



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ANORGANİK BOŞLUK TAŞIYICILI PEROVSKİT TİPİ GÜNEŞ
HÜCRESİ SENTEZİ**

Büşra KAYA

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Proses ve Reaktör Tasarımı Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İsmail BOZ**

Haziran, 2018

İSTANBUL

Bu çalışma, Tarih girmek için burayı tıklatın. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
,nda olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Unvan Adı SOYADI(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 24492 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. İsmail BOZ'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Ayrıca çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mehtap ŞAFAK BOROĞLU'ya tüm yardımları ve destekleri için çok teşekkür ederim.

Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Serap Güneş'e, ve araştırma ekibine sağladıkları teknik imkanlardan ve faydalı bilgilerinden dolayı en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım, E. Sedide Sorucuoğlu'na, Gizem Kırıkçı'ya, İlke Ilıcak'a çok teşekkür ederim

Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ayça Ergün'e, Ufuk G. Civelek'e, Gizemnur Baş'a, Merve Arslan'a, Derya Boz'a, Merve Doğan'a, Gözde Tirkayi'ye, Ali Sivrikaya'ya çok teşekkür ederim.

Maddi ve manevi her türlü desteği hiçbir zaman esirgemeyen sevgili ailem Muzaffer Kaya, Halime Kaya, Esra Kaya'ya çok teşekkür ederim ama en çokta en son nefesine kadar eğitimim için uğraşan babama sonsuz teşekkürler.

Haziran 2018

Büşra KAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	2
2.1. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ.....	2
2.2. FOTOVOLTAİK PİLLER	3
2.2.1. Fotovoltaik Pillerin Tarihsel Gelişimi	3
2.2.1.1. Birinci Nesil Fotovoltaik Piller	4
2.2.1.2. İkinci Nesil Fotovoltaik Piller	5
2.2.1.3. Katı Hal Boya Duyarlı Güneş Pilleri	6
2.2.1.4. Organik Güneş Pilleri	7
2.2.1.5. Hibrid Güneş Hücreleri.....	8
2.3. YARI İLETKENLER.....	9
2.3.1. Şeffaf İletken Oksit Tabaka (ITO, FTO).....	11
2.3.2. Kompakt Metal Oksit Tabaka (ETM)	11
2.3.3. Mezopor Metal Oksit Tabakası	14
2.3.4. Perovskit Güneş Hücresi	15
2.3.4.1. Perovskit Güneş Hücresi Tipleri.....	21
2.3.4.2. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) ile Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar	23
2.3.4.3. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) Kararlılığı	27
2.3.5. Boşluk Taşıyıcı Tabaka (HTM).....	29
2.3.5.1. NiO ile Çalışılan Perovskit Tipi Güneş Hücresi Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar	31
2.3.6. Karşıt Metal Elektrot	32
3. MALZEME VE YÖNTEM	33

