



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



c-Si HETEROEKLEM/PEROVSKİT TANDEM GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ELİF DAMGACI

EYLÜL 2024

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

c-Si HETEROEKLEM/PEROVSKİT TANDEM GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ELİF DAMGACI

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Yüksel KAPLAN
Doç. Dr. Ayşe SEYHAN

Eylül 2024

Elif DAMGACI tarafından **Prof. Dr. Yüksel Kaplan ve Doç. Dr. Ayşe SEYHAN** danışmanlığında hazırlanan “**c-Si Heteroeklem/Perovskit Tandem Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu**” isimli bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mine İnce OCAKOĞLU, Tarsus Üniversitesi

Üye : Prof.Dr. Serkan TOROS, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Bora TİMURKUTLUK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç.Dr. Selmin Ener RUŞEN, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Elif DAMGACI

ÖZET

c-Si HETEROEKLİM/PEROVSKİT TANDEM GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

DAMGACI, Elif

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

İkinci Danışman : Doç. Dr. Ayşe SEYHAN

Eylül 2024, 118 sayfa

c-Si SHJ ve perovskit tandem güneş hücrelerindeki en son ilerlemeler, hem üst hem de alt hücre katmanlarının optimizasyonuna, yenilikçi malzemelerin entegrasyonuna ve alt katman olarak kullanılan silisyum hücre türlerinin çeşitlendirilmesine yönelik çalışmalarla ivme kazanmıştır. Bu çalışmada, c-Si SHJ/perovskit tandem güneş hücreleri üzerine alt ve üst hücrenin geliştirilmesi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Alt hücreyi oluşturan c-Si heteroeklem güneş hücresinin önemli bir katmanı olan ITO'nun O₂ oranı ve sıcaklık optimizasyonu yapılarak karakterize edilmiştir. Üst perovskit hücrede ise tüm katmanlar solüsyon bazlı hazırlanıp dönele kaplama yöntemiyle üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Monolitik c-Si Heteroeklem/Perovskit Tandem hücre yapısını oluşturmak için birinci adımda ITO filmler, oda sıcaklığı (RT) ile 250°C arasında değişen sıcaklıklarda magnetron püskürtme kullanılarak biriktirilmiş ve ideal ITO filmi için en uygun sıcaklık 200°C olarak belirlenmiştir. İkinci adımda ise bu ideal sıcaklıkla üretilen alt hücre üzerine geliştirilmiş perovskit üst hücre katmanları üretilerek tandem hücre yapısı tamamlanmıştır. Alt ve üst hücrenin Tandem-200 konfigürasyonunun verimliliği %16,74 olarak ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: c-Si heteroeklem güneş hücresi, perovskit güneş hücresi, tandem güneş hücresi, geçirgen iletken oksit, ince film ve sıcaklık optimizasyonu

SUMMARY

DEVELOPMENT OF c-SI SHJ/PEROVSKITE TANDEM SOLAR CELLS AND CHARACTERIZATION

DAMGACI, Elif

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Co- Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ayşe SEYHAN

September 2024, 118 pages

Recent advancements in c-Si SHJ and perovskite tandem solar cells have accelerated with efforts focused on optimizing both the top and bottom cell layers, integrating innovative materials, and diversifying the types of silicon cells used as substrates. In this study, the development and characterization of the top and bottom cells in c-Si SHJ/perovskite tandem solar cells were conducted. The bottom cell was characterized by optimizing the O₂ ratio and the temperature of the ITO layer, which plays a crucial role in the c-Si heterojunction solar cell. In the top perovskite cell, all layers were fabricated and characterized using a solution-based spin coating method. In the first step of forming the monolithic c-Si Heterojunction/Perovskite Tandem cell structure, ITO films were deposited via magnetron sputtering at temperatures ranging from room temperature (25 °C) to 250 °C, with the optimal temperature for the ideal ITO film being determined as 200°C. In the second step, the tandem cell structure was completed by fabricating the perovskite top cell layers onto the bottom cell produced at this optimal temperature. The efficiency of the Tandem-200 configuration, encompassing both the bottom and top cells, was measured to be 16.74%.

Keywords: c-Si heterojunction solar cell, perovskite solar cell, tandem solar cell, transparent conductive oxide, thin film and temperature optimization

ÖN SÖZ

Doktora tez çalışmam sürecinde bana sundukları her türlü imkân için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'na ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne teşekkür ederim. Doktora eğitimim süresince çalışmalarına yön veren, bilgi ve deneyimini esirgemeyen, akademik katkılarının yanında hayati anlamda da yol gösteren kıymetli danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Yüksel KAPLAN ve Doç. Dr. Ayşe SEYHAN 'a en içten saygı ve şükranlarımı sunarım. Doktora tezim süresince katkı ve destekleri için Prof. Dr. Mine İNCE OCAKOĞLU ve makine mühendisliği anabilim dalı başkanı olarak desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Bora TİMURKUTLUK hocalarıma teşekkür ederim. Laboratuvarda bilgi deneyimlerini paylaşan ve beni kız kardeşleri gibi gören Prof. Dr. Recep ZAN, Prof. Dr. Yeliz KONUKLU, Doç. Dr. Mehmet Ali OLĞAR ve 3501 Tübitak Projesi ile çalışmalarına farklı bir alanla da destek veren Dr. Öğretim Üyesi Filiz Keleş' e teşekkür ederim. 3501 proje süresince tanıştığım hem akademik hem de hayat tecrübeleriyle desteklerini esirgemeyen Dr. Öğretim Görevlisi Abdullah ATILGAN' a teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasında göstermiş oldukları anlayış, destek ve fedakârlıklarından dolayı çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Emre KARTAL ve akademiye girmeye her an hazır olan manevi kardeşim Furkan GÜÇLÜER'e teşekkür ederim. Doktora süresince beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşlarım Dr. Gamze ATALMIŞ ve Dr. Öğretim Görevlisi Nebi YELEGEN'e teşekkür ederim.

Tez çalışma süresi boyunca maddi ve manevi desteklerini üzerimden çekmeyen deney molalarımnda benimle kahve arası veren değerlim annem Fadime DAMGACI ve canım babam Arif DAMGACI'ya, moral ve motivasyonumu yüksek tutan şefkatli ablam Tuğba DAMGACI'ya, ne olursa olsun Elifcik senin yanındayız diyen abim Tuğrul Alpaslan DAMGACI ve onun değerli eşi, benim kız kardeşim Gamze DAMGACI'ya teşekkür ederim. İnsanın sürdürülebilir bir hayatı olması için güvenilir dostları olmalıdır. Bu dönem süresince beni yalnız bırakmayan İrem GÜL, Sidre ERGANİŞ, Didar EKİCİ, Halil İbrahim KEÇECİ ve Serkan KULA'ya destekleri için teşekkür ederim. Bu çalışmaya 20AG014 numaralı TUBİTAK 1004 Çift taraflı c-Si heteroeklem güneş hücrelerinin geliştirilmesi projesine kısmi olarak desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xvi
SİMGE VE KISALTMALAR	xvii
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	2
1.2 Güneş Enerjisi.....	4
1.3 Fotovoltaik ile İlgili Temel Kavramlar	6
1.3.1 Güneş ışıınımı	6
1.3.2 Güneş hücresinin temelleri	7
1.3.3 Kısa devre akımı (I_{sc}).....	11
1.3.4 Açık devre voltajı (V_{oc})	11
1.3.5 Doluluk faktörü (FF)	12
1.3.6 Verimlilik (η).....	13
1.3.7 Harici ve iç kuantum verimliliği.....	13
1.4 Bir Güneş Hücresinde Oluşabilecek Kayıplar	15
1.4.1 İç kaynaklı kayıplar	16
1.4.1.1 Eg kaybının altında oluşan kayıplar	17
1.4.1.2 Isıl kayıplar	17
1.4.1.3 Emisyon kayıpları	17
1.4.1.4 Carnot kayıpları	18
1.4.1.5 Açık uyumsuzluğu kayıpları	18
1.4.2 Güneş hücrelerinde dışsal kayıplar	18
1.4.2.1 Yansıma kayıpları	19
1.4.2.2 Parazitik absorbsiyon	19

1.4.2.3 Seri direnç kayıpları.....	19
1.4.2.4 Kontak gölgelemesi	20
BÖLÜM II	21
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	21
2.1 Perovskit Güneş Hücreleri	21
2.1.1 Perovskit yapısı ve özellikleri.....	23
2.1.2 Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi	25
2.1.3 Perovskit güneş hücrelerini oluşturan katmanların özellikleri	27
2.1.4 Perovskit güneş hücrelerinin teknolojik ilerlemesi.....	33
2.2 c-Si Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Tarihçesi ve Gelişimi	35
2.3 Tandem Güneş Hücreleri	37
2.4 Monolitik Perovskit/Silisyum Tandem Güneş Hücrelerinin Yakın Geçmişi	40
BÖLÜM III.....	42
c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRESİNİN ÜRETİLMESİ, GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU	42
3.1 Yüzey Desenlendirme.....	43
3.2 Yüzey Temizliği	43
3.3 Katkısız (i) ve Katkılı (n) ve (p) a-Si: H Tabakaların Kaplanması.....	44
3.4 ITO Tabakasının PVD ile Kaplanması	45
3.5 Arka ve Ön Yüzey Metalizasyon İşlemi.....	45
3.6 Fırınlama	46
3.7 Üretilen Alt Hücrelerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu	46
3.7.1 SHJ güneş hücrelerinde ITO filmlerinin optimizasyonu: oksijen akış hızının performansa etkisi	47
3.7.1.1 Oksijen akış hızının oranına göre ITO ince film üretimi.....	47
3.7.1.2 O ₂ akış oranına göre üretilen ITO ince filmlerin karakterizasyonu....	48
3.7.1.3 Yapısal özellikler	48
3.7.1.4 Optiksel özellikler.....	51
3.7.1.5 Elektriksel özellikler	52
3.7.2 5×5 cm ² SHJ güneş hücrelerinin üretimi.....	53
BÖLÜM IV.....	56
PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU	56
4.1 Perovskit Güneş Hücresi Üretiminde Kullanılan Malzemeler	56
4.2 Üretim Aşamasında Kullanılan Cihazlar	56

4.3 Perovskit Güneş Hücrelerinde Alan	58
4.4 Alttaşların Dağlama İşlemi ve Temizlenmesi.....	59
4.5 Elektron Taşıma Malzemelerinin Üretilmesi ve Kaplanması.....	59
4.5.1 Kompakt TiO ₂ katmanının üretilmesi ve kaplanması.....	60
4.5.2 Mezoporoz TiO ₂ katmanının üretilmesi ve kaplanması	61
4.5.3 SnO ₂ katmanının üretilmesi ve kaplanması.....	62
4.6 Elektron Taşıma Katmanlarının Karakterizasyonu.....	63
4.6.1 c-TiO ₂ ve mp XRD, SEM ve kalınlık sonuçları	63
4.6.2 Kompakt TiO ₂ ve Mesoporoz TiO ₂ SEM Sonuçları.....	67
4.6.3 SnO ₂ XRD, SEM ve Kalınlık sonuçları.....	69
4.7 Perovskit Soğurucu Katmanının Üretilmesi ve Karakterizasyonu	70
4.7.1 Üretilen perovskit ince filmlerin sarı faz, iğne deliği ve çubuksu yapı sorunu	71
4.7.2 Perovskit katmanı kaplanma işleminden önce antisolvent damlatma yöntemi	76
4.7.3 Perovskit katmanında tavlama sıcaklığının optimizasyonu.....	77
4.8 Boşluk Taşıma Katmanı Üretilmesi ve Karakterizasyonu.....	79
4.9 Üst Perovskit Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesiyle Hücre Yapılarının Oluşturulması.....	81
BÖLÜM V	83
MONOLİTİK c-Si SHJ/PEROVSKİTE TANDEM GÜNEŞ HÜCRESİ.....	83
5.1 5×5 cm ² Alanda c-Si SHJ/Perovskit Monolitik Tandem Güneş Hücresinin Üretilmesi	83
5.2 5×5 cm ² Alanda c-Si SHJ/Perovskit Monolitik Tandem Güneş Hücresinin Morfolojik Görünümü ve J-V Karakterizasyonu.....	85
5.3 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Üretilen VO ₂ 'inin Bant Aralığı Hesaplaması.....	86
5.4 2.5×2.5 cm ² Monolitik Tandem Güneş Hücresi için c-Si SHJ Alt Hücresinin Üretilmesi	87
5.4.1 ITO filmlerin üretilmesi.....	88
5.4.2 ITO filmlerin biriktirme sıcaklığının yapısal özellikleri üzerine etkisi	89
5.5 ITO Filmlerinde Biriktirme Sıcaklığının Optik Özellikler Üzerindeki Etkisi	93
5.6 ITO Filmlerin Elektriksel Özellikleri Üzerinde Sıcaklığın Etkisi	95

5.7 Sıcaklık Optimizasyonu Yapılan Alt Hücrenin Tandem Güneş Hücresi İçin	
Hazırlanması	97
5.8 Monolitik c-Si SHJ/Perovskit Tandem Güneş Hücresinin Yapısal ve Morfolojik	
Özellikleri	97
5.9 c-Si SHJ ve Monolitik c-Si SHJ/Perovskite Tandem Güneş Hücrelerinin	
Verimliliği.....	99
BÖLÜM VI.....	101
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKLAR	103
ÖZ GEÇMİŞ	118
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	119

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Güneş ışığı altında bir hücre için farklı kayıp mekanizmalarına atfedilen gelen ışığın oranı ($E_g = 1.31$ eV ile)	17
Çizelge 2.1. Organik ve inorganik perovskit malzemelerin özellikleri ve değerleri (Roy vd., 2020).....	31
Çizelge 3.1. Kristal boyutunun (D) hesaplanmasında kullanılan parametreler.	50
Çizelge 3.2. 0, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 sccm O_2 akış hızlarında biriktirilen ITO filmlerinin XRD verilerinden hesaplanan yapısal parametreleri (Kartal vd., 2023). ..	51
Çizelge 3.3. Farklı O_2 oranlarında (0, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 sccm) biriktirilen ITO filmlerinin SHJ güneş hücresi parametreleri (Kartal vd., 2023).	54
Çizelge 4.1. Üretilen c-TiO ₂ 'in kalınlık değerleri	65
Çizelge 5.1. ITO filmlerinin biriktirme parametreleri ve karşılık gelen örnek gösterimleri.....	89
Çizelge 5.2. ITO filmlerinin FWHM (β), Bragg açısı (θ), kristal boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ), mikro gerinim (ϵ) ve birim alan başına düşen kristal sayısı (N) değerleri (Damgacı vd., 2024).....	90
Çizelge 5.3. XRD ile elde edilen 5 ana tepe için hesaplanan doku katsayısı değerleri ..	92
Çizelge 5.4. ITO filmlerinin geçirgenlik, yansıma ve enerji bant aralık değerleri	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı raporlarına göre Türkiye'nin Kurulu Güç Kapasitesi Trendi (IRENA, 2023).....	5
Şekil 1.2. AM0 ve AM1.5G koşullarındaki spektral ışıma, AM1.5G altında foton akısı ve 5800 K sıcaklığındaki bir kara cismin ışıma spektrumları (Tress, 2014).....	7
Şekil 1.3. Yarı iletkenlerde elektron-boşluk çifti oluşumu ve ayrılması: bir fotonun soğurulması (a), elektronun iletim bandına yükselmesi ve valans bandında bir boşluk bırakması (b), üretilen elektron-boşluk çifti (c), taşıyıcıların elektrik alanı tarafından ayrılması (d), p-i-n bağlantısının bant diyagramı (e)	9
Şekil 1.4. Işık Altında Bir Güneş Hücresi I-V Eğrisi	10
Şekil 1.5. Gerçek (düz çizgi) ve ideal (kesikli çizgi) güneş hücresi I-V karakteristiği ..	12
Şekil 1.6. Bir güneş hücresinin harici kuantum verimliliği ve ışık enerjisine karşılık gelen kayıplar	14
Şekil 1.7. Güneş hücrelerindeki iç kaynaklı ve dış kaynaklı kayıp türleri	16
Şekil 2.1. Perovskit güneş hücrelerinin 2009- 2023 yılları arasında gelişimi ve kilometre taşları (Xu vd., 2024)	22
Şekil 2.2. 2013-2024 yılları arasında SCI-expanded dergilerde yayınlanan akademik yayın sayısı (Web of Science, 2024)	23
Şekil 2.3. Perovskit yapısı.....	24
Şekil 2.4. Bir Omh-perovskitteki enerji diyagramının şematik gösterimi (a); Omh-PSC'lerdeki ana sürecin şeması (b) (Berhe vd., 2016; Marchioro vd., 2014) ..	26
Şekil 2.5. Perovskit güneş hücresine ait tabakaların enerji seviyeleri ve hücre içindeki yük taşınımı (Marchioro vd., 2014)	27
Şekil 2.6. Tipik SHJ güneş hücrelerinin şematik gösterimiyle birlikte, SHJ'nin tarihsel gelişimi ve bu alandaki önemli kilometre taşları (Ying vd., 2024) ...	37
Şekil 2.7. Dört çeşit tandem güneş hücrelerinin yapısal çizimleri (a) Tünel bağlantılı iki terminalli tandem hücre, (b) Üç terminalli tandem hücre, (c) Dört	

terminalli tandem hücre ve (d) Dört terminalli optik bölme tandem hücre (Leijtens vd., 2018)	38
Şekil 2.8. Son dokuz yıl içinde perovskit/silisyum tandem güneş hücrelerinin şampiyon PCE (güç dönüştürme verimliliği) gelişimi (Ying vd., 2024).	41
Şekil 3.1. Alt hücre c-Si heteroeklem güneş hücrelerinin üretim adımları (a); temizleme işlemi için çeker ocak (b); AK1000 marka modellen PECVD/PVD sistemi (c); serigrafik baskı (d); fırın (e)	42
Şekil 3.2. Katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si: H tabakaların kaplanması (Seyhan, 2019).....	44
Şekil 3.3. PVD sisteminin şematik gösterimi (a) ve PVD ile arka yüzeyi tamamen gümüş kaplanmış hücre (b) (Seyhan, 2019).	45
Şekil 3.4. 0, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 sccm O ₂ akış hızlarında cam altlık üzerine biriktirilen ITO filmlerinin XRD desenleri (a) ve kristal boyutunun FWHM (rad) ile değişimi (b)	49
Şekil 3.5. ITO için oksijen değişiminde; (a) Geçirgenlik, (b) Bant aralığı, (c) Tabaka direnci ve (d) FOM grafikleri (Kartal vd., 2023)	53
Şekil 3.6. SHJ güneş hücresi üzerinde biriktirilen ITO filmlerinin şematik gösterimi ..	54
Şekil 3.7. 2,5 sccm O ₂ 'de biriktirilen SHJ güneş hücresinin J-V grafiği (a) 5x5 cm ² alanda biriktirilen SHJ güneş hücresi fotoğrafı (b) (Kartal vd., 2023)	55
Şekil 4.1. PGH modülü performans ölçümü için kullanılan alanların tanımı (Dong, vd., 2015).....	58
Şekil 4.2. Alttaşların temizleme aşamaları	59
Şekil 4.3. Sol-jel yöntemiyle kompakt TiO ₂ üretimi	60
Şekil 4.4. Sol-gel yöntemiyle mezoporoz TiO ₂ ETL ince filminin üretilmesi	61
Şekil 4.5. 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm, 3500 rpm ve 4000 rpm'de kaplanan kompakt TiO ₂ 'in ve FTO 'nun XRD sonuçları	64
Şekil 4.6. FTO/Kompakt TiO ₂ üzerine kaplanan Mezoporoz TiO ₂ kaplanan ince filmlerin XRD sonuçları.....	65
Şekil 4.7. c-TiO ₂ profilometre kalınlık ölçümü	66
Şekil 4.8. Mesoporoz TiO ₂ kalınlık değeri	66
Şekil 4.9. Red ve arkadaşlarının ürettiği c-TiO ₂ ince filmde gözlemlenen çatlaklar (Red vd., 2018).....	67
Şekil 4.10. 3500 rpm (a) ve 4000 rpm'de (b) kaplanan c-TiO ₂ 'in SEM sonuçları.....	68
Şekil 4.11. Mp-TiO ₂	68

Şekil 4.12. FTO/c -TiO ₂ /Mp-TiO ₂ yüzey görüntüsü	69
Şekil 4.13. SnO ₂ elektron iletim katmanının XRD sonuçları	69
Şekil 4.14. SnO ₂ elektron iletim katmanının SEM görüntüsü	70
Şekil 4.15. Perovskit tabakasının üretilmesi	71
Şekil 4.16. Perovskit ince filmde sarı faz XRD pikleri	73
Şekil 4.17. İkincil fazın SEM görüntüsü.....	73
Şekil 4.18. İğne delik yapısının oluşması	74
Şekil 4.19. Çubuksu Yapıların SEM görünümü	75
Şekil 4.20. Antisolvent uygulamasını sonucu SEM görüntüleri (a), XRD sonuçları (b), Kalınlık değerinin ölçülmesi (c)	77
Şekil 4.21. Perovskit ince filmler üretilirken sıcaklık optimizasyonu (a) DMF ve perovskite 3000 rpm de 80°C’de, (b) DMF ve perovskite 4000 rpm de 80°C’de, (c) 3000 rpm de perovskite 100°C, (d) 4000 rpm de perovskite 100°C uygulamasının SEM görüntüleri	78
Şekil 4.22. Sıcaklık optimizasyonu ve son adımda antisolvent eklenerek perovskit ince filmin SEM görüntüsü	78
Şekil 4.23. Spiro-OMeTAD ince filminin karakterizasyonu. (a) Spiro-OMeTAD solüsyonu. (b) Spiro-OMeTAD SEM görüntüsü. (c) Spiro-OMeTAD kalınlık ölçümü. (d) Spiro-OMeTAD XRD ölçümü.	80
Şekil 4.24. FTO/c-TiO ₂ / CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x / Spiro- OMeTAD/Ag konfigürasyonlu hücrenin verimi (a), FTO/c-TiO ₂ /mp-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x / Spiro- OMeTAD/Ag konfigürasyonlu hücrenin verimi (b)	81
Şekil 4.25. Perovskit hücrenin üretimi, hücrenin bitmiş hali (a), FE-SEM en kesit görünümü (b), tasarımı (c), I-V karakteristikleri (d)	82
Şekil 5.1. c-Si SHJ/Perovskit tandem hücrenin şematik gösterimi (a); üretim yöntemleri (b); laboratuvar ortamında üretilmiş 5×5 cm ² c-Si SHJ/Perovskit Tandem güneş hücresi (c).....	84
Şekil 5.2. c-Si SHJ/Perovskite tandem güneş hücresi SEM görüntüleri. (a) rastgele piramit yapıları n-tipi c-Si/ perovskit güneş hücresi geniş alan SEM görüntüsü, (b) tandem katmanların ve kalınlıklarının yakın kesit görünümü (sarı daireler iğne deliği, yeşil renkler kalınlıkları göstermektedir), (c) SHJ güneş hücresinin kesiti, (d) üst perovskit hücre yapısı.....	85
Şekil 5.3. 5×5 cm ² VO ₂ kullanılan hücrenin J-V grafiği	86
Şekil 5.4. Cam üzerine kaplanan VO ₂ bant aralığı değeri.....	86

Şekil 5.5. SHJ güneş hücresi ($2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$) (a), SHJ/perovskit tandem güneş hücresi (aktif alan: 1.45 cm^2) (b), ince film renkleri ve biriktirme yöntemleri (c), SHJ/perovskit tandem güneş hücresi eV diyagramı (d)	87
Şekil 5.6. ITO filmlerinin farklı sıcaklıklardaki XRD sonuçları	90
Şekil 5.7. XRD desenlerinden hesaplanan farklı sıcaklıklarda üretilen ITO filmlerinin hesaplanan doku katsayıları (TC).....	91
Şekil 5.8. Farklı sıcaklıklarda PVD sistemi ile cam altlıklar üzerine biriktirilen ITO filmlerinin (ITO-RT, ITO-150, ITO-175, ITO-200 ve ITO-250) dalga boyuna karşı optik geçirgenlik spektrumları	93
Şekil 5.9. Farklı sıcaklıklarda (ITO-RT, ITO-150, ITO-175, ITO-200 ve ITO-250) PVD sistemi ile cam altlıklar üzerine biriktirilen ITO filmlerinin dalga boyuna karşı optik yansımaya spektrumları.....	94
Şekil 5.10. Farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO filmlerinin bant aralığı ölçümü, $h\nu$ ile $(\alpha h\nu)^2$ 'nin grafiği.	95
Şekil 5.11. ITO filmlerinin tabaka direnci, FOM ve öz direnç grafiği	96
Şekil 5.12. Monolitik c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücresinin XRD sonuçları	98
Şekil 5.13. c-Si SHJ/Perovskite tandem güneş hücresi SEM görüntüleri. (a) rastgele piramit yapılı n-tipi c-Si/ perovskit güneş hücresi geniş alan SEM görüntüsü, (b) tandem katmanların ve kalınlıklarının yakın kesit görünümü (sarı daireler iğne deliklerini, yeşil renkler kalınlıkları göstermektedir), (c) SHJ güneş hücresinin kesiti, (d) üst perovskit hücre yapısı	99
Şekil 5.14. c-Si SHJ ve monolitik c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücrelerinin verimliliği	100

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Fırınlama işlemi yapılan fırın (a), 5*5cm ² busbarlı SHJ hücresi (b)	46
Fotoğraf 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar (a) Eldivenli Kabin (Ar Akışlı), (b) Isıtıcı tabla, (c) dönel kaplama.....	97
Fotoğraf 4.2. c-TiO ₂ kaplanan camlar (Damgacı vd., 2023)	61
Fotoğraf 4.3. mp-TiO ₂ kaplanan camlar	61
Fotoğraf 4.4. Sentezlenen SnO ₂	62
Fotoğraf 4.5. UV Lamba.....	63
Fotoğraf 4.6. Perovskit incefilmlerde (a); ikincil faz (sarı faz) (b) geçişi	72
Fotoğraf 5.1. Alt hücre üzerine yapılan gömlekleme (a), homojen maskeleme işlemi (b), alt hücre üzerine tamamlanan tandem güneş hücresi (c)	97

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
a-Si	Amorf silisyum
Au	Altın
CdTe	Kadmiyum tellür
CH(NH ₂) ₂	Formamidinyum
CH ₃ NH ₃	Metilamonyum
CIGS	Bakır indiyum galyum selenyum
CsI	Sezyum iyodür
c-TiO ₂	Kompakt titanyum dioksit
CuI	Bakır iyodür
d	Atomik tabakalar arası mesafe
DMF	Dimetilformamid
e	Elektron
Ec	İletim bandı
Eg	Enerji bant aralığı
eV	Elekton-volt
Ev	Değerlik (valans) bandının en üst düzeyi
Li-TFSI	Li-bis(trifluoromethanesulfonylimide)
MAPbI ₃	Metilamonyum kurşun iyodür
mg	Miligram
mp-TiO ₂	Mezoporoz titanyum dioksit
η	Verim
nm	Nanometre
P ₃ HT	Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)
PbI ₂	Kurşun iyodür
PbS	Kurşun sülfür
PCBM	6,6-fenil C ₆₁ bütirik asit metil ester
PEDOT	PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate))
Si	Silisyum

SnO ₂	Kalay dioksit
TBP	4-tert-butylpyridine
VO ₂	Vanadyum dioksit
W	Watt
λ	Dalgaboyu
Ω	Ohm
μm	Mikrometre

Kısaltmalar	Açıklama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
AM	Hava Kütlesi
BDGH	Boya Duyarlı Güneş Hücresi
BSF	Arka Yüzey Alanı
ETL	Elektron İletim Tabakası
HOMO	En Yüksek Dolu Moleküler Orbital
HTL	Boşluk İletim Tabakası
IPCE	Fotonun Akıma Dönüşüm Verimi
ITO	İndiyum-Katkılı Kalay Oksit
I-V	Akım-Voltaj
J _{max}	Maksimum Akım Yoğunluğu
J _{sc}	Kısa-Devre Akım Yoğunluğu
LED	Işık Yayan Diyot
LUMO	En Düşük Boş Moleküler Orbital
MPP	Maksimum Güç Noktası
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NÖHÜNAM	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PERC	Pasifleştirilmiş Yayıcılı Ve Arka Hücre
PGH	Perovskit Güneş Hücresi
P _{in}	Gelen Işık Şiddetinin Gücü
PL	Fotoluminesans
P _{mak}	Maksimum Güç

PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
RCA	Amerikan Radyo Şirketi
RH	Bağıl Nem
Rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
SHJ	Silisyum Heteroeklem
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
UV-Vis	Mor-Ötesi ve Görünür Bölge
Vapp	Uygulanan Voltaj
Vmax	Maksimum Voltaj
Voc	Açık Devre Voltajı



BÖLÜM I

GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bu artan enerji talebinin karşılanmasında, sınırlı ve sürekli azalan fosil yakıtlar yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, alternatif enerji kaynaklarına yönelmek gereklilik haline gelmiştir. Alternatif enerji kaynakları arasında güneş, rüzgar, biyoenerji, dalga, hidro, jeotermal ve hidrojen enerji türleri bulunmaktadır. Bu kaynaklar arasında en yüksek enerji potansiyeline sahip olanı ise, sınırsız bir enerji kaynağı olan güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için geliştirilen teknolojilerden biri de güneş hücreleridir. Güneş hücreleri, güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren cihazlar olup, sürdürülebilir ve temiz enerji üretimi konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, güneş hücrelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, enerji ihtiyacının karşılanmasında kilit bir öneme sahiptir.

Güneş enerjisinin diğer enerji kaynakları ile yarışabilir duruma gelmesi için oldukça yüksek verimlilik ve düşük maliyet konusundaki problemlerin çözülmesine ihtiyaç vardır. Gerek fotovoltaiik (FV) piyasasının %90' ına sahip olan kristal silisyum (c-Si) tabanlı güneş hücrelerde, gerekse diğer güneş hücre yapılarında hem yüksek verimlilik hem de düşük maliyetli üretim sorunları henüz çözülmüş değildir. Bu noktada son yıllarda umut vaat eden iki çeşit güneş hücre yapısı vardır. Bunlardan ilki Si heteroeklem (SHJ) güneş hücresi, diğeri ise perovskit güneş hücreleridir (PGH). Her iki güneş hücresi yapısında hem daha düşük maliyetli üretim yapmak hem de yüksek verim elde etmek mümkündür. Ayrıca bu yeni nesil güneş hücreleri, geleneksel güneş hücrelerinin üretim maliyetini arttıran yüksek sıcaklık proseslerinden bağımsızdır. Dünya enerji sorununa çözüm bulma noktasında en çok gelecek vaat eden bu yeni nesil güneş hücre teknolojileri çevre dostu, yüksek verimli ve düşük maliyetli perovskit güneş hücreleridir. Elbette, ticarileşme sürecinde kat edilmesi gereken önemli bir mesafe bulunmaktadır. Öte yandan, güneş hücrelerinin yapısının mekanizmasının tam olarak anlaşılması, verimliliklerinin artırılması ve stabilitelerinin sağlanması gibi birçok kritik sorunun da çözülmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, yeni nesil güneş hücreleri olarak bilinen yüksek verimli ve maliyet etkin c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücrelerinin üretim reçetesini geliştirmek için araştırma yapılmıştır. Bu doğrultuda, malzeme özellikleri detaylı bir şekilde araştırılmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca, elde edilen bilgi-birikimi kullanılarak c-Si Heteroeklem/Perovskit tandem güneş hücrelerinin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma hem teorik hem de pratik açıdan önemli katkılar sağlayarak, gelecekteki enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik önemli bir adım atmayı amaçlamaktadır. Tez konusu, alt hücrede düşük sıcaklıklarda c-Si SHJ güneş hücresi geliştirilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi, üst hücrede ise perovskit güneş hücresi üretim reçetesinin geliştirilmesi, ayrıca alt-üst hücrenin monolitik tandem olarak birleştirilerek güneş hücresinin üretilmesi çerçevesinde belirlenmiştir. Böylece ulusal öncelik alanlarımızdan özellikle enerji alanında katma değeri yüksek malzeme ve teknolojilerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Fotovoltaik niş bir teknolojiden küresel bir sektöre dönüşmesiyle düşük maliyetli, kararlı ve yüksek verimli güneş hücresi üretme fırsatı doğurmuştur. Bu tez çalışmasında, Si tabanlı bir yapı üzerine perovskit tabakası uygulanarak tandem güneş hücrelerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Verimlilik teorik verime yaklaştıkça FV teknolojisinin fosil yakıtlara rakip olabilmesi için yeni çözümler aranmaktadır. En umut verici yaklaşım, birçok araştırma laboratuvarında kanıtlanmış olan ve bunların güncel haliyle rapor olarak Amerika'da bulunan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından sunulan verimliliği kanıtlanmış Si güneş hücreleri ile verimliliği son 10 yılda rekora ulaşmış perovskit güneş hücrelerinin birleştirilmesinden oluşan çok eklemli diğer bir adıyla tandem güneş hücrelerini oluşturmaktır.

Tezin genel kapsamı, üniversitemiz Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Laboratuvarı'nda (NÖHÜNAM) yürütülen araştırmalarda, geliştirilen güneş hücresi teknolojilerine entegre edilebilecek nitelikte c-Si heteroeklem ve organik güneş hücrelerinin üretim ve karakterizasyon süreçlerinin incelenmesini içermektedir. Bu çalışmalar, güneş hücresi performansını artırmak ve yenilikçi güneş enerjisi çözümleri geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Büyük ve küçük alanda n-tipi c-Si alttaş üzerine büyütülen katkısız ince film tabakalı heteroeklem yapısında alt

hücre olan c-Si SHJ güneş hücreleri NÖHÜNAM altyapısında bulunan Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD)/ Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ile üretilmiştir. Üst perovskit güneş hücresinin üretimi yine aynı altyapıya ait eldivenli kabin içerisinde inert bir ortamda yapılmıştır. Alt ve üst hücrenin birleşmesi ile oluşan tandem hücre yapısının üretilmesi ve geliştirilmesi de NÖHÜNAM’da yapılmıştır.

Bu tezin amacı doğrultusunda, aşağıda belirtilen adımlar sistematik olarak izlenmiş ve sonuçlara ulaşılmıştır;

Alt c-Si SHJ Hücrenin Geliştirilmesi

- ✓ ITO tabakası için biriktirme sıcaklığı altı farklı sıcaklık değeri (RT, 150°C, 175°C, 200°C, 225°C ve 250°C) ile optimizasyonu
- ✓ c-Si alt tabakalar üzerine indiyum kalay oksit (ITO) filmlerinin biriktirilmesi sırasında oksijen (O₂) akış hızlarının etkisini incelemek

Üst Perovskit Hücrenin Geliştirilmesi

- ✓ Tüm katmanların solüsyon bazlı sentezlenip dönel kaplama yöntemi ile kaplanması
- ✓ ITO/FTO cam alttaşlar üzerine üst hücre yapısının oluşturulması
- ✓ Elektron iletim katmanı (ETL) olarak TiO₂ için c-TiO₂ ve mp- TiO₂ sentezlenmesi kaplanması ve optimizasyonu & SnO₂ elektron taşıma malzemesinin sentezlenmesi ve optimizasyonu
- ✓ Perovskit soğurucu tabakanın 1000,2000,3000,4000 rpm de kaplanarak optimize edilmesi
- ✓ Spiro-OMeTAD boşluk taşıma katmanının (HTL) dinamik ve statik kaplanarak kalınlık optimizasyonunun yapılması

c-Si SHJ/Perovskit Tandem Güneş Hücresinin Geliştirilmesi

- ✓ Tandem hücre üzerinde enkapsülasyon malzemesi olarak ITO oda sıcaklığında PVD ile kaplanmıştır.
- ✓ Düşük sıcaklık uygulaması ile elektron iletim malzemesi olarak SnO₂ kullanılmıştır.
- ✓ Tandem yapıda 5×5 cm² alanda VO₂ PVD ile üretilerek verim artışı gözlenmiştir.
- ✓ Tandem yapıda 2.5×2.5 cm² alanda üretim yapılarak alt ve üst hücrenin optimum şartları kullanılarak verim artışı gözlenmiştir.

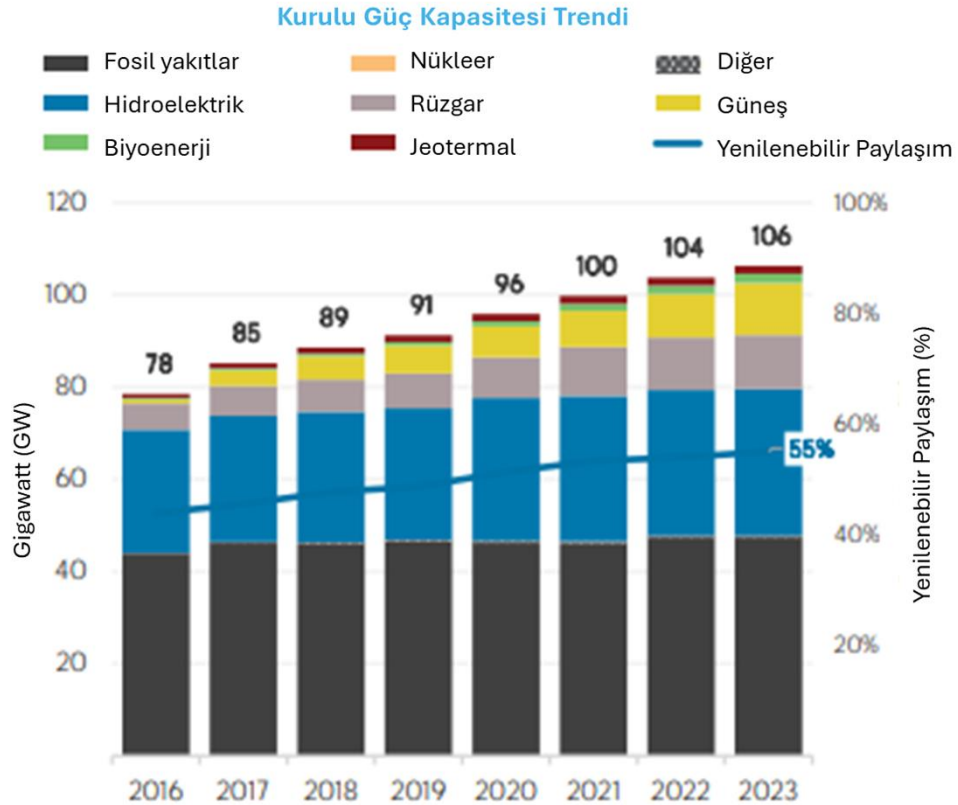
1.2 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisinin potansiyel büyüklüğü, dünya çapında enerji taleplerini karşılamada oldukça umut verici bir çözüm sunmaktadır. Ortalama olarak, güneş ışığından dünya yüzeyine her saat ulaşan enerji miktarının yaklaşık 430 exajoule (EJ) olduğu tahmin edilmektedir. Bu enerji, dünyanın yıllık toplam enerji tüketiminden çok daha fazladır ve güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılması durumunda, küresel enerji sorunlarına kalıcı bir çözüm olabileceğini göstermektedir (Ritchie & Roser, 2022). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan güneş enerjisi, dünya yüzeyine ulaşan yüksek miktardaki güneş radyasyonundan faydalanarak elektrik üretiminde kullanılır. Her gün, dünya yüzeyine yaklaşık 1366 W/m² doğrudan güneş ışını ulaşmakta, bu değer atmosferdeki kayıplar nedeniyle 1000 W/m² düzeyine kadar azalmaktadır (Duffie & Beckman, 2013).

Güneş enerjisinin elektrik üretimindeki rolü, FV güneş enerjisi teknolojileri ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemleri olarak iki farklı şekilde uygulanabilir. Fotovoltaik sistemler, yarı iletken malzemeler aracılığıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken (Green, 1982), yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri, aynalar veya lensler kullanarak güneş ışınlarını bir noktada yoğunlaştırır ve yüksek sıcaklıkta termal enerji üretir; bu enerji, türbinler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür (Zhao vd., 2019). Bu teknolojiler, sürdürülebilir ve temiz enerji üretimi sağlarken, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve karbon emisyonlarını düşürür. Dünya genelinde artan enerji talebi ve iklim değişikliğiyle mücadele çabaları, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır. Böylece, güneş enerjisi

teknolojileri hem ekonomik kalkınmaya katkı sağlamakta hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansının 2023 yılındaki Türkiye raporuna göre; yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel enerji üretimindeki payının sürekli artış gösterdiğini ve fosil yakıtların enerji sektöründeki ağırlığının giderek azaldığını ortaya koymaktadır. 2023 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu kapasitenin %55'ini oluşturması, dünya genelinde enerji dönüşümünün hızlandığını göstermektedir. Bu eğilim hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji güvenliği açısından kritik bir gelişme olarak değerlendirilmelidir. Yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımların ve politika desteklerinin devam etmesi durumunda, bu eğilimin gelecek yıllarda da süreceği öngörülebilir. Şekil 1.1'de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretim kapasitesindeki payının yıllar içerisindeki artışı gösterilmektedir. Bu artış, fosil yakıtların azalması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artması ile birlikte gerçekleşmektedir.



Şekil 1.1. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı raporlarına göre Türkiye'nin Kurulu Güç Kapasitesi Trendi (IRENA, 2023)

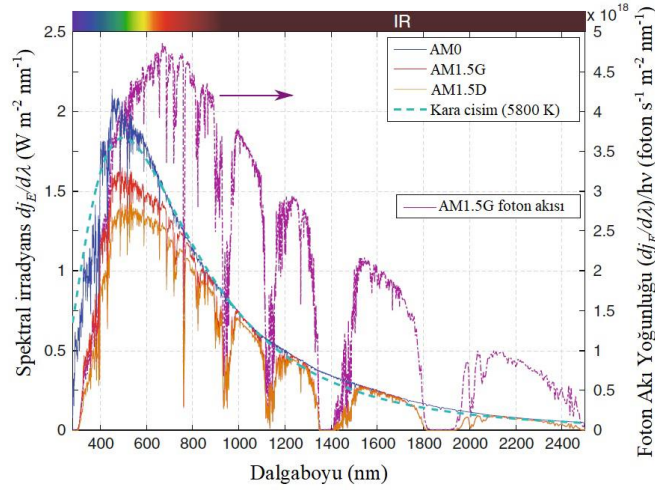
1.3 Fotovoltaik ile İlgili Temel Kavramlar

FV sistemler, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme sürecinde yarı iletken malzemeler aracılığıyla fotoelektrik etkiden yararlanır. Temel kavramlar arasında enerji dönüşüm verimliliği, hücre performansı ve malzeme yapıları yer alır. Bu kavramlar, fotovoltaik sistemlerin verimliliği ve uzun ömürlülüğünü belirleyen ana etmenlerdir.

1.3.1 Güneş ışıınımı

Güneş, yüzeyinde yaklaşık 64 MW/m²'lik enerji üretir ve yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 K civarındadır. Güneşin spektral dağılımı, bir kara cisim spektrumuna benzer şekilde davranır ve bu nedenle geniş bir dalga boyu aralığında enerji yayar. Dünya'ya ulaşan toplam güneş ışıınımı, yaklaşık 1.5 x 10¹¹ metre mesafeden geçerek, atmosferin dış kenarında 1367 W/m² değerine kadar düşer. Bu ışık, atmosferde bulunan çeşitli atomlar ve moleküller tarafından emilir, yansıtılır ve saçılır, bu da yeryüzüne ulaşan ışıınım miktarını etkiler (Ribbing, 2020; Duffie & Beckman, 2013). Yarıiletkenlerin bant aralığından (*E_g*) daha yüksek enerjilere sahip fotonların absorbe edilmesi olasılığı göz önüne alındığında, güneşten gelen termal radyasyonun spektral dağılımının iyi anlaşılması gerekmektedir. Güneş spektrumu, 5800 K sıcaklığındaki bir kara cismin spektral dağılımına benzer bir profile sahiptir (Tress, 2014). Bu dağılım, Şekil 1.2'de gösterilmiştir.

Güneşten gelen ışıınımın spektral dağılımı, %52 oranında kızılötesi (infrared, IR) bölgede, %43 oranında görünür (visible, VR) bölgede ve %5 oranında morötesi (ultraviolet, UV) bölgede yer almaktadır. Bu dağılımların yoğunluğu, güneş ışıınlarının atmosferdeki gazlarla etkileşimi ve izledikleri yol tarafından belirlenir. Bu etkileşim ve yolculuk, güneş spektrumunun atmosferde ve atmosfer dışında farklılık göstermesine neden olur. Bu farklılıkları tanımlamak ve standartlaştırmak amacıyla, güneş ışıınlarının yayıldığı andan yeryüzüne ulaşmaya kadar izlediği yolu ve spektral değişimleri göz önünde bulunduran hava kütlesi (Air mass, AM) kavramı kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. AM0 ve AM1.5G koşullarındaki spektral ışıma, AM1.5G altında foton akısı ve 5800 K sıcaklığındaki bir kara cismin ışıma spektrumları (Tress, 2014).

