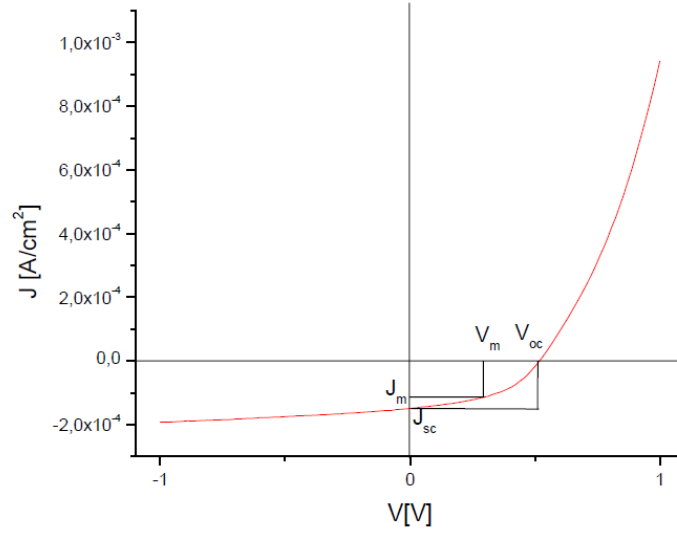
Hücreye ışık düştüğü zaman, hücre güç üretmeye başlar ve I-V eğrisi formunu alarak dikey yönde kayar ve bu yüzden güneş pilleri ideal diyot olmaktan çıkar. Denklem I_L olarak ifade edilen ışık tarafından üretilen akım eklenir ve 2.2denklemleri ile ifade edilir.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (2.2)$$

Bir güneş pilinin performansının değerlendirilmesinde en önemli parametre verimlilik (η) olup, hücrenin ürettiği maksimum elektrik gücünün ($P_{maks.}$) kendisinden aldığı ışık gücüne oranı ($P_{ışık}$) olarak tanımlanır ve denklem 2.3 ile verilir:

$$\eta = \frac{P_{maks.}}{P_{ışık}} \quad (2.3)$$

I-V ölçümü sırasında hücre aydınlatılır. Hücrenin elektrotlarında oluşan voltaj ve akan akım ölçülür. Bir güneş pili hücresinin akım-gerilim grafiği Şekil 2.12.'de görülmektedir.



Şekil 2. 12.Güneş Pili IV Grafiği

Güneş pili hücresinin elektrik gücü, akım ve gerilimin bir ürünüdür. I-V eğrisinin bir noktasında elektrik gücünün bir maksimumu vardır. Bu maksimum güç, sırasıyla $J_{maks.}$ ve $V_{maks.}$ olarak işaretlenmiş akım ve voltajın oluşturduğu güçtür. Böylece $P_{maks.}$ elde edilir.

I-V eğrisinde J_{sc} ve V_{oc} olmak üzere iki önemli parametre daha vardır. J_{sc} , kısa devre akımı olarak adlandırılır ve IV eğrisinin y eksenini kestiği noktadır. Orada uygulanan harici voltaj sıfırdır. Bu noktada ölçülen akım aslında elektrotların kısa devre yapıldığı yani tamamen güneş pili tarafından üretilen akımdır.

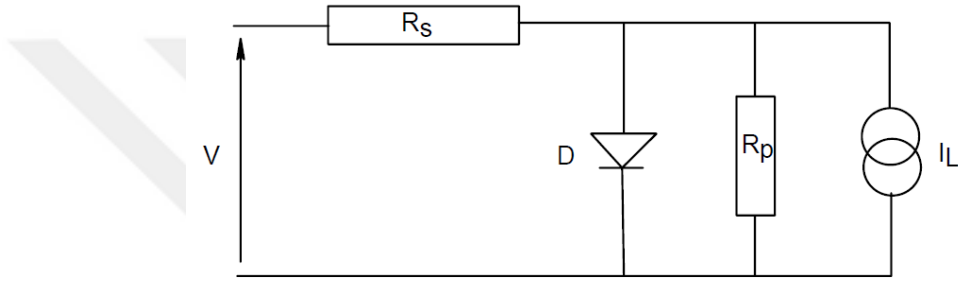
İkinci önemli parametre ise açık devre voltajı (V_{oc}) olup, bu parametre IV eğrisinin X eksenini kestiği noktadır. Bu voltaj, güneş pili hücresinin iç voltajına tam olarak eşit olup, pilden hiçbir akım akmayacaktır. Bu noktalar esasen, hücrenin verebileceği maksimum akım ve voltajdır. İdeal bir diyot durumunda, bu parametreler güneş pili hücresinin maksimum gücünü verir. Ancak gerçekte durum böyle olmayıp, yukarıda anlatılan parametrelere bir faktör daha eklenir ki, bu faktöre doldurma faktörü (FF) adı verilir ve denklem 2.4 ile ifade edilir.

$$FF = \frac{J_{maks.} V_{maks.}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.4)$$

Doldurma faktörü, güneş pilinin IV eğrisinin ideal bir diyotun eğri formundan ne kadar saptığını gösterir. Hücrenin güç dönüştürme verimliliği yüzde cinsinden aşağıdaki 2.5denklemleri kullanılarak hesaplanır.

$$\eta = \frac{(FF)I_{sc}V_{oc}}{P_{ışık}} \times 100 \quad (2.5)$$

Bir güneş pilinin elektronik eşdeğer devresi Şekil 2.13. de verilmiştir [25]. Eşdeğer devreden hareketle IV eğrisi aşağıdaki 2.6 denklemleri ile fit edilebilir[26,27].



Şekil 2. 13. Güneş Pili Eş Değer Devresi

$$I = \frac{I_L - \frac{V}{R_p}}{1 + \frac{R_s}{R_p}} - \frac{I_0}{1 + \frac{R_s}{R_p}} \left(e^{\frac{V - IR_s}{n k T / q}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

I = Ölçülen akım, V = Elektrotlarda oluşan voltaj, I_0 = Ters akım,

I_L = Aydınlik altında hücre tarafından üretilen foto-akım n =İdealite faktörü

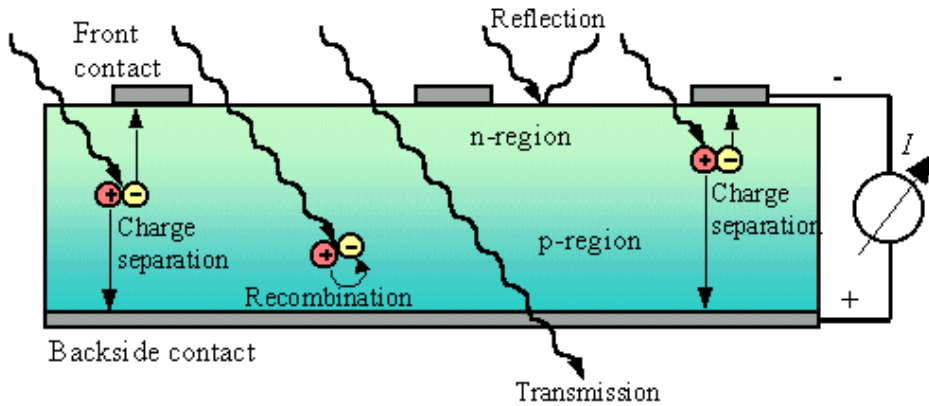
K = Boltzmann sabiti T = Kelvin cinsinden sıcaklık, q =Elektronik yük

I-V eğrisinden iki önemli parametre daha çıkarılabilir ki, bunlar güneş pili hücresinin paralel (R_p) ve seri dirençleridir (R_s). Seri direnç, kontakt direnci ile yarıiletken materyalin yük transfer direncinden meydana gelir ve maksimum gücü etkiler.Büyük R_s değerlerinde V_{oc} bozulmadan kalırken doygunluk faktörü ve kısa devre akımı etkilenir.

I-V eğrisine bakıldığında, paralel direnç temel olarak 0V civarındaki eğrinin eğimidir. Düşük paralel direnç, foto-akımı için alternatif bir akım yolu sağlayarak güç kaybına yol açar. Bu durum dolgu faktörünü azaltır ve açık devre voltajını düşürür. Kısa devre akımı ise aynı kalır.