3.1. MALZEME	33
3.2. YÖNTEM.....	37
3.2.1. İletken Cam Substratlarının Hazırlanması.....	37
3.2.2. TiO ₂ (1) İnce Filmlerin Sentezi	37
3.2.3. TiO ₂ (2) İnce Filmlerin Sentezi	38
3.2.4. Ticari TiO ₂ Mezopor İnce Filmlerin Sentezi.....	38
3.2.5. Asidik Temelli TiO ₂ Mezopor İnce Filmlerin Sentezi	38
3.2.6. P25 Temelli TiO ₂ Mezopor İnce Filmlerin Sentezi.....	39
3.2.7. Metil Amonyum İyodür (CH ₃ NH ₃ I) Sentezi.....	39
3.2.8. Metil Amonyum Kurşun İyodür (CH ₃ NH ₃ PbI ₃) İnce Filmlerin Sentezi.....	40
3.2.9. ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ Kaplı Camlar Üzerine Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O Başlangıç Reaktif Kimyasalı İle NiO Anorganik Boşluk Taşıyıcının Sentezlenmesi	40
3.2.10. ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ Kaplı Camlar Üzerine Ni(Cl) ₂ ·6H ₂ O Başlangıç Reaktif Kimyasalı İle NiO Anorganik Boşluk Taşıyıcının Sentezlenmesi	41
3.2.11. ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ Kaplı Camlar Üzerine Ni(OCOCH ₃) ₂ ·4H ₂ O Başlangıç Reaktif Kimyasalı İle NiO Anorganik Boşluk Taşıyıcının Sentezlenmesi	42
3.2.12. ZnO Elektron Taşıyıcılı İnce Filmlerin Sentezi	42
3.2.13. ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ / CH ₃ NH ₃ PbI ₃ Kaplı Camlar Üzerine Spiro-OMeTAD Sentezi.....	42
3.2.14. Anorganik Boşluk Taşıyıcı Perovskit Tipi Güneş Hücresinin Gümüş Kaplanması	43
3.2.15. X-Işını Kırınımı Analizi	44
3.2.16. UV-Görünür Bölge Difüz Reflektans Spektroskopisi Analizi	44
3.2.17. Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi	45
3.2.18. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi.....	46
3.2.19. Partikül Boyutu Analizi	46
3.2.20. Keithley 2401 Akım- Voltaj Eğrisi Analizi.....	46
4. BULGULAR.....	49
4.1. SENTEZLENEN TiO ₂ İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU	49
4.1.1 Farklı Başlangıç Malzemeleri İle Sentezlenmiş TiO ₂ İnce Film Örneklerinin UV-Vis Analiz Sonuçları.....	49
4.1.2 Farklı Başlangıç Malzemeleri İle Sentezlenmiş Mezopor TiO ₂ Pasta Tabakası Film Örneklerinin UV-Vis Analiz Sonuçları.....	50
4.1.3. Sentezlenen TiO ₂ İnce Filminin XRD Analiz Sonuçları	50
4.1.4. TiO ₂ İnce Film Mikroskop Görüntüleri.....	51

