



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FOTOVOLTAİK SİLİSYUM GÜNEŞ
HÜCRELERİ İÇİN NİKEL METAL KONTAK
GELİŞTİRİLMESİ**

Berkeli AKGAYEV

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

**Nisan-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Berkeli Akgayev tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Silisyum Güneş Hücreleri İçin Nikel Metal Kontak Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 30/04/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Aytakin UZUNOĞLU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Veysel ÜNSÜR

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Atıf Emre DEMET

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
FBE Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 120E474 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Berkeli AKGAYEV

Tarih: 24/05/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİLİSYUM GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN NİKEL METAL KONTAK GELİŞTİRİLMESİ

Berkeli AKGAYEV

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Veysel ÜNSÜR

2024, 85 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Veysel ÜNSÜR

Doç. Dr. Aytekin UZUNOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Atıf Emre DEMET

Kristal silisyum (Si) güneş hücrelerinin metalizasyonu, güç çevirim verimliliğini artırırken maliyeti azaltma potansiyeline sahip önemli üretim adımlarından biridir. Güneş hücreleri teknolojisinin sürdürülebilirliği ve ekonomik açıdan etkinliği için geleneksel olarak kullanılan şablon baskılı gümüş (Ag) kontaklara alternatif malzemelerin geliştirilmesi, kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada da nikel (Ni) metal tozları, cam frit ve organik bir ortamdan oluşan bir Ni metal pastası tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu metal pasta, şablon baskı ile Si güneş hücrelerinin ön yüzeyine Ni kontakların uygulanması için kullanılmıştır. Schottky kontak oluşumunu önlemek amacıyla, Si güneş hücresinin ön yüzeyine Ni ve Si arasına bir grafen tabakası yerleştirilmiştir. Ön yüzeydeki grafen katman ve Ni, ısıtma işlemi sonrası ara yüzeyde yeni bir malzeme gibi davranıp kontakların iş fonksiyonunu, Si elektron ilgisinden daha düşük bir seviyeye indirerek, oluşan kontakların omik (veya omik benzeri) özellik göstermesini sağlar. Yapılan analizler, grafen tabakasının hücrelerin dokulu ön yüzeyine başarılı bir şekilde transfer edildiğini ve G/2D tepe noktalarının açıkça gözlemlendiğini, bu da grafen tabakasının yüksek kalitesini doğrulamaktadır. Metal pasta öğelerinden biri olan cam frit için elde edilen bulgular, geçiş sıcaklığının (T_g) 270 °C ile 320 °C arasında olduğunu ve bu durumun pastanın mükemmel aşındırma davranışını sağlamak için uygun bir sıcaklık profili sunduğunu göstermektedir. SEM görüntülemeleri, Ni kontakların Ag kontaklara benzer bir en/boy dağılım oranına ve sinterleme davranışına sahip olduğunu göstermiştir. Solar simülatör ile yapılan akım-gerilim ölçümlerinde, Ni kontaklı güneş hücresinin açık devre geriliminin 660 mV, kısa devre akım yoğunluğunun 38,9 mA/cm² ve doluluk faktörünün %81,0 olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, Ni kontakların güneş hücresine yaklaşık %21 verimlilik sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, alternatif malzemelerin kullanımının güneş hücreleri teknolojisindeki ilerlemeyi destekleyebileceğini ve daha ekonomik çözümler sunabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: FV sistemler, gümüş metal kontak, güneş enerjisi, nikel metal kontak, silisyum güneş hücresi, şablon baskı, yenilenebilir enerji.

ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPMENT OF NICKEL METAL CONTACTS FOR PHOTOVOLTAIC SILICON SOLAR CELLS

Berkeli AKGAYEV

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENERGY SYSTEMS
ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Veysel UNSUR

2024, 85 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Veysel UNSUR

Assoc. Prof. Dr. Aytekin UZUNOGLU

Asst. Prof. Dr. Atif Emre DEMET

The metallization of crystalline silicon (Si) solar cells is one of the critical manufacturing steps with the potential to enhance power conversion efficiency while reducing costs. The development of alternative materials to the traditionally used screen-printed silver (Ag) contacts is crucial for the sustainability and economic viability of solar cell technology. In this study, a nickel (Ni) metal paste composed of Ni metal powders, glass frit, and an organic medium was designed and produced. This metal paste was used to apply Ni contacts to the front surface of Si solar cells through screen printing. To prevent the formation of Schottky contacts, a graphene layer was placed between the Ni and the front surface of the Si solar cell. After thermal processing, the graphene layer and Ni on the front surface acted like a new material at the interface, lowering the work function of the contacts below the electron affinity of Si, resulting in ohmic (or quasi-ohmic) contact properties. Analyses confirmed that the graphene layer was successfully transferred to the textured front surface of the cells, with clear observation of the G/2D peaks, verifying the high quality of the graphene layer. Findings for the glass frit, one of the metal paste components, indicated a transition temperature (T_g) between 270 °C and 320 °C, providing an appropriate temperature profile for excellent etching behaviour of the paste. SEM imaging showed that the Ni contacts had a length/width distribution ratio and sintering behaviour similar to Ag contacts. Current-voltage measurements with a solar simulator determined that the Ni-contacted solar cell had an open-circuit voltage of 660 mV, a short-circuit current density of 38.9 mA/cm², and a fill factor of 81.0%, resulting in an efficiency of approximately 21%. This study demonstrates that the use of alternative materials can support progress in solar cell technology and offer more economical solutions.

Keywords: nickel metal contact, PV systems, renewable energy, screen printing, silver metal contact, silicon solar cell, solar energy, solar cell metallization.

ÖNSÖZ

Ekonomik ve sosyal açıdan toplumun yaşam kalitesini belirleyen unsurlardan biri enerjidir. Şüphesiz ki gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin temel hedeflerinden biri sürdürülebilir bir enerji kaynağı sağlamaktır. Çünkü enerji teknolojinin gelişmesini ve ekonomik kalkınmayı yükselteceği gibi toplumun refah seviyesini de yükseltecektir. Enerji, ekonomik kalkınmayı destekleyen bir faktör olmasının yanı sıra sürdürülebilirlik, çevresel etkiler ve enerji verimliliği gibi konuları da kapsayan önemli bir alanı temsil etmektedir.

Bu tez çalışması, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini vurgulayarak, güneş enerjisinin geleceğine odaklanmakta ve yaygın olarak kullanılan bir yenilenebilir enerji teknolojisi olan fotovoltaik sistemlerinin gelişimine ve uygulanabilirliğine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışma sürecinin her aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli Dr. Öğr. Üyesi Veysel ÜNSÜR hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatıma kattığınız değeri asla unutmayacağım.

Berkeli AKGAYEV
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Küresel Enerji Sektörü.....	2
1.1.1. Üretim ve tüketim	2
1.1.2. Yatırım ve teşvikler	5
1.2. Yenilenebilir Enerji: Temiz Enerji – Temiz Dünya.....	6
1.2.1. Güneş enerjisi: FV sistemler.....	8
1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Motivasyon	11
2. SİLİSYUM FOTOVOLTAİK GÜNEŞ HÜCRELERİ.....	12
2.1. Hücre Temelleri	14
2.1.1. Yarı iletkenler	14
2.1.2. Bant aralığı.....	15
2.1.3. P-N eklemi	16
2.1.4. Fotovoltaik etki	17
2.1.5. Akım üreten ışık.....	18
2.2. Hücre Parametreleri	19
2.2.1. I-V eğrisi	20
2.2.2. Açık devre voltajı.....	21
2.2.3. Kısa devre akımı	21
2.2.4. Doldurma faktörü.....	22
2.2.5. Verimlilik.....	23
2.3. Direnç Etkileri.....	23
2.3.1. Karakteristik direnç (R_{CH}).....	23
2.3.2. Şönt direnç (R_{SH})	24
2.3.3. Seri direnç (R_S)	24
2.4. Hücre Üretimi ve Mimarileri	26
2.4.1. PERC	30
2.4.2. Bifacial PERC.....	31
2.4.3. TOPCon	32
2.4.4. IBC.....	33

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	36
3.1. Metal Elektrotlar	39
3.1.1. Ön yüzey kontak	40
3.2. Baskı Teknikleri.....	40
3.2.1. Şablon baskı (SP).....	41
4. DENEYSEL TASARIM	43
4.1. Ön Yüzey Metalizasyon.....	43
4.2. Metal Pasta Üretimi	44
4.2.1. Cam frit (Glas frit)	44
4.2.2. Organik ortam	47
4.2.3. Nikel metal pasta	48
4.3. Metal Elektrotların Tasarımı.....	49
4.4. Grafen: Üretimi ve Transferi	50
4.5. Şablon Baskılı Nikel Metal Kontak	53
4.6. Isıl İşlem (RTP)	54
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	56
5.1. Grafen Transferi ve Karakterizasyonu.....	56
5.2. Metal Pasta Karakterizasyonu	57
5.3. Nikel Metal Pastalı Güneş Hücreleri	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
7. KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α	alfa
Δ	delta
λ	lambda
μ	viskozite birimi
η	verimlilik, eta
e^-	elektron
\$	dolar
€	euro
Ω	direnç birimi, ohm
&	ve
%	yüzde
A	alan
E	elektrik alan
g	gram
h	yükseklik
I	akım
J	joule
k	Boltzmann sabiti
l	uzunluk
m	metre
mA	miliamper
mV	milivolt
n	malzeme özelliği
P	güç
R	direnç
T	sıcaklık
V	gerilim
W	watt
w	genişlik
q	elektron yükü

Kısaltmalar

AB	Avrupa birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif akım
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
AM	Hava kütlesi
ARC	Yansıma önleyici kaplama
B	Bor
B ₂ O ₃	Bor trioksit
Bi ₂ O ₃	Bizmut oksit
BSF	Arka yüzey alanı
CBA	Tüketim bazlı yaklaşım
Cd-Te	Kadmiyum tellür
CF	Kapasite faktörü
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
CSP	Konsantre güneş enerjisi
Cu	Bakır
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
Cz	Czochralski yöntemi
c-Si	Kristal silisyum
DC	Doğru akım
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetresi
EC	Etil Selüloz
Ej	Exajoule
EOL	Ömür sonu maliyet
ETS	Karbon fiyatlandırma politikaları
eV	Elektron volt
FF	Doldurma faktörü
FV	Fotovoltaik
FZ	Float Zone yöntemi
Ga	Galyum
Ge	Germanyum
Ga-As	Galyum arsenit
GES	Güneş enerji santrali
GW	Gigawatt
HJT	Hetero bağlantı
IBC	İndirgenmiş arka kontak
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
I-V	Akım-gerilim
I _{MP}	Maksimum akım

I _{SC}	Kısa devre akımı
İn-P	İndiyum fosfit
KW	Kilowatt
KWh	Kilowatt saat
Li ₂ CO ₃	Lityum karbonat
MgO	Magnezyum oksit
Mg-Si	Metalürjik silisyum
MPPT	Maksimum güç noktası takibi
MP	Maksimum güç
Ni	Nikel
NM	Net ölçüm
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NZE	Net sıfır emisyon
P	Fosfor
PBA	Üretim bazlı yaklaşım
PbO	Kurşun oksit
PERC	Pasifleştirilmiş emitör arka kontak
POCl ₃	Fosfor oksiklorür
PSG	Fosfosilikat cam
PWh	Petawatt saat
P _{MAX}	Maksimum güç
REC	Yenilenebilir enerji sertifikaları
RPS	Yenilenebilir portföy standartları
RTP	Hızlı ısıl işlem
SDR	Testere hasarı giderme
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum dioksit
SoG-Si	Güneş sınıfı silisyum
SP	Şablon baskı
STC	Standart test koşulları
TGA	Termogravimetrik analiz
TeO ₂	Tellür dioksit
TOPCon	Tünel oksit pasifleştirilmiş kontak
V _{OC}	Açık devre voltajı
V _{MP}	Maksimum gerilim
Zn	Çinko
ZnO	Çinko oksit
WO ₃	Tungsten trioksit
XRD	X-ışını difraksiyonu

1. GİRİŞ

İnsan hayatının vazgeçilmez unsurlarından biri enerjidir. İhtiyaç duyduğumuz bu enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Enerji sektörü, petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların en yaygın kullanıldığı alandır (%33) ve küresel sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağıdır. Bu emisyonlar, karbondioksit, metan ve nitroz oksit gibi sera gazlarını içerir (EÜAŞ, 2021). Bu bağlamda, gelişim ve yaşamın devam etmesi için sürdürülebilir ve dünya genelinde erişilebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Dünya, karbon salınımı yapan fosil yakıtlardan uzaklaşarak birden fazla sektörde yenilenebilir enerjiye geçiş yapmaktadır (IEA, 2022a). Yenilenebilir enerji, dünyanın karbondan arındırılması ve net sıfır emisyona giden yolda enerji geçişinin anahtarıdır. Hedeflenen bu değişimle beraber, fosil yakıt kullanımının yerini kademeli olarak yenilenebilir enerji alacaktır. Düşük karbon emisyonlu enerji sektörü, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının genişlemesine bağlıdır.

Yenilenebilir enerji, sanayi başta olmak üzere hizmet, ulaşım, ısıtma ve konut sektörlerinin tamamında artarak yaygınlaşmaktadır. 2022 yılında, yenilenebilir enerji kapasitesi 291 GW artış göstermiş ve güneş enerjisi teknolojilerinde etkileyici bir büyüme kaydedilmiştir (IRENA, 2023). Küresel kurulu güneş enerjisi kapasitesi, 1000 GW'ı aşarak önemli bir kilometre taşını geride bıraktı (IEA, 2022b). Özellikle son 10 yılda, güneş enerjisi teknolojilerinden yararlanma konusunda büyük bir ivme yaşanmıştır. Bu hızlı gelişmenin nedenleri, artan verimlilik, teknolojik ilerlemeler ve üretim maliyetlerinin düşmesidir (bp, 2022a). Güneş enerjisi sistemlerinin çevresel ve ekonomik faydalarının yanı sıra yaygın olarak bulunabilirliği, diğer enerji üretim teknolojileriyle rekabet edebilir hale gelmesini sağlamıştır.

Türkiye, enerji arz güvenliği, teknoloji gelişimi, sürdürülebilirlik ve çevre dostu enerji kaynakları alanlarında bir enerji politikası izlemektedir. Enerji talebinde yıllık olarak ortalama %3,4 artış görülmekte ve kişi başı elektrik tüketimi 3142 kWh olarak hesaplanmaktadır (EÜAŞ, 2021). Türkiye, elektrik üretiminin yaklaşık %45'ini doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan karşılamaktadır (Kavak vd., 2023). Bu durum, fosil yakıt ithal eden bir ülke olan Türkiye için yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Türkiye, güneş enerjisi açısından zengin bir ülke olmasına rağmen, Ocak 2024 itibarıyla toplam elektrik kurulu gücünün 107,2 GW olduğu ve bunun sadece %11,0'ının güneş enerjisinden oluştuğu bir durumla karşı karşıyadır (İpek & Hakyemez, 2024). Türkiye için güneş enerjisi, enerji çeşitliliğini sağlayarak enerjide dışa bağımlılığı azaltacak alternatif bir enerji kaynağıdır.

1.1. Küresel Enerji Sektörü

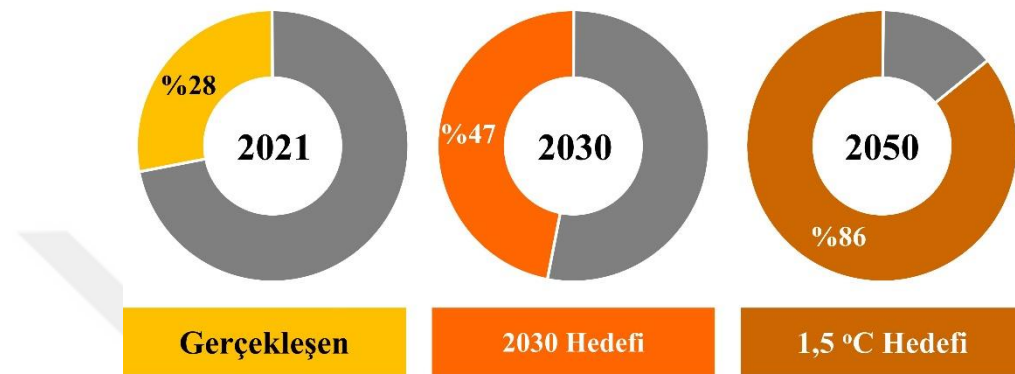
Enerji sektörü, odun, kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımıyla başlayan büyük enerji geçişlerine şahitlik etmiştir. Ancak bugün, hızla büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin eşiğindedir. Küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi tehditlerle mücadele kapsamında, karbon fiyatlandırma politikaları (ETS), Paris Anlaşması ve Kyoto Protokolü gibi küresel adımlar atılmaktadır (IEA, 2022a). Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler 2050'ye kadar sıfır emisyonlu (NZE) bir küresel enerji sektörü yol haritası belirleyerek, küresel ısınmayı 1,5 °C ile sınırlama ve iklim değişikliğinden kaçınma hedeflerini belirlemiştir (IEA, 2021c).

Enerji sektörünün temiz enerjiye geçiş sürecinde yapılacak yatırımlar ve uygulanacak politikalar son derece kritiktir. Çünkü mevcut yatırımlar, hedeflenen enerji geçişini kısa ve uzun vadede karşılamak için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, gelecekteki yatırımların ve politikaların doğru bir şekilde yönlendirilmesi gerekmektedir. 2023 yılının sonuna geldiğimizde neredeyse tüm ülkeler, yenilenebilir enerjiye destek politikalarına sahip olup, büyük çoğunluğu enerji sektöründe bu politikalara devam etmektedir. Bu pazarın büyük bir bölümünü, Çin ve Hindistan gibi güneydoğu Asya ülkeleri oluşturmaktadır. ABD ise federal ve eyalet düzeyinde uyguladığı teşviklerle fotovoltaik (FV) pazarında genişlemeye devam etmektedir, ancak Çin hala en büyük FV pazarı konumunu korumaktadır. Ayrıca, Brezilya ve Vietnam'daki üretim artışları da güneş enerjisine yönelik güçlü politika desteklerinden kaynaklanmaktadır (IEA, 2021a). Bu destek politikaları, temiz enerji teknolojilerinden FV ve rüzgâr enerjisinin teşvik edilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve temiz enerji inovasyonunun desteklenmesi gibi adımları içermektedir. Enerji sektöründeki bu değişiklikler, sosyal ve ekonomik kalkınmayı desteklemeli ve yaşam kalitesini iyileştirmelidir.

1.1.1. Üretim ve tüketim

Üretim ve tüketim faaliyetleri, enerji verimliliği ve sistem gereksinimleri, üretim bazlı (PBA) ve tüketim bazlı (CBA) olarak değerlendirilmektedir. Bir ülkenin enerji tüketimi, sanayi, ulaşım ve nüfus ihtiyaçları tarafından belirlenmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde elektrik talebi hızla artmaktadır. Yüksek yaşam standardı, gelir kaynakları, üretim seviyeleri ve sanayi gelişimi enerji tüketimini artıran faktörlerdir. Özellikle Asya ülkelerinde devam eden ekonomik büyüme, bu ülkelerin enerji ihtiyaçlarını hızla artırmaktadır. Çin ve Hindistan gibi ülkelerde, hızlı nüfus artışı ve enerji yoğunluğundaki artış, kişi başına düşen enerji tüketiminde bir artışa neden olmaktadır. Güney Kore,

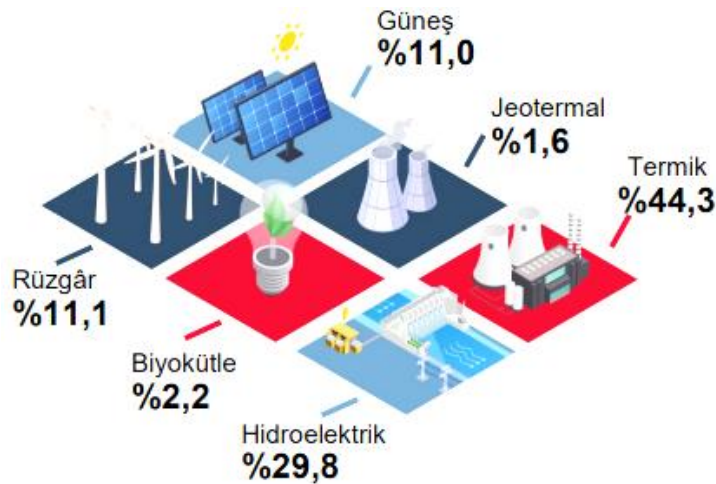
Japonya ve Endonezya da elektrik tüketiminde artış yaşanan diğer Asya ülkeleridir (Shalaeva vd., 2020). 2020-2050 döneminde %3 büyüme öngörülen dünya ekonomisi, enerji talebini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu talep artışının yaklaşık %50'sini, ekonomik büyüme potansiyeli yüksek olan Asya Pasifik ülkeleri (Hindistan, Güneydoğu Asya) oluşturacaktır. En fazla enerji tüketen ülkeler ise ABD, Çin ve Hindistan'dır (EÜAŞ, 2021).



Şekil 1.1. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı (IEA, IRENA).

Fosil yakıtların elektrik üretimindeki yüksek payı, enerji sektöründe karbon salınımının en yoğun olduğu alanı oluşturur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı hızla artmaktadır, ancak kömür ve doğalgazın payı hala daha yüksektir. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması, enerji sistemlerinin karbon salınımından arındırılması anlamına gelmektedir. Küresel ısınmayı 1,5 °C ile sınırlandırmak ve net sıfır karbon hedefine ulaşmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payının %86 (PwC, 2021) seviyelerine çıkması gerekmektedir (Şekil 1.1).

Son yıllarda, fosil yakıt fiyatlarında yaşanan artış sonrası, yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi maliyetlerinde gözlemlenen düşüş, yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminin rekabet gücünü artırmıştır. Özellikle güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, maliyetleri sürekli olarak düşürülerek, finansal açıdan tercih edilen bir elektrik üretim kaynağı haline gelmiştir (PwC, 2024). Bu durum, elektrik üretiminde karbonsuzlaştırma hedeflerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, dünyadaki birçok pazarda zaten en ucuz yeni enerji üretim kaynağı olarak kabul edilmektedir (IHS, 2022). 2021 yılında, dünya genelinde elektriğin yaklaşık %28,3'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanırken, sadece güneş FV sistemlerinden elde edilen elektrik miktarı 1020 TWh olarak kaydedildi (IRENA, 2022b).



Şekil 1.2. Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimi kurulu güç dağılımı (TEİAŞ, TSKB).

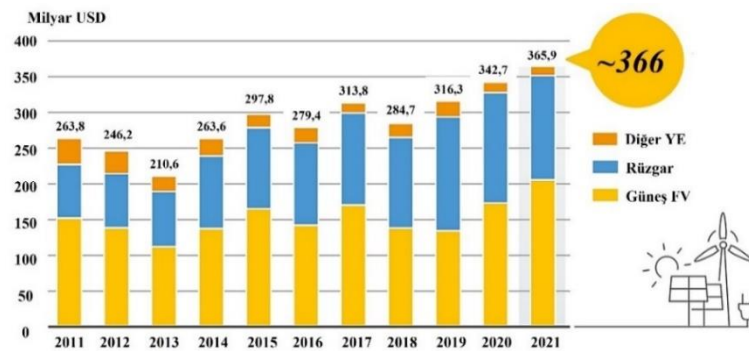
Türkiye, enerji politikasını çeşitli hedefler doğrultusunda şekillendirmektedir. Bu hedefler arasında, kendi enerji ihtiyacını karşılayabilme, sürdürülebilir enerji üretimi ve kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanma, elektrik altyapısını geliştirme, nükleer enerji kullanımı, enerji yoğunluğunu azaltma gibi stratejik amaçlar bulunmaktadır. Bu çerçevede, yerli üretim ve kaynaklara dayalı enerji politikası, ekonomik büyüme ile uyumlu bir altyapı oluşturmayı amaçlamaktadır.

2023 yılında Türkiye'nin elektrik üretiminin %57,7'si fosil yakıtlardan, %19,6'sı hidrolik enerjiden, %10,4'ü rüzgârdan, %5,7'si güneşten, %3,4'ü jeotermal enerjiden ve %3,2'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı, 2024). Bu veriler, özellikle termik santrallerin geniş bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Elektrik tüketimi ise endüstriyel sektör, konutlar, ticari işletmeler ve kamu binaları gibi çeşitli alanlarda gerçekleşmektedir. Türkiye'de ekonomik büyüme, sanayileşme ve nüfus artışı gibi faktörler, elektrik talebini sürekli olarak artırmaktadır. Bu bağlamda, temel hedeflerden biri, elektrik talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmasıdır. 2023 yılı sonunda devreye alınan yeni elektrik santralleri sayesinde, rüzgâr ve güneş enerjisinin toplam kurulu güçteki payı %21'e (İpek & Hakyemez, 2024) ulaşmıştır (Şekil 1.2). Bu, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini etkin bir şekilde değerlendirebilme yeteneğini göstermektedir. Ülke, enerji arzını çeşitlendirmeye ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmaya yönelik çalışmalarını sürdürmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yapılan yatırımlar ve uygulanan politika önlemleri, Türkiye'nin enerji sektöründe daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir dönüşüm sağlama yolunda önemli adımları temsil etmektedir.

1.1.2. Yatırım ve teşvikler

Yenilenebilir enerji kaynaklarının uzun vadeli gelişimi için devlet politikalarına ve destek mekanizmalarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple ülkeler, yenilenebilir portföy standartları (RPS), tarife garantileri, çeşitli ihaleler ve yenilenebilir enerji sertifikaları (REC) gibi yenilenebilir enerjiyi destekleyen politikaları sürdürmektedir. Aynı zamanda birçok ülke, mali teşvikler (hibeler ve vergi indirimleri) gibi değişen politika araçlarını kullanarak yenilenebilir enerjiyi desteklemek ve öz tüketimi teşvik etmektedir (IEA, 2021a). Enerji sektörünün her alanında yatırımlar artmaktadır, ancak son yıllardaki en önemli artış, yenilenebilir enerji, şebeke bağlantıları ve son kullanım enerji verimliliği için yapılan harcamalardan kaynaklanmaktadır (IEA, 2022c). Yenilenebilir enerji kaynakları, 2023 yılı itibariyle toplam enerji sektörü yatırımlarının %80'den fazlasını temsil etmektedir. Şekil 1.3, yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların dağılımını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, enerji sektörüne yapılan yatırımlarda önde gelen teknoloji FV sistemlerdir (IEA, 2023; IRENA, 2022a).

Küresel düzeyde güneş enerjisine olan talebin arttığı bir süreçte, farklı ülkelerde yerel piyasalarda önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Çin, bu alanda liderliğini sürdürmek amacıyla önemli teşvikler sağlamış ve sadece 2021 yılında güneş enerjisi için 530 milyon dolarlık teşvik ayırmıştır. ABD ise son 10 yılda güneş enerjisi kurulu gücünü 25 kat büyütürken bu alanda önemli bir büyüme göstermiştir. İtalya, güneş enerjisi kurulu gücünü 10 yılda 18 GW artırarak 2025 yılında 28 GW'a ulaşmayı hedeflemektedir. Almanya ise yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payını artırma hedefi doğrultusunda büyük ölçüde güneş enerjisinden faydalanarak 200 GW'a kadar yenilenebilir kurulu güç hedeflemektedir. İspanya, 2018'de 4,5 GW olan güneş enerjisi kapasitesini 2020'de 11,4 GW'a çıkartarak Avrupa'da en hızlı büyüyen ülkelerden biri olmuştur (IEA, 2022c; IRENA, 2022a; PwC, 2021).



Şekil 1.3. Küresel yenilenebilir enerji yatırımları: 2011-2021 (REN21).