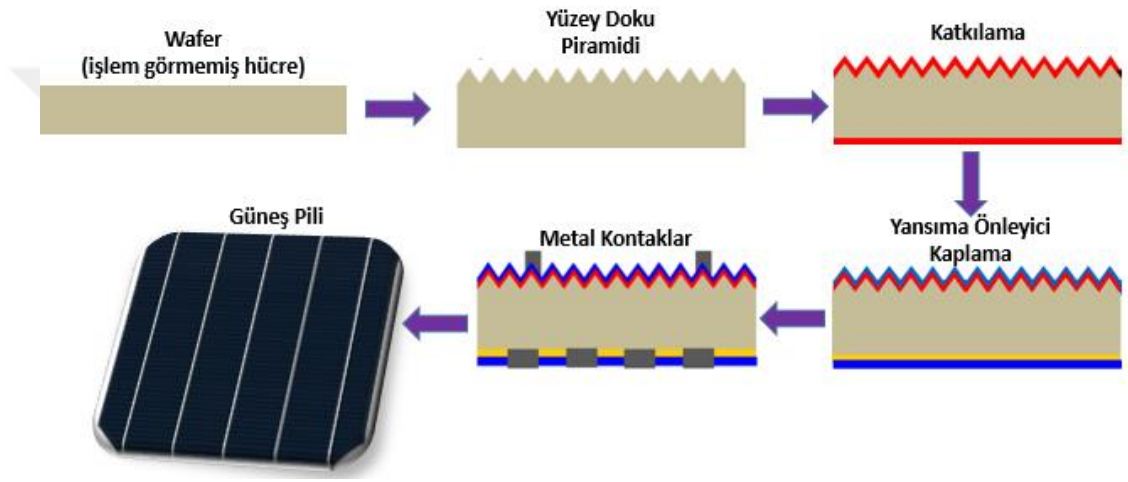
2.5. Güneş Pili Üretim Basamakları

Elektronlar ve geride bıraktıkları deşikler, sırasıyla, katı madde içinde çiftler halinde görülen negatif ve pozitif yük taşıyıcılarıdır. Yarıiletkenler güneş pilleri üretmek için kullanılır ve yarıiletken malzemenin özellikleri gelen güneş ışığı fotonlarının elektron-deşik çiftlerinden elektron salınmasını kolaylaştırır. Arkalarındaki deşikleri bırakarak serbest hale geçen elektronlar katı içinde serbestçe hareket edebilir. Ancak, bu hareketlerin net bir yönü yoktur. Elektriği kullanmak için elektron toplamak gerekir. Yarıiletken malzeme bu nedenle 'saf olmayan' atomlarla kirlenir. İki farklı atom türü, yarıiletken içinde n tipi ve p tipi bir bölge üretir ve bu iki komşu bölge bir elektrik alanı oluşturur. Bu alan daha sonra elektron toplayabilir ve fotonlar tarafından serbest bırakılan elektronları n tipi bölgeye çeker. Deşikler p-tipi bölgeye zıt yönde hareket ederler. Bununla birlikte, güneş ışığından gelen enerjinin tamamı serbest elektron üretmez. Bunun birkaç nedeni vardır. Güneş ışığının bir kısmı güneş pilinin yüzeyine yansır veya hücreden geçer. Bazı durumlarda, n-tipi ve p-tipi bölgelere gelmeden önce elektronlar ve deşikler yeniden birleşir. Dahası, fotonun enerjisi çok düşükse (kızılötesi gibi uzun dalga boylarındaki ışıklar için) elektronun serbest bırakılması yeterli değildir. Öte yandan, foton enerjisi çok yüksekse, elektronu serbest bırakmak için enerjisinin sadece bir kısmına ihtiyaç duyulur ve geri kalanı ısıya dönüşür. Şekil 2.14. de foton iletimi gösterilmiştir.



Şekil 2. 14. Güneş hücresi foton iletimi

Güneş pili oluşturduğu pn eklem ile yarıiletken aygıt olma özelliği kazanır. Bu pn ekleme düşen fotonların daha fazlasını hapsetmek için yüzey piramidi yapısını kullanır. Fotonların oluşturduğu yansıma kayıplarını önlemek için yansıma önleyici kaplama (ARC) yüzey piramid yapısının üstüne eklenir. Akım toplamak için ise ön ve arkada bulunan metal kontaklar kullanır. Standart kristal silikon güneş pilinin yapısı ve katmanları Şekil 2.15.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2. 15. Geleneksel Güneş Pili Üretim Akışı ve Güneş Pili Gösterimi

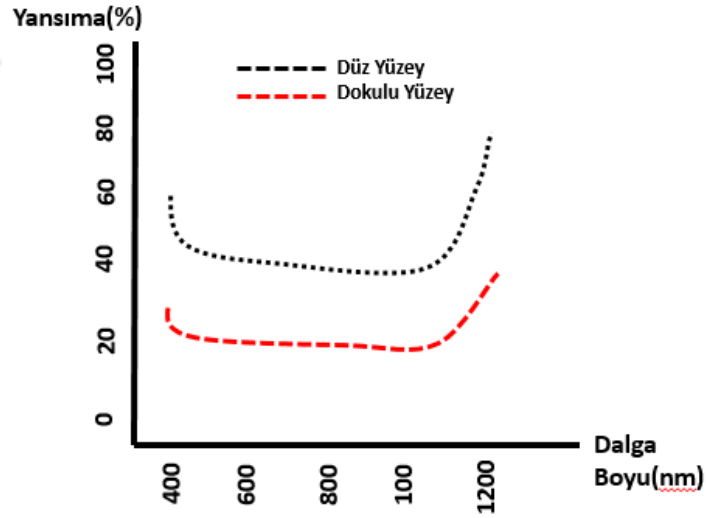
2.5.1. Yüzey doku piramidi

Fotovoltaik güneş pilleri ışık yoluyla gelen fotonları emer ve elektron-deşik çifti oluşturur. Hücre üzerine düşen fotonların miktarı hücrenin elektriksel parametrelerini etkilemektedir. Bunun için foton miktarının fazlalığı güneş pilleri için istenen bir durumdur. Silikon 1.12 ev bant boşluğuna sahiptir ve bu bant boşluğunun üzerindeki fotonları emebilir. Bu bant boşluğu dalga boyu aralığı 300 - 1100 nm arasına denk gelmektedir.

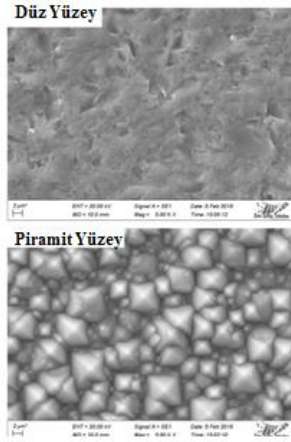
Tektüre, hem mono hem de polikristalin olan bir silikon güneş pili üretiminde önemli bir adımdır. Bu işlem, wafer kesmenin neden olduğu yüzey hasarını ortadan kaldırır. Aynı zamanda waferların yansımalarını azaltıp yüzeyde küçük yumrular oluşturarak ve

hücreye (özellikle daha uzun dalga boylu fotonlar) ışık tutmayı dahil ederek hücre verimliliğini de artırır.

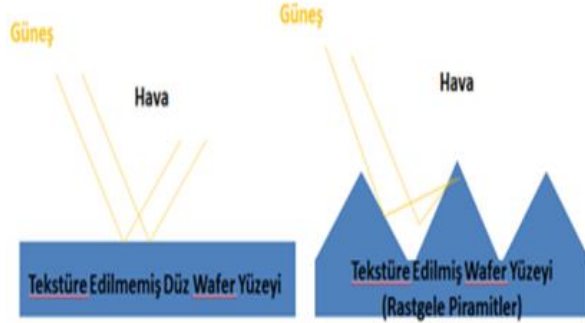
Silikon tabanlı güneş hücrelerinde tekstüre tipik olarak sulu bir KOH veya NaOH artı IPA çözeltisi veya bir yüzey aktifleştirici madde kullanılarak gerçekleştirilir. Güneş pilinin yüzeylerindeki piramidal doku gelen ışınların normalden farklı bir açıyla kırılmasına neden olur. Böylece ışınlar hücre içinde daha fazla hareket edip daha fazla yol alarak elektron-deşik çifti oluşumuna katkıda bulunacaktır. Elektron-deşik çiftinin birleşmeden ayrılması güneş hücreleri için istenen bu durum değildir. Elektron-deşik çiftinin birleşmeden ayrılması hücrede oluşabilecek akımı engeller bu olaya rekombinasyon denir. Tekstüre işlemi rekombinasyon kayıplarını azaltır[29]. Şekil 2.16.' da yüzey piramit yapısının güneş hücresi üzerinde ki yansıtma etkisini anlatmaktadır.



Şekil 2. 16. Optik yansıtma verilerinin temsili grafiği



(a)



(b)

Şekil 2. 17.Dokusuz düz silikon ile piramit silikon wafer yüzeyi arasındaki fark ve dokusuz düz silikon ile rasgele piramit dokulu silikon wafer yüzeyi arasındaki ışık yansıma farkının gösterimi [29]

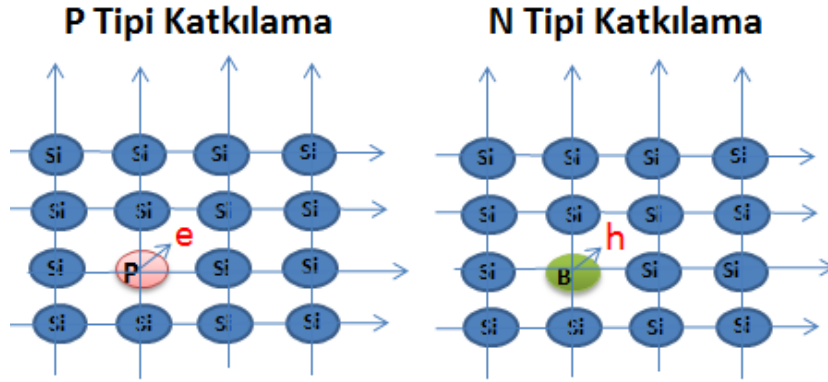
Hücreyi tekstüre ederek ışık yakalamanın üç ana hedefi vardır:

1. Ön yüzey yansıtıcılığını azaltmak,
2. Hücrenin içinden geçen ışığın yol uzunluğunu arttırmak,
3. Geliş açısını daha büyük yaparak ön yüzey/hava arasında toplam iç yansıma ile arka yüzeyden yansıyan içeride kalan ışık miktarını arttırmak.