4.2.SENTEZLENEN PEROVSKİT ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU	53
4.2.1. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İnce Filminin XRD Analiz Sonuçları	53
4.2.2. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İnce Filminin UV-Vis Analiz Sonuçları	55
4.2.3. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İnce Filminin FTIR Analiz Sonuçları	56
4.3.SENTEZLENEN NiO İNCE FİLM İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU	57
4.3.1. NiO İnce Filminin XRD Analiz Sonuçları	57
4.3.2. NiO İnce Filminin UV-Vis Analiz Sonuçları	58
4.3.3. NiO İnce Filminin FTIR Analiz Sonuçları	59
4.3.4. NiO İnce Filmlerinin DLS Analiz Sonuçları	60
4.4. SENTEZLENEN ZnO İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONLARI	62
4.4.1. ZnO İnce Filminin UV-Vis sonuçları	62
4.5.SENTEZLENEN GÜNEŞ HÜCRELERİNİN AKIM VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ	63
4.5.1. Düzlemsel Yapılı Farklı TiO_2 İnce Filmleriyle Sentezlenen Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi	63
4.5.2. Mezopor Yapılı Farklı TiO_2 İnce Filmleriyle Sentezlenen Perovskit Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi	65
4.5.3. Farklı Çözücü İçinde Sentezlenen Perovskitin Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi	67
4.5.4. İnorganik Yapılı Boşluk Taşıyıcı Tabaka NiO 'lerin İnce Film Olarak Kaplanması ITO/c- TiO_2 /m- TiO_2 /Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)/ NiO /Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi	69
4.5.5. Organik Yapılı Boşluk Taşıyıcı Tabaka Spiro-OMETAD Kullanılarak ITO/c- TiO_2 /m- TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ / NiO /Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi	72
4.5.6. Tersine Çevrilmiş Yapılı Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi	73
4.5.7. İnorganik Yapılı Boşluk Taşıyıcı Tabaka NiO Kullanılarak ITO/c- TiO_2 /m- TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ / NiO /Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi.....	74
4.5.8. ITO/c- TiO_2 / Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) /P3HT/Ag Güneş Hücresinin SEM Analiz Sonuçları	75
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	78
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Fosil enerji kaynakları açısından dünya enerji kullanımı (İTÜ, 2007).....	2
Şekil 2.2: Türkiye'nin toplam güneş radyasyonu (Y.E.G.M).	3
Şekil 2.3: Tek ve çok kristal silisyumun üretim metotlarından çekme ve kesme yöntemi (Ardağ,2012).	5
Şekil 2.4: İnce film güneş pilinin panel yapısı (Ardağ,2012).	6
Şekil 2.5: Katı hal boya duyarlı güneş hücreleri yapısı (Ojanperä, 2015).	7
Şekil 2.6: Hibrit güneş pilleri yapısı (Ojanperä, 2015).	8
Şekil 2.7: Güneş hücreleri gelişim süreci (Green, 2015).	9
Şekil 2.8: İletkenlik derecesine göre değişen bant enerjileri (Şelçuk, 2017).	10
Şekil 2.9: Fermi seviyeleri (Şelçuk, 2017).	10
Şekil 2.10: TiO ₂ farklı kristal yapısı (Mo, 1995).	12
Şekil 2.11: TiO ₂ kristallerinin atomlar arası bağ uzunlukları ve bağ açıları (Diebold, 2003).	14
Şekil 2.12: Perovskit yapıları (A) kübik yapı, B) tetragonal yapı, C) ortorombik yapı (Guo, 2016).	16
Şekil 2.13: Rutenyum bazlı N719 boya ile perovskit absorbands karşılaştırılması (Burschka, 2013).	17
Şekil 2.14: Hibrid kurşun halojenür perovskit tiplerinin bant aralıkları (Popov, 2014)	18
Şekil 2.15: Perovskit tek kademe kaplama (Kojima, 2009).	19
Şekil 2.16: Perovskit ardışık sıralı kaplama (Kojima, 2009).	20
Şekil 2.17: Perovskit çift kaynak kaplama (Kojima, 2009).	20
Şekil 2.18: Ardışık sıralı buhar kaplama (Kojima, 2009).	21
Şekil 2.19: Solüsyon buharlı birikim (Kojima, 2009).	21
Şekil 2.20: Perovskit güneş hücresi tipleri (Song, 2016).	22
Şekil 2.21: Spiro-OMETAD, LiTFSI, FK209, TBP'ın molekül yapısı (Vivo, 2017).	30

Şekil 3.1: Metil amonyum iyodürün sentezi.	39
Şekil 3.2: Perovskit filtre işlemi öncesi (1) ve filtreleme işlemi sonrası (2).....	40
Şekil 3.3: NiO kurutma sonrası ve kalsinasyon sonrası.	41
Şekil 3.4: Vaksis metal buharlaştırma cihazı.	43
Şekil 3.5: Gümüş kaplanması sonrası güneş hücresi.	44
Şekil 3.6: Ocean Optics USB-4000 marka spektrofotometre.	45
Şekil 3.7: Fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim karakteristiği.....	47
Şekil 4.1: Farklı başlangıç malzemeleri ile sentezlenmiş TiO ₂ ince filmlerinin UV-Vis sonuçları.	49
Şekil 4.2: Farklı TiO ₂ pastalarının UV-Vis grafiği.	50
Şekil 4.3: TiO ₂ ince film XRD grafiği.	51
Şekil 4.4: a)3000 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO ₂ , b) 1500 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO ₂ , c) PEG 1000 ilavesi ile 3000 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO ₂ , d) HCl+ Asetil aseton bağlayıcı ile 3000 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO ₂	52
Şekil 4.5: a)P127 temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO ₂ ince film, b)1*0,15+1*0,30 M temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO ₂ ince film, c) 2*0,15+1*0,30 M temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO ₂ ince film, d) 1*0,15+2*0,30 M temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO ₂ ince film yüzey görüntüsü.	53
Şekil 4.6: Sentezlenen metil amonyum iyodürün XRD analiz sonuçları.....	54
Şekil 4.7: Perovskit (CH ₃ NH ₃ PbI ₃) ait XRD grafiği.	55
Şekil 4.8: Perovskit (CH ₃ NH ₃ PbI ₃) UV-VİS grafiği.	56
Şekil 4.9: Perovskit (CH ₃ NH ₃ PbI ₃) ait FTIR grafiği.	57
Şekil 4.10: Farklı başlangıç reaktifleri ile sentezlenen NiO’lerin XRD analizi sonuçları.	58
Şekil 4.11: Sentezlenen NiO’lerin UV-Vis sonuçları.	59
Şekil 4.12: NiO ince filmlerinin FTIR sonuçları.	60
Şekil 4.13: Ni(NO ₃) ₂ .6H ₂ O-başlangıç reaktifi DLS sonuçları.	60
Şekil 4.14: NiCl ₂ ·6H ₂ O başlangıç reaktifi DLS sonuçları.	61
Şekil 4.15: Ni(OCOCH ₃) ₂ .4H ₂ O DLS sonuçları.....	62