AM hesaplama formülü, güneşin ufku üzerindeki açısına, yani zenit açısına (θ) dayanır. AM, güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşana kadar kat ettiği mesafenin, atmosferdeki en kısa yoluna (güneş tam tepedeyken) olan oranı olarak tanımlanır:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.1)$$

1.3.2 Güneş hücresinin temelleri

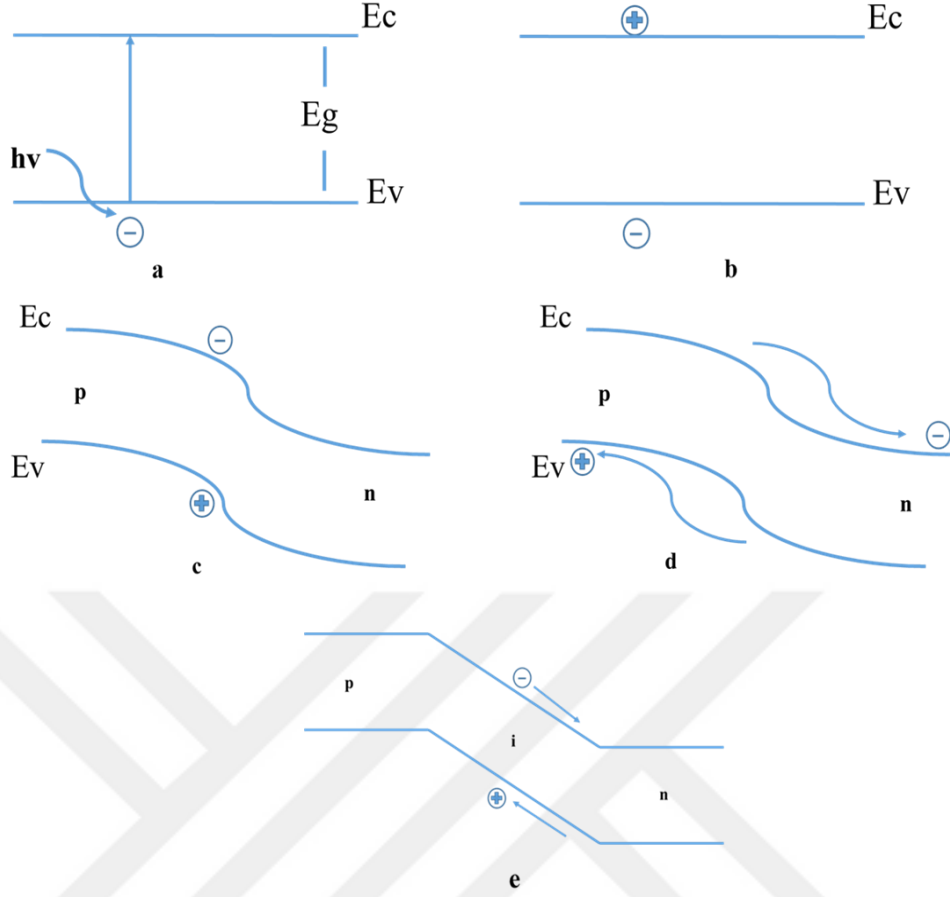
Güneş hücreleri, diyotlara benzer şekilde çalışan elektronik cihazlardır. Gelen ışığı dönüştürerek elektrik üretirler. Çoğu p-n bağlantısı şeklindedir, ancak p-i-n veya Schottky bağlantıları gibi başka türleri de vardır. FV etki, güneş hücresinin işleyişinin temelini oluşturan bir süreçtir ve bu etki, fotonların yarı iletken malzeme üzerine düşmesiyle elektriksel enerjiye dönüşmesini sağlar. Bu süreç, fotoelektrik etki ile yakından ilişkilidir; çünkü her iki etki de fotonların enerji taşıyıcıları olarak elektronları harekete geçirmesine dayanır. Fotoelektrik etkide, metalin enerji bant aralığına eşit veya daha yüksek enerjiye sahip bir foton metal tarafından emilir ve elektronların yayılmasına neden olur. Bu belirli enerji, bir elektronun bir metalden serbest kalması için gereken minimum enerji olup, iş fonksiyonu olarak adlandırılır. Yayılan elektronların kinetik enerjisi ise şu şekilde ifade edilir:

$$K = h\nu - \phi \quad (1.2)$$

Burada h Planck sabiti, ν ışığın frekansı ve ϕ iş fonksiyonudur.

FV etki, yük taşıyıcılarının oluşturulması, ayrıştırılması ve toplanmasına dayanan bir olgudur ve bu süreç üç temel aşamadan oluşur. İlk aşamada, gelen fotonların enerjisi yarıiletken malzeme tarafından soğurulur ve bu soğurma işlemi sonucunda elektron-delik çiftleri (yük taşıyıcıları) üretilir. İkinci aşamada, bu yük taşıyıcıları, p-n birleşimi boyunca oluşan elektriksel alan sayesinde ayrılarak, serbest elektronlar ve delikler olarak birbirinden ayrılır. Son aşamada ise, bu ayrılmış yük taşıyıcıları, devrede akım oluşturarak elektrik enerjisi üretmek amacıyla terminallerde toplanır. Bu süreçlerin her biri, FV hücrelerin verimliliğini belirleyen kritik fiziksel mekanizmalardır.

Soğurma işleminde, malzemenin bant aralığı enerjisine eşit veya daha yüksek bir enerjiye sahip gelen bir foton malzeme tarafından soğurulur. Soğurulan fotonlar elektronu değerlik bandından iletim bandına uyarır. Uyarılmış elektronlar değerlik bandında boşluklar bırakır. Hem elektronlar hem de boşluklar yük taşıyıcılardır ve her ikisi de akıma katkıda bulunur. Akım, üretilen yük taşıyıcılarının miktarına bağlı olduğundan, yansıma önleyici kaplama (ARC) veya arka yansıtıcı gibi foton emilimini artıran teknikler kullanılır. Milisaniyeler içinde, oluşturulan elektronlar, değerlik bandına geri dönerek deliklerle yeniden birleşme eğilimindedir. Bu rekombinasyon, elektrik üretimi gerçekleşmeden önce engellenmelidir. Rekombinasyonu önlemek ve yük taşıyıcılarını etkin bir şekilde ayırmak için p-n bağlantısı kullanılır. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, p-n bağlantısında yer alan yerleşik elektrik alan, yük taşıyıcılarını, yani elektron ve delikleri, yeniden birleşmeden önce birbirinden ayırarak elektrik üretimi için gerekli olan ayrışmayı sağlar. Bu yerleşik elektrik alan, FV hücrelerin verimliliğini korumak ve artırmak için kritik bir rol oynar. Ayrılmanın ardından elektronlar n tarafındaki kontaklar tarafından toplanırken, delikler p tarafındaki kontaklar tarafından toplanır. Cihazı seri olarak bir yüke bağlayarak, foto-üretilen bu akım iş yapmak için kullanılır. İnce film güneş hücreleri gibi belirli uygulamalarda ya da kısa ömürler ve düşük azınlık taşıyıcı difüzyon uzunlukları nedeniyle yük taşıyıcı ayrımının yetersiz kaldığı durumlarda, p-i-n bağlantıları tercih edilebilir. Bununla birlikte, p-i-n yapılarının kullanımı bazı zorlukları da beraberinde getirebilir. Katkısız i-bölgesi, güneş hücresine seri direnç ekleyerek iletkenliğin azalmasına neden olabilir. Ancak, kristal kalitesi açısından kusurlu yapılara sahip güneş hücreleri için p-i-n bağlantıları avantajlı olabilir. Bu p-i-n bağlantısının bant diyagramı ve daha geniş tükenme bölgesi, Şekil 1.3'te detaylandırılmıştır.



Şekil 1.3. Yarı iletkenlerde elektron-boşluk çifti oluşumu ve ayrılması; bir fotonun soğurulması (a), elektronun iletim bandına yükselmesi ve valans bandında bir boşluk bırakması (b), üretilen elektron-boşluk çifti (c), taşıyıcıların elektrik alanı tarafından ayrılması (d), p-i-n bağlantısının bant diyagramı (e)

Güneş hücreleri, fotonların eksik olduğu karanlık koşullarda, temel olarak bir diyot gibi işlev görür. Bu durumda, hücreye herhangi bir enerji uygulanmadığı için fotovoltaik etki meydana gelmez ve cihazın davranışı, klasik bir pn birleşim diyotunununkine benzer. Bu davranış, güneş hücresinin elektriksel özelliklerini açıklamak için Shockley Diyot denklemi ile tanımlanabilir. Shockley Diyot Denklemi, p-n birleşimlerinde akım-gerilim ilişkisini ifade eden temel bir denklem olup, güneş hücrelerinde de geçerlidir. Bu denkleme göre, güneş hücresinin karanlıkta gösterdiği elektriksel yanıt, hücrenin sıcaklığı, malzeme özellikleri ve uygulanan voltaj gibi parametrelere bağlıdır. 1.3 denkleminin formu, hücredeki akımın, voltaj ile üssel bir şekilde arttığını ve ters akımın ihmal edilebilir seviyede olduğunu gösterir. Dolayısıyla, güneş hücresinin karanlık koşullardaki performansını ve diyot özelliklerini anlamak için Shockley Diyot denklemi kritik bir rol oynar. Bu denklemin doğru bir şekilde uygulanması, güneş hücresinin gece

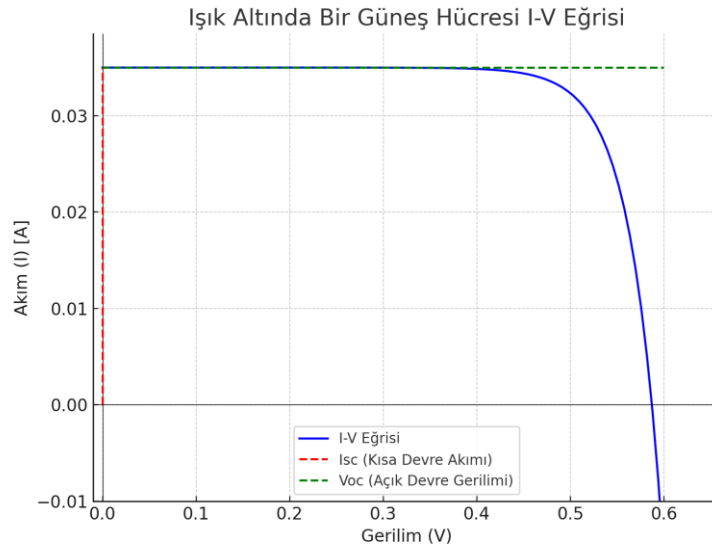
ya da düşük ışık seviyelerinde nasıl davrandığını anlamada önemli bir araçtır. Bu denklem karanlık koşullar altında aşağıdaki gibidir;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1.3)$$

Burada Boltzmann sabiti (k), Kelvin (K) cinsinden mutlak sıcaklık (T), temel yük (q), ışıkla üretilen akım (I_L) ve karanlık doygunluk akımı (I_0). I_0 , hücredeki rekombinasyonu temsil etmekte ve daha yüksek bir I_0 değeri, daha yüksek rekombinasyon oranını göstermektedir. Aydınlatılmış koşullar altında ise bu denklem (1.4) şeklini alır:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - I_L \quad (1.4)$$

Burada I_L , aydınlatma tarafından üretilen akımdır. Aydınlatma altındaki güneş hücrelerinin I-V eğrisi geleneksel olarak Şekil 1.4'teki gibi kullanılır. Güneş hücreleri için diğer temel özellikler bu eğriden türetilir.



Şekil 1.4. Işık Altında Bir Güneş Hücresi I-V Eğrisi

Bu grafik, bir güneş hücresinin ışık altında elde edilen akım-gerilim (I-V) karakteristiğini göstermektedir. Grafikte kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre gerilimi (V_{OC}) gibi önemli parametreler gösterilmiştir.

1.3.3 Kısa devre akımı (I_{SC})

Kısa devre akımı (I_{SC}), bir güneş hücresinin elektrotları arasına herhangi bir dış gerilim uygulanmadığında hücreden geçen akımı ifade eder. Bu durum, sıfır gerilim koşulları altında gerçekleşir ve I_{SC} , $I_L = I_{SC}$ ile gösterilebilir. I_{SC} , bir güneş hücresinin maksimum akım üretim kapasitesini temsil eder ve bu nedenle hücrenin performansını değerlendirmede önemli bir parametredir. I_{SC} , hücre alanı, üzerine düşen ışığın yoğunluğu, hücre malzemesinin optik özellikleri ve yük taşıyıcılarının toplanma etkinliği gibi bir dizi faktörden etkilenir. Bu faktörler, hücrenin verimliliğini doğrudan belirleyerek I_{SC} 'nin değerini şekillendirir.

1.3.4 Açık devre voltajı (V_{OC})

V_{OC} , bir güneş hücresinin elektrotları arasındaki devre açık olduğunda, yani hücreden herhangi bir akım akışı olmadığında ölçülen maksimum gerilimdir. V_{OC} , güneş hücresinin malzeme özellikleri, sıcaklık ve ışık yoğunluğu gibi faktörlerden etkilenir ve hücrenin enerji dönüşüm verimliliğinin önemli bir göstergesidir. V_{OC} , ideal bir diyot denklemi ile ifade edilir:

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.5)$$

Si tabanlı güneş hücreleri tipik olarak 0.6-0.75 V aralığında bir V_{OC} değerine sahiptir. Si hücrelerinin V_{OC} değeri, malzemenin bant aralığı ve taşıyıcı rekombinasyon hızına bağlıdır (Nelson, 2003). Perovskit güneş hücreleri ise geniş bant aralığı ve yüksek ışık emilimi gibi özellikleri sayesinde genellikle 1.0 V veya daha yüksek bir V_{OC} değerine ulaşabilirler. Bu yüksek V_{OC} , perovskit bazlı malzemelerin düşük rekombinasyon hızlarıyla ilişkilidir (Menda vd., 2021). Tandem güneş hücreleri, farklı bant aralıklarına sahip iki veya daha fazla alt hücrenin birleşiminden oluşur. Her alt hücre kendi V_{OC} değerine sahip olup, toplam V_{OC} , bu değerlerin toplamı olarak elde edilir. Örneğin, bir Si ve bir perovskit hücresinden oluşan tandem yapı, 1.6 V veya daha yüksek bir toplam V_{OC} 'ye ulaşabilir, bu da hücrenin genel verimliliğini artırır. Sonuç olarak, Si, perovskit ve tandem güneş hücrelerindeki V_{OC} , malzeme ve yapılandırma özelliklerine bağlı olarak

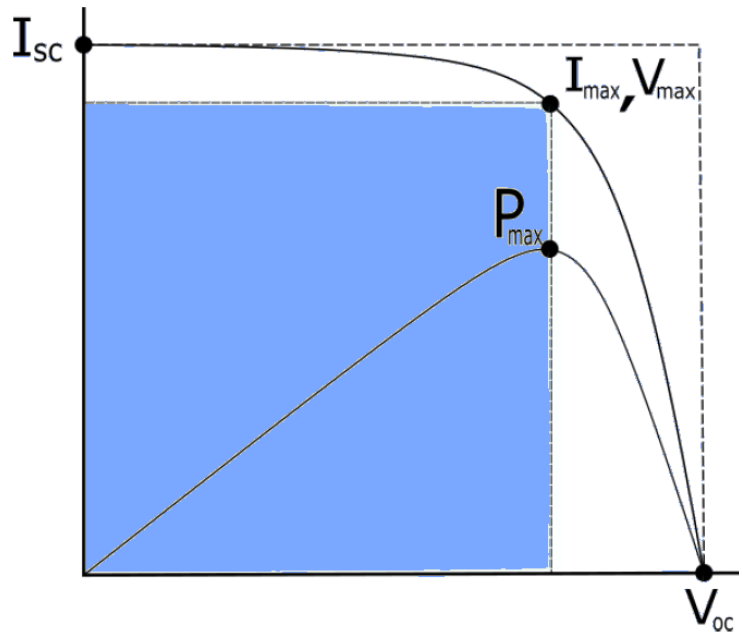
değişiklik gösterir ve hücre performansını belirleyen kritik bir parametredir (Ying vd., 2024).

1.3.5 Doluluk faktörü (FF)

Doluluk faktörü, bir güneş hücresinin üretebileceği maksimum verimi belirleyen parametredir. Bir güneş hücresi tarafından üretilen maksimum güç (P_{maks}) ile (1.6)'de verildiği gibi I_{sc} ve V_{oc} 'un çarpımı arasındaki orandır.

$$FF = \frac{P_{maks}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (1.6)$$

İdeal bir güneş hücresinde FF, teorik olarak 1'e eşit olmalıdır, yani hücre, maksimum güç çıkışına ulaşabilir. Ancak, pratikte çeşitli kayıplar ve hücre içindeki içsel dirençler nedeniyle FF her zaman 1'den küçük olur. Bu kayıplar, elektriksel dirençler, rekombinasyon etkileri ve diğer cihaz içi verimsizlikler gibi faktörlerden kaynaklanır. Bu nedenle, gerçek dünyada kullanılan güneş hücrelerinin doluluk faktörü, ideal değerin altında kalır ve bu durum hücrenin genel verimliliğini sınırlayıcı bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. İdeal bir güneş hücresi I-V eğrisi ile gerçek bir güneş hücresi I-V eğrisinin karşılaştırması Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5. Gerçek (düz çizgi) ve ideal (kesikli çizgi) güneş hücresi I-V karakteristiği

1.3.6 Verimlilik (η)

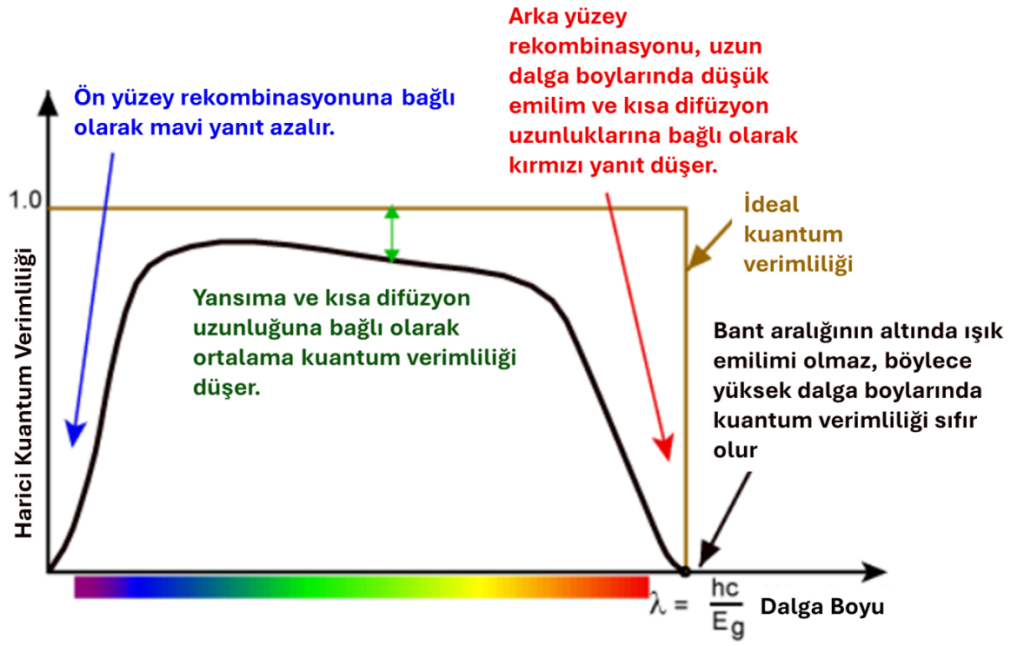
Dönüşüm verimliliği, güneş hücresi tarafından üretilen gücün gelen ışığın güç yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Bir güneş hücresinin dönüşüm verimliliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$\eta = \frac{P_{\text{maks}}}{P_{\text{gelen}}} = \frac{V_{\text{OC}} I_{\text{sc}} FF}{P_{\text{gelen}}} \quad (1.7)$$

Burada, P_{gelen} ışığın güç yoğunluğunu ifade eder ve genellikle standart test koşullarında AM 1.5 spektrumu olarak kabul edilir. AM 1.5 spektrumu, oda sıcaklığında 1000 W/m² güç yoğunluğuna sahip standart bir güneş ışıınımı koşulunu temsil eder.

1.3.7 Harici ve iç kuantum verimliliği

Harici kuantum verimliliği (External Quantum Efficiency (EQE)), bir güneş hücresine gelen fotonların metal kontaklar tarafından toplanan yük taşıyıcılarına dönüşme oranını ifade eder. Bu metrik, bir güneş hücresinin farklı dalga boylarındaki ışığı elektriğe dönüştürme kapasitesini değerlendirir. Yani, EQE, gelen ışığın hücre tarafından ne kadar etkili bir şekilde elektriğe dönüştürüldüğünü ve bu dönüşümde kullanılan fotonların ne kadarının elektriksel akım oluşturan yük taşıyıcılarına dönüştüğünü ortaya koyar. Bu açıdan, EQE bir güneş hücresinin spektral yanıtını ve genel performansını anlamak için kritik bir parametre olarak öne çıkarmaktadır. EQE'nin ideal şekli dikdörtgen olmalıdır; ancak rekombinasyon kayıpları nedeniyle, gerçek şekil daha düşük ve eğrilmiştir. Yüksek enerjili, kısa dalga boyu bölgesinde yüzey rekombinasyonları, düşük enerjili, uzun dalga boyu bölgesinde ise hacimsel (bulk) rekombinasyonları meydana gelir. Bu durum, aşağıdaki Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.6. Bir güneş hücresinin harici kuantum verimliliği ve ışık enerjisine karşılık gelen kayıplar

Bir güneş hücresi, gelen tüm fotonları soğuramaz; bu durum, yansımaya ve ışığın hücre üzerinden geçişi sırasında meydana gelen kayıplardan kaynaklanır. Bu kayıplar, hücrenin yüzeyinde ve iç yapısında gerçekleşir, bu da güneş hücresinin verimliliğini doğrudan etkiler. Gelen fotonların bir kısmı, güneş hücresinin yüzeyinden yansıyarak kaybolur, bir kısmı ise hücre malzemesinden geçip soğurmadan tekrar çevreye yayılır.

Bu kayıpların değerlendirilmesi ve güneş hücresinin performansının daha doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için iç kuantum verimliliği (IQE) kavramı tanımlanır. İç kuantum verimliliği, bir güneş hücresinin soğurduğu fotonlara karşılık toplanan yük taşıyıcılarının oranıdır. Bu, güneş hücresinin aktif bölgesine ulaşan ve orada enerjilerini elektriğe dönüştüren fotonların etkinliğini ölçer.

IQE, harici kuantum verimliliğinden (EQE) farklı olarak, yalnızca soğurulan fotonları dikkate alır; yani yansımaya ve geçiş kayıplarını hesaba katmaz. Bu nedenle, IQE eğrisi, bir güneş hücresinin gerçek performansını daha iyi yansıtır. IQE eğrisinin elde edilmesi, EQE eğrisinden yansımaya ve geçiş kayıplarının çıkarılmasıyla mümkündür. Böylece, güneş hücresinin iç yapısındaki malzeme kalitesi, taşıyıcı toplama etkinliği ve diğer içsel kayıplar daha net bir şekilde analiz edilebilir.

Bu bilimsel yaklaşım, güneş hücresinin optik ve elektriksel özelliklerini ayrıntılı olarak anlamamızı sağlar ve hücre tasarımında yapılabilecek iyileştirmeler için yol gösterici olur. Sonuç olarak, IQE, güneş hücresi teknolojilerinin geliştirilmesinde kritik bir parametre olarak öne çıkar ve hücrelerin etkinliğini optimize etme sürecinde önemli bir rol oynar.

1.4 Bir Güneş Hücresinde Oluşabilecek Kayıplar

Güneş hücresinde oluşabilecek kayıplar, hücrenin verimliliğini etkileyen çeşitli fiziksel ve optik süreçler nedeniyle meydana gelir.

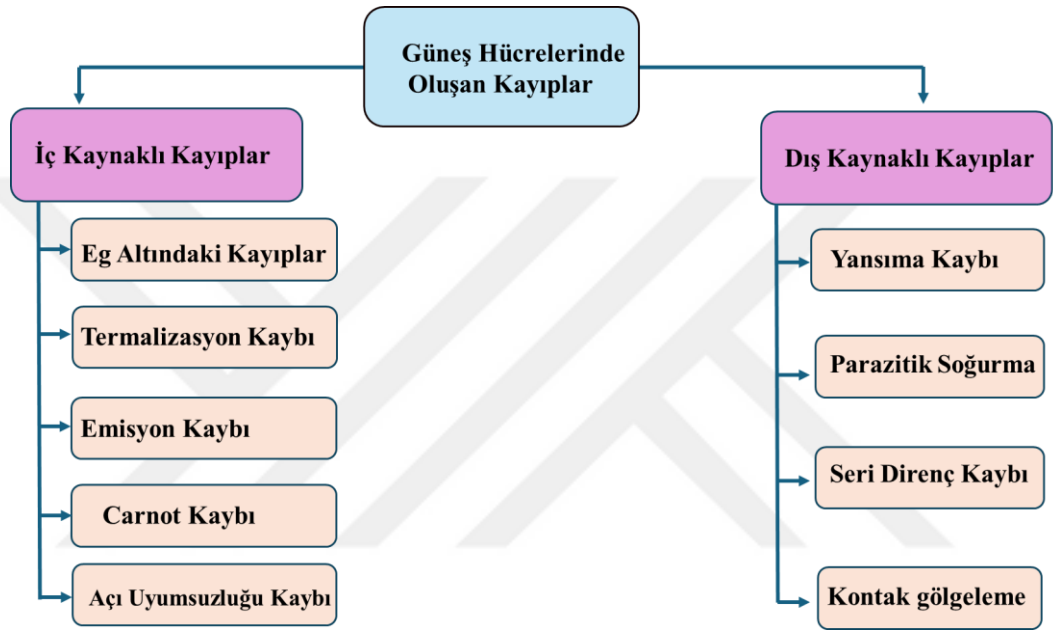
Shockley-Queisser Limiti, tek bir yarıiletken malzeme ile yapılan ideal bir güneş hücresinin, gelen güneş ışığından ne kadar enerji üretebileceğini belirler. Bu limit, hücrenin E_g 'sine bağlıdır ve en iyi koşullar altında bile, bu limitin ötesine geçmek mümkün değildir. Tipik olarak, bu limit yaklaşık %33 ile %34 arasında bir verimliliği işaret eder.

Shockley-Queisser Limitinin Aşılma Yolları:

1. Tandem Güneş Hücreleri: Farklı bant aralıklarına sahip malzemelerin üst üste yerleştirildiği bu hücreler, farklı enerji seviyesindeki fotonları daha verimli bir şekilde kullanabilir.
2. Çoklu Bağlantılı Hücreler: Her biri farklı bant aralığına sahip olan birkaç bağlantı içeren hücreler, daha geniş bir spektrumdaki fotonları elektriğe dönüştürebilir.
3. Kuasi Parçacıklar (Quasi-particles): Eksitonlar gibi kuasi parçacıkların kullanımı, enerjinin daha verimli bir şekilde dönüştürülmesini sağlar.

Shockley-Queisser Limiti, güneş enerjisi teknolojileri için bir yol gösterici olmuş, araştırmacıların daha verimli güneş hücreleri geliştirmesi için sınırları zorlamalarına olanak tanımıştır.

Güneş hücrelerinde meydana gelen kayıplar, fiziksel ve elektriksel süreçlerin bir sonucu olarak ortaya çıkabilir ve bu kayıplar, sistemin genel işlevselliği ve güç dönüşüm verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu kayıplar, güneş hücresinin ışığı soğurması, yük oluşumu, yük toplama ve elektriksel çıktı gibi süreçler sırasında meydana gelebilir. Güneş hücrelerinde iki tür kayıp ayırt edilebilir: içsel (intrinsic) ve dışsal (extrinsic) kayıplar (Hirst ve Ekins-Daukes, 2011). Bu kayıp türleri Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Güneş hücrelerindeki iç kaynaklı ve dış kaynaklı kayıp türleri

Aşağıda bu kayıpları açıklayan alt başlıklar, açıklamalar ve ilgili denklemler sunulmuştur.

1.4.1 İç kaynaklı kayıplar

Güneş hücrelerinde meydana gelen içsel kayıplar, hücrelerin temel malzeme özelliklerinden kaynaklanan ve hücrenin performansını sınırlayan kayıplardır. Bu tür kayıplar, güneş hücresinin verimliliğini sınırlayan temel fiziksel süreçlerle ilişkilidir ve bu kayıpların minimize edilmesi, hücrenin teorik olarak ulaşabileceği maksimum verimliliğe yaklaşmasını sağlar. Çizelge 1.1’de örnek olarak E_g kaybı ve termalizasyon kaybı etkisinin diğerleri arasında önemli olduğu gözlemlenebilir.

Çizelge 1.1. Güneş ışığı altında bir hücre için farklı kayıp mekanizmalarına atfedilen gelen ışığın oranı ($E_g = 1.31$ eV ile)

Mekanizma	Yüzdesi (%)
Güç çıkışı	32,5
Bant aralığı altı (E_g) kaybı	25
Isılaşma kaybı	29,8
Carnot Kaybı	2.2
Boltzmann kaybı	9.3
Emisyon kaybı	1.1

1.4.1.1 E_g kaybının altında oluşan kayıplar

Bant aralığının altındaki enerjilere sahip fotonlar, geniş güneş spektrumu ile tek bir E_g 'nin spesifik enerji soğurma karakteristiği arasındaki uyumsuzluk nedeniyle güneş hücresinde soğurulmadan kalır (Dupré vd., 2016). Gelen fotonların yansıtılamaması ve bant aralığının üzerinde bir elektronu uyarmak için yeterli enerjinin olmaması nedeniyle bu kayıp gerçekleşir. Kafes atomları, serbest taşıyıcılar veya arka metalizasyon, bu fotonların hücreden kaçmasına izin verebilir ya da onları soğurabilir. Fotonlar içeri alınırsa ise enerjileri malzemenin kafes titreşim kuantumları olan fononlara dönüştürülür ve bu da ısı kaynağı olur (Hirst ve Ekins-Daukes, 2011).

1.4.1.2 Isıl kayıplar

Fotovoltaik ekipmanlarda ısı kayıp adı verilen özel bir enerji kaybı türü vardır. Bir güneş hücresinde, yarı iletken bir malzeme ışığı soğurduğunda ekstra enerjiye sahip uyarılmış elektrik taşıyıcıları üretilir. Termal denge dağılımlarına ulaşmak için bu taşıyıcılar bant kenarlarına doğru hızla gevşer ve bu süreçte enerjilerinin bir kısmını kaybederler. Bu süreç çok hızlı bir şekilde, yaklaşık 10-12 saniye içinde gerçekleşir. Ekstra enerji, malzemedeki kafes titreşim kuantumları olan fononlara aktarıldığında ise ısı üretimi gerçekleşir (Sadasivam vd., 2017).

1.4.1.3 Emisyon kayıpları

Kirchoff yasasına göre, ışığı soğuran malzemeler aynı zamanda ışık yaymalıdır ve güneş hücresinden gelen bu emisyon, dönüşüm verimliliğinde bir düşüşe neden olur (Dupré ve ark., 2016). Işıma rekombinasyonu nedeniyle hücre tarafından yayılan fotonların kaybı

emisyon kaybı olarak bilinir. Bu foton emisyonu oranı doğrudan ön gerilim (V) ile ilişkilidir ve Rau'nun karşılıklılık ilkesi kullanılarak belirlenebilir (Wang ve Lundstrom 2013).

1.4.1.4 Carnot kayıpları

Carnot kaybı, termodinamiğin ikinci yasasından kaynaklanan bir verim kısıtlaması olup, güneş hücrelerinin teorik maksimum verimini belirler. Hücre ile çevresindeki ortam arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan, bir güneş hücresinin verimliliği üzerindeki teorik maksimum sınırlamayla ilgilidir. Bu sınırlama, ısı kaynağı ve ısı emici arasındaki sıcaklık kontrastı tarafından belirlenen ve çeşitli ısı motorları için geçerli olan Carnot verimliliğinden kaynaklanmaktadır. Bir güneş hücresi bağlamında, güneş hücresinin kendisi, soğurulan güneş ışığı tarafından ısıtılan ısı kaynağı olarak hizmet ederken, çevredeki ortam daha düşük bir sıcaklıkta ısı emiciyi temsil eder (Dupré ve ark., 2016). Bir sistemin (örneğin bir güneş hücresinin) termodinamik maksimum veriminin şu şekilde hesaplandığını belirtir:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}} \quad (1.8)$$

Burada $T_{\text{çevre}}$; güneş hücresinin çalışma sıcaklığı (RT, 300K), $T_{\text{güneş}}$ ise güneşin yüzey sıcaklığıdır (6000K). Bu denklem, ışığın tam verimle enerjiye dönüştürülemeyeceğini ve bu enerji dönüşümü sırasında önemli ölçüde kayıp olacağını gösterir.

1.4.1.5 Açı uyumsuzluğu kayıpları

Güneş ışığı bir güneş hücresine ideal açıdan farklı bir açıyla çarptığında, açı uyumsuzluğu kaybı olarak bilinen bir voltaj azalması olur. Hava ve güneş hücresinin bulunduğu noktada ışık kırılır ve yansırak bu kayba neden olur.

1.4.2 Güneş hücrelerinde dışsal kayıplar

Güneş hücrelerindeki dışsal kayıplar tipik olarak güneş hücresinin malzeme özellikleri veya altında yatan fiziksel ilkelerle ilgisi olmayan dış güçlere veya koşullara atfedilebilir.

Bu unsurlar arasında kontak gölgelenmesi, parazitik soğurulma, yansıma kaybı ve seri direnç gibi konular yer almaktadır (Abdullah vd., 2016; Hirst ve Ekins-Daukes, 2011). Cihazın verimliliğini büyük ölçüde azaltma potansiyeline sahip olmalarına rağmen, bu kayıplar teorik olarak önlenabilir, dolayısıyla temel sınırlayıcı verimlilik belirlenirken dikkate alınmazlar.

1.4.2.1 Yansıma kayıpları

Cihaz tarafından yansıtılan güneş radyasyonu enerjisinin miktarı, bu kayıp üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir ve bu da güneş hücresinin verimliliğini bir bütün olarak etkiler. Bir Si güneş hücresinin ön yüzeyinden yansıyan ışığın tipik kaybı %30'dur ve bu da cihazın toplam güç dönüşümünün verimliliğini düşürür (Wang vd, 2017).

1.4.2.2 Parazitik absorpsiyon

Parazitik absorpsiyon, verimli yük oluşturma amacı taşımayan bir güneş hücresi içindeki aktif olmayan katmanlar veya malzemelerdeki ışığın absorpsiyonunu ifade eder. Şeffaf iletken katmanlar, kontak katmanları, yansıma önleyici kaplamalar ve pasivasyon katmanlarının tümü parazitik absorpsiyon kayıplarına neden olabilir (Fell vd., 2022). Bu katmanlar güneş hücresinde önemli işlevlere hizmet ederken, aynı zamanda belirli bir seviyeye kadar ışığı absorbe de edebilir ve bu da ışığın elektrik enerjisine dönüşümü için gereken mevcut ışığı azaltabilir. Güneş hücresindeki verimlilik kayıpları, absorbe edilen ışığın yük taşıyıcılarının üretilmesini engelleyen parazitik absorpsiyondan kaynaklanır. Parazitik absorpsiyonun ele alınması ve azaltılması, güneş hücrelerinin genel verimliliğini ve performansını artırmak için gereklidir (Werner vd., 2016a). CO₂ plazma işlemini içeren düşük sıcaklıkta ağartma prosedürü sayesinde, şeffaf elektrot içindeki parazitik absorpsiyon azaltılabilir (Pysch vd., 2007).

1.4.2.3 Seri direnç kayıpları

Seri direnç, güneş hücrelerinde verimliliğin düşmesinde önemli bir faktördür. Akımın yarı iletken malzemeden, iletken katmanlardan ve güneş hücresinin ara bağlantılarından akarken karşılaştığı toplam direnci içerir. Bu direnç, akımı sürmek için mevcut etkin voltajı sınırlayarak güç ve verimlilik kayıplarına neden olur. Yüzey alanı $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$

olan güneş hücreleri 8.2 Amper (A)'e kadar akım üretebilir (Servaites vd., 2010). Güneş hücresinin boyutlarının büyümesi, akım taşıyıcılarının daha uzun olmasına neden olur. Bu durum, daha büyük akımların taşınması ve akım taşıyıcılarının uzunluğu sebebiyle artan seri dirençten dolayı güç kayıplarının artmasına yol açar. Bu nedenle, seri direncin olabildiğince düşük tutulması, güç kayıplarını en aza indirmek açısından büyük önem taşır. Organik FV hücrelerde, aktif katman hareketliliğini artırabilecek yeni aktif katman malzemeleri geliştirilerek seri direnç optimize edilebilir (Gupta vd., 2015).

1.4.2.4 Kontak gölgelemesi

Kontak gölgelemesi, hücre yüzeyinde gölgeler oluşturan ve gelen güneş ışığını engelleyen elektrik kontaklarının veya iletken akım taşıyıcılarının varlığıyla ortaya çıkan bir güneş hücresi olgusudur. Bu gölgeler, aktif FV malzemeye ulaşan ışık miktarını azaltarak yerel güç üretiminde azalmalara ve verimliliğin düşmesine neden olur (Fathi vd., 2017). Ayrıca, metal ızgaranın gölgeleme etkileri nedeniyle FV paneller üzerinde sıcak noktalar oluşur. Bir sıcak nokta ortaya çıktığında, etkilenen bölgedeki sıcaklık hızla artarak termal strese ve potansiyel olarak panel erimesine neden olabilir. Bu durum panele kalıcı olarak zarar verebilir ve genel verimliliğini düşürebilir. Ayrıca, sıcak noktalar panelin çıkış voltajını azaltarak performansını daha da düşürebilir (Sarkın vd., 2020).

BÖLÜM II

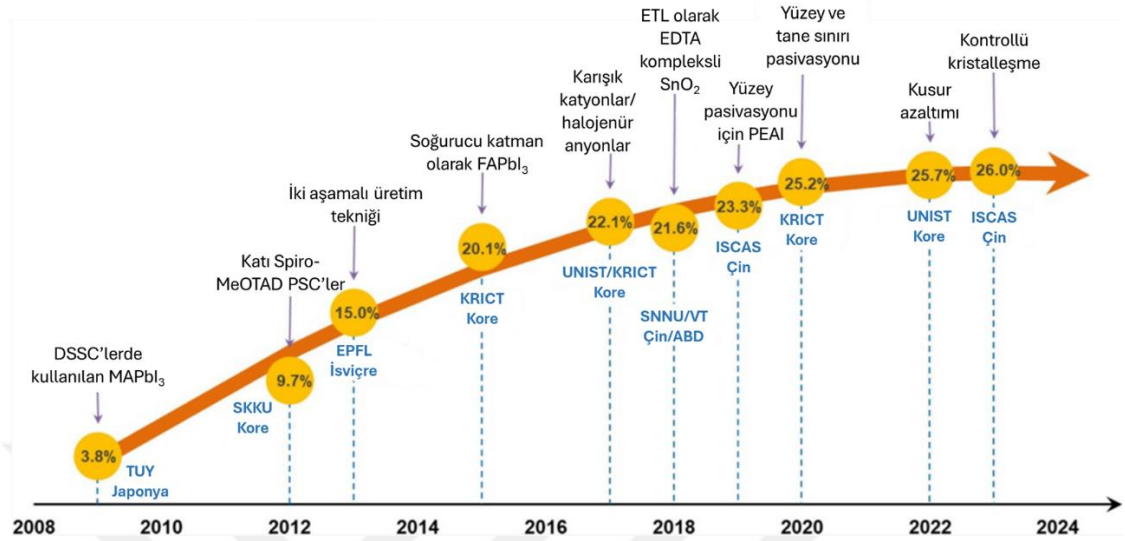
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde tezin üst hücre olarak perovskit güneş hücreleri, alt hücre olan c-Si SHJ güneş hücreleri bu iki hücrenin entegre edilmesiyle elde edilen tandem güneş hücreleri üzerine literatür araştırılması yapılmıştır.

2.1 Perovskit Güneş Hücreleri

Kristal silisyum (c-Si) güneş hücreleri küresel fotovoltaik (FV) pazarına hakimdir ve toplam pazar payının %97'sinden fazlasını temsil etmektedir (Fraunhofer ISE, 2023; IEA, 2023). Ancak son zamanlarda, perovskit güneş hücre (PGH)'lerin ve perovskit/c-Si tandem güneş hücrelerinin geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. PGH'ler perovskit minerali ile aynı bileşime sahip malzemeler verimlilik ve kararlılıkta önemli gelişmeler sergilemiştir. PGH'ler yeni nesil güneş hücreleri olarak büyük bir potansiyele sahiptir ve 2009 ile 2024 yılları arasında kısa bir süre içinde verimlilikte %3,13'ten %26,1'e kayda değer bir artış göstermiştir (NREL, 2024). Araştırmacılar, perovskit güneş hücrelerinin verimliliğini ve kararlılığını artırmak için sürekli olarak yeni malzemeler, üretim yöntemleri ve katman konfigürasyonlarını araştırmaktadır. Halojenür perovskit ailesine ait olan perovskit güneş hücreleri, güneş teknolojisinde yüksek performans ve düşük üretim maliyetleri sunma konusunda önemli bir umut vaat etmektedir. Bu teknolojinin ticarileştirilmesi için gerekli olan geniş ve küçük alanlı perovskit filmleri üretmek için çözelti bazlı ve buhar fazlı kaplama yöntemleri de dahil olmak üzere çeşitli üretim teknikleri geliştirilmiştir (Park vd., 2020). Birçok araştırmacı, PGH yapısını oluşturan şeffaf iletken oksit (TCO) (Wei vd., 2016; Shibayama vd., 2018), elektron transfer katmanı (ETL) (Zhang vd., 2019; Cao vd., 2019; Zong vd., 2022; Damgacı ve Seyhan 2023), boşluk taşıma katmanları (HTL) (Zhou vd., 2020; Du vd., 2021; Cao vd., 2022), perovskit soğurucu katmanları (Jamal vd., 2018; Ma vd., 2023; Zhang vd., 2022) üzerinde çalışmış ve optimize ederek perovskit güneş hücrelerinin yüksek verimliliğini sağlamıştır. Her katman için hibrit veya katkılı malzemeler gibi çeşitli malzemeler kullanılarak hücrenin elektriksel ve optiksel özellikleri geliştirilmiş, bu da kararlılığın ve verimliliğin artmasına yol açmıştır (Lekesi vd., 2022). Tüm bu 2009-2023 yılları arasında

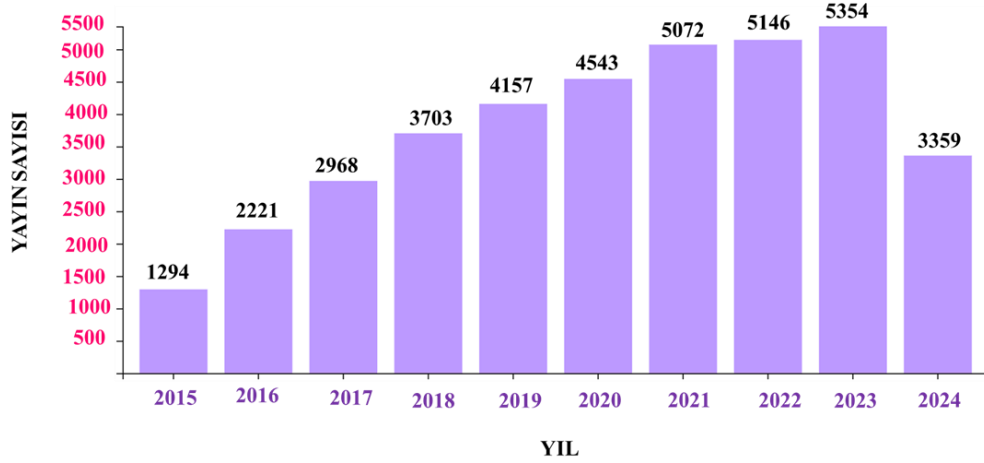
yapılan bir çok çalışma ve gelişmeler Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Xu vd., 2024). Bu verim artışını sağlayan çalışmalar alt başlıklarda detaylıca verilmiştir.



Şekil 2.1. Perovskit güneş hücrelerinin 2009- 2023 yılları arasında gelişimi ve kilometre taşları (Xu vd., 2024)

NREL'in (NREL, 2024) en iyi hücre FV verimliliği tablosuna göre de tek bağlantılı PGH'lerin verimliliği son beş yılda yavaş bir artış göstermiştir, çünkü bu hücreler teorik sınırı yaklaşımaktadır. Tek bağlantılı cihazların Shockley-Queisser sınırını aşmak amacıyla, PGH'ler, Si ve dar bant aralıklı perovskitler gibi diğer FV malzemelerle tandem güneş hücreleri üretmek için hızlı bir ilerleme kaydetmiştir.

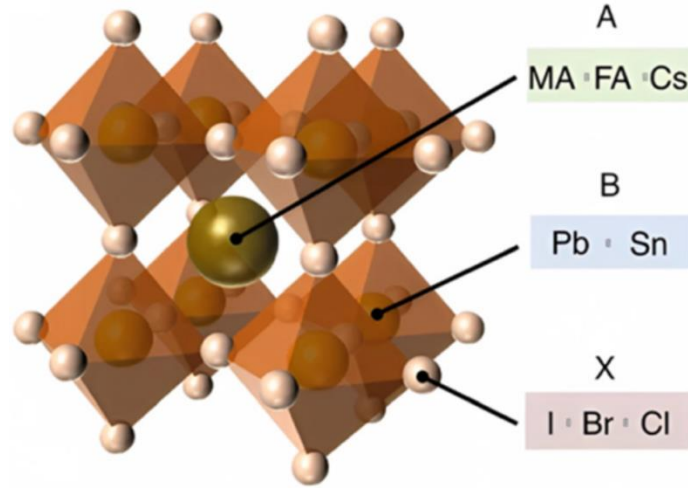
Bu dönemde bilimsel makalelerde de belirgin bir artış yaşanmıştır. SCI-expanded endeksli dergilerde yayınlanan makalelerin sayısı, teknolojik yeniliklerin ve akademik ilginin bir göstergesi olarak öne çıkmaktadır. 2013 yılında sınırlı sayıda olan perovskit güneş hücreleri üzerine makaleler, 2024'e gelindiğinde binlerce akademik çalışmaya dönüşmüştür (Web of Science, 2024). Bu artış, PGH'lerinin teknolojisinin yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, endüstriyel ölçekte de önemli bir ilerleme kaydettiğinin ve geniş bir araştırma camiası tarafından ele alındığının bir göstergesidir. 2013-2024 yılları arasında yıllara göre yapılan makale sayısı Şekil 2.2 'de verilmiştir.



Şekil 2.2. 2013-2024 yılları arasında SCI-expanded dergilerde yayınlanan akademik yayın sayısı (Web of Science, 2024)

2.1.1 Perovskit yapısı ve özellikleri

Dünya'daki su ve oksijenden daha yaygın bir madde olan Perovskit malzemesi 1839 yılında Gustav Rose tarafından Ural Dağları'nda keşfedilmiştir. Adını da Rus mineralist Countr Lev Perovskite'den almıştır (Luxová vd., 2008). Perovskite, genel olarak ABX_3 kimyasal formülüne sahiptir ve doğal olarak oluşan bir mineral olan $CaTiO_3$ olan kalsiyum titanattan türetilir. Perovskit malzemelerinin kristalografik yapısındaki kristal örgü boyutundaki değişimler, özellikle yarıiletken-metal geçiş süreçleri, elektronik özelliklerin önemli ölçüde değişmesine neden olmaktadır. Bu süreçlerin derinlemesine anlaşılması, organik tabanlı tabaka halide perovskitleri elektronik uygulamalar için cazip hale getirmektedir. Bu malzemeler, ayarlanabilir bant aralığı sayesinde, fotovoltailer, LED'ler ve sensör teknolojileri gibi alanlarda yüksek verimlilik ve geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır (Noh vd., 2013; Snaith, 2014). Ayrıca, bu malzemeler düşük maliyetli üretim süreçleriyle elektronik cihazlar için umut vadetmektedir (Kojima vd., 2009).