2.5.2.Katkılama (Difüzyon)

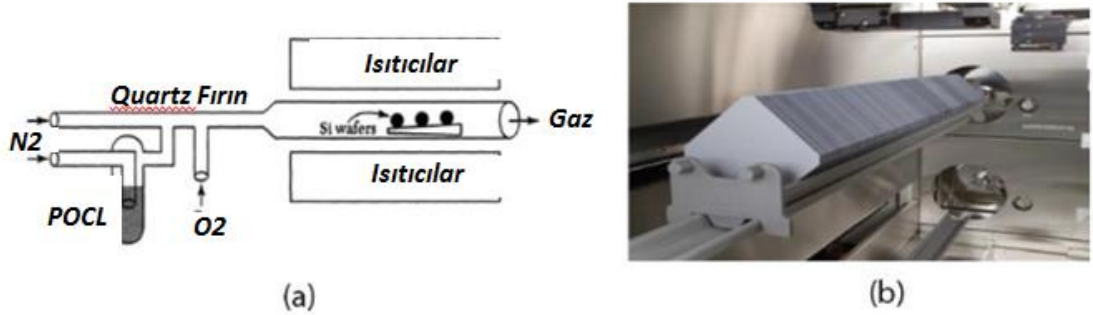
Yüksek sıcaklık süreçleri güneş pili üretiminin önemli bir parçasını oluşturur. Bu tür işlemlerin örnekleri, difüzyon, serigrafi baskı kontaklarının ateşlenmesi, yüzey pasivasyon katmanlarının aktive edilmesi veya pn eklem bölgesinin oluşturulmasıdır.

Genelde silisyum pullara diyot özelliği kazandırmak ve fotovoltaiik etkiyi sağlamak amacıyla fosfor veya bor katkılama işlemi yapılır. Katkılama işlemi sonucunda silisyum kristali içerisinde silisyum atomları yerine geçen fosfor veya bor atomları, kristale ekstra elektron sağlayarak veya elektron sayısını eksilterek, n-tipi veya p-tipi özellik kazandırır. Şekil 2.18. de elektron ve deşiklerinin bağlanması ile oluşturulan katkılamanın şematik gösterimi yer almaktadır.

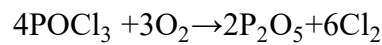
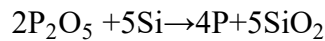


Şekil 2. 18. Katkılama Şematik Gösterimi

Yayıcı difüzyon endüstriyel güneş pili üretimindeki en önemli termal adımlardan biridir. Kristalin p-tipi silikon güneş pillerinin n-tipi yayıcısı, fosfor (P) difüzyonuyla oluşturulurken n-tipi silikon güneş pillerinde bu işlem boron difüzyonuyla oluşturulur. Difüzyon, ön çökeltme ve içeri girme olmak üzere genelde iki aşamada gerçekleştirilir. Ön çökeltme aşamasında sıvı POCl_3 ve N_2 gazı sıvının içine köpürtülerek buharlaştırılır. POCl_3 buharlaşır ve yüzeyinde birikir. Oksijen varlığında, 850°C sıcaklıkta fosfosilikat cam (PSG) oluşur. Şekil 2.19. 'da temsili fırın (difüzyon) örneği gösterilmektedir.



Şekil 2. 19. Difüzyon işleminin şematik gösterimi ve difüzyon ekipmanının temsili görüntüsü



Difüzyon aşaması sonrasında wafer üstünde ince bir PSG tabakası bulunur. Bu ince fosfosilikat cam tabakası nedeniyle üst wafer yüzeyi camsı hale gelir ve güneş pillerinin mavi tepkisini bozar. PSG katmanını çıkarmak için belirli kimyasallar ve deiyonize suya daldırıp aşındırma işlemi yapılabilir [30].

2.5.3. Yansıma önleyici kaplama

Yüzey dokusuna ek olarak yansımayı daha da azaltmak ve hücreye emilen ışık miktarını arttırmak için yüzeye ARC kaplama uygulanır.

ARC oluşturmak için silisyum nitrür (Si_3N_4) ya da titanyum oksit (TiO_2) kullanılır. Güneş pilinin rengi yansıma önleyici kaplamanın kalınlığı değiştirilerek değiştirilebilir.

Silikon güneş pillerinde hem tek katmanlı hem de çift katmanlı ARC kaplamalar, bu yansıma kayıplarını minimumda tutmak için kullanılır. Belirli bir ARC kaplamasının optimum kalınlığını bulmak için kaplanacak güneş pilinin maksimum kuantum verimliliğine sahip olduğu dalga boyunu seçmesi gerekir. ARC kaplama olarak özel malzeme seçimi kırılma indisine, birikme kolaylığına, kalınlık homojenliğinin kontrol edilebilirliğine ve kaplamanın özelliklerine bağlıdır. Bir başka önemli ölçüt ise, kaplama işleminin gerçekleştirildiği işlem sıcaklığıdır.

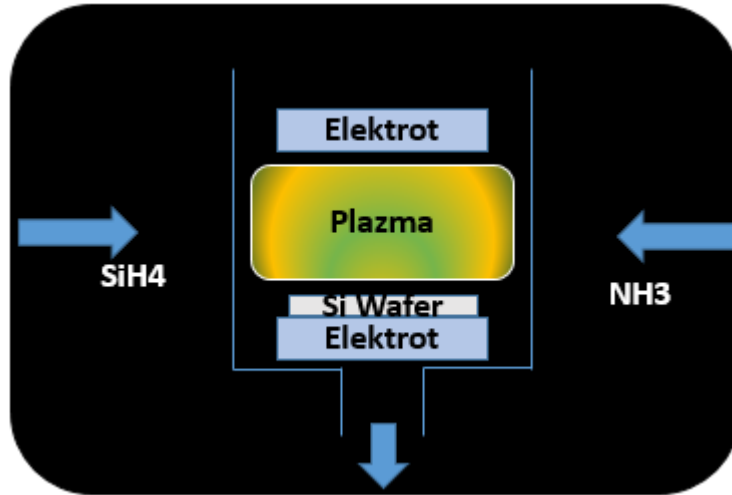
Yarıiletken endüstrisinde, wafer üzerindeki tabakaları biriktirmek için temel olarak üç yöntem vardır:

- 1) Sadece birkaç uygulama için kullanılan ve yüksek sıcaklık gerektiren “Atmosferik Basıncılı Kimyasal Buhar Birikimi” (APCVD). APCVD yöntemi çoğunlukla mikro elektronikte kullanılır.
- 2) Tüp fırınlarda ve APCVD yöntemi gibi uygulanacak biriktirme işlemini içeren “Düşük Basıncılı Kimyasal Buhar Biriktirme” (LPCVD). Bu yöntem yüksek sıcaklıklar gerektirir.
- 3) ARC (anti reflection coaing) wafer üzerinde biriktirilmesi için en yaygın yöntem olan “Plazma Geliştirilmiş Kimyasal Buhar Birikimi” (PECVD). Yarıiletken teknolojisine bu kaplama işlemi daha uygundur. Çünkü CVD işlemi ile 900 °C’de

biriktirilebilir, ancak zayıf homojenliğe sahiptir. Yüksek çökelme sıcaklığı, ömür boyu bozulmalara bağlı olarak güneş pili parametrelerinde bozulmaya neden olur.

PECVD işlemi daha yaygın kullanılır. ARC kaplama gaz halinde bulunur ve wafer üzerine katılan kimyasal bir reaksiyon işlemi yoluyla olur. Bu nedenle yarıiletken teknolojisinde sıkça tercih edilir [31].

Plazma ile zenginleştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD) işlemi, sadece yansımayı azaltmakla kalmayıp aynı zamanda ön taraf n-tipi yayıcıyı ve kütleyi pasifleştiren bir ARC $\text{SiN}_x\text{:H}$ tabakası biriktirmek için uygundur. PECVD sisteminin bir şeması Şekil 2.20.'de gösterilmektedir. Waferların, ön tarafları birbirine bakacak şekilde hazneye yüklenir. 400- 450 °C sıcaklıkta çalışan işlem gazları amonyak (NH_3) ve silan (SiH_4) bazlı plazma, hidrojenlenmiş $\text{SiN}_x\text{:H}$ tabakasını oluşturur. $\text{SiN}_x\text{:H}$ filmine dahil edilen hidrojen ateşleme adımı sırasında yığın halinde yayılır ve güneş pili performansını arttırmak için sarkan bağları pasifleştirir.