Şekil 4.16: ZnO ince film UV-VİS sonuçları.....	63
Şekil 4.17: ITO/(1*0,15M+2*0,3M) TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /P3HT/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	64
Şekil 4.18: ITO/(P127) TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /P3HT/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	65
Şekil 4.19: ITO/(1*0,15 M+2*0,3 M) TiO ₂ / m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /P3HT/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	66
Şekil 4.20: ITO/(P127) TiO ₂ / m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /P3HT/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.....	67
Şekil4.21: ITO/(1*0,15M+2*0,3M)TiO ₂ /mTiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (DMF+DMSO)/P3HT/A g fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.....	68
Şekil4.22: ITO/(P127)TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (DMF+DMSO)/P3HT/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	69
Şekil 4.23: ITO/c-TiO ₂ / m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (ticari)/NiO(asetat)/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	70
Şekil 4.24: ITO/c-TiO ₂ / m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (ticari)/NiO(nitrat)/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	71
Şekil 4.25: ITO/c-TiO ₂ / m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (sentez)/NiO(nitrat)/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	71
Şekil 4.26: ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /Spiro-OMETAD/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.	73
Şekil 4.27: ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /NiO/Ag Güneş Hücreсі Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi (1).....	74
Şekil 4.28: ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /NiO/Ag Güneş Hücreсі Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi (2).....	75
Şekil 4.29: Perovskit ince film örneğinin a)400µm,b)100 µm, c)20 µm, d)10 µm ait SEM görüntüsü.....	76
Şekil 4.30: ITO/c-TiO ₂ /Perovskit (CH ₃ NH ₃ PbI ₃)/P3HT/Ag güneş hücreсіne ait kesit SEM görüntüsü.....	77
Şekil 4.31: ITO/c-TiO ₂ /Perovskit (CH ₃ NH ₃ PbI ₃)/P3HT/Ag güneş hücreсіne ait EDAX sonuçları	77
Şekil 5.1: a) NiO kaplı güneş hücreсі, b) spiro-OMETAD kaplı güneş hücreсіnin kaplama işleminden 24 saat sonra durumu.....	86