Türkiye, artan enerji talebini karşılamak ve çevresel sorunlara çözüm bulmak amacıyla güneş enerjisi santrallerine yönelik önemli adımlar atmaktadır. Bu kapsamda, hibe destekleri ve teşvik kredileri gibi finansal araçlar kullanılarak güneş enerji üretimi desteklenmektedir. Ülkenin enerji sektörünü canlandırmak amacıyla Teşvik Uygulama ve Yabancı Sermaye Genel Müdürlüğü tarafından sunulan üç temel teşvik programı ile ulusal ve uluslararası sermayeli firmaların yatırım projelerine destek verilmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Türkiye'nin enerji vizyonu, Ulusal Enerji Planı'nda belirtilen hedeflerle şekillenmekte olup, 2035 yılına kadar güneş enerjisi kapasitesini 52,9 GW'a, rüzgâr enerjisi kapasitesini ise 29,6 GW'a çıkarma hedefi bulunmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı, 2022).



Şekil 1.4. Türkiye'nin yatırım teşvik sistemi (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

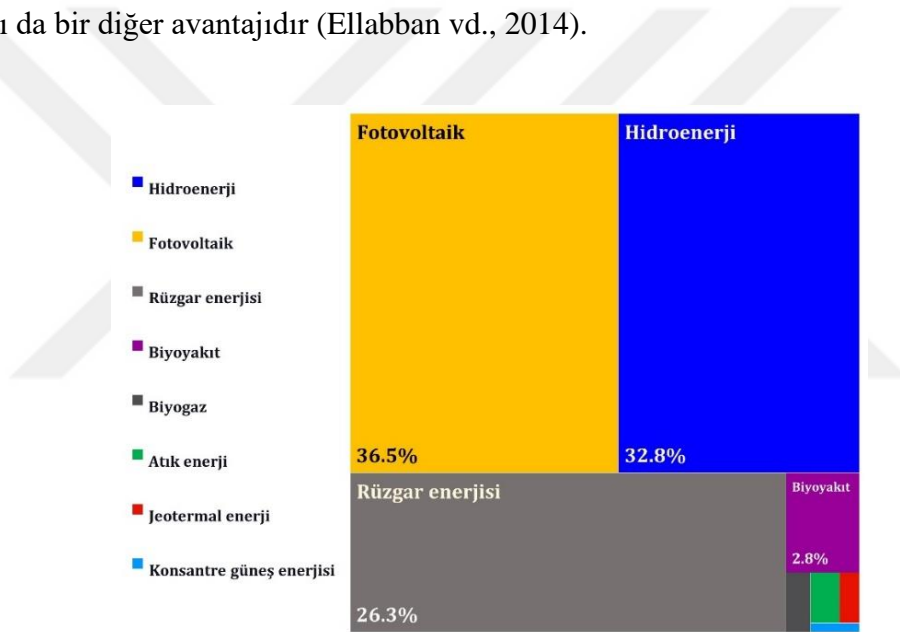
Yenilenebilir enerjiye teşvik sağlamak amacıyla Türkiye'de sunulan destek unsurları arasında KDV istisnası, gümrük vergisi muafiyeti, vergi indirimi, sigorta primi işveren hissesi desteği, faiz veya kâr payı desteği gibi önemli unsurlar yer almaktadır (Şekil 1.4). Bu teşvikler, Türkiye'nin sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşma yolunda etkili bir şekilde kullanılarak, enerji sektöründe inovasyon ve çevresel dostu uygulamaların geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

1.2. Yenilenebilir Enerji: Temiz Enerji – Temiz Dünya

Günümüzde enerji, ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınmaları için en büyük unsurlardan biridir. Temel hedef, güvenilir, temiz, ucuz ve kolay erişilebilen enerji kaynaklarının sağlanmasıdır. Bu nedenle ülkeler, yenilenebilir enerji kaynaklarına

yönelmiştir. Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan elde edilen enerjidir. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji ve hidro enerji gibi doğal olarak yenilenebilen kaynaklardan elde edilen enerjiyi içerir (Şekil 1.5). Bu kaynaklar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak hem kısa hem de uzun vadede dünya enerji ihtiyacını karşılama potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları dünya genelinde eşit bir şekilde dağılmamış olsa da, her bölgenin bu kaynaklara bir miktar erişimi vardır (Twidell, 2021).

Farklı enerji kaynakları birbirini tamamlayıcı özelliklere sahip olduğundan, genel olarak ele alındığında güvenilir ve istikrarlı bir enerji kaynağı sağlanabilir. Bu kaynaklar elektrik, ulaşım, endüstri ve bina sektörlerinde kullanılabilir. Geniş kullanım yelpazesine sahip olmaları, yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitli teknolojilerle gelişmesini ve ticarileşmesini sağlamıştır. Ayrıca, yenilenebilir enerji sistemlerinin modüler ve esnek olması da bir diğer avantajıdır (Ellabban vd., 2014).



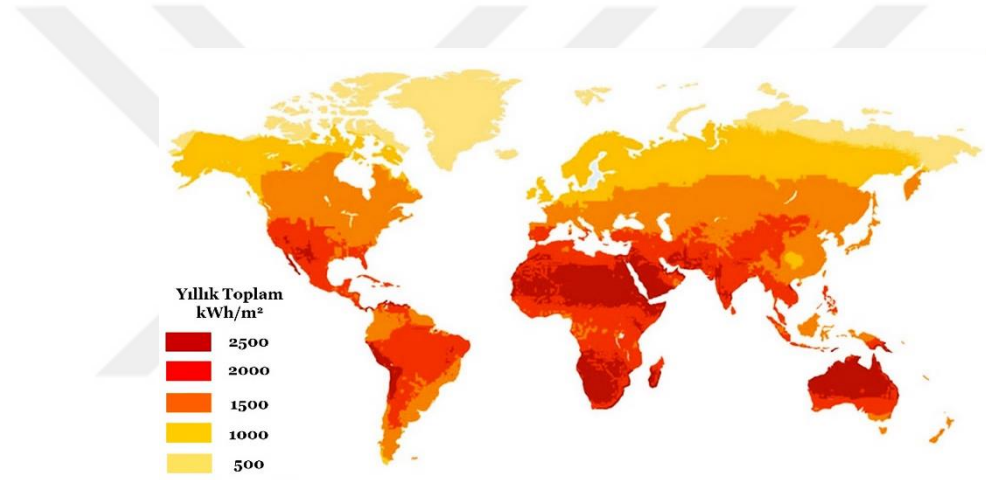
Şekil 1.5. 2023 yılında kurulu yenilenebilir enerji kapasitesinin küresel dağılımı (IRENA).

Yenilenebilir enerji kaynakları, 2022 yılında %10'luk bir büyüme kaydetmiştir. Çin, geçtiğimiz yılın güneş ve rüzgâr enerjisi ilave kurulu kapasitesinin yarısını bünyesinde barındırarak bu büyümede önde gelen ülke olma konumunu sürdürmüştür. Toplam yenilenebilir enerji kaynakları kurulu kapasitesi 3371 GW'a ulaşmış, bu kapasitenin önemli bir kısmını hidro enerji (1255 GW), güneş FV (1046 GW) ve rüzgâr enerjisi (898 GW) teknolojileri oluşturmaktadır (Şekil 1.5) (IRENA, 2023). Teknolojik ilerlemeler ve temiz enerjiye yönelik politikalar, yenilenebilir enerjiye geçiş sürecini hızlandırmıştır. Dünya genelinde 166 ülke, ulusal veya bölgesel düzeyde belirli sektörlerde yenilenebilir enerji hedefleri belirlemiş ve 2050 yılına kadar %100

yenilenebilir enerji hedefini benimseyen ülke sayısı 36'ya ulaşmıştır (REN21, 2022). Bu hedeflerin çoğunluğu enerji sektörüne yönelik olmakla birlikte, ısıtma, soğutma ve ulaştırma sektörleri de bu hedefleri benimsemeye yönelik adımlar atmaktadır.

1.2.1. Güneş enerjisi: FV sistemler

Güneş, gezegenimiz için tükenmez bir enerji kaynağıdır ve Dünya yüzeyi ortalama olarak 343 W/m^2 güneş enerjisi almaktadır (Alley vd., 2023). Ayrıca güneş enerjisi, diğer enerji kaynakları arasında en bol ve yaygın olanıdır. Yılda yaklaşık 4 milyon EJ (exajoule) güneş enerjisi, yer yüzüne ulaşmaktadır (Kabir vd., 2018). Bu, ihtiyaç duyduğumuz enerjinin çok daha fazlasıdır (Şekil 1.6). Örneğin, Dünya'nın birincil enerji tüketimi 2021 yılında 595.15 EJ'ye ulaşmıştır (bp, 2022b). Bu değer 2035 yılına kadar 778 EJ'ye ulaşması beklenmektedir (Absi Halabi vd., 2015).



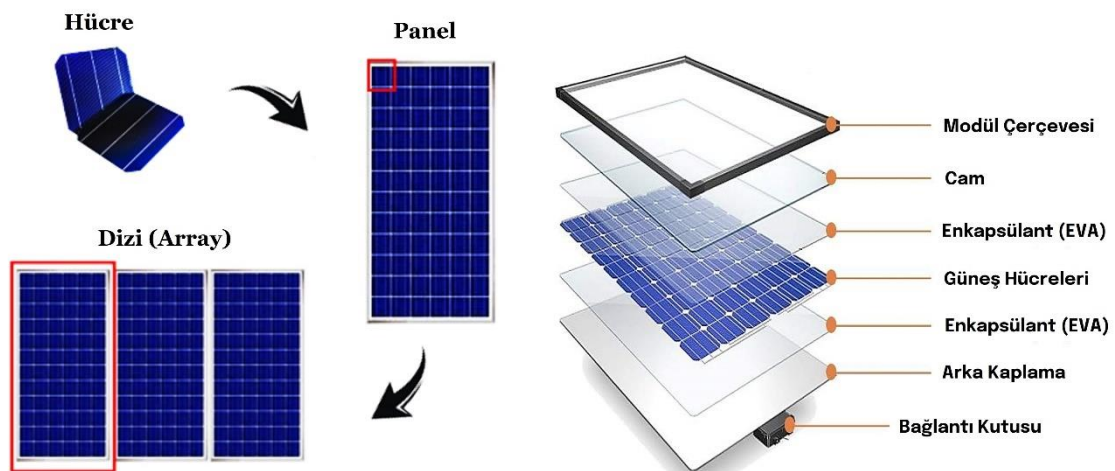
Şekil 1.6. Küresel ışınım atlası.

Her ülkenin güneş enerjisi potansiyeli farklı olsa da tüm ülkeler güneş enerjisinden doğrudan faydalanabilirler. Şekil 1.6'ya baktığımızda, dünyanın en güneşli bölgesinin Afrika kıtası olduğunu görüyoruz. Afrika'nın güneş enerjisi potansiyeli, konsantre güneş enerjisi (CSP) için 460 PWh ve FV enerjisi için 660 PWh civarındadır (Kabir vd., 2018). Kıtaların kapsadığı alan ve güneş radyasyonunun bölgeye dağılımı gibi faktörler göz önüne alındığında, Avustralya, en yüksek güneş kaynaklarına sahip olan ülke olarak birinci sırada yer almaktadır. Ancak maksimum potansiyel dikkate alındığında, Afrika açık ara en yüksek güneş kaynaklarına sahip kıtadır. Orta Amerika, Orta Doğu ve Avrasya da diğer yüksek potansiyelli bölgelerdir. Sonuç olarak, Afrika kıtasının büyük ölçekli FV sistemler kurmak için uygun koşullara sahip olduğunu, Avustralya'nın ise konsantre güneş enerjisi sistemleri için uygun olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 1.1. Güneş enerjisi kurulu kapasite (IRENA, 2023).

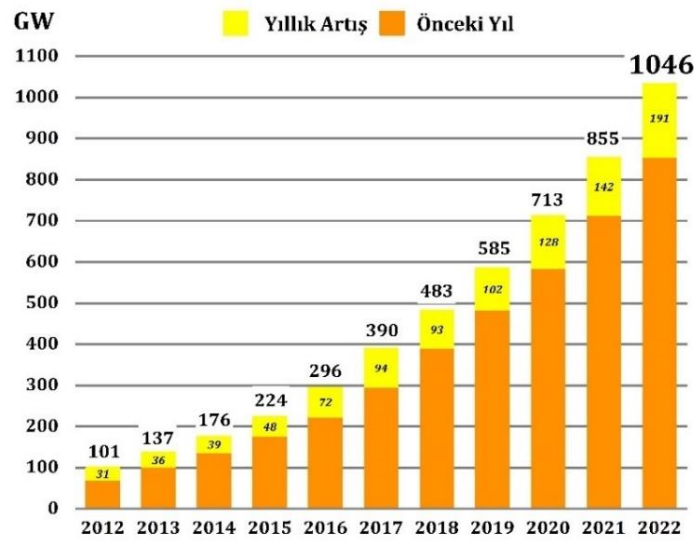
N	Bölgeler	Güneş enerjisi 2022	Büyüme
1	Avrupa	227.799 MW	%19.8
3	Afrika	12.641 MW	%8.7
4	Asya	597.573 MW	%23.1
5	Orta Amerika ve Karayipler	3.987 MW	%11.3
6	Avrasya	11.618 MW	%19.0
7	Orta doğu	12.882 MW	%33.0
8	Kuzey Amerika	126.443 MW	%17.9
9	Güney Amerika	32.773 MW	%57.6
10	Okyanusya	27.400 MW	%17.4
	Toplam	1.053.116 MW	%22.2

Bu büyük potansiyele rağmen, Afrika kıtasında güneş enerjisinin düşük kullanımı, ulusal enerji politikalarının eksikliği, iletim altyapısı ve yasal çerçevelerin zayıf olması gibi faktörlere bağlanabilir. Ayrıca, kıtasal elektrik tüketiminin düşük olması da etkili bir faktördür. Güneş enerjisi teknolojilerinin yaygınlaşması ve hızlı bir şekilde geliştirilmesi, büyük ölçüde güneş radyasyonunun dağılımı ve yoğunluğuna bağlıdır. Ancak güneş enerjisi endüstrisi, gelişmiş ülkeler ile yüksek güneş potansiyeline sahip ülkeler arasında önemli farklılıklar göstermektedir (Çizelge 1.1). Görece düşük bir güneş potansiyeline sahip olan Çin, güneş enerjisinden en fazla yararlanan ülkedir. Japonya ve Almanya, sınırlı güneş kaynaklarına rağmen güneş enerjisi teknolojisi ve kullanımı açısından önde gelen ülkelerdir (Pavalie vd., 2019).



Şekil 1.7. Güneş hücresi, güneş paneli ve fotovoltaik (FV) panel dizisinin gösterimi. Güneş panelinin yapısı ve bileşenleri.

Güneş enerjisi teknolojilerinin yaygın olarak kullanılabilir olduğu bölgelerde bu teknolojilerin benimsenmesi hayati öneme sahiptir. Ancak, bir teknolojinin bölgesel veya yerel ölçekte kabul görmesi, sosyal, ekonomik ve finansal etkilerle doğrudan ilişkilidir. Günümüzde güneş enerjisinden faydalanmak için çeşitli teknolojiler mevcuttur, ancak en yaygın kullanılanı güneş FV sistemleridir. FV sistemler, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren elektronik cihazlardır. Bu sistemlerin tasarımı ve kullanımı oldukça basittir. FV cihazlar, elektriği indüklemek için genellikle silisyum gibi yarı iletken malzemeleri kullanır. Güneş ışığından aldığı enerjiyle elektronları yüksek enerji seviyesine geçirerek akım oluşmasını sağlar. Bu hücrelerin bir araya getirilmesiyle güneş panelleri oluşturulur ve panellerin bir araya gelmesiyle FV sistemleri oluşur (Şekil 1.7). Bu sistemler, inverter, batarya, şarj kontrol, AC/DC bağlantılar, montajlama, mekanik-elektrik kurulum gibi bileşenleri içerir (Akgayev & Unsur, 2024). FV sistemleri, şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız ve hibrit olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Şebekeye bağlı sistemler, konutlarda tercih edilen bir seçenektir; panel dizileri, invertör aracılığıyla doğrudan şebekeye bağlanır. Şebekeden bağımsız FV sistemleri ise batarya depolama gerektirir ve şebekenin olmadığı kırsal bölgelerde enerji ihtiyacını karşılar, genellikle su pompalama, havalandırma ve ısıtma sistemlerinde kullanılır. Hibrit FV sistemleri ise farklı enerji kaynaklarının kombinasyonunu kullanarak enerji verimliliğini ve kullanılabilirliğini artırır, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakların birleşimiyle kesintisiz enerji sağlar (Genus, 2021).



Şekil 1.8. Güneş FV küresel kapasite ve yıllık artış 2012-2022 (REN21).

Son zamanlarda doğalgaz ve kömür fiyatlarındaki dalgalanmaların ardından, büyük ölçekli FV sistemlerin elektrik üretimi için ekonomik bir seçenek haline gelmesi dikkat çekicidir. Bu durum, güneş enerjisi teknolojilerinin enerji üretimindeki önemini ve karbon emisyonlarını azaltmada etkili bir çözüm olarak değerini artırmıştır. FV endüstrisi, maliyet düşüşleri ve teknolojik ilerlemeler sayesinde önemli bir evrim geçirmiştir. Teknolojik yenilikler, FV ürünlerinin performansını artırmış ve maliyetlerini düşürmüştür; bu, 2010 ile 2020 yılları arasında güneş paneli fiyatlarında gerçekleşen %93'lük maliyet düşüşüyle de desteklenmektedir. Güneş FV pazarı, 2022 yılında 191 GW'lık bir artışla dünya çapında FV kurulu kapasitesini 1046 GW'a yükseltmiştir (Şekil 1.8). Bu gelişmeler, teknolojik inovasyonun maliyet ve performans üzerindeki olumlu etkisini açıkça göstermektedir ((IRENA, 2023), (IEA, 2021b))

1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Motivasyon

Günümüzde, FV sistemlerinin maliyetlerini düşürmek için iki ana bileşeni geliştirmemiz gerekmektedir: verimliliklerini artırmak veya üretim maliyetini önemli ölçüde azaltmak. FV sistemlerinde maliyeti en çok artıran ilk iki bileşen, yarıiletken malzeme olarak kullanılan Si wafer ve kontak oluşumunda kullanılan metal malzemedir. Metalizasyon işlemi için kullanılan gümüş (Ag), maliyet açısından en büyük paya sahip olan faktördür. Bu nedenle, gümüş yerine daha ucuz olan nikel (Ni) ile kontak oluşturarak maliyetleri düşürmek, FV enerjisinin fosil yakıtlara karşı rekabetçi hale gelmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, Si ile Ni metal uyumu sağlanarak Ag kontak alternatifi olarak sunulmaktadır.

Bu bağlamda, endüstriyel ölçekte, wafer tabanlı silisyum güneş hücreleri üzerine şablon baskı tekniği kullanılarak Ni kontak oluşumu hedeflenmektedir. Şöyle ki:

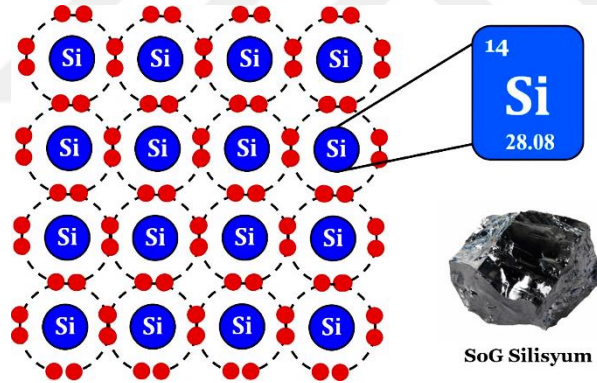
- Ni metal pasta kompozisyonu tüm bileşenleri ile geliştirilmiştir.
- Ni-Si arasında Schottky kontakten kaçınmak için ikisi arasına ara katman olarak grafen eklenmiştir.
- Geliştirilen Ni metal pastası şablon baskı yöntemiyle basılmıştır.
- Elektriksel, optiksel ve yapısal karakterizasyonlar yapılarak referans hücre ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

2. SİLİSYUM FOTOVOLTAİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

Silisyum, güneş hücrelerinde en yaygın kullanılan malzemedir ve yer kabuğundaki elementler arasında %27 oranıyla ikinci sırada yer alır. Doğada, silisyum genellikle silika (SiO₂) olarak kum ve kuvars şeklinde bulunur (CIFTJA vd., 2008). Silisyumun kullanılabilir hale getirilmesi için oksijenden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu işlem, metalurjik yöntemlerle gerçekleştirilir ve silisyum dioksit, karbonun oksidasyonu ile ayrıştırılarak silisyum ve karbon monoksit (CO) üretir. Bu işlem sonucunda, yaklaşık %98 saflıkta metalurjik dereceli silisyum (MG-Si) elde edilir.

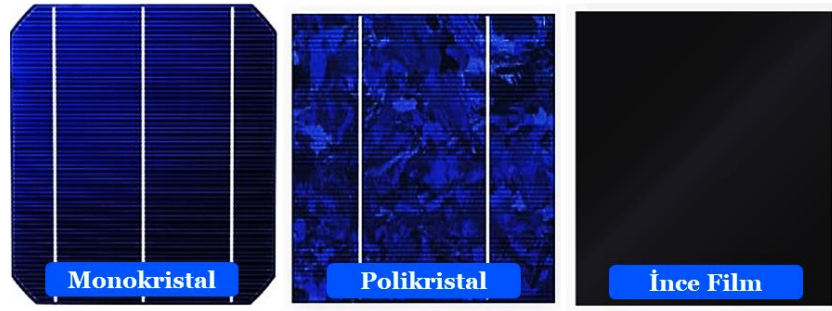


Daha sonra, silisyum gerekli saflığa ulaşana kadar rafine edilir ve reaktörde kimyasal reaksiyona sokulur. Bu işlemlerin sonucunda, güneş hücrelerinde kullanılan hammadde olarak hem yüksek saflıkta silisyum (SoG-Si, %99,9999) hem de kristal bir yapıya sahip silisyum üretilir. Şekil 2.1, bu süreçte elde edilen 6N saflığa sahip SoG-Si'yi göstermektedir (Pizzini, 2010; Pizzini vd., 1984; Roskill Information Services, 2011).



Şekil 2.1. Güneş hücre üretiminde kullanılan kristal bir yapıya sahip silisyum.

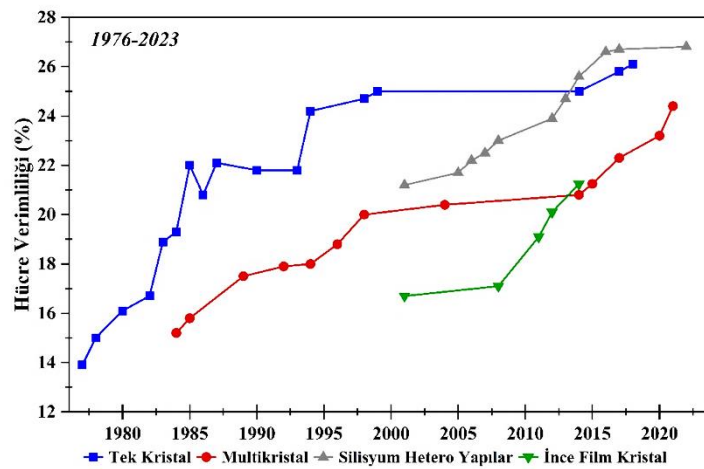
FV güneş panellerinde kullanılan yarı iletken malzemeler genellikle kristal silisyum (c-Si) yarı iletken malzemelerdir ve üretilen güneş modüllerinin %95'ini oluşturur (Ballif vd., 2022). Yüksek verimlilik, düşük maliyet ve uzun ömür gibi özellikleri nedeniyle silisyum, güneş hücrelerinde tercih edilen bir malzemedir. Silisyum, elektriksel, optik ve yapısal özelliklerini uzun süre koruyabilen bir elementtir. Ancak saf silisyumun ve tek kristal silisyumun üretimi yüksek teknoloji gerektiren ve zorlu bir süreçtir. Şekil 2.2'de endüstride yaygın olarak kullanılan silisyum güneş hücresi türleri gösterilmektedir. Bu türler arasındaki temel fark, yarı iletkenin kristal yapıdaki düzenlilik ve mükemmeliğidir.



Şekil 2.2. Silisyum güneş hücresi tipleri.

1950'lerde Bell Laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilen ilk modern güneş hücresi, kristal silisyum kullanılarak üretilmiş ve günümüzdeki silisyum tabanlı güneş hücrelerinin temelini oluşturmuştur. Zaman içinde, farklı yapılar ve teknolojiler üzerinde çalışılarak silisyum tabanlı güneş hücrelerinin verimliliği artırılmaya yönelik çabalar sürmüştür (Fraas, 2014; Green, 2009). Teknolojinin ilerlemesi, kristal silisyum temelli güneş hücrelerinin hızla gelişmesine ve performansının artmasına öncülük etmiştir.

Kristal silisyum güneş hücreleri, genellikle Czochralski (Cz-Si) yöntemiyle üretilen tek kristalli silisyumdan oluşan monokristal ve silisyumun eritilip kalıba dökülüp ince plakalar halinde kesilmesiyle elde edilen polikristal olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır (Glunz vd., 2001; Zhao vd., 2001). Monokristal silisyum güneş hücreleri, yüksek verimlilikleriyle dikkat çekerken, diğer silisyum güneş hücrelerine kıyasla daha maliyetlidir. Polikristal güneş hücreleri ise daha düşük bir verimlilikle karakterize edilse de üretim maliyetleri daha düşük olma avantajına sahiptir.



Şekil 2.3. NREL tarafından yayınlanan, kristal silisyum FV araştırma hücreleri için onaylanmış enerji verimlilikleri (NREL, 2023).

Şekil 2.3, kristal silisyum hücrelerinin verimliliğinin 1976'dan günümüze nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu hücreler laboratuvar koşullarında %25-27 arasında verimlilik seviyelerine ulaşabilmekte iken endüstriyel olarak standart test koşullarında (STC) %20-23 arasında değişen verimliliklere sahiptir. Bu sayede, kristal silisyum güneş hücreleri, enerji sektöründeki önemli bir gelişme olarak ortaya çıkmış ve farklı üretim teknikleri ve yapılar aracılığıyla verimliliği artırılmaya çalışılan bir alanda evrim geçirmiştir.

2.1. Hücre Temelleri

2.1.1. Yarı iletkenler

Güneş hücreleri, özel olarak işlenmiş yarı iletken malzemelerden üretilmektedir. Yarı iletken malzemeler, tam bir iletken olmayan, yani elektrik akımını sınırlayan malzemelerdir. Bu özellik, yarı iletken malzemeleri güneş hücreleri için ideal hale getirir (Honsberg & Bowden, 2019).

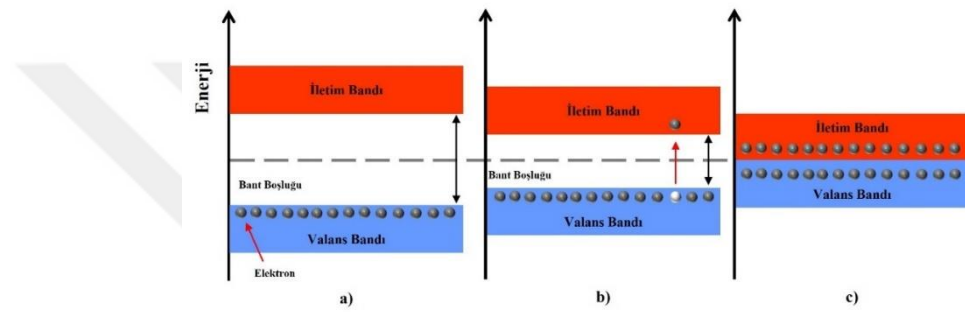
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
		5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.00	8 O 15.99	9 F 18.99		
		13 Al 26.98	14 Si 28.08	15 P 30.97	16 S 32.06	17 Cl 35.45		
IB	IIB	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90
47 Ag 107.87	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90		
79 Au 196.96	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.98	84 Po 210	85 At 210		

Şekil 2.4. Periyodik tablodan bir kesit. Güneş hücresi üretiminde kullanılan malzemeler yeşil ile gösterilmiştir.