Şekil 2. 20. PECVD sisteminin şeması

2.5.4 Metal kontaklar

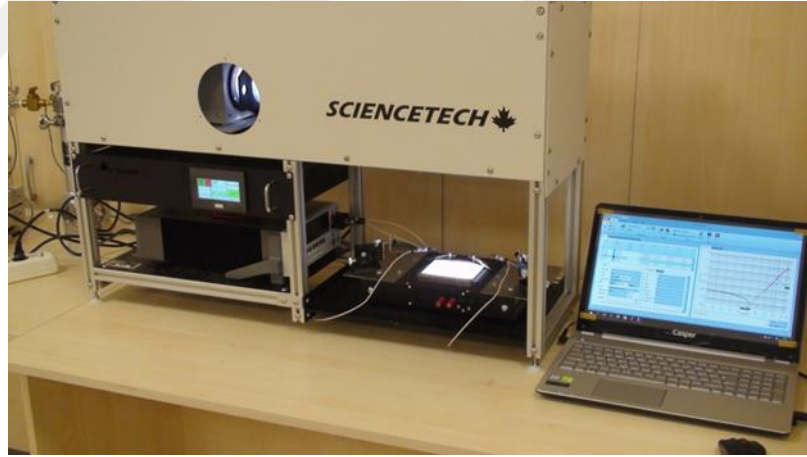
Güneş pilinin verimliliğini artırmak için metal kontaklardan kaynaklı direnç kayıpları en aza indirilmelidir. Metal kayıplarının ana nedenleri temas direnci ve kullanılan metalin direncidir. Hücre tarafından üretilen akımı toplayıp devreye iletebilmek için,

hücrenin ön ve arka yüzeyi metal kaplanır. Metal kaplama Serigrafi (Screen Printing) yöntemi ile yapılır. Bu yöntemde pasta kıvamındaki metal, hücre yüzeyine, bir maske yardımı ile istenilen şekilde uygulanır ve kurutularak son halini alır. Hücrenin ön yüzü gümüş, arka yüzü ise gümüş ve alüminyum ile kaplanır.

Serigrafi sonucu yapılan ön kontaklar, yalıtkan SiN tabakasının üzerinde bulunduğu için akım çekemezler. Bu sorunu da aşmak için örnekler yaklaşık 900°C fırınlarda, 10-20 saniye boyunca tavlanylup soğutulur. Tavlama sonucunda gümüş, SiN tabakayı delerek silisyuma dokunur. Ayrıca arka yüzeydeki alüminyum da, silisyum içine difüz ederek arka yüzeyi p^+ katkı seviyesine getirir.

BÖLÜM 3. MATERYALVEYÖNTEM

Güneş pili hücrelerinin karakterizasyonları için monokristal ve polikristal güneş pili hücreleri satın alınmıştır. Bu pillerin ± 1 V aralığında akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılmıştır. I-V deneysel ölçümlerinden elde edilen karakteristik eğriler yardımıyla hücrelerin idealite faktörleri (n), doyma akımları (I_0), engel yükseklikleri (Φ_B), kısa devre akımları (I_{sc}), açık devre voltajları (V_{oc}), doluluk faktörleri (FF), maksimum güçleri (P_m), verimleri (η), seri dirençleri (R_s) ve şönt dirençleri (R_{sh}) gibi performans parametreleri tayin edilmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında Sciencetech marka filtre güneş simülatörü kullanılarak karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde (50, 100, 140, 250 ve 300 W/m²) gerçekleştirilmiştir (Şekil.3.1.).



Şekil 3. 1. Akım-gerilim ölçümlerinde kullanılan Sciencetech marka filtre güneş simülatörü

BÖLÜM 4 ARAŞTIRMA BULGULARI

Şekil 4.1.'de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin karanlık ortam altındaki uygulanan voltaja bağlı I-V eğrileri gösterilmiştir. Güneş pilleri, genelde PN eklemlere sahip olup, Schottky diyotlar (metal/yarıiletken kontaklar) gibi bir davranış sergilerler. Şekil 4.1. deki karakteristiklerden açıkça görüldüğü üzere her iki pil de doğrultucu bir davranış sergilemiş olup, her iki pilin de $\pm 0,8$ V'da doğrultma faktörleri (düz beslem akımının ters beslem akımına oranı) sırasıyla 529 ve 394 olarak bulunmuştur.

Güneş pillerinin elektriksel karakteristiklerini incelerken akım-gerilim ilişkisini, termal enerji üzerindeki baskın etkinin yük taşıyıcılarının hareketini yönlendirmede rol aldığı saf termiyonikemisyon (TE) teorisi ile modelleyebiliriz [32]. Bu teori, termal aktivasyonun aygıtın akım akışı üzerinde baskın bir rol oynadığından dolayı diyot parametrelerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır. Buna göre uygulana harici bir voltaj bölgesine akım iletim mekanizması denklem 4.1 ile verilir [32, 33].

$$I=I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT} \right) -1 \right] \quad (4.1)$$

V = Harici voltaj, n = İdealite faktörü, R_s = Seri direnç,

I_0 = Ters doyma akımı, T = Mutlak sıcaklık, q = Elektronik yük,

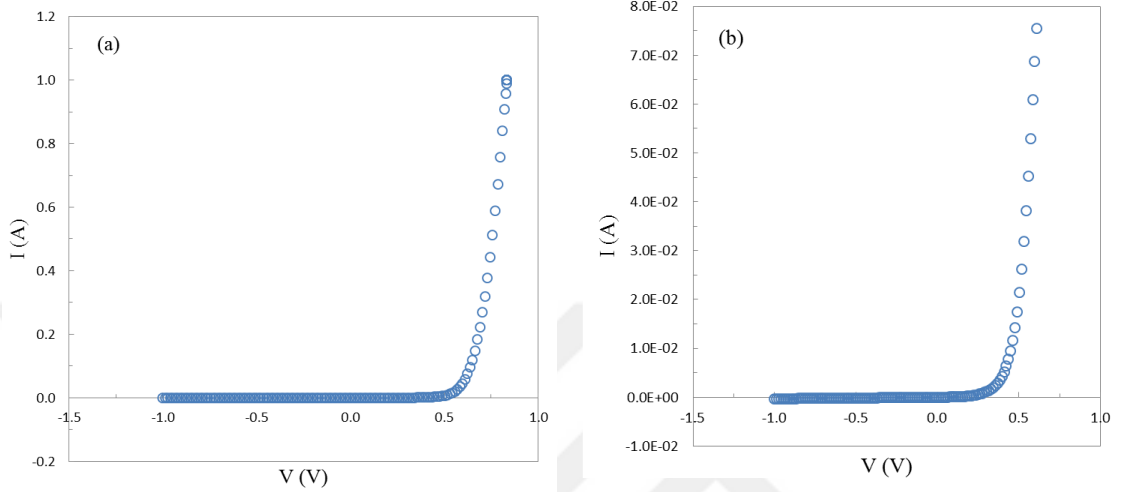
k = Boltzmann sabiti

Bu yöntem, yüksek termal enerjiye sahip taşıyıcıların diyottaki metal ve yarıiletken tabakala arasındaki engel yüksekliğini geçebileceğini varsayar [9]. 4.1 denklemi seri direnç modifikasyonunu ve ideallikten sapmayı belirlemek için kullanılan bir n parametresini içerir. Bu denklemde doyma akımı olarak tanımlanan I_0 , azınlık yük taşıyıcılarının hareketinden kaynaklanır ve denklem 4.2 ile verilir [33].

$$I_0=AA^*T^2\exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (4.2)$$

A = Diyot alanı, A^* = Etkin Richardson sabiti (p-tipi Si için $32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$),

Φ_B = Sıfır beslem engel yüksekliği



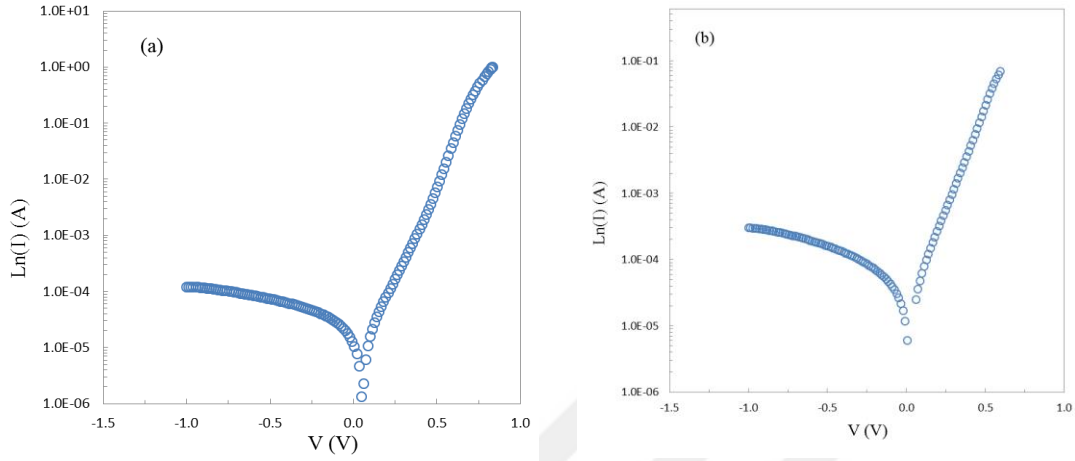
Şekil 4. 1. Güneş pili hücrelerinin karanlık ortamda Monokristal ve Polikristal I-V eğrileri