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: TiO ₂ 'nin yapı parametreleri (Şan, 1997).....	12
Tablo 2.2: NiO tabaka kalınlığının güç dönüşüm verimi üzerine etkisi (Tang, 2018).....	32
Tablo 3.1: Güneş hücrelerinin hazırlanması için kullanılan kimyasal malzemeler.....	33
Tablo 4.1: Düzlemsel yapılı farklı TiO ₂ ince filmleriyle pil karakteristiklerinin sonuçları.	65
Tablo 4.2: Mezopor yapılı farklı TiO ₂ ince filmleriyle güneş pillerinin karakteristik sonuçları.	67
Tablo 4.3: Farklı çözücü etkisinin farklı TiO ₂ ince filmleriyle güneş pillerinin karakteristik sonuçları.	69
Tablo 4.4: Farklı NiO çözelti ince filmleriyle oluşturulan ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /Perovskit (CH ₃ NH ₃ PbI ₃) /NiO/ Ag hücrelerin pil karakteristikleri.....	72
Tablo 4.5: ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi.	75
Tablo 5.1: 1*0,15M +2*0,30 M temelli sentezlenen TiO ₂ güneş hücrelerini karşılaştırılması.....	87
Tablo 5.2: P127 temelli sentezlenen TiO ₂ güneş hücrelerini karşılaştırılması.....	88

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Absorbsiyon Katsayısı
CB	: İletkenlik Bandı
D	: Kalınlık
h	: Plank Sabiti
e	: Elektron
ecB	: İletkenlik Bandında oluşan Yük
E_f	: Fermi Seviyesi
E_g	: Bant Aralığı Enerjisi (ev)
eV	: Elektron volt
h⁺	: Boşluk
I	: Akım
J_{sc}	: Kısa Devre Akımı
T	: Transmittans
n	: Kırılma yolu
UV	: Ultraviyole Bölge
VB	: Değerlik Bandı
Vis	: Görünür Bölge
Voc	: Açık Devre Gerilimi
η	: Fotovoltaik Hücrelerde Güç Dönüşüm Verimi
Θ	: Yansıma açısı (Bragg açısı)
Λ	: Dalga boyu
v	: Frekans
Å	: Angstrom

Kısaltmalar	Açıklama
DMF	: Dimetil Formamid
DMSO	: Dimetil Sülfoksit
DRS	: Diffuse Reflektans Spektroskopisi
EDAX	: Enerji Dağılımı Spektroskopisi
ETF	: Elektron Taşıyıcı Film
ETM	: Elektron Taşıyıcı Tabaka
FF	: Dolgu Fakörü
FTIR	: Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi
FTO	: Flor Katkılı Kalay Oksit Kaplı Cam
GBL	: Gama-bütirolakton
HTF	: Boşluk Taşıyıcı Film
HTM	: Boşluk Taşıyıcı Tabaka
HOMO	: En Yüksek Enerjili Dolu Orbital
ITO	: İndiyum Katkılı Kalay Oksit Kaplı Cam
LUMO	: En Düşük Enerjili Boş Orbital
MAI	: Metil Amonyum İyodür
NiO	: Nikel Oksit
PCBM	: Fenil-C ₆₁ -bütirik asit metil esteri
PEDOT:PSS	: Poli(3,4-etilen dioksi tiyofen):poli (stiren sülfonat)
P3HT	: Poli (3-hekziltiyofen-2,5-diyl)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TiO₂	: Titanyum Dioksit
U.E.A.	: Uluslararası Enerji Ajansı
XRD	: X Işını Kırınımı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANORGANİK BOŞLUK TAŞIYICILI PEROVSKİT TİPİ GÜNEŞ HÜCRESİ SENTEZİ