Yarı iletken malzemelerin özellikleri, güneş hücrelerinin verimliliğiyle doğrudan ilişkilidir. Güneş hücrelerinde kullanılan bir yarı iletken malzeme silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi tek bir elementten olabilir. Galyum arsenik (Ga-As), indiyum fosfat (In-P) ve kadmiyum tellür (Cd-Te) gibi bileşiklerden veya silisyum (Si), germanyum (Ge), alüminyum (Al) veya galyum (Ga) gibi elementlerin alaşımlarından yapılabilir (Şekil 2.4) (Paranthaman vd., 2016). Araştırmacılar FV güneş hücreleri için optimum değerlere sahip olan en uygun malzemeyi seçmek için bu farklılıklardan yararlanabilir.

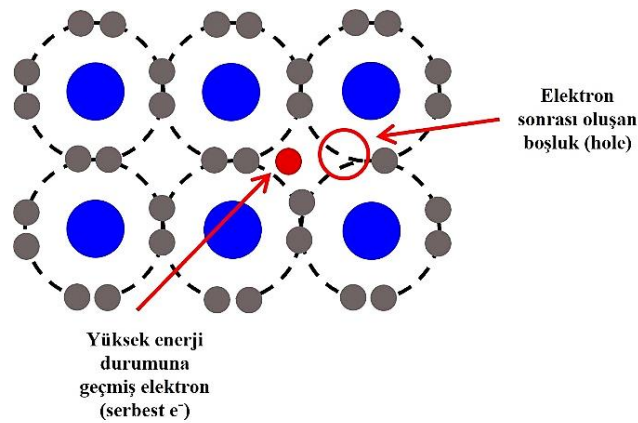
2.1.2. Bant aralığı

Bir malzemede bir elektronun bağlı durumundan serbest duruma geçebilmesi için gereken minimum enerji miktarına bant aralığı denir. Şekil 2.5, malzemenin enerji seviyelerinin en yüksek valans bandı ile en düşük iletim bandı arasındaki enerji farkını ifade eder. Elektronlar, valans bandında bulunurlar ve bu enerji seviyesine ulaşıldığında, elektronlar uyarılarak serbest bir duruma geçer ve iletim için hazır hale gelirler. FV hücrelerde, bant aralığını aşabilmek için gereken enerji güneşten sağlanır. Güneş enerjisi, elektronların bant aralığı enerjilerine ulaşmasını sağlar ve serbest elektronlar ile akım oluşturur.



Şekil 2.5. Malzemelerin iletkenlik derecesine göre değişen bant enerjileri
a) Yalıtkan b) Yarı İletken c) İletken

Yarı iletken malzemeler, ışığa maruz kaldıklarında ışığın enerjisini emerek elektronların yüksek enerji seviyelerine geçiş yapmasını sağlar. Bu enerji, malzemede elektronları harekete geçirir ve akım oluşumuna neden olur. Yarıiletkenler, FV cihazlar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır, çünkü yarı iletkenlerin iletkenlik özellikleri, enerji seviyelerinin kontrolüyle ve dışarıdan uygulanan uygun gerilimlerle manipüle edilebilir. Bu da elektrik enerjisi üretimi ve kontrolü için idealdir.

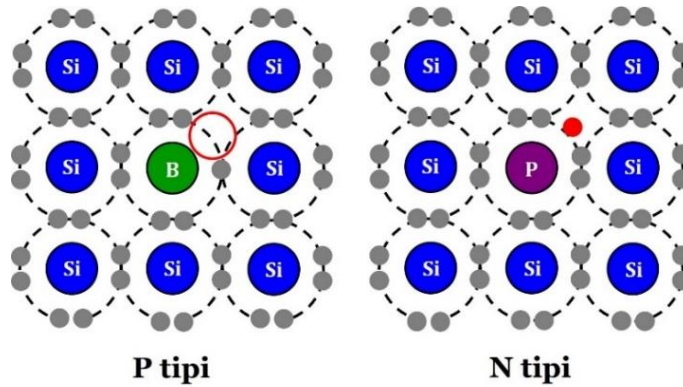


Şekil 2.6. Bir elektronun bağından kopması ve sonrası oluşan boşluk (Si örneği).

Atomlar arasında oluşan kovalent bağlar, elektronları bir arada tutar. Bu bağlı elektronlar, enerjileri değiştirilmediği sürece hareket etmezler. Yüksek sıcaklıklarda elektronlar, bağlarından kopmak için yeterli enerjiyi kazanabilirler (Şekil 2.6). Bu durumda, elektronlar kafes etrafında serbestçe hareket ederler ve yüksek enerji seviyelerine ulaşırlar. Düşük enerji durumunda ise elektronlar hareketsizdir. Elektronlar, bu iki enerji seviyesi arasında bulunarak enerji seviyelerinin aralığını belirlerler. Bir yarı iletkenin bağ yapısı, yarı iletken malzemelerin elektronik yapısını şekillendirir ve malzemenin elektriksel özelliklerini etkiler. Bu nedenle, farklı uygulamalara bağlı olarak farklı bant aralıklarına sahip yarı iletken malzemeler seçilebilir.

2.1.3. P-N eklemi

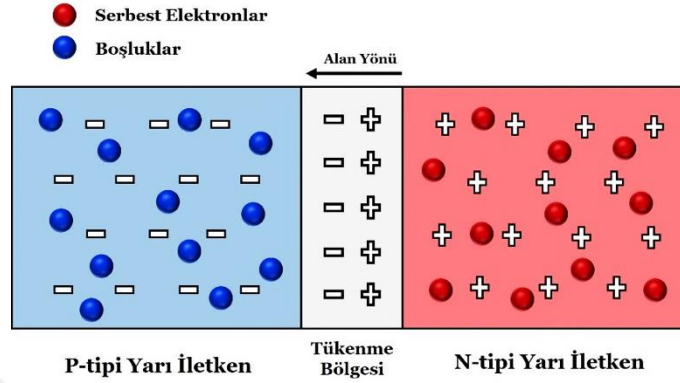
P-N eklemi, pozitif yüklü (P-tipi) ve negatif yüklü (N-tipi) yarı iletken malzemelerin birleşmesiyle oluşur. Yarı iletken malzemeler, P veya N tipi olarak katkılanabilir (Şekil 2.7). Katkılama (doping) tekniği, yarı iletken malzemelerdeki elektron ve boşluk sayısını değiştirmek için kullanılır (Smith vd., 2018). Katkılama yöntemiyle, grup IV yarı iletken malzemeleri, grup V atomları ile katkılanarak N-tipi malzeme veya grup III atomları ile katkılanarak P-tipi malzeme haline getirilebilir (Şekil 2.7). N-tipi malzemeler, mevcut elektron sayısını artırarak yarı iletkenin iletkenliğini artırırken, P-tipi malzemeler, mevcut boşluk sayısını artırarak yarı iletkenin iletkenliğini artırır.



Şekil 2.7. P tipi: Silisyum (Si) atomunun yerine bor (B) atomunun yerleşmesi sonucu oluşan boşluk. N tipi: Silisyum (Si) atomunun yerine fosfor (P) atomunun yerleşmesi sonucu oluşan bir serbest elektron.

Silisyum güneş hücrelerinde de bir P-N eklemi yapısı kullanılır. Güneş hücrelerinde kullanılan silisyum yarı iletken malzeme, P-tipi olması için bor ile katkılanır. Bu işlem, malzemenin kristal yapısında bor atomlarının yer aldığı bir bölge oluşturur. Bu

bölge, pozitif yüklü bir malzeme olarak davranır. N-tipi yarı iletken malzeme oluşturmak için ise fosfor kullanılır (Şekil 2.7). Malzemenin kristal yapısında fosfor atomları yer alır ve fazla serbest elektron oluşmasını sağlar. Bu bölge, negatif yüklü bir malzeme olarak davranır.

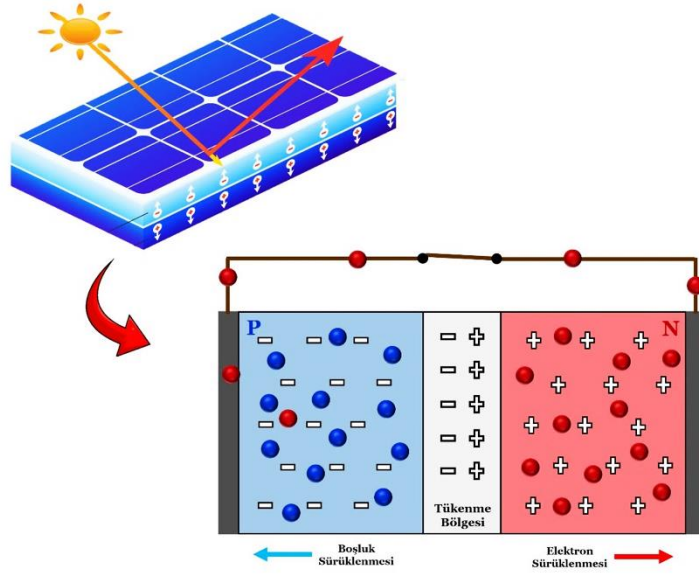


Şekil 2.8. P-N eklemine şematik gösterimi.

N tipi ve P tipi yarı iletken malzemelerin temas ettiği noktada bir P-N eklemi oluşur. N tipi bölge yüksek elektron konsantrasyonuna, P tipi bölge ise yüksek boşluk konsantrasyonuna sahiptir. Bu iki bölge arasında difüzyon süreci gerçekleşir, N tipindeki fazla elektronlar P tipine doğru yayılırken, P tipindeki boşluklar N tipine doğru yayılır. Elektronların ve boşlukların P-N eklemi noktasına doğru hareket etmesiyle N tipi bölgede pozitif iyon çekirdekleri, P tipi bölgede ise negatif iyon çekirdekleri ortaya çıkar. Bu durumda, iki bölge arasında bir elektrik alanı (E alanı) oluşur. Bu bölgeye "tükenme bölgesi" denir (Şekil 2.8), çünkü elektrik alanı serbest taşıyıcıları hızlı bir şekilde süpürerek bölgeyi serbest taşıyıcılardan arındırır.

2.1.4. Fotovoltaik etki

Fotovoltaik etki, yarıiletken malzemelerin ışık tarafından uyarılması sonucu elektriksel enerjiye dönüşebilmesine dayanır. Bu etki, ilk olarak 1839 yılında Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Ancak, güneş hücrelerinin yaygın kullanımı ve ticari uygulamaları, 1954 yılında ilk silisyum P-N eklemli güneş hücresinin kullanımıyla başlamıştır (Rappaport, 1959). Fotovoltaik etki, güneş hücrelerinin yanı sıra diğer yarı iletken cihazlarda da kullanılabilir.



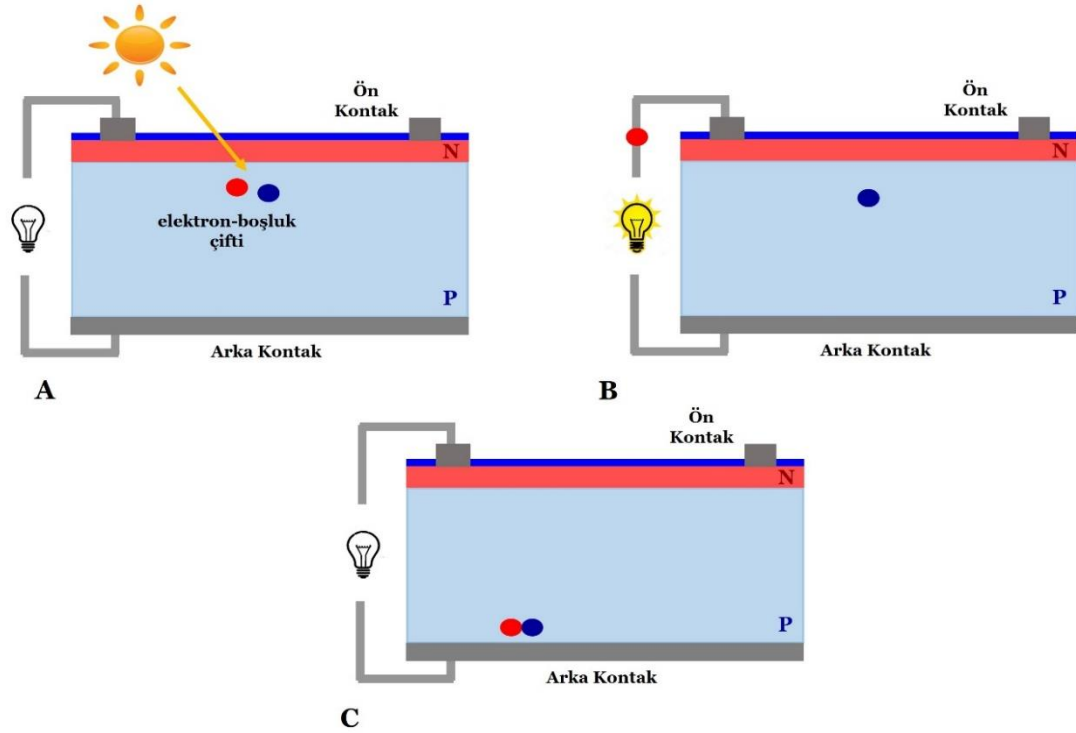
Şekil 2.9. İletken terminallerle kısa devre yapılmış güneş hücresinin, güneş ışığı altında sergilediği davranış.

Güneş hücreleri, fotovoltajik etkiyi kullanarak güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Işıkla uyarılan yarıiletken malzemelerdeki taşıyıcılar, tek başına elektrik üretimi için yeterli değildir. Güç üretimi için, bir gerilim oluşturulması gerekmektedir. Bu gerilim oluşturulması süreci, "Fotovoltajik Etki" olarak bilinir ve güneş hücrelerinde voltaj farkının oluşmasını sağlar. Fotovoltajik etkinin temel mekanizması şu şekildedir: Işık tarafından üretilen taşıyıcıların p-n eklemi tarafından toplanması, elektronların bağlantının n-tipi tarafına ve boşlukların p-tipi tarafına hareket etmesine neden olur. Güneş ışığı yarıiletken malzemelerin yüzeyine ulaştığında, fotonlar malzemelerin atomlarına çarparak elektronları enerji seviyelerinden serbest bırakır. Serbest bırakılan elektronlar, malzeme içindeki elektrik alan tarafından toplanarak bir akım oluşturur. Bu akım, güneş hücresinin terminalleri arasında bir gerilim oluşturur ve böylece elektrik enerjisi elde edilir. Bu sürecin bir diyagramı Şekil 2.9'da görülebilir.

2.1.5. Akım üreten ışık

FV hücrelerde güneş ışığıyla akım üretim temeli iki aşamalı bir süreçtir. İlk olarak güneş ışığı yarı iletken malzemelerde soğrulur ve valans bandındaki elektronların uyarılmasıyla elektron-boşluk çifti oluşturur. Yarı iletken malzemelerde oluşan elektron-boşluk çifti akım taşıyıcılar olarak adlandırılır. Bu durumda elektronlara çoğunluk taşıyıcılar, boşluklara ise azınlık taşıyıcılar denir. İkinci süreçte bu taşıyıcılar P-N eklemindeki elektrik alan etkisiyle ayrılır ve geri birleşme (rekombinasyon) gerçekleşmez. Çoğunluk taşıyıcılar bağlantı terminalleri boyunca hareket ederek akım oluşturur. Azınlık taşıyıcılar P-N eklemi bölgesine ulaşır ve elektrik alan tarafından

bağlantı boyunca süpürülür. Şekil 2.10 P-N eklemiyle çalışan güneş hücresinin çalışma döngüsünü göstermektedir.



Şekil 2.10. Bir P-N eklemine sahip güneş hücresinin çalışma prensibi. **A)** Güneş ışığının soğrulması sonucu elektron-boşluk çiftinin oluşması **B)** Işık tarafından üretilen elektronun bağlantı terminali aracılığıyla hareket etmesi ve akım oluşturarak elektrik üretmesi **C)** Elektron yükü geçerek boşlukla tekrar bağlanır ve devre tamamlanır.

2.2. Hücre Parametreleri

Güneş hücresinin özelliklerini ve performansını belirleyen bazı temel parametreler vardır. Bu parametreler bize, güneş hücresinin ışığı ne kadar verimli elektrik enerjisine dönüştürebileceğini gösterir. Güneş hücresi tasarımcıları ve üreticileri, bu parametrelerin optimizasyonu ile ilgilenir. Temel hücre parametreleri şunlardır:

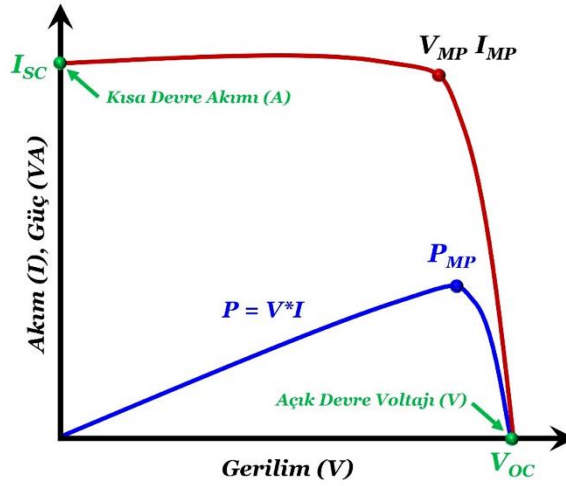
- Kısa Devre Akımı (I_{sc})
- Açık Devre Voltajı (V_{oc})
- Maksimum Güç (P_{max})
- Doldurma Faktörü (FF)
- Verimlilik (%)
- Direnç (R)

2.2.1. I-V eğrisi

Hücre parametrelerine geçmeden önce güneş hücresinin I-V karakteristik eğrisinin ne olduğuna açıklık getirelim. I-V eğrisi bir FV güneş hücresinin elektriksel karakteristiğini akım-gerilim (I-V) eğrisiyle temsil eder. Güneş ışığının, FV hücredeki P-N eklemine akım-voltaj özellikleri üzerinde etkisi vardır. Güneş hücresinin I-V eğrisi, matematiksel olarak tanımlanan bir denklemle ifade edilir. Aşağıdaki formül I-V eğrisini oluşturmak için kullanılan temel bir denklemdir:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad 2.2$$

Burada I, hücreden akan akımı temsil eder, I_L ise güneş ışığı tarafından üretilen akımı ifade eder ve ışık yoğunluğunun artışıyla doğru orantılı olarak artar. I_0 ise ters yönde akan doyma akımını temsil eder. Hücre sıcaklığını temsil eden T, elektron yükünü ifade eden q, Boltzmann sabitini temsil eden k ve hücre üzerindeki gerilimi temsil eden V'dir. n ise malzeme özelliklerine bağlı olarak değişen bir faktördür ve hücrenin kalite değerini gösterir (Lindholm vd., 1979).



Şekil 2.11. Güneş hücresinin akım-gerilim (I-V) eğrisi

Şekil 2.11'de gördüğümüz I-V eğrisi üzerinde, hücre parametreleri ve önemli noktalar işaretlenmiştir. Bu eğri, hücrenin çalışma noktalarını, açık devre gerilimini, kısa devre akımını ve doldurma faktörünü belirleyen bilgileri sağlar. Işık yoğunluğu, sıcaklık ve malzeme özellikleri gibi parametreler, I-V eğrisi üzerindeki etkileri nedeniyle güneş hücresinin performansını belirler.

Güç eğrisi, güneş hücresinin çalışabilmesi için gereken maksimum gücü (P_{MP}) gösterir. Akım eğrisi üzerinde ise kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre voltajı (V_{OC}) gibi parametreler, güneş hücrenin karakterizasyonunu belirler. Güneş hücresi kısa devre olduğunda voltaj sıfırken, açık devre olduğunda akım sıfırdır. Güneş hücre performansının iyileştirilmesi için, bu parametreler optimize edilir ve güç eğrisindeki maksimum nokta hedeflenir.

2.2.2. Açık devre voltajı

Açık devre voltajı devreden hiçbir akımın geçmediği voltaj değeridir. Bir güneş hücresinin sağlayabileceği maksimum voltajdır. Güneş hücresi denkleminde net akımı sıfıra eşitleyerek V_{OC} için bir denklem bulunur:

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad 2.3$$

Denkleme baktığımızda, V_{OC} 'nin sıcaklıkla doğrusal olarak arttığını gösterse de sıcaklık, karmaşık bir etkiye sahiptir ve hücre teknolojisine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, denklem V_{OC} 'nin güneş hücresinin doyma akımına (I_0) ve üretilen akıma (I_L) bağlı olduğunu göstermektedir. I_0 değeri güneş hücresindeki geri birleşmeye bağlıdır. Bu nedenle V_{OC} , hücredeki geri birleşme miktarının bir ölçüsüdür.

2.2.3. Kısa devre akımı

Güneş hücresi üzerindeki voltaj değerinin sıfır olduğu durumdaki akıma kısa devre akımı (I_{SC}) denir. Yani güneş hücresi kısa devre olduğunda, güneş hücresinden geçen akımdır. Kısa devre akımı ışığın soğrulmasıyla üretilen taşıyıcıların toplanmasından kaynaklanır. İdeal bir güneş hücresinde kısa devre akımı ve güneş ışığı tarafından üretilen akım aynıdır. Bu nedenle kısa devre akımı, güneş hücresinden alınabilecek en büyük akımdır. Kısa devre akımı hücre alanı, fotonların sayısı (ışık kaynağının gücü), gelen ışığın spektrumu ve güneş hücresinin optik özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır.

$$J_{SC} = qG(L_n * L_p) \quad 2.4$$

burada G, üretim hızı, L_n ve L_p , sırasıyla elektron/boşluk çiftinin difüzyon uzunluklarıdır. Bu denklem, kısa devre akımının üretim hızına ve difüzyon uzunluğuna bağlı olduğunu gösterir.

$$I_{SC} = J_{SC} * A \quad 2.5$$

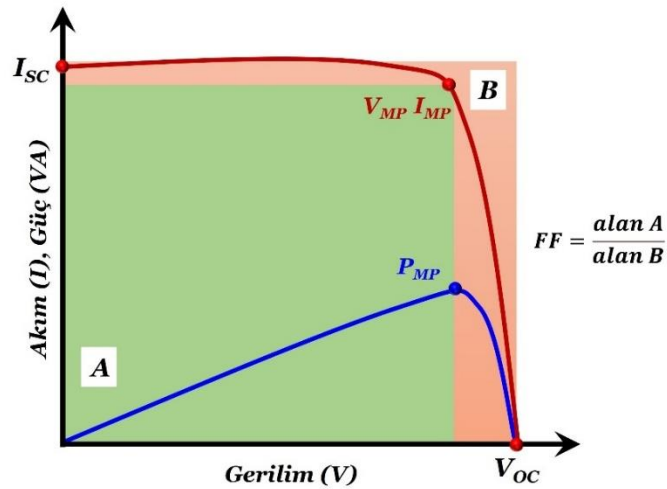
Bir güneş hücresinin kısa devre akımı, gelen ışığın spektrumuna ve hücreye ulaşan foton akısına bağlıdır. Kısa devre akımı, akım yoğunluğu (J_{SC}) ile hücre alanının (A) çarpımıyla hesaplanır.

2.2.4. Doldurma faktörü

Açık devre voltajının ve kısa devre akımının, sırasıyla güneş hücrelerinden alınabilecek maksimum voltaj ve akım olduğunu yukarıda açıklamıştık. Ancak her iki noktada da güneş hücresinden gelen güç sıfırdır. Doldurma faktörü (FF), V_{OC} ve I_{SC} ile güneş hücresinin maksimum gücünü belirleyen bir parametredir (Bayod-Rújula, 2019). FF, bir güneş hücresi tarafından üretilen maksimum gücün (P_{max}), V_{oc} ve I_{sc} ile çarpımı arasındaki orandır. FF, hücrenin iç direncini ve verimliliğini gösterir. Yani, FF'nün yüksek olması, hücrenin daha iyi bir enerji dönüşüm verimliliği sağladığını gösterir. Güneş hücresinin performansını artırmak için, FF optimize edilmeye çalışılır

$$FF = \frac{I_{MP} * V_{MP}}{I_{SC} * V_{OC}} = \frac{P_{max}}{I_{SC} * V_{OC}} \quad 2.6$$

Denklemdaki "MP" alt simgesi güneş hücresinin maksimum güç noktasındaki değeri belirtir. Güneş hücreleri için maksimum güç noktası tanımlarız ve maksimum güç çıkışının olduğu noktayı yukarıdaki bölümlerde (Şekil 2.11) grafik üzerinde göstermiştik. Burada V_{MP} ve I_{MP} maksimum güç noktasındaki akım ve gerilimi ifade eder.



Şekil 2.12. Güneş hücresinin doldurma faktörünün I-V eğrisi üzerindeki gösterimi

FF, grafiksel olarak güneş hücresinin "kareliğinin" bir ölçüsüdür ve aynı zamanda I-V eğrisinin kapsadığı en büyük dikdörtgenin alanıdır. Şekil 2.12'de FF, I-V eğrisi

üzerinde gösterilmiştir. Grafik voltajın bir fonksiyonu olarak hücre çıkış akımını (kırmızı çizgi) ve gücü (mavi çizgi) gösterir. Ayrıca grafik daha yüksek voltajın daha yüksek FF'ne sahip olacağını göstermektedir. FF'nün yüksek olması güneş hücresinin daha verimli çalıştığı anlamına gelir.

2.2.5. Verimlilik

Verimlilik, güneş hücrelerinin performanslarının karşılaştırılmasında sıklıkla kullanılan bir parametredir. Güneş hücresinden çıkan enerjinin güneş hücresine gelen enerjiye oranı olarak hesaplanır. Bu dönüşüm verimliliği gelen ışığın 1,5AM spektrumu tarafından tanımlandığı, güneşin ışınım akım (I_{in}) değerinin 1000 W/m^2 'ye sahip olduğu ve $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta standart test koşulları (STC) altında ölçülür (Bayod-Rújula, 2019).

Güneşin yeryüzündeki radyasyon gücünün yaklaşık 1000 W/m^2 olduğu kabul edilir. Bu nedenle, bir güneş hücre verimliliği şu şekilde ifade edilebilir:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{1000} \quad 2.7$$

burada η , verimliliği, P_{in} , güneş hücresine gelen enerjiyi, P_{max} ise güneş hücresinden elde edilen gücü ifade eder.

$$P_{max} = V_{OC} * I_{SC} * FF \quad 2.8$$

Bir güneş hücresinin performansı, sıcaklık, gelen ışığın spektrumu ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Bu performans, güneş hücresinin verimliliğiyle ölçülür ve yüzde (%) olarak ifade edilir.

2.3. Direnç Etkileri

Güneş hücreleri için bir başka elektriksel parametre dirençtir. Güneş hücresinin her bileşeninin bir direnci vardır ve bu direnç hücre performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Direnç etkileri güneş hücrelerinin verimini azaltmaktadır. İdeal olarak, hücrenin dirençleri olabildiğince düşük olmalıdır. Dirençlerin büyüklüğü ve etkisi hücre geometrisine bağlıdır.

2.3.1. Karakteristik direnç (R_{CH})

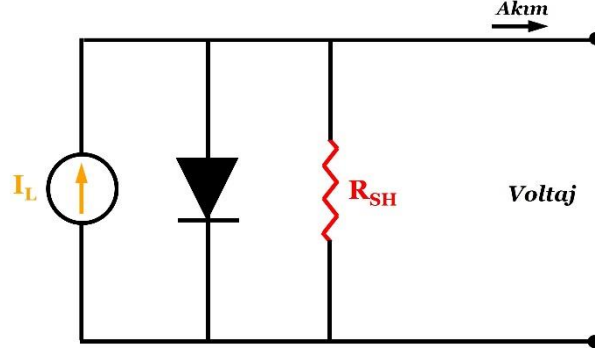
Karakteristik direnç, hücrenin maksimum güç noktasındaki çıkış direncidir. Güneş hücresinden maksimum güç çıkışı almak için kullanılan bu parametre, R_{CH} sembolü ile gösterilir ve birimi Ω 'dur (Green, 1982). Hücrenin iç direncidir ve bunun yüksek olması daha az akım geçeceği anlamına gelir. Karakteristik direnç aşağıdaki şekilde bulunur:

$$R_{CH} = \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \approx \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad 2.9$$

Güneş hücrelerinde R_{CH} oldukça kullanışlıdır, çünkü hücrelerin seri ve paralel bağlantılarında belirleyici rol oynar. Hücreler seri olarak bağlandığında R_{CH} toplamı artarken, hücreler paralel bağlandığında R_{CH} toplamı azalır. Yüksek direnç hücre performansını düşüreceği için istenmeyen bir durumdur.