Şekil 2.3. Perovskit yapısı

Güneş hücrelerinde soğurucu tabaka olarak kullanılan perovskit malzemesi ise ilgili mineral ile aynı yapıya sahip bir bileşiktir. Asıl perovskit minerali CaTiO_3 formunda olup kalsiyum (Ca), titanyum (Ti) ve üç oksijenden (O_3) atomundan oluşmaktadır. Perovskit yapısı ise Şekil 2.3'te gösterildiği gibi ABX_3 (A: organik/inorganik katyon grubu; B: metal katyon grubu; X: tuz elementi). A konumu CH_3NH_3^+ , $\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$ gibi organik ya da Cs^+ , Rb^+ gibi inorganik katyonlar tarafından paylaşılırken; daha küçük B konumu ise çoğunlukla Pb^{+2} (bazen Sn^{+2}) katyonu tarafından işgal edilir. X konumu ise I-, Br ve/veya Cl- tuzları tarafından paylaşılır. Perovskitlerin kristalografik kararlılıkları ve muhtemel yapıları hakkında iki parametreye bağlı olarak çıkarımlar yapılabilir: tolerans faktörü t ve oktahedral faktörü μ . Tolerans faktörü t , A-X mesafesinin B-X mesafesine ideal katı küre içerisinde oranı olarak ifade edilir. Özellikle, Goldschmidt tolerans faktörü, t , her bir iyonun (A, B, X) kimyasal formülüne, sadece ABX_3 'e ve iyonik yarıçaplarına dayanan perovskite yapısının stabilitesini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmıştır (Bartel vd., 2019). Tolerans faktörünü (1.2) denklemi ile ifade edilir;

$$t = \frac{r_A + r_B}{\sqrt{2}(r_B + r_X)} \quad (2.1)$$

Burada, r_A , r_B , r_X sırasıyla belirtilen iyonların iyon yarıçapıdır. Oktahedral faktörü μ ise, r_B/r_X oranıdır. Halojen perovskitler ($X = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) için t ve μ genellikle $0.81 < t < 1.11$ ve $0.44 < \mu < 0.90$ aralıklarındadır. Eğer t değeri 0.89 - 1.0 gibi dar aralıkta olursa kübik yapı olması olasıdır. Eğer t değeri daha düşük olursa daha asimetrik bir tetragonal veya

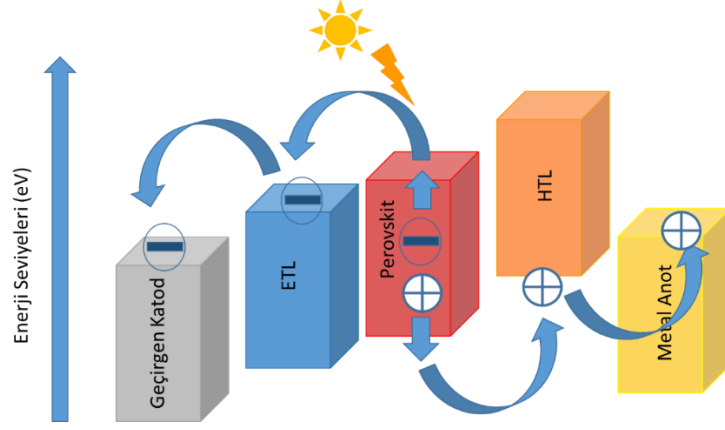
orthorombik yapı ortaya çıkar. Bu kısıtlara rağmen, herhangi bir perovskit yapısının bir başka yapıya dönüşümü ısıtma ile mümkündür; yüksek sıcaklıklarda genellikle kübik yapı ortaya çıkmaktadır.

Perovskit direkt band yapılı bir malzeme olup yüksek soğurum katsayısına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı Si güneş hücrelerinin aksine çok daha ince bir tabaka ile büyük miktarda fotonun soğurulmasına imkan sunmaktadır. Bu da son ürün maliyetini önemli ölçüde düşürmektedir. Perovskit malzemesinin bir diğer önemli avantajı da yüksek taşıyıcı mobilitesi ve uzun difüzyon yoludur (0.1-1.0 μm) (Stranks vd., 2013; Xing vd., 2013). Ayrıca organik güneş hücreleri ve boya duyarlaştırıcı güneş hücrelerinin (BDGH) yirmi yıldan fazla piyasada bulunması ve bu hücrelerinin bilgi literatürü de perovskit güneş hücreleri gelişimine kaynak olmuştur.

2.1.2 Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi

Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi, BDGH'lerinin geliştirilmiş bir yapıya dayanmaktadır. Bu hücreler, iki temel ortam içerir: hassaslaştırıcı (duyarlaştırıcı) katman ve boşluk taşıyıcı katman. Perovskit katmanı, geniş bir ışık spektrumunu soğurma kapasitesine sahip olup, yüksek fotovoltaj verimlilik sağlar. Hücre üzerine düşen fotonlar, elektrik enerjisine dönüştürülme sürecinde aşağıdaki aşamalardan geçer:

1. Fotonun Soğurulması: Perovskit katmanı, fotonlarının soğurur ve bu süreçte enerjiyi perovskit malzemesine transfer eder.
2. Elektron ve Boşluk Çiftlerinin Oluşumu: Soğurulan enerji, perovskit malzemesinde elektron ve boşluk çiftlerini oluşturur. Bu çiftler, enerji transferi için gerekli olan yük taşıyıcılarıdır.
3. Yük Taşıyıcılarının Ayrılması ve Toplanması: Elektronlar, HTL'ye hareket ederken, boşluk perovskit katmanında kalır. Elektronların toplandığı HTL'de bu yük taşıyıcıları elektrik akımına dönüştürülür.
4. Elektrik Akımına Dönüşüm: Elektronlar, dış bir devre aracılığıyla hareket ederken elektrik akımını oluşturur, bu da hücrenin elektrik enerjisi üretmesini sağlar.



Şekil 2.5. Perovskit güneş hücresine ait tabakaların enerji seviyeleri ve hücre içindeki yük taşınımı (Marchioro vd., 2014)

2.1.3 Perovskit güneş hücrelerini oluşturan katmanların özellikleri

Perovskit güneş hücrelerinde kullanılan iletken malzeme kaplı geçirgen alttaşlar, cihazın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genellikle indiyum tin oksit (ITO) ve flor katkılı kalay oksit (FTO) gibi iletken oksitler, bu alttaşlarda kullanılır. ITO, yüksek optik geçirgenlik ve iyi elektriksel iletkenlik özellikleri sunarken, FTO daha düşük maliyetli üretim süreçlerine uygun olmasıyla bilinir. Bu iletken tabakalar, perovskit aktif tabakaya yeterli ışığın ulaşmasını sağlarken aynı zamanda cihazın elektriksel verimliliğini de artırır. Böylece, hücrelerin ışık absorpsiyonunu maksimize ederek elektriksel kayıpları en aza indirirler. Ayrıca, son yıllarda yapılan çalışmalar, bu iletken tabakaların kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama yöntemlerinin, cihaz verimliliği üzerindeki etkisini daha da optimize etmek amacıyla yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (Wang & Zhang, 2021; Chen vd., 2020; Li vd., 2019).

Perovskit soğurucu tabakası ETL ve HTL arasına sıkıştırılır. Perovskit güneş hücresinde, kompakt veya mezogözenekli metal oksitler, ETL olarak kullanılır. ETL malzemesi perovskit malzemesinin enerji seviyelerine uygun seçilmelir. Uygun bir ETL malzemesinin direnci ve absorpsiyon kayıplarını azaltmak için genellikle ince olması gerekir. Ayrıca ETL'ler ve elektrotlar arasındaki temasın iyileştirilmesi ve ETL'ler ile perovskite katmanları arasındaki arayüzlerin değiştirilmesi de önem taşımaktadır. Perovskit güneş hücrelerinde ETL'nin temel amacı ışığı soğuran perovskit katmanından elektronların ekstraksiyon verimliliğini arttırmak ve boşluğu bloke etmek için perovskit katmanı ile elektron seçici bir temas oluşturmaktır. Literatürde perovskit güneş

hücrelerinde TiO_2 , SnO_2 , PCBM, PEDOT: PSS gibi farklı organik ve inorganik (Jung vd., 2015; Chiang and Wu, 2016; Kim vd., 2020) elektron taşıma malzemeleri kullanılmıştır. O'Regan ve Gratzel tarafından BDGH'leri 1991 yılında keşfedilmiştir. Yüksek dielektrik sabite sahip TiO_2 malzemesinin boya ile duyarlaştırılarak foto-anot tabakası olarak kullanıldığı bu hücre türü yapı içerisindeki sıvı elektrolit ve platin tabakasına rağmen düşük üretim maliyeti ve kolay üretim aşamaları nedeniyle ticarileşme olanağı bulmuştur. Son yıllarda yaşanan en heyecan verici gelişme ise yüksek soğurum katsayısı ve geniş bir bölgede soğurum yapabilme kabiliyetine sahip perovskit malzemesinin sıvı elektrolit BDGH'lerinde boya olarak kullanılması olmuştur. Perovskit malzemesinin üstün özellikleri daha sonra katıhal BDGH'lerinde aktif soğurucu tabaka olarak kullanılmış ve PGH olarak tanımladığımız hücre türünün ortaya çıkmasına esin kaynağı olmuştur. BDGH'lerinden sonra TiO_2 , perovskit güneş hücreleri için de metal oksit malzeme (Yang vd., 2016; Saliba vd., 2016) olarak en çok kullanılan yüksek verimlilik sağlayan inorganik elektron transfer tabakasıdır. TiO_2 'in perovskit güneş hücreleri için bir ETL olarak minimum iletim bandının (CBM), MAPbI_3 'den biraz daha yüksek olması (Ogomi vd., 2014) ve TiO_2 'in ultraviyole (UV) ışınlarına hassas olması (Kim vd., 2014) PGH'lerinin ticarileştirilmesi için uygun olmayan bazı sınırlamalar göstermektedir. Bu kusurlarına rağmen TiO_2 , iyi eşleştirilmiş bant hizalaması ve yüksek geçirgenlik özellikleri sayesinde genellikle yüksek verimli perovskit güneş hücreleri için kullanılır. Aynı zamanda TiO_2 'nin mezogözenekli yapısı, gelen fotonların emilimini, foto akım oluşumunu ve hücre verimliliğini artırabilir. TiO_2 'in geniş alanlarda üretilen perovskit güneş hücrelerinde uygulanabilir olması ve perovskit güneş hücrelerinin verimliliğine ve kararlılığına olumlu etkisi bu hücrelerin ticarileşmesi açısından da kolaylık sunmuştur. Literatürde TiO_2 üretimi yaygın olarak iki yöntemle sentezlenir. Bunlardan birincisi TiO_2 'in sol-jel yöntemiyle çözelti halinde hazırlanıp dönel kaplama yöntemiyle üretilmesi diğeri ise; PVD yöntemiyle TiO_2 püskürtme hedefi ile TCO'ların üzerine büyütülmesidir. Çözelti bazlı üretim yöntemiyle düşük sıcaklıkta Kang ve arkadaşları $\text{FTO/TiO}_2/\text{MAPbI}_3/\text{Spiro-OMeTAD}/\text{Au}$ konfigürasyonunda 1cm^2 alanda hücre üretmiş %11.7 verimi elde etmiştir (Gao vd., 2017). Kim ve arkadaşları ise geniş alan uygulamasında TiO_2 üzerine yaptıkları çalışmalarında yüksek sıcaklık 400°C , düşük tavlama işlemleri (Kim vd., 2017) ile verimi %22 verimliliğe ulaşmışlardır. Çözelti bazlı üretimi basit, pratik ve ucuz olsa da TiO_2 daha kararlı ve homojen bir yapıda olması ve daha geniş alanlarda kullanılarak PGH'sinin ticarileşebilmesi için düşük sıcaklıkta argon ortamında PVD ile TCO üzerine büyütülmesi en iyi üretim alternatifidir. Bu yöntem ile

2017 yılında Rajmohan ve arkadaşları orta sıcaklıkta (150°C) TiO₂ ince film tabakayı sentezlemek için reaktif magnetron püskürtme kullanmıştır. Blok tabaka kalınlığının fotovoltaiik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. 76 nm kalınlığında TiO₂ engelleme tabakasına sahip PGH'leri için% 8.7 güç dönüşüm verimi gibi yüksek bir performans elde etmişlerdir (Rajmohan vd., 2017). Aynı yıl içerisinde Im ve arkadaşlarının planar mimarili esnek perovskit güneş hücreleri üzerine yaptıkları çalışmada oda sıcaklığında kontrollü saçtırma yöntemi ile 50 nm kalınlıkta (Mali vd., 2017) TiO₂ üreterek hücre verimini % 15 çıkarmışlardır. Tandem güneş hücrelerinde de yaygın olarak kullanılan TiO₂, % 23.1 verimli Perovskite / Silisyum 4-Terminal Tandem güneş hücrelerinde de TiO₂ Püskürtme yöntemiyle üretilmiştir (Lee vd., 2019).

Yüksek performanslı perovskit güneş hücresi elde etmek için, düşük kusur yoğunluğu olan ve iğne deliği kusuru içermeyen tek tip ve ince bir SnO₂ de bir diğer alternatif ETL malzemesidir. SnO₂, geniş bir optik Eg'ye (3.6–4.0 eV) ve tüm görünür spektrumda yüksek geçirgenliğe sahiptir, bu da ışığın çoğunun geçebileceğini ve perovskit tabakası tarafından absorbe edilebileceğini garanti etmektedir (Das ve Jayaraman, 2014). SnO₂, esnek güneş hücreleri, tandem güneş hücreleri ve büyük ölçekli ticarileştirme ile uyumlu olan düşük sıcaklık yöntemleriyle (<200 ° C) kolayca işlenir. Ayrıca SnO₂, TiO₂'den çok daha yüksek bir elektron hareketliliğine (421.70 cm²/(V·s)) sahiptir ve elektronların verimli taşınmasını sağlar. SnO₂ vakum bazlı ve çözelti bazlı olmak üzere iki farklı yöntem ile üretilir. Literatüre bakıldığında Kam ve arkadaşlarının saçtırma yöntemiyle üretilen SnO₂ ETL üretmiş ve bu katman sert ve esnek yüzeyler üzerinde hava ortamında kararlı ve verimli perovskite güneş pilleri için sağlam elektron taşıma katmanı olarak oda sıcaklığında püskürtmeli TCO üzerine büyütülerek %12.82 verimlilik elde etmişlerdir (Kam vd., 2019). Song ve arkadaşları ise 30 günlük kararlılığa sahip düşük sıcaklıklı kompakt SnO₂ kullanarak SnO₂ ETL bazlı perovskit güneş hücresi performansını % 13'e yükseltmiştir (Song vd., 2015). Toledo ve arkadaşları ise düşük sıcaklıkta PET/ ITO/ SnO₂/ C60 -SAM/ FA0.30MA0.70PbI₃/ Spiro-OMeTAD/ Au konfigürasyonunda PET-ITO üzerine SnO₂ yi büyütürerek % 18.4 verimliliğe ulaşmışlardır (Wang vd., 2017). Tandem güneş hücrelerinde de sıkça kullanılan SnO₂ tabakası, Chen ve arkadaşlarının Perovskit/Silisyum Monolitik Tandem güneş hücresi çalışmasında da ITO üzerine saçtırma yöntemiyle büyütülerek %25.4 verime ulaşmasında önemli bir rol oynamıştır (Chen vd., 2019).

SnO_2 'nin üretim yöntemlerinden diğeri ise çözelti bazlı termal ayrışma yöntemidir. Bu yöntemde termal bozunmalar için, SnCl_2 , SnCl_4 veya bunların hidratları $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ etanol veya diğ solventler içinde çözülür ve öncü çözücüler dönel kaplama yöntemiyle kaplanır ardından ısı tabaka üzerinde tavla işlemi yapılarak SnO_2 yapısı elde edilir (Song vd., 2015; Dong vd., 2015). Bu termal ayrıştırma yöntemini kullanarak, Fang ve çalışma arkadaşları ortalama % 16.02 verimlilik elde etmiştir. Jiang ve arkadaşları, yoğun ve iğne deliği içermeyen SnO_2 filmi elde etmek için ticari SnO_2 kolloidal öncüsünü kullanarak SnO_2 , ITO üzerine döndürülerek kaplanma işlemi ile 150°C 'de son tavlama işlemi yaparak %19.9 verimlilik (Jiang vd., 2016) elde etmiş çalışmalarının devamında PbI_2 'nin yüzey pasivasyon katmanını daha da optimize ederek, sertifikalı verimliliklerini % 21'e çıkarmışlardır (Jiang vd., 2017). Bu tez çalışmasında ETL olarak yüksek taşıyıcı hareketliliğine ve elektronları etkili bir şekilde taşımak için elektriksel iletkenlikli, geniş bant aralıklı ve PGH'lerinde en çok kullanılan TiO_2 ve SnO_2 kullanılmıştır.

PGH'lerin ana katmanı olan perovskit soğurucusu, güneş spektrumunun görünür bölgesinde foto-aktiftir. Perovskiti oluşturan farklı A, B ve X elementleri arasındaki kombinasyon, çeşitli özelliklere ve hücre performanslarına yol açar. PGH'lerde kullanılan perovskit malzemeleri genellikle organik ve inorganik perovskitler olarak iki ana kategoriye ayrılır. Metilamonyum Kurşun İyodür (MAPbI_3), organik perovskitlerin en yaygın örneklerinden biridir ve yaklaşık 1.55 eV bant aralığı değerine sahiptir. Elektron hareketliliği yaklaşık $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, delik hareketliliği ise yaklaşık $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. MAPbI_3 , yüksek verimlilik (~22%) ve iyi optik soğurma özellikleri sunar, ancak nem ve ışığa karşı hassasiyeti nedeniyle stabilite sorunları yaşanabilir (Kojima vd., 2009; Snaith et vd., 2014). Formamidinyum Kurşun İyodür (FAPbI_3), bant aralığı değeri yaklaşık 1.48 eV ile MAPbI_3 'e göre biraz daha geniştir ve elektron hareketliliği yaklaşık $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, boşluk hareketliliği ise yaklaşık $5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. FAPbI_3 , daha yüksek verimlilik (~25%) ve daha iyi termal ve ışık stabilitesi sunmuştur (Snaith vd., 2014). Metilamonyum Kurşun İyodür-Bromür ($\text{MAPb}(\text{I}_x\text{Br}_{1-x})_3$), bant aralığı değerini ~1.55 eV'den ~2.3 eV'ye kadar ayarlama kapasitesine sahiptir ve elektron hareketliliği yaklaşık $12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, boşluk hareketliliği ise yaklaşık $3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. Bu malzeme, ışık ve nem stabilitesi açısından iyileştirilmiş özellikler sunar (Yang vd., 2017; Zhang vd., 2020). Metilamonyum Kurşun İyodür-Klorür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$), bant aralığı değerini yaklaşık 1.55 eV'den 2.0 eV'ye kadar ayarlayabilir ve elektron hareketliliği ~ $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, boşluk hareketliliği ise ~2

cm^2/Vs 'dir. Bu malzeme, bant aralığını ayarlama kapasitesine sahip olup, ışık ve nem stabilitesi sunar (Cheong vd., 2018; Lee vd., 2020). İnorganik perovskit malzemeler arasında CsPbI_3 , yaklaşık 1.73 eV bant aralığı değerine sahip olup, elektron hareketliliği $\sim 15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve boşluk hareketliliği $\sim 4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. CsPbI_3 , iyi optik soğurulucuğu ve daha iyi termal stabilite sunar (Snaith vd., 2016; Zhang vd., 2020). $\text{CsPb}(\text{I}_x\text{Br}_{1-x})_3$ ise bant aralığı değerini $\sim 1.73 \text{ eV}$ 'den $\sim 2.3 \text{ eV}$ 'ye kadar ayarlama kapasitesine sahip olup, elektron hareketliliği $\sim 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve boşluk hareketliliği $\sim 6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. Bu malzeme yüksek verimlilik ve stabilite sunar (Yang vd., 2017; Zhang vd., 2020). Son olarak, MAPbBr_3 malzemesi yaklaşık 2.3 eV E_g değerine sahip olup, elektron hareketliliği $\sim 5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve boşluk hareketliliği $\sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. Bu malzeme, yüksek bant aralığı değeri ve daha iyi ışık ve termal stabilite sunar (Park vd., 2015; Snaith vd., 2016). Literatürde bulunan daha birçok organik-inorganik perovskit çeşitleri bulunmaktadır. Bunların genel özellikleri ve değer aralıkları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Organik ve inorganik perovskit malzemelerin özellikleri ve değerleri (Roy vd., 2020).

Özellikleri	Değer Aralığı
Bant aralığı	1.5-2.5 eV
Soğurma katsayısı	10^5 cm^{-1}
Eksiton bağlama enerjisi	10 meV'den düşük
Kristalizasyon enerji bariyeri	$56.6\text{-}97.3 \text{ kJ mol}^{-1}$
Fotoluminesans kuantum verimi	%70
Yüksek taşıyıcı ömrü	300 nm'den büyük
Eksiton	Wannier tip
Trap-state yoğunluğu	10^{10} cm^{-3} (Tekli kristal) $10^{15}\text{-}10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (Çoklu Kristal)

Boşluk taşıma katmanının kullanımı hücrenin performansını arttırmak için önemli bir parametredir. İyi bir HTL seçmek için önceliğimiz perovskit tabakasından boşluk transferi sağlamasıdır. Perovskit güneş hücresinde kullanılacak ideal bir HTL seçmek istiyorsak bu malzeme sentezlendikten sonra çabuk bozulmaması için kararlı, perovskit tabakanın değerlik bandı ile uyumlu bir uygun HOMO enerji seviyesine sahip, çözünür, kısa devre akımını engellemek ve yük transferini gerçekleştirmek için yüksek boşluk mobiliteli, hidrofobik davranış gösteren, hücrenin ticari boyutta kullanılabilmesi için kolay sentezlenebilen, maliyeti düşük özellikli bir HTL seçilmelidir (Cheong, Impellizzeri, & Fraga, 2018).

Katı haldeki boşluk taşıma malzemelerinin geliştirilmesi (HTM) ilk olarak 1998'de katı haldeki BDGH'leri hakkındaki ilk raporda kaydedilmiştir ve bu rapora göre güneş hücresi verimliliğini % 1 civarındadır (Bach vd., 1998). 2009 yılında üretilen ilk PGH'nin verimi % 3.8 olarak elde edilmiştir (Kojima vd., 2009). Bu çalışmalardan sonra sıvı elektrolitin yerine katı spiro-OMeTAD boşluk taşıma malzemesi kullanılmasıyla hem PGH'ne hem verimine hemde kararlılığına olumlu katkıları olmuştur. Spiro-OMeTAD molekülleri uzun yıllardır bu uygulama için tercih edilen malzeme olmuştur. Bis (triflorometan) sülfonimid lityum tuzu (LiTFSI) tuzları ve tert-butilpiridin (TBP) ile katkıldığında, elde edilen karışım, perovskit soğurucu ışıkla oluşturulmuş boşlukları verimli bir şekilde çıkarabilir ve bunları toplama elektroduna taşıyabilir.

Literatür göz önüne alınarak yüksek verimli PGH'ler için yaygın olarak kullanılan boşluk taşıma malzemeler p tipi olarak genelde spiro-OMeTAD, PTAA, PEDOT:PSS, P3HT, PCDTBT gibi organik yarıiletkenler yada NiO, CuO, CuI gibi metaloksit yarıiletkenler sıkça kullanılmıştır. En yaygın kullanılan boşluk taşıma malzemesi ise PEDOT:PSS ve spiro-OMeTAD'dir. Ancak kullanılan bu iki taşıma malzeme de katkısız üretildiğinde perovskit güneş hücresi yapısında verim düşüşüne neden olmuştur (Wang vd., 2020; Han vd., 2020). Bu yüzden boşluk taşıma malzemelerinin yanında LiTFSI, tris (2- (1h Pirazol-1-il) -4-tert-butilpiridin) kobalt (III) tri [bis (triflorometan) sülfonimid] (FK209), V₂O₅ (Wang vd., 2019) gibi malzemeler ile katkılanmaları gerekir. Katkı maddeleri, PGH'lerinin performansını iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır; ancak, bu maddelerin hücre stabilitesine ve ömrüne olumsuz etkileri de rapor edilmiştir. Bu olumsuz etkilerin önüne geçmek amacıyla yapılan son araştırmalar, alternatif dopantların kullanımına odaklanmaktadır. Araştırmalar, katkı maddelerinin negatif etkilerini minimize ederek daha işlevsel ve kararlı hücreler üretmeyi hedeflemektedir. Özellikle, PGH'lerinin uzun vadeli stabilite ve güvenilirliklerinin artırılması, enerji üretiminde sürdürülebilirlik sağlamak adına büyük önem taşımaktadır. Sahli ve arkadaşlarının %25.2 verimlilikli tamamı desenlendirilmiş Monolitik Perovskit/Silisyum Tandem güneş hücreleri çalışmasında da HTL Spiro- TTB olarak ısı buharlaştırma yöntemiyle ITO'nu üzerine kaplanmıştır. Film düzensizliklerini minimize etmenin hayati gerekliliğini vurgulayan Spiro-TTB, silisyum ile yüzey gerilimi uyumsuzluğunu en aza indirmesinden yararlanarak tünelleme bağlantılarıyla tutarlı bir şekilde entegre edilmiştir (Sahli vd., 2018).

PGH'lerinde metal kontaklar, hücrenin verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü etkileyen kritik bileşenlerdir. PGH'lerinde arka kontakta kullanılan en yaygın metaller yüksek iletkenlik ve yüksek yansıtıcılık sunan altın (Au) ve gümüşdür (Ag). Bunun yanında karbon malzemeler ise su itici tabakaları nedeniyle hücrelerin stabilitesini artırarak metallerin yerine geçme potansiyelini yükseltir (Zhang, 2015). Perovskit tandem güneş hücrelerinde, metal kontakların seçimi hem üst perovskit katmanı hem de alttaki Si veya diğer yarı iletken katmanlarla uyumlu olmalıdır. Bu tür hücrelerde kullanılan metal kontaklar, yüksek iletkenlik ve uzun ömürlülük sağlamalıdır. Au ve Ag genellikle yüksek performanslı tandem hücrelerde tercih edilse de, maliyet ve üretim zorlukları göz önüne alındığında, nikel (Ni) ve bakır (Cu) gibi alternatifler de araştırılmaktadır (Cheong vd., 2018; Zhang vd., 2020).

2.1.4 Perovskit güneş hücrelerinin teknolojik ilerlemesi

PGH'lerinin teknolojik gelişiminde Çin, Birleşik Krallık, ABD, Güney Kore, Almanya ve Japonya gibi ülkeler öncü rol oynamaktadır. Çin, büyük ölçekli üretim kapasitesi ve ticari uygulamalarda lider konumdayken; Birleşik Krallık ve ABD, perovskitlerin keşfi ve temel araştırmalarda önemli katkılar sunmaktadır. Güney Kore, Almanya ve Japonya ise ileri malzeme teknolojileri ve verimlilik artırıcı yeniliklerle PSC teknolojisinin gelişimine destek sağlamaktadır. Bu ülkelerin bilimsel araştırma ve endüstriyel iş birlikleri, PGH'lerin ticari üretim ve uygulamalarında büyük önem taşımaktadır (Zhou vd., 2022; Smith & Johnson, 2023).

Mevcut durumda, Çin başta olmak üzere çeşitli ülkelerdeki FV şirketleri, büyük ölçekli PGH modüllerinin üretiminde önemli ilerlemeler kaydetmek amacıyla yoğun çaba sarf etmektedir. Çin menşeli Microquanta Semiconductor tarafından 2022 yılının başlarında faaliyete geçirilen 100 MW kapasiteli perovskit üretim hattı, dünyanın ilk ticari perovskit α modülleri grubunu başarılı bir şekilde teslim etmiştir (Microquanta Semiconductor, 2022). Şirket, dünyadaki ilk perovskit fish-light tamamlayıcı enerji santralinin, ilk ticari perovskit çatı enerji santralinin başarılı bir şekilde devreye alınmasından kısa bir süre sonra şebekeye bağlandığını duyurmuştur (Microquanta Semiconductor, 2023). Yine Çin'den Golden Concord Holdings Limited şirketi, 100 MW kapasiteli perovskit üretim hattı ile dikkat çekici bir gelişme kaydetmiştir. Bu üretim hattında üretilen perovskit bileşenlerinin verimliliği, %16 seviyesini aşmıştır. Şirketin hedefleri doğrultusunda, bu

verimlilik oranının 2023 yılı sonuna kadar %18'i geçmesi idi (GCL, 2023). Bu ilerleme, perovskit güneş hücrelerinin ticari uygulanabilirliği ve rekabetçiliği açısından önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Verimlilikteki bu artış, sadece enerji üretiminde maliyet etkinliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir enerji çözümlerinin geniş çapta uygulanabilmesi adına da kritik bir rol oynamaktadır. UtmoLight (Çin), 2024 yılına kadar tamamlanması planlanan, 3 milyar Renminbi (RMB) yatırım değeriyle dünyanın en büyük 1 GW kapasiteli perovskit FV üretim hattını ve 100 ton kapasiteli perovskit kuantum nokta üretim hattını Wuxi'de inşa etmektedir (UtmoLight, 2024).

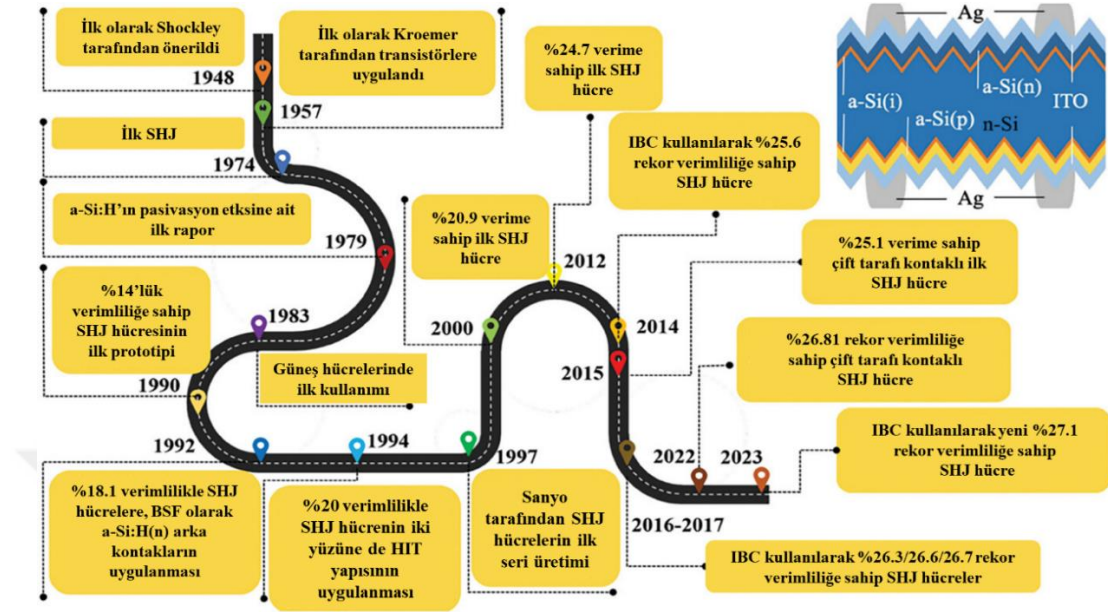
Perovskit-Si tandem güneş hücrelerinde öncü olan Oxford PV (Birleşik Krallık), Almanya'da perovskit-Si tandem güneş pilleri için dünyanın ilk 100 MW kapasiteli üretim hattını inşa etmeyi tamamlamıştır ve bu hattın faaliyete geçmesi planlanmaktadır. Bu gelişme, tandem güneş hücrelerinin ticari olarak geniş ölçekte üretilmesi yolunda önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle, perovskit ve Si'nin birleştirilmesiyle elde edilen daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği, bu teknolojinin güneş enerjisi pazarında rekabet gücünü artıracak önemli bir yenilik olarak kabul edilmiştir. Mayıs 2023'te Birleşik Krallık Oxford PV, ticari boyuttaki 'M4' (258 cm²) perovskit-Si tandem güneş hücrelerinde %28,6 verimlilik ile yeni bir dünya rekoru açıkladı (Oxford PV, 2023). Bu hücre, iki terminalli bir perovskit-Si tandem cihazıdır. Şirket, bu teknolojiyi %30'un üzerinde verimlilik hedefiyle geliştirmek için net bir yol haritasına sahiptir. ABD'de bulunan Tandem PV de perovskitleri kullanarak silisyum bazlı güneş hücrelerinin performansını artırmayı taahhüt etmektedir, ancak bu konuda mekanik olarak üst üste yerleştirilmiş perovskit-Si tandem güneş panellerine odaklanmaktadır. Tandem PV, ticari standartlara uygun tandem panellerin üretimini hızlandırmak amacıyla birkaç milyon dolar kaynak sağlamıştır (Tandem PV, 2022). Tüm bu gelişmeler Şekil 2.1'de de gösterilmiştir. Bu gelişmeler, PGH'lerinin gelecekteki enerji pazarında önemli bir rol oynayacağını ve sürdürülebilir enerji geçişinin hızlanmasına katkı sağlayacağını göstermektedir. Ayrıca, bu teknolojilerin ilerlemesi, hem araştırma ve geliştirme alanında yenilikçi çözümler sunacak hem de enerji üretiminde daha geniş ve erişilebilir çözümler sağlayarak küresel enerji stratejilerinde önemli bir değişim yaratacaktır.

2.2 c-Si Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Tarihçesi ve Gelişimi

Si tabanlı güneş hücrelerinde en yüksek fotovoltaiik dönüşüm verimliliğine ulaşan güneş hücresi teknolojisi SHJ güneş hücreleridir. Homoeklem sınırlamasının üstesinden gelmenin bir yolu olarak, elektronik cihazlar için heteroeklem ilk uygulaması 1948 yılında Shockley tarafından önerilmiştir (Shockley, 1949). Heteroeklem konseptini güneş hücrelerine uygulama fikri, 1957'de Kroemer tarafından kapsamlı bir şekilde tartışılan ve daha sonra “yüksek hızlı ve opto-elektronikte kullanılan yarı iletken heteroyapıları geliştirdiği için 2000 Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülen Shockley'in heteroeklem transistöründen ilham almaktadır (Kroemer, 1957 ve Nobel, 2000). a-Si (amorfl silisyum) ve mc-Si (multikristalin silisyum) arasında oluşturulan SHJ'nin öncü çalışmaları 1974 yılında Fuhs ve arkadaşları tarafından başlatılmıştır (Fuhs vd., 1974). 1979 yılında Pankove ve arkadaşları a-Si:H'nin mc-Si üzerindeki yüzey pasivasyon etkisine ilişkin ilk raporu yayınlamış (Pankove vd., 1979) ve a-Si:H pasivasyonlu bağlantı noktasının kaçak akımının SiO_x pasivasyonlu bağlantı noktasından iki kat daha düşük olduğunu keşfetmişlerdir. Daha sonra, Okuda ve arkadaşları 1983 yılında emitör oluşumu için bir SHJ içeren ilk güneş hücresini (a-Si:H/poli-Si tandem güneş hücreleri) rapor ettiler (Okuda vd., 1983). Bu çalışma, Sanyo şirketine (2010 yılında Panasonic tarafından satın alındı) 1990 yılında düşük sıcaklıkta işlenmiş a-Si:H katmanını ucuz substratlar üzerindeki ince film poli-Si güneş hücrelerine dahil etme motivasyonunu vermiştir (Taguchi, 1990). Bu a-Si:H/poly-Si birleşiminin özelliklerini incelemek için, a-Si:H(p) (p-tipi a-Si) yayıcıyı doğrudan normal bir n-Si alttaş plakası üzerine de yerleştirmiş ve %12'ye yakın bir PCE elde etmişlerdir. a-Si:H (p) yayıcı ile n-Si alttaş plakası arasına a-Si:H (i) pasifleştirme katmanını daha fazla yerleştirerek, SHJ güneş hücresi ile heteroeklem olarak da bilinen SHJ güneş hücresinin ilk prototipi %14,5'e varan bir PCE elde etti. Bunu takiben, 1992'de, ışık yakalama için çift taraflı dokulu Si alttaşlar kullanarak ve BSF olarak a-Si:H (n) arka kontaktları uygulayarak SHJ güneş hücrelerinin PCE'sini %18,1'e çıkarmaya devam ettiler (Tanaka vd., 1992). 1994 yılında, her iki tarafta SHJ yapısı ve arka elektrot olarak yüksek oranda yansıtıcı bir metal kullanılarak, ortaya çıkan SHJ güneş hücresinin PCE'si %20'e yükseltilmiştir (Sawada vd., 1994). Bu umut verici sonuçların ardından, Sanyo Ekim 1997'de SHJ güneş hücrelerinin seri üretimine başlamıştır (Taguchi vd., 2000). SHJ yapısının sonraki on yıl içinde optimizasyonu, 2000 yılında %20,9 olan verimliliğin 2012 yılında %24,7'ye yükselmesiyle sonuçlanmış (Sakata vd., 2000; Green vd., 2002; Taguchi vd., 2005;

Tsunomura vd., 2009; Green vd., 2012, Taguchi vd., 2014) geleneksel dopant dağılımlı homoeklem teknolojileri ile rekabet edebilirliğini göstermiştir. Aynı şirket 2014 yılında, ön yüzeydeki metal ızgara gölgelemesini tamamen ortadan kaldırmak için SunPower şirketinin öncülük ettiği SHJ ile IBC (SHJ-IBC) kombinasyonu sayesinde %25,6'lık dünya rekoru PCE'ye ulaşarak önemli bir kilometre taşına imza atmıştır (Masuko vd., 2014). Sanyo'nun SHJ patentinin 2010 yılında sona ermesinin ardından, daha fazla şirketin kademeli olarak SHJ güneş hücrelerinin geliştirilmesi ve üretimine girmiştir. 2015 yılında, TCO'lar ve silisyum ince filmler alanında güçlü bir geçmişe sahip olan KANEKA şirketi, çift tarafı kontaklı SHJ güneş hücrelerinde %25,1'lik rekor bir enerji dönüşüm verimliliği (PCE) elde etmiştir (Adachi vd., 2015). Bu başarı, PERX güneş hücrelerinin o zamana kadar ulaştığı en yüksek PCE'yi aşarken, aynı zamanda o dönemin çift tarafı kontaklı silisyum homoeklem (TOPCon, laboratuvar ölçeğinde) güneş hücrelerinin en iyi PCE'si ile de eşdeğer bir performans sergilemiştir (Green vd., 2016). SHJ-IBC hücre mimarisine geçtikten sonra, Temmuz 2016'dan Mart 2017'ye kadar bir yıldan kısa bir süre içinde sürekli olarak %26,3 (Yoshikawa vd., 2017a), %26,6 (Yoshikawa vd., 2017b) ve %26,7 (Green vd., 2017) gibi dünya rekoru PCE'ler elde ettiler. Bugüne kadar, tek eklemlili bir silisyum güneş hücresi için bildirilen en yüksek PCE, Ekim 2022'de LONGi şirketi tarafından özellikle her iki tarafı temaslı SHJ güneş pilleri kullanılarak elde edilen %26,81'e ulaşmıştır (Lin vd., 2023). Hücre, 751 mV gibi etkileyici V_{oc} ve %86,07 gibi FF değerine sahipti; her iki değer de teorik sınırlarına yaklaşıyordu (Richter vd., 2013). Bu durum, SHJ teknolojisinin sahip olduğu önemli potansiyeli açıkça ortaya koymaktaydı. SHJ'nin kanıtlanmış faydalarına rağmen, geleneksel üretim süreciyle düşük uyumluluk ve düşük sıcaklıklı Ag pastaları, yüksek kaliteli silisyum alttaşlar ve ITO gibi pahalı malzemeler gerektirmesi nedeniyle üretim maliyetleri hala Si homoeklem güneş hücrelerinden daha yüksektir. SHJ güneş hücreleri, yüksek performans elde etmek amacıyla her iki yüzeyde de yaklaşık 80-100 nm kalınlığında bir ITO katmanına ihtiyaç duyar. ITO, hücrelerin optik ve elektriksel özelliklerini iyileştirirken, özellikle ışık geçirgenliğini artırarak ön temas direncini düşürür. Ancak, bu süreçte indiyum gibi nadir bulunan ve maliyetli bir malzeme tüketimi söz konusudur. Literatürde, %25,11'lik bir cihaz PCE'si elde edilen SHJ güneş hücrelerinde yaklaşık $4,2 \text{ mgW}^{-1}$ oranında indiyum kullanıldığı rapor edilmiştir (Zhang vd., 2021). Bu durum, yüksek verimlilikle birlikte malzeme tüketimi ve sürdürülebilirlik arasında bir denge sağlama gerekliliğini vurgulamaktadır. SHJ güneş hücrelerinin tarihsel

süreci ve bu alandaki önemli dönüm noktaları, kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve Şekil 2.6 ile desteklenerek sunulmuştur.



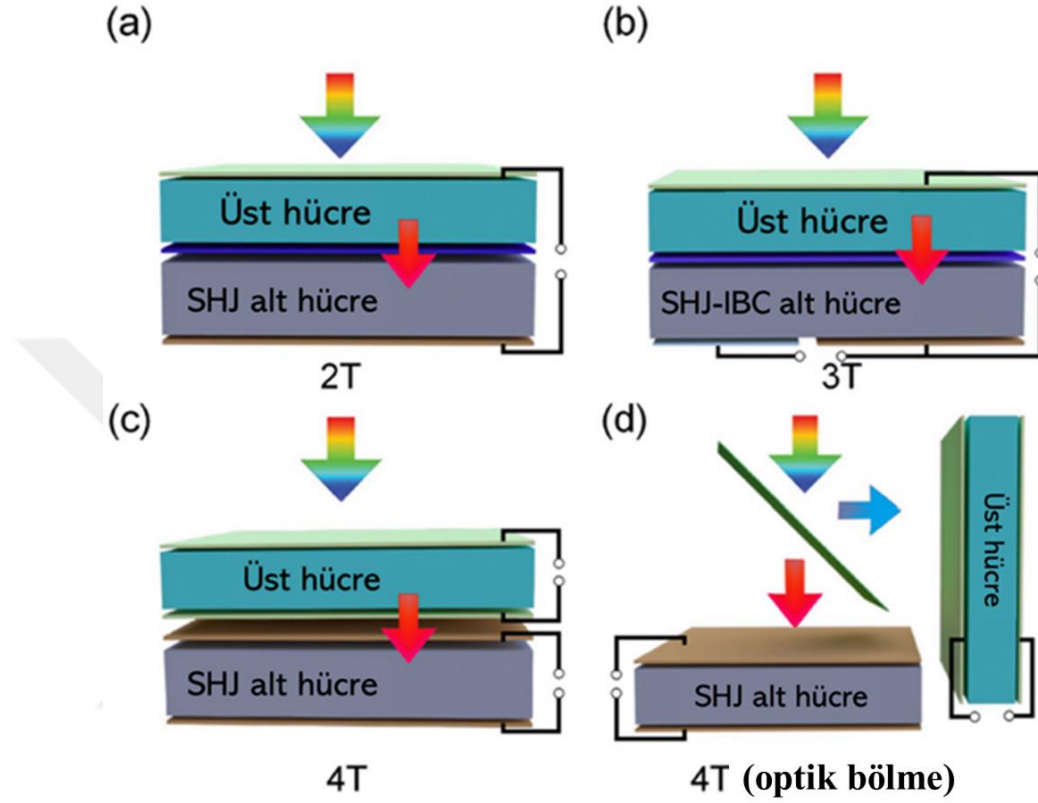
Şekil 2.6. Tipik SHJ güneş hücrelerinin şematik gösterimiyle birlikte, SHJ'nin tarihsel gelişimi ve bu alandaki önemli kilometre taşları (Ying vd., 2024)

Son zamanlarda yapılan çalışmalardan biri olan, 2023 yılında Li ve arkadaşları nc-Si:H katmanlarına oksijen ekleyerek nano-kristalin Si oksit tabanlı bir tünel bağlantısı geliştirmiştir. Biriktirme prosedürü sırasında CO₂ ve doping gazının akış oranını ayarlayarak, optimize edilmiş nc-SiO_x: H(p⁺ / n⁺) tünel bağlantısının optik performansı, elektrik performansından ödün vermeden önemli ölçüde iyileştirilmiş ve sonuç olarak sırasıyla 0.5091 ve 12.5 cm² açıklık alanlarına sahip perovskit / SHJ tandem güneş hücreleri için % 27.16 ve % 23.39 verimlilik elde edilmiştir (Li vd., 2023).

2.3 Tandem Güneş Hücreleri

Tandem güneş hücreleri birden çok aktif katmana sahiptir. Her katmanı farklı dalga boyuna duyarlı olacak şekilde tasarlanarak, elektromanyetik spektrumunun daha geniş kısmından yararlanmayı sağlamak tandem güneş hücresinin amacıdır. Bu sayede tek katmanlı bir güneş hücresine göre daha fazla verim elde edilmiş olur. Katmanlar organik, inorganik veya hem organik hem de inorganik (hibrit) olabilir. Paralel ve seri olmak üzere iki farklı biçimde bağlantı yapılabilir.

Tandem yapılarda (çok eklemlı), birden fazla düzenleme yapılabilir; her bir yapının kendine özgü avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Tandem yapılar genel olarak 2 Terminalli (2T), nadir de olsa 3 terminalli (3T) ve 4 terminalli (4T) olmak üzere sınıflandırılır (Leijtens vd., 2018).