Büşra KAYA

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İsmail BOZ

Sürekli gelişen dünyada artan enerji ihtiyacı insanlığı alternatif enerji kaynakları aramaya itmektedir. Güneş enerji bu konuda en önemli alternatif enerji kaynağı olmaktadır. Özellikle Türkiye gibi orta kuşak iklime sahip ülkelerde güneş enerjisi kullanımına daha uygundur. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren aygıtlara güneş hücresi denir. Organik -anorganik fotovoltaiik hücrelerin içinde bulunan perovskit güneş pilleri diğerleri ile karşılaştırıldığında kolay proseslenmesi, düşük maliyeti ve yüksek performans özellikleri ile öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, güneş hücresini oluşturan her bir tabakanın yapısal değişimlerinin verim üzerine etkisine bakılmıştır. Sentezlenen yapıların morfolojik, optik karakterizasyonu ve akım gerilim analizleri incelenmiştir. Elektron taşıyıcı tabaka olarak TiO_2 ve boşluk taşıyıcı tabaka olarak kullanılan NiO sol jel yöntemi ile sentezlenmiştir. Perovskit sentezi için ilk olarak metil amonyum iyodur sentezlenmiş ve PbI_2 ile 60°C , 12 saat boyunca reaksiyona sokularak elde edilmiştir. Elde edilen bütün çözeltiler ince film yapısını oluşturmak için dönerek kaplama metodu kullanılarak kaplanmıştır. En performans olarak $\text{ITO/c-TiO}_2/\text{m-TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{NiO}(\text{nitrat})/\text{Ag}$ güneş hücresinde verim %0,64, $\text{Voc}=464$ mV, $\text{Jsc}=5,90$ mA/cm^2 , $\text{FF}=0,30$ olarak bulunmuştur. NiO partikül boyutunun, boşluk taşıyıcı tabakanın yapısı etkilediği boyut artımının verim düşmesine neden olduğu bulunmuştur.

Haziran 2018, 111 sayfa.

Anahtar kelimeler: güneş hücresi, kompakt TiO_2 , mezopor TiO_2 , $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3)$ Perovskit, NiO

SUMMARY

M.Sc. THESIS

SYNTHESIS OF PEROVSKITE TYPE SOLAR CELL WITH INORGANIC HOLE CARRIER

Büşra KAYA

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Chemical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İsmail BOZ

Increasing energy demand of constantly growing world is pushing humanity to seek alternative energy sources. Solar energy is the most important alternative energy source in this regard. Especially in countries with moderate climate such as Turkey, solar energy generation is more convenient to use. Device that convert solar energy to electricity is called solar cell. The perovskite solar cells found in organic - inorganic photovoltaic cells are characterized by easy processing, lower cost and high performance compared to others. In this thesis, the effect of the structural changes of each layer forming the solar cell on efficiency is examined. Morphological, optical characterization and current analysis of the synthesized structures have been investigated. TiO_2 and NiO were synthesized as ElectronTransportLayer and HoleTransportLayer via sol-gel method. Perovskite was synthesized in two stages: $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ was produced in inert N_2 medium. CH_3NH_3 and PbI_2 were mixed at 60°C during 12 hours. Each of ETL, HTL and perovskite were coated with spin coater for thin layer production. The highest performance was found in $\text{ITO} / \text{c-TiO}_2 / \text{m-TiO}_2 / \text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 / \text{NiO (nitrate)} / \text{Ag}$. Solar cell, with efficiency %0.64, $V_{oc}=464 \text{ mV}$, $J_{sc}=5.90 \text{ mA/cm}^2$, $\text{FF}=0.30$. It has been found that cavity carrier layer structure affected by the size of NiO particle and increasing size of NiO particle results in decreasing of efficiency

June 2018, 111. pages.

Keywords: solar cell, compact TiO₂, mesoporous TiO₂, perovskite (CH₃NH₃PbI₃), NiO



1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze insanlığın en büyük problemlerinden biri güvenilir, çevreci ve sürdürülebilir enerji olmuştur. Nüfus artışına ve çeşitlenen gereksinimlerin karşılanma hızına paralel olarak enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Güneş, rüzgâr, su, dalga, jeotermal, biokütle vb. gibi enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynakları olarak sayılabilirler. Güneş enerjisi, tartışmasız olarak bunların içinde en çok dikkat çeken enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, dünya ve üzerinde yaşayan canlılar için önemli bir sorun olan çevreyi kirlletici artıkların bulunmayışı, yerel olarak uygulanabilmesi ve karmaşık bir teknoloji gerektirmemesi gibi üstünlükleri sebebiyle son yıllarda üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı bir konu olmuştur.

Güneş pilleri ya da fotovoltaik piller diye anılan cihazlar, yarıiletkenlerin fotovoltaik etki özelliğini kullanarak, güneş ışığından