2.3.2. Şönt direnç (R_{SH})

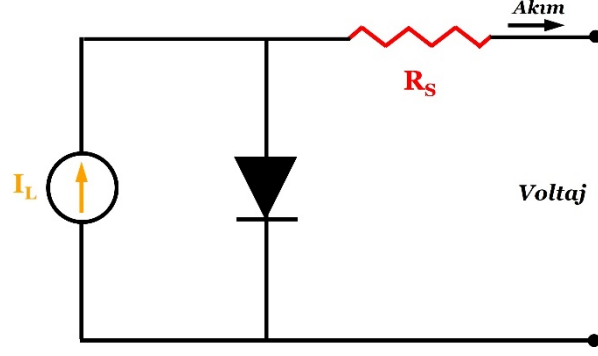
Güneş hücrelerinin tasarımından ve üretiminden kaynaklı oluşan direnç şönt (R_{SH}) direnci denir. Yani bir güneş hücresinde bir bölgenin direncinin, diğer bölgelerinin direncine göre daha düşük olması olarak tanımlanır ve bu bölgede R_{SH} direnci oluşur. R_{SH} direncinin düşük olması üretilen akım için alternatif bir akım yolu oluşturur ve güç kaybının olmasına sebep olur (Şekil 2.13). Bu güneş hücresinden akan akım miktarını azaltır. Şönt direnci güneş hücresinin belirli bölgesinde oluşan bozukluklardır ve hücre verimini düşüreceği için istenmeyen bir durumdur. Malzeme kalitesi ve hücre üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle R_{SH} direncinin oluşumu önlenir.



Şekil 2.13. Şönt dirençli bir güneş hücresinin şeması.

2.3.3. Seri direnç (R_S)

Seri direnç bir güneş hücresinde, elektronlar tarafından oluşan akımın izlediği yolda karşılaşılan dirençlerin toplamını ifade eder. Bunlar, sırasıyla yarı iletken malzemelerin direnci, metal bağlantıyla silisyum arasındaki temas direnci ve bağlantı metal kontakların direncidir. Şekil 2.14'de seri dirençli bir güneş hücresinin eşlenik devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Seri dirençli bir güneş hücresinin şeması.

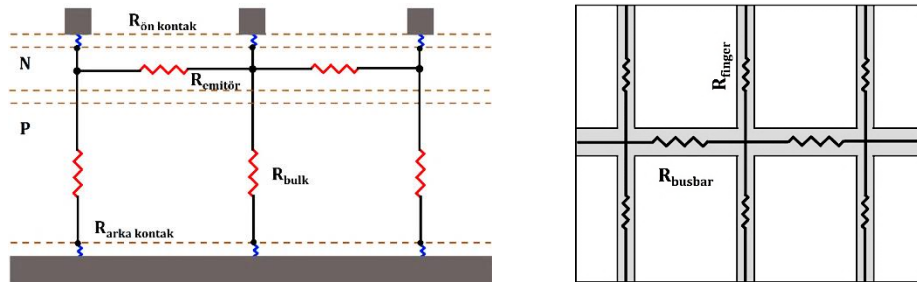
Seri direncin yüksek olması FF'nü azaltmaktadır. Güneş hücresinin akım seviyeleri, seri dirençlerde oluşacak kayıplara bağlı olarak değişecektir. Direncin güneş hücresinin çıkış gücünü azaltacağı ve bu nedenle hücre performansını düşüreceği için seri dirençlerin olabildiğince düşük seviyelerde olması istenir. Güneş hücrelerinde güç kaybına neden olan bileşenlerin toplamı aşağıdaki gibidir:

$$P_{Toplam} = P_{emitör} + P_{kontak} + P_{finger} + P_{busbar} + P_{gölgeleme} \quad 2.10$$

Gölgeleme dışında güç kayıplarını dirençler oluşturmaktadır. Bu seri dirençler aşağıda sıralanmıştır:

- Temel tabaka direnci (R_b)
- Emitör direnci (R_E)
- Kontak direnci (R_c)
- Elektrot direnci (R_f)

Güneş hücrelerinin direnç bileşenlerinin şematik diyagramı Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Bu bileşenler arasında yarıiletken emitör direnci ve metal elektrotlar genel seri direncin ana bileşenleridir ve optimizasyon sürecinde en çok dikkate alınması gereken unsurlardır.



Şekil 2.15. Bir güneş hücresinin direnç bileşenleri.

Üretilen akım tipik olarak hücrenin temel katmanından hücre yüzeyine dikey olarak akar. Temel tabakanın direnci ve akımı sabit tutulur. Hücrenin bu bileşenin gösterdiği dirence “bulk direnci” denir ve R_b ile tanımlanır. Bir diğer güç kaybı emitör direncinden (R_E) kaynaklanır. Ancak emitör tabakada akımın aktığı mesafe sabit olmayabilir. Akım, metal elektrotlara en yakın yerden toplanır. Kontak direnç kayıpları, silisyum güneş hücresi ile metal elektrotların temas ettiği noktadaki arayüzde meydana gelir. Ön yüzeydeki metal elektrotlar, alttaki yarıiletken malzemeden çok daha yüksek bir iletkenliğe sahiptir.

$$R_S = R_{arka\ kontak} + R_{bulk} + R_{emitör} + R_{ön\ kontak} + R_{finger} + R_{busbar} \quad 2.11$$

Güneş hücrelerindeki seri direnç kayıpları R_S olarak adlandırılır. R_S , altı farklı bileşenin direncinden oluşur. Bu bileşenler ince elektrot (R_{finger}), busbar (R_{Busbar}), ön kontak ($R_{ön\ kontak}$), emitör ($R_{emitör}$), temel tabaka (R_{Bulk}) ve arka kontak ($R_{arka\ kontak}$) dirençleridir. R_S 'nin düşük olması, güneş hücrelerinin verimliliğini artırır ve daha fazla enerji üretmelerine olanak sağlar. Bu sebeple, güneş hücrelerinin tasarımı ve üretimi sürecinde bu kayıpların en aza indirilmesi, temel hedefler arasında yer almaktadır.

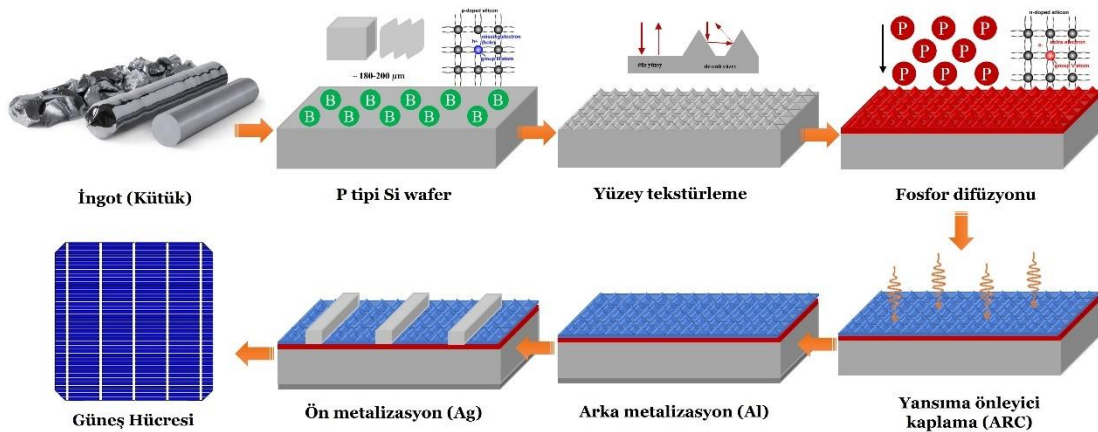
2.4. Hücre Üretimi ve Mimarileri

Günümüz ticari FV güneş hücrelerinin çoğunda ana malzeme olarak silisyum kullanılır. FV modülleri oluşturan bu hücreler farklı üretim teknolojilerine sahip olabilirler. Ancak birkaç üretim adımı hariç tüm silisyum hücrelerde tipik olarak aynı proses uygulanır. Silisyum tabanlı güneş hücrelerinin üretim zincirini ana bölümlere ayıracak olursak: (1) polisilikon üretimi, (2) kütük (ingot) üretimi, (3) wafer üretimi, (4) hücre üretimi ve (5) modül üretiminden oluşmaktadır (Şekil 2.16) (USDE, 2023). Polisilikon parçalarının monokristal bir yapıya dönüştürülmesi için Czochralski (Cz) veya float-zone (FZ) üretim yöntemleri kullanılır (Glunz vd., 2001), (Pfann, 1952). Bu yöntemler, tek bir kristal büyütme için kullanılan özel eritme teknikleridir. Monokristal Si üretmek için kullanılan en yaygın yöntem Czochralski metodudur. Cz yöntemi, küçük bir tohum kristalinin bir potadaki eriyik içine sokulmasıyla başlayan ve tek bir kristal elde etmek için tohumu yukarı doğru çeken bir kristal büyütme teknolojisidir. Si silindirik bir biçimde büyütülür. Daha sonra kare olacak şekilde kırılarak wafer haline getirilir. Sonraki işlemler hücre mimarisine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir ve tüm bu işlemlerin sonucu Si waferler hücrelere dönüştürülür. Hücrelerin bir araya gelmesiyle güneş enerjisi panelleri olarak bildiğimiz FV modüller oluşturulur (Şekil 2.16).



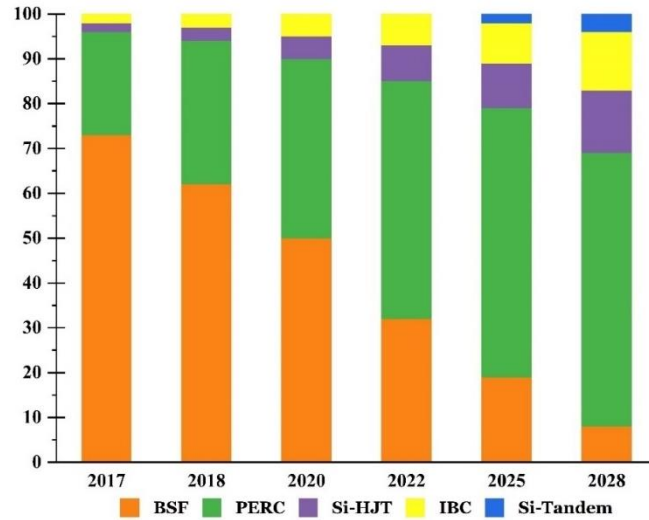
Şekil 2.16. FV modül üretim şeması.

Güneş hücre üretiminde, yüksek verimlilik, düşük maliyet veya her ikisini de sağlayan çeşitli üretim teknolojileri kullanılmaktadır. Standart FV hücre üretim hattı şemasında Cz yöntemiyle üretilen kristal silisyum (c-Si) güneş hücreleri dilimlenerek wafer haline getirilir. Dilimleme işlemi sonrasında wafer yüzeylerinde testere hasarı oluşabilir, bu nedenle kaldırma işlemiyle testere hasarları giderilir. Yüzey alanı artırmak için kimyasal çözeltilerle yüzey tekstüre işlemi uygulanır. N-tipi emitör oluşturmak için POCl_3 difüzyonu gibi yöntemler kullanılır ve böylece hücrenin temel yapısı olan P-N eklemi oluşturulur. Kenar izolasyonu işlemiyle hücre kenarında oluşan fazladan difüzyon giderilir ve ön yüzeydeki emitör bölgesi arka yüzeyden elektriksel olarak izole edilir. Yüzeylerdeki yansımaları azaltmak için ön yüzeyde yansımaya önleyici kaplamalar (ARC) kullanılır, bu kaplamalar kimyasal buhar biriktirme (CVD) işlemiyle uygulanır. Ardından ön ve arka terminal bağlantıları yapılır, gümüş (Ag) ön terminal ve alüminyum (Al) arka terminal tercih edilir. Tüm bu işlemlerden sonra hücreler fırınlanır, bu adımda yüksek sıcaklığa maruz kalarak metal kontakların silisyum yüzeyiyle tam temas sağlaması ve iyi bir elektriksel bağlantı oluşması sağlanır. Son olarak, hücreler modüller haline getirilerek güneş panelleri oluşturulabilir (Unsur, 2018). (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'ya bakınız).



Şekil 2.17. Tipik bir FV güneş hücresinin (Al-BSF) üretim adımlarının şematik olarak gösterimi.

Güneş hücresi üretimi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmakta ve yeni üretim varyasyonları geliştirilmektedir. PERC, TOPCon, IBC, HJT ve Si-Tandem gibi hücre üretim teknolojileri günümüz yüksek verimli güneş hücresi üretim teknolojilerinden bazılarıdır (Şekil 2.18) (ITRPV, 2023), (Taylor & Jäger-Waldau, 2019). PERC bugün hücre üretim endüstrisinde olgun bir teknolojidir ve Al-BSF güneş hücrelerinden sonra en yaygın kullanılan teknolojidir. Al-BSF güneş hücrelerinin verimlilik potansiyellerinin sınırlı olması, daha yeni hücre teknolojilerine kıyasla geride kalmıştır ve yerini PERC teknolojisine bırakmıştır. Ticari olarak iyi bir performans gösteren PERC teknolojisi şu anda güneş hücreleri arasında en çok tercih edilen hücre üretim teknolojisidir. Son yılların hücre üretimine damgasını vuran PERC hücrelerinin yeni nesil teknolojisi ise TOPCon'dur. TOPCon, geri birleşme kayıplarını azaltmak ve hücre verimliliğini artırmak için Si hücreye ince bir oksit tabakasının eklendiği yeni bir güneş hücresi üretim konseptidir. TOPCon teknolojisi yüksek verimlilik hedefleyen uygulamalarda popüler olarak kullanılmaktadır (Dullweber & Schmidt, 2016; Ghosh vd., 2022). Hücre üretim endüstrisine tanıtılan iki yeni teknoloji olan IBC ve HJT, güneş paneli imalatında benimsenen yüksek verimli teknolojiler arasındadır. Özellikle HJT son 10 yılın yükselen hücre üretim teknolojisidir (Lachenal vd., 2019; Liu vd., 2020). Bu teknoloji, kristal Si ve amorf ince film silisyumun bir kombinasyonudur. Monokristal silisyum güneş hücrelerinin iyi absorpsiyon ve amorf silisyum ince film hücrelerinin üstün pasivasyon avantajlarının yeni bir teknoloji olan HJT hücrelerde birleştirilmesidir. Si-Tandem, farklı yarı iletken malzemelerinin birleştirildiği teknolojiyi ifade eder. Bu yaklaşım, Si güneş hücreleriyle başka bir yarı iletken malzeme tabakasının kombinasyonunu içerir (Shen vd., 2020). Son olarak tüm bu teknolojilerden farklı olan IBC mimarisi, güneş hücrelerinin ön yüzeyinde yer alan metal kontaklarını hücrenin arka yüzeyine taşıyarak potansiyel olarak daha yüksek verimlilik elde edilmesine dayanır. IBC hücreleri, yüksek maliyet ve karmaşık üretim süreçleri nedeniyle yaygın olan güneş hücrelerine kıyasla daha az tercih edilen hücre tipi olsa da önümüzdeki yılların belirleyici teknolojisi olma yolundadır. Sonuç olarak PERC, TOPCon, IBC, HJT ve Si-Tandem teknolojileri güneş hücre endüstrisinde en gelişmiş teknolojiler arasında yerlerini alarak popülerliğini korumaktadır (Şekil 2.18). Bu teknolojiler sayesinde, güneş enerjisi üretiminde yüksek verimlilikler elde edilerek, temiz ve sürdürülebilir bir gelecek için önemli adımlar atılmaktadır.



Şekil 2.18. Farklı güneş hücre üretim teknolojilerinin yıllara göre pazar payı ve öngörüler (ITRPV, 2023).

Şekil 2.18, Fotovoltaik için Uluslararası Teknoloji Yol Haritası (ITRPV) tarafından yayınlanan ticari FV hücre teknolojilerinin mevcut ve öngörülen pazar paylarını göstermektedir. Şu anda pazarda en büyük pay sahibi PERC hücrelerdir ve önümüzdeki 5-10 yıl boyunca bu şekilde devam etmesi öngörülmektedir. PERC teknolojilerinin 2028 yılına kadar FV hücre pazarının %60'ını oluşturması beklenmektedir (ITRPV, 2023). Hücre üretim hattına ek işlem adımlarının uygulanabilmesi, yeni teknolojilere geçiş ve verimlilik artışı için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, PERC üretim hattında yapılan birkaç ek işlem ile TOPCon hücrelerinin üretimi de mümkündür. PERC, TOPCon, IBC, HJT ve Si-Tandem gibi hücre üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, güneş enerjisinden elektrik üretiminde yüksek verimliliklerin elde edilmesi anlamına gelir. Gelecekte, bu teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, FV sektörünün büyümesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Çizelge 2.1. Onaylanmış yüksek verimli güneş hücresi mimarileri (NREL, 2023).

Mimari Yapı	Alan (cm ²)	Voc (mV)	Isc (mA)	FF (%)	Verimlilik (%)
PERC (P Tipi)	261,40	692,0	41,60	83,2	23,70
iTOPCon (N Tipi)	261,46	716,7	40,14	82,0	23,57
TOPCon (N tipi)	242,97	721,6	41,64	83,9	25,20
Si-HJT (N tipi)	244,53	748,5	39,48	85,5	25,30
Si-HJT (P tipi)	274,10	751,3	41,30	85,6	26,60
IBC (N Tipi)	179,74	740,3	42,5	84,7	26,60

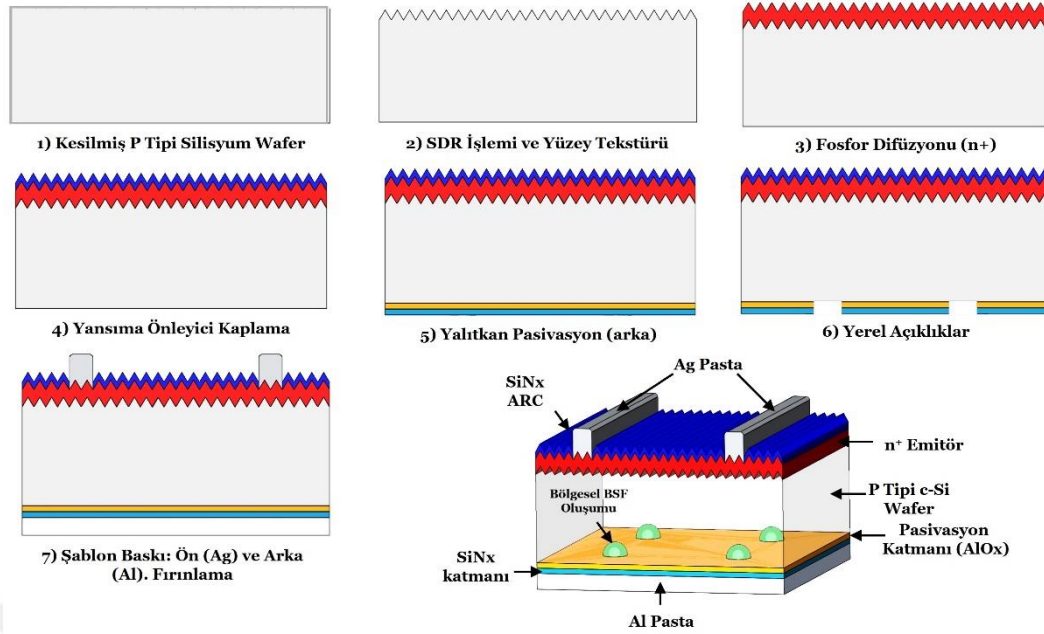
*Güneş hücre teknolojileri sürekli olarak gelişmekte olduğundan, onaylanan en yüksek verimlilik değerleri zamanla değişebilir.

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), güneş hücresi teknolojilerinde onaylanmış en yüksek verimlilik sonuçlarını düzenli olarak yayınlamaktadır (Green vd., 2023; NREL, 2023). Son yayımlanan verilerden bazıları Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Bu veriler, FV pazarında rekabet eden dört silisyum tabanlı güneş enerjisi teknolojisi (PERC, TOPCon, IBC ve HJT) üzerinde odaklanmıştır. Bu teknolojiler arasında; (1) UNSW tarafından geliştirilen ve ticari üretimin büyük bir kısmını kapsayan PERC, (2) ilk olarak UNSW tarafından tanıtılan ve daha sonra Fraunhofer Güneş Enerji Sistemleri Enstitüsü (FhG-ISE) tarafından ticari olarak kullanılabilir hale getirilen TOPCon, (3) Sharp tarafından geliştirilen HJT ve son olarak (4) Lammer ve Shwartz tarafından önerilen ve Stanford Üniversitesi tarafından geliştirilen IBC hücreleridir. İlerleyen bölümlerde, FV endüstrisindeki bu hücre teknolojileri daha detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

2.4.1. PERC

Geleneksel silisyum FV hücrelerinin, güneş enerjisi endüstrisinde uzun süredir varoluşu, bu üretim teknolojisini standart hale getirmiştir. Al-BSF endüstriyel silisyum güneş hücrelerinin verimliliğinin yaklaşık %20 ile sınırlı olması, üreticileri yeni hücre mimari arayışına yönlendirmiştir. Teknolojinin gelişmesi ve olgunlaşması yeni hücre üretim teknolojilerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bunlardan ilki PERC (Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Kontak) hücrelerdir (Şekil 2.19). PERC hücre mimarisi, UNSW'li Green araştırma grubu tarafından 1989 yılında tanıtıldı ve bu yapı %22,8 enerji dönüşüm verimliliğine sahipti (Allen vd., 2019; Dullweber & Schmidt, 2016). Ancak, bu hücre yapısı için endüstriyel olarak uygun maliyetli ve yüksek performanslı üretim süreçlerinin geliştirilmesi yaklaşık 25 yıl sürmüştür. Bu süre zarfında, PERC hücrelerinin yapısal olarak piyasadaki standart silisyum güneş hücrelerine benzemesi belirgin bir avantaj olmuştur.

PERC güneş hücreleri günümüz güneş panellerinde kullanılan yaygın hücre üretim teknolojisidir. PERC hücreler, hücre verimliliğini artırmak için geleneksel güneş hücrelerinin modifiye edilmiş halidir. Standart monokristal Al-BSF hücrelerin aksine, PERC hücreleri güneş ışığının soğrulmasını iyileştiren pasivasyon katmanı sunar ve BSF katmanının bölgesel oluşmasını sağlar. Bu ekstra katmanın yansıtıcı özelliği sayesinde soğrulamayan güneş ışığı P-N eklemine geri yansıtılır ve daha fazla enerji üretimi gerçekleşir.



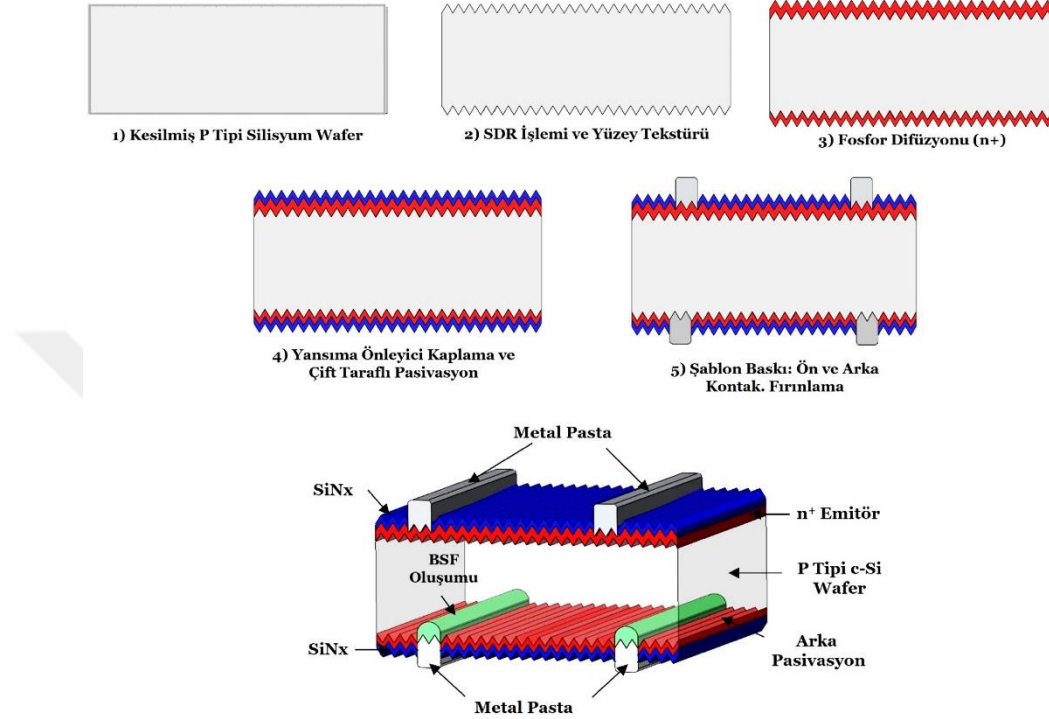
Şekil 2.19. PERC güneş hücrelerinin şematik yapısı.

PERC hücrelerde AL-BSF hücre işlemine fazladan iki adım eklenir. İlk olarak arka yüzeye bir pasivasyon katmanı uygulanır. Ardından arka pasivasyon yığnında bölgesel boşluklar oluşturularak Al arka kontağın silisyum tabakayla temas etmesi sağlanır. Bu işlem lazerler veya kimyasallarla yapılabilir. Bölgesel boşlukların açıldığı ve alüminyumun temas ettiği noktada BSF alanı oluşur (Şekil 2.19). Arka kısma pasivasyon katmanının eklenmesi yüzey geri birleşme kaybını azaltır ve daha yüksek verimlilik elde edilir. Ayrıca, bu tabaka ışığın daha iyi yakalanmasını sağlar. Işık, hücre içerisinde daha fazla dolaşarak fazladan taşıyıcı üretir ve daha fazla akım üretilir. Tüm bunlara ek olarak PERC teknolojisi, endüstride yaygın bir şekilde kullanılarak bir standart haline gelmiştir. Verimlilik ve performans açısından sürekli olarak geliştirilen bir teknoloji olması, PERC mimarisini diğer teknolojilere kıyasla tercih edilebilir kılmaktadır.

2.4.2. Bifacial PERC

Güneş ışığından en iyi şekilde yararlanmak ve daha fazla enerji üretebilmek için güneş hücreleri tek yüzlü (monofacial) ve çift yüzlü (bifacial) olarak farklı tasarımlarda kullanılmaktadır. Tek yüzlü güneş hücreleri genellikle güneş panellerinde gördüğümüz ve yaygın olarak kullanılan standart hücrelerdir. Tek yüzlü güneş hücreleri ışığı yalnızca ön yüzeyde soğurarak elektrik enerjisi üretebilen hücrelerdir. Çift yüzlü güneş hücreleri ise hem ön hem de arka yüzeyinden aldığı güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştüren özel bir hücre mimari yapısıdır (Şekil 2.20). PERC hücreleri hem tek yüzlü hem de çift yüzlü hücreler şeklinde üretilebilmektedir. Çift yüzlü PERC teknolojisi, tek yüzlü PERC

güneş hücrelerinden farklı olarak modülün arka tarafına yansıyan albedo güneş ışınlarından da elektrik üreterek daha yüksek verimlilik sağlar. Çift yüzlü PERC, çift yüzlü güneş hücrelerinin PERC teknolojisi ile birleştirilmesidir (Sugiura vd., 2020; C. Zhang vd., 2020).