Şekil 4.2. ' de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin karanlık ortam altındaki uygulanan voltaja bağlı yarı-logaritmik $\ln(I)$ - V eğrileri verilmiştir. Şekil 4.2.'den görüldüğü üzere, her iki pil hücresinin de deneysel eğrileri düz beslem bölgesinde eksponansiyel, ters beslem bölgesinde ise doymuş akım davranışı göstermiştir. Bu da her iki aygıtın iyi bir doğrultma davranışı gösterdiğini doğrulamaktadır. I_0 ve n değerleri, sırasıyla eğrinin lineer bölgesinin akım eksenini kestiği noktadan ve eğrinin eğiminden (denklem 4.3) elde edilmiştir.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (4.3)$$

Buradan, Φ_B değerleri, belirli bir sıcaklık için aşağıdaki 4.4 denklemi yardımıyla elde edilmiştir. Her iki pil için de elde edilen bu parametreler Tablo 1.'de verilmiştir.

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A A^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.4)$$



Şekil 4. 2. Güneş pili hücrelerinin karanlık ortamda Monokristal ve Polikristal. yarı-logaritmik $\ln(I)$ - V eğrileri

Diğer taraftan, yarı-logaritmik düz beslem I - V çizimlerinin ara düz beslem bölgesinde lineer bir davranış gösterdiği, ancak R_s 'nin yeterince yüksek düz beslem bölgesindeki etkisinden dolayı da doğrusallıktan saptığı açıktır.

Elde edilen n değerleri 1'den büyük çıkmıştır. Güneş pilleri için n değerleri genellikle 1 ile 5 arasındadır [34]. Buradan da her iki güneş pili hücresi için elde edilen n değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4. 1. Güneş pili hücrelerinin karanlık ortam altındaki elektriksel parametreleri

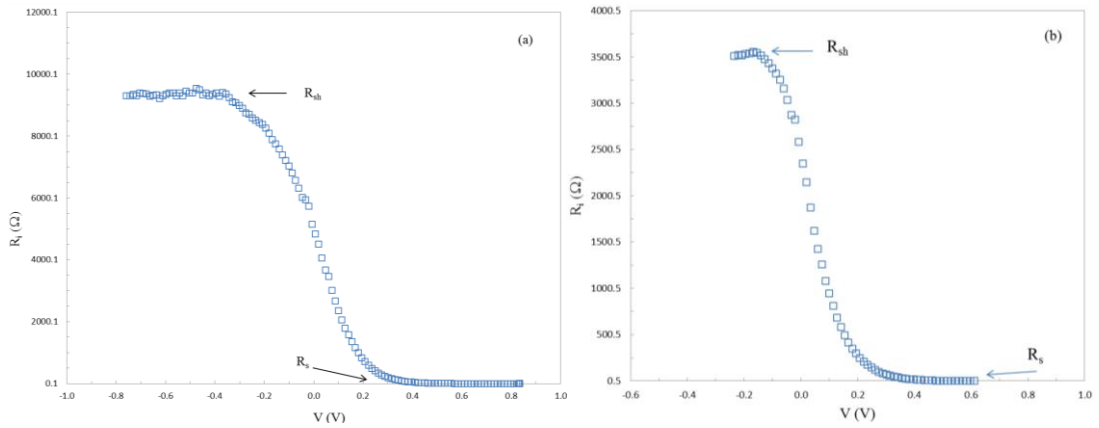
Pil hücresi	n	I_0 (A)	Φ_B (eV)	R_{sh} (k Ω)	R_s (Ω)
Monokristal	2,72	$4,78 \times 10^{-6}$	0,799	9,37	0,14
Polikristal	2,76	$1,70 \times 10^{-5}$	0,766	3,53	0,45

Metal/yarıiletken (Schottky) (MS), metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) ve güneş pilleri gibi elektronik aygıtlar, genellikle hem seri dirençten (R_s) hem de şönt dirençten (R_{sh}) oluşan parazitik bir dirence sahiptir [35].

R_s ve R_{sh} parametreleri MS ve MIS tipi yapıların elektriksel karakteristiklerini etkilediği gibi güneş pillerinin de elektriksel performansını önemli ölçüde etkiler.

Seri direnç, farklı birçok kaynaktan meydana gelebilir.

Doğrultucu kontakten ölçüm için alınmış bir tel, silisyum yarıiletkenine yapılmış omik (arka) kontak, gövde ile arka kontak arasına yerleşmiş kirli bir film tabakası, doğrultucu kontak altındaki silisyum yüzeyi kıyısında bulunan tüketme tabakası ve arka kontak arasındaki gövde direnci, doğrultucu kontak altında bulunan silisyum içerisindeki düzgün olmayan katkı dağılımı bu kaynaklara örnek olabilir. Bu katkı düzensiz olursa oldukça yüksek öz dirençli bir bölge meydana getirir ki, bu da yavaş taşıyıcı yoğunluğu oluşturur. Seri direnç özellikle, admittans tekniğiyle yapılan ara yüzey durumları tayinlerinde ciddi hatalara sebep olabilir. R_{sh} , sızdıran bir oksit veya yalıtkan tabakadan oluşur. R_s değerleri düşürülerek ve R_{sh} değerleri yükseltilerek R_s boyunca düşük bir voltaj ve R_{sh} boyunca da düşük bir akım elde edilebilir. İdeal durumda, bu değerler sırasıyla sıfır ve 10^{12} mertebesinde olmalıdır [36].



Şekil 4. 3. Güneş pili hücrelerinin uygulanan voltaja bağlı karanlık ortam parazitik direnç karakteristikleri

Bu tezde kullanılan güneş pillerinin uygulanan voltaja bağlı karanlık ortam altında parazitikdirenç değerleri deneysel I-V eğrileri kullanılarak denklem 4.5yardımıya elde edilmiş ve uygulanan voltaja bağlı olarak Şekil 4.3.'de verilmiştir.

$$R_i = \frac{dV_i}{dI_i} \quad (4.5)$$

R_i = Parazitik direnç, V_i = Aygıtı uygulanan harici voltaj, I_i = Aygıt akımı

Şekil 4.3.'den açıkça görülebileceği gibi, yeterince büyük düz beslem altındaki R_i değerleri neredeyse sabit hale gelmiştir ve bu değerler de R_s 'ye karşılık gelir. Benzer şekilde, sıfır beslemde elde edilen R_i değerleri hemen hemen sabittir ve R_{sh} 'ye karşılık gelir. Buna göre, güneş pili hücrelerinin elde edilen R_i ve R_{sh} değerleri sırasıyla monokristal için 0,15 ve 9,46 kΩ, polikristal için ise 0,45 Ω ve 3,53 kΩ olarak bulunmuştur.

Güneş pillerinin iç direnci karanlık I-V karakteristikleri kullanılarak 4.5 denklemi yardımıyla elde edilmiştir. Seri direnç değerlerini daha başka yöntemlerle de tayin etmek mümkündür. Bunlar tek bir ışık şiddeti altında gerçekleştirilen “fotovoltaik ölçüm yöntemi” ve farklı ışık şiddetleri altında gerçekleştirilen “PN eklem yöntemidir. Fotovoltaik ölçüm yöntemi şiddeti bilinen sabit bir aydınlatma altında gerçekleştirilir. Bunun için güneş pilinin çıkış terminallerindeki gerilim ve bu terminallerden çıkan akım değeri, terminale bağlanan değişken dirençli bir yük vasıtasıyla ölçülerek aygıtın I-V karakteristiği elde edilir [37]. Fotovoltaik ölçüm yöntemi normal fotovoltaik çalışma modunda olan bir güneş pili için geçerli olup, aygıtın karakteristikleri denklem 4.1'in genelleştirilmiş bir şekli olan 4.6 denklemi ile tanımlanır.

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(V - IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - I_L \quad (4.6)$$

I = Terminal akımı, I_0 = Doyma akımı, q = Elektronik yük,

n = İdealite faktörü, K = Boltzmann sabiti, T = Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık,

V = Terminal gerilimi, I_L = Işığın ürettiği akım, R_s = Seri direnç

Bu ölçüm yönteminde güneş pili bir üreteç görevi gördüğünden dolayı I-V karakteristiği akım-voltaj düzleminin dördüncü çeyreğinde elde edilir. Işığın ürettiği akım ışık şiddeti ile doğru orantılıdır. Diğer taraftan bu akımın büyüklüğü güneş pilinin geometrik yapısı ve üretildiği malzemeye de bağlıdır.