Şekil 2.7. Dört çeşit tandem güneş hücrelerinin yapısal çizimleri (a) Tünel bağlantılı iki terminalli tandem hücre, (b) Üç terminalli tandem hücre, (c) Dört terminalli tandem hücre ve (d) Dört terminalli optik bölme tandem hücre (Leijtens vd., 2018)

SHJ-Tandem güneş hücreleri, farklı bant aralıklarına sahip birden fazla alt hücre kullanarak taşıyıcı termalizasyon kayıplarını azaltır. Şekil 2.7, dört farklı SHJ-Tandem Güneş Hücreleri yapısını göstermektedir. Şekil 2.7 (a)'da görüldüğü gibi, iki terminal (2T) cihazlar, iki alt hücreyi bağlamak için tünel birleşimi veya şeffaf iletken malzeme kullanır. 2T cihazlar, modül entegrasyonunda avantajlara sahiptir. Bunun nedeni, 2T cihazların hücreler arasında çok az boşluk bırakarak standart seri veya paralel bağlantılarla entegre edilebilmesidir (Leijtens vd., 2018). Ayrıca, 2T cihazlar, ara elektrodu ortadan kaldırarak parazitik absorpsiyonu azaltır. Şu ana kadar, endüstriyel ölçekte üretilen tüm çoklu eklem güneş hücreleri 2T yapısını kullanmaktadır. Ancak, 2T cihazların üretimi üç ana zorlukla karşı karşıyadır: akım uyumu, yüksek performanslı

rekombinasyon birleşimi ve değişen spektrumlar altında performans kayıpları (Werner vd., 2018). Bu faktörler arasında, tünel birleşimi, alt hücreler arasında düşük elektrik direnci ve yüksek optik geçirgenlik sağlayan bir ara katman oluşturarak yüksek verim elde edilmesinde önemli bir rol oynar. Bu sorunların çözülmesiyle birlikte, 2T cihazların gelecekteki uygulamalar için tercih edileceği öngörülmektedir.

3T Tandem güneş hücreleri literatürde çok sık rastlanmamaktadır. Cihaz yapısı iki terminalli tandem yapısına benzer olup monolitik bir alt ve bir üst hücrenin entegre olması ve bununla birlikte üçüncü bir ara terminal sağlanmıştır. Bu terminal, devreyi akım eşleştirme koşulundan kurtarmak için elektrik bağlantısına bir serbestlik derecesi daha ekler Şekil 2.7 (b). Bu, üst veya alt hücreye eşleşen bir direnç yükü eklenerek yapılabilir. Literatürde perovskite yapısı ile bir örneği olmayıp a-Si (Wang ve Lin 2011) güneş tandem hücresi, polimer ve GaAsP/SiGe (Li vd., 2015) yapısı ile cihaz yapısı mevcuttur. Günümüzde üretilen üç eklemlili yapılarda; GaInP (1.9 eV), GaAs (1.4 eV) ve Ge (0.7 eV) kullanılmaktadır. Şimdiye kadar perovskit hücreleri kullanan 3-T tandeminin bir gösterimi yoktur.

4T konfigürasyonları için iki tipik yapı bulunmaktadır: mekanik olarak yığılmış (Şekil 2.7(c)) ve optik ayırıcı 4T tandem cihazlar (Şekil 2.7(d)). 4T konfigürasyonu, rekombinasyon birleşimi ihtiyacını ortadan kaldırır ve alt hücreler arasında akım uyumu veya işlem uyumluluğu gerektirmez, bu nedenle daha esnek bir seçenek sunar. İki alt hücre optik olarak birbirine bağlıdır ancak elektriksel olarak bağımsızdır. Her bir alt hücre, üretim yöntemleri ve süreçlerinden bağımsız olarak ayrı ayrı üretilir. Dolayısıyla, her bir alt hücrenin verimliliği maksimuma çıkarılabilir. Bununla birlikte, ara elektrottan kaynaklanan parazitik absorpsiyon ve direnç nedeniyle önemli optik ve elektriksel kayıplar kaçınılmazdır. Ayrıca, bu cihazların üretim zorluğu ve modüllere entegrasyonu, uygulamalarını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, 4T cihazlar günümüze kadar herhangi bir pratik uygulamada kullanılmamıştır.

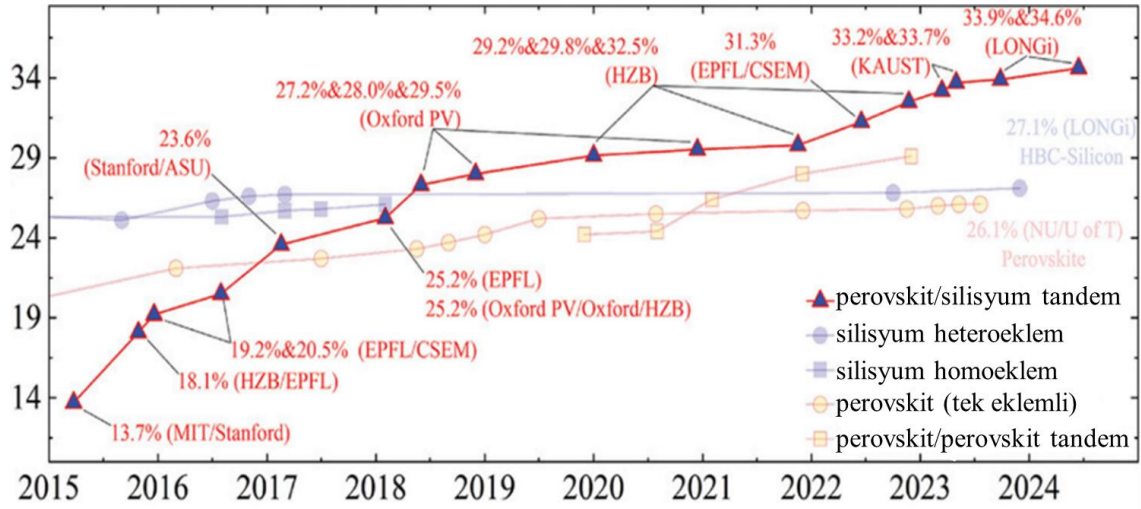
4T SHJ-Perovskit tandem güneş hücreleri, yüksek verimlilikleri ile dikkat çeken ileri teknolojilerden biridir. 4T konfigürasyonu, perovskit ve Si hücrelerinin optik olarak birbirine bağlı olmasına rağmen elektriksel olarak bağımsız çalışmasına olanak tanır. Optiksel olarak, perovskit üst hücre genellikle %90'a kadar ışık geçirgenliği sunar, bu da alttaki Si hücresinin daha geniş bir dalga boyu aralığında fotonları soğurmasını sağlar

(Gao vd., 2022). Elektriksel olarak, bu tür hücrelerde elde edilen güç dönüştürme PCE %30'un üzerinde rapor edilmiştir (Yu vd., 2023). 4T hücrelerin her iki alt hücrelerinin de bağımsız çalışabilmesi, farklı ışık koşullarında verimliliği optimize etme imkânı sunar. Ancak ara katmanlardan kaynaklanan optik kayıplar ve üretim zorlukları, ticari uygulanabilirliği kısıtlamaktadır.

4T tandem hücreler, iki ek şeffaf elektrotun kullanılması nedeniyle önemli optik kayıplara ve iki bağımsız devre gereksinimi nedeniyle ek maliyetlere yol açmaktadır. Bu nedenlerle, 2T tandem yapılar, endüstriyel uygulamalar için daha cazip hale gelmiş ve dolayısıyla bu tez çalışmasının da odak noktası olmuştur.

2.4 Monolitik Perovskit/Silisyum Tandem Güneş Hücrelerinin Yakın Geçmişi

Bu bölümde, sadece dokuz yıl süren araştırma ve geliştirme çalışmalarının sonucunda, monolitik perovskit/silisyum tandem güneş hücrelerinde elde edilen dikkat çekici verimlilik artışı incelenmiştir. Bu süre zarfında, hücre verimliliği %13,7'den %34,6'ya yükselmiştir. Bu gelişmeyi ortaya koyan zaman çizelgesine genel bir bakış sunulmuş, araştırmaların hücre verimliliği üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu kapsamda, literatürdeki güncel çalışmalar ve deneysel bulgular ışığında kaydedilen ilerlemeler detaylı olarak değerlendirilmiş ve tez çalışmasının ana konusu olan Monolitik c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücresinin üretim süreçleri titizlikle gerçekleştirilmiştir. Bu süreçler, hücre verimliliğini artırmaya yönelik geliştirilen yenilikçi tekniklerin uygulanmasını ve sonuçlarının analitik bir yaklaşımla incelenmesini içermektedir. Şekil 2.8, perovskit/Si tandemlerin 9 yıl boyunca kazandığı şampiyon PCE gelişimini göstermektedir (Ying vd., 2024). Karşılaştırma amacıyla, Si ve perovskit tek bağlantılı güneş hücrelerinin yanı sıra perovskit/perovskit tandem güneş hücrelerinin PCE gelişimi de sunulmuştur. Bu şekil, farklı hücre yapılandırmalarındaki verimlilik artışlarının zaman içindeki değişimini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.



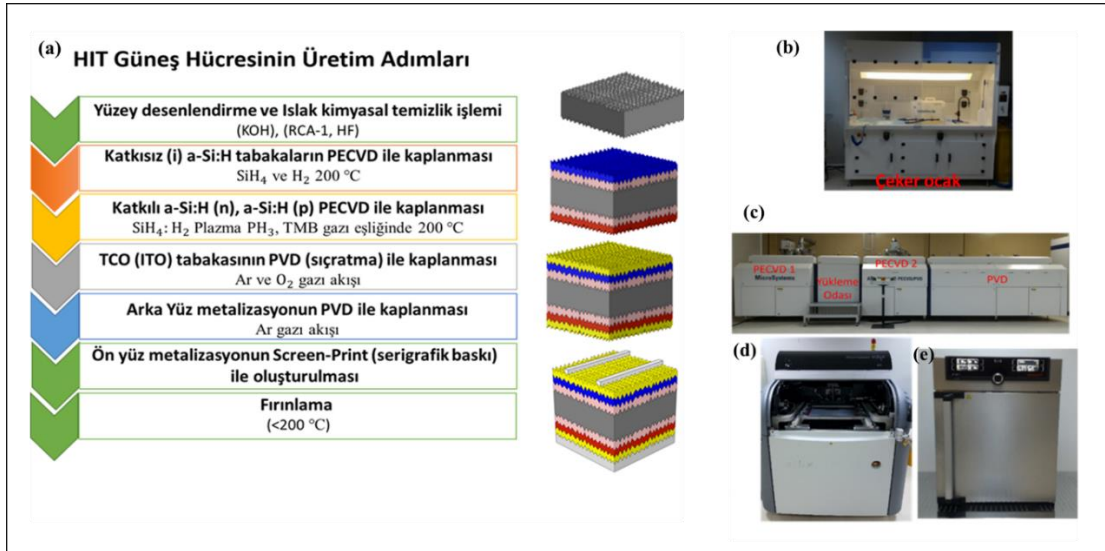
Şekil 2.8. Son dokuz yıl içinde perovskit/silisyum tandem güneş hücrelerinin şampiyon PCE (güç dönüştürme verimliliği) gelişimi (Ying vd., 2024)

İlk çalışmada, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) ekibi bir iletken rekombinasyon tabakası kullanmadan yüksek katkılandırılmış bir tabaka ile % 13,7 verim elde etmişlerdir ve bu yapıda aynı zamanda üst elektrot olarak gümüş nanotel kullanılmıştır (Mailoa vd, 2015). Daha sonra 2018 yılında iki terminalli yapıda SnO_2 ETL olarak kullanılmıştır ve % 18,1 verim elde edilmiştir (Dagar, 2018). Akabinde yapılan çalışmada şeffaf rekombinasyon tabakası olarak AZO (Alüminyum katkılı çinko oksit) kullanılmış ve % 21,2 verim elde edilmiştir. 2017 yılında Werner ve ekibi Sezyum Formamidinyum (CsFA) iki katyon yapısı kullanarak % 23,6 verim elde etmiştir (Werner vd., 2018).

BÖLÜM III

c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRESİNİN ÜRETİLMESİ, GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde tandem güneş hücresinin alt hücresi olarak üretilen c-Si SHJ, alt hücrenin üst hücreye bağlayacak olan ara katmanın ITO'nun sıcaklık ve optimizasyonu yapılmış ve üst hücrenin üretimine hazır hale getirilmiştir. Si güneş hücreleri sınıfından c-Si SHJ hücreleri, özellikle verimliliğin ve güvenilirliğin ön planda olduğu ticari güneş enerjisi uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Üretim süreçlerinde kullanılan teknolojilerin sürekli gelişmesiyle birlikte, bu hücrelerin maliyetleri de giderek düşmektedir ve bu durum, güneş enerjisi pazarında daha yaygın kullanımını teşvik etmektedir. Standart güneş hücrelerinin üretimi ile kıyaslandığında SHJ güneş hücresi üretmek için nispeten az sayıda işlem adımı gereklidir. Bu işlem adımları: Yüzey desenlendirme işlemi, yüzey temizliği, katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si: H tabakaların kaplanması, ITO tabakasının PVD ile kaplanması, arka ve ön yüzey metalizasyon işlemi, fırınlama olmak üzere 6 adımdan oluşur. Bu adımları basitçe gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Alt hücre c-Si heteroeklem güneş hücrelerinin üretim adımları (a); temizleme işlemi için çeker ocak (b); AK1000 marka modelli PECVD/PVD sistemi (c); serigrafik baskı (d); fırın (e)

3.1 Yüzey Desenlendirme

Malzeme maliyetini azaltmak için silisyum hetero-eklem güneş hücrelerinde kullanılan alttaşlar olabildiği kadar ince olmalıdır. Alttaş yüzeyinin desenlendirmesi c-Si tabanlı güneş hücrelerinde kullanılan yaygın bir ışık yakalama yöntemidir (van Sark, Korte, & Roca, 2012). Desenlendirme işleminde genel olarak KOH (Potasyum Hidroksit) veya KOH/IPA (Potasyum Hidroksit/İzopropil Alkol) gibi maliyeti düşük kullanımı basit solüsyonlar kullanılır (Al-Husseini & Lahlouh, 2017).

3.2 Yüzey Temizliği

Cihaz performansını artırmak amacıyla alttaş yüzeyinin organik kirleticilerden, metalik parçacıklardan ve doğal oksitlerden arındırılması gerekir. Yüzeyi desenlendirmiş c-Si alttaşın hücre olarak üretilebilmesi için ilk olarak yüzey temizliği amacıyla standart RCA prosedürü kullanılır. RCA temizlik yöntemi, 1960'larda Radio Corporation of America (RCA) laboratuvarlarında geliştirilmiştir ve iki ana adımdan oluşur: RCA1 ve RCA2.

RCA1 adımı, alttaş yüzeyindeki organik maddeler ve partiküller temizlenir. Bu işlemde kullanılan çözeltide amonyum hidroksit (NH_4OH), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve deiyonize su bulunur. Çözeltinin karışım oranı genellikle 1:1:5 şeklindedir. Çözeltinin sıcaklığı $75\text{-}80^\circ\text{C}$ 'ye getirilir ve alttaş 10-15 dakika süreyle bu çözeltide tutulur. Temizlik süresi aşılmamalıdır, çünkü bu, yüzeyde aşırı oksitlenmeye yol açabilir. Temizleme işleminin ardından alttaş, kimyasal kalıntıların tamamen uzaklaştırılması için deiyonize su ile en az 5 dakika durulanır.

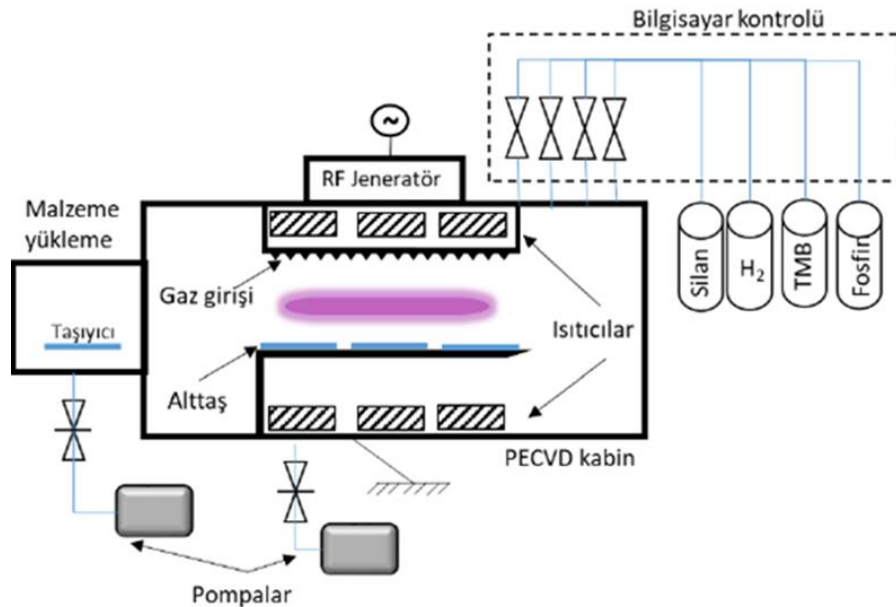
RCA2 adımı, wafer yüzeyindeki metal iyonları temizlenir. Bu işlem için kullanılan çözelti, hidroklorik asit (HCl), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve deiyonize su içerir. Çözeltinin tipik karışım oranı 1:1:6 şeklindedir ve yine $75\text{-}80^\circ\text{C}$ 'de uygulanır. Metal iyonlarının yüzeyden uzaklaştırılması için wafer, 5-10 dakika süreyle çözelti içinde tutulur. Temizlik sonrasında, wafer kimyasal kalıntılardan arındırılmak için deiyonize su ile durulanır.

Hem RCA1 hem de RCA2 işleminin ardından alttaş, son bir kez deiyonize su ile durulanarak yüzeyde kalan tüm kirleticilerin uzaklaştırıldığına emin olunur. Durulama sırasında kullanılan suyun ultra saf su olması önemlidir. Son olarak alttaş, azot gazı ile ya

da dönel kurutucu kullanılarak kurutulur. Bu temizlik işleminden sonra HF daldırma yöntemiyle %2 lik seyreltilmiş HF içerisinde oda sıcaklığında 90 saniye bekletilerek bu sırada hidrojen bağları ile yüzey pasivasyonunu sağlanır ve oksit tabakanın uzaklaştırılması amaçlanır. Hemen sonrasında saf suya daldırılır ve azot ile kurutma işlemi yapılır (Fahrner, 2013). Bu süreçten sonra zaman kaybedilmeden alttaş PECVD sistemine yerleştirilir.

3.3 Katkısız (i) ve Katkılı (n) ve (p) a-Si: H Tabakaların Kaplanması

Temizlenen alttaş PECVD sistemine yerleştirilir. Burada katkılı ve katkısız a-Si:H tabakaların üretimi 13,56 MHz frekansa sahip Radyo Frekanslı (RF) PEVCD ile gerçekleştirilir. n tipi kristal Si ile katkılı a-Si:H tabakalarının arasında yüzey pasivasyonunu sağlamak için katkısız a-Si:H tabakaları Si alttaşın her iki yüzeyine ince bir katman olarak kaplanır. Bu işlem sırasında silan (SiH_4) ve hidrojen (H_2) gazı kullanılmış tüm işlemler 200 °C’de, 120 W gücünde, 2 mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir (Seyhan, 2019). c-Si yüzeyine önce katkısız sonra katkılı a-Si:H tabakaların biriktirme işlemi yapılmıştır. Bu işlemler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si: H tabakaların kaplanması (Seyhan, 2019)

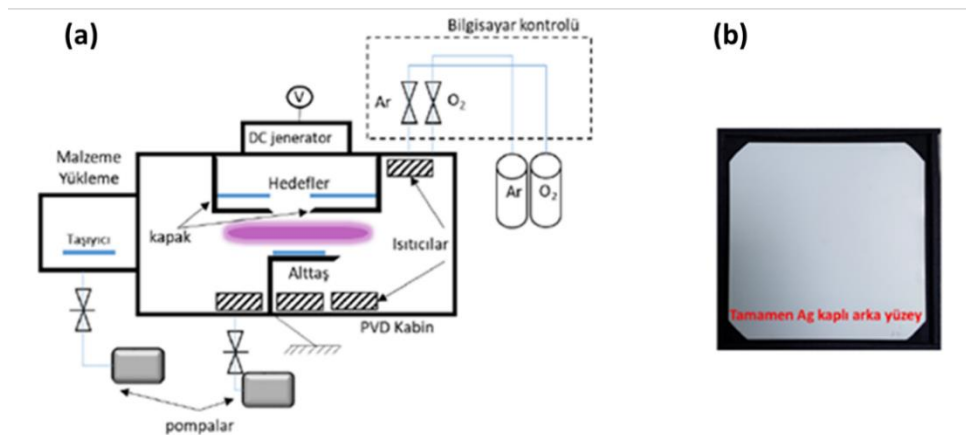
3.4 ITO Tabakasının PVD ile Kaplanması

SHJ güneş hücrelerinde TCO, yüksek yanal iletkenliği ve optik geçirgen özellikleri sayesinde katkılı a-Si: H tabaka ile metalizasyon arasına kaplanan bir katmandır. Güneş hücrelerinde yansıma önleyici, yüksek elektrik iletkenliğine sahip ve düşük sıcaklıkta kaplanabilen farklı hem organik hemde inorganik TCO malzemeleri kullanılabilir. Bunlardan bazıları ITO, FTO ve AZO şeffaf iletken oksitler inorganik iken, organik yapıda kullanılan malzemeler ise PEDOT: PSS (poli (3,4-ethylenedioxythiophene)) ve türevleri şeklindedir.

SHJ güneş hücrelerinde ITO daha yaygın kullanılması görünür dalga boylarında yüksek şeffaflığa sahip, düşük dirençli ve düşük sıcaklıklarda kolayca üretilebilir olmasıdır (Van Sark vd., 2012). Ayrıca malzeme sıcaklığı, DC-RF gücü ve O₂ gaz akış oranı gibi sıçratma koşulları kaplanan ITO filminin direnç, taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı hareketliliği, geçirgenlik ve yansıtma gibi elektriksel ve optik özellikleri üzerinde etkilidir (ALTAN, 2018).

3.5 Arka ve Ön Yüzey Metalizasyon İşlemi

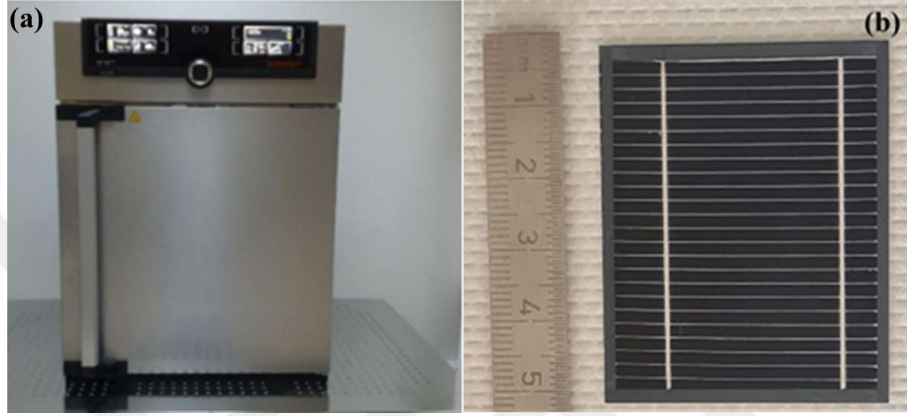
Güneş hücresinde üretilen elektron-boşluk çiftlerinin hücre yüzeyinden toplanması ve elektrik iletimi ön ve arka metal bağlantı ile sağlanır. SHJ güneş hücrelerinde arka yüz metalizasyon işlemi PVD ile yapılırken ön yüz metalizasyon işlemi serigrafik baskı yöntemi ile Ag baskı yapılır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. PVD sisteminin şematik gösterimi (a) ve PVD ile arka yüzeyi tamamen gümüş kaplanmış hücre (b) (Seyhan, 2019)

3.6 Fırınlama

Hücre verimini etkileyen adımlardan biridir. İnce akım toplayıcıları (finger) ve kalın akım toplayıcıları (busbar) belirlenen desen doğrultusunda güneş hücresine aktarılır ve sonrasında 200°C, 5-10 dk. fırınlama işlemi yapılarak akım toplayıcılar kurutulur. Kullanılacak fırın ve üretilen 5 busbarlı SHJ hücresinin son hali aşağıdaki Fotoğraf 3.1'deki gibidir.



Fotoğraf 3.1. Fırınlama işlemi yapılan fırın (a), 5×5cm² 2 busbarlı SHJ hücresi (b)

3.7 Üretilen Alt Hücrelerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu

c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücrelerinde alt hücrenin geliştirilmesi ve karakterizasyonu, hücre performansını ve verimliliğini artırmada kritik bir rol oynar. SHJ teknolojisi, c-Si tabanlı alt hücrelerde yüksek verimlilik ve düşük rekombinasyon kayıpları sunarak, perovskit hücrelerle birleştirildiğinde daha geniş spektrumda güneş ışığını etkin bir şekilde dönüştürme potansiyeline sahiptir. Alt hücrenin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin titizlikle karakterize edilmesi, tandem hücrelerde ideal performansın elde edilmesi için gereklidir. Özellikle, c-Si SHJ alt hücresinin ışık soğurma, yük taşıyıcı mobilitesi ve yüzey pasivasyon özellikleri, tandem hücrelerin toplam enerji dönüşüm verimliliğini belirleyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle, c-Si SHJ alt hücresinin optimize edilmesi ve ayrıntılı karakterizasyonu, tandem güneş hücrelerinin performansını maksimize etmek ve yenilenebilir enerji üretiminde ileriye dönük adımlar atmak için önemlidir.

Bu bölümde $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ve $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ boyutlarında n tipi c-Si alttaşlar üzerine TCO katmanlar kaplanarak alt hücrenin geliştirilmesi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar sunulmuştur

Bu amaç doğrultusunda tandem güneş hücrelerinde alt hücre performansını iyileştirmek için DC magnetron püskürtme yöntemi kullanarak n-tipi c-Si dilim ITO filmlerinin biriktirilmesi sürecinde O_2 akış hızının etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yine alt hücre geliştirilmesinde ITO tabakasının sıcaklık optimizasyonu yapılarak en iyi optik ve elektrik özellikler üzerine üst hücre üretimi yapılarak Monolitik c-Si SHJ/Perovskit Tandem hücre tamamlanmıştır.

3.7.1 SHJ güneş hücrelerinde ITO filmlerinin optimizasyonu: oksijen akış hızının performansa etkisi

ITO filmler, SHJ hücrelerinde yüksek ışık geçirgenliği ve yük taşıyıcılarının verimli bir şekilde toplanmasını sağlayarak önemli bir bileşen olma rolünü üstlenirler. O_2 akış hızının ITO filmlerinin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi, SHJ hücrelerinin performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, n-tipi c-Si alttaş üzerine ITO filmleri DC magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak biriktirilmiştir. Deneylerde farklı O_2 akış hızları kullanılmış ve bu parametrenin film özelliklerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışma TR dizinde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi'nde yayımlanmıştır.

3.7.1.1 Oksijen akış hızının oranına göre ITO ince film üretimi

Bu çalışmada, $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ boyutlarında ve 1,1 mm kalınlığındaki cam altlıklar üzerine ITO filmlerin kaplanması için bir magnetron püskürtme sistemi kullanılmıştır. Kullanılan ITO hedef malzemesi, literatürde belirtilen yüksek saflık standartlarına (%99,999, 5N) uygun olarak seçilmiştir (Seyhan vd., 2023; Kartal vd., 2023). Bu yüksek saflık seviyesi, elde edilen filmlerin kalitesini artırmak açısından kritik öneme sahiptir, çünkü düşük saflıktaki hedef malzemeler film özelliklerini olumsuz etkileyebilecek safsızlıklar içerebilir. Cam altlıklar PVD sistemine yerleştirmeden önce, standart bir alt tabaka temizleme işleminden geçirilmiştir. Ardından cam altlıklar PVD sistemine yerleştirilmiş

ve kaplama işlemi 2×10^{-2} mbar basınç, 200°C sıcaklık ve 2050 W güç koşullarında gerçekleştirilmiştir. İnce film kaplama deneyleri, 0 ila 3 sccm arasında değişen farklı O_2 akış hızları (0, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 sccm) kullanılarak yapılmıştır.

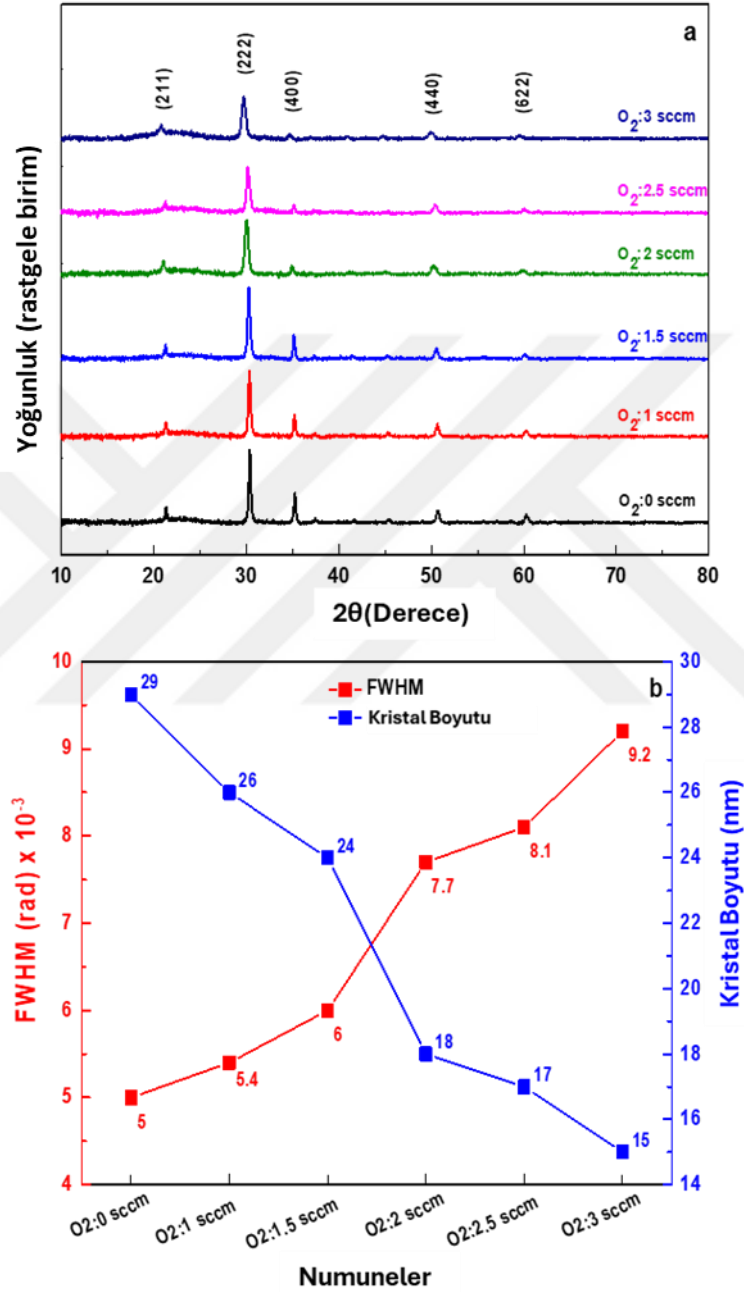
3.7.1.2 O_2 akış oranına göre üretilen ITO ince filmlerin karakterizasyonu

ITO filmlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri, sırasıyla X-ışını difraksiyonu (XRD), Elipsometre ve temassız levha direnci ölçüm cihazları kullanılarak karakterize edilmiştir.

3.7.1.3 Yapısal özellikler

ITO filmlerinin yapısal özellikleri, XRD yöntemi kullanılarak 10° ila 80° arasında değişen tarama aralığında detaylı bir şekilde incelenmiştir. XRD analizleri, filmlerin kristal yapısı ve faz kompozisyonu hakkında bilgi sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD desenleri, Şekil 3.4a'da sunulmuştur ve bu desenler, ITO filmlerinin kristalin yapısını ve olası kristalografik yönelimlerini ortaya koymaktadır. Sonuçlar tüm ITO filmlerinin polikristal morfolojisi sergilediğini göstermiştir. (211), (222), (400), (440) ve (622) düzlemlerine karşılık gelen kırınım pikleri kübik bixbyite kristal yapısını göstermiştir. O_2 miktarı kademeli olarak artırıldığında, (222), (400), (440) ve (622) kafes düzlemlerine karşılık gelen kırınım piklerinde bir azalma gözlenmiştir. XRD analizlerinde Sn (kalay), SnO (kalay (II) oksit) veya SnO_2 'ye ait bir kırınım piki gözlemlenmemiştir; bu da Sn atomlarının In_2O_3 (indiyum(III) oksit) yapısına entegre olduğunu göstermektedir. Farklı O_2 oranlarında biriktirilen tüm ITO filmleri için, en belirgin pik olan (222) düzlemine karşılık gelen kristal yapı parametreleri hesaplanmış ve bu sonuçlar Şekil 3.4b ve Şekil 3.5'da detaylı olarak sunulmuştur. Kristal boyutunun (D) belirlenmesi, eşitlik (1)'de verilen Debye-Scherrer denklemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Parthiban vd., 2011). Debye-Scherrer formülü, XRD verilerinden kristal boyutunu tahmin etmek için kullanılan önemli bir araçtır. Debye-Scherrer formülü, 1918 yılında Peter Debye ve Paul Scherrer tarafından geliştirilmiştir. Formül, genellikle nanometre boyutundaki kristaller için kullanılır, ancak daha büyük kristaller için de uygulanabilir. Debye-Scherrer formülü katıdaki düzenli (kristalin) alanların ortalama boyutunu, pik genişliği ile ilişkilendirerek kristalin boyutun hesaplanmasını sağlamaktır. ITO filmlerinin kristal ölçümleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Şekil 3.4b'de

gösterildiği üzere, kristal boyutundaki artış, Yarım Maksimumda Tam Genişlik (Full Width at Half Maximum, FWHM) değerlerinde bir azalmaya karşılık gelmektedir. Bu bulgu, daha büyük kristal boyutlarının daha iyi kristal yapılarının oluşumunu desteklediğini göstermektedir.



Şekil 3.4. 0, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 sccm O_2 akış hızlarında cam altlık üzerine biriktirilen ITO filmlerinin XRD desenleri (a) ve kristal boyutunun FWHM (rad) ile değişimi (b)

Kristal boyutunun artan O_2 içeriği ile küçülme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. O_2 kullanılmadan üretilen ITO filmleri en büyük kristal boyutuna (29 nm) sahipken, 3 sccm

O₂ akış hızıyla üretilen filmler en küçük kristal boyutunu (15 nm) göstermiştir. Özellikle 0, 1 ve 1,5 sccm O₂ oranları kullanılarak üretilen ITO örnekleri, daha büyük kristal boyutlarına sahip oldukları için daha gelişmiş bir kristalleşme eğilimi sergilemiştir. Bu gözlem, düşük oksijen oranlarının genellikle ince filmlerde daha iyi tanımlanmış ve daha geniş kristal bölgelerinin oluşmasına uygun koşullar sağladığı şeklindeki yerleşik anlayışı desteklemektedir.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.1)$$

Çizelge 3.1. Kristal boyutunun (D) hesaplanmasında kullanılan parametreler.

O ₂ (sccm)	β (rad) x 10 ⁻³	θ (derece)	cosθ	D (nm)
0	5.0	15.1825	0.9651	29
1	5.4	15.1624	0.9652	26
1.5	6.0	15.1305	0.9653	24
2	7.7	15.0885	0.9655	18
2.5	8.1	15.0108	0.9659	17
3	9.2	14.8560	0.9656	15

Kübik yapıya sahip ITO için kafes sabiti (a), Denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır (Rezaie vd. 2018). Dislokasyon yoğunluğu (δ) ve mikro gerinim (ε), sırasıyla Denklem (3.3) ve (3.4) ile belirlenmiştir (Thirumoorthi, vd., 2015; Mageshwari, vd., 2013). Birim alan başına düşen kristal sayısı (N) ise Eşitlik (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2} \quad (3.2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta \cot \theta}{4} \quad (3.4)$$

$$N = \frac{t}{D^3} \quad (3.5)$$

Bu çalışmada, farklı O₂ oranlarıyla elde edilen ITO filmlerinin önemli yapısal özellikleri, film kalınlığına bağlı olarak a, δ , ϵ ve N parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Bu parametrelerin sayısal değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi O₂ içeriği arttıkça δ , ϵ ve N değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Bu durum, 0, 1 ve 1,5 sccm O₂ oranlarıyla üretilen ITO filmlerinin, 2, 2,5 ve 3 sccm O₂ oranlarıyla üretilenlere kıyasla daha iyi kristal yapı ve boyuta sahip olduğunu göstermektedir. En yüksek δ , ϵ ve N değerleri, 3 sccm O₂ altında biriktirilen ITO filminde gözlemlenirken; 2,5, 2, 1,5 ve 1 sccm O₂ altında biriktirilen filmlerde bu değerler daha düşük bulunmuştur. Buna karşılık, 0 sccm O₂'de elde edilen ITO filmi bu yapısal parametreler arasında en düşük değerleri göstermiştir. Daha yüksek O₂ içeriği ile dislokasyon yoğunluğundaki artış, filmlerde daha fazla kristalografik kusurun varlığına işaret etmektedir. Bu artış, kristal kafeste daha yüksek yapısal düzensizliklerin varlığına işaret etmektedir (Sarker, vd., 2021). Ayrıca, kristal sabiti değerlerinin O₂ oranlarına bağlı olarak 10.2-10.4 Å aralığında değiştiği ve artan O₂ içeriği ile birlikte örgü sabitinde bir artış gözlemlendiği tespit edilmiştir (Kartal vd., 2023).

Çizelge 3.2. 0, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 sccm O₂ akış hızlarında biriktirilen ITO filmlerinin XRD verilerinden hesaplanan yapısal parametreleri*(Kartal vd., 2023).

O ₂ (sccm)	LC (a)(Å)	MS (ϵ) (x10 ⁻³)	DD (δ) (lines/nm ²) (x10 ⁻³)	NCA (N) (nm ⁻²) (x10 ⁻²)
0	10.2	1.2	1.2	0.4
1	10.2	1.3	1.5	0.6
1.5	10.2	1.4	1.7	0.7
2	10.3	1.9	3.1	1.7
2.5	10.3	2.0	3.5	2.0
3	10.4	2.2	4.4	3.0

*LC: Kafes Sabiti, MS: Micro gerinim, DD: Dislokasyon Yoğunluğu, NCA: Birim Alan Başına Düşen Kristal Sayısı

3.7.1.4 Optiksel özellikler

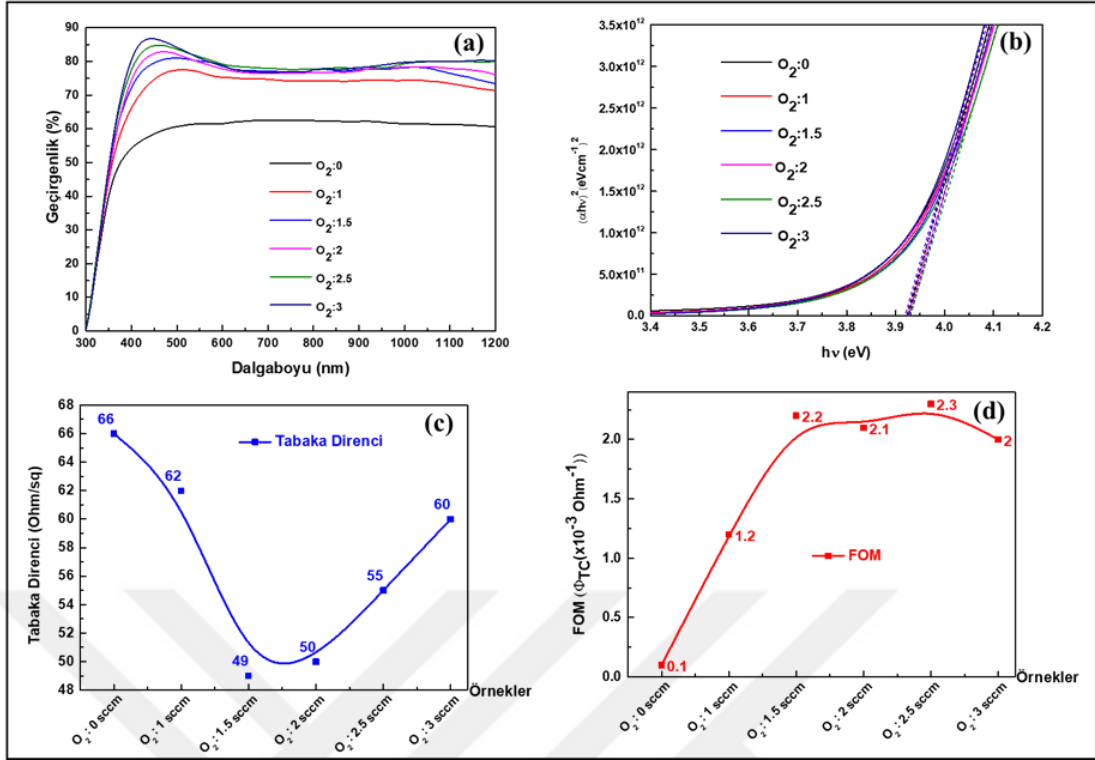
ITO filmlerinin çeşitli O₂ akış hızlarındaki geçirgenlik spektrumları Şekil 3.5'da sunulmuştur. ITO filmlerinin geçirgenlik spektrumları incelendiğinde, görünür ışık bölgesinde (400-800 nm) şeffaflığın arttığı açıkça görülmektedir. Yapılan detaylı analizler, O₂ oranının artırılmasının ortalama geçirgenlik değerini yükselttiğini göstermektedir. Ancak bu durum, 3 sccm O₂ oranına ulaşıldığında değişmekte ve geçirgenlikte bir azalma gözlenmektedir. En yüksek ortalama geçirgenlik değeri % 80,3

ile 2,5 sccm O₂ oranında üretilen ITO filminde elde edilirken, en düşük değer % 61,0 ile O₂'siz ortamda üretilen ITO filminde görülmüştür. 2,5 ve 3 sccm O₂ oranlarında üretilen ITO filmleri, yakın UV bölgesinde en yüksek geçirgenliğe sahiptir. Önemli bir nokta olarak, O₂ içeriğindeki artış hem yakın UV bölgesinde hem de daha büyük dalga boylarında geçirgenliği artırmaktadır. Bu sonuç, O₂ akış oranlarındaki küçük değişikliklerin geçirgenlik eğilimlerini nasıl etkileyebileceğini göstermektedir.

Farklı O₂ akış hızlarıyla biriktirilen ITO filmlerinin optik Eg hesaplanması, optik geçirgenlik verilerinin analizi yoluyla sistematik olarak gerçekleştirilmiştir (Zhang, vd., 2000). ITO filmlerinin Eg değerlerini belirlemek için kullanılan, $(\alpha hv)^2$ ile hv arasındaki korelasyon Şekil 3.5b'de gösterilmektedir. Eg değerleri, farklı O₂ akış hızları altında biriktirilen tüm ITO filmlerinde yaklaşık olarak 3,92 eV olarak hesaplanmıştır. Farklı O₂ oranlarının ITO filmlerin bant aralığını önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir.

3.7.1.5 Elektriksel özellikler

Özellikle 550 nm dalga boyunda ölçülen geçirgenlik değerleri, ITO filmlerinin başarımlı ölçütü (Figure of Merit, FOM) hesaplanması için önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. FOM özellikle, farklı malzemelerin veya farklı üretim yöntemlerinin tek bir ölçekte karşılaştırılmasına olanak tanır, bu da belirli uygulamalar için hangi malzemenin daha uygun olduğunu değerlendirmeyi kolaylaştırır. FOM değeri, $\phi_{TC} = T^{10}/R_{sh}$ denklemiyle hesaplanır; bu denklem, 550 nm spesifik dalga boyunda ITO filmlerinin hem geçirgenlik hem de tabaka direnci özelliklerini ifade etmektedir (Kacha, vd., 2022). Değişken O₂ akış hızları altında üretilen ITO filmlerinin karşılık gelen tabaka direnci (R_{sh}) değerlerinin yanı sıra hesaplanan ϕ_{TC} değerlerini temsil etmektedir. O₂ akış hızları 0 sccm'den 1,5 sccm'ye çıkarıldığında, ϕ_{TC} değerleri artış göstermiştir. Ancak 1,5 sccm'yi aştığımızda ϕ_{TC} değerleri birbirine çok yakın olduğu için yatay bir seyir izlemiştir. ITO filmler arasında, 2,5 sccm O₂ oranında biriktirilen film en yüksek FOM değerine sahiptir ($2,3 \times 10^{-3} \text{ Ohm}^{-1}$). O₂ akış hızı 0'dan 1.5 sccm'ye arttıkça, tabaka direnci değeri azalmış, bu da elektriksel özelliklerinin iyileştiğini göstermektedir. Buna karşılık, bu eğilim 1,5 sccm eşiğinin üzerinde tabaka direnci değerlerinde sürekli bir artışa yol açarak elektriksel özellikte bir düşüşe işaret etmektedir. O₂ olmadan biriktirilen film 66 Ohm/sq ile en yüksek tabaka direnci değerini gösterirken, 1,5 sccm O₂ oranıyla üretilen film 49 Ohm/sq ile en düşük tabaka direnci değerini sergilemiştir (Kartal vd., 2023).



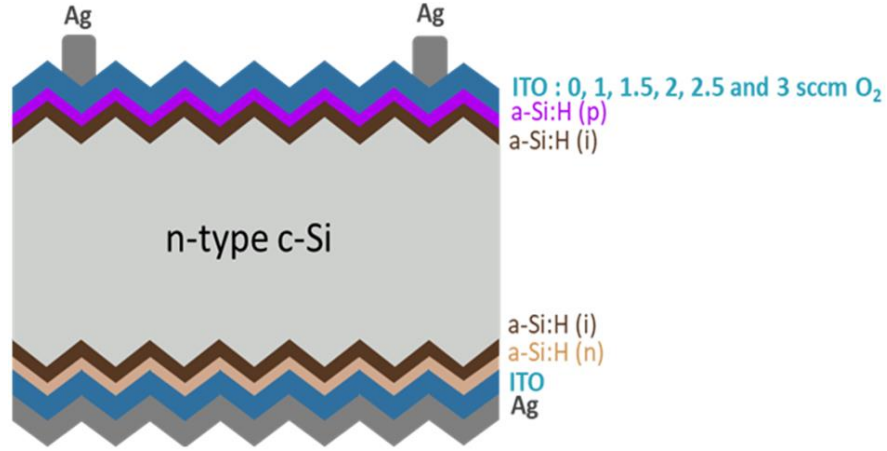
Şekil 3.5. ITO için oksijen değişiminde; (a) Geçirgenlik, (b) Bant aralığı, (c) Tabaka direnci ve (d) FOM grafikleri (Kartal vd., 2023)

3.7.2 5×5 cm² SHJ güneş hücrelerinin üretimi

SHJ güneş hücreleri, 5×5 cm², 180 µm kalınlığında, (100) yönelimli rastgele piramit dokulu c-Si alttaş kullanılarak üretilmiştir. Bu dilimler, c-Si yüzeyindeki oksit tabakasının bir HF çözeltisi ile çıkarılması, saf su ile durulanması ve N₂ gazı ile kurutulmasıyla hazırlanmıştır.