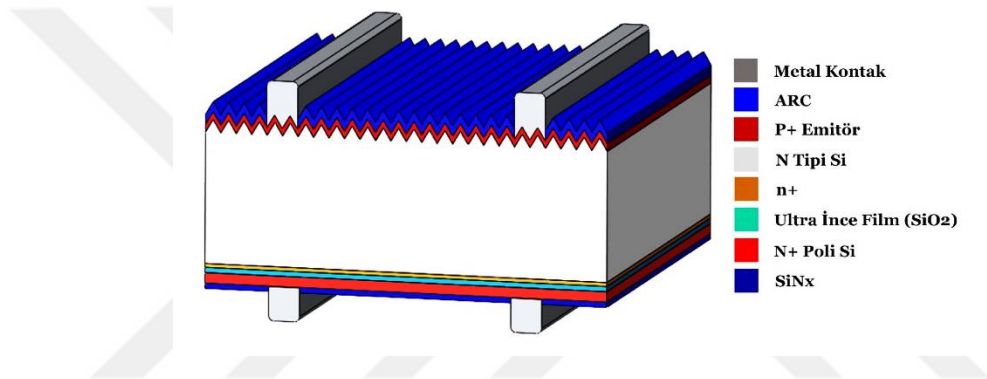
Şekil 2.20. Bifacial PERC güneş hücrelerinin şematik yapısı.

FV güneş enerji sistemlerinde çift yüzlü hücrelerin kullanılmasının temel sebebi yüksek enerji üretimidir. Her iki tarafından da güneş ışığı olarak enerji üretebilen özellikleri, genel olarak enerji üretiminde artışa ve hücre verimliliğinin artmasına olanak tanır. Bu nedenle, güneş panellerinde çift yüzlü hücrelerin kullanımı giderek popüler hale gelmektedir. Üretim proseslerinde bazı değişiklikler gerektirse de bu tasarımın sağladığı avantajlar önemlidir. Ayrıca, estetik bir görüntüye sahip olmaları da bu hücrelerin tercih edilmesini teşvik eder. PERC hücre teknolojisinin çift yüzlü olarak üretilmesi, farklı uygulama alanlarına ve avantajlara bağlı olarak tercih edilebilir bir alternatif olarak devam etmektedir.

2.4.3. TOPCon

Araştırmacılar, güneş enerjisi sektöründe ticarileştirme ve endüstriyel üretim potansiyeli yüksek olan yeni hücre konseptlerini sürekli olarak keşfetmektedir. Bu durum, mevcut hücre üretim hatlarında minimum değişikliklerle uygulanabilen ve daha düşük

üretim maliyetleri vaat eden teknolojiler için fırsatlar sunmaktadır. Son zamanlarda yapılan araştırmalar, poli Si ve c-Si tabakaları arasına çok ince bir arayüz oksit (SiO_x) katmanı yerleştirmenin V_{OC} değerini yükselttiğini göstermiştir. Bu bulgu, PERC hücre yapısının optimizasyonu için yeni bir dönemin başlamasını sağlamıştır. Bu anlayışa dayanan pasifleştirici kontaklar, ultra ince SiO_x katmanlarına sahip tünel oksit pasifleştirici kontaklar (TOPCon) olarak tanıtılmıştır (Şekil 2.21). TOPCon teknolojisi, yeni nesil PERC teknolojisi olarak güneş enerjisi sektörüne girmiştir (Chen vd., 2019; Ghosh vd., 2022). Bu teknoloji, PERC hücrelerinin verimliliğini artırmak için önemli bir adımdır ve daha yüksek performans ve daha düşük üretim maliyetleri sunma potansiyeline sahiptir.



Şekil 2.21. Endüstriyel TOPCon (iTOPCon) güneş hücrelerinin şematik yapısı.

TOPCon güneş hücreleri, N tipi Si kullanılarak üretilir ve bu teknoloji, ultra ince bir SiO₂ ve fosfor katkılı birçok c-Si tabakası eklemeyi içerir. SiO₂ arayüz oksit katmanı, yüzey geri birleşmeyi azaltır ve geri yansımayı önler. Bu teknolojide en önemli özellik c-Si tabakanın metal kontaklarla doğrudan temas etmemesidir. Bunun yerine, elektronlar tünel oksit tabakasından geçerek arka kontaklara ulaşır. TOPCon hücre üretimi, mevcut PERC üretim hatlarına birkaç adım eklenmesiyle mümkündür. Bu nedenle PERC güneş hücrelerinin yerini alması için uygun bir teknolojidir. Bu tür teknolojiler, güncel üretim altyapısının optimize edilmesi ve yenilikçi süreç iyileştirmeleriyle uyumlu olacak şekilde geliştirilmektedir. Bu optimizasyon çalışmaları, güneş enerjisi endüstrisinde daha verimli ve rekabetçi hücre teknolojilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

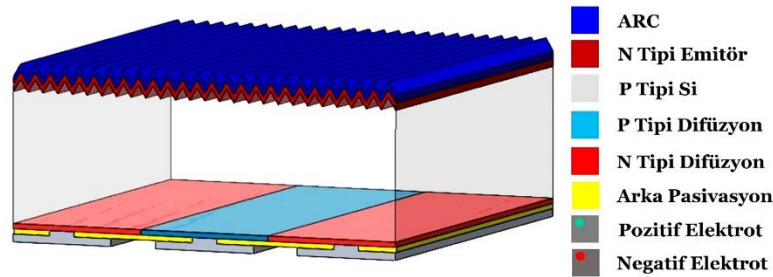
2.4.4. IBC

Geleneksel Si tabanlı güneş hücrelerinin tasarım sürecinde, ön yüzey metal kontaklardan kaynaklı gölgelenme, ön difüzyon tabakası seri direnci ve yüzey geri birleşmeleri gibi kaçınılmaz bazı sorunlar bulunmaktadır. Bu gibi performans

sınırlamalarını aşmak ve hücre verimliliklerini artırmak amacıyla arka bağlantılı kontak güneş hücreleri geliştirilmiştir.

Arka bağlantılı güneş hücreleri (IBC), pozitif ve negatif metal elektrotlarının her ikisinin de arka yüzeyde konumlandırıldığı ve ön yüzeyin iyi bir şekilde pasifleştirildiği bir hücre tasarımıdır. IBC güneş hücrelerinde, her iki kontak da hücrenin arkasına yerleştirildiği için gölgeleme kayıpları tamamen ortadan kaldırılır. Ön yüzeyde potansiyel bir gölgeleme faktörü olmadığı için daha yüksek verim elde edilir. Bu hücrelerde P-N eklemi hücrenin arka tarafında yer almaktadır. Ön yüzeyde soğrulan güneş ışığının ürettiği elektron-boşluk çiftleri, yine hücrenin arka tarafında toplanabilir (Lachenal vd., 2019; Verlinden vd., 1994).

IBC hücrelerinin mimari yapısı, Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Işık soğrulmasıyla ön yüzeyde üretilen azınlık taşıyıcılarının arka bağlantıya kadar ulaşması gerekmektedir. Bu nedenle, hücre kalınlığının difüzyon uzunluğuyla orantılı olmasına dikkat edilmelidir. IBC hücreleri, gölgeleme kayıplarının en aza indirildiği, daha yüksek verimlilik elde edilebilen ve azınlık taşıyıcıların etkin bir şekilde toplanabildiği bir hücre tasarımı olarak önemli bir gelişmedir.



Şekil 2.22. IBC güneş hücrelerinin şematik yapısı.

IBC Ar-Ge ölçeğinde Si tabanlı tek bir P-N eklemine sahip güneş hücreleri arasında en yüksek enerji dönüşüm verimliliğini (%26,7) gösteren teknolojidir. Fakat hücre üretim maliyeti yüksek bir teknolojidir. Yakın zamanda, Float Zone (FZ) yöntemiyle üretilen wafer üzerinde %24,8 verimlilik elde edilen IBC teknolojisi, üretim sürecini basitleştirerek maliyeti makul seviyelere indirmiştir (Lachenal vd., 2019). IBC hücre tasarımının diğer teknolojilere göre daha yüksek verimlilik sağlamasının nedeni, metal kontaktların arka yüzeyde olmasıyla temas geri birleşmenin azaltılması, ışık soğurmanın iyileştirilmesi, daha iyi pasifleştirme sağlayan bir ön yüzey ve düşük seri dirençli bir arka metal kontak yaklaşımıdır. Ayrıca, IBC hücrelerinin arka tarafta her iki

kontakın birbirine bağlanmasının daha kolay olması ve FV modüllerde hücreler arası boşluk gereksinimi duymaması gibi avantajları bulunmaktadır.

IBC hücre teknolojisi, yüksek verimlilik potansiyelinin olması ve estetik görünümü nedeniyle güneş enerjisi endüstrisinde ilgi gören teknolojidir. İlerleyen yıllarda, yeni malzemelerin ve yeni tasarımların geliştirilmesiyle IBC hücrelerinin verimliliği daha da artırılabilir. Sürekli olarak gelişen üretim süreçleri ve mimari entegrasyonlar IBC hücrelerini daha rekabetçi hale getirebilir. IBC güneş hücrelerinin benimsenmesi, yüksek verimlilik, estetik uyum ve ticari uygulama potansiyeli gibi faktörlerin birleşimiyle şekillenecektir.

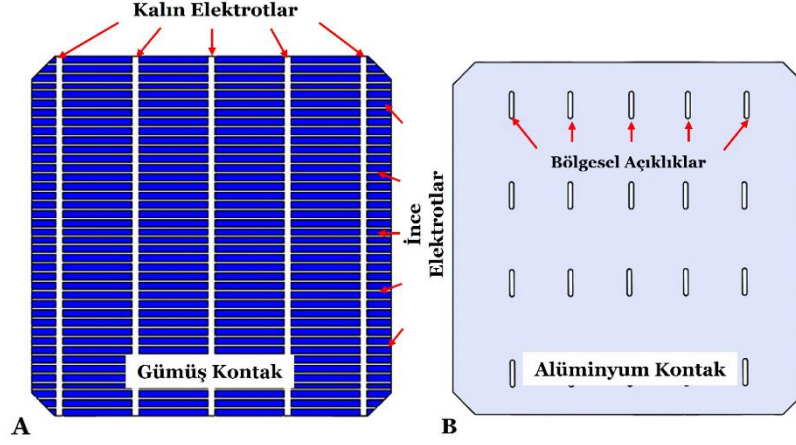


3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

FV güneş hücrelerinde metalizasyon, hücre üretim sürecindeki bir adımdır. Metalizasyon, güneş hücre üretiminde FV etkiyle üretilmiş akımı toplamak için güneş hücrelerinin yüzeylerinde metal kontakların üretilmesidir. Metalizasyon işlemi, güneş hücresinin ön ve arka yüzeylerine elektriksel bağlantıların yapılması için kullanılan bir yöntemdir. Güneş hücrelerinde hem elektriksel hem de optiksel rol oynar. Bu metaller yüksek iletkenlik özelliklerine sahip malzemelerden yapılır (Schubert, 2006). Güneş hücresinin esas bir parçası olan metalizasyon işlemi, güneş hücresinin elektriksel verimini artırmak için optimize edilir. İyi bir metalizasyon işlemi, daha fazla elektron akışı sağlar ve bu da hücrenin daha fazla elektrik üretmesini mümkün kılar. Sonuç olarak güneş hücreleri için metalizasyon adımının, hücrenin verimliliği, performansı ve uzun ömürlülüğü üzerinde bir etkisi vardır.

FV güneş hücrelerinde, ön ve arka yüzeylere metal kontaklar uygulanır. Gümüş (Ag) ön yüzeye, alüminyum (Al) ise arka yüzeye metal kontak olarak kullanılır (Şekil 3.1). Ag metal kontak, ince (finger) ve kalın (busbar) elektrotlardan oluşur. Busbar, geniş aralıklarla yerleştirilmiş kalın bir metal şerittir ve güneş hücresinin ön yüzeyindeki elektrik bağlantılarını sağlar (Asay, 2022; Lorenz, 2018). Busbar, güneş hücrelerinin seri ve paralel bağlantılarını yapmak için önemli bir bileşendir. Güneş hücresinin ön yüzeyine yayılan ince uzun metal çizgilere finger denir. Bu ince elektrotlar, güneş hücresine düşen güneş ışığının elektriksel olarak daha verimli bir şekilde toplanmasını sağlar. Finger'ların kalınlığı ve aralıkları, hücre performansı ve tasarımına bağlı olarak değişebilir. Bu metalizasyon bileşenlerinin optimize edilmesi, hücre performansını artırarak daha yüksek elektrik üretimine katkıda bulunur.

Arka yüzey Al kontakları, güneş hücresinin arka yüzeyindeki elektrik bağlantılarını sağlamak için kullanılır. Bu kontaklar genellikle ince bir tabaka halinde uygulanır. Al kontaklarının yaygın olarak kullanılmasının sebepleri düşük maliyeti, geniş ölçekli üretim imkânı ve iyi elektriksel iletkenliğidir. Metal kontakların doğru optimize edilmesi, FV güneş hücrelerinin performansını artırarak daha yüksek elektrik üretimine katkı sağlar. Bu nedenle, metalizasyon bileşenlerinin tasarımı ve optimizasyonu, güneş hücresi teknolojilerinde önemli bir araştırma alanıdır.



Şekil 3.1. PERC teknolojili kristal silisyum güneş hücrelerinin ön (A) ve arka (B) görünümü

Ticari c-Si güneş hücrelerinde, ön yüzey metal kontak oluşumu, yarıiletken malzeme üretiminden sonra en maliyetli ikinci işleme aşamasıdır (Kumar vd., 2017), (Unsur vd., 2019). FV endüstrisinde, güneş hücrelerinde ön kontak metalizasyonu için gümüş (Ag) metal pastası kullanılmaktadır. Ag, iyi bir iletkenlik özelliğine sahip olmasının yanı sıra, Si yarıiletken ile de uyumlu bir malzemedir. Üretilen hücrenin verimliliği, metal pastası ile Si yarıiletken malzeme arasındaki temas kalitesine bağlıdır.

Tek kristalli Si FV hücre araştırmalarının temel hedeflerinden biri, güneş hücresinin dönüşüm verimliliğini artırmak ve watt başına maliyeti azaltmaktır. Si wafer maliyetlerinde ilerleme kaydedilse de Ag fiyatındaki uzun vadeli artış, metalizasyon işleminin hücre maliyetlerine belirgin bir şekilde etki etmektedir. FV endüstrisinin büyümesiyle birlikte, Ag talebi giderek artmaktadır. Bir güneş hücresi için ortalama Ag tüketimi 2010 yılında 0,3 g/hücre iken, bu 2021 yılında 0,1 g/hücreye kadar düşmüş olsa da metalizasyon işlemi için Ag, hala maliyetli bir malzemedir (0.81\$/g) (Metal Price, 2024; Silver Institute, 2020). Farklı metal malzemeler üzerinde yapılan deneyler, Ag bağımlılığını azaltmayı amaçlayan önemli bir araştırma alanıdır (Beaucarne vd., 2012). Bu çalışmalar, güneş hücrelerinin üretiminde metalizasyon işleminin kritik önemini daha da vurgulamıştır. Özellikle Si güneş hücrelerinde geleneksel Ag metal pastasının yerine alternatif metallerin bulunması ve geliştirilmesi, FV endüstrisi için büyük bir adımdır. Bu, Ag'e olan talepteki artışın neden olduğu maliyet baskısını azaltabilir ve FV güneş hücrelerinin ticari uygulanabilirliğini daha da artırabilir.

Ag pastası, metalik toz, cam frit ve organik bileşiklerden oluşan çok bileşenli bir karışım sistemidir (Aleman, 2013). Tipik bir kalın film Ag pastası, aşağıdaki bileşenleri içerir:

- Metal Tozu (70-80%): Ag partiküllerinden oluşur ve elektrik iletkenliği sağlar.
- Organikler (15-20%): Ag partiküllerini bir arada tutar ve bağlayıcı görevi görür.
- Cam Frit (5-10%): Metal pastanın Si alt tabakaya bağlanmasını sağlar

Bu bileşenler, güneş hücrelerinin metalizasyon işlemi sırasında kullanılır. Organik bileşikler, pastanın esnekliğini kontrol eder ve metal tozunun çözülmesini sağlar. (Nguty & Ekere, 2000). Cam frit ise temas direncini, Si yüzeyinin aşındırılmasını ve genel yüzey performansını etkileyen ana faktördür. Ayrıca, cam frit oranı elektriksel temas oluşumu ve mekanik performans açısından da önemlidir (Hilali vd., 2006; Y. Zhang vd., 2009). Bu bileşenlerin bir araya gelmesiyle Ag pastası oluşturulur ve güneş hücresinin ön yüzeyine uygulanır. Bu pastanın kalınlığı, içeriği ve uygulama yöntemleri, hücre performansını etkilemektedir. Ag pastasının optimize edilmesiyle, iyi bir temas kalitesi, düşük temas direnci ve yüksek mekanik dayanıklılık sağlanabilir.

Si güneş hücrelerinde Ag metal pastasının alternatifi olarak, farklı iletken metaller düşünülebilir. Bunlardan bazıları nikel (Ni), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi metallerdir. Ni, ucuz bir malzeme olup Ni silisitler aracılığıyla Si ile iyi bir bağlantı teması kurabilir (Nguyen vd., 2010). Ancak, Ni ve diğer metaller Ag'ye göre daha yüksek bir özgül elektrik direncine sahiptir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda Ni/Si arasında hızlı bir difüzyon gerçekleşebilir, bu da çözülme sorunlarına neden olabilir. Tüm bunlara rağmen, Ni benzer özelliklere sahip olduğu için Ag'nin yerini alabilecek potansiyele sahiptir.

Ag içeren metal pastanın yerine sırasıyla yalnızca Ni veya Zn, cam frit, organik ortam içeren basit pastalar Si üzerinde test edilmiştir. Ag uyumlu cam fritlerin kullanıldığı bu deneyler, Si ile temas sağlamanın mümkün olduğunu, ancak Ag pastalara kıyasla daha düşük performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak, araştırmalar pasta formülasyonunu veya fırınlama koşullarını değiştirerek Ag yerine başka bir metal kullanmanın mümkün olduğunu göstermektedir (Rudolph vd., 2013).

Si güneş hücreleri üretiminde, pahalı olan Ag'nin daha ucuz bir metal olan Ni (0.018\$/g) (Metal Price, 2024) ile değiştirilmesi, hücre üretim maliyetinde büyük tasarruflar sağlayabilir. Ag'nin yerine farklı iletken metallerin kullanılması konusu, 2013 yılında Constance'da gerçekleşen Kristal Silisyum Güneş Hücrelerinin Metalizasyonu 4. Çalıştayında ele alınmıştır. Bu çalıştayda, ön yüzey metalizasyon pastasında pahalı olan Ag'nin yerine daha ucuz metaller olan Ni veya Zn gibi metallerin kullanılmasının avantajları üzerinde durulmuştur (Rudolph vd., 2013). Bu değişiklik, Si güneş hücrelerinin toplam üretim maliyetinde düşüş sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

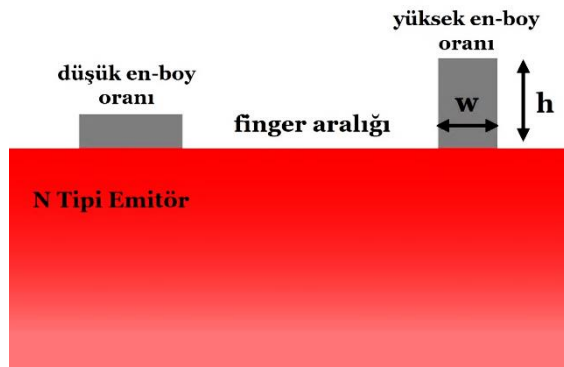
Ancak, bu çalışma metalizasyon işleminde, Ag yerine Ni, Cu veya Zn içeren bir pastanın uygulanması ve sonrasında oluşan temasın reaksiyonunun araştırılması ile sınırlıdır.

3.1. Metal Elektrotlar

“Metal Kontak” güneş hücrelerinin ön yüzeyine uygulanan metal elektrotların yapısını ifade eder. Bu metal elektrotlar baskı teknikleri kullanılarak oluşturulur. Ön yüzeydeki metal kontakların amacı, güneş hücresi tarafından üretilen akımı toplamak ve taşımaktır. Birbirine bağlı bir diziyi oluşturan bu ince elektrotlar hücre yüzeyindeki gölgelenmeyi en aza indirecek şekilde tasarlanır. Ön metal bağlantı modelinin tasarımı ve optimizasyonu, elektrik iletkenliği, ışık Emilimi ve seri direnci (R_s) dengeleyerek, güneş hücrelerinin genel performansını belirler.

$$\text{En Boy Oranı} = \frac{\text{Yükseklik}}{\text{Genişlik}} = \frac{h}{w} \quad 3.1$$

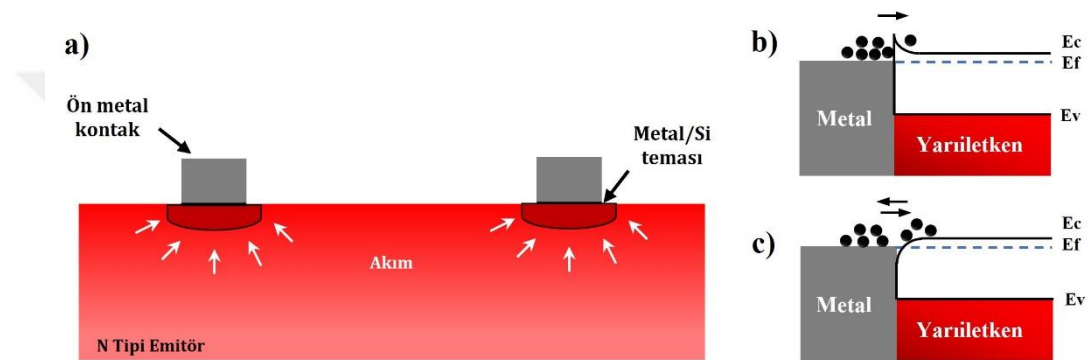
Ön yüzey metal kontakların tasarımı, aynı zamanda bağlantı ve temas kayıplarının genel olarak azaltılmasını içerir. Bu kayıplar, emitör direnci, kontak temas direnci ve gölgelenme kayıplarını içerir. Bu kayıpların büyüklüğünü belirleyen faktörler, ön yüzey kontak tasarımının kritik özellikleridir. Finger ve busbar aralığı, metal kontak yükseklik-genişlik oranı, minimum metal hat genişliği ve metalin öz direnci dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi finger ve busbar aralığı, hücre üzerindeki iletken metal şeritlerin uygun şekilde yerleştirilmesini sağlar. Metal kontak yükseklik-genişlik oranı, kontak direncini optimize ederken hücre performansını etkileyen bir faktördür. Minimum metal hat genişliği, daha fazla ışık Emilimi ve daha düşük gölgelenme kayıpları için ayarlanmalıdır. Metalin öz direnci ise elektrik akımının etkin bir şekilde iletilmesini sağlamak için dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.2. Ön yüzey metal kontak şemasının temel özellikleri.

3.1.1. Ön yüzey kontak

Güneş hücrelerinin ön yüzeyinde bulunan metal kontaklar, üretilen elektriği hücre dışına iletmekle birlikte güneş ışığının hücreye geçmesini sağlamaktan da sorumludur (Şekil 3.3). Si yarıiletken malzemesi, metallere göre daha yüksek bir dirence sahiptir. Bu nedenle, güneş hücrelerinde seri direnci azaltmak için daha optimize bir üst elektrot modeline ihtiyaç vardır. İdeal olarak, metal elektrotların birbirine yakın ve ince olması tercih edilir. Ancak, bu durum hücrenin gölgelenmesine neden olabilir ve böylece I_{SC} ve FF değerlerini doğrudan etkileyebilir. Metal kontakın direncinin optimizasyonu, bu etkenleri kontrol etmemizi sağlar.



Şekil 3.3. a) Yarı iletken malzeme ile metal elektrot arasındaki temas noktaları b) Schottky ve c) Omik kontaktların şematik gösterimi. E_c : enerji seviyesi, E_f : fermi enerji seviyesi, E_v : valans bandı enerji seviyesi.

Si güneş hücrelerinde, metal ile yarı iletken malzeme arasında iki farklı kontak direnci tipi bulunur: Schottky ve Omik. Schottky kontakta, metal ile yarı iletken arasında bir eklem oluşur ve bu eklem diyot gibi davranır, yani elektronların tek yönlü geçişine izin verir. Öte yandan, Omik kontakta iki farklı malzemenin birleşim noktasında elektriksel dirençsiz bir bağlantı sağlanır. Bu kontak tipinde elektrik akımı düzgün bir şekilde geçer ve temas direnci oldukça düşüktür (Şekil 3.3). Her iki kontak tipi de güneş hücrelerinin performansını etkileyen faktörlerdir ve doğru kontak tasarımı, düşük dirençli ve yüksek verimli elektrik bağlantıları sağlar. Bu da güneş hücrelerinin daha fazla ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmesini ve daha yüksek bir verimlilik elde etmesini sağlar.

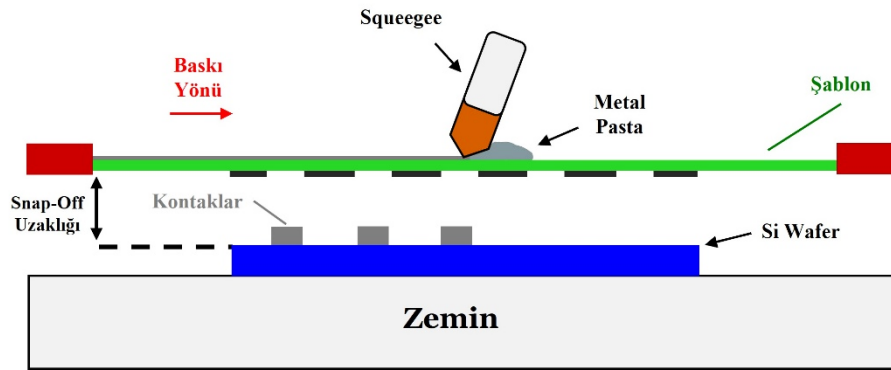
3.2. Baskı Teknikleri

Güneş hücrelerinin metalizasyon işlemi farklı teknik uygulama ve yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Bu teknikler kendi aralarında Impact ve Non-Impact baskı teknolojilerine ayrılır. Impact teknolojide (Şablon baskı) Si plaka ile şablon

arasında bir temas gerekirken, Non-Impact teknoloji (Inkjet) temassız baskı yapar (Ebong & Chen, 2012). Bu yöntemlerin hepsi, metal pastanın hücre yüzeyine uygulanmasını sağlar. Baskı teknikleri arasında şablon baskı (SP) en yaygın tercih edilen yöntemdir. Günümüzde SP ön yüzey kontak oluşumu yöntemi basit işlenebilirlik, yüksek verimlilik ve maliyet açısından en uygundur (Unsur vd., 2019). Inkjet baskı gibi Non-Impact teknolojiler şablon baskıya alternatif olarak kullanılan tekniklerdir. Bu teknikler, farklı uygulama ihtiyaçlarına bağlı olarak tercih edilebilir. Baskı yönteminin seçimi, hücre tasarımı, maliyet, verimlilik ve gereksinimler gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

3.2.1. Şablon baskı (SP)

FV uygulamalarına artan büyük ilgi, güneş hücre üretim hacminin kademeli olarak artmasına ve otomatik üretim sürecinin geliştirilmesini tetikledi. SP Al-BSF güneş hücreleriyle başlayan bu serüven, güneş hücre metalizasyonunda baskı yöntemlerinin uygulanmasının başlangıç noktası oldu. Teknolojinin gelişmesiyle güneş hücre teknolojisinin yeni konsepti olan PERC hücrelere geçiş FV endüstrisinde yeni bir dönemi başlatmıştır. Şablon baskılı güneş hücreleri 1970 yıllara dayanmaktadır ve devam eden yıllarda SP, endüstriyel ölçekte güneş hücre üretim hattına yerleşmiş bir metalizasyon yöntemi olmuştur. SP güneş hücreleri bu istikrarını koruyarak günümüz FV modül pazarının hâkimi olmaya devam etmektedir (Shih & Shi, 2017; Tepner & Lorenz, 2023).