PN eklem yönteminde güneş pili değişken ışık şiddetleri altında aydınlatılır. Işık şiddeti değerlerinin bilinmesine gerek yoktur. Ancak ışığın ürettiği akım değerleri bilinmelidir. Bu ölçümler, kısa devre akımından (ışığın ürettiği akım) ve açık devre voltajından oluşur. Bu metod kullanılarak elde edilen I-V karakteristikleri 4.7 denklemi ile verilir ve her ışık yoğunluğu için I_{sc} ve V_{oc} değerleri elde edilir.

$$I_L = I_0 \left[e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} - 1 \right] \quad (4.7)$$

V_{oc} = Açık devre voltajı

Bir üçüncü yöntem olarak da denklem 4.1 ile tanımlanan düz beslem karanlık I – V karakteristikleri ele aldığımızda bu üç yöntemden elde edilen seri direnç değerlerinin ortalaması bize aygıtın seri direnç değerini elde etmemize imkan sağlar.

Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin seri direnç değerlerini elde etmek için öncelikle düz beslem ölçüm metodu ile PN eklem metodu birbiriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre denklem 4.1 ile 4.7 karşılaştırıldığında ve ara işlemler yapıldığında aşağıdaki 4.8 denklemi elde edilmiştir.

$$R_s = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad (4.8)$$

İkinci olarak fotovoltaik ölçüm yöntemi (denklem 4.6) ile PN eklem yöntemi (denklem 4.7) birbiriyle karşılaştırılmıştır. PN eklem ölçüm yönteminde akım değerleri pozitif olarak alındığından 4.6 denklemi $I \geq 0$ için yeniden yazılmıştır (denklem 4.9).

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V_3 - IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (4.9)$$

Denklem 4.9’u akım-voltaj düzleminin birinci bölgesine taşımak için denklemin sağ tarafına $-I_L$ terimi eklenip -1 ile çarpılarak denklem 4.10 elde edilmiştir.

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(V_3 - (I - I_L)R_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (4.10)$$

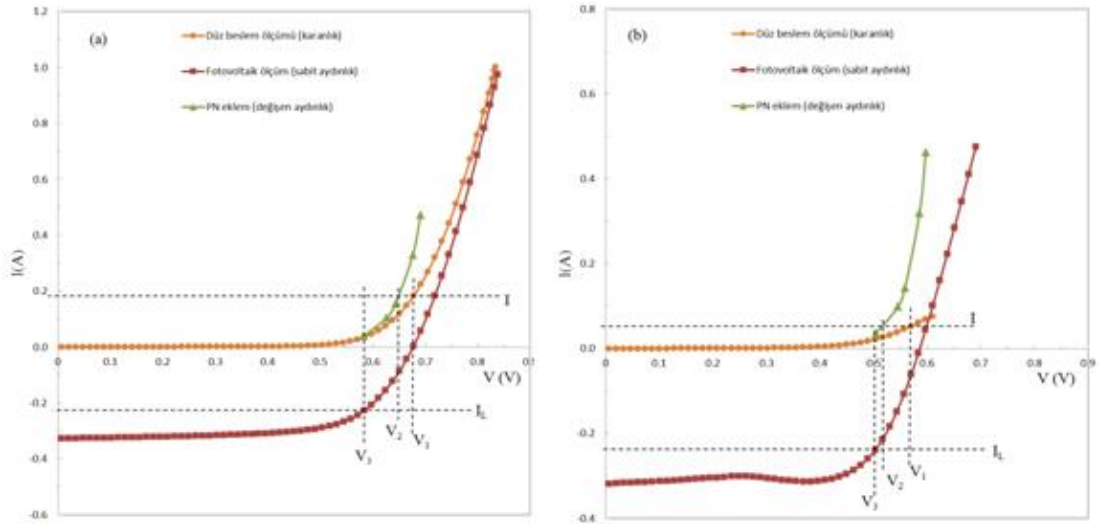
Denklem 4.10 ile 4.7 karşılaştırıldığında ve ara işlemler yapıldığında aşağıdaki 4.11 denklemi elde edilmiştir.

$$R_s = \frac{V_2 - V_3}{I_L - I} \quad (4.11)$$

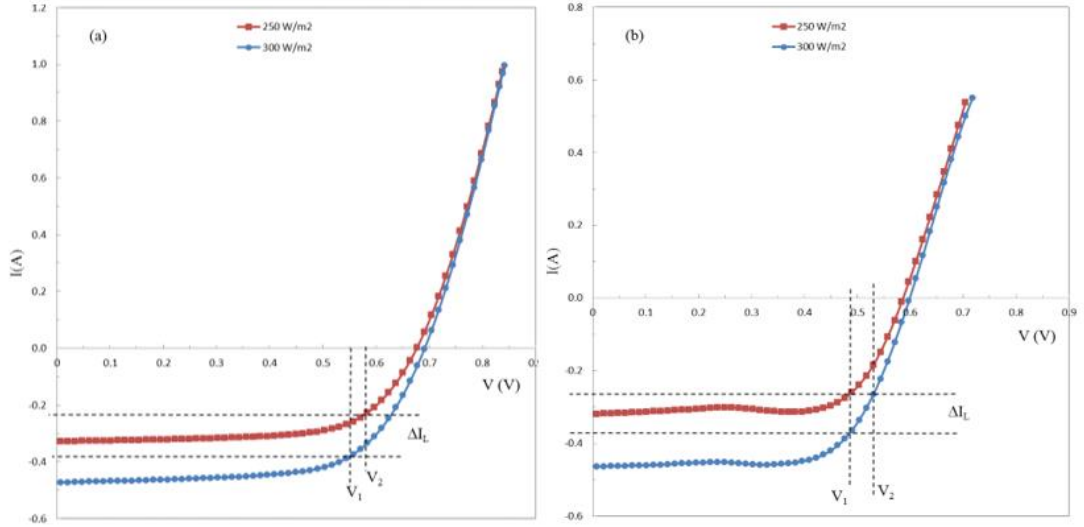
Son olarak da fotovoltatik ölçüm yöntemi (denklem 4.6) ve düz beslem ölçüm yöntemi (denklem 4.1) karşılaştırıldığında ve benzer şekilde ara işlemler yapıldığında seri direnç için aşağıdaki 4.12 denklemi elde edilmiştir.

$$R_s = \frac{V_1 - V_3}{I_L} \quad (4.12)$$

Şekil 4.4.’de her iki güneş pili için bu üç yöntemden elde edilmiş I-V karakteristikleri gösterilmiştir. Elde edilen bu karakteristikler yardımıyla monokristal ve polikristal güneş pili hücreler için R_s değerleri sırasıyla 0,18 ve 0,42 Ω olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 4. Monokristal ve Polikristal güneş hücrelerinin fotovoltatik, PN eklem ve düz beslem ölçüm yöntemleriyle elde edilmiş I –V karakteristikleri

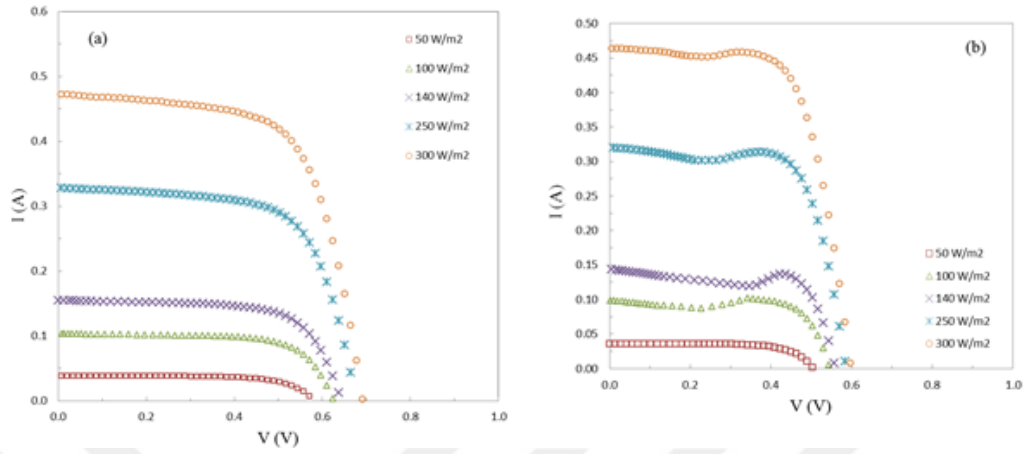


Şekil 4. 5. Monokristal ve Polikristal güneş pili hücrelerinin fotovoltaiik ölçüm yöntemi ile iki farklı aydınlatma şiddetinde elde edilmiş I-V karakteristikleri

Seri direnç değerlerinin tayininde kullanılan yöntemlerden bir olan fotovoltaiik ölçüm yöntemi, iki farklı aydınlatma şiddetinde de gerçekleştirilebilir [37]. Buna göre yine büyüklüğünün bilinmesine gerek olmayan iki farklı ışık şiddetinde I-V karakteristikleri elde edilir. Bu iki farklı karakteristiklerden elde edilen kısa devre akımlarının farkına eşit bir akım aralığı (ΔI_L) keyfi olarak bir miktar yukarı doğru kaydırılır. Bu işlemi genellikle eğrilerin kıvrıldığı diz bölgesine doğru yapmak daha uygundur. Buna göre, seri direnç değerlerini kesişme noktalarına karşılık gelen voltaj değerleri yardımıyla elde etmek için denklem 4.13 kullanılmıştır.