SHJ güneş hücrelerinin çalışma verimliliğini artırmak için, PECVD tekniği kullanılarak c-Si alttaşın her iki yüzeyine 10 nm kalınlığında ((i) a-Si:H) katmanları biriktirilmiştir. Biriktirme işlemi SiH₄ ve H₂ gazlarının karışımını içermektedir. SiH₄, H₂ ve Trimetil Boron (TMB) gazı kullanılarak ön yüzeyde 10 nm kalınlığında p-tipi bir a-Si:H tabakası biriktirilirken, SiH₄, H₂ ve Fosfin (PH₃) gazları kullanılarak arka yüzeyde 10 nm kalınlığında n-tipi bir a-Si:H tabakası biriktirilmiştir. Tüm hücreler için, SHJ güneş hücrelerinin arka yüzeyine 40 nm ITO ve 220 Åg biriktirilmiştir. Ek olarak, p-tipi a-Si:H tabakası üzerine 100 nm kalınlığında bir ITO tabakası farklı O₂ oranlarında

biriktirilmiştir. Ön metalizasyon, ekran baskısı yoluyla Ag pasta kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.6, bu çalışmada üretilen SHJ güneş hücresinin şematik bir gösterimini vermiştir.



Şekil 3.6. SHJ güneş hücresi üzerinde biriktirilen ITO filmlerinin şematik gösterimi

ITO filmlerinin biriktirilmesinde farklı O_2 akış hızlarının SHJ güneş hücrelerinin verimliliği üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Değerlendirilen önemli güneş hücresi parametreleri V_{OC} , FF ve dönüşüm verimliliğidir (η). Çizelge 3.3, SHJ güneş hücresinden elde edilen parametreleri göstermektedir. En iyi FF performans, ortalama O_2 oranı (2-2,5 sccm) ile elde edilmiştir. Bu durum, söz konusu O_2 oranlarının parazitik direnç kayıplarını azaltmasıyla açıklanabilir (Aissa, vd., 2019; Chen, vd., 2014; Gong, vd., 2022).

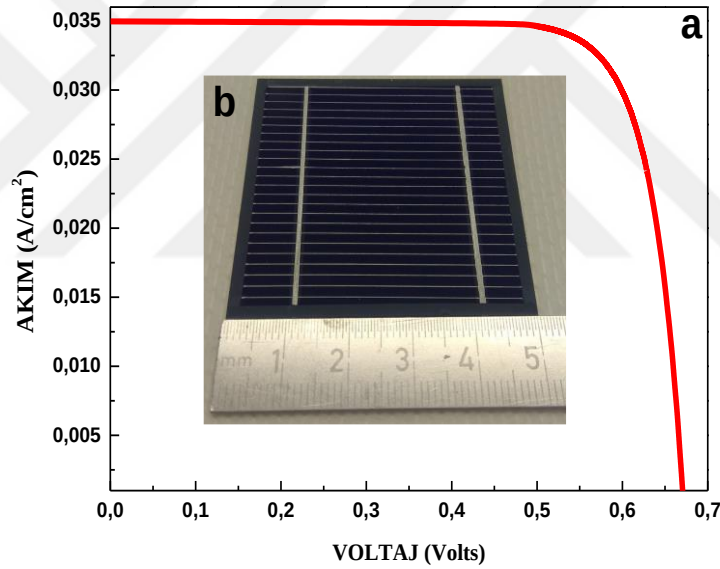
Çizelge 3.3. Farklı O_2 oranlarında (0, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 sccm) biriktirilen ITO filmlerinin SHJ güneş hücresi parametreleri (Kartal vd., 2023).

Hücre ($5 \times 5 \text{ cm}^2$)	Verimlilik (η)	Jsc (A/cm^2)	FF (%)	Vmp (V)	Voc (V)
$O_2:0 \text{ sccm}$	17.3 %	0.035	78.7	0.529	0.628
$O_2:1 \text{ sccm}$	17.4 %	0.035	77.2	0.540	0.645
$O_2:1.5 \text{ sccm}$	17.6 %	0.035	78.6	0.536	0.539
$O_2:2 \text{ sccm}$	18.4 %	0.035	79.7	0.560	0.658
$O_2:2.5 \text{ sccm}$	18.6 %	0.035	79.2	0.569	0.672
$O_2:3 \text{ sccm}$	18.0 %	0.035	78.6	0.550	0.653

SHJ güneş hücrelerinin verimliliği, O_2 içeriği 0'dan 2,5 sccm'ye yükseldikçe başlangıçta bir artış göstermektedir. Ancak, O_2 içeriği 3 sccm'ye ulaştığında, verimlilikte bir düşüş görülmektedir. Özellikle, 0 ve 1 sccm O_2 akış oranlarına sahip ITO filmler kullanılarak üretilen SHJ güneş hücrelerinde gözlemlenen nispeten düşük verimlilikler, düşük optik

özelliklere ve yüksek tabaka direncine bağlanabilir. O₂ akış hızları 1,5 ve 2 sccm olan ITO filmlerden üretilen SHJ güneş hücreleri söz konusu olduğunda, kayda değer düşük tabaka direncine rağmen, düşük optik özellikleri nedeniyle verimlilik seviyeleri nispeten düşüktür. ITO filmlerle üretilen ve 3 sccm O₂ akış hızı ile karakterize edilen SHJ güneş hücreleri için, daha yüksek tabaka direnci optik özelliklerin etkisini bastırmış ve 2,5 sccm O₂ akış hızına sahip ITO filmlerle üretilen SHJ güneş hücrelerine kıyasla daha düşük verimlilikle sonuçlanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada ITO kullanılarak üretilen SHJ güneş hücrelerinden elde edilen en yüksek %18,6 verimlilik değeri, 2,5 sccm O₂ oranıyla elde edilmiştir (Kartal vd., 2023). Şekil 3.7, bu güneş hücrelerinin akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafiğini ve üretilen hücrenin fotoğrafını göstermektedir.



Şekil 3.7. 2,5 sccm O₂'de biriktirilen SHJ güneş hücresinin J-V grafiği (a) 5x5 cm² alanda biriktirilen SHJ güneş hücresi fotoğrafı (b) (Kartal vd., 2023)

Bu çalışma, DC magnetron püskürtme yöntemiyle n-tipi c-Si alttaşlar üzerine biriktirilen ITO filmlerinin özelliklerinin, O₂ akış hızlarına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Optimum O₂ akış hızının belirlenmesi, SHJ güneş hücrelerinin verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu sonuçlar, güneş hücresi teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, yenilenebilir enerji alanında önemli ilerlemeler sağlayabilir. SHJ hücrelerinin daha verimli ve ekonomik hale getirilmesi, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir adım olacaktır.

BÖLÜM IV

PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

4.1 Perovskit Güneş Hücresi Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Tez çalışma süresince hücre üretimi ağırlıklı olarak solüsyon bazlıdır. Bu yüzden alınan malzemelerin saflığı kullanım derecesi önemlidir. Bu çalışmada kullanılan tüm malzemeler ticari kaynaklardan satın alınmış ve herhangi bir saflaştırma işlemine tabi tutulmadan alındığı gibi kullanılmıştır. ETL; titanium isopropoxide (TTIP; 97%), ethanol (99.8%), HCl (%36.5) ve kollodial SnO₂, ethanol malzemeleri kullanılmıştır. Boşluk HTL; 2,2',7,7'-tetrakis (N,N-di-p-methoxyphenylamine)- 9,9'-spirobifluorene (spiro-OMeTAD), 4-tert-butylpyridine (tBP), bis(trifluoromethane)sulfonimide lithium salt (Li-TFSI), chlorobenzene (99.8%), acetonitrile (99.8%), Sigma Aldrich'ten temin edilmiştir. Perovskit malzemeleri ve TCO'lar (ITO ve FTO) ise Ossila ve LUMTEC firmasından temin edilmiştir. Metalizasyon malzemesi olarak kullanılan Ag (%99,99) Nanomat firmasından temin edilmiştir.

4.2 Üretim Aşamasında Kullanılan Cihazlar

Deneyisel çalışmalarda kullanılan cihazların hepsi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma merkezi tarafından sağlanmıştır. Deneyisel çalışmalarda perovskit ve DMF, spiro-OMeTAD, klorobenzen kaplamasının yapılabilmesi için inert bir ortam oluşturan Ar akışlı eldivenli kabin, incefilm kaplaması için G3-P8 marka dönel kaplama, perovskit çözeltisinin karıştırılması ve kaplanan incefilmlerin tavlama için Heidolph marka ısı tabaka kullanılmıştır. Fotoğraf 4.1.'de deneyisel çalışmalarda kullanılan sistemlerin fotoğrafları verilmiştir.

Eldivenli Kabin

PGH'leri çözelti bazlı ve vakum bazlı olmak üzere iki şekilde üretilebilir. Bu çalışmada çözelti bazlı üretim yapılmıştır. Ancak perovskitin çözelti bazlı incefilm üretimi neme ve oksijene duyarlı olduğu için eldivenli kabine ihtiyaç vardır. Bunun için eldivenli kabin,

perovskit ve DMF, spiro-OMeTAD, klorobenzen gibi çözeltilerin FTO ve ITO cam üzerine kaplanabilmesi, kimyasal malzemelerin ve incefilmlerin saklanması için atmosfer koşullarına karşı inert ortam (yüksek saflıkta azot veya argon gaz kullanılarak) oluşturur. Perovskit ve çözelti malzemeleri bu kabin içerisinde kaplanmıştır. Bu çalışmada Pure LAB marka Ar akışlı eldivenli kabin kullanılmıştır.

Dönel Kaplama (Spin Coating)

Dönel kaplama işlemi bir alttaş üstüne veya yarı iletken alttaş üzerine sıvı malzemeyi doğru şekilde dağıtmak için merkezkaç kuvveti yardımıyla homojen bir incefilm elde etmeyi sağlar. Bu çalışmada dönel kaplama sistemi solüsyon bazlı malzemelerin alttaş üzerine kaplanabilmesi için kullanılmıştır. Dönel kaplama parametreleri incefilmin kalınlığını ve homojenliğini etkilemektedir. Bu yüzden kaplanan incefilmlerin optimizasyonu çözelti miktarları ve dönel kaplama hızı parametreleri ile yapılmıştır. Bu parametreler perovskit incefilm üretim başlığı altında üretim parametreleri bölümünde verilmiştir.

Isıl Tabaka (Hot Plate)

Perovskit çözeltisinin kaplama işlemi yapılmadan önce ısıtılması ve çözeltinin karıştırılması gerekmektedir. Bunun için çözelti içerisine konulan manyetik bir balık ile belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir süre karıştırılarak ısıtılır. Dönel kaplama sistemi ile elde edilen perovskite ince film tavlama işlemi eldivenli kabin içerisinde bulunan ısıtıcı tabla ile tavlama yapılır.

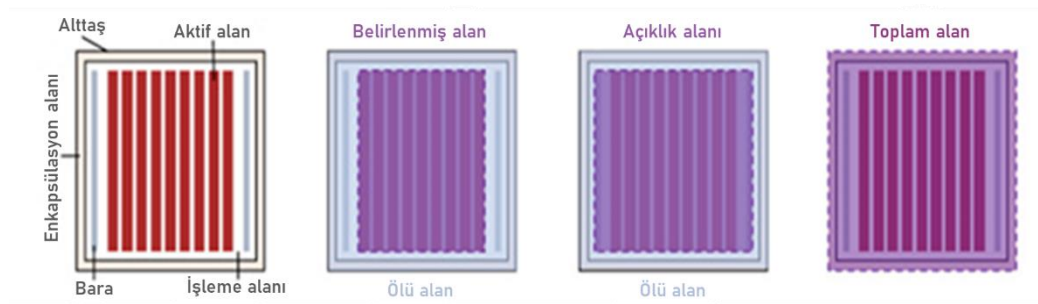


Fotoğraf 4.1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan cihazlar (a) Eldivenli Kabin (Ar Akışlı), (b) Isıtıcı tabla, (c) dönel kaplama

4.3 Perovskit Güneş Hücrelerinde Alan

Laboratuvar ölçekli, küçük alanlı imalattan endüstriyel ölçekli, geniş alanlı ve yüksek verimli üretime geçişi kolaylaştırmak için FV teknolojilerinin yüksek verimlilik, düşük maliyetli, uzun süreli kararlılık ve ölçeklenebilirlik olarak dört önemli alanda güvenilir gösterimlere ihtiyaç duyar. Cihaz alanındaki bir artışla, tüm PV teknolojilerinin verimleri azalma eğilimindedir.

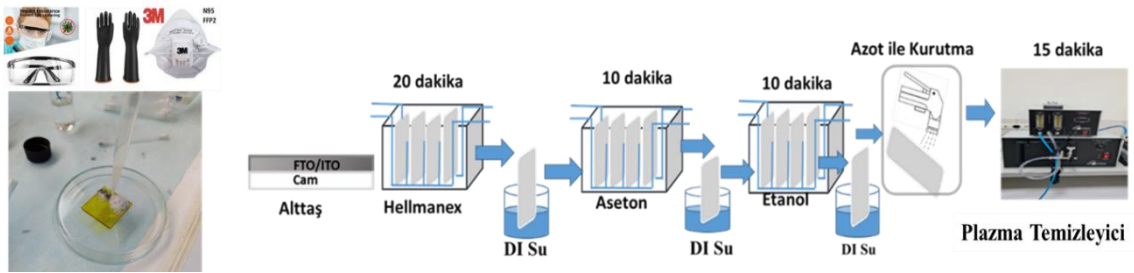
PGH modülleri normalde daha iyi bir performans elde etmek için daha küçük alanlı seri bağlantılı birim hücrelere ayrılır. Böylece, bir PGH modülü iki alana ayrılabilir, "Aktif alan", her bir fonksiyonel katmanın örtüşme alanı ile hesaplanabilen, ışık absorpsiyonunun ve FV enerji dönüşümünün gerçekleştiği alandır. Buna bağlı olarak, birbirine bağlanan alanlara "ölü alan" denir ve herhangi bir elektrik üretmezler. Genel olarak mini PGH modülü dört alandan oluşur. Aktif Alan (Active Area): Her bir fonksiyonel katmanın örtüşme alanı ile hesaplanabilen, ışık absorpsiyonunun ve FV enerji dönüşümünün meydana geldiği alandır. Belirlenmiş alan (Designated Area): Belirlenmiş bir aydınlatma alanı, aktif alan ve aralarındaki bağlantı alanlarıdır. Açıklık Alanı (Aperture Area): Aktif malzemeler ve tüm temas eden bileşenler gibi bir modülün tüm temel bileşenlerini içerir. Toplam Alan (Total Area): Toplam alan bir modülün toplam öngörülen alanıdır, alt tabaka alanı ve çerçeveyi içerir (Hu, vd., 2019). Bu alanların gösterimi Şekil 4.1. gösterilmiştir.



Şekil 4.1. PGH modülü performans ölçümü için kullanılan alanların tanımı (Dong vd., 2015)

4.4 Alttaşların Dağlama İşlemi ve Temizlenmesi

Tez alışma suresince PGH retiminde alttaş olarak FTO 25×25mm boyutlarında 600, 400 nm ve 100 nm ITO 20 × 15 mm² ve 25 × 25 mm² boyutlarında 100 nm TCO alttaşlar kullanılmıştır. Camların aşındırma işlemi, cam yüzeyine özel kimyasallar kullanarak yapılan bir işlemdir. Bu işlem, cam yüzeyine desenler, şekiller veya metinler kazımak veya matlaştırmak amacıyla yapılır. FTO/ITO camlarının dağlama işlemi, cam yüzeyine özel kimyasallar kullanarak yapılır ve FTO tabakasının belirli bir kısmının çıkarılmasını veya matlaştırılmasını sağlar. FTO/ITO camının dağlama işlemi için Zinc powder (inko tozu) ile hidroklorik asit (HCl) kullanılmış ve dağlanacak alan kompton bantı ile kaplanarak işlem tamamlanır. Dağlama işlemi tamamlanan bu alttaşları kullanmadan önce temizleme işlemi yapılmıştır. Temizleme işleminde alttaşa zarar vermemek ve kalıntı bırakmamak için %2 Hellmanex zeltisi 200 ml sıcak suya 2 ml hellmanex eklenerek 20 dakika boyunca ultrasonikasyon işlemi yapılmıştır. Hemen ardından saf su (DI) ile durulanır (Saliba, vd., 2016). Daha sonra sırasıyla etanol ve aseton içerisinde 10’ar dakika ultrasonikasyonda işlem yapılır. Yıkama işlemi sonrası saf su ile durulanarak azot ile kurutma işlemi yapılır. Kalıntıların tamamen temizlenmesi için 15 dakika boyunca plazma temizleyici işlemine maruz bırakılmıştır. Alttaşların temizlik aşamaları, şekil 4.2’te verilmiştir.



şekil 4.2. Alttaşların temizleme aşamaları

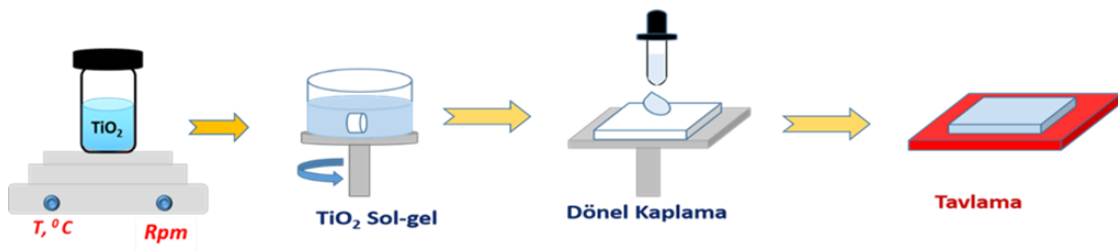
4.5 Elektronik Taşıma Malzemelerinin retilmesi ve Kaplanması

Tez kapsamında 3 farklı elektronik taşıma malzemesi sentezlenmiş ve kaplanmıştır. Bu malzemeler kompakt TiO₂, mezoporoz TiO₂ ve SnO₂’dir.

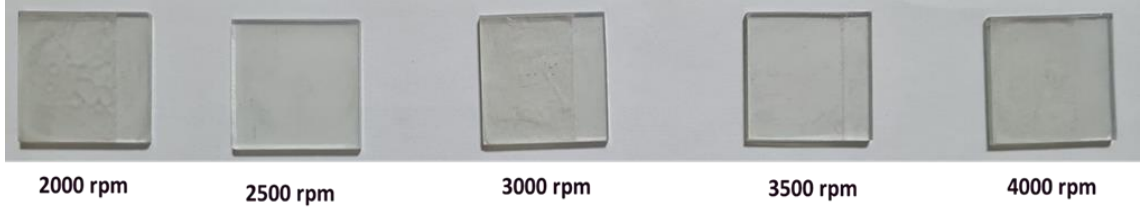
4.5.1 Kompakt TiO₂ katmanının üretilmesi ve kaplanması

Kompakt ETL, perovskite tabakası ve FTO substratı arasındaki arayüzdeki kusur konsantrasyonunu azaltarak cihazdaki histerezis etkilerini de azaltabilir (Eliwi, vd., 2022). ZnO, SnO₂, TiO₂, Nb₂O₅, Al:ZnO ve SrTiO₃ gibi çeşitli metal oksitler hem düzlemsel hem de mezo-gözenekli PGH'ler için kompakt ETL olarak kullanılabilir. Kompakt TiO₂ (c-TiO₂), yüksek şeffaflığı, mükemmel taşıyıcı ayırma kabiliyeti, çevresel stabilitesi ve kolay üretim süreci nedeniyle yüksek verimli mp-PGH'lerde yaygın olarak ETL olarak kullanılır. c-TiO₂ tabakası, spin kaplama, sprey piroliz, magnetron püskürtme, elektrokimyasal biriktirme ve atomik katman biriktirme ile hazırlanabilir (Mahmood, vd., 2017).

Bu çalışmada c-TiO₂ sol-gel yöntemiyle üretilmiş TCO katmanının üzerine dönel kaplama yardımıyla kaplanmıştır. Buna göre; TiO₂ üretiminde asidik, 0,15 M ve 0,30 M titanyum diizopropoksit bis (asetilasetonat) çözeltileri etanol içerisinde hazırlanmıştır. XRD karakterizasyonu sonuçları ile en iyi sonucun 0,30 M'lık çözeltide elde edilmiştir. 0,30 M'lık etanol çözeltisi 300 µl titanyum diizopropoksit bis (asetilasetonat) (IPA içinde ağırlıkça %75) ve 4,8 µl %37 HCl'nin yaklaşık 1 ml etanole eklenmesi ve ardından 2 ml'ye tamamlanması ile elde edilmiştir. Daha sonra hazırlanan çözelti döndürülerek kaplama yöntemi ile 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 rpm'de 60 saniye kaplanarak ve 100°C'de 5 dakika tavlama yapıldıktan sonra aynı işlem 3 kere tekrarlanmıştır. Büyütülen film 500°C'de 30 dakika boyunca tavlansmıştır. Sol-gel yöntemi ile kompakt TiO₂ üretimi, Şekil 4.3'te şematik olarak gösterilmiştir. Kaplanan camların son hali ise Fotoğraf 4.2'de verilmiştir (Damgacı vd., 2023).



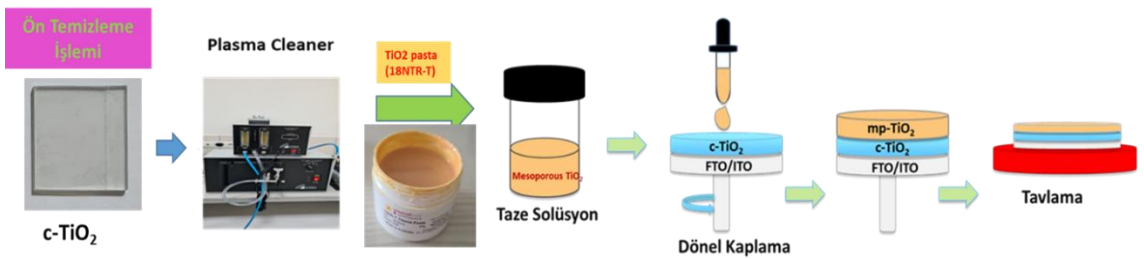
Şekil 4.3. Sol-jel yöntemiyle kompakt TiO₂ üretimi



Fotoğraf 4.2. c-TiO₂ kaplanan camlar (Damgacı vd., 2023)

4.5.2 Mezoporoz TiO₂ katmanının üretilmesi ve kaplanması

Şekil 4.4'te gösterilen aşamalar takip edilerek mezoporoz TiO₂ kaplaması yapılmadan önce c-TiO₂ plazma temizleyici içerisinde 30 dakika boyunca ön temizleme işlemine tabi tutulur. Daha sonra mesoporoz TiO₂ için; ticari TiO₂ pasta (Dyesol 18NR-T), ethanol (%99.5), susuz terpineol (Sigma-Aldrich) olmak üzere üç malzemeden 1:2:4 (Schulze vd., 2017) kütleli oranda 150 µl'lik mp-TiO₂ için ticari TiO₂ pastadan çözelti hazırlanmıştır. Çözeltinin her deney öncesi taze hazırlanmasına özen gösterilmiştir. Hazırlanan çözeltiden c-TiO₂ üzerine dönel kaplama yardımıyla önce 150 µl, 2000 rpm de 25s, daha sonra 4000 rpm 40 saniye boyunca döndürülerek kaplanır. Daha sonra 120°C'de tavlama işlemi yapılır. Daha sonra tekrar 150 µl alınır ve bu işlem ikinci kez de tekrarlanır. Son olarak kaplanan numuneler kapalı ısıt tabaka üzerine konularak 500°C de 30 dakika boyunca ısıt işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemler sonucu elde edilen mp-TiO₂ kaplı camlar Fotoğraf 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Sol-gel yöntemiyle mezoporoz TiO₂ ETL ince filminin üretilmesi



Fotoğraf 4.3. mp-TiO₂ kaplanan camlar

4.5.3 SnO₂ katmanının üretilmesi ve kaplanması

SnO₂ (kalay (IV) oksit) çözeltisi sentezlenirken çözücü olarak genellikle organik çözücüler veya su kullanılır. Seçilen çözücü, SnO₂'nin sentezlenmesi için uygun reaksiyon ortamını sağlamalı ve çözücü içinde SnO₂'nin çözünürlüğünü dikkate almalıdır. Organik çözücüler, genellikle SnO₂'nin sentezinde kullanılan çözücüler arasındadır. Bu çözücülerden bazıları metanol, etanol, izopropanol gibi alkol bazlı çözücülerdir. Bu çözücüler, SnO₂'nin iyi çözünürlüğünü sağlar ve reaksiyonu destekler. Bu çalışmada SnO₂ izopropanol ile sentezlenmiştir.

1 ml (%15 ağırlık) SnO₂ koloidal solüsyonunun 10 µl izopropanol içinde çözülmesi için manyetik balık yardımıyla 2 saat boyunca döndürülerek oda sıcaklığında bekletilir. Daha sonra filtreleme işlemi yapılır. Hazırlanan çözeltinin 0,45 µm (PTFE) filtreyle filtrelene işlemi yapılması partikül maddeyi gidermek ve çözeltinin kirleticilerden arınmış olmasını sağlamış olur. Fotoğraf 4.4 'de görülen filtrelenmiş solüsyon kaplanmaya hazır halde oda sıcaklığında bekletilir.



Fotoğraf 4.4. Sentezlenen SnO₂

Elektron transfer tabakası olarak kaplanacak SnO₂ çözeltisi kaplanmadan önce FTO alttaşı Fotoğraf 4.5'te gösterilen UV-Lamba işlemine 15 dakika boyunca tabi tutulmuştur. Bu işlem SnO₂ çözeltisini daha homojen kaplanmasını sağlamıştır.



Fotoğraf 4.5. UV Lamba

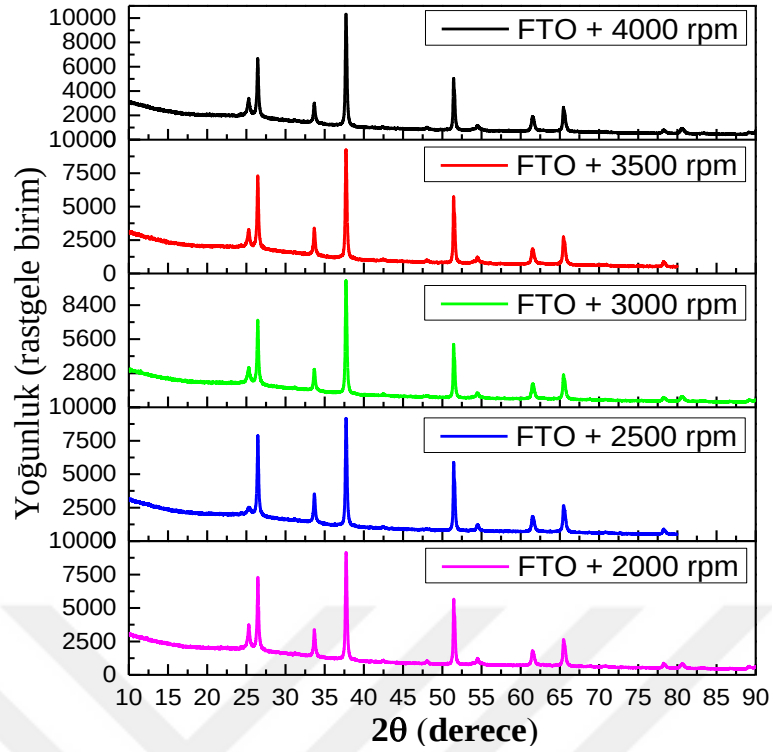
Mikro pipet yardımıyla 70 μ l SnO_2 alınır kaplamaya hazır FTO alttas üzerine aktarılarak 4000 rpm 'de 30 s boyunca döndürülerek kaplanır. Kaplama işleminden sonra dağlama işlemi yapılan alan koton bir temizleme çubuğu ile saf su ile temizlenir. Bir sonraki adım olan tavlama işlemi ısı tabaka üzerine konularak 30 dakika boyunca 150°C 'de tavlama işlemi yapılır. Daha sonra filmdeki kalıntıları gidermek için 15 dakika UV-lamba işlemi yapılarak perovskit katmanının kaplanması için eldivenli kabin içerisine alınır.

4.6 Elektron Taşıma Katmanlarının Karakterizasyonu

Üretilen ETL'lerin karakterizasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu katmanların kristal yapısı, yüzey görünümü ve kalınlık değerleri aşağıdaki gibidir.

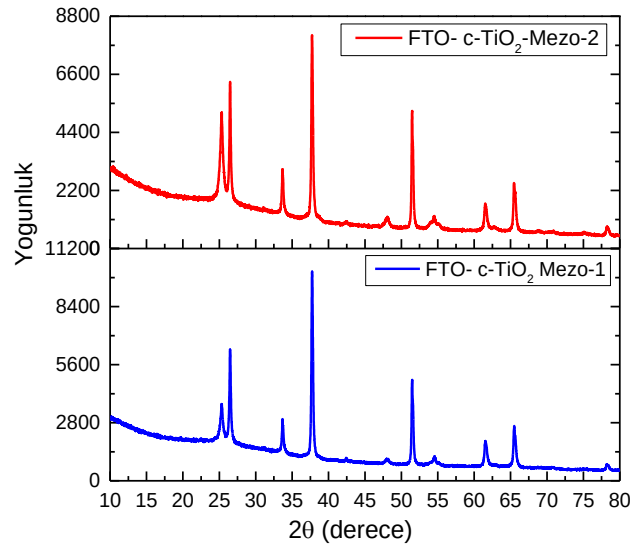
4.6.1 c-TiO₂ ve mp XRD, SEM ve kalınlık sonuçları

TiO_2 hem kristal hem de amorf formlarda, anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç kristal polimorfta bulunur. Bu çalışmada, c-TiO₂ 'ler dönel kaplama işleminden sonra 500°C 'de tavlannmıştır. Üretilen c-TiO₂'lerin XRD sonuçlarına göre TiO_2 'in anataz fazı 350°C sıcaklık ve üstünde ortaya çıkan $25,3^\circ$ 'de açık bir şekilde görülmektedir. TiO_2 'in anataz fazı, fotokatilitik aktive için en aktif kristaldır (Hashimoto vd., 2005, Fujishima vd., 2008, Nakata, K., & Fujishima, A. 2012). Anataz fazında kristallenmeye sahip c-TiO₂ yüksek verimli PGH'lerinin elde edilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada anataz fazında c-TiO₂ 'in 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 rpmlerde üretim parametrelerinde Şekil 4.5'da görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.5. 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm, 3500 rpm ve 4000 rpm’de kaplanan kompakt TiO_2 ’in ve FTO ‘nun XRD sonuçları

XRD spektrumunda $2\theta = 25.3^\circ, 38.3^\circ, 48.3^\circ, 54.3^\circ, 55.2^\circ, 63.1^\circ, 69.4^\circ, 70.5^\circ, 75.3^\circ$ ve 83.1° de gözlemlenen pikler sırasıyla (101), (004), (200), (105), (211), (204), (116), (220), (215) ve (303) kristalleridir. Tüm kırınım pikleri iyi tanımlanmıştır ve anataz TiO_2 oluşumunun açık bir şekilde gösterilmektedir. Üretilen c- TiO_2 ’lerin XRD sonuçlarına göre TiO_2 ’in anataz fazı 350°C sıcaklık ve üstünde ortaya çıkan $25,3^\circ$ ’de açık bir şekilde görülmektedir. TiO_2 ’in anataz fazı, fotokatilitik aktive için en aktif kristaldir (Fujishima, 1999; Hashimoto vd., 2005; Nakata, K., & Fujishima, A. 2012). Anataz fazında kristallenmeye sahip c- TiO_2 yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinin elde edilmesinde büyük öneme sahiptir Oryantasyon düzlemi tetragonal yapıdadır. TiO_2 ’in anataz fazı, fotokatilitik aktive için en aktif kristaldir. Kompakt TiO_2 üzerine kaplanan Mezoporoz TiO_2 XRD sonuçları aşağıdaki Şekil 4.6’deki gibidir. Mp- TiO_2 $2\theta = 25.32^\circ$ (101), $48,06$ (200) sadece anataz fazıdır.

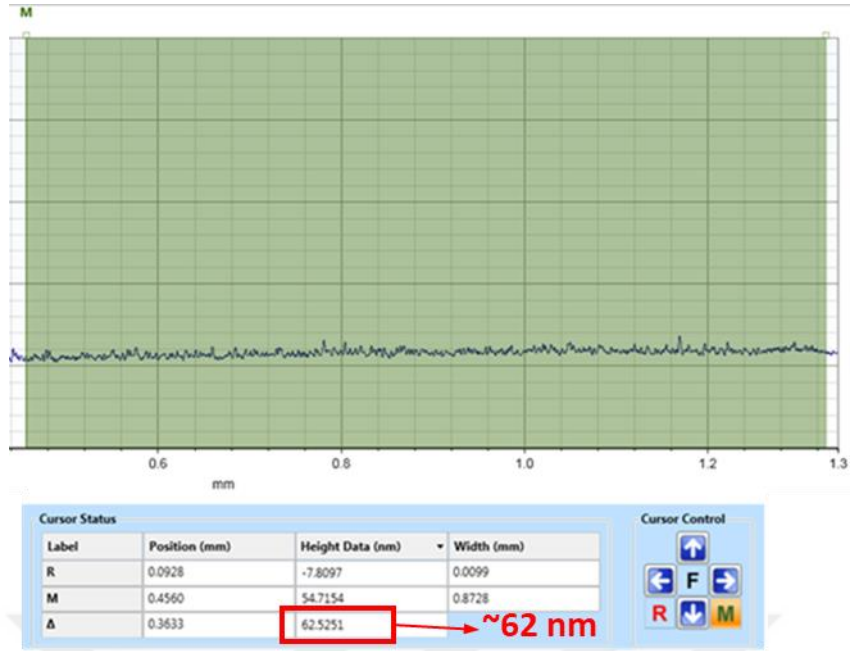


Şekil 4.6. FTO/Kompakt TiO₂ üzerine kaplanan Mezoporoz TiO₂ kaplanan ince filmlerin XRD sonuçları

Kaplanan elektron tabakasında kalınlık önemli bir parametredir. Kalınlık değerinin optimizasyonu için c-TiO₂ çözeltisinden bir pipet yardımıyla alınıp dönel kaplama cihazı üzerinde Çizelge 4.1’de verilen dönme hızı ve süresince döndürülerek kaplanmıştır. Optimum kalınlık profilometre ile ölçülmüş ve Şekil 4.8’de olduğu gibi 62 nm olarak bulunmuştur (Damgacı ve Seyhan, 2023).

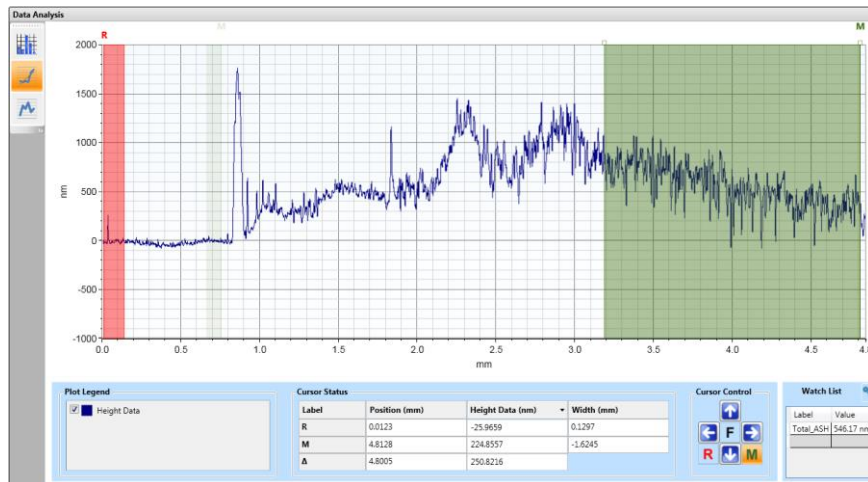
Çizelge 4.1. Üretilen c-TiO₂’in kalınlık değerleri

Kullanılan solüsyon miktarı	Döndürme hızı ve süresi	Kalınlık değeri
100 µl	1000 rpm 10s, 2000 rpm 15 s	160 nm
100 µl	1000 rpm 10s, 2500 rpm 15 s	154 nm
100 µl	1000 rpm 10s, 3000 rpm 15 s	81 nm
100 µl	1000 rpm 10s, 3500 rpm 15 s	78 nm
100 µl	1000 rpm 10s, 4000 rpm 15 s	62 nm



Şekil 4.7. c-TiO₂ profilometre kalınlık ölçümü

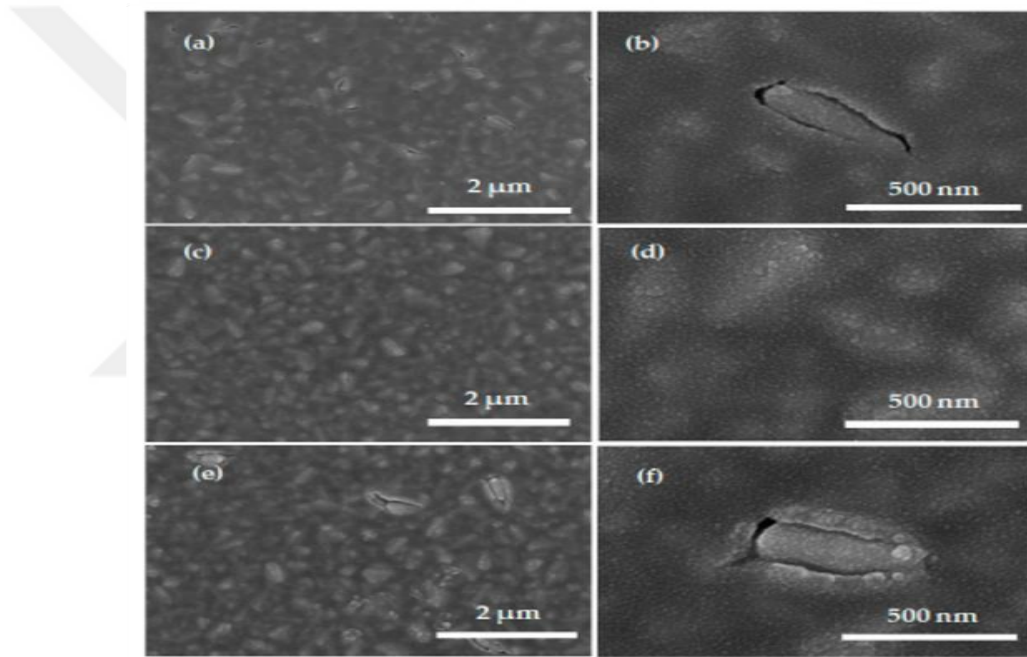
Mezoporoz TiO₂ sol gel yöntemiyle üretilmiş olup yine dönel kaplama cihazı yardımıyla kaplama işlemi yapılmıştır. Kalınlık optimizasyonu için TiO₂ çözeltisinden 150 µl bir pipet yardımıyla alınıp kaplama işlemi önce 25000 rpm’de 15 s, daha sonra 4000 rpm de 45 s dönme işlemi iki adımda gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda ortalama 250 nm kalınlık elde edilmiştir. Kalınlık aşağıda verilen Şekil 4.9’deki gibidir.



Şekil 4.8. Mesoporoz TiO₂ kalınlık değeri

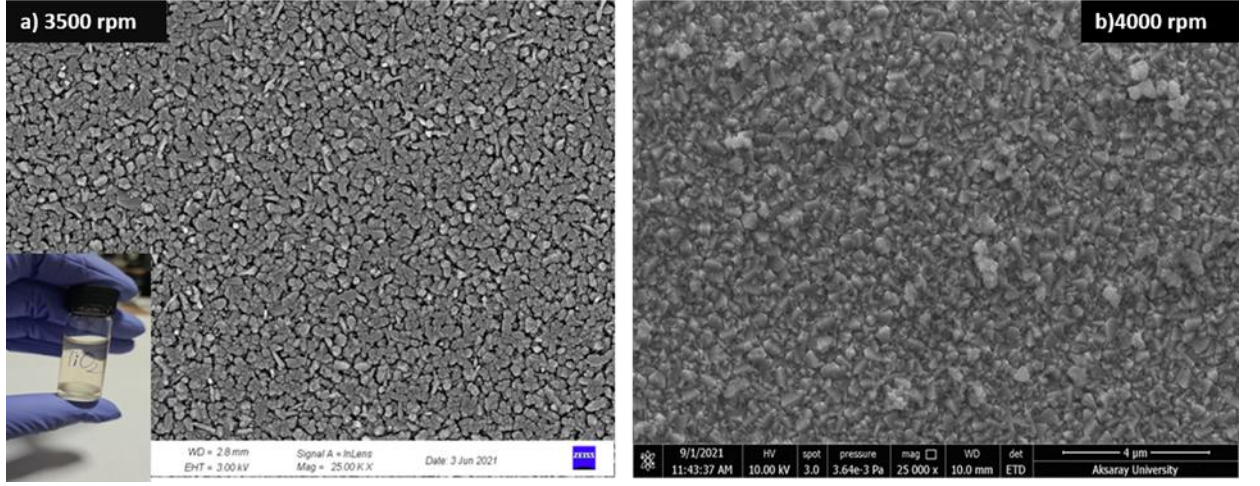
4.6.2 Kompakt TiO₂ ve Mesoporoz TiO₂ SEM Sonuçları

Kompakt TiO₂ kaplamasında sonra birçok çalışmada da zaman zaman çatlamalara (fracture) Şekil 4.9'da rastlanmıştır. Bu yapıların engellenmesi için TiCl₄ (Titanyum tetraklorür) ile yıkama işlemi yapılacaktır. Bu yapıların optimizasyonu için çalışmalar devam etmektedir. Dönel kaplama yöntemiyle kaplanan TiO₂'de oluşan çatlaklılar aşağıda sağ tarafta görülen Ren ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da ortaya çıkmıştır (şekil 4.9). TiO₂ boşluk engelleme tabakasının çatlaklarını kapatmak için basit bir döndürme kaplamalı TiO₂ 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm 'de kaplanarak ince film üretip çözüm bulmuşlardır (Ren vd., 2018).



Şekil 4.9. Red ve arkadaşlarının ürettiği c-TiO₂ ince filmde gözlemlenen çatlaklar (Ren vd., 2018)

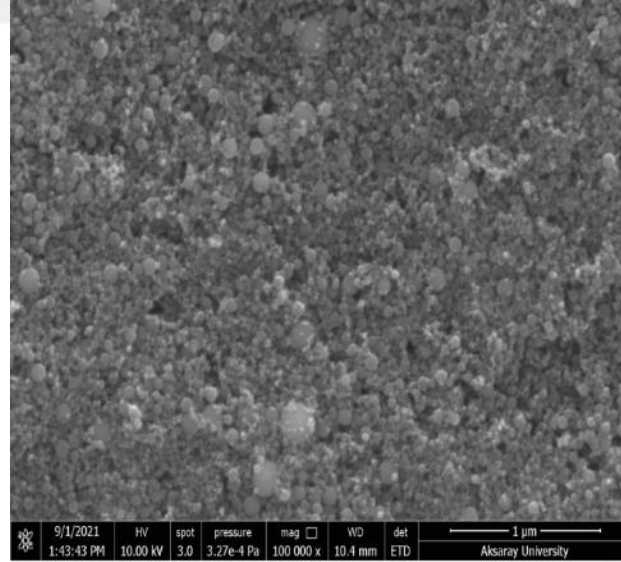
Ren ve arkadaşlarının çalışmaları da göz önüne olarak yüksek rpm de bu çatlak sorunları aşılmıştır. Dönel kaplama yardımıyla 3500 ve 4000 rpm kaplanan ince c-TiO₂ filmlerin SEM sonuçları Şekil 4.10'deki gibidir. Kompakt TiO₂ kaplamasının yüzey görüntüleri incelendiğinde, iğne deliği yapısının yok denecek kadar az olduğu ve kaplamanın FTO yüzeyine düzgün bir şekilde yerleştiği görülmüştür. İğne boşluğu yapısının az olması, perovskit güneş hücrelerinin verimliliğinin artmasına katkı sağlayan kritik bir etken olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.10. 3500 rpm (a) ve 4000 rpm’de (b) kaplanan c-TiO₂’in SEM sonuçları

Mp-TiO₂

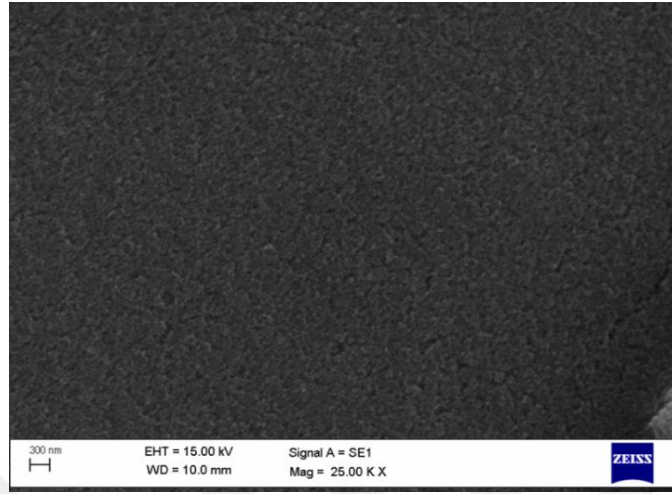
Kaplanan FTO alttaş üzerine kaplanan mp-TiO₂ yapılarının SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. Mesoporoz TiO₂ SEM Sonuçları literatür ile uyumlu olup gözenek yapıları Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Mp-TiO₂

Mezoporoz TiO₂ ‘in hücre verimliliğini etkileyen iğne delik yapısının olmaması önemli bir parametredir. FTO/c -TiO₂ /Mp-TiO₂ konfigürasyonunda kaplama sonrası yüzeyden

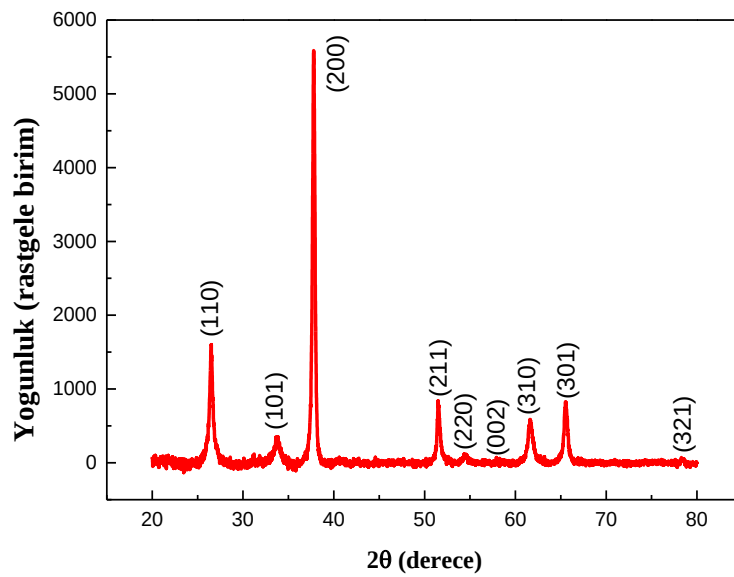
alınmış bir diğer SEM görüntüsü aşağıdaki gibidir. 200 nm’de yüksek büyütme görüntüsü Şekil 4.12’teki gibidir.