Şekil 3.4. Şablon baskı tekniğinin şematik gösterimi

SP en olgun güneş hücre metalizasyonu üretim teknolojisidir ve SP yöntemiyle oluşturulan metal kontaklar ile yarıiletken emitör arasında fiziksel bir oluşum mekanizması söz konusudur. Bugünün temas oluşturma mekanizmalarının anlayışı, düşük temas direnci ve baskılana bilirlği yüksek metal pasta geliştirilmesi temeline dayanır. Şekil 3.4'te gördüğümüz SP işleminin temel prensibidir. İletken bir metal pastanın şablondaki kontak açıklıklarından Si wafer üzerine plastik spatül yardımıyla

basılmasıdır. SP, aynı baskıyı çoğaltmak için şablonlar kullanır. Bu şablonlar ön yüzeydeki metal şeritleri oluşturmak için özel olarak tasarlanır. Şekil 3.4'te Si güneş hücresinin ön yüzeyine uygulanan metal pastayı görmekteyiz. Şablon üzerindeki açıklıklar metal pastanın yüzeye aktarılmasını sağlar. Baskı işlemi, bir baskı raklesi (squeegee) ile gerçekleştirilir ve metal pastanın şablondan geçerek yüzeye düzgün bir şekilde yayılması amaçlanır. Metal pastalar, daha sonra fırınlama adımıyla sabitlenir ve yüzeyde metal bir kontak oluşur. SP ile uygulanan metal pastalar, güneş hücrelerinde düşük temas direnci ve iyi bir elektriksel iletkenlik sağlar. Bu nedenle, düşük maliyeti ve teknoloji uyumluluğu, SP baskı yöntemini FV endüstrisinde en yaygın kullanılan baskı teknolojisi haline getirmiştir.



4. DENEYSEL TASARIM

Bu çalışmanın bir parçası olarak, metal pasta üretimi deneyi gerçekleştirilmiştir. Ardından, metalizasyon ve ısıtma işlemi fırını prosedürleri uygulanmıştır. Bu aşamaların yanı sıra, XRD (X-Işını Difraktometresi), FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu), Partikül Boyut Analizi, Termal Analiz, Reometre ve Solar Simülatör gibi çeşitli karakterizasyon cihazları kullanılarak gerekli analizler yapıldı. Bu analizler, elde edilen numunelerin yapısını, morfolojisini, termal özelliklerini ve elektriksel performansını değerlendirmek için kullanıldı.

4.1. Ön Yüzey Metalizasyon

Elde etmek istediğimiz metal pasta, ağırlıkça %70 ile %85 arasında değişebilen metal tozu, %20'ye kadar organik maddeler ve %1-5 arasında değişen cam frit içermektedir (Şekil 4.1). Her bileşenin kontak oluşumu ve fırınlama aşamalarında ayrı ayrı görevleri bulunmaktadır. Metal toz, elektriksel iletkenlik sağlarken, organik maddeler metal pastadaki esnekliği kontrol ederek yüzeydeki kontaklarda çatlama ve kırılmaları önler. Organikler, çeşitli solventler ve bağlayıcılardan oluşur ve her bileşenin istenen viskoziteye sahip olmasını sağlar. Cam frit ise SiN_x'den yapılan ARC katmanını aşındırarak metal ile Si arasında temas oluşumunu sağlar. Bu yalıtkan malzemenin aşındırılması, kontak direnci açısından önemlidir. Si ile metal kontak arasında bağlantı oluşturulurken kontak direncini artırmamak gerekir. Bu nedenlerle, ön kontak metalizasyon işleminde aşağıdaki yöntemler izlenmiştir:

1) Metal Pasta

- Metal pastada kullanılacak olan metalik tozun partikül boyutu analizi yapılmıştır.
- Geniş çalışma aralığına sahip cam frit reçeteleri, metal oksitler kullanılarak elde edilmiştir.
- Solventler, bağlayıcılar, yüzey etkileyiciler ve tiksotropik akışkanlar kullanılarak organik karışımlar hazırlanmıştır.

2) Optimizasyon

- Metal pasta içinde, sabit partikül boyutuna sahip Ni metal tozu ve sabit organik karışım oranları kullanılarak, cam frit bileşenleri değiştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.
- İstenilen cam frit optimizasyonu elde edildikten sonra, Ni metal partiküllerinin boyutları optimize edilmiştir.

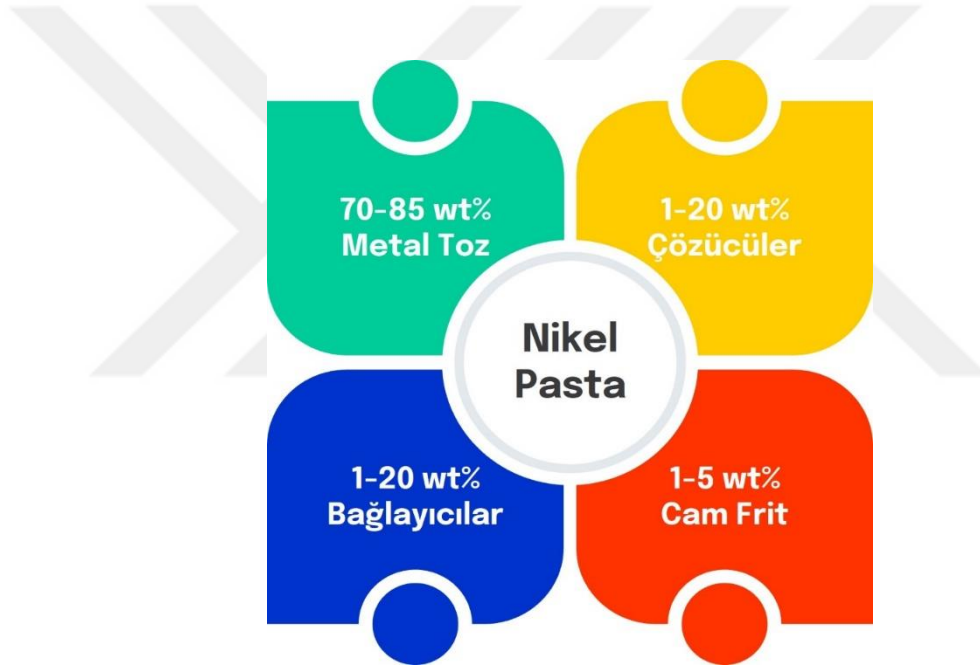
- Pasta bileşenleri değiştirilerek farklı metal pasta grupları oluşturulmuştur.

3) Baskı

- Elde edilen metal pastaların viskozite değerleri dikkate alınarak snap-off mesafesi 0,7-1,0 mm arasında değiştirilerek SP yöntemiyle basılmıştır.
- Metal pastalar Si güneş hücrelerinin üzerine baskılandıktan sonra her bir pasta için ayrı ayrı veri tabloları oluşturulmuştur.

4) Isıl İşlem

- Ni atomlarının Si ile omik bir bağlantı sağlaması için uygun fırınlama sıcaklığı belirlenmiştir.
- Uygun ısıl işlem profili bulunduktan sonra tüm numunelere aynı proses uygulanmıştır.



Şekil 4.1. Metal pasta ve içerdiği bileşenler.

4.2. Metal Pasta Üretimi

4.2.1. Cam frit (Glass frit)

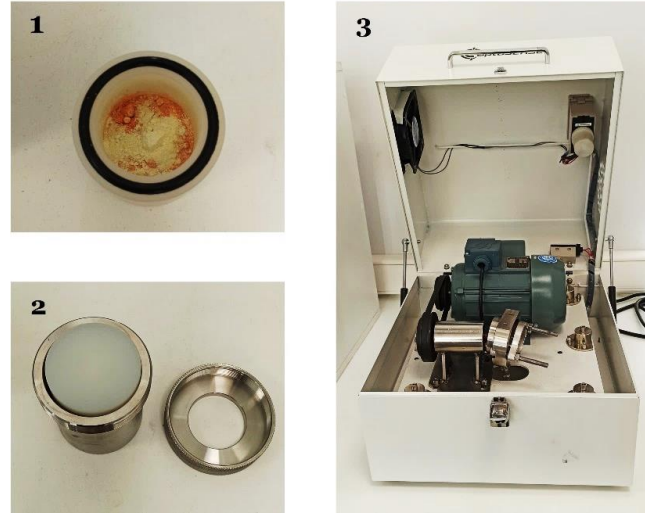
Metal pastanın ana bileşenlerinden biri olan cam frit üretimi için metal oksitler kullanılmıştır. Kurşun oksit (PbO), çinko oksit (ZnO), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum dioksit (SiO_2), bor trioksit (B_2O_3), tellür dioksit (TeO_2) ve bizmut oksit (Bi_2O_3) gibi metal oksitleri içeren malzemeler bunlardan bazılarıdır. Öncelikle metal oksitler kullanılarak cam fritlerin optimizasyonu yapılmıştır. Bu aşamada, ağ oluşturucu olarak bilinen malzemelerden B_2O_3 ve SiO_2 kullanılmıştır. Ayrıca, metal oksitler arasında PbO , Bi_2O_3 ve Al_2O_3 , ağ oluşumunu destekleyici olarak eklenmiştir. Bunların yanı sıra, katkı

malzemeleri olarak MgO , Li_2CO_3 ve WO_3 gibi metal oksitleri de kullanılmıştır. Cam frit üretimi için kullanılan metal oksitlerin, işlem görmemiş halleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu seçimler, belirli tane boyutları ve bileşimlerle cam fritin istenen özelliklerini sağlamak üzere yapılmıştır.



Şekil 4.2. Cam frit üretiminde kullanılan metal oksitler.

Metal oksitlerin homojen bir şekilde dağılımını sağlamak için bilyalı değirmen (SPEX) kullanılarak karıştırılır (Şekil 4.3). Bu aşama, metal oksitlerin birbiriyle etkili bir şekilde karışmasını ve istenen homojenliği elde etmeyi amaçlamaktadır. Daha sonra hazırlanan karışım numuneleri, fırın süreci için özel olarak tasarlanmış alüminyum potalara yerleştirilmiştir. Fırın süreci, toplamda 120 dakika sürmüş ve sıcaklık aralığı $1100-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. Bilyalı karıştırma makinesi (High-Speed Vibration Ball Mill).

Fırından çıkan cam frit numuneleri, hızlı soğutma tekniği kullanılarak deiyonize suda soğutulmuştur. Bu yöntem, numunelerin hızlı bir şekilde soğumasını sağlar ve amorf

yapı oluşumunu teşvik eder. Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra, elek yardımıyla süzgeçten geçirilerek partiküllerin ayrılması sağlanmıştır. Şekil 4.5, işlem adımlarının bir görselini sunmaktadır.



Şekil 4.4. Yüksek sıcaklık fırını.

Cam fritlerin nemden arındırılması amacıyla, 80 °C'de 120 dakika süren bir etüvde kurutma işlemi uygulandı. Bu işlem, nemin tamamen uzaklaştırılmasını ve cam fritlerin stabil hale gelmesini sağlar. Numunelerin kurutulmasının ardından, öğütme işlemi gerçekleştirildi. Kurutulan numuneler, öğütme makinesinde 60 dakika boyunca öğütülerek toz haline getirildi (Şekil 4.6). Bu işlem, cam fritin metal pastanın kontak oluşumu sürecinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için istenen özellikleri sağlamayı amaçlamaktadır.



Şekil 4.5. Cam fritlerin üretimi: Eritme ve Hızlı Soğutma (Melt Quenching) tekniği.

Metal oksitler, aynı üretim aşamalarından geçirilerek farklı miktarlarda cam fritler üretildi: 10, 25 ve 50 gram. Bu şekilde, farklı miktarlarda cam frit elde edilerek ölçüm ve değerlendirme çalışmaları için çeşitli numuneler hazırlandı. Üretilen cam fritin son hali

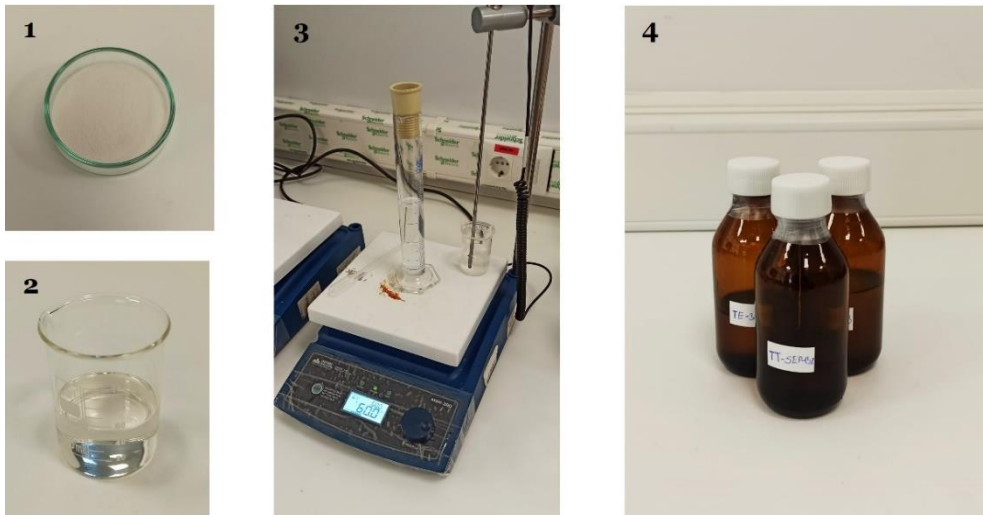
görsel olarak sunularak, cam fritlerin son görünümü ve parçacık boyutu hakkında referans sağlanmaktadır.



Şekil 4.6. Cam parçacıklarının bilyeli öğütücü ile toz haline getirilmesi. Metal pasta bileşenleri: Cam frit.

4.2.2. Organik ortam

Metal pastanın organik bileşenleri, solvent (çözücü), bağlayıcı, yüzey etkileştirici ve tiksotropik akışkanlardan oluşur. Organik karışımın hazırlanması sürecinde çözücü olarak terpineol ve butyl butyrate kullanılırken, bağlayıcı olarak ethyl cellulose tercih edilmiştir. Ek katkı maddeleri olarak ise castor oil ve span85 kullanılmıştır. İlk olarak, bağlayıcı çözücü içerisine eklenir ve çözünmesi için manyetik ısıtıcı (hot plate) yardımıyla 60 °C sıcaklıkta 60 dakika süreyle karıştırılır. Bu aşama, bağlayıcının çözücü içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar.



Şekil 4.7. Organik karışımın hazırlanması: Manyetik Isıtıcı. Metal pasta bileşenleri: Organik ortam

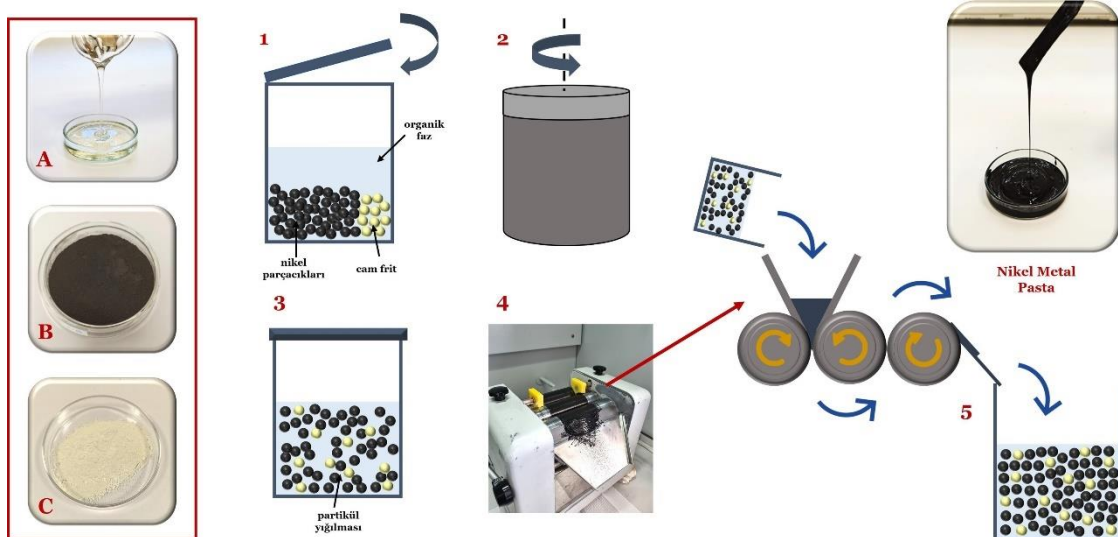
Karıştırma işleminin ilk aşaması tamamlandıktan sonra, karışıma yüzey etkileştirici ve tiksotropik akışkanlar eklenir. Bu ek maddeler, karışımın reolojik özelliklerini iyileştirmek ve metal pastanın istenen akışkanlık ve viskozite özelliklerini

elde etmek amacıyla kullanılır. Yüzey etkileştirici ve tiksotropik akışkanların eklenmesinin ardından, karışım 30 dakika daha karıştırılarak homojen bir organik ortam oluşturulur. Bu süreç sonunda oluşan organik ortamın üretim aşaması ve nihai hali Şekil 4.7'de görsel olarak sunulmuştur.

4.2.3. Nikel metal pasta

Cam frit ve organik ortam hazırlandıktan sonra, pasta üretimine geçilmiştir. Bu aşamada, Ni tozu, cam frit ve organik karışım, bir kabın içine aktarılmıştır ve homojen bir pasta elde etmek amacıyla 60°C'ye kadar ısıtılarak 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem, bileşenler arasındaki bağların oluşmasını teşvik etmiş, ancak aynı zamanda topaklanmaların meydana gelmesine de yol açmıştır.

Topaklanmaların giderilmesi ve karışımın homojenleştirilmesi için bir sonraki adımda üç silindri değirmen (Three Roll Mill) kullanılmıştır. Üç silindri değirmen, karışımın geçtiği bir boşluk oluşturarak parçacıkların sıkışması ve ezilmesi sürecini gerçekleştirir. Bu yöntem, karışımın homojen bir kıvama ulaşmasını ve topaklanmaların etkin bir şekilde giderilmesini sağlar. Değirmenin silindirleri arasında uygulanan basınç ve kesme kuvveti, karışımın ince partiküllere ayrılmasına ve istenilen pürüzsüz dokunun elde edilmesine yardımcı olur. Bu süreç, karışımın mikroyapısının optimize edilmesi ve nihai ürünün kalitesinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 4.8, bu işlemin görsel bir temsilini sunarak karışımın homojenizasyon sürecini detaylandırmaktadır.



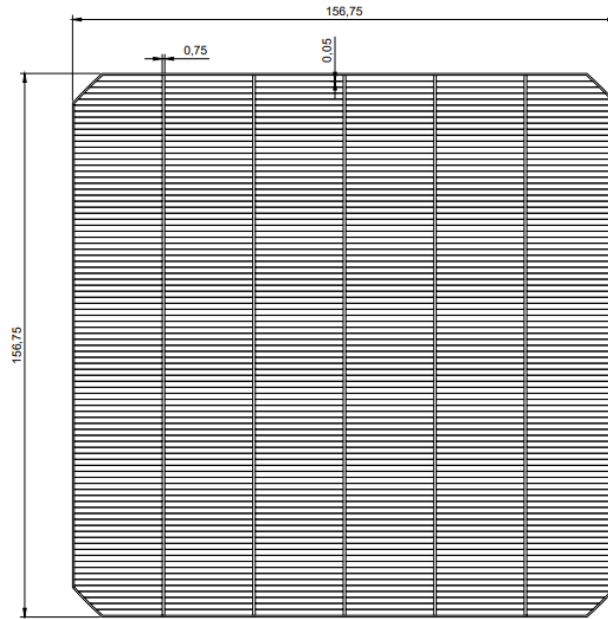
Şekil 4.8. Metal pasta bileşenleri ve üretim aşamaları: A) Organik karışım, B) Nikel metal toz ve C) Cam frit.

Ni metal pastanın parçacık boyutunu küçültmek ve homojen bir dağılım elde etmek amacıyla, metal pasta silindirler arasındaki boşluğa aktarıldı. Ayarlanabilir

silindirler yardımıyla, metal pastanın parçacık boyutu istenilen aralığa getirildi. 30 dakika boyunca pasta, silindirler arasında ileri-geri hareket ettirilerek parçacık boyutu ve homojenlik iyileştirildi. Bu işlem sırasında, silindirlerin uyguladığı basınç ve kesme kuvvetleri, pastanın daha ince partiküllere ayrılmasını sağladı. Daha sonra, ince bir şekilde dağılmış Ni pasta üçüncü silindirde toplandı ve bir kaba aktarıldı. Bu işlem, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi yapılmıştır ve pastayı oluşturan bileşenleri ve üretim sürecinin sonunda elde edilen metal pastanın nihai halini göstermektedir.

4.3. Metal Elektrotların Tasarımı

Üretim süreçlerinde, güneş hücreleri üzerinde farklı sayı ve yerleşimlere sahip metal şerit denemeleri yapılmıştır. Bu çeşitlilik, hücrelerin performansını optimize etmek ve verimliliklerini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Farklı metal şerit sayıları ve yerleşimleri, elektriksel dirençlerin azaltılmasına ve hücrelerin güç çıkışının maksimize edilmesine yardımcı olur. İnce elektrot genişliği değişiklikleri ise gölgelenmeyi optimize ederek hücre verimliliğini artırabilir. Güneş hücrelerindeki busbar sayısı, tasarım tercihlerine bağlı olarak değişebilir. Önceleri geleneksel olarak tek busbarlı hücreler yaygın olarak kullanılırdı. Ancak, yeni gelişmiş tasarımlar ve teknolojilerle birlikte günümüzde çok busbarlı hücreler daha yaygın bir tercih haline gelmiştir. FV endüstrisinde iki (2BB), üç (3BB), dört (4BB) veya daha fazla busbar bulunduran tasarım konfigürasyonları bulunmaktadır.

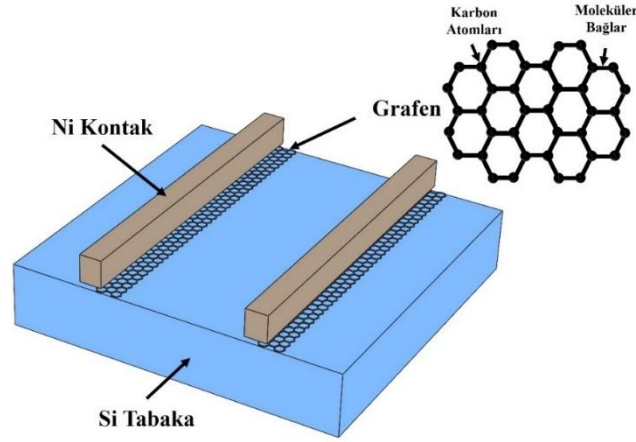


Şekil 4.9. Ön yüzey metal kontak oluşumu için tasarlanmış şablon örneği (AutoCAD)

Bu çalışmada, hücrenin ön yüzey metal kontaktları için 5BB'lı şablon tasarımı yapılmıştır (Şekil 4.9). Bu tasarım, daha fazla busbar kullanarak hücrenin elektriksel performansını optimize etmeyi hedefler. 5BB tasarım, daha düşük seri direnç, daha iyi akım dağılımı ve daha yüksek güç çıkışı sağlamak için tasarlanmıştır. Bu şekilde, güneş hücrelerinin verimliliği ve performansı artırılmaya çalışılmaktadır.

4.4. Grafen: Üretimi ve Transferi

Si güneş hücrelerinde yüksek kontak direncinden kaçınmak için kontak bağlantısı omik olmalıdır. Bu nedenle, Si malzeme ile kontak yapabilmek için daha düşük bir iş fonksiyonuna sahip bir metal kullanılmalıdır. Örneğin, Ag yerine Ni kullanıldığında, Ni'nin 5,04 eV iş fonksiyonu ile Si'nin 4,08 eV iş fonksiyonu arasında Schottky kontak meydana gelir (Baker vd., 1971; Chandra vd., 2010). Ancak, bu kontak oluşumunu engellemek ve omik bir kontak bağlantısı sağlamak için Si hücrenin ön yüzeyine grafen katmanı yerleştirilecektir. Grafen katmanının Ni metalinin yanına eklenmesi durumunda, grafen/Ni ara yüzeyinin iş fonksiyonunun ~ 3 eV seviyelerine kadar düşeceği gözlenmiştir (Byun vd., 2013). Grafen katmanı ve Ni metalinin hücrenin ısıl işlemi sonrasında ara yüzeyde yeni bir metal gibi davranacak ve oluşacak kontak omik olacaktır. Bu sebepten güneş hücrelerinin ön yüzeyine ek katman olarak grafen uygulanacaktır. Şekil 4.10 Si/Ni arasına uygulanacak olan grafen katmanının şematik olarak gösterimini sunmaktadır.



Şekil 4.10. Si malzemeyle Ni kontak arasına uygulanmış ek grafen katmanı ve yapısının şematik gösterimi

Grafen, karbon atomlarının düzlemde tek atom kalınlığında düzenli bir altıgen yapı oluşturduğu 2 boyutlu bir malzemedir ve bu nedenle bir karbon allotropu olarak kabul edilir. Bu yapı, karbon atomlarının altıgen şekilli bir örgü oluşturduğu görsel olarak bir arı peteği şekline benzetilebilir. Grafen, olağanüstü ısı ve elektrik iletkenliğine

sahiptir. Elektronlar, düzlemsel yapıda serbestçe hareket edebilir, bu da grafenin elektrik akımını son derece etkili bir şekilde iletebilmesini sağlar (Geim, 2009; Gurbuz vd., 2024).

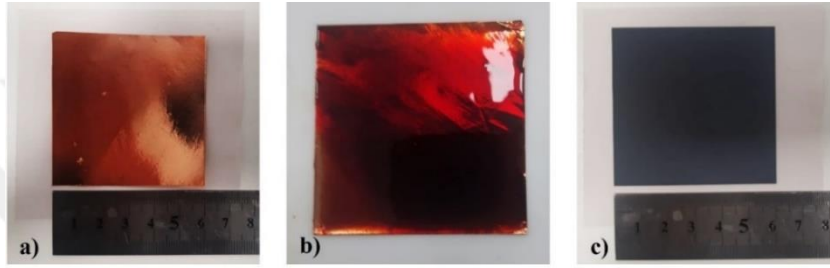
Grafenin üretimi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler arasında kimyasal buhar biriktirme (CVD), mekanik peeling ve grafen oksitin indirgenmesi bulunmaktadır. CVD, grafen üretiminde en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, bir kap içinde ısıtılmış bir malzeme yüzeyi, buhar halindeki bir taşıyıcı gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan katı bir malzeme ile kaplanır (Rockett, 2008). CVD yöntemi ile kontrol edilebilir film kalınlığında grafen üretebilmek mümkündür. Ayrıca bu yöntem, grafenin büyük ölçekli üretimi ve ticarileştirilmesi için de umut verici bir yaklaşım sunmaktadır (Deokar vd., 2015; Plutnar vd., 2018). Bu nedenle, çalışmamızda tek tabaka grafenin oluşturulması için CVD yöntemine başvurulmuştur.

Bu çalışma, grafen sentezi için CVD yöntemi kullanılarak bakır folyo üzerinde bir süreç tasarlamayı hedeflemektedir. İlk olarak, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutundaki bakır alttaşlar kullanılarak tek tabaka grafen üretimi için optimizasyon adımları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, optimizasyon sürecinden geçen grafen, $6 \times 6 \text{ cm}^2$ boyutundaki bakır alttaşlar üzerinde daha geniş alanlarda sentezlenmiştir. Ardından, asidik ortamda 4 V ve 1 A akım altında elektroliz ile kaplanmıştır. Bu işlem, bakırın daha yumuşak bir yüzeye sahip olmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yüzeydeki oksit kirliliklerin giderilerek saf bir bakır yüzey oluşmasına yardımcı olur. Asidik ortamdan çıkarılan bakır folyo, deiyonize (DI) suyla yıkanmış ve ardından saf aseton içinde 10 dakika bekletilmiştir. Organik kalıntılar çözüldükten sonra DI suyla durulanmış ve izopropil alkol (IPA) içinde 10 dakika bekletilmiştir. IPA içinde bekletilen bakır folyo, aseton kalıntılarından arındırıldıktan sonra yüksek saflıkta azot (N_2) gazı ile kurutulmuştur.



Şekil 4.11. Grafen büyütme için kullanılan MTI OTF-1200X CVD sistemi

Elektroliz işleminden sonra bakır alttaşlar CVD sistemi içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.11). Vakum alınarak ortamdaki oksijen uzaklaştırılmıştır ve basınç 50 mTorr seviyelerine indiğinde H₂ ve Ar gazları sırasıyla 50 ve 100 sccm akış oranlarında sisteme verilmeye başlanmıştır. CVD sistemi başlangıçta kullanılan gaz akışlarını sabit tutarak 1010 °C sıcaklığa çıkarılmış ve burada beklenmiştir. Bakır alttaşlarının kristalizasyonu arttıkça, proses sıcaklığı 1000 °C'ye indirilmiş ve Ar gazı kesilerek 200 sccm metan (CH₄) ve 400 sccm H₂ gazlarıyla 20 dakikalık bir süreçte grafen büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.