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{\Delta I_L} \quad (4.13)$$

Şekil 4.5.'de bu yöntem kullanılarak her iki pil için elde edilmiş R_s değerleri sırasıyla 0,19 ve 0,41 Ω bulunmuştur. Görüldüğü üzere tüm yöntemlerde elde edilen seri direnç değerleri birbiriyle uyumludur. Ölçümler nispeten yüksek akımlarda gerçekleştiğinden genelde R_{sh} ihmal edilmiştir [37].



Şekil 4. 6.Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık altındaki I-V karakteristikleri

Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık altındaki I-V karakteristikleri Şekil 4.6.’de verilmiştir. Bir güneş pili hücrelerinin açık devre voltajı (V_{oc}) denklem 4.14 ile verilir[38].

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.14)$$

I_{sc} = Kısa devre akımı, I_0 = Doyma akımı

Monokristal güneş pili hücrelerinin 300 W/m^2 ’lik aydınlatma altındaki kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), dönüşüm verimliliği (η) ve doldurma faktörü (FF) sırasıyla 472,5 mA, 0,691 V, % 16,8 ve % 65,1 olarak bulunmuştur. Her iki güneş pili için tüm elektriksel performans parametreleri Tablo 4.2. ve 4.3’de verilmiştir.

Kısa devre akımı (I_{sc}), V_{oc} ’yi doğrudan etkileyen bir parametredir. Diğer taraftan doyma akımı (I_0) da açık devre voltajını ters yönde etkiler. Buna göre, I_0 ’daki azalma (Tablo 4.5. ve 4.6.) ve I_{sc} ’deki artış, V_{oc} ’de bir artışa neden olur. I_0 parametresi doğrudan güneş pili hücrendeki rekombinasyonlarla ilişkilidir[39]. Ayrıca, yansıma önleyici tabakaların da hücre yüzeyini pasifleştirerek yüzey rekombinasyonunu da azalttığı düşünülmektedir[40]. Azalan yüzey rekombinasyonu, I_0 değerlerinde bir azalmaya neden olur. Bu yüzden hem artan I_{sc} hem de azalan I_0 nedeniyle V_{oc} değeri artmıştır.

Tablo 4. 2. Monokristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı performans parametreleri

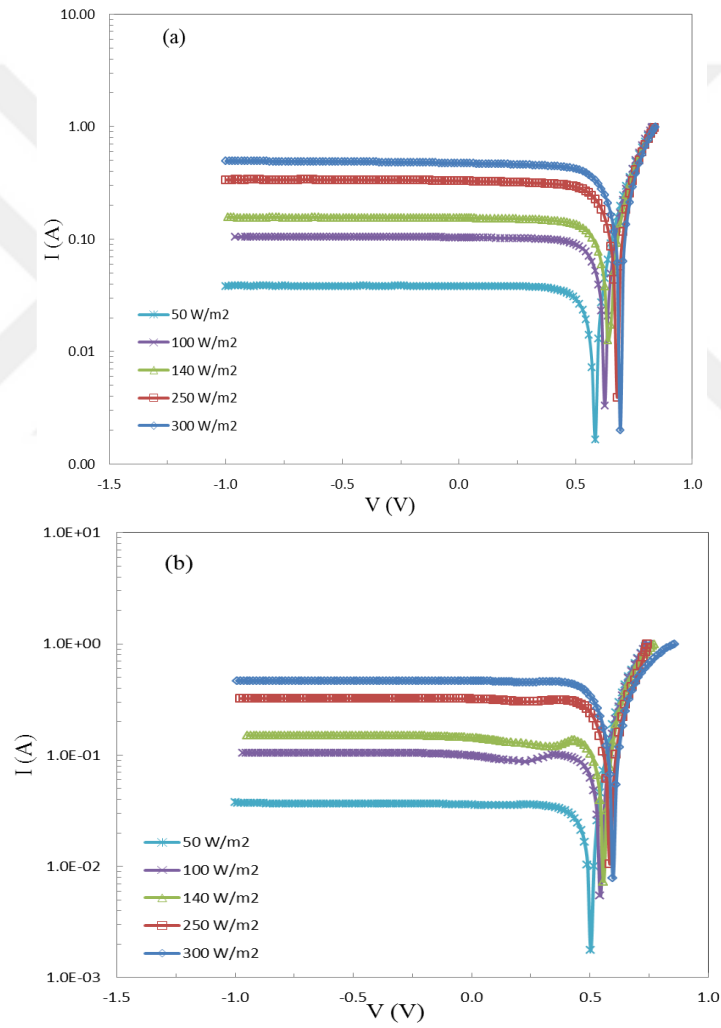
Aydınlık Şiddeti (W/m ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF %	η %	P _m (mW)	V _m (mV)	I _m (mA)
50	0,582	38,2	69,3	7,29	15,4	462,0	33,4
100	0,624	103,3	69,3	10,60	44,8	499,0	89,8
140	0,643	154,3	68,1	11,46	67,6	507,9	133,1
250	0,676	328,2	66,2	14,00	147,0	525,1	280,0
300	0,691	472,5	65,1	16,82	212,6	526,0	404,1

Tablo 4. 3. Polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı performans parametreleri.

Aydınlık Şiddeti (W/m ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	FF %	η %	P _m (mW)	V _m (mV)	I _m (mA)
50	0,505	35,8	69,3	5,83	12,5	398,3	31,5
100	0,546	98,5	75,4	9,60	40,6	439,4	92,3
140	0,559	143,2	75,5	10,15	60,4	451,3	133,9
250	0,586	319,3	71,1	12,64	133,2	455,1	292,6
300	0,599	463,5	68,0	14,96	188,8	448,7	420,7

Şekil 4.7.'de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık altındaki yarı-logaritmik ln(I)-V karakteristikleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, güneş

pili hücreleri üzerine doksan derecelik doğrudan ışık uygulandığında ve ayrıca ışık yoğunluğunun artmasıyla düz beslem akım değerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Diğer taraftan, aydınlatma altında ters beslem akım değerlerinde belirgin bir değişiklik olmuş ve aydınlatma şiddetinin artmasıyla bu akım değerleri artmıştır. Aygıtın verdiği bu ışık tepkisi oluşan karanlık akıma ışıkla oluşturulmuş yük taşıyıcılarının katkısından meydana gelen bir durum olup, güneş pilinin foto-iletken davranışını gösterir [41-43].



Şekil 4. 7. Monokristal ve polikristal Güneş pili hücrelerinin aydınlık altındaki yarı-logaritmik $\ln(I)$ - V eğrileri

Aydınlatma altındaki güneş pillerinin I-V karakteristiklerindeki değişimlerden denklem 4.3 ve 4.4 yardımıyla aydınlık şiddetine bağlı elektriksel parametreler elde edilmiş olup, Tablo 4.4. ve 4.5.'de verilmiştir. Tablolardan görüldüğü üzere, n değerlerinde bir azalış ve Φ_B değerlerinde ise artış tespit edilmiş olup, bu durumda taşıyıcı transport işleminin fotonların oluşturduğu taşıyıcılar tarafından kontrol edildiği sonucuna varılmıştır [44].

Tablo 4. 4. Monokristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı elektriksel parametreleri

Aydınlık Şiddeti (W/m ²)	n	I ₀ (A)	Φ_B (eV)
50	2,66	8,59x10 ⁻⁶	0,784
100	2,44	3,17x10 ⁻⁶	0,809
140	2,31	1,25x10 ⁻⁶	0,833
250	2,14	4,70x10 ⁻⁷	0,859
300	1,95	1,14x10 ⁻⁷	0,895

Tablo 4. 5. Polikristal güneş pili hücrelerinin aydınlık şiddetine bağlı elektriksel parametreleri

Aydınlık Şiddeti (W/m ²)	n	I ₀ (A)	Φ_B (eV)
50	2,11	3,25x10 ⁻⁶	0,801
100	1,97	1,29x10 ⁻⁶	0,825
140	1,81	3,88x10 ⁻⁷	0,856
250	1,52	1,86x10 ⁻⁸	0,935
300	1,38	2,91x10 ⁻⁹	0,983

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında günümüzde yaygın olarak kullanılan silisyum monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin karanlık ve farklı aydınlık şiddetleri altında elektriksel karakteristikleri ve performans parametreleri incelenmiştir. Pillerin her ikisinde de artan ışık şiddetine bağlı olarak açık devre voltaj değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu durum azalan yüzey rekombinasyonlarına ve buna bağlı olarak da deneysel ölçüm sonucunda elde edilen artan kısa devre akımlarıyla azalan doyma akımlarına atfedilmiştir.