Şekil 4.12. FTO/c -TiO₂ /Mp-TiO₂ yüzey görüntüsü

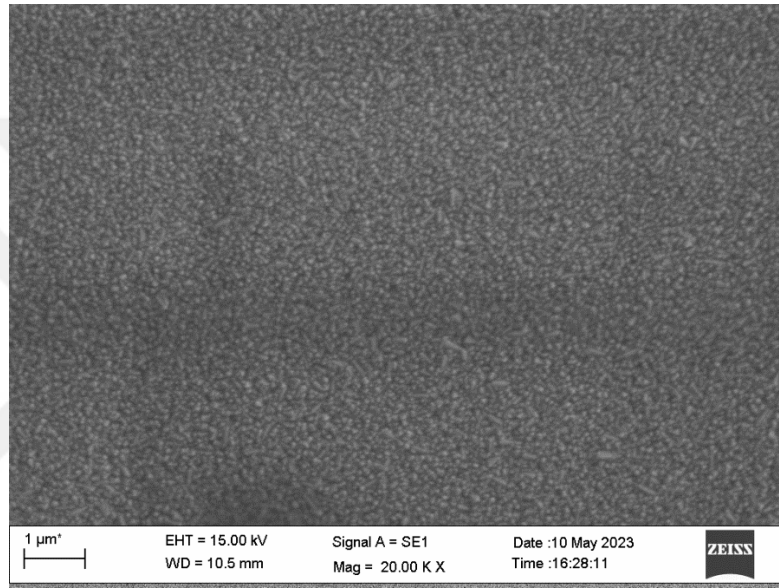
4.6.3 SnO₂ XRD, SEM ve Kalınlık sonuçları

SnO₂ ince filmlerin XRD profilleri, $2\theta = 26.6^\circ$, 33.8° , 38° ve 51.7° ’de sırasıyla (110), (001), (020) ve (121) olmak üzere dört kırınım tepe noktasında görülmüştür (Şekil 4.13). Kristal yapısı tetragonal bir yapıdır. Kırınım tepe noktalarının tümü, SnO₂’nin tetragonal fazı ile iyi bir uyum içindedir. Kart numarası 98-009-1517.



Şekil 4.13. SnO₂ elektron iletim katmanının XRD sonuçları

Şekil 4.14'teki SEM sonuçlarına bakıldığında düz, üniform ve iğne deliği içermeyen yüzeyi görülmüştür. Bu özellikler, ETL'nin perovskit katmanı ile daha iyi bir arayüz oluşturmaya olanak tanır. Üniform ve pürüzsüz bir yüzey, perovskit katmanının homojen şekilde kaplanmasını sağlar, bu da kusur yoğunluğunu azaltarak iğne deliği gibi yapısal kusurların oluşumunu engeller. Ayrıca, düzgün bir SnO₂ yüzeyi, elektronların taşınma hızını artırarak rekombinasyon kayıplarını en aza indirir. Bu durum, PGH'lerinin optik ve elektriksel verimliliğini olumlu yönde etkiler, böylece cihazın genel performansını artırarak daha yüksek verimlilik değerlerine ulaşılmasını sağlar.

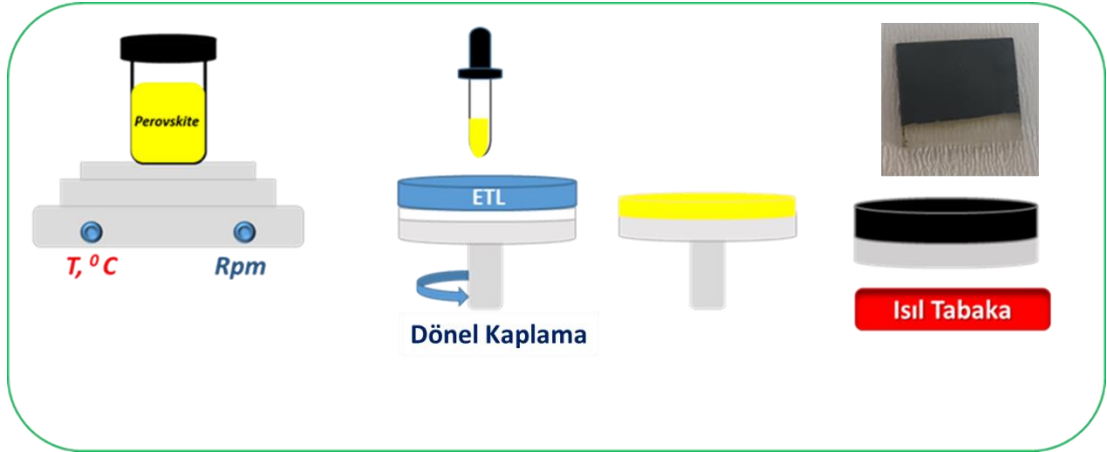


Şekil 4.14. SnO₂ elektron iletim katmanının SEM görüntüsü

4.7 Perovskit Soğurucu Katmanının Üretilmesi ve Karakterizasyonu

ETL kaplama işlemi bittikten sonra perovskit katmanı kaplama işlemi için eldivenli kabin içerisine transfer edilmiştir. Perovskit katmanı kaplanmadan önce, kaplanmış ETL kaplı alttaş bir süre düşük sıcaklıkta ısıtılmıştır. ETL katmanı üzerine, molar oranı 1:1:4 olan ve metilamonyum iyodür (MAI), PbCl₂ ve PbI₂'yi DMF içinde içeren CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x formülasyonu ile kaplanmıştır. Molar oranı 1:1:4 olan ve metilamonyum iyodür (MAI), PbCl₂ ve PbI₂'yi DMF (dimetilformamid) içinde içeren CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x formülasyonu, perovskit katmanının yapısında kullanılan özel bir kimyasal bileşimdir. Bu formülasyonda, metilamonyum iyodür (MAI) perovskitin organik kısmını oluşturarak, metilamonyum (CH₃NH₃⁺) iyonlarının kristal yapıyı destekleyen A konumunda yer

almasını sağlar. Kurşun (II) iyodür (PbI_2) ise kurşun atomlarını (Pb^{2+}) sağlayarak, perovskit yapısında metal kısmını oluşturur. Kurşun (II) klorür (PbCl_2), iyodür iyonlarının bir kısmının klor iyonları (Cl^-) ile yer değiştirmesine olanak tanıyarak perovskitin optoelektronik özelliklerini iyileştirir. Bu değişim, perovskit yapısının enerji band aralığını etkileyerek ışık soğurma kapasitesini ve taşıyıcı taşınımını optimize eder. Tüm bileşenler DMF içinde çözülür, böylece homojen bir karışım elde edilir ve kaplama işlemi sırasında düzgün ve kaliteli ince filmler oluşturulabilir. Bu oranlar (1 mol MAI, 1 mol PbCl_2 , 4 mol PbI_2) perovskitin yapısal ve elektronik özelliklerini optimize ederek güneş hücrelerinin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar. Kaplanan katman daha sonra 60 °C'de bir saat süreyle sıcak tabla üzerinde ısıtılmıştır. Ardından, perovskit çözeltisi 0.45 μm 'lik bir PTFE filtre aracılığıyla ETL katmanının üzerine damlatılmış ve 4000 rpm'de 45 saniye boyunca döndürülmüştür. Bu işlemin ardından, 70 °C'de 25 dakika boyunca ısıl tabaka üzerinde tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tavlama işleminden sonra ince filmin siyaha dönüşmesi perovskitin istenilen kristal yapıda bir incefilm olduğu gösteren ön tanı gibi düşünülebilir. Ancak ince film kalitesinin belirlenmesi için fiziksel ve optik özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir. Tüm bu işlemler, Şekil 4.15'da gösterilmiştir. Üretilen perovskit ince filmlerin karakterizasyonu SEM, XRD ve profilometre ile yapılmış ve sonuçlar karakterizasyon kısmında verilmiştir.

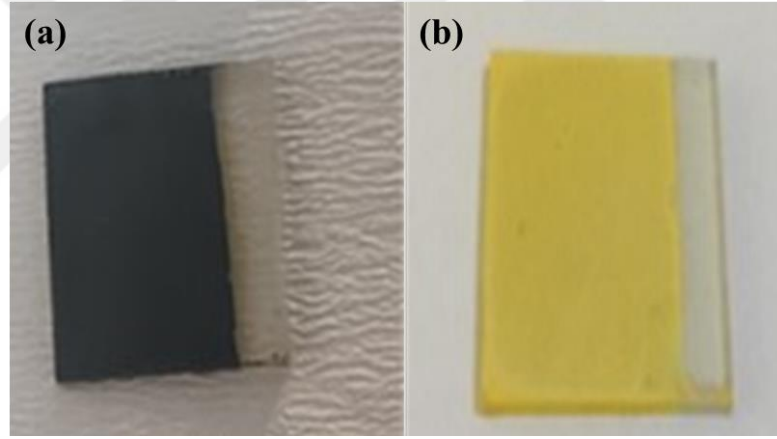


Şekil 4.15. Perovskit tabakasının üretilmesi

4.7.1 Üretilen perovskit ince filmlerin sarı faz, iğne deliği ve çubuksu yapı sorunu

Altaş üzerine ETL ve perovskit kaplandıktan sonra tavlama işlemi ısıl tabaka ile yapılır. Kaplanan perovskitin sıcaklıkla önce siyah daha sonra sarı renge dönüşmesine ikincil faz

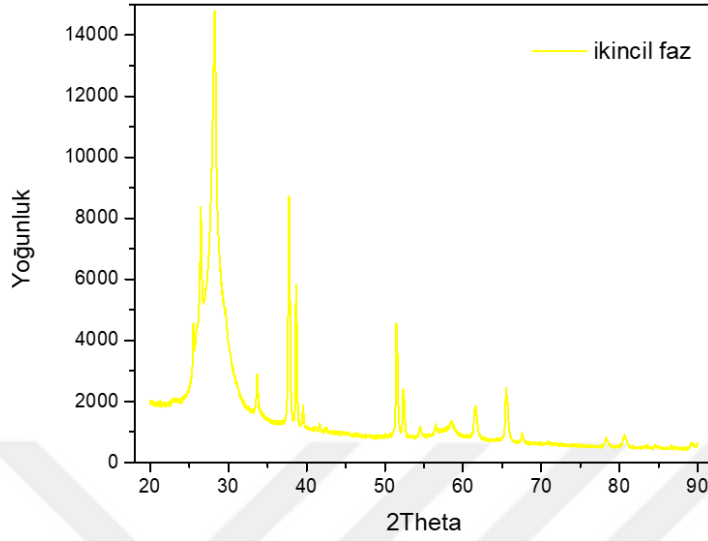
geçiş bir diğer adıyla sarı faz geçişi denir. Bu faz, kristal yapıyı azaltır, aygıt performansını ve stabiliteyi düşürür. Bu konuda birçok araştırma mevcut olup Guanda ve arkadaşları MAPbI₃'ün, yüksek nem altında MAPbI₃'ten PbI₂'ye ayrışması nedeniyle rengi normalde koyu kahverengiden veya siyahtan sarı renge 24 saatten daha kısa bir sürede değiştiği için, MAPbI₃'ün nemli havaya karşı çok hassas olduğunu belirtmiştir (Niu vd., 2014). Fotoğraf 4.6'de görüldüğü gibi, bu çalışmada kullanılan perovskit çözeltisi her ne kadar eldivenli kabin içerisinde kaplansa da sistem içerisindeki nem dengesi zamanla değiştiği için zaman zaman kaplanan perovskit çözeltisi de alttaş üzerine kaplandıktan sonra rengi siyahtan sarı renge dönüşmüştür. Bu yüzden deneysel çalışmaya başlandığında nem değerlerine dikkat edilmelidir. Ayrıca kaplanan alttaşın tavlama işlemine geçtiğinde ani sıcaklık değişimi, nem ile birlikte alttaşın renk değişimine sebep olmaktadır. Buna ek olarak tavlama işleminde sadece sıcaklık değil tavlama süresinin artırılması da ikincil faz değişimine neden olmaktadır.



Fotoğraf 4.6. Perovskit incefilmlerde (a); ikincil faz (sarı faz) (b) geçişi

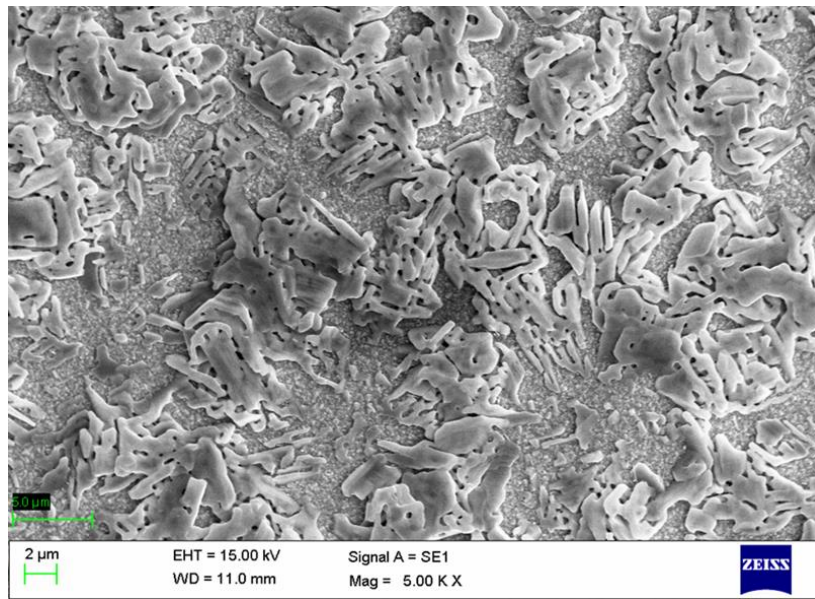
Perovskit malzemelerinde ikincil fazların oluşumu, XRD analizlerinde belirgin ek pikler şeklinde ortaya çıkarak, saf perovskit yapısının bozulduğunu gösterir. Bu fazlar, SEM görüntülerinde malzeme yüzeyinde düzensiz kristal büyümesi ve faz ayrışması şeklinde gözlemlenebilir. Ayrıca, ikincil fazların varlığı hem kristal kalitesini hem de cihazın optik-elektronik performansını olumsuz etkileyebilir. Sarı faz oluşumundan sonra SEM ve XRD sonuçlarına bakılmıştır. XRD analizinde belirgin kristal piklerinin zayıflamasına veya kaybolmasına yol açar. Bu durum, yapının düzenliliğinin azaldığını ve amorf özelliklerin arttığını gösterir. Sarı faz ayrıca kristal yapıdaki düzensizlikleri artırarak pik genişlemelerine ve yeni fazların oluşumuna neden olabilir. Bu yeni fazlar, XRD

deseninde farklı pikler olarak Şekil 4.16'da görülmüştür, bu da sarı fazın varlığını doğrulamaktadır.



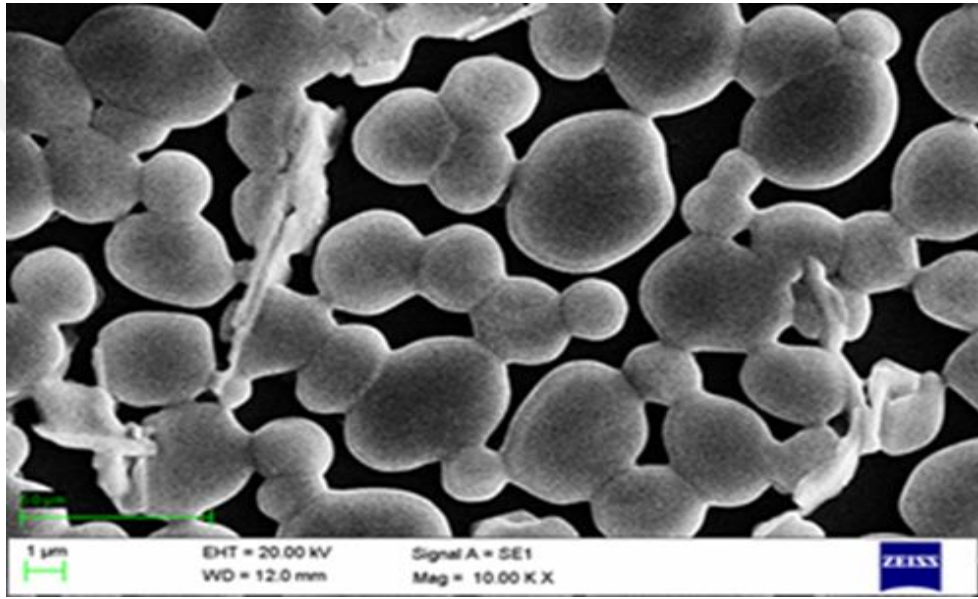
Şekil 4.16. Perovskit ince filmde sarı faz XRD pikleri

Sarı faz oluşumu, yüzeyde düzensizliklere ve morfolojik kusurlara yol açar. SEM analizlerinde bu yüzey düzensizlikleri, çatlaklar, iğne yapı ve boşluklar (pinholes) olarak gözlemlenebilir. Bu tür morfolojik kusurlar, perovskite katmanının homojenitesini bozarak cihaz performansını olumsuz etkiler. Bu kusurların görünümü Şekil 4.17'de SEM morfolojik karakterizasyonunda görüldüğü gibidir.



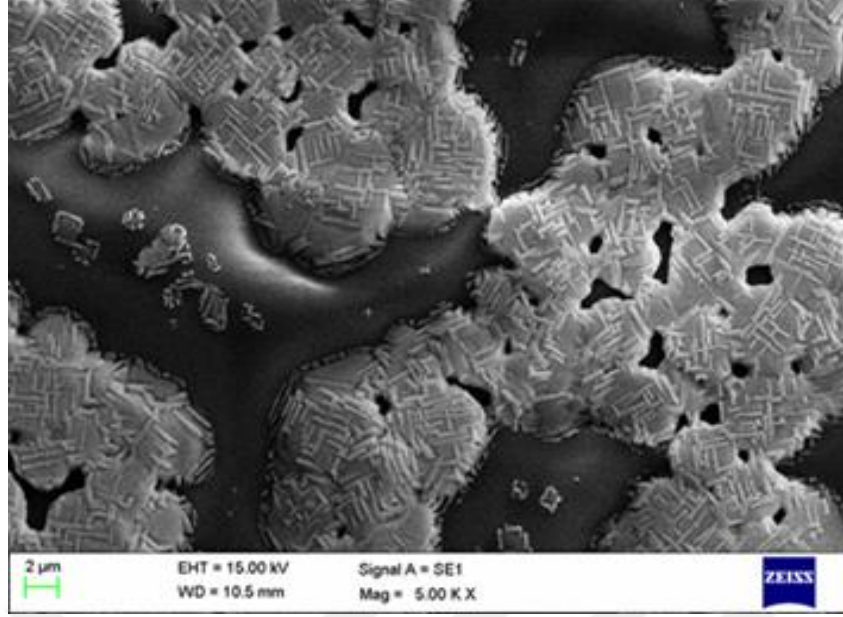
Şekil 4.17. İkincil fazın SEM görüntüsü

Perovskit ince filmlerin üretiminde karşılaşılan bir diğer problem de iğne deliği oluşumudur. İğne boşlukları, filmdeki düzensiz kristal büyümesi ve malzeme içindeki kusurlar nedeniyle oluşan mikroskobik lerdir. Bu boşluklar, filmin homojenliğini bozar ve elektriksel sızıntılara yol açarak cihaz performansını düşürür. İğne deliklerini azaltmak için, çözelti işleme koşullarının iyileştirilmesi ve kaplama tekniklerinin optimize edilmesi önemlidir. Örneğin, dönel kaplama hızının ayarlanması ve tavlama sürelerinin optimize edilmesiyle, ince film yüzeyinde daha homojen bir yapının elde edilmesi sağlanabilir (Saliba vd., 2016). Bu tez çalışma sırasında da üretilen filmlerde böyle bir sorun yaşanmıştır bu sorunun sem görüntüsü şekil 4.18’deki gibidir.



Şekil 4.18. İğne delik yapısının oluşması

Perovskit ince filmlerinin üretiminde sık karşılaşılan bir diğer problem ise çubuksu yapıların (rod-like structures) oluşumudur. Bu yapılar, perovskitlerin düzensiz kristalleşmesi sonucu oluşur ve yüzeyde homojen bir ince film yerine anizotropik kristal büyümelerine yol açar. Çubuksu yapılar, perovskitlerin optoelektronik performansını olumsuz etkileyerek ışık soğurma ve taşıyıcı taşınım özelliklerini azaltır. Çubuksu yapıların oluşumunu önlemek için, film üretim süreçlerinde çözücü buharlaştırma hızı ve tavlama sıcaklıklarının kontrol edilmesi gibi kristalleşme süreçlerine müdahale edilebilir (Zhang vd., 2017). Tez çalışma süresince üretilen filmlerin SEM sonuçlarında da buna rastlanmaktadır. Bu görünüm Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



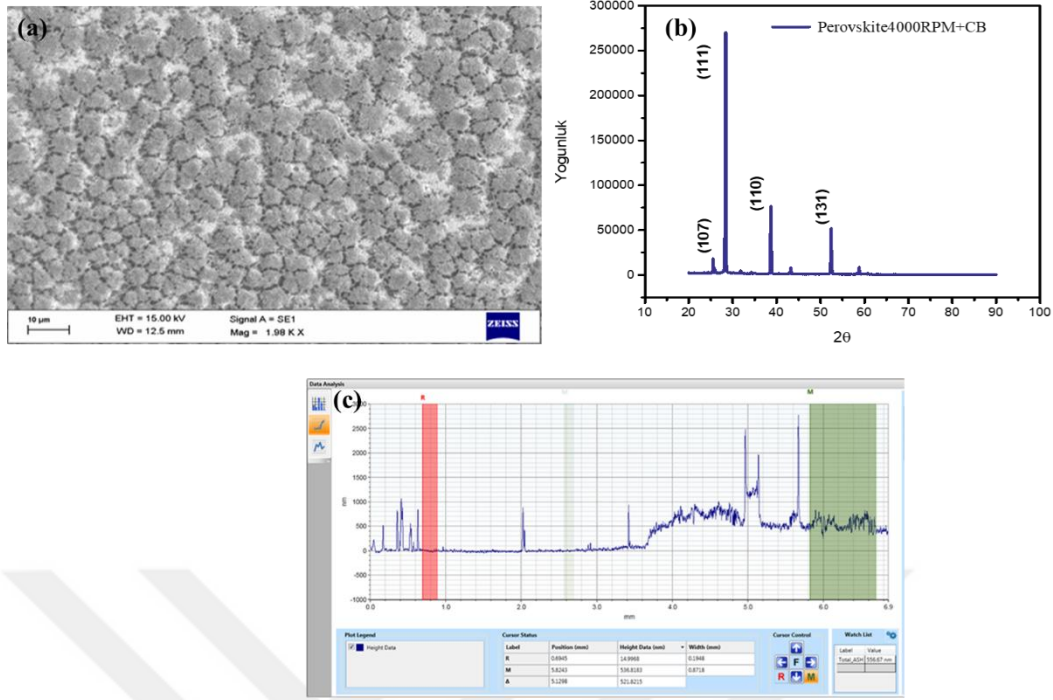
Şekil 4.19. Çubuksu Yapıların SEM görünümü

Antisolvent damlatma yöntemine ek olarak sıcaklık optimizasyonu, perovskit ince film üretiminde sarı faz, iğne deliği ve çubuksu yapı sorunlarının çözümünde kritik bir rol oynamaktadır. Sıcaklık optimizasyonu, perovskit kristal büyüme dinamiklerini kontrol ederek, daha homojen film yapısının oluşmasını sağlar ve malzemenin kararlılığını artırır. Sarı faz sorununa karşı, düşük sıcaklıkta uzun süreli tavlama işlemleri sarı fazın oluşumunu engelleyerek kararlı siyah fazın korunmasına yardımcı olmaktadır. Özellikle, 100°C civarında optimize edilen tavlama süreçleri, FA-Cs katyon kombinasyonlarının kullanımıyla siyah fazın stabilitesini artırmaktadır. İğne boşluğu sorununa yönelik olarak, sıcaklık kontrolü çözücünün homojen buharlaşmasını sağlayarak, kristal büyümesini iyileştirir ve mikroskobik boşlukların oluşumunu engeller. Çeşitli çalışmalarda, 60°C ile 100°C arasında yapılan düşük sıcaklık tavlamaları, filmin homojenliğini artırarak iğne deliklerinin azaltılmasında etkili olmuştur (Liu vd., 2020). Çubuksu yapı sorununda ise, sıcaklık optimizasyonu çözücünün buharlaşma hızını düzenleyerek kristal çekirdeklenme hızını kontrol eder ve düzenli kristal büyümesini sağlar. 70°C ile 100°C arasında yapılan tavlama işlemleri, kristal büyümesini optimize ederek çubuksu yapıların oluşumunu engellemiş ve homojen filmler elde edilmiştir (Zhou vd., 2022). Bu yöntemler, perovskit film homojenliğini iyileştirerek, cihazların optoelektronik performansını artırmakta önemli katkılar sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında perovskit soğurucu katmanında bu sorunların çözülmesi için perovskit katmanın kaplanmadan hemen antisolvent damlatılmış ve sıcaklık optimizasyonu yapılarak perovskit soğurucu katmanı optimize edilmiştir. Bu optimize edilme işlemleri alt başlıklarda açıklanmıştır.

4.7.2 Perovskit katmanı kaplanma işleminden önce antisolvent damlatma yöntemi

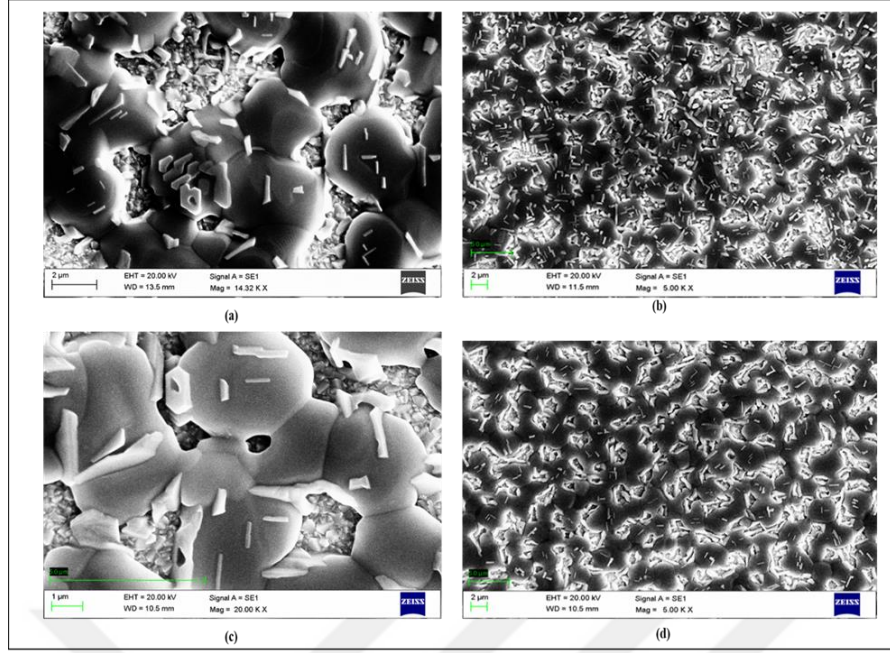
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ zengin karışım perovskit çözeltisi, DMF içinde çözülerek hazırlanmıştır. Çözeltinin hazırlanmasının ardından, film kaplama işlemi tek aşamalı dönel kaplama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ancak filmin morfolojik ve fiziksel yapısında iğne deliği, çubuksu yapıların bulunması ve renginin mat siyahtan sarı renge dönüşmesi perovskitin film kalitesini ve güneş hücresindeki performansı üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu yüzden bu tez çalışmasında perovskit ince filmlerin kaplanmasından hemen sonra antisolvent olarak klorobenzen (CB) kullanılmıştır. Tek adımda dönel kaplama yöntemiyle 50 µl pipet yardımıyla alınıp perovskit hücre kaplanmadan son 10 saniye içerisinde tek adımlı kaplama işlemi yapılmıştır. Klorobenzen antisolventinin kullanımı, perovskite filmlerin morfolojik özelliklerinde belirgin iyileşmelere yol açmıştır. SEM Şekil 4.20 (a) 'da görüntüleri, klorobenzen uygulanan filmlerin daha düzgün ve homojen bir yüzey yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Kristal büyüklüklerinde gözlemlenen artış, perovskite filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunmuştur. XRD analizleri Şekil 4.20 (b)'de klorobenzenin filmde kristal yapının düzenlenmesini sağladığını ve perovskite yapısının daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığını doğrulamıştır. XRD analizleri literatür sonuçlarına da uygun 14,28 (110), 28,52 (220) ana pikleri ile uyumluluk göstermektedir. Ayrıca üretilen perovskit ince filmlerin kalınlıkları ölçülmüş Şekil 4.20 (c) 'deyaklaşık 520 nm kalınlık değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.20. Antisolvent uygulamasını sonucu SEM görüntüleri (a), XRD sonuçları (b), Kalınlık değerinin ölçülmesi (c)

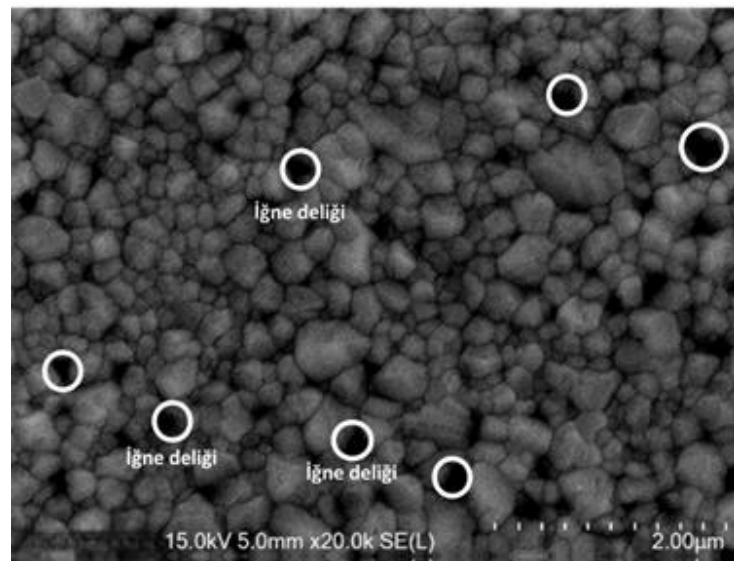
4.7.3 Perovskit katmanında tavlama sıcaklığının optimizasyonu

Sıcaklık optimizasyonu, perovskite film üretiminde çubuksu yapı, pin hole ve sarı faz sorunlarını etkili bir şekilde çözme potansiyeline sahiptir. Perovskite filmlerinin yüksek sıcaklıkta (100°C ila 200°C) işlenmesinin çubuksu yapıların oluşumunu azalttığını ve film kalitesini artırdığını göstermiştir (Liu vd., 2021). Zhang ve arkadaşları ise iğne delik kusurlarının düşük sıcaklıkta (50°C ile 80°C) yapılan inkübasyon işlemleri ile önemli ölçüde azaltıldığını ortaya koymuştur (Zhang vd., 2022). Sarı fazın sıcaklık aralıklarında (80°C ile 150°C) yönetilmesi, sarı faz oluşumunu etkili bir şekilde kontrol ederek perovskite filmlerin stabilitesini artırmada önemli bir strateji olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, perovskite film performansını ve uzun ömürlülüğünü önemli ölçüde iyileştirebilmektedir (Chen vd., 2023). Bu tez çalışmasında, sıcaklık optimizasyonunun perovskite film üretimindeki çeşitli problemleri çözmede nasıl etkili olduğunu ve verimliliği artırabileceğini vurgulamaktadır. Bu çalışmada 80°C ve 100°C’de sıcaklık optimizasyonlarıyla birlikte 3000 rpm de ve 4000 rpm de hızlarında da çözeltinin dinamik kaplanması göz önüne alınmıştır. Bu parametrelerde üretilen ince filmlerin SEM sonuçları aşağıdaki Şekildeki 4.21’deki gibidir.



Şekil 4.21. Perovskit ince filmler üretilirken sıcaklık optimizasyonu (a) DMF ve perovskite 3000 rpm de 80°C’de, (b) DMF ve perovskite 4000 rpm de 80°C’de, (c) 3000 rpm de perovskite 100°C, (d) 4000 rpm de perovskite 100°C uygulamasının SEM görüntüleri

Son olarak 100°C ‘de 4000 rpm’de kaplanan perovskit ince filmler 30 dakika tavlama işlemi yapılmıştır. Bu sıcaklık ve rpm aralıklarına ek olarak tavlama süresi eklenerek ve antisolvent işlemi de yapılarak sıcaklık perovskit ince filmin morfolojik görünümü iyileştirilmiş ve son hali Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. Sıcaklık optimizasyonu ve son adımda antisolvent eklenerek perovskit ince filmin SEM görüntüsü

Şekilde 4.22’de görüldüğü üzere perovskit ince filmde çubuksu yapı ve sarı faz sorunu çözülmüştür. Film homojen bir şekilde kaplanmış ancak yine de ara ara iğne deliği yapılar görülmektedir. Üretim işlemi eldivenli kabin içinde olmasına rağmen iğne deliği oluşumu, genellikle nem ve sıcaklık kontrolündeki yetersizliklerden kaynaklanabilir. Eldivenli kabin nem seviyesi 1 ppm’in altında tutulmalıdır, ancak bu değerin üzerinde nem, perovskit kristal yapısında bozulmalara yol açarak iğne deliği oluşumunu tetikleyebilir. Sıcaklık kontrolü de kristalleşme sürecinde kritik bir faktördür; sıcaklık dalgalanmaları kristal büyümesinde düzensizlikler yaratabilir ve ince filmde kusurlar oluşabilir. Bu durum hücre üretimi tamamlandıktan sonra PGH’lerinde düşük verimliliğe neden olan etkilerden biri olmuştur.

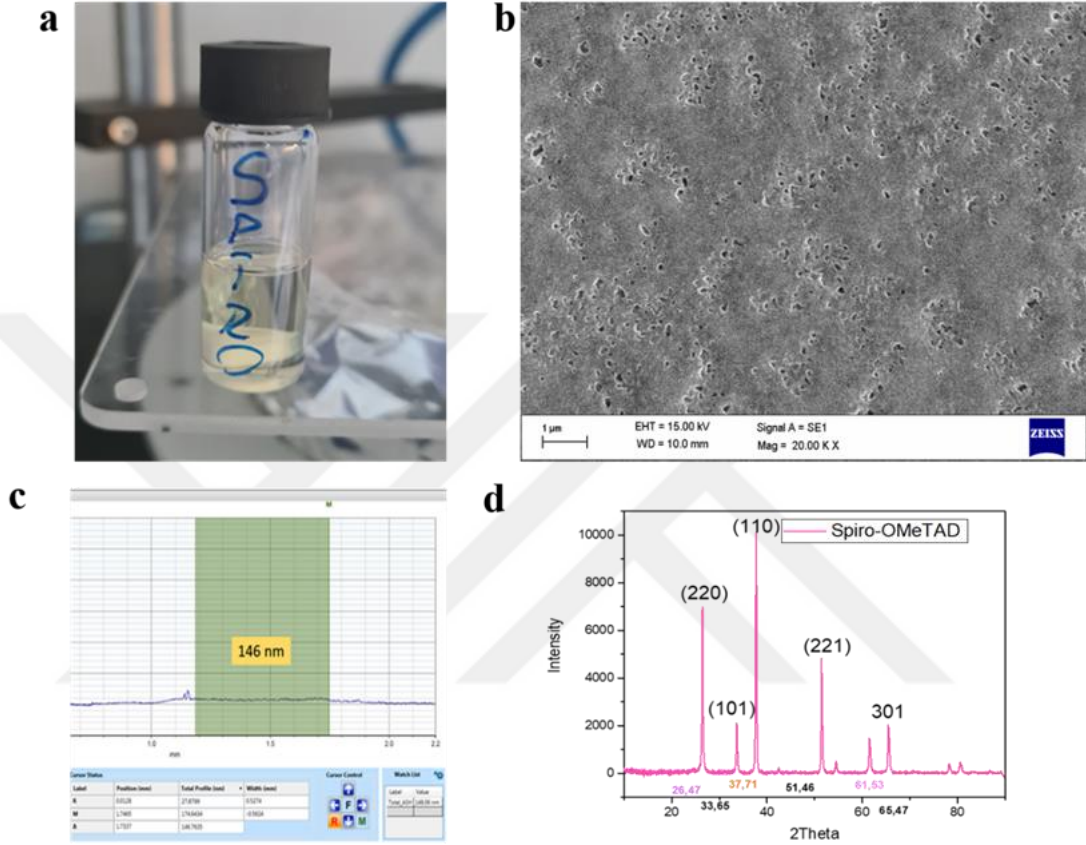
4.8 Boşluk Taşıma Katmanı Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Son zamanlarda, spiro-OMeTAD HTL, PGH’ler de kullanıldı ve artan PCE’ye katkıda bulundu. Spiro-OMeTAD’in enerji seviyeleri, perovskite ve duyarlılaştırıcı gibi soğurucu katmanlarla iyi bir şekilde eşleşmiştir (Cheong, vd., 2018). Ancak Spiro-OMeTAD hızla bozunma özelliği onu aygıt yapısında en zayıf halka olarak görülemesine sebep olmuş ve bu yüzden yeni malzemeler araştırılmıştır. Hem küçük moleküle hem de polimere dayalı birçok yeni boşluk taşıma malzemesi geliştirilmiş olsa da, Spiro-OMeTAD hala hem BDGH’lerde hem de PGH’lerde en başarılı HTM’ler olarak kabul edilmektedir ve bu iki tür fotovoltaiik cihazların rekor verimlilikleri Spiro kullanılarak elde edilmiştir.

Perovskit güneş hücrelerinin eşsiz özelliklerinin yanı sıra dış etmelerin (oksijen, nem, uv vb.) etkisi ile kararlılık problemi devam etmektedir. Bu problemi çözebilmek için boşluk taşıyıcı tabakası (HTL) kullanılmaktadır. İdeal bir HTL, yüksek boşluk mobiliteli, kararlı, kolay sentezlenebilen, perovskit tabakasının değerlik bandı ile uyumlu bir HOMO enerji seviyeli, perovskit tabakasından boşluk iletimini sağlayan ve perovskit tabakasının kararlılığını koruyacak özelliklere sahip olmalıdır. Bu çalışmada literatürde en yaygın olarak kullanılan yüksek verimli perovskit güneş hücre yapısını sağlayan Spiro-OMeTAD boşluk iletim malzemesi kullanılmıştır.

Bu çalışmada 1 ml chlorobenzen içerisine 72 mg Spiro-OMeTAD ve 30 µl 4-tert-butyl (TBP), 18 µl Bis (trifluoromethane) Sulfamide Lithium (1ml metilamine içerisine 520 mg 18 µl Bis (trifluoromethane) Sulfamide Lithium) eklenerek çözelti hazırlanmıştır. Bu

çözelti, bir gece boyunca manyetik balık yardımıyla döndürülerek bekletilmiş daha sonra perovskit üzerine dönel kaplama yardımıyla 4000 rpm de 20s boyunca dinamik kaplama işlemi yapılmıştır. Sentezlenen bu HTL'nin sentez hali, SEM görüntüleri, kalınlık görüntüleri ve XRD sonuçları Şekil 4.23'te verilmiştir.



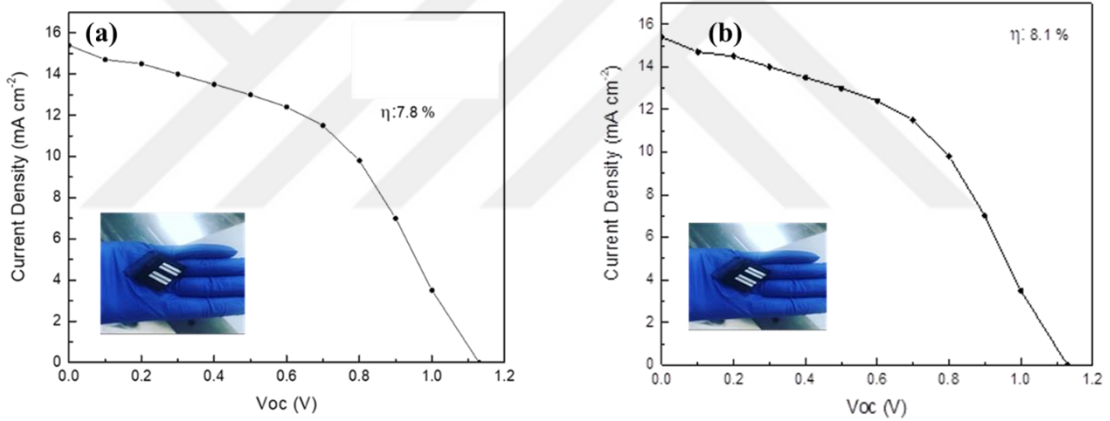
Şekil 4.23. Spiro-OMeTAD ince filminin karakterizasyonu. (a) Spiro-OMeTAD solüsyonu. (b) Spiro-OMeTAD SEM görüntüsü. (c) Spiro-OMeTAD kalınlık ölçümü. (d) Spiro-OMeTAD XRD ölçümü.

Şekil 4.25 (a)'da kaplanmaya hazır şeffaf Spiro-OMeTAD çözeltisi gösterilmiştir. Şekil 4.25 (b)'de Spiro-OMeTAD homojen bir şekilde yüzeye kaplandığı SEM görüntüsünde görülmektedir. Ancak az da olsa iğne deliği kusurları içermektedir. İğne deliği sorunu alt katmanların da homojen olarak kaplanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.25 (c)'de ise yüzey üzerine homojen olarak kaplanan Spiro-OMeTAD ait 146 nm kalınlık değeri gösterilmiştir. Spiro-OMeTAD XRD spektrumunda $2\theta = 26,47^\circ, 33,65^\circ, 37,71^\circ, 51,46^\circ, 61,53^\circ, 65,47^\circ$ sırasıyla (220), (221), (110), (310) kristal düzlemlerindeki yansımaları olarak yorumlanmıştır (4.25 (d)). Spiro-OMeTAD, TBT ve LiTFSI ile

katkılandığı için ana piklerde (110) ve (101) Spiro-OMeTAD, (220) (221) Li TFSI, (310) TBT kristallerinin oluşumu açıkça görülmektedir.

4.9 Üst Perovskit Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesiyle Hücre Yapılarının Oluşturulması

Bu tez kapsamında 3 farklı tip perovskit güneş hücresi üretilmiştir. Bunlardan ilki FTO/c-TiO₂/ CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x/ Spiro- OMeTAD/Ag konfigürasyonuna ait hücredir. Cihaz alanı 3.8 cm² 'lik alanda ölçülen perovskit güneş Hücresinin I-V grafiği ve hücre Şekil 4.24'te görüldüğü gibidir. Buna göre hücre verimliliği % 7.8'dir (Damgacı ve Seyhan, 2021). Daha sonra bu konfigürasyon üretimine mp-TiO₂ ETL katmanını eklenerek FTO/c-TiO₂/mp-TiO₂/CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x/Spiro-OMeTAD/Ag 2.tip konfigürasyonu oluşturulmuş ve verimlilik % 8.1 değerine çıkmıştır.

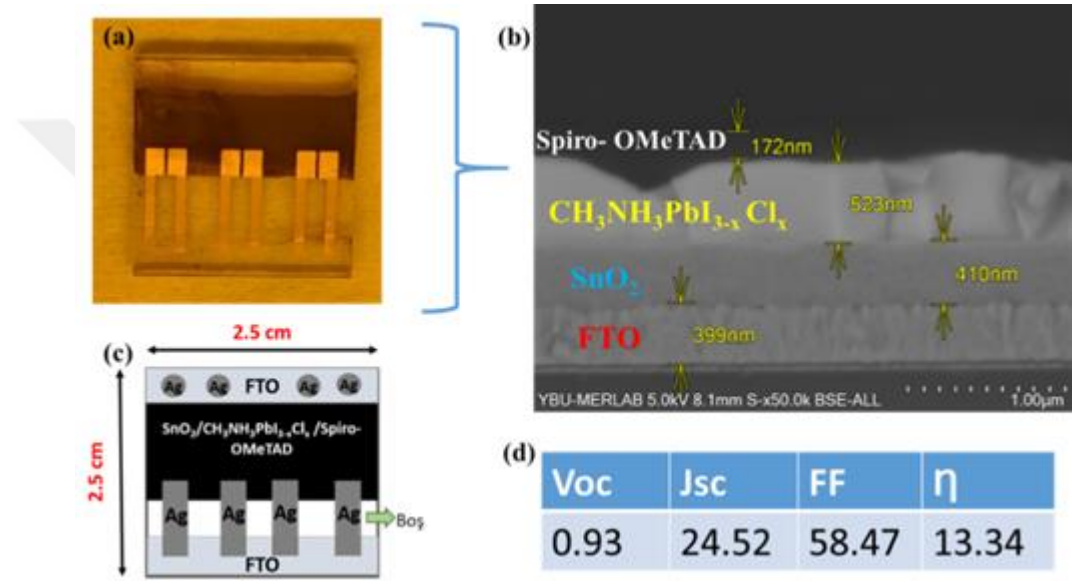


Şekil 4.24. FTO/c-TiO₂/ CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x/ Spiro- OMeTAD/Ag konfigürasyonlu hücrenin verimi (a), FTO/c-TiO₂/mp-TiO₂ /CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x/ Spiro- OMeTAD/Ag konfigürasyonlu hücrenin verimi (b)

Üçüncü perovskit hücre konfigürasyonu ise FTO/SnO₂/CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x/ Spiro-OMeTAD/Ag PGH'sidir. Bu hücre tipi 1 ve 2 hücre tipinden daha yüksek verimli çıkmıştır. Bunun sebebi olarak SnO₂'nin daha pürüzsüz kaplanması diğer katmanların daha kaliteli, homojen kaplanmasına sebep olarak verimliliği arttırmıştır.