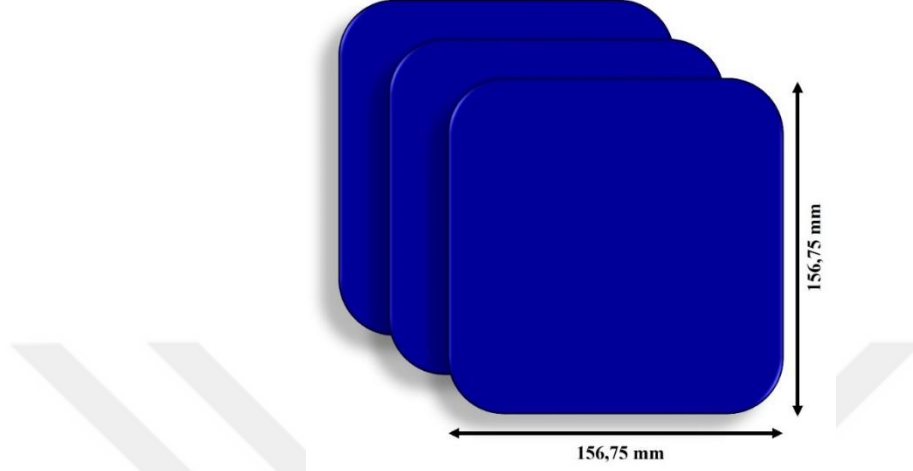
Şekil 4.12. a) Üzerinde grafen büyütülmüş bakır folyo, b) Üzerine fotorezist damlatılmış grafen kaplı bakır alttaş, c) Üzerine grafen transfer edilmiş 6 cm x 6 cm ebatlarındaki Si wafer

Bakır üzerindeki grafenin Si wafer üzerine aktarımı, fotorezist yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.12). Bu aşamada, CVD sisteminden çıkarılan grafen kaplı bakır alttaşların üzerine kalın bir fotorezist tabakası damlatılarak bakır alttaşların yüzeyi tamamen kaplanmıştır. Ardından, fotorezist kaplı bakır alttaşlar demir klorür (FeCl₃) çözeltisine konularak bakırın alt yüzeyi hızlı bir şekilde aşındırılmıştır. Daha sonra FeCl₃ çözeltisi DI su ile değiştirilerek bakırın çözeltiden arındırılması sağlanmıştır ve amonyum persülfat ((NH₄)₂S₂O₈) çözeltisi içeren başka bir kaptaki bekletilmiştir. Bu aşamada, bakır tamamen aşındıktan sonra mikro pipet yardımıyla amonyum persülfat çözeltisi alınmış ve yerine DI su eklenerek çözeltinin seyreltilmesi sağlanmıştır. Bu işlem, grafeni olası kimyasallardan uzaklaştırırken, grafen üzerinde sert bir yapıda mekanik destek sağlayan fotorezistin korunmasını sağlar.

DI su üzerinde yüzen grafenin Si wafer transferi ıslak transfer yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Si wafer, DI suya batırılarak grafenin yüzeye tam anlamıyla yerleşmesi sağlanmış ve ardından sudan çıkarılmıştır. Daha sonra, hot plate üzerinde 100 °C'ye kadar ısıtılmış ve 15 dakika bekletildikten sonra, fotorezistin çözünmesi için aseton içine daldırılmıştır. Fotorezist tamamen çözündüğünde, DI suyla yıkanmış ve N₂ gazıyla kurutulmuştur. Bu şekilde, grafen Si wafer yüzeyine başarıyla transfer edilmiştir.

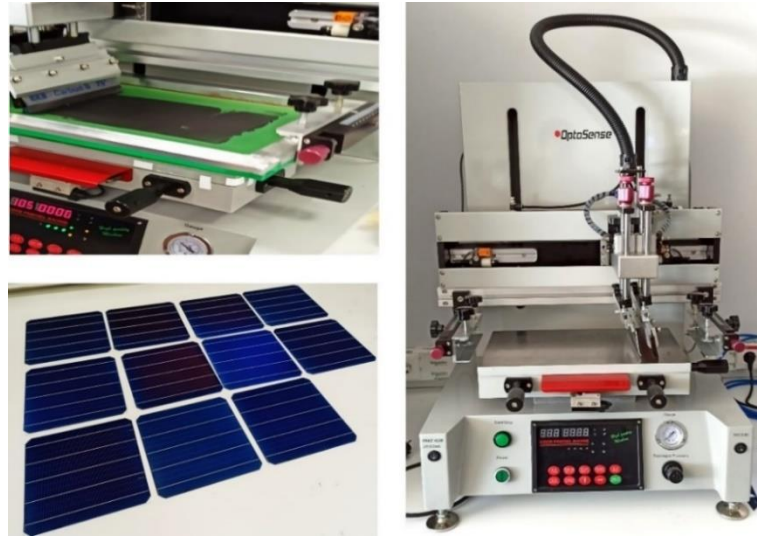
4.5. Şablon Baskılı Nikel Metal Kontak

Yapılan deney çalışmalarında, P-tipi Mono PERC M2 güneş hücreleri kullanılmıştır. $156,75 \times 156,75 \text{ mm}^2$ boyutuna sahip bu güneş hücreleri, ön yüzey kontak baskısı yapılmamış şekilde temin edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Metalizasyon işlemi yapılmamış P-tipi Mono PERC M2 güneş hücreleri

$156,75 \times 156,75 \text{ mm}^2$ boyutundaki P tipi Mono c-Si wafer üzerine Ni metal pastalar kullanılarak SP makinesiyle ön kontak metalizasyon işlemi gerçekleştirildi. Farklı şablonlar kullanılarak geniş bir yelpazede metal elektrot baskı tasarımı yapıldı. SP makinesiyle baskılanmış olan ön kontak Ni metal pasta örnekleri ve SP makinesi Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Daha sonra baskılanmış ön kontak metal pastalarının kuruması için uygun bir süre ve sıcaklıkta bekletildi.



Şekil 4.14. Mono c-Si Wafer üzerine basılmış SP Ni metal pasta

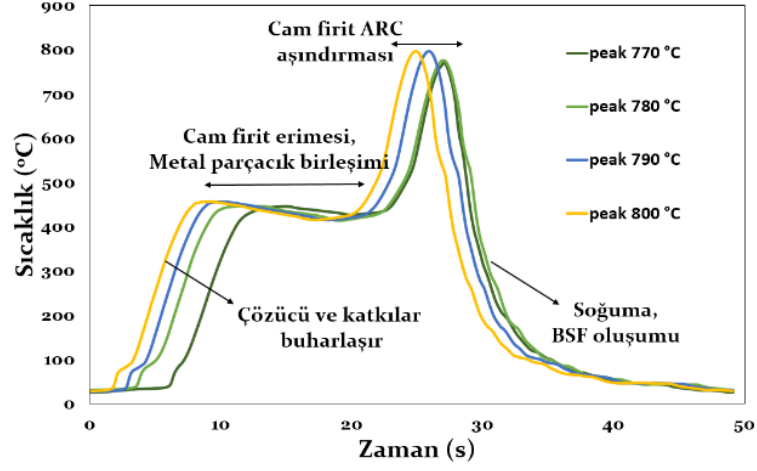
4.6. Isıl İşlem (RTP)

Ön kontak metal pastalar kurutulduktan sonra, temas oluşumunu sağlamak için özel bir fırında belirli bir sıcaklık ve süreyle ısıl işlem uygulanır. Bu adım güneş hücresi metalizasyon işleminin son adımıdır. SP baskılı Ni metal kontaklar, temas oluşumu için bir konveyör bant fırınında birlikte pişirilir. Bu işlem için ODTÜ-GÜNAM laboratuvarlarında bulunan BTU hızlı pişirme fırını (Şekil 4.15) kullanılmaktadır. BTU fırını, 950 °C'ye kadar sıcaklık sağlayabilen ve 1000 cm/dk bant hızına sahip olan bir ekipmandır. Bu sıcaklık, metal kontakların fırınlanması için gereken uygun sıcaklık seviyesini sağlamaktadır. Bant hızı ise hücrelerin fırın içinde hareket ettiği hızı ifade eder. Bu özellikler, ön yüzey metal kontakların doğru sıcaklık ve sürede işlenmesini sağlayarak, istenilen temas oluşumunu elde etmek için optimize edilmiştir.



Şekil 4.15. Altı bölge, IR lambalı ısıl işlem fırınının dıştan ve içten fotoğrafları (Asav, 2022).

Tepe sıcaklıklar, Si ve Ni ara yüzleri için uygun olan 760°C ile 820°C arasında seçilmiştir. Isıl işlem süresi, yaklaşık olarak bir dakika olarak belirlenmiştir. Uygulanan ısıl işlem, pastadaki organik bileşenlerin buharlaşmasını ve metalin wafer üzerinde yapışmasını sağlar. Bu işlem, Şekil 4.16'da gösterilen belirli bir sıcaklık profili ile hücrelere ısıl işlem uygulanmasını içerir. Bu sıcaklık profili dört bölgeye ayrılmıştır. İlk bölgede (450°C'ye çıkarken), pasta içinde kullanılan solventlerin buharlaşıp pastadan uzaklaşır. Boyun bölgesinde (450°C), cam fritlerin ARC katmanını aşındırmak için aktifleşir. Pik bölgede (>600°C), ARC aşındırması ve metal parçacıkların sinterlenmesi meydana gelir. Soğutma bölgesinde ise BSF oluşumları gözlemlenir.



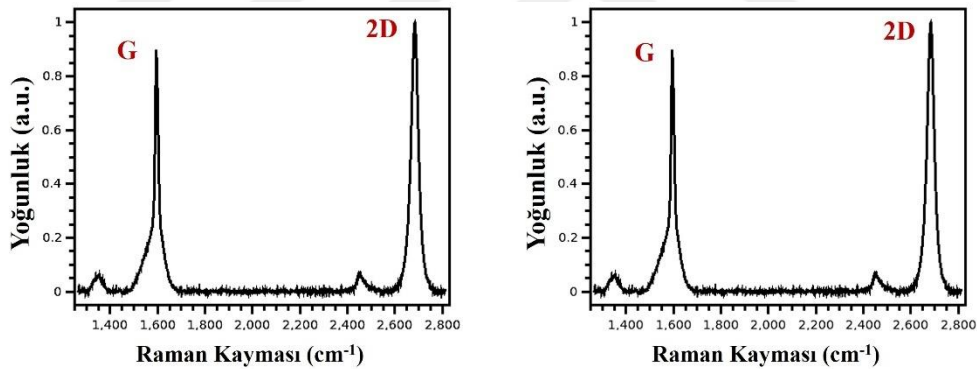
Şekil 4.16. Farklı pik sıcaklıklarında gerçekleştirilen ısıl işlem profili.

Ni pastanın ısıl işlem profili, uygun metal oksitlerin kullanımı sayesinde, Ag pastasının profiline benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik, ısıl işlem sırasında oluşan kimyasal ve fiziksel reaksiyonların, Ni ve Ag pastalarında benzer şekilde gerçekleşmesini sağlar. Konveyör bant fırınında uygulanan bu ısıl işlem, metal pastanın wafer yüzeyine düzgün bir şekilde yayılmasını ve yüzeyle güçlü bir bağ oluşturmasını temin eder. Böylece, elde edilen metal kontakların elektriksel iletkenliği artırılarak, hücrelerin performansı optimize edilir. Bu süreçte, ısıl işlemin süresi ve sıcaklık profili dikkatlice kontrol edilerek, metal ve yarı iletken arasındaki temas direnci minimize edilir. Sonuç olarak, ısıl işleminden geçen Ni metal kontaklar hem mekanik sağlamlık hem de yüksek elektriksel iletkenlik özellikleri sergileyerek, hücrelerin verimliliğine önemli katkı sağlar.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

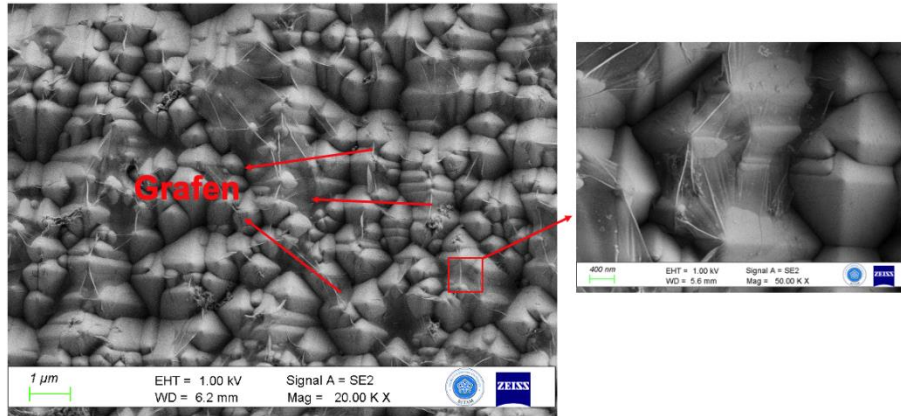
5.1. Grafen Transferi ve Karakterizasyonu

Si waferlerin ön yüzeyine başarılı bir şekilde uygulanan grafen transferi, detaylı bir karakterizasyona tabi tutulmuştur. Optik mikroskop altında incelenen tekstüre edilmiş Si wafer yüzeyinin, grafen transferi sonrasında baloncuk benzeri yapılarla kaplı olduğu görüntülenmiştir. Yapılan Raman spektroskopisi incelemeleri, bu yapıların grafen olduğunu onaylamıştır. Bu inceleme sayesinde grafen tabakasının kalınlığı ve yapısı belirlenerek grafenin karakteristik pikleri oluşturulmuştur. Şekil 5.1'de hücrelerin ön yüzeyinde farklı noktalarda Raman spektroskopisi analizi sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçlar, grafenin başarılı bir şekilde güneş hücreleri üzerine aktarıldığını ve G ve 2D piklerinin net bir şekilde gözlemlendiğini göstermektedir. Bu durum, grafen tabakasının kaliteli olduğunu gösteriyor. Ancak, grafenin taşınması sırasında oluşabilecek bölgesel kusur piklerini de yaklaşık 1350 cm^{-1} bölgesinde gözlemlemekteyiz. Bu bölgesel kusurların kaynağı, grafenin yanı sıra transfer sırasında ortaya çıkan potansiyel kusurları da içermektedir ve bu durum D pikinin gözlemlenmesine neden olmuştur.



Şekil 5.1. Transfer edilen grafenin farklı konumlarının Raman spektrum pikleri.

Sonrasında, grafen kaplı Si wafer yüzeyi, FE-SEM cihazıyla detaylı bir şekilde görüntülenmiştir. Şekil 5.2, tekstüre edilmiş Si wafer yüzeyinde grafen tabakasının varlığını göstermektedir. Farklı bölgeleri kapsayacak şekilde alınan görüntüler, grafenin wafer üzerine başarılı bir şekilde transfer edildiğini ve yüzeye homojen bir şekilde yayıldığını kanıtlamaktadır. Bu görüntüler, grafen tabakasının Si wafer yüzeyine tutunmasını ve düzgün bir kaplama sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. FE-SEM analizleri, grafen tabakasının kalitesini ve bütünlüğünü değerlendirerek, transfer sürecinin etkinliğini doğrulamaktadır.



Şekil 5.2. Grafen transferi yapılan Si waferın FE-SEM görüntüsü.

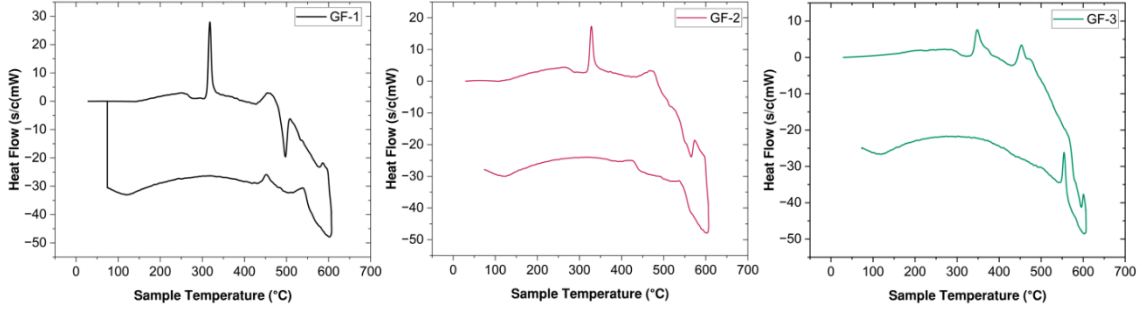
5.2. Metal Pasta Karakterizasyonu

Öncelikle, metal pastanın bileşenleri olan cam frit ve organik karışım özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analizlerin temel amacı, Ni metal pastasının basılabilirlik özelliğine sahip olduğunu ve cam fritin güneş hücrelerinin ön yüzeyindeki ARC katmanını aşındırdığını doğrulamaktır. Çalışma kapsamında 30'un üzerinde cam frit reçetesi denenmiş olup bunlardan Çizelge 5.1'de verilen 3 tanesi en iyi sonuçları vermiştir.

Çizelge 5.1. Cam frit kompozisyon reçeteleri.

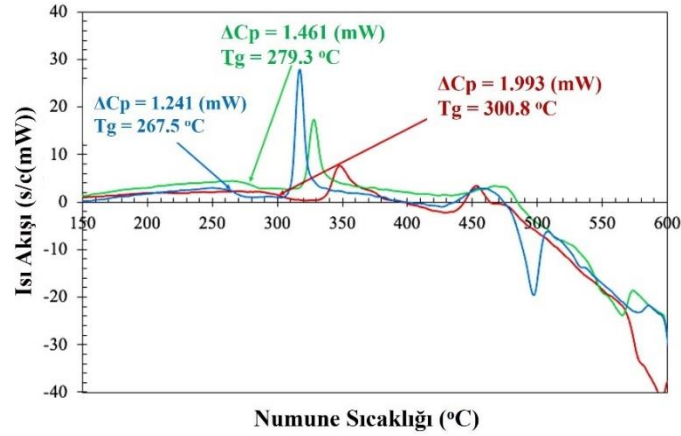
#	Ağ yapıcılar			Ağ destekleyiciler (Araçlar)			Düzenleyiciler		
	SiO ₂ (%mol)	Al ₂ O ₃ (%mol)	B ₂ O ₃ (%mol)	PbO (%mol)	Bi ₂ O ₃ (%mol)	TeO ₂ (%mol)	Nb ₂ O ₅ (%mol)	WO ₃ (%mol)	Li ₂ O (%mol)
GF-1	5	4		35	11	40	2	3	
GF-2	10	8	15	40	8	14	3		2
GF-3	15	6	4	45	15	10		2	3

İlk olarak elde edilen cam fritlerin partikül boyut analizleri CILAS 1190 cihazıyla yapılarak 10 µm altında olduğundan emin olunmuştur. Daha sonra DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) ve TGA (Termogravimetrik Analiz) analizleri yapılarak cam geçiş sıcaklıklarının (T_g) istenilen aralıkta olup olmadığı analiz edilmiştir. Bu analizler, cam frit numunelerinin termal özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. DSC, numunenin ısı işlemlere karşı tepkisini ölçerken, TGA numunenin ağırlığının sıcaklıkla değişimini izler. Bu yöntemler, numunenin ağırlığındaki ve sıcaklığındaki değişimler gibi termal olayları belirlemek için kullanılmıştır.



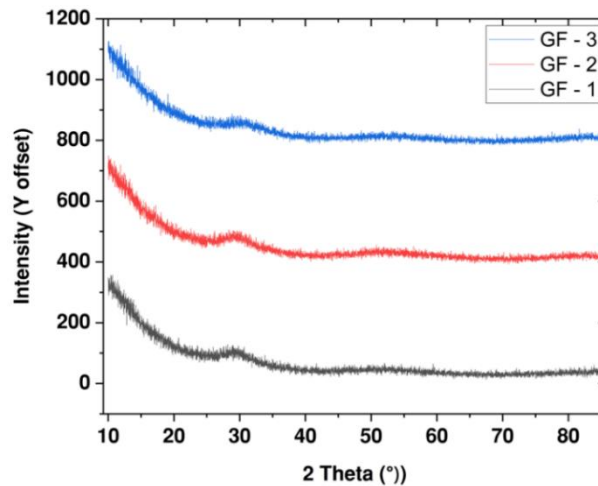
Şekil 5.3. Metal pastalarda kullanılan cam fritlerin TGA grafikleri

Şekil 5.3, Çizelge 5.1’de verilen cam fritlerin TGA analiz grafiklerini göstermektedir. Camın geçiş sıcaklığı (T_g), aşındırma davranışını belirler. T_g değeri, camın yumuşama noktasını temsil eder ve camın akışa geçtiği sıcaklığı ifade eder. Bu değer düşük olduğunda, fırınlama sırasında cam erken yumuşamaya başlar ve aşındırma için daha fazla zamanı olur. Bu durum, p-n eklemine zarar verebilir. Seçilen cam fritler için T_g değeri, 260°C ile 300°C arasında değişmektedir. Bu sıcaklık aralığı, ısıl işlem profilinin cam fritin ARC katmanını aşındırmak ve Ni yığını ile Si emitör arasında temas kurmak için uygun bir zaman sağladığı yaklaşık 500°C’lik yumuşama sıcaklıklarına karşılık gelir. Bu, cam fritin ARC katmanını aşındırması ve Ni yığını ile Si emitörü arasında bir temas oluşturması için yeterli süreye sahip olduğunu gösterir.



Şekil 5.4. TGA analizinde ısı akışının numune sıcaklığına göre değişimi

TGA analizi sonucunda, cam frit numunelerinin T_g değerlerinin istenilen aralıkta olması (Şekil 5.4), cam fritlerin kullanımının beklentilere uygun olduğunu ve belirlenen sıcaklık aralığında istenilen performansı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu sıcaklık değeri, güneş hücrelerinin ön yüzeyinde bulunan ARC katmanının aşındırılması ve metal pastayla Si tabaka arasındaki temas kalitesinin kontrol edilmesi için gereklidir.



Şekil 5.5. Üretilen cam fritlerin XRD grafikleri. Y eksenini ofset olarak çizilmiştir.

Ayrıca üretilen cam fritlerin amorf olup olmadıklarını kontrol etmek için XRD ölçümleri alınmıştır. Şekil 5.5’de de gösterildiği üzere herhangi bir kristal yapısının olmadığı ve tamamen cam malzeme olduğu görülmüştür.

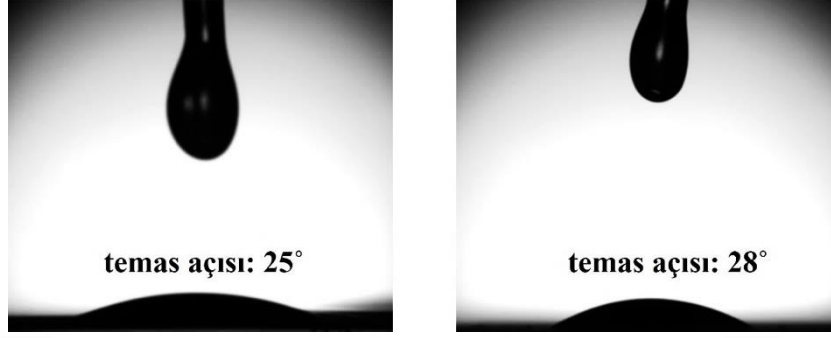
Daha sonra pastanın ikinci bileşeni olarak hazırlanan organik ortamın temas açısı ve viskozite ölçümleri alınarak metal pasta uyumluluğu kontrol edilmiştir. Pastanın istenen reolojik özelliklerini sağlamak için çeşitli solventler, bağlayıcılar ve tiksotropik araçlar kullanılarak oluşturulan farklı organik ortamın kompozisyon reçeteleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çözücüler, ısı işlem sırasında sırayla buharlaşarak metal kontakta çatlak oluşumunu önlerken, bağlayıcılar, farklı yüzey özelliklerine sahip partiküllerin birbirine tutunması için gereklidir. EC ve PVP’nin ise, manyetik nikel metal parçacıklarının topraklanmasını önlemede etkili oldukları gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.2. Organik ortam reçetelerinin ağırlıkça yüzdeleri.

#	Terpineol	Texanol	EC	PVP	Sorbitan	Viskozite (25 °C)
OV-1	52,0	36,0	6,0	2,5	3,5	4,76 Pa*s
OV-2	55,0	28,0	8,0	4,0	5,0	19,68 Pa*s
OV-3	52,0	26,0	10,0	5,5	6,5	25,80 Pa*s

Organik ortam, baskı kalınlığını ve en-boy oranını etkilemesi bakımından viskozite özellikleriyle de önem taşır. Hazırlanan organik ortam numunelerinin viskozite değerleri, Brookfield DVNext RV model reometre kullanılarak ölçülmüştür. Çizelge 5.2’de de görüldüğü üzere, geniş bir viskozite aralığına sahip organik ortamlar elde edilmiştir. Özellikle, 15-30 Pa*s viskozite aralığına sahip organik ortamların, iyi bir

basılabilirlik özelliğine sahip olduğu ve metal pasta için uygun olduğu belirlenmiştir. Bu aralıkta bulunan viskozite değerleri, baskı işlemi sırasında istenilen kalınlık ve en-boy oranının elde edilmesini sağlayarak, metal pastanın uygulama performansını optimize eder.



Şekil 5.6. Farklı organik karışımların ıslanabilirlik analizi için temas açısı ölçümleri.

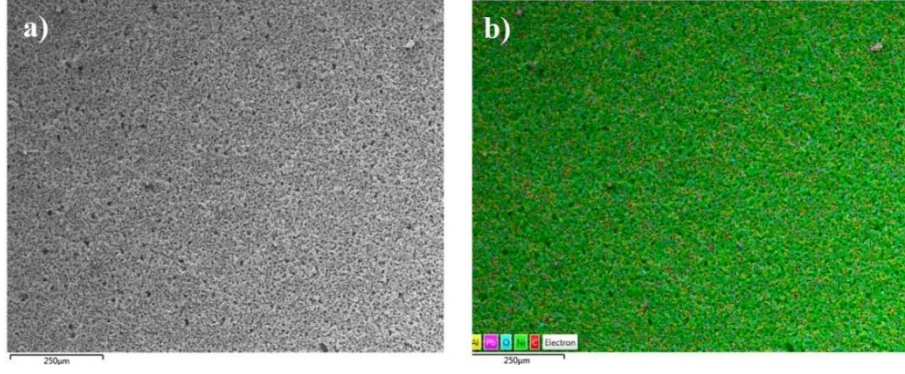
Organik ortamın ıslanabilirlik davranışını göstermek amacıyla temas açısı ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5.6). Kontrol edilen temas açısı 30°'nin altında olduğunda, ıslata bilirliliğinin (wettability) arttığı ve katı içeriği fazla olan metal pastanın tamamını ıslattığı gözlemlenmiştir. Bu sayede de tüm pasta homojen olarak karıştırılabilmekte ve baskıya uygun hale getirilebilmektedir.

Organik ortam ve cam frit optimizasyonları tamamlandıktan sonra, tüm bileşenler (Ni metal tozu, cam frit ve organik karışım) homojen bir şekilde karıştırılarak Ni metal pastası elde edilmiştir. Metal pasta kompozisyon örnekleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Elde edilen pastaların viskozite değerleri 300-400 Pa*s aralığında ölçülmüştür.

Çizelge 5.3. Üretilen Ni metal pastalar ve içerdiği bileşenler.