Pillerin her ikisinde de doluluk faktörlerinin aydınlanma şiddetine bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu durum akım-gerilim karakteristiklerinde aydınlanma şiddetine bağlı bir ideallikten sapma olduğu sonucuna varılmıştır.

Pillerin ideallik faktörü değerleri karanlık altında 2,7 civarında bulunmuş olup, bu değerler artan ışık şiddetiyle azalmıştır. Bu sonuçlar güneş pilleri için kabul edilen değerler arasındadır.

Monokristal güneş pili hücreleri için aydınlık şiddetine bağlı ölçümlerde elde edilen güç dönüşüm verim değerleri polikristal hücrelerdeki değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Polikristal güneş pili hücrelerinin iç dirençleri monokristal tipi güneş pili hücrelerinin iç direnç değerlerinden daha büyük çıkmıştır. Bu durum p ve n bölgelerinin direnci ile aktif tabaka üzerindeki geçirgen tabakanın direncine atfedilmiştir. Diğer taraftan bazı güneş pillerinde akımı toplamak üzere farklı şekillerde metal kontakt oluşturulması sonucu da seri direncin azalmasına atfedilebilir.

Seri direnç tayin etme yöntemlerinden biri olan ve iki farklı akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilen seri direnç değerlerinin daha güvenilir olduğu kanaatine varılmıştır. Çünkü farklı ışık şiddetlerinde hemen hemen aynı seri direnç değerleri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] www.enerjiportali.com.tr, Erişim Tarihi: 24.02.2020
- [2] www.mmo.org.tr, Erişim Tarihi: 17.02.2020
- [3] www.assets.kpmg.com.tr, Erişim Tarihi: 17.02.2020
- [4] www.iea.org, Erişim Tarihi: 17.02.2020
- [5] www.electrek.com, Erişim Tarihi: 02.04.2020
- [6] www.teias.gov.tr, Erişim Tarihi: 02.04.2020
- [7] www.cogrfyaci.gen.tr, Erişim Tarihi:02.04.2020
- [8] www.guyad.org , Erişim Tarihi: 02.04.2020
- [9] www.1.eere.energy.gov, Erişim Tarihi:12.03.2020
- [10] www.californiasolarcenter.org , Erişim Tarihi: 12.03.2020
- [11] www.nrel.gov, Erişim Tarihi: 12.03.2020
- [12] Yu, G., Gao, J., Hummelen, J.C., Wudl, F., Heeger, A.J., Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor- Acceptor Heterojunctions, 270, 1789, 1995.
- [13] Li, G., Shrotriya, V., Huang J., Yao Y., Moriarty, T., Emeryand, K., Yang, Y., High efficiency solution processable polymer photovoltaic cells byself organization of polymerblends, Nature Materials, (4), 864, 2005.
- [14] He, X., Gao, F., Tu, G., Hasko, D., Huttner, S., Steiner, U., Greenham, N. C., Friendand, R. H., Huck, W. T. S., Formation of Nanopatterned Polymer Blends in Photovoltaic Devices, NanoLett. (10), 1302, 2010.
- [15] O'Regan, B., Gratzel, M., A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ film, Nature, 353, 737, 1991.
- [16] Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., Pettersson, H., Dye- sensitized solar cells, Chemical Reviews , 110-6595, 2010.

- [17] Duncan, W.R., Prezhd, O., Theoretical studies of photoinduced electron transfer in dye-sensitized TiO₂, Annual Review of Physical Chemistry ,58, 143, 2007.
- [18] www.ee.sharif.edu,Erişim Tarihi:03.05.2020
- [19] www.PVEducation.com, Erişim Tarihi: 03.05.2020
- [20] www.asdn.net/asdn/physics/semiconductor.php, Erişim Tarihi : 03.05.2020
- [21] www.circuitbread.com, Erişim Tarihi: 13.04.2020
- [22] www.electronicstutorials.ws/diode/diode_1.htm, Erişim Tarihi: 13.04.2020
- [23] www.halbleiter.org/en/fundamentals/doping, Erişim Tarihi: 17.04.2020
- [24] <https://www.halbleiter.org/en/fundamentals/doping/> . Erişim Tarihi 18.04.2020
- [25] Waldauf C., Schilinsky P., Hauch J., Brabec C., Materialand device concepts. For organic photovoltaics: towards competitive efficiencies, Thin Solid Films, 451-452, 503-507, 2004.
- [26]Vogel M., Diplomarbeit: Herstellungund Charakterisierung organischer Solarzellen auf Basis von C60 und Zink-Phthalocyanine, FU-Berlin, October 2002.
- [27] Tivanov, M. “Determination of solar cell parameters from its current voltage and spectral characteristics”,Solar Energy Materials & Solar Cells, (87), 457-465, 2005.
- [28]www.volkerquaschnig.de/articles/fundamentals3/index.php,Erişim Tarihi:17.04.2020
- [29] Basher M.K., Khalid Hossain M., Afaz R., Rahman M.T., Erman N.M., Study and investigation of phosphorus doping time on emitter region for contact resistance optimization of monocrystalline silicon solar cell, Results in Physics, 10, 205-211, 2008.
- [30] Akand, Abdur Rafiq., Basher Mohammad Khairul., Chowdhury Asrafusjaman., Abedin Nusrat Atia., Mahbubul H., Study and Fabrication of Crystalline Silicon Solar Cell in Bangladesh; Using Thermal Diffusion Technique., Innovative Space of Scientific Research Journals 2, 417-426, 2015.
- [31] www.sinovoltaics.com/solar-basics/solar-cell-production-from-silicon-wafer-to-cell/ .,Erişim Tarihi: 17.04.2020

- [32] Sharma B.L., Fabrication and Characterization of Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions, Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications 113-159, 1984
- [33] Sze S.M., Kwok K.N., Physics of semiconductor devices Wiley, New Jersey, 755, 2007.
- [34] Wolf, M. Rauschenbach, H. Series resistance effects on solar cell measurements, *anced Energy Conversion*, 3(2), 455-479, 1963
- [35] Sze S. M., Physics of Semiconductor Devices, (2) (John Wiley, New York, 1981.
- [36] Alialy S., Altındal Ş., Tanrikulu E. E., Yıldız D. E., Analysis of temperature dependent current-conduction mechanisms in Au/TiO₂/n-4H-SiC (metal/insulator/semiconductor) type Schottky barrier diodes, *Journal Of Applied Physics* 8(116), 10, 2014.
- [37] Rauschenbach H., Understanding Solar Measurements, *Semicond. Prod. Applic. News*, Hoffman Electronics Corp., El Monte, Calif., (3) 455-479, 1963.
- [38] Dutta U., . Chatterjee P., The open circuit voltage in amorphous silicon *p-i-np-i-n* solar cells and its relationship to material, device and dark diode parameters, *Journal of Applied Physics*, 4(96), ,2261-2270,2004
- [39] Yoon W., Boercker J.E., Lumb M.P., Placencia D., Foos E.E., Tischler J.G., Enhanced open-circuit voltage of Pb Sn an crystal quantum dot solar cells, *Scientific Reports* (3), 2225,2013.
- [40] Yeo C.I., Choi H.J., Song Y.M., Kang S.J., Lee Y.T., A single- material graded refractive index layer for improving the efficiency of III-V triple-junction solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, 14(3), 7235-7240, 2015.
- [41] Yakuphanoglu F., Photovoltaic properties of hybrid organic/inorganic semiconductor photodiode, *Synthetic Metals*, 21(157), 859-862, 2007
- [42] Park S., Jang W., Wang D.H., Alignment of Cascaded Band-Gap via PCBM/ZnO Hybrid Interlayers for Efficient Perovskite Photovoltaic Cells, *Macromolecular Research*, 26, 472-476,2018.
- [43] Lin Y.J., Chin Y.M., Chang H.C., *ECS Journal of Solid State Science Technology*, 6, 2017

[44] Karabulut A.,. Dere A., El-Sehemi A.G., Al-Ghamdi A.A., Yakuphanoglu F., Cadmium Oxide:Titanium Dioxide Composite Based Photosensitive Diode, Journal of Electronic Materials,. 47, 7159-7169, 2018.



ÖZGEÇMİŞ

Selin GÖRMEZ İlk, orta ve lise eğitimini Adıyaman’da tamamladı. 2011 yılında Bursa İstanbul Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2013 yılında başladığı Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Bölümü’nü 2017 yılında bölüm 1.si olarak bitirdi. 2017 yılında Giresun Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında GTC Güneş Sanayi bünyesinde çalışmaya başladı. Halen GTC Güneş Sanayi bünyesinde Ar & Ge mühendisi olarak görev yapmaktadır. 2020 yılında Adıyaman Üniversitesi pedagojik formasyon eğitimini tamamladı.