Şekil 4.25 (a)'da bitmiş perovskit hücresi, Şekil 4.25 (b)'de ise bu hücrenin FE-SEM en kesit görüntüsü verilmiştir. FE-SEM görüntüsünde SnO₂'nin kalınlığı 400 nm'dir. Bunun nedeni kullanılan kollodial'ın zaman içerisinde derişiminin artmasıdır. Kalınlık değeri

optimize edilen şekilde olsa idi verimlilik değerin %15'lerde olabileceği düşünülmüştür. Bu sonuç bile çözeltinin her zaman en taze şekilde hazırlanması gerektiğinin göz önüne sermiştir. Şekil 4.25 (c)'de ise hücre üretimine başlanmadan önce tasarlanan hücre yapısı görülmektedir. Hücrenin gümüş kontakları ısı buharlaştırma sisteminde yapılmıştır. Ancak maskeleme bu tasarıma uygun olmadığı için ölçümden önce Ag pasta eklenmiş daha sonra verimlilik ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.25 (d)'de ise üretilen hücrenin J-V karakteristik değerleri verilmiştir. Bu değerler Voc: 0.93, Jsc: 24.52, FF: 58.47 ve son olarak verimlilik değeri ise %13.34 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.25. Perovskit hücrenin üretimi, hücrenin bitmiş hali (a), FE-SEM en kesit görünümü (b), tasarımı (c), I-V karakteristikleri (d)

BÖLÜM V

MONOLİTİK c-Si SHJ/PEROVSKİTE TANDEM GÜNEŞ HÜCRESİ

Bu bölümde Monolitik c-Si SHJ/perovskit tandem güneş hücreleri $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ alanlı ve $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alanlı 2 tip tandem hücre üretilmiştir.

5.1 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ Alanda c-Si SHJ/Perovskit Monolitik Tandem Güneş Hücresinin Üretilmesi

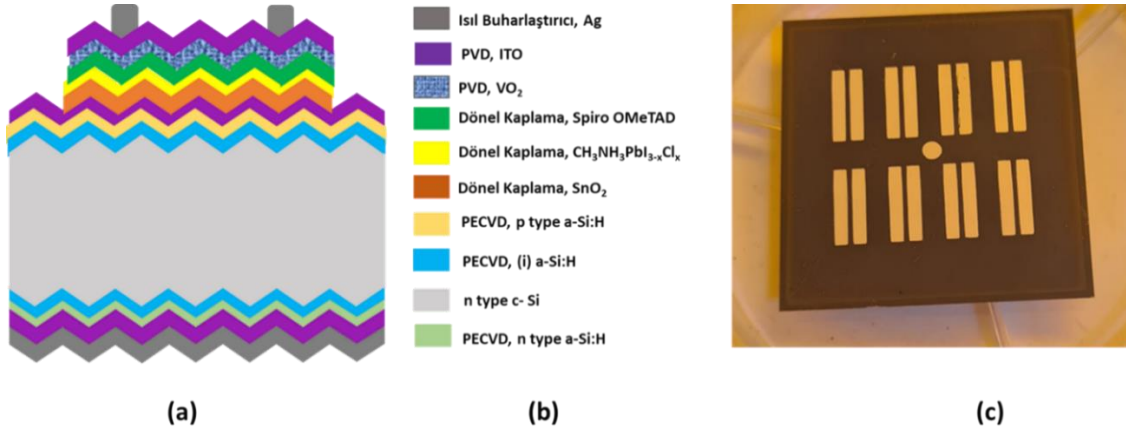
Tandem hücre üretimi için alt $5 \times 5 \text{ cm}^2$ boyutlarında (100) yönelimli n-tipi c-Si ($180 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlık) alttaş kullanılmıştır. Alttaşların temizliği ve diğer tüm katmanların: (i) a-Si:H tabakasının kaplanması; (n)-(p) a-Si:H tabakasının kaplanması; TCO tabakalarının kaplanması ve üretimi 3. Bölümde bulunan temizleme ve üretim aşamaları ile birebir aynı uygulanmıştır. Üst hücre üretimi için ise aşağıdaki üretim adımları takip edilmiştir:

- c-Si SHJ hücre katmanının son tabakası olan ITO tabakasının üzerine SnO_2 'nin kaplanması: $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alan üzerine hazırlanan ETL katmanı olan SnO_2 çözeltisinden pipet yardımıyla alınarak ITO üzerine damlatılmış ardından dönel kaplama yardımıyla 4000 rpm'de 30 saniye boyunca döndürülerek kaplanmıştır. Ardından 150°C 'de 30 dakika tavlama işlemi yapılmış ve kalınlığı yaklaşık 450 nm olarak ölçülmüştür.
- Perovskit katmanının kaplanması: Kaplanan ETL tabakasının üzerine perovskit katmanı kaplanmadan alttaş eldivenli kabin içerisine alınmıştır. Perovskit çözeltisi önce ısıtıl tabaka üzerinde düşük sıcaklıkta bir süre ısıtılmış hemen ardından hazırlanan çözeltiden 350 μl alınarak ETL tabakasının üzerine damlatılmıştır. Önce 2500 rpm de 10 saniye daha sonra 4000 rpm de 30 saniye boyunca döndürülerek iki adımda kaplama işlemi tamamlanmıştır. Ardından 70°C 'de tavlama işlemi yapılmış ve kalınlığı yaklaşık 650-700 nm ölçülmüştür.
- HTL katmanı Spiro-OMeTAD'ın kaplanması: Tavlama işlemi biten perovskit katmanının soğuması beklenmiştir. Soğuma işleminden sonra hazırlanan HTL Spiro-OMeTAD çözeltisinden 350 μl 4000 rpm de 30 saniye boyunca alınarak

dinamik kaplama yöntemiyle kaplanmıştır ve yaklaşık kalınlığı 180-190 nm olarak ölçülmüştür.

- VO₂ katmanının kaplanması: 5 mTorr Ar gaz basıncı altında 75W güç ile oda sıcaklığında HTL üzerine biriktirilmiştir. VO₂ katmanı yaklaşık 10 nm kalınlığında kaplanmıştır.
- ITO katmanının kaplanması: Spiro-OMeTAD/VO₂ üzerine ITO katmanının kaplanması PVD'de gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında 75W güç 5 mTorr Ar gazı basıncında kaplanmıştır. Kaplanan ITO'lar yaklaşık 77 nm kalınlıkta kaplanmıştır.
- Ag üst kontakların kaplanması: Hücresinin son aşaması olan üst kontaklar uygun bir maske yardımıyla ~150 nm kalınlıkta işlemi 10⁻⁶ torr basınç altında ısı buharlaştırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

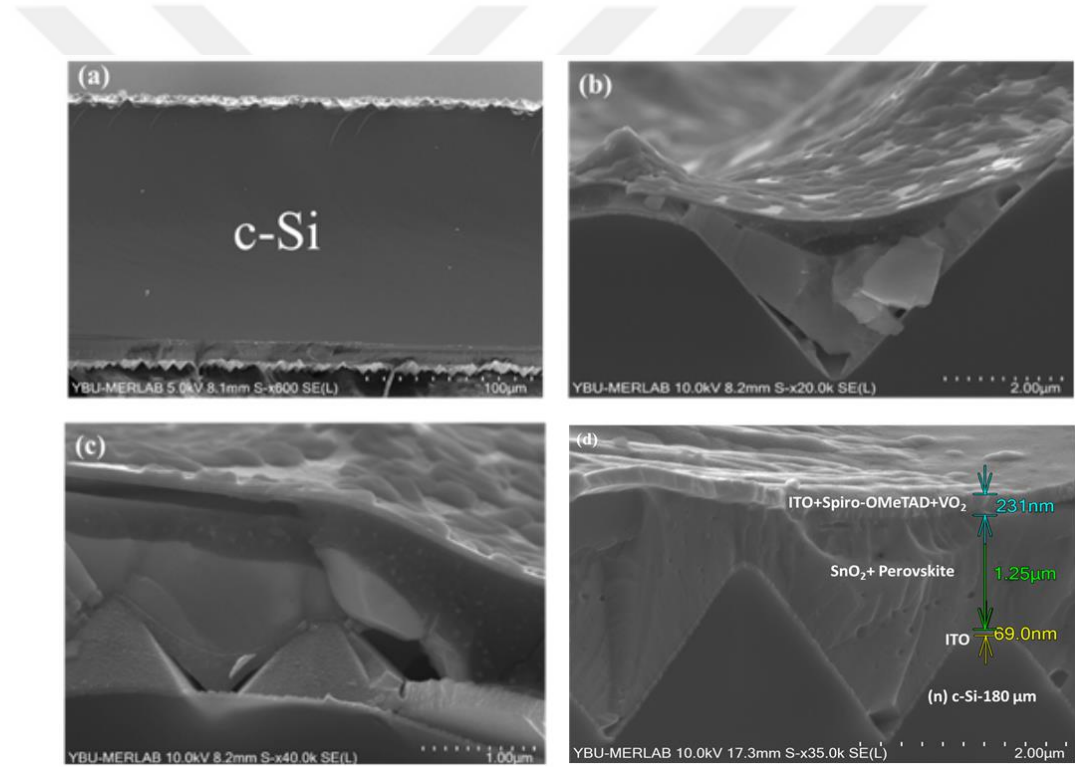
Tüm katmaların tamamlandıktan sonra 5×5 cm² alanda c-Si SHJ/Perovskit tandem hücrenin son hali Şekil 5.1'de verilmiştir.



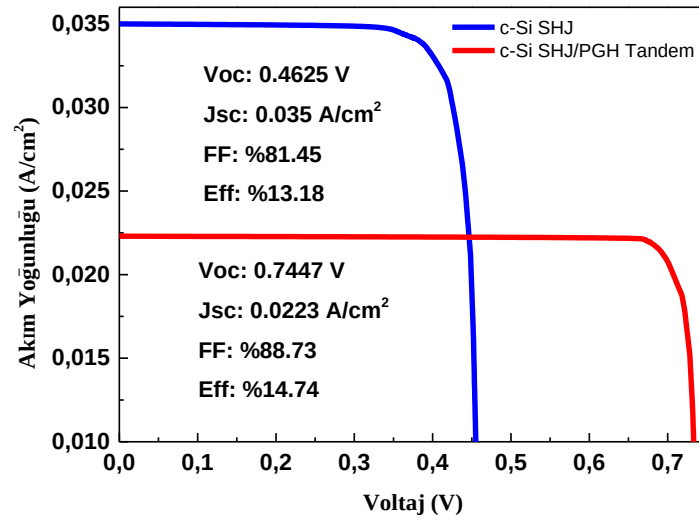
Şekil 5.1. c-Si SHJ/Perovskit tandem hücrenin şematik gösterimi (a); üretim yöntemleri (b); laboratuvar ortamında üretilmiş 5×5 cm² c-Si SHJ/Perovskit Tandem güneş hücresi (c)

5.2 5×5 cm² Alanda c-Si SHJ/Perovskit Monolitik Tandem Güneş Hücresinin Morfolojik Görünümü ve J-V Karakterizasyonu

Perovskit üst hücre yapısı, sıcaklık optimizasyonundan sonra elde edilen en iyi parametreler kullanılarak üretilen edilen c-Si Heteroeklem alt hücre yapısı üzerine entegre edilmiştir. Üst hücrede ise spiro-OMeTAD üzerine kararlılığını koruma üzere VO₂ katmanı kaplanmıştır. Öte yandan, perovskit üst hücre yapısında, kapsülleme işlemine alternatif olarak ITO katmanı kullanılmıştır. Bu yapının SEM görüntüsü Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Çalışma sonucunda verimlilik SHJ %13,18’den Monolitik c-Si SHJ/Perovskit Tandem güneş hücresi %14,74’e yükselmiştir. İlgili verimlilik grafikleri ise Şekil 5.3’te gösterilmiştir



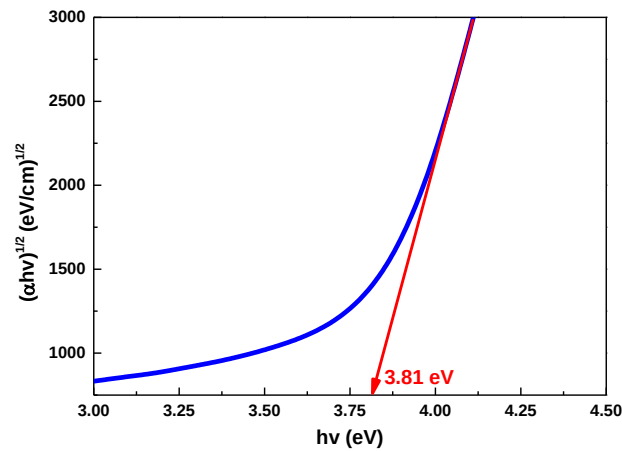
Şekil 5.2. c-Si SHJ/Perovskite tandem güneş hücresi SEM görüntüleri. (a) rastgele piramit yapılı n-tipi c-Si/ perovskit güneş hücresi geniş alan SEM görüntüsü, (b) tandem katmanların ve kalınlıklarının yakın kesit görünümü (sarı daireler iğne deliği, yeşil renkler kalınlıkları göstermektedir), (c) SHJ güneş hücresinin kesiti, (d) üst perovskit hücre yapısı



Şekil 5.3. 5×5 cm² VO₂ kullanılan hücrenin J-V grafiği

5.3 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Üretilen VO₂'nin Bant Aralığı Hesaplaması

Yarı iletken malzemelerde E_g belirlemek için görünür bölgedeki optik soğurma katsayısı (α) ve gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) gereklidir. Spiro-OMeTAD üzerine kaplanan VO₂, faz geçiş özellikleri, optik yönetim, elektriksel iletkenlik ve termal stabilite gibi avantajlarıyla perovskit ve diğer güneş hücrelerinde performans iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bu avantajlar, hücrelerin verimliliğini artırırken aynı zamanda uzun vadeli dayanıklılıklarını ve stabilitelerini de güçlendirir. Şekil 5.4'de cam üzerine büyütülen VO₂ 'nin E_g 'si Tauc metodu ile hesaplanmış ve 3.81 eV değeri elde edilmiştir.

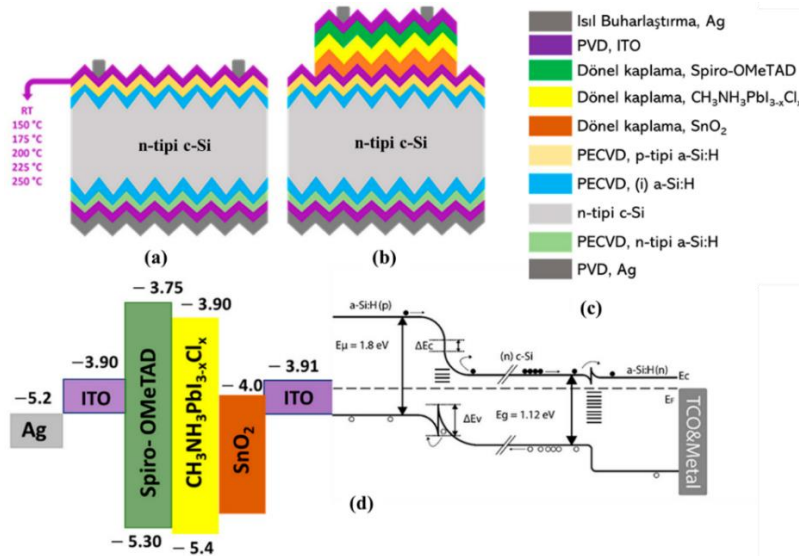


Şekil 5.4. Cam üzerine kaplanan VO₂ bant aralığı değeri

PGH'lerinde HTL olan Spiro-OMeTAD'nin yaklaşık 3 eV band aralığı ile VO₂'nin 3.81 eV band aralığı arasındaki uyum, enerji seviyelerinin etkin bir şekilde hizalanmasına olanak tanır. Bu hizalama, boşluk taşıyıcı katmanı (HTL) olarak kullanılan Spiro-OMeTAD'nin boşluk taşınmasını iyileştirir. Böylece, taşıyıcıların daha verimli bir şekilde aktarılması sağlanır ve bu da genel cihaz verimliliğini artırır. Ayrıca, VO₂'nin yüksek bant aralığı, hücrenin yüksek sıcaklıklara karşı termal dayanıklılığını güçlendirir, bu da uzun vadeli stabilite açısından avantaj sağlar.

5.4 2.5×2.5 cm² Monolitik Tandem Güneş Hücresi için c-Si SHJ Alt Hücresinin Üretilmesi

Bu başlık altında, alt hücre yapısındaki katmanlardan biri olan ITO katmanının biriktirme sıcaklığının optimizasyonu, altı farklı sıcaklık değeri (RT, 150°C, 175°C, 200°C, 225°C ve 250°C) kullanılarak SHJ güneş hücreleri üretimi gerçekleştirilmiş ve fotovoltaiik parametreleri ölçülmüştür. Ardından, en yüksek ve en düşük verimlilik değerlerini gösteren iki SHJ hücresi üzerine perovskit hücreleri üretilerek monolitik tandem güneş hücreleri oluşturulmuştur. Şekil 5.5, üretilen monolitik tandem hücrenin katman yapısını, her bir katmanın üretim yöntemlerini ve SHJ/perovskit bant aralığı diyagramını göstermektedir.



Şekil 5.5. SHJ güneş hücresi (2.5×2.5 cm²) (a), SHJ/perovskit tandem güneş hücresi (aktif alan: 1.45 cm²) (b), ince film renkleri ve biriktirme yöntemleri (c), SHJ/perovskit tandem güneş hücresi eV diyagramı (d)

5.4.1 ITO filmlerin üretilmesi

Farklı sıcaklıklarda (RT, 150°C, 175°C, 200°C, 225°C ve 250°C) cam altlık (yüzey alanı: 2.5 x 2.5 cm², kalınlık: 1.1 mm) üzerine biriktirilen ITO filmlerinin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. SHJ güneş hücresinin üretim sürecinde, ITO katmanının sıcaklığı sıcaklık sensörleri ve ısıtıcılar kullanılarak otomatik olarak düzenlenmektedir. Bu otomatik kontrol, istenen malzeme özellikleri ve cihaz performansına ulaşmak için gerekli olan hassas ve tutarlı sıcaklık koşullarını sağlamaktadır. ITO filmler, 13.56 MHz'de çalışan bir PVD sistemine entegre doğru akım (DC) magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak biriktirilmiştir. Film biriktirme sürecinde, %99.999 (5N) saflığında bir ITO saçtırma hedefi kullanılmış ve sonuç olarak yaklaşık 100 nm kalınlığında ITO filmler elde edilmiştir.

Cam altlıklar PVD odasına yerleştirilmeden önce, 5 dakika aseton, 5 dakika etanol ve 10 dakika deiyonize su içeren bir ultrasonik banyoya daldırılarak temizlenmiş ve ardından azot gazı ile kurutulmuştur. Temizlenen cam altlıklar, PVD sistemine yerleştirilmiş ve sistem vakuma alınarak 7.3x10⁻⁶ mbar'lık bir çalışma basıncına ulaşması sağlanmıştır. Sürekli olarak argon ve Oksijen (O₂) verilerek, haznede 2.1x10⁻² mbar'lık bir biriktirme basıncı oluşturulmuştur. Püskürtme işlemi sırasında verilen O₂ gazı, biriktirilen ITO filminin stokiometrisini kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Oksijenin varlığı, oksidasyon sürecini hızlandırarak istenen kristal yapının oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, oksijenin argon gazına oranını ayarlayarak, ITO filmindeki oksijen içeriği hassas bir şekilde kontrol edilmiştir. Bu, istenen elektriksel ve optik özelliklerin elde edilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

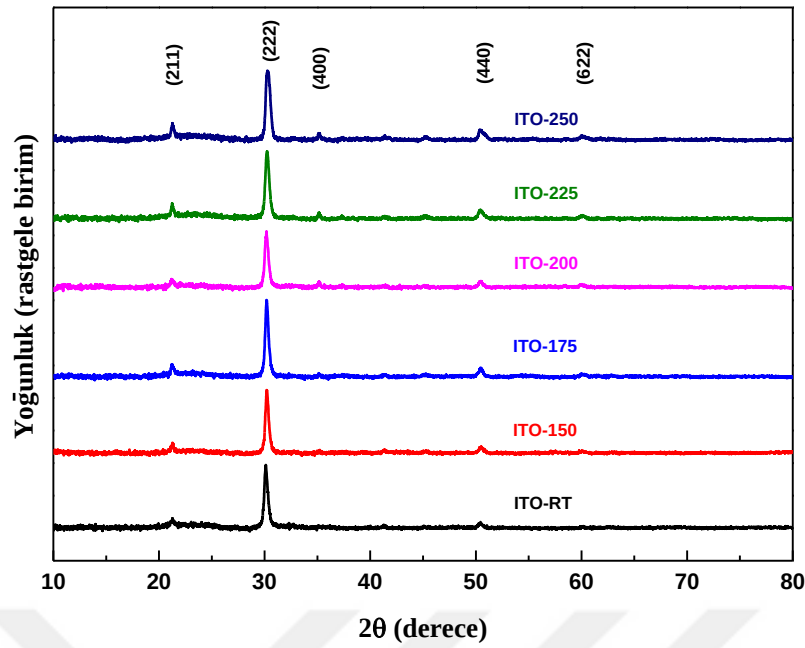
ITO filmleri, gaz oranları ve güç sabit tutulurken, farklı sıcaklıklarda DC magnetron püskürtme yöntemi ile biriktirilmiştir. Sistem vakumunu ve biriktirme işlemini etkileyecek olası nem, kirlilik gibi durumları önlemek amacıyla, cam altlıklar yüklenmeden önce sistem başlangıçta yüksek vakumda ve 200°C sıcaklıkta bir süre çalıştırılmış ve daha sonra biriktirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1, bu biriktirme parametrelerini ve bunlara karşılık gelen değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.1. ITO filmlerinin biriktirme parametreleri ve karşılık gelen örnek gösterimleri.

Örnek	Ar Akışı (sccm)	Biriktirme Gücü (W)	Biriktirme Sıcaklığı (°C)
ITO-RT	200	1850	RT
ITO-150	200	1850	150
ITO-175	200	1850	175
ITO-200	200	1850	200
ITO-225	200	1850	225
ITO-250	200	1850	250

5.4.2 ITO filmlerin biriktirme sıcaklığının yapısal özellikleri üzerine etkisi

Şekil 5.6, farklı sıcaklıklarda (RT, 150, 175, 200, 225, 250 °C) biriktirilen ITO filmlerinin XRD analizini göstermektedir. ITO filmleri, 10-80°'lik 2θ tarama aralığında taranmıştır. Yapılan analiz sonucunda, (211), (222), (400), (440) ve (622) kırınım piklerinin kübik ITO'ya karşılık geldiği belirlenmiştir (Raoufi, vd., 2015). Ayrıca, bu kırınım pikleri, tüm filmlerin polikristal özellikler sergilediğini göstermektedir (Raoufi, vd., 2015; Lien, 2010; Ogi vd., 2009). ITO-RT, ITO-150 ve ITO-175 örneklerinde (400) piki görülmezken, 175 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bu pik açıkça gözlemlenmiştir (Şekil 5.6). Bu durum, uygulanan sıcaklığın atomların düzenini iyileştirerek daha iyi bir kristal yapı sergilediğini göstermektedir (Ren, vd.,). Çizelge 5.2, farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO filmlerinin yapısal parametrelerini sunmaktadır. ITO filmlerinin yapısal parametreleri, en yüksek yoğunluğa sahip kırınım piki olan (222) düzlemine göre hesaplanmıştır. Ayrıca, ITO (222) ve (400) kırınım piklerinin yöneliminin, film biriktirme oranının (Thilakan vd., 1997) ve sıcaklığının (Meng vd., 1998) artırılmasıyla değiştirilebilmektedir. (222) düzlemine göre yapılan analizde, ITO-150 örneği en düşük FWHM değerine (7.18E-03 rad) sahipken, ITO-250 örneği en yüksek FWHM değerine (8.67E-03 rad) sahiptir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça 150 °C'nin üzerinde biriktirilen ITO filmlerinin FWHM değerlerinde sürekli bir artış gözlenmiştir. Tüm ITO-RT, ITO-150, ITO-175, ITO-200, ITO-225 ve ITO-250 örneklerinin (222) yönelimindeki 2θ değerleri sırasıyla 30,14°, 30,23°, 30,22°, 30,19°, 30,25° ve 30,32° olarak bulunmuştur. Bu veriler, ICSD kart numaraları 98-005-0848 (ITO-RT, ITO-150 ve ITO-200), 98-005-0847 (ITO-175) ve 98-005-0849 (ITO-225 ve ITO-250) ile uyumludur.



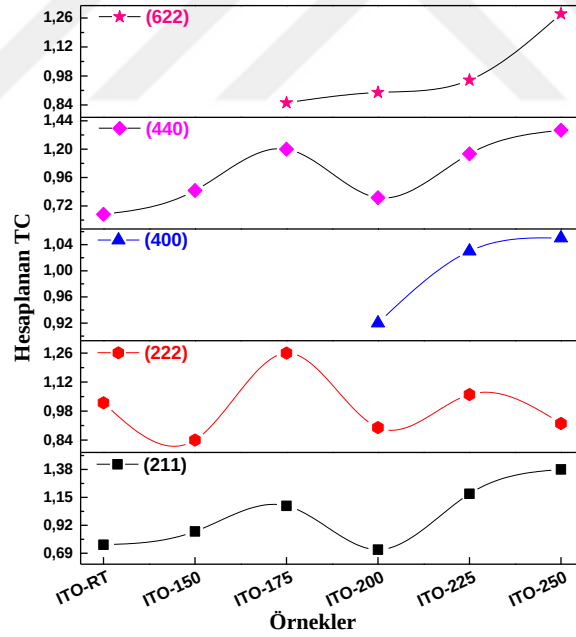
Şekil 5.6. ITO filmlerinin farklı sıcaklıklardaki XRD sonuçları

ITO filmlerindeki kristal boyutu, oksijen değişiminde kullanılan denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.2, farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO filmlerinin kristal boyutlarını ve β değerlerini göstermektedir. Kristal boyutu ile β değerlerinin ters orantılı olduğu ve kristal boyutu artarken β 'nın belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5.7). Ayrıca, Çizelge 5.2'de gösterildiği gibi, 150 ila 250 °C arasında artan sıcaklıkla birlikte kristal boyutunda bir azalma gözlenirken, en iyi kristal boyutu 150 °C'de 20 nm olarak belirlenmiştir (Ezzeldien vd., 2022). Bu durum ITO numunelerinin 150 °C'de daha iyi kristalleştiğini gösterse de değerler birbirine çok yakın olduğu için farklı karakterizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 5.2. ITO filmlerinin FWHM (β), Bragg açısı (θ), kristal boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ), mikro gerinim (ϵ) ve birim alan başına düşen kristal sayısı (N) değerleri (Damgacı vd., 2024).

Örnek	β (rad)	θ (derece)	$\cos\theta$	D (nm)	δ (lines/nm ²) (x 10 ⁻³)	ϵ (x 10 ⁻³)	N (nm ⁻²) (x 10 ⁻²)
ITO-RT	7.90E-03	15.0699	0.9656	18	3.1	1.9	1.7
ITO-150	7.20E-03	15.1153	0.9654	20	2.5	1.7	1.3
ITO-175	7.30E-03	15.1082	0.9654	19	2.8	1.8	1.5
ITO-200	7.90E-03	15.0948	0.9655	18	3.1	1.9	1.7
ITO-225	8.20E-03	15.1266	0.9654	17	3.5	2	2
ITO-250	8.70E-03	15.1621	0.9652	16	3.9	3.1	2.4

Dislokasyon yoğunluğu (δ), mikro gerinim (ϵ) ve birim alan başına düşen kristal sayısı (N) oksijen değişimindeki gibi hesaplanmış ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir (Sofı vd., 2018). 150 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda biriktirilen ITO filmlerinin dislokasyon yoğunluğunda düzenli bir artış gözlenmiştir. ITO-RT ve ITO-200'ün dislokasyon yoğunlukları eşit olup 3.1×10^{-3} lines/nm² olarak hesaplanmıştır. En düşük dislokasyon yoğunluğu ITO-150 için 2.5×10^{-3} lines/nm² olarak belirlenirken, en yüksek dislokasyon yoğunluğu ITO-250 için 3.9×10^{-3} lines/nm² olarak hesaplanmıştır. Mikro gerinim parametreleri, 150°C ve üzerinde biriktirilen ITO filmlerinde düzenli bir artış göstermiştir. ITO-RT ve ITO-200'ün mikro gerinim parametreleri eşit olup 1.9×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. En düşük mikro gerinim parametresi ITO-150'de 1.7×10^{-3} olarak belirlenirken, en yüksek mikro gerinim ITO-250'de hesaplanmıştır. Birim alan başına düşen kristal sayısı, 150 °C ve üzerinde biriktirilen ITO filmlerinde düzenli bir artış göstermiştir. ITO-RT ve ITO-200'ün birim alan başına düşen kristal sayısı eşit olup 1.7×10^{-2} nm⁻² olarak hesaplanmıştır. En düşük kristal sayısı ITO-150' de 1.3×10^{-2} nm⁻² iken, en yüksek kristal sayısı ITO-250'de 2.4×10^{-2} nm⁻² olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.7. XRD desenlerinden hesaplanan farklı sıcaklıklarda üretilen ITO filmlerinin hesaplanan doku katsayıları (TC)

Kırınım pikleri (211), (222), (400), (440) ve (622) için sıcaklık katsayıları (TC), ICSD kartları ve denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır (Manzano vd., 2013).

$$TC_{hkl} = \frac{\frac{I_{means.}(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum_{\bar{h}\bar{k}\bar{l}} \frac{I_{meas.}(\bar{h}\bar{k}\bar{l})}{I_0(\bar{h}\bar{k}\bar{l})}} \quad (5.1)$$

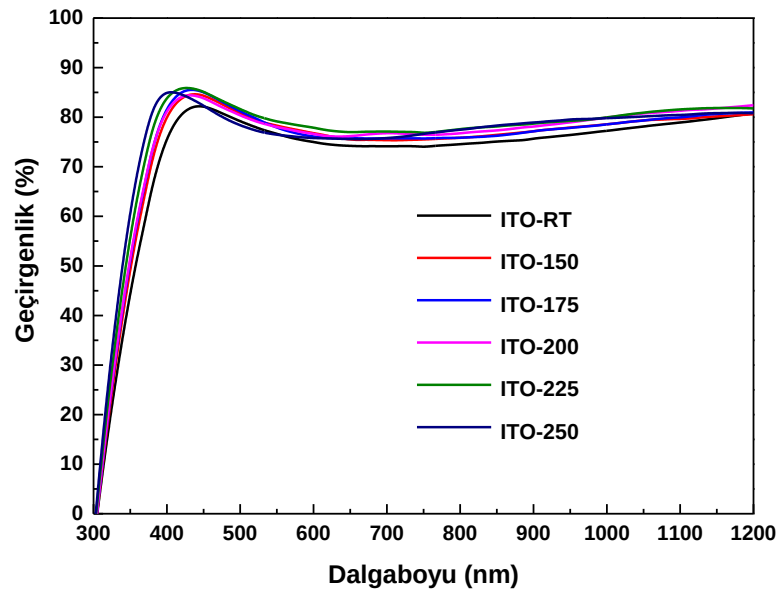
Burada I_{ort} , I_0 ve N sırasıyla her bir (hkl) noktasının ölçülen yoğunlukları, ICSD kartlarında verilen teorik bağıl yoğunluk ve dikkate alınan yansıma sayısı olarak tanımlanır. Kırınım pikleri (211), (222) ve (440) için $N=6$, (622) için $N=4$ ve (400) için $N=3$ kullanılmıştır. Şekil 5.6'da görülen XRD piklerine karşılık gelen N değerleri her bir ITO film için kullanılmıştır. Şekil 5.7, farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO filmlerinin doku katsayılarını göstermektedir ve karşılık gelen değerler Çizelge 5.3'te verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 5.3'te (211), (222), (400), (440) ve (622) kırınım piklerine karşılık gelen I_{ort} ve ICSD kartından elde edilen I_0 değerleri gösterilmektedir. Doku katsayısı olan TC , (hkl) değerleri göz önüne alındığında, ITO filmlerinin yönelimlerinin (211), (222) ve (440) kırınım pikleri yönünde olduğu görülmektedir. Ek olarak, sıcaklık arttıkça TC (400) ve TC (622) için TC (hkl) değerlerinde tutarlı bir artış olduğu kaydedilmiştir.

Çizelge 5.3. XRD ile elde edilen 5 ana tepe için hesaplanan doku katsayısı değerleri

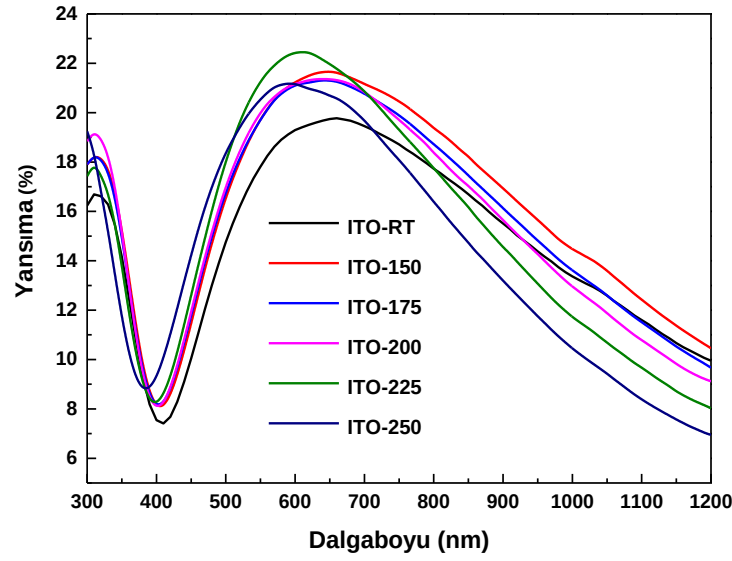
Örnek	Kırınım Tepeleri				
	(211)	(222)	(400)	(440)	(622)
ITO-RT	10.3	100	30.5	37.3	27.4
ITO-150	10.3	100	30.5	37.3	27.4
ITO-175	10.7	100	30.6	37.1	27.4
ITO-200	10.3	100	30.5	37.3	27.4
ITO-225	11.1	100	30.5	36.8	26.9
ITO-250	11.1	100	30.5	36.8	26.9
ITO-RT	319.6	2373.8	-	172.7	-
ITO-150	364.8	1944.7	-	225.4	-
ITO-175	470.4	2919.7	-	318	100
ITO-200	302.8	2098.4	190.8	211	105.1
ITO-225	533.3	2469.8	214.3	303.7	110.8
ITO-250	623.3	2128.4	217.2	356	147.3
ITO-RT	0.76	1.02	-	0.65	-
ITO-150	0.87	0.84	-	0.85	-
ITO-175	1.08	1.26	-	1.20	0.85
ITO-200	0.72	0.90	0.92	0.79	0.90
ITO-225	1.18	1.06	1.03	1.16	0.96
ITO-250	1.38	0.92	1.05	1.36	1.28

5.5 ITO Filmlerinde Biriktirme Sıcaklığının Optik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Farklı sıcaklıklarda PVD sistemi ile cam alt tabakalar üzerinde biriktirilen ITO'nun dalga boyuna karşı optik geçirgenlik ve yansıtma spektrumları Şekil 5.8 ve 5.9'da gösterilmektedir. Çizelge 5.4, cam altlık üzerine biriktirilen filmlerin optik özelliklerini sunmaktadır. Farklı sıcaklıklarda biriktirilen filmlerin geçirgenlik spektrumları, bu filmlerin elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde oldukça şeffaf olduklarını göstermektedir. 400-1200 nm dalga boyu aralığında, farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO ortalama %77'nin üzerinde bir geçirgenlik ve ortalama %14'ün üzerinde bir yansıma göstermiştir (Çizelge 5.4). Ortalama geçirgenlik değeri artan sıcaklıklarla birlikte artarken, 225 °C'den sonra azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek ortalama geçirgenlik %80 ile ITO-200'de, en düşük ortalama geçirgenlik ise %77 ile ITO-RT'de ölçülmüştür. Sıcaklık artışı, yakın kızılötesi bölgede geçirgenliği artırırken, daha yüksek dalga boylarında geçirgenliği azaltmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda oksijen eksikliğinden kaynaklanan taşıyıcı konsantrasyonundaki artışa bağlı olabilir (Nisha vd., 2005). Yüksek taşıyıcı konsantrasyonu, uzun dalga boyu bölgesinde daha yüksek yansıma neden olmaktadır.



Şekil 5.8. Farklı sıcaklıklarda PVD sistemi ile cam altlıklar üzerine biriktirilen ITO filmlerinin (ITO-RT, ITO-150, ITO-175, ITO-200 ve ITO-250) dalga boyuna karşı optik geçirgenlik spektrumları

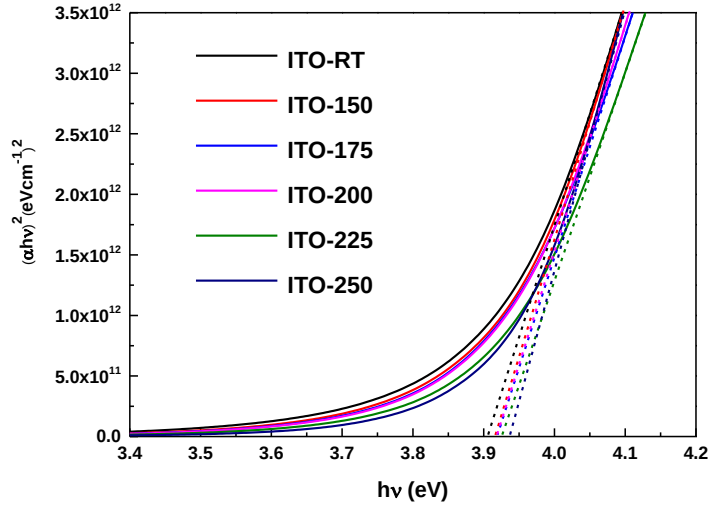


Şekil 5.9. Farklı sıcaklıklarda (ITO-RT, ITO-150, ITO-175, ITO-200 ve ITO-250) PVD sistemi ile cam altlıklar üzerine biriktirilen ITO filmlerinin dalga boyuna karşı optik yansımaları

Çizelge 5.4. ITO filmlerinin geçirgenlik, yansımaya ve enerji bant aralık değerleri

Örnek	Ortalama Geçirgenlik (%) (400-1200 nm)	Ortalama Yansımaya (%) (400-1200 nm)	E _g (eV)	Geçirgenlik (%) (550 nm)
ITO-RT	77	15	3.9	77
ITO-150	78	16	3.91	78
ITO-175	78	16	3.91	78
ITO-200	80	15	3.91	78
ITO-225	79	15	3.92	79
ITO-250	79	14	3.93	76

Yarı iletken malzemelerde E_g belirlemek için α ve $h\nu$ gereklidir (Tauc vd., 1968). Bu tez çalışmasında, farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO'nun bant aralığı ölçümü, $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiği çizilerek elde edilmiştir (Şekil 5.10). Depolanan ITO filmlerinden elde edilen optik bant aralığının 3,90 eV ile 3,93 eV arasında olduğu hesaplanmıştır. Enerji bant aralığı değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sıcaklık arttıkça ITO filmlerin bant aralığında bir artış gözlenmiştir. ITO'nun bant aralığındaki artış, soğurma kenarının yakın UV bölgesine kaymasıyla ilişkilendirilebilir. Bu olgu genellikle Burstein-Möss (B-M) etkisi (Hamberg vd., 1986) olarak adlandırılır ve daha yüksek biriktirme sıcaklıkları ile artan taşıyıcı konsantrasyonlarından kaynaklanabilir.



Şekil 5.10. Farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO filmlerinin bant aralığı ölçümü, $h\nu$ ile $(\alpha h\nu)^2$ 'nin grafiği.

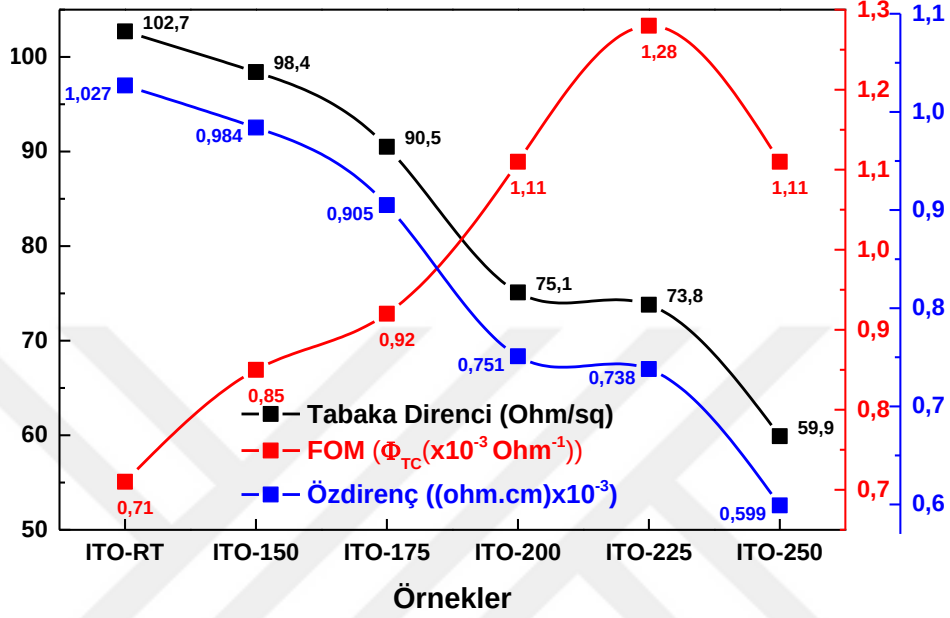
5.6 ITO Filmlerin Elektriksel Özellikleri Üzerinde Sıcaklığın Etkisi

ITO filmlerin sıcaklığa bağlı başarı ölçütü (FOM) hesaplamak için 550 nm'deki geçirgenlik değerleri kullanılmıştır (Çizelge 5.4). Haacke'ye göre, TCO filmlerin optik ve elektriksel özellikleri, elektriksel tabaka direnci ve optik geçirgenlik ile en iyi şekilde karakterize edilir. Bu nedenle, filmlerin performansını değerlendirmek ve malzeme kalitesini belirlemek için FOM değeri önemli bir parametre olarak tanımlanmaktadır (Akhmedov vd., 2023; Ali vd., 2014; Zhu vd., 2020; Lee vd., 2019). FOM değeri, aşağıdaki denklem (6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Phi_{TC} = T^{10}/R_{sh} \quad (5.2)$$

Burada T geçirgenlik, R_{sh} ise ITO filmlerin tabaka direncidir (Haacke vd, 1976). Şekil 5.11, farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO'nun Φ_{TC} ve R_{sh} değerlerini göstermektedir. Biriktirme sıcaklığı Φ_{TC} arttıkça değerlerinin arttığı görülmektedir (250 °C hariç). ITO-225'in en iyi FOM değerine ($1.28 \times 10^{-3} \text{ Ohm}^{-1}$) sahip olduğu hesaplanmıştır. Şekil 5.11'de farklı sıcaklıklarda biriktirilen ITO'ların R_{sh} değerleri gösterilmektedir. ITO ince filmlerin elektriksel özellikleri film bileşimi, sıcaklık ve oksijen içeriği gibi biriktirme parametrelerine bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte R_{sh} ve öz direnç değerlerinde düzenli bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. ITO filmleri arasındaki en yüksek tabaka direnci (R_{sh}) değeri, 102,7 Ohm/sq ile ITO-RT'de elde edilmiştir. En düşük R_{sh}

değeri ise 59,9 Ohm/sq ile ITO-250'de gözlenmiştir. Özdirenç değerlerinde en yüksek değer, $102,7 \times 10^{-3}$ ohm.cm ile ITO-RT filminde, en düşük değer ise $59,9 \times 10^{-3}$ ohm.cm ile ITO-250 filminde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ITO filmlerinin elektriksel özelliklerinin sıcaklık arttıkça iyileştiğini göstermektedir.