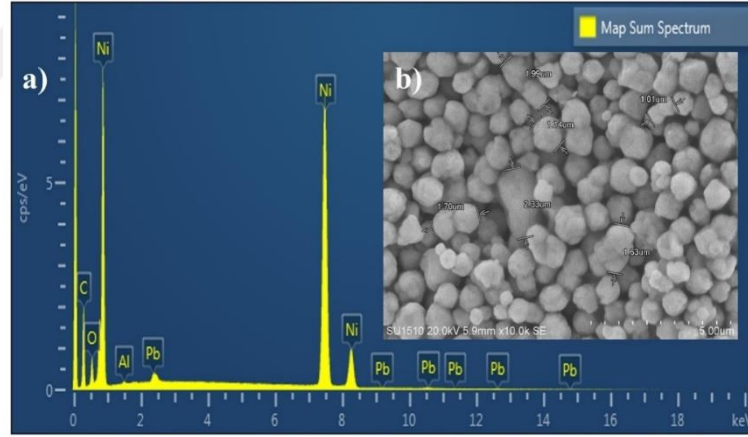
#	Cam frit	Organik Ortam	Metalik Toz
Metal Pasta 1	2,5-3,0%	25,0-27,5%	69,5-72,5%
Metal Pasta 2	3,0-3,5%	22,5-25,0%	71,5-74,5%
Metal Pasta 3	3,5-4,0%	20,0-22,5%	73,5-76,5%

Şekil 5.7, pastanın termal işlem öncesi çekilen SEM görüntüsünü sunmaktadır. Bu şekilde, seçilen Ni pastasının wafer üzerine homojen bir şekilde dağıtılması ve kızılötesi ışık altında iki dakika kurutulması sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri gözlemlenmektedir. Şekil 5.7(a), parçacık boyutunun homojenliğini, Şekil 5.7(b) ise metal tozu, cam frit ve bağlayıcıların homojen dağılımını açıkça göstermektedir.



Şekil 5.7. Üretilen Ni pastanın FE-SEM görüntüleri.

Pastanın homojenliği sağlanmış ve parçacık boyutu D50 dağılımı $\leq 5\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Ortalama metal parçacık boyutu ise, Şekil 5.8(b)'de $1.5\ \mu\text{m}$ olarak gösterilmiştir. Bu, fırınlama sırasında parçacıkların daha kolay bir şekilde sinterlenerek gözenekliliği azaltması ve dolayısıyla kontak direncini azaltması gereken bir pastanın önemli bir özelliğidir. Şekil 5.8(a), (b)'nin elementel analizini göstermiş olup, pastada safsızlık bulunmadığını göstermektedir.



Şekil 5.8. Ni pastanın parçacık boyutu dağılımı ve element analizi (SEM).

5.3. Nikel Metal Pastalı Güneş Hücreleri

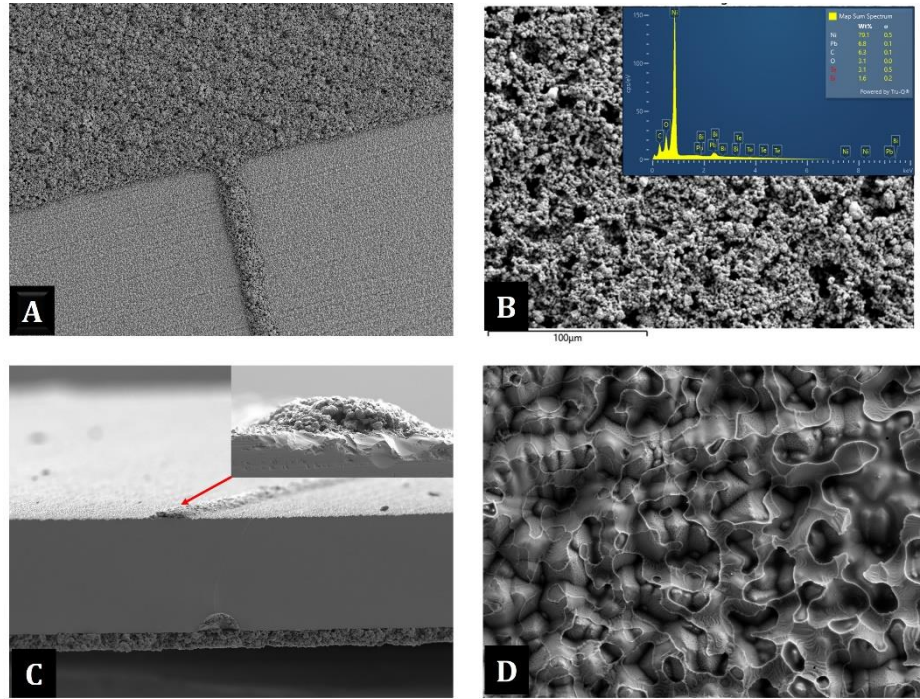
Üretilen Ni metal pastalar, SP ile güneş hücrelerine basıldıktan sonra akım-voltaj (I-V) ölçümleri, kontak ve finger direnç ölçümleri ile elektriksel özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, kontakların optiksel analizi, FE-SEM fotoğrafları ile gerçekleştirilmiştir. Akım, voltaj, doluluk oranı ve verim, sourcemetre ile solar simülatör yardımıyla ölçülmüştür. Kontak direnci, eşit uzaklıkta bulunan kontaklar için uygulanan transfer mesafe metodu (TLM measurement) algoritmasıyla ölçülmüştür. Şekil 5.9, P-tipi

Mono PERC M2 güneş hücrelerinin ve SP yöntemiyle uygulanan Ni metal pastasının ön yüzey kontaklarını gösteren görüntüyü sunmaktadır.



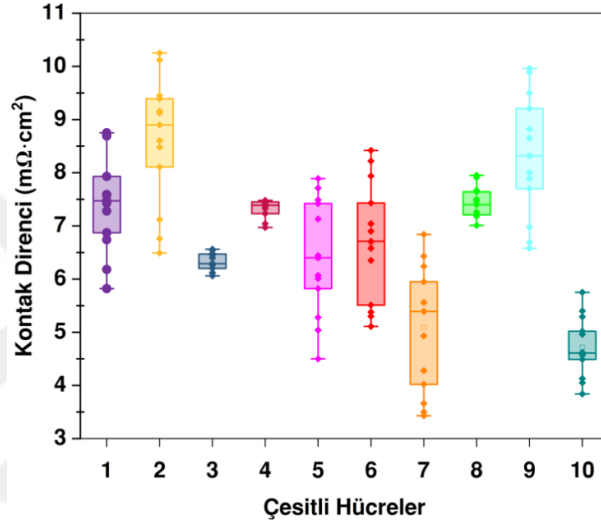
Şekil 5.9. P-tipi Mono PERC M2 güneş hücrelerinde metalizasyon **A)** Metalizasyon işlemi yapılmamış hücre, **B)** Ni pasta baskılı hücre **C)** Ag pasta baskılı referans hücre.

Fırınlanan kontakların EDX analizi ve FE-SEM görüntüleri Şekil 5.10'da sunulmuştur. Bu sonuçlar, Ni metal parçacıklarının sinterlenmesinden sorumlu olan organik karışımın uygun yüzey aktif maddelere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, cam fritin ARC katmanını aşındırma yeteneği yaklaşık 450°C'ye ayarlanmıştır, bu da Ni kontaklarının termal davranışının gümüş muadillerinden farklı olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.10. Mikro ölçekli yapısal analiz, ısı işlem sonrası Ni kontakların FE-SEM görüntüsü: **A)** Nikel kontaklı güneş hücresinin üstten görünümü (finger ve busbar) **B)** Oluşan metal kontakın element analizi (EDX) **C)** Nikel kontaklı güneş hücresinin yandan görünümü (cross section) **D)** Metal kontakın kaldırılması sonrası yüzeyin üstten görünümü.

Kontak direncini biraz daha ayrıntılı incelemek için Ni kontaklı farklı numunelerin TLM metoduyla ölçülmüş kontak direnç grafiği Şekil 5.11’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, aynı üretim koşullarına rağmen hücreden hücreye kontak direnci geniş bir aralıkta ($3,5-10,5 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$) değişmektedir. Hücreden hücreye kontak direncinin bu kadar farklılık göstermesi bir eksiklik olarak kabul edilmektedir. Ancak Ni kontakların ortalaması $5,28 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ olarak ölçülmüş ve bu değer, gümüş muadillerine kıyasla umut vericidir.



Şekil 5.11. TLM yöntemiyle ölçülmüş Ni kontaklı farklı hücrelerin kontak direnç grafiği.

Çizelge 5.4'te, Ni kontaklı güneş hücrelerinin Ag kontaklı referans hücre ile karşılaştırmalı ortalama elektriksel parametreleri bulunmaktadır. Bu değerler, baskılanan Ni kontaklı hücrelerin ortalamasını temsil etmektedir. Açık devre voltajı (V_{OC}) 660 mV, kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) $38,9 \text{ mA}/\text{cm}^2$, doldurma faktörü (FF) %81,0 ve yaklaşık %20,8 verimlilik elde edilmiştir. İlk göze çarpan eksiklik akım yoğunluğundan kaynaklanmakla birlikte, bu durumun sebebi Ni kontaklı hücrelerde kullanılan kontakların Ag kontaklı hücrelerdekinden daha geniş olmasıdır. Ni kontaklı hücrelerde 40-50 μm 'lik kontaklar bulunurken, Ag kontaklılarda bu değer 30-35 μm arasındadır. Bu durum, aktif yüzeyde gölgelenmeye neden olarak akımın azalmasına yol açmıştır. Elde edilen sonuçlar, temas oluşumunun ciddi bir sorun teşkil etmediğini göstermektedir. Son olarak metal sürtünmesi (metal fraction) yani metal ve Si'nin birbirine temas ettiği alanın toplam alana oranının etkilediği ve metalden kaynaklı geri birleşme akımı diye adlandırılan J_0 , Ni için $48 \text{ fA}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür ve bu değer Ag'e göre daha azdır. Bu durum, Ni'nin grafen ile teması söz konusu olduğu için beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 5.4. Ni kontaklı güneş hücreleri ve referans olarak kullanılan Ag kontaklı güneş hücrelerin ortalama elektriksel ölçüm değerleri.

#	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Verim (%)	R _c (mΩ·cm ²)	R _F Ω/cm	J _{0,metal} (fA/cm ²)
Ni Kontak	662	38,9	81,0	20,84	5,28	0,92	48
Ag Kontak	665	39,7	81,7	21,15	4,63	1,1	51

Kontak kalitesinin en çok etkilediği elektriksel parametre olan FF, Ni kontaklarda Ag kontaklara göre düşüktür. Bu durum, Ni'nin emitörle temasının Ag kadar iyi olmadığına bir göstergesidir. Aynı zamanda, ürettiğimiz hücrelerde Ni/Si arasında bir grafen katmanı bulunmakta olup, Ni'nin her bölgede bu katmanla etkileşime girerek iş fonksiyonunu düşürmesi gerekmektedir. Ancak, grafen tekstüre yüzeyde tam bir %100 kaplama gerçekleştirememiş olabilir. Bunun temel nedeni, yüzeyin pürüzlü olması ve grafenin bu pürüzlü yüzeye her noktada tam olarak yapışmamasıdır. Bu yüzden Ni kontakları altındaki bölgelerin bir kısmının Ni/Si direk kontak kurmasına neden olmuş olabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak Ni kontak direnci Ag kontaklılara göre %15'lik bir artış sağlarken FF'te %0,7'lik bir azalışa sebep olmuştur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, yaygın olarak kullanılan Ag kontakların maliyet kısıtlamalarının üstesinden gelmek için şablon baskılı Ni metal kontakların karakterizasyonu üzerine odaklanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları, grafen transferinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ve Ni metal pastalarının güneş hücrelerine uygulanabilirliğini göstermiştir. Ancak, elde edilen verilerden çıkan bazı önemli noktalar, üzerinde durulması gereken konuları ortaya koymaktadır. Grafen transferi sürecindeki bölgesel kusurlar, transfer sırasında ortaya çıkan potansiyel kusurlar ve pürüzlü yüzey nedeniyle oluşan pikler, grafenin taşınması sırasında dikkate alınması gereken zorlukları işaret etmektedir. Bu noktada, transfer verimliliğini artırmak ve bölgesel kusurları minimize etmek için daha fazla optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç vardır.

Cam fritlerin ARC katmanını aşındırma yeteneğine odaklanan metal pasta karakterizasyonu, başarılı bir şekilde cam frit reçetelerinin belirlenmesini sağlamıştır. Ancak, organik karışımın bazı bileşenlerinin kontrollü bir şekilde ayarlanması, özellikle de organik ortamın reolojik özelliklerinin daha fazla optimize edilmesi gerekmektedir. Ni metal pastalı güneş hücrelerinin elektriksel performansı, Ag kontaklı referans hücrelere kıyasla bazı avantajlar ve dezavantajlar göstermektedir. Kontak direncindeki hücreden hücreye geniş aralık, optimizasyon çalışmalarının daha da derinleştirilmesini gerektirmektedir. Doldurma faktöründeki düşüş, Ni'nin emitörle temasının geliştirilmesi ihtiyacını vurgulamaktadır.

Önerimiz, grafen transferi sürecindeki bölgesel kusurları azaltmak, organik ortamın reolojik özelliklerini daha iyi ayarlamak ve Ni metal pastalı güneş hücrelerinin performansını artırmak için daha fazla deneysel ve teorik çalışma yapmaktır. Bu öneriler, güneş hücresi teknolojisinin geliştirilmesine ve yenilenebilir enerji sektöründe daha sürdürülebilir çözümler sunulmasına katkıda bulunabilir.

7. KAYNAKLAR

- Absi Halabi, M., Al Qattan, A., & Al Otaibi, A. (2015). Application of solar energy in the oil industry—Current status and future prospects. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.030>
- Akgayev, B., & Unsur, V. (2024). Evaluation of residential stand alone photovoltaic systems in mega cities of the world. *International Journal of Green Energy*, 21(2), 448-460. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2276153>
- Aleman, M. (2013). Low Temperature Processes for the Front Side Metallization of Silicon Solar Cells.
- Allen, T. G., Bullock, J., Yang, X., Javey, A., & De Wolf, S. (2019). Passivating contacts for crystalline silicon solar cells. *Nature Energy*, 4(11), Article 11. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0463-6>
- Alley, R., Blumsack, S., Bice, D., & Feineman, M. (2023). Solar Energy. <https://www.e-education.psu.edu/earth104/node/950>
- Asav, H. (2022). Improving The Performance Of Monocrystalline Silicon PERC Solar Cells By Optimizing Front And Rear Metallization [Master Thesis, Middle East Technical University]. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/98112>
- Baker, B. G., Johnson, B. B., & Maire, G. L. C. (1971). Photoelectric work function measurements on nickel crystals and films. *Surface Science*, 24(2), 572-586. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(71\)90282-2](https://doi.org/10.1016/0039-6028(71)90282-2)
- Ballif, C., Haug, F.-J., Boccard, M., Verlinden, P. J., & Hahn, G. (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 7(8), Article 8. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>
- Bayod-Rújula, A. A. (2019). Chapter 8—Solar photovoltaics (PV). İçinde F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, & D. Ferrero (Ed.), *Solar Hydrogen Production* (ss. 237-295). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4>
- Beaucarne, G., Schubert, G., Hoornstra, J., Horzel, J., & Glunz, S. W. (2012). Summary of the Third Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells. *Energy Procedia*, 21, 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.002>
- bp. (2022a). *Energy Outlook* (s. 57). British Petroleum.
- bp. (2022b). *Statistical Review of World Energy* (s. 60).
- Byun, K.-E., Chung, H.-J., Lee, J., Yang, H., Song, H. J., Heo, J., Seo, D. H., Park, S., Hwang, S. W., Yoo, I., & Kim, K. (2013). Graphene for True Ohmic Contact at

- Metal–Semiconductor Junctions. *Nano Letters*, 13(9), 4001-4005. <https://doi.org/10.1021/nl402367y>
- Chandra, S. V. J., Jeong, M.-R., Shim, K.-H., Hong, H.-B., Lee, S.-H., Ahn, K.-S., & Choi, C.-J. (2010). Effective Metal Work Function of Pt Gate Electrode in Ge Metal Oxide Semiconductor Device. *Journal of The Electrochemical Society*, 157(5), H546. <https://doi.org/10.1149/1.3332849>
- Chen, Y., Chen, D., Liu, C., Wang, Z., Zou, Y., He, Y., Wang, Y., Yuan, L., Gong, J., Lin, W., Zhang, X., Yang, Y., Shen, H., Feng, Z., Altermatt, P. P., & Verlinden, P. J. (2019). Mass production of industrial tunnel oxide passivated contacts (i-TOPCon) silicon solar cells with average efficiency over 23% and modules over 345 W. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(10), 827-834. <https://doi.org/10.1002/pip.3180>
- CIFTJA, A., ABEL ENGH, T., & TANGSTAD, M. (2008). Refining and Recycling of Silicon: A Review.
- Deokar, G., Avila, J., Razado-Colambo, I., Codron, J.-L., Boyaval, C., Galopin, E., Asensio, M.-C., & Vignaud, D. (2015). Towards high quality CVD graphene growth and transfer. *Carbon*, 89, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.03.017>
- Dullweber, T., & Schmidt, J. (2016). Industrial Silicon Solar Cells Applying the Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Concept—A Review. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6, 1366. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2571627>
- Ebong, A., & Chen, N. (2012). Metallization of crystalline silicon solar cells: A review. *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, 102-109. <https://doi.org/10.1109/HONET.2012.6421444>
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- EÜAŞ. (2021). Sektör Raporu. <https://www.euas.gov.tr/sektor-raporu>
- Fraas, L. M. (2014). History of Solar Cell Development. İçinde L. M. Fraas (Ed.), *Low-Cost Solar Electric Power* (ss. 1-12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3_1
- Geim, A. K. (2009). Graphene: Status and Prospects. *Science*, 324(5934), 1530-1534. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>
- Genus. (2021, Şubat 16). Different Types of Solar PV Systems. *Genus*. <https://www.genusinnovation.com/blogs/types-of-solar-pv-systems>

- Ghosh, D. K., Bose, S., Das, G., Acharyya, S., Nandi, A., Mukhopadhyay, S., & Sengupta, A. (2022). Fundamentals, present status and future perspective of TOPCon solar cells: A comprehensive review. *Surfaces and Interfaces*, 30, 101917. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101917>
- Glunz, Rein, S., Warta, W., Knobloch, J., & Wettling, W. (2001). Degradation of carrier lifetime in Cz silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 65, 219-229. [https://doi.org/DOI: 10.1016/S0927-0248\(00\)00098-2](https://doi.org/DOI: 10.1016/S0927-0248(00)00098-2)
- Green. (1982). Accuracy of Analytical Expressions for Solar Cell Fill Factors. *Solar Cells*, 7, 337-340.
- Green, M. A. (2009). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17(3), 183-189. <https://doi.org/10.1002/pip.892>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Siefert, G., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3-16. <https://doi.org/10.1002/pip.3646>
- Gurbuz, H. N., Yilmaz, K., Ipekci, H. H., Uzunoglu, A., & Cagil, E. M. (2024). Synthesis and characterization of new targeted pH-responsive heteroatom-doped hexagonal boron nitride nanosheets for controlled drug release. *Materials Science and Engineering: B*, 299, 116909. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116909>
- Hilali, M. M., Sridharan, S., Khadilkar, C., Shaikh, A., Rohatgi, A., & Kim, S. (2006). Effect of glass frit chemistry on the physical and electrical properties of thick-film Ag contacts for silicon solar cells. *Journal of Electronic Materials*, 35(11), 2041-2047. <https://doi.org/10.1007/s11664-006-0311-x>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2019). *Semiconductor Materials*. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials>
- IEA. (2021a). *Global Energy Review* (s. 36).
- IEA. (2021b). *Renewables-Analysis and forecast to 2026* (s. 175).
- IEA. (2021c). *World Energy Outlook* (s. 386).
- IEA. (2022a). *Electricity Market Report—Jan* (s. 118).
- IEA. (2022b). *Renewable Energy Market Update* (s. 29).
- IEA. (2022c). *World Energy Investment* (s. 227).
- IEA. (2023). *World Energy Investment* (s. 181).

- IHS. (2022). Top 10 Cleantech Trends. <https://ihsmarkit.com/info/0122/cleanenergytechtrends2022.html>
- IRENA. (2022b). Renewable Energy Statistics (s. 462).
- IRENA. (2023). Renewable capacity statistics. <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- İpek, E., & Hakyemez, C. (2024). TSKB Ekonomik Araştırmalar (1).
- IRENA. (2022a). Finance & Investment. <https://www.irena.org/financeinvestment>
- ITRPV. (2023). International Technology Roadmap for Photovoltaic. <https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- Kavak, D. K., Hakyemez, C., Şentürk, Z., Arıkan, E., Çelen, E., Kardeş, Y., & Emreçan, M. (2023). Enerji Görünümü.
- Kumar, A., Bieri, M., Reindl, T., & Aberle, A. G. (2017). Economic Viability Analysis of Silicon Solar Cell Manufacturing: Al-BSF versus PERC. *Energy Procedia*, 130, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.412>
- Lachenal, D., Papet, P., Legradic, B., Kramer, R., Kössler, T., Andreetta, L., Holm, N., Frammelsberger, W., Baetzner, D. L., Strahm, B., Senaud, L. L., Schüttauf, J. W., Descoedres, A., Christmann, G., Nicolay, S., Despeisse, M., Paviet-Salomon, B., & Ballif, C. (2019). Optimization of tunnel-junction IBC solar cells based on a series resistance model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 110036. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110036>
- 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.
- Liu, Y., Li, Y., Wu, Y., Yang, G., Mazzarella, L., Procel-Moya, P., Tamboli, A. C., Weber, K., Boccard, M., Isabella, O., Yang, X., & Sun, B. (2020). High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: Materials, Devices and Applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 142, 100579. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100579>
- Lorenz, A. (2018). Screen Printed Thick Film Metallization of Silicon Solar Cells—Recent Developments and Future Perspectives.

- Metal Price. (2024).
<https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=ni&u=g&d=0>
- Nguty, T. A., & Ekere, N. N. (2000). The rheological properties of solder and solar pastes and the effect on stencil printing. *Rheologica Acta*, 39(6), 607-612.
<https://doi.org/10.1007/s003970000117>
- Nguyen, A., Rane-Fondacaro, M., Efstathiadis, H., Haldar, P., Michaelson, L., Wang, C., Munoz, K., Tyson, T., & Gallegos, A. (2010). Formation of low ohmic contact nickel silicide layer on textured silicon wafers using electroless nickel plating. *Proc. of the 25th EPVSEC*.
- NREL. (2023). Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Paranthaman, M. P., Wong-Ng, W., & Bhattacharya, R. N. (Ed.). (2016). *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells* (C. 218). Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-20331-7>
- Pavalié, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2019). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239>
- Pfann. (1952). Zone-refining. *Trans. AIME*, 194.
- Pizzini, S. (2010). Towards solar grade silicon: Challenges and benefits for low cost photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(9), 1528-1533.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.01.016>
- Pizzini, S., Calligarich, C., Calligarich, C., & Calligarich, C. (1984). On the Effect of Impurities on the Photovoltaic Behavior of Solar-Grade Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 131(9), 2128. <https://doi.org/10.1149/1.2116033>
- Plutnar, J., Pumera, M., & Sofer, Z. (2018). The chemistry of CVD graphene. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(23), 6082-6101. <https://doi.org/10.1039/C8TC00463C>
- PwC. (2021). Türkiye ve Dünyada Güneş Enerjisi Sektörü. PwC.
<https://www.pwc.com.tr/turkiye-ve-dunyada-gunes-enerjisi-sektoru>
- PwC. (2024). Dünyada ve Türkiye’de Güneş Enerjisi Sektörü.
<https://www.pwc.com.tr/dunyada-ve-turkiyede-gunes-enerjisi-sektoru>
- Rappaport, P. (1959). The photovoltaic effect and its utilization. *Solar Energy*, 3(4), 8-18. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(59\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(59)90002-7)
- REN21. (t.y.). RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT. Geliş tarihi 29 Ağustos 2022, gönderen <https://www.ren21.net/gsr-2022>

- REN21. (2022). Renewables Global Status Report. <https://www.ren21.net/gsr-2022>
- Rockett, A. (Ed.). (2008). Chemical Vapor Deposition. İçinde *The Materials Science of Semiconductors* (ss. 573-609). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68650-9_12
- Roskill Information Services (Ed.). (2011). *Silicon and Ferrosilicon: Global Industry Markets and Outlook* (13. ed). Roskill Information Services.
- Rudolph, D., Olibet, S., Hoornstra, J., Weeber, A., Cabrera, E., Carr, A., Koppes, M., & Kopecek, R. (2013). Replacement of Silver in Silicon Solar Cell Metallization Pastes Containing a Highly Reactive Glass Frit: Is it Possible? *Energy Procedia*, 43, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.087>
- Schubert, G. (2006). Thick Film Metallisation of Crystalline Silicon Solar Cells: Mechanisms, Models and Applications. <http://kops.uni-konstanz.de/handle/123456789/9378>
- Shalaeva, D. S., Kukartseva, O. I., Tynchenko, V. S., Kukartsev, V. V., Aponasenko, S. V., & Stepanova, E. V. (2020). Analysis of the development of global energy production and consumption by fuel type in various regions of the world. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 952(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/952/1/012025>
- Shen, H., Walter, D., Wu, Y., Fong, K. C., Jacobs, D. A., Duong, T., Peng, J., Weber, K., White, T. P., & Catchpole, K. R. (2020). Monolithic Perovskite/Si Tandem Solar Cells: Pathways to Over 30% Efficiency. *Advanced Energy Materials*, 10(13), 1902840. <https://doi.org/10.1002/aenm.201902840>
- Shih, Y.-C., & Shi, F. G. (2017). Silicon Solar Cell Metallization Pastes. İçinde D. Lu & C. P. Wong (Ed.), *Materials for Advanced Packaging* (ss. 855-877). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45098-8_20
- Silver Institute. (2020). Silver's important role in solar power.
- Smith, R. P., Hwang, A. A.-C., Beetz, T., & Helgren, E. (2018). Introduction to semiconductor processing: Fabrication and characterization of p-n junction silicon solar cells. *American Journal of Physics*, 86(10), 740-746. <https://doi.org/10.1119/1.5046424>
- Sugiura, T., Matsumoto, S., & Nakano, N. (2020). Bifacial PERC Solar Cell Designs: Bulk and Rear Properties and Illumination Condition. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(6), 1538-1544. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3013987>

- Taylor, N., & Jäger-Waldau, A. (2019). Low Carbon Energy Observatory Photovoltaics Technology Development Report 2018. <https://doi.org/10.2760/373667>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı. (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı (s. 54). https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı. (2024). Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2023). Yatırım Teşvik Sistemleri. <https://www.sanayi.gov.tr/anasayfa>
- Tepner, S., & Lorenz, A. (2023). Printing technologies for silicon solar cell metallization: A comprehensive review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(6), 557-590. <https://doi.org/10.1002/pip.3674>
- Twidell, J. (2021). *Renewable Energy Resources* (4. bs). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429452161>
- Unsur, V. (2018). Understanding And Developing Fire-Through Dielectric Contacts On Highly Efficient Silicon Solar Cells. UNC Charlotte Electronic Theses and Dissertations. <https://repository.charlotte.edu/islandora/object/etd%3A293/>
- Unsur, V., Klein, T., van Hest, M. F. A. M., Al Jassim, M., & Ebong, A. (2019). Rapid thermal processing of cost-effective contacts for silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(5), 453-459. <https://doi.org/10.1002/pip.3119>
- USDE. (2023). Solar Photovoltaic Manufacturing Basics. Energy.Gov. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-manufacturing-basics>
- Verlinden, Swanson, R. M., & Crane, R. A. (1994). 7000 High Efficiency Cells for a Dream. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2, 143-152.
- Zhang, C., Shen, H., Sun, L., Yang, J., Wu, S., & Lu, Z. (2020). Bifacial p-Type PERC Solar Cell with Efficiency over 22% Using Laser Doped Selective Emitter. *Energies*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/en13061388>
- Zhang, Y., Yang, Y., Zheng, J., Hua, W., & Chen, G. (2009). Thermal properties of glass frit and effects on Si solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 114(1), 319-322. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.09.011>
- Zhao, Wang, A., & Green, M. (2001). 24.5% efficiency PERT silicon solar cells on SEH MCZ substrates and cell performance on other SEH CZ and FZ substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 66, 27-36. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00155-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00155-0)