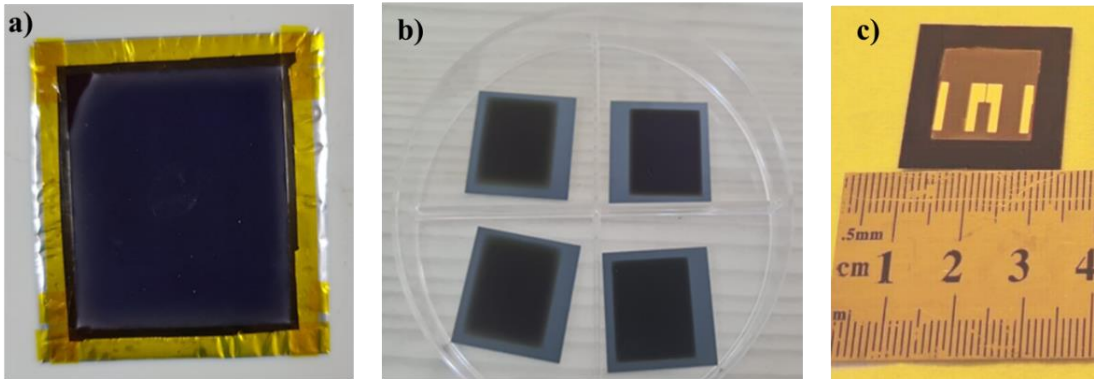
Şekil 5.11. ITO filmlerinin tabaka direnci, FOM ve özdirenç grafiği

Bu bölümde, biriktirme sıcaklığının ITO filmlere etkisi incelenmiştir. Bu filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri analiz edilerek tandem yapının alt hücrelerinde kullanılabilme potansiyeli araştırılmıştır. Yapısal özelliklere göre en iyi kristal boyutu ITO-150 örneğinde 20 nm olarak elde edilmiştir. Öte yandan numunelerin kristal boyutu birbirlerine çok yakın olduğundan dolayı kristal boyutları kendi aralarında değerlendirilip literatür ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Optik özelliklere göre ise en iyi geçirgenlik sonucu %80 ile ITO-200 örneğinde elde edilmiştir. Sıcaklığın artması ile ITO'nun elektriksel özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Elektriksel özelliklere göre en iyi sonuç 59,9 ohm/sq ile ITO-250 örneğinde elde edilmiştir. Görüldüğü üzere numunelerin optimum biriktirme sıcaklığı farklı karakterizasyon sonuçlarına göre değişkenlik göstermektedir. Ek olarak hem optik hem de elektriksel özellikleri esas alarak hesaplanan FOM değerine göre ise en iyi değer, ITO-200 örneğinde elde edilmiştir. Özetle biriktirme sıcaklığı, tandem yapının alt hücrelerini iyileştirmede kritik bir parametredir ve bu bölümde ITO-200 örneği, bu kritik parametrenin belirlenmesinde en iyi sonuç olarak değerlendirilmiştir. Böylece optimize edilen alt hücre, daha sonra monolitik c-Si

SHJ/Perovskit tandem güneş hücresinde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir (Damgacı, vd., 2024).

5.7 Sıcaklık Optimizasyonu Yapılan Alt Hücrenin Tandem Güneş Hücresi İçin Hazırlanması

Tandem güneş hücresi üretimi için sıcaklık optimizasyonu yapılan alt hücrenin tamamlanmasının ardından üst hücrenin üretimi sırasında alt hücrenin korunması ve verimliliğinin artırılması amacıyla gömlekleme işlemi yapılmıştır. Bu işlemde, alt hücrenin dikkatlice alüminyum folyo ile gömleklene (Fotoğraf 5.1a) ve kenar kısımlarının ısıya dayanıklı bant ile solüsyonun sızdirmasını önleyecek şekilde tutturulmuştur. Bu da üst hücre için bir nevi maske (Fotoğraf 5.1b) görevi görür. Böylece solüsyon bazlı üst hücre üretim sürecinde kullanılan kimyasal çözücülerden ve malzemelerden kaynaklanabilecek zararların önlenmesini sağlar. Fotoğraf 5.1a 'da gösterilen gömlekleme işlemi, alt hücre ile üst hücre arasında istenmeyen etkileşimlerin önüne geçer ve aynı zamanda homojen bir (Fotoğraf 5.1c) üst katmanın oluşturulmasına olanak tanır.

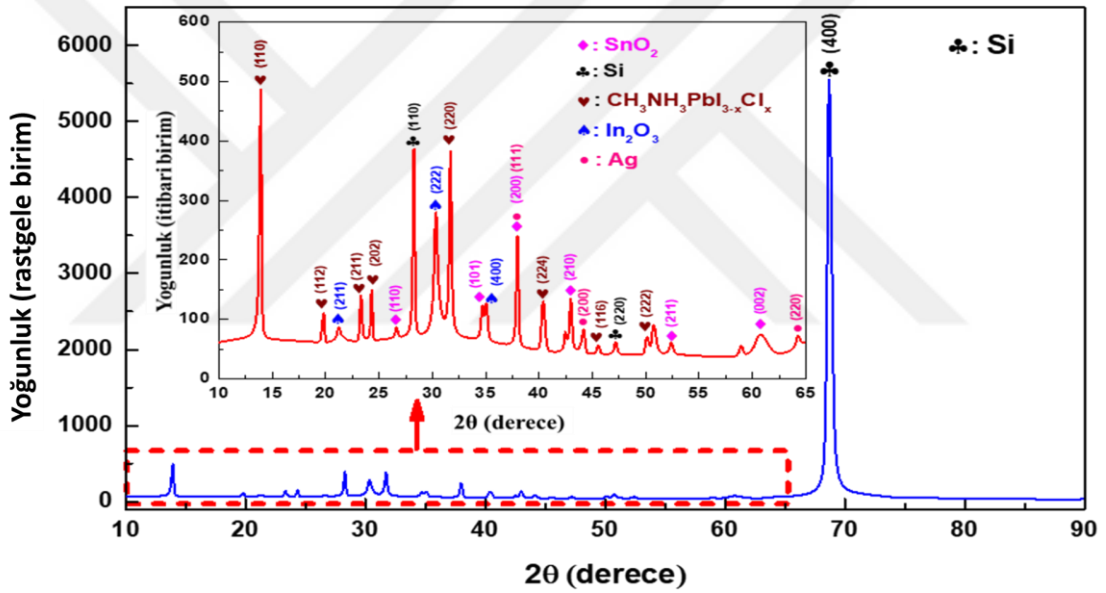


Fotoğraf 5.1. Alt hücre üzerine yapılan gömlekleme (a), homojen maskeleme işlemi (b), alt hücre üzerine tamamlanan tandem güneş hücresi (c)

5.8 Monolitik c-Si SHJ/Perovskit Tandem Güneş Hücresinin Yapısal ve Morfolojik Özellikleri

Tandem hücreyi oluşturan katmanların yapısal analizleri $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.15406 \text{ nm}$) X-ışını kaynağı ile XRD kullanılarak incelenmiştir. $2\theta = 10\text{-}90^\circ$ tarama aralığında XRD ölçümleri

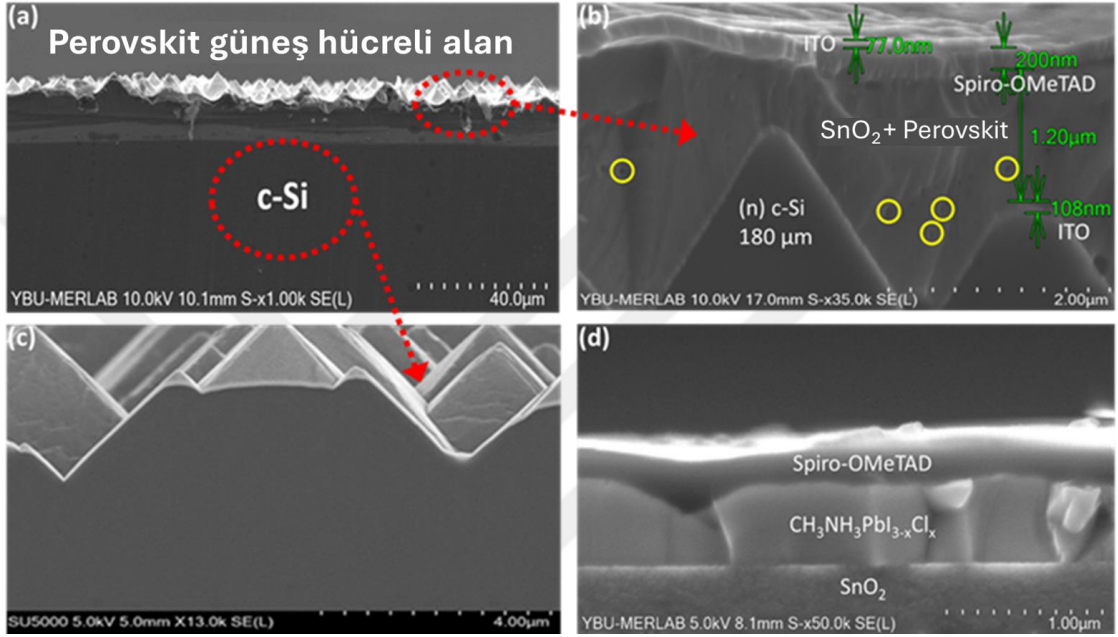
alınmıştır. Tüm ince filmler için XRD analizinin sonuçları Şekil 5.12'de sunulmuştur. Ölçümler hava ortamında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 68.66'daki 2θ Si piki diğer piklerin yoğunluğundan daha baskın olduğu için kırmızı alan yakınlaştırılmış ve bu şekilde gösterilmiştir. Si pikleri sırasıyla 2θ= 28.26° (110), 47.18° (220), 68.66° (400). Ag pikleri 37.96° (111), 44.16° (200), 64.26° (220). SnO₂ 26.64° (110), 34.17° (101), 37.96° (200), 42.96° (210), 52.38° (211), 60.72° (002) (Ren vd., 2018). In₂O₃ 21.23° (211), 30.3° (222), 35.1° (400), 21.23° (Satpute vd., 2023; Chaudhary vd., 2017). CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x 13.92° (110), 19.82° (112), 23.32° (211), 24.32 (202), 31.68 (220), 40.38° (224), 45.54 (116), 50.14° (222) (Oku, 2020; Sewvandi vd., 2016) (Spiro-OMeTAD, malzemenin amorf olduğu için herhangi bir X-ışını kırınım piki gözlenmemiştir (Song vd, 2021).



Şekil 5.12. Monolitik c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücresinin XRD sonuçları

Perovskit/c-Si SHJ monolitik tandem güneş hücrelerinin SEM ölçümleri, güneş hücre yapısı içindeki farklı katmanların ve arayüzlerin morfolojisi, yapısı ve kalitesi hakkında bilgi sağlamıştır. Şekil 5.13 (a), n-tipi c-Si ve PGH'lerinin rastgele piramit yapısını göstermektedir. Şekil 5.13 (c) bir SHJ hücresinin enine kesitini gösterirken, Şekil 5.13 (d) üst perovskit hücre yapısını göstermektedir. SEM görüntüleri, rastgele piramit desenlendirilmiş Si altta üzerine üretilen SHJ alt hücrenin vadilerini perovskit hücresinin tamamen doldurmadığı alanlarda yapısal kusurlar ve iğne delikleri göstermektedir; bu iğne delikleri ve kusur bölgeleri, monolitik tandem güneş hücresinin verimliliği üzerinde

olumsuz bir etkiye sahiptir. SHJ (alt hücre) 180 μm kalınlığında n-tipi kristal silisyum (c-Si) katman, 10 nm kalınlığında a-Si:H ince filmler ve 100 nm kalınlığında ITO katmanlarından oluşmaktadır. a-Si:H katman kalınlıkları SEM görüntüsünde hem çok ince oldukları için hem de c-Si ile kontrast oluşturmadığı için görülmemektedir. Perovskit (üst) hücrenin katman kalınlıkları Şekil 5.13'te gösterildiği gibi ITO 77 nm, Spiro-OMeTAD 200 nm ve SnO_2 +perovskite 1200 nm'dir.

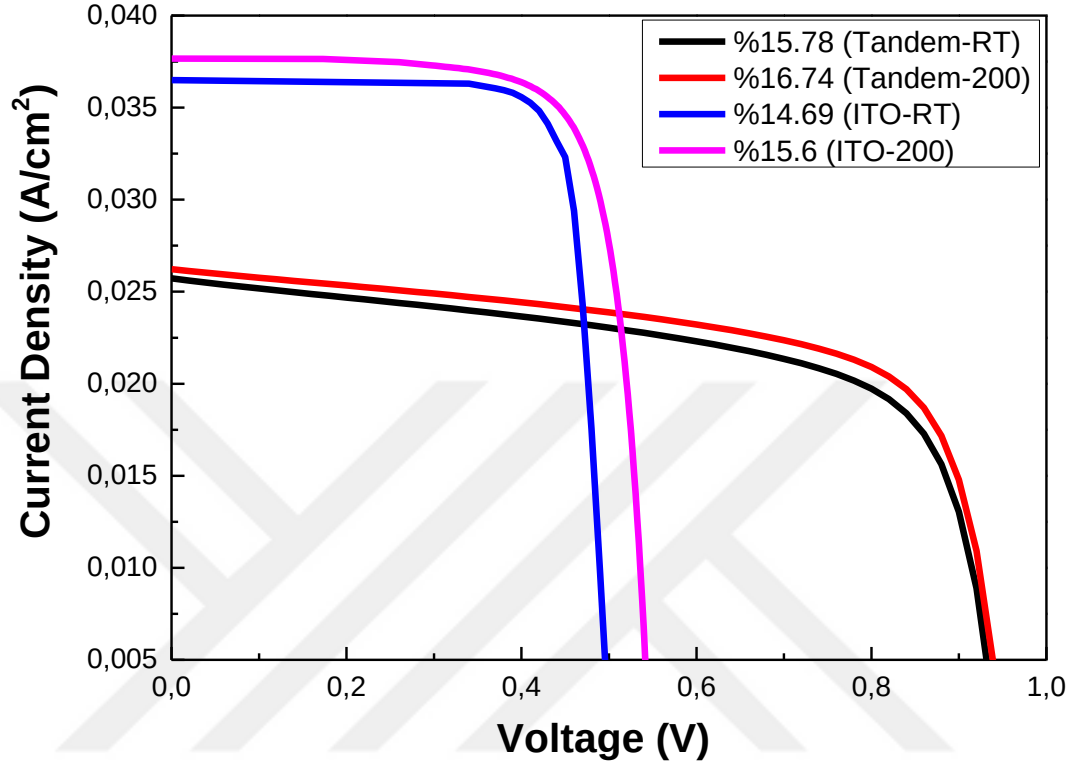


Şekil 5.13. c-Si SHJ/Perovskite tandem güneş hücresi SEM görüntüleri. (a) rastgele piramit yapılı n-tipi c-Si/ perovskite güneş hücresi geniş alan SEM görüntüsü, (b) tandem katmanların ve kalınlıklarının yakın kesit görünümü (sarı daireler iğne deliklerini, yeşil renkler kalınlıkları göstermektedir), (c) SHJ güneş hücresinin kesiti, (d) üst perovskit hücre yapısı

5.9 c-Si SHJ ve Monolitik c-Si SHJ/Perovskite Tandem Güneş Hücrelerinin Verimliliği

Şekil 5.14, n-tipi c-Si/ITO/ SnO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ /Spiro-OMeTAD/ITO/Ag ve c-Si SHJ güneş hücresinden oluşan monolitik bir tandem güneş hücresinin verimliliğini göstermektedir. Oda sıcaklığında ve 200 derecede biriktirilen ITO'ların kullanıldığı tandem güneş hücresinin dönüşüm verimliliği sırasıyla %15,78 ve %16,74 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, tandem güneş hücrelerinde kullanılan malzemelerin kristal yapısının, biriktirme işlemleri sırasındaki sıcaklık optimizasyonundan önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıklar genellikle daha iyi bir kristal

yapıya yol açar, bu da tipik olarak daha düşük kusur yoğunlukları ile sonuçlanır. Bu durum, daha verimli yük taşıyıcı taşınmasını ve toplanmasını kolaylaştırarak sonuçta daha yüksek genel verimliliğe katkıda bulunabilir.



Şekil 5.14. c-Si SHJ ve monolitik c-Si SHJ/Perovskit tandem güneş hücrelerinin verimliliği

BÖLÜM VI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

c-Si SHJ/perovskit tandem hücrelerinde hem alt hücre hem de üst hücre optimizasyonu, genel hücre verimliliğini artırmada kritik bir rol oynar. Alt hücre optimizasyonu, daha yüksek ışık Emilimi ve yük taşıyıcı toplanması sağlayarak rekombinasyon kayıplarını azaltır. Üst hücre optimizasyonu ise, daha geniş bir spektrumda ışık yakalayarak ve geçirgenliği artırarak alt hücreye ulaşan foton sayısını maksimize eder. Bu iyileştirmeler, arayüzey kusurlarını azaltarak, yük taşıyıcı ömrünü artırarak ve seri direnci düşürerek tandem hücrenin genel performansını önemli ölçüde yükseltir. Sonuç olarak, her iki hücrenin de optimizasyonu, tandem güneş hücrelerinin geleceği için son derece önemlidir. Bu motivasyon ile mevcut tez çalışmasında alt ve üst hücrelerin önce ayrı ayrı üretilip geliştirilmesi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen bu hücreler sıralı şekilde entegre edilerek monolitik c-Si SHJ/perovskit tandem yapısı oluşturulmuştur.

Alt c-Si hücrede, O₂ akış hızının ITO filmlerinin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerinde belirgin etkileri olduğu gözlemlenmiştir. XRD analizleri, O₂ akış hızının artmasıyla film kristallüğünde değişiklikler olduğunu göstermiştir. Optik ölçümler, O₂ akış hızının film geçirgenliğini etkilediğini ortaya koymuştur. Elektriksel analizler ise, en uygun O₂ akış hızının belirlenmesiyle, film direncinin minimize edilebileceğini göstermiştir. Optimum O₂ akış hızında elde edilen ITO filmlerinin kullanıldığı SHJ güneş hücreleri, %18,6 verimlilikle başarılı sonuçlar vermiştir. Bu çalışma sadece alt hücrenin geliştirilmesi ve karakterizasyonu amacıyla gerçekleştirilmiştir. Alt hücre ile üst hücrenin birbirine entegrasyonu sağlanarak monolitik c-Si SHJ/perovskit tandem güneş hücresi üretilen çalışmada ise ITO filmlerin sıcaklık optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada da optimum O₂ akış hızının tayin edilmesinde kullanılan analiz yöntemleri kullanılmış olup, alt hücredeki ITO katmanı için en uygun sıcaklık 200°C olarak belirlenmiştir. Ek olarak HTL üzerine yaklaşık 10 nm kalınlıkta VO₂'nin kaplanmıştır. Çalışma sonucunda verimlilik SHJ hücrede %13,18'den Monolitik c-Si SHJ/Perovskit Tandem güneş hücresi %14,74'e yükselmiştir.

Üst perovskit hücrede ise tüm katmanlar tamamen solüsyon bazlı üretilmiştir. ETL katmanında üç farklı tip elektron iletim malzemesi kullanılmış, bunlardan en iyi

verimlilik sonucunu veren SnO₂ ETL katmanı hem perovskit güneş hücresinde morfolojik, optik ve elektriksel olarak uygun görülmüş hem de düşük sıcaklık ile üretilmesinden ötürü c-Si SHJ alt hücre üzerine büyütülmeye en uygun ETL katmanı olarak seçilmiştir.

Yapılan JV karakterizasyonunda 200°C biriktirme sıcaklığında üretilen ITO alt hücre ile perovskit üst hücrenin birleştirildiği yapıda Tandem-200 konfigürasyonunun verimliliği %16.74 olarak tespit edilmiş ve bu, %15.78 verimliliğe sahip olan Tandem-RT konfigürasyonuna kıyasla önemli bir iyileşmeyi göstermiştir. Verimdeki %7.3 oranında iyileşme, 200 °C’de biriktirilen ITO için ışık geçirgenliğinin %80’in üzerine çıkmasıyla ve tabaka direncinin ise 75.1 Ω /sq değerine düşmesi ile ilişkilendirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, c-Si SHJ/perovskit tandem güneş hücrelerinin performansını artırmak için hem alt hem de üst hücrelerin detaylı optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır. Alt hücrede ITO filmlerin O₂ akış hızının ve biriktirme sıcaklığının, üst hücrede ise ETL malzemesinin seçiminin ve solüsyon bazlı kaplama tekniğinin verimliliğe olan etkileri ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar ile ideal koşulların sağlanması halinde tandem hücre verimliliğinde kayda değer bir iyileşme sağlanabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, tandem hücrelerin ticari uygulanabilirliği için ileriye dönük stratejiler geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

KAYNAKLAR

Abdullah, M. F., Alghoul, M. A., Naser, H., Asim, N., Ahmadi, S., Yatim, B., & Sopian, K., “Research and development efforts on texturization to reduce the optical losses at front surface of silicon solar cell”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 380-398, 2016.

Adachi, D., Hernández, J. L., & Yamamoto, K., “Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency”, *Applied Physics Letters*, 107(23), 2015.

Anonim, “Best Research-Cell Efficiency Chart”, NREL, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, 01 Eylül 2024.

Anonim, “Oxford PV sets new solar panel efficiency world record”, <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-sets-new-solar-panel-efficiency-world-record-0>, 31 Ocak 2024.

Bach, U., Lupo, D., Comte, P., Moser, J. E., Weissörtel, F., Salbeck, J., Spreitzer, H. and Grätzel, M., “Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies”, *Nature*, 395(6702), 583-585, 1998.

Cao, T., Chen, K., Chen, Q., Zhou, Y., Chen, N., & Li, Y., “Fullerene derivative-modified SnO₂ electron transport layer for highly efficient perovskite solar cells with efficiency over 21%”, *ACS applied materials & interfaces*, 11(37), 33825-33834, 2019.

Cao, W., Zhang, J., Lin, K., Qiu, L., Li, J., Dong, Y., ... & Yang, Y., “Redox engineering of spiro-OMeTAD based hole transport layer enabled by ultrathin Co (III)-grafted carbon nitride nanosheets for stable perovskite solar cells”, *Nano Energy*, 104, 107924, 2022.

Chen, B., Yu, Z., Liu, K., Zheng, X., Liu, Y., Shi, J. ve Huang, J., “Grain engineering for perovskite/silicon monolithic tandem solar cells with efficiency of 25.4%”, **Joule**, 3(1), 177-190, 2019.

Chen, X., Xiong, F., Cai, L., Deng, X. and Zhang, Y., “Impact of Transparent Conductive Oxide Properties on Perovskite Solar Cell Performance”, **Journal of Photovoltaics**, 10(3), 870-879, 2020.

Cheong, H., Impellizzeri, G. and Fraga, M. A. (2018). “Hole transport materials for perovskite solar cells: Properties, processing, and performance”, **Advanced Energy Materials**, 8(12), 1702944, 2018.

Chiang, C. H., & Wu, C. G., “Bulk heterojunction perovskite–PCBM solar cells with high fill factor”, **Nature Photonics**, 10(3), 196-200, 2016.

Damgacı, E., & Seyhan, A., “Perovskit Güneş Hücreleri İçin c-TiO₂ Optimizasyonu”, **International Journal of Engineering Research and Development**, 15(1), 64-70, 2023.

Damgaci, E., Kartal, E., Gucluer, F., Seyhan, A., & Kaplan, Y., “Impact of Temperature Optimization of ITO Thin Film on Tandem Solar Cell Efficiency”, **Materials**, 17(11), 2784, 2024.

Das, S., ve Jayaraman, V., “SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors”, **Progress in Materials Science**, 66, 112-255, 2014.

Dong, Q., Shi, Y., Wang, K., Li, Y., Wang, S., Zhang, H., ... & Ma, T., “Insight into perovskite solar cells based on SnO₂ compact electron-selective layer”, **The Journal of Physical Chemistry C**, 119(19), 10212-10217, 2015.

Du, Q., Shen, Z., Chen, C., Li, F., Jin, M., Li, H. ve Wang, M., “Spiro-OMeTAD: Sb₂S₃ Hole Transport Layer with Triple Functions of Overcoming Lithium Salt Aggregation, Long-Term High Conductivity, and Defect Passivation for Perovskite Solar Cells”, **Solar Rrl**, 5(11), 2100622, 2021.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed., **John Wiley & Sons**, Hoboken, NJ, 2013.

Dupré, O., Vaillon, R., & Green, M. A., “A full thermal model for photovoltaic devices”, **Solar Energy**, 140, 73-82, 2016.

Fathi, M., Abderrezek, M., & Friedrich, M., “Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating”, **Clean Technologies and Environmental Policy**, 19(2), 577-585, 2017.

Fell, A., Greulich, J., Feldmann, F., Messmer, C., Schön, J., Bivour, M., ve Glunz, S. W., “Modeling parasitic absorption in silicon solar cells with a near-surface absorption parameter”, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 236, 111534, 2022.

Fuhs, W., Niemann, K., & Stuke, J., “Heterojunctions of Amorphous Silicon and Silicon Single Crystals”, **AIP Conference Proceedings**, 20 (1), 345–350, 1974.

Fujishima, F., “TiO₂ photocatalysis fundamentals and applications”, **A Revolution in cleaning technology**, 14-21, 1999.

Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A., “TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena”, **Surface science reports**, 63(12), 515-582, 2008.

Gao, L. L., Li, C. X., Li, C. J., & Yang, G. J., “Large-area high-efficiency perovskite solar cells based on perovskite films dried by the multi-flow air knife method in air”, **Journal of Materials Chemistry A**, 5(4), 1548-1557, 2017.

GCL-POWER, “New detail: Solar cell materials”, GCL Power, <https://www.gcl-power.com/newdetail/5571.html>, 17 Mayıs 2017.

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. ve Dunlop, E. D., “Solar cell efficiency tables (version 47)”, **Prog. Photovolt: Res. Appl.**, 24, 3–11, 2016.

Green, M. A., Emery, K., King, D. L., Igari, S. ve Warta, W., “Solar Cell Efficiency Tables (Version 20)”, ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications***, 10(5), 355-360, 2022.

Green, M. A., Solar cells: Operating principles, technology, and system applications, ***Prentice-Hall, Englewood Cliffs***, New Jersey, 1982.

Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. and Hao, X., “Solar cell efficiency tables (version 57)”, ***Progress in photovoltaics: research and applications***, 29(1), 3-15, 2021.

Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E., Levi, D., Hohl-Ebinger, J. and Ho-Baillie, A.W.H., “Solar Cell Efficiency Tables (Version 50)”, ***Progress in Photovoltaics***, 25, 668-676, 2017.

Gupta, D. K., Langelaar, M., Barink, M., and van Keulen, F., “Topology optimization of front metallization patterns for solar cells”, ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 51, 941-955, 2015.

Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A., “TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects”, ***Japanese journal of applied physics***, 44(12R), 8269, 2005.

Han, W., Ren, G., Liu, J., Li, Z., Bao, H., Liu, C. and Guo, W., “Recent progress of inverted perovskite solar cells with a modified PEDOT: PSS hole transport layer”, ***ACS Applied Materials & Interfaces***, 12(44), 49297-49322, 2020.

Hirst, L. C., ve Ekins-Daukes, N. J., “Fundamental losses in solar cells”, ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications***, 19(3), 286-293, 2011.

International Energy Agency, Global Solar PV Market Trends, ***IEA***, <https://www.iea.org/reports/global-solar-pv-market-trends>, Paris, 2023.

Jamal, M. S., Bashar, M. S., Hasan, A. M., Almutairi, Z. A., Alharbi, H. F., Alharthi, N. H., and Akhtaruzzaman, M., “Fabrication techniques and morphological analysis of

perovskite absorber layer for high-efficiency perovskite solar cell: A review”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 98, 469-488, 2018.

Jiang, Q., Chu, Z., Wang, P., Yang, X., Liu, H., Wang, Y. And You, J. (2017). “Planar-structure perovskite solar cells with efficiency beyond 21%”, ***Advanced materials***, 29(46), 1703852, 2017.

Jiang, Q., Zhang, L., Wang, H., Yang, X., Meng, J., Liu, H. and You, J. (2016). “Enhanced electron extraction using SnO₂ for high-efficiency planar-structure HC(NH₂)₂PbI₃-based perovskite solar cells”, ***Nature Energy*** 2, 16177, 2017.

Jung, J. W., Chueh, C. C. and Jen, A. K. Y. (2015). “A Low-Temperature, Solution-Processable, Cu-Doped Nickel Oxide Hole-Transporting Layer via the Combustion Method for High-Performance Thin-Film Perovskite Solar Cells” ***Advanced materials***, 27(47), 27: 7874-7880, 2015.

Kam, M., Zhang, Q., Zhang, D. and Fan, Z., “Room-Temperature Sputtered SnO₂ as Robust Electron Transport Layer for Air-Stable and Efficient Perovskite Solar Cells on Rigid and Flexible Substrates”, ***Scientific reports***, 9(1), 6963, 2019.

Kartal, E., Duran, İ., Damgacı, E. and Seyhan, A., “Investigation of Structural, Optical, and Electrical Properties of Ito Films Deposited at Different Plasma Powers: Enhanced Performance and Efficiency in SHJ Solar Cells”, ***Eurasian Journal of Science Engineering and Technology***, 4(1), 25-35, 2023.

Kim, H. S., Im, S. H. and Park, N. G., “Organolead Halide Perovskite: New Horizons in Solar Cell Research”, ***The Journal of Physical Chemistry C***, 118(11), 5615-5625, 2014.

Kim, J., Kim, K. S. and Myung, C. W., “Efficient electron extraction of SnO₂ electron transport layer for lead halide perovskite solar cell”, ***npj Computational Materials***, 6(1), 100, 2020.

Kim, M., Kim, G. H., Oh, K. S., Jo, Y., Yoon, H., Kim, K. H. and Kim, D. S., “High-Temperature–Short-Time Annealing Process for High-Performance Large-Area Perovskite Solar Cells”, **ACS nano**, 11(6), 6057-6064, 2017.

Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. and Miyasaka, T., “Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells”, **Journal of the American Chemical Society**, 131(17), 6050-6051, 2009.

Kroemer, H. “Theory of a wide-gap emitter for transistors”, **Proceedings of the IRE**, 45(11), 1535-1537, 1957.

Lee, S. W., Bae, S., Cho, K., Kim, S., Hwang, J. K., Lee, W. And Kim, D. “Sputtering of TiO₂ for High-Efficiency Perovskite and 23.1% Perovskite/Silicon 4-Terminal Tandem Solar Cells”, **ACS Applied Energy Materials**, 2(9), 6263-6268, 2019.

Leijtens, T., Bush, K. A., Prasanna, R. and McGehee, M. D., “Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors”, **Nature Energy**, 3(10), 828-838, 2018.

Lekesi, L. P., Koao, L. F., Motloun, S. V., Motaung, T. E. and Malevu, T., “Developments on Perovskite Solar Cells (PSCs): A Critical Review”, **Applied Sciences**, 12(2), 672, 2022.

Li, Y., Wang, X., Xu, Q., Li, Y., Zhang, Y., Han, W. and Zhang, X., “Nanocrystalline silicon-oxygen based tunneling recombination junctions in perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells”, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 262, 112539, 2023.

Li, Y., Zhao, Y., Zhang, W. and Liu, Z., “Optimizing the thickness and conductivity of transparent conductive oxides for efficient perovskite solar cells”, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 200, 109974, 2019.

Lin, H., Yang, M., Ru, X., Wang, G., Yin, S., Peng, F. and Xu, X., “Silicon heterojunction solar cells with up to 26.81% efficiency achieved by electrically optimized nanocrystalline-silicon hole contact layers”, *Nature Energy*, 8(8), 789-799, 2023.

Luxová, J., Šulcová, P. and Trojan, M., “Study of perovskite compounds”, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 93(3), 823-827, 2008.

Ma, F., Zhao, Y., Qu, Z. and You, J., “Developments of Highly Efficient Perovskite Solar Cells”, *Accounts of Materials Research*, 4(8), 716-725, 2023.

Mali, S. S., Hong, C. K., Inamdar, A. I., Im, H. and Shim, S. E., “Efficient planar n-i-p type heterojunction flexible perovskite solar cells with sputtered TiO₂ electron transporting layers”, *Nanoscale*, 9(9), 3095-3104, 2017.

Marchioro, A., Teuscher, J., Friedrich, D., Kunst, M., Van De Krol, R., Moehl, T. and Moser, J. E., “Unravelling the mechanism of photoinduced charge transfer processes in lead iodide perovskite solar cells”, *Nature Photonics*, 8(3), 250-255, 2014.

Masuko, K., Shigematsu, M., Hashiguchi, T., Fujishima, D., Kai, M., Yoshimura, N. and Okamoto, S., “Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(6), 1433-1435, 2014.

Menda, U. D., Ribeiro, G., Nunes, D., Calmeiro, T., Águas, H., Fortunato, E. and Mendes, M. J., “High-performance wide bandgap perovskite solar cells fabricated in ambient high-humidity conditions”, *Materials Advances*, 2(19), 6344-6355, 2021.

Nelson, J., The Physics of Solar Cells, *Imperial College*, İngiltere, 2003.

Niu, G., Li, W., Meng, F., Wang, L., Dong, H. and Qiu, Y., “Study on the stability of CH₃NH₃PbI₃ films and the effect of post-modification by aluminum oxide in all-solid-state hybrid solar cells”, *Journal of Materials Chemistry A*, 2(3), 705-710, 2014.

Nobel Prize Outreach AB “The Nobel Prize in Physics 2020”, NobelPrize.org, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary/>, 2020.

Ogomi, Y., Morita, A., Tsukamoto, S., Saitho, T., Fujikawa, N., Shen, Q. and Hayase, S., “CH₃NH₃Sn_xPb_(1-x)I₃ Perovskite Solar Cells Covering up to 1060 nm”, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5(6), 1004-1011, 2014.

Okuda, K., Okamoto, H. and Hamakawa, Y., “Amorphous Si/Polycrystalline Si Stacked Solar Cell Having More Than 12% Conversion Efficiency”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 22(9A), L605, 1983.

Pankove, J. I. and Tarng, M. L., “Amorphous silicon as a passivant for crystalline silicon”, *Applied Physics Letters*, 34(2), 156-157, 1979.

Park, N. G. and Zhu, K., “Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules”, *Nature Reviews Materials*, 5(5), 333-350, 2020.

Philipps, S. and Warmuth, W., Photovoltaics report, *Fraunhofer ISE*, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>, Freiburg, Almanya, 29 Temmuz 2024.

Pysch, D., Mette, A. and Glunz, S. W., “A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(18), 1698-1706, 2007.

Rajmohan, G. D., Huang, F. Z., d'Agostino, R., Du Plessis, J. and Dai, X. J., “Low temperature reactively sputtered crystalline TiO₂ thin film as effective blocking layer for perovskite solar cells”, *Thin Solid Films*, 636, 307-313, 2017.

Rao, H. S., Chen, B. X., Li, W. G., Xu, Y. F., Chen, H. Y., Kuang, D. B. and Su, C. Y., “Improving the Extraction of Photogenerated Electrons with SnO₂ Nanocolloids for Efficient Planar Perovskite Solar Cells”, *Advanced Functional Materials*, 25(46), 7200-7207, 2015.

Raoufi, Davood, and Atefeh Taherniya., “ The effect of substrate temperature on the microstructural, electrical and optical properties of Sn-doped indium oxide thin films”, *The European Physical Journal Applied Physics*, 70.3, 2015.

Ren, H., Zou, X., Cheng, J., Ling, T., Bai, X., & Chen, D., “ Facile solution spin-coating SnO₂ thin film covering cracks of TiO₂ hole blocking layer for perovskite solar cells ”, *Coatings*, 8(9), 314. 2018.

Ribbing, C., Introduction to solar radiation, **Wiley-VCH**, Weinheim, 2020.

Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S. W., “Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(4), 1184-1191, 2013.

Ritchie, H. and Roser, M., “Energy”, Our World in Data, <https://ourworldindata.org/energy>, 2022.

Roy, P., Sinha, N. K., Tiwari, S. and Khare, A., “A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status”, *Solar Energy*, 198, 665-688, 2020.

Sadasivam, S., Chan, M. K. and Darancet, P., “Theory of Thermal Relaxation of Electrons in Semiconductors”, *Physical Review Letters*, 119(13), 136602, 2017.

Sahli, F., Werner, J., Kamino, B. A., Bräuninger, M., Monnard, R., Paviet-Salomon, B. and Ballif, C., “Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency”, *Nature Materials*, 17(9), 820-826, 2018.

Sakata, H. and Nakai, T. and Baba, T. and Taguchi, M. and Tsuge, S. and Uchihashi, K. and Kiyama, S., “20.7% highest efficiency large area (100.5 cm²) HIT/sup TM/ cell”, *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anchorage, AK, USA, s. 7-12, 2000.

Saliba, M., Matsui, T., Domanski, K., Seo, J. Y., Ummadisingu, A., Zakeeruddin, S. M. and Grätzel, M., “Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance”, *Science*, 354(6309), 206-209, 2016.

Sarkın, A. S., Ekren, N. and Sağlam, Ş., “A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels”, *Solar Energy*, 199, 63-73, 2020.

Sawada, T., Terada, N., Tsuge, S., Baba, T., Takahama, T., Wakisaka, K. and Nakano, S., “High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell, **In *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)***, Waikoloa, Hawaii, USA, s. 1219-1226, Aralık, 1994.

Schulze, P. S., Bett, A. J., Winkler, K., Hinsch, A., Lee, S., Mastroianni, S., ... & Goldschmidt, J. C., “Novel low-temperature process for perovskite solar cells with a mesoporous TiO₂ scaffold”, *ACS applied materials & interfaces*, 9(36), 30567-30574, 2017.

Semiconductor M, “The World's First Perovskite Fish-Light Complementary Power Station Has Successfully Been Connected to Grid!”, Microquanta Semiconductor, <https://www.microquanta.com/%20en/newsinfo/4812255D9A185CF04>, 13 Temmuz 2023.

Semiconductor M., “The homepage of Microquanta Semiconductor”, Microquanta Semiconductor, www.microquanta.com/en/

Semiconductor M., “The world’s first batch commercial perovskite module α was successfully delivered”, Microquanta Semiconductor, <https://www.microquanta.com/newsinfo/B149DB6E1BC112C6>, 09 Mayıs 2023.

Servaites, J. D., Yeganeh, S., Marks, T. J. and Ratner, M. A., “Efficiency Enhancement in Organic Photovoltaic Cells: Consequences of Optimizing Series Resistance”, *Advanced Functional Materials*, 20(1), 97-104, 2010.

Shibayama, N., Fukumoto, S., Sugita, H., Kanda, H. and Ito, S., “Influence of transparent conductive oxide layer on the inverted perovskite solar cell using PEDOT: PSS for hole transport layer”, **Materials Research Bulletin**, 106, 433-438, 2018.

Shockley, W., “The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors”, **Bell System Technical Journal**, 28(3), 435-489, 1949.

Smith, J., “Güneş Enerjisi ve Geleceği”, UTMOLight, <http://www.utmolight.com/20492/134151.html>, 12 Nisan 2023.

Smith, R. and Johnson, P., “Global trends in perovskite solar cell development: A country-based analysis”, **Renewable Energy Review**, 28(1), 45-61, 2023.

Solar Magazine, “Tandem PV secures an initial \$6m to speed up commercial-grade tandem panels production”, Solar Magazine, <https://solarmagazine.com/2022/04/tandem-pv-initial-6m-speed-up-commercial-grade-tandem-panels-production>, 20 Nisan 2022

Song, J., Zheng, E., Bian, J., Wang, X. F., Tian, W., Sanehira, Y. and Miyasaka, T., “Low-temperature SnO₂-based electron selective contact for efficient and stable perovskite solar cells”, **Journal of Materials Chemistry A**, 3(20), 10837-10844, 2015.

Song, W., Rakocevic, L., Thiruvallur Eachambadi, R., Qiu, W., Bastos, J. P., Gehlhaar, R., ... & Poortmans, J., “Improving the morphology stability of spiro-OMeTAD films for enhanced thermal stability of perovskite solar cells”, **ACS Applied Materials & Interfaces**, 13(37), 44294-44301, 2021.

Taguchi, M., “Improvement of the Conversion Efficiency of Polycrystalline Silicon Thin Film Solar Cell”, **Proc. of Fifth PVSEC**, Florida, USA, 1990.

Taguchi, M., Kawamoto, K., Tsuge, S., Baba, T., Sakata, H., Morizane, M. and Oota, O., “HITTM cells—high-efficiency crystalline Si cells with novel structure”, **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 8(5), 503-513, 2000.

Taguchi, M., Sakata, H., Yoshimine, Y., Maruyama, E., Terakawa, A., Tanaka, M. and Kiyama, S., “An approach for the higher efficiency in the HIT cells”, ***In Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference***, Lake Buena Vista, Florida, USA, s. 866-871, January, 2005.

Taguchi, M., Yano, A., Tohoda, S., Matsuyama, K., Nakamura, Y., Nishiwaki, T. and Maruyama, E., “24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer”, ***IEEE Journal of Photovoltaics***, 4(1), 96-99, 2013.

Tanaka, M., Taguchi, M., Matsuyama, T., Sawada, T., Tsuda, S., Nakano, S. and Kuwano, Y., “Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)”, ***Japanese Journal of Applied Physics***, 31(11R), 3518, 1992.

Tress, W., Organic Solar Cells, ***Springer***, London, England, 2014.

Tsunomura, Y., Yoshimine, Y., Taguchi, M., Baba, T., Kinoshita, T., Kanno, H. and Tanaka, M., “Twenty-two percent efficiency HIT solar cell”, ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 93(6-7), 670-673, 2009.

Wang, C., Guan, L., Zhao, D., Yu, Y., Grice, C. R., Song, Z. and Yan, Y., “Water Vapor Treatment of Low-Temperature Deposited SnO₂ Electron Selective Layers for Efficient Flexible Perovskite Solar Cells”, ***ACS Energy Letters***, 2(9), 2118-2124, 2017.

Wang, C., Hu, J., Li, C., Qiu, S., Liu, X., Zeng, L. and Guo, F., “Spiro-Linked Molecular Hole-Transport Materials for Highly Efficient Inverted Perovskite Solar Cells”, ***Solar RRL***, 4(3), 1900389, 2020.

Wang, H. P. and He, J. H., “Toward Highly Efficient Nanostructured Solar Cells Using Concurrent Electrical and Optical Design”, ***Advanced Energy Materials***, 7(23), 1602385, 2017.

Wang, X. and Lundstrom, M. S., “On the Use of Rau's Reciprocity to Deduce External Radiative Efficiency in Solar Cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(4), 1348-1353, 2013.

Wang, X., Wu, J., Yang, Y., Liu, X., Guo, Q., Song, Z. and Huang, M., “High performance and stable perovskite solar cells using vanadic oxide as a dopant for spiro-OMeTAD”, *Journal of Materials Chemistry A*, 7(21), 13256-13264, 2019.

Wang, Z. and Zhang, C., “Transparent Conductive Oxide Films in Perovskite Solar Cells: A Review of Materials and Properties”, *Advanced Materials*, 33(12), 2007247, 2021.

Wei, Q., Yang, Z., Yang, D., Zi, W., Ren, X., Liu, Y. and Liu, S. F., “The effect of transparent conductive oxide on the performance $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cell without electron/hole selective layers”, *Solar Energy*, 135, 654-661, 2016.

Werner, J., Geissbühler, J., Dabirian, A., Nicolay, S., Morales-Masis, M., Wolf, S. D. and Ballif, C., “Parasitic Absorption Reduction in Metal Oxide-Based Transparent Electrodes: Application in Perovskite Solar Cells”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(27), 17260-17267, 2016.

Werner, J., Niesen, B. and Ballif, C., “Perovskite/silicon tandem solar cells: marriage of convenience or true love story?—An overview”, *Advanced Materials Interfaces*, 5(1), 1700731, 2018.

Xu, L., Wang, S., Pu, M., Guo, Y., Li, X. and Luo, X., “Recent major advancements in perovskite solar cells”, *Journal of Optics*, 26(5), 053001, 2024.

Yang, W. S., Park, B. W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U. and Seok, S. I., “Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells”, *Science*, 356(6345), 1376-1379, 2017.

Ying, Z., Yang, X., Wang, X. and Ye, J., “Towards the 10-Year Milestone of Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells”, *Advanced Materials*, 2311501, 2024.

Yoshikawa, K., Kawasaki, H., Yoshida, W., Irie, T., Konishi, K., Nakano, K. and Yamamoto, K., “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%”, ***Nature Energy***, 2(5), 1-8, 2017.

Yoshikawa, K., Yoshida, W., Irie, T., Kawasaki, H., Konishi, K., Ishibashi, H. and Yamamoto, K., “Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology”, ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 173, 37-42, 2017.

Zhang, X., Zhang, W., Wu, T., Wu, J. and Lan, Z., “High efficiency and negligible hysteresis planar perovskite solar cells based on NiO nanocrystals modified TiO₂ electron transport layers”, ***Solar Energy***, 181, 293-300, 2019.

Zhang, Y., Kim, M., Wang, L., Verlinden, P. and Hallam, B., “Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption”, ***Energy & Environmental Science***, 14(11), 5587-5610, 2021.

Zhang, Y., Sun, Z., Liu, H., Cui, G., Zhou, H. and Yang, Y., “Growth of high-quality perovskite films for efficient solar cells”, ***Nature Photonics***, 11(9), 492-496, 2017.

Zhang, Z., Wang, H., Jacobsson, T. J. and Luo, J., “Big data-driven perovskite solar cell stability analysis”, ***Nature Communications***, 13(1), 7639, 2022.

Zhao, Y., Zhang, H. and Xu, Y., “Concentrated Solar Power and Photovoltaic Hybrid Power Generation Technology: Current Status and Future Development”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 101, 112-120, 2019.

Zhou, H., Wang, J. and Chen, X., “Recent advancements in perovskite solar cell technologies and their commercialization efforts”, ***Journal of Photovoltaic Research***, 15(3), 89-102, 2022.

Zhou, X., Qiu, L., Fan, R., Wang, A., Ye, H., Tian, C. and Yang, Y. “Metal–Organic Framework-Derived N-Rich Porous Carbon as an Auxiliary Additive of Hole Transport

Layers for Highly Efficient and Long-Term Stable Perovskite Solar Cells”, ***Solar RRL***, 4(3), 1900380, 2020.

Zong, B., Deng, J., Sun, Q., Zhang, Z., Meng, X., Shen, B. and Lu, G., “Facile Surface Engineering of Composite Electron Transport Layer for Highly Efficient Perovskite Solar Cells with a Fill Factor Exceeding 81%”, ***Advanced Materials Interfaces***, 9(6), 2102331, 2022.



ÖZ GEÇMİŞ

Elif DAMGACI, yılında 'da doğdu. yılında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesinde göreve başladı. yılından itibaren Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora çalışmalarını sürdürmektedir. Aynı zamanda yılından itibaren Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında ve Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.



TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet SCI indeks uluslararası makale, 2 adet TR Dizin, ile 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Damgaci, E., Kartal, E., Gucluer, F., Seyhan, A., & Kaplan, Y. (2024). Impact of Temperature Optimization of ITO Thin Film on Tandem Solar Cell Efficiency. *Materials*, 17(11), 2784.

Damgacı, E., & Seyhan, A. (2023). Perovskit Güneş Hücreleri İçin c-TiO₂ Optimizasyonu. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 64-70.

Kartal, E., Güçlüer, F., Damgacı, E., Sarp, A. O., Seyhan, A., & Kaplan, Y. Investigation of the effect of oxygen flow modulation on ITO film properties to improve the performance of SHJ solar cells. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3).

Damgacı, E., & Seyhan, A. (2021). Solüsyon Bazlı Perovskit Güneş Hücresi Üretimi. *PROCEEDINGS BOOK*, 428. (8. KOP Bölgesel Kalkınma Sempozyumu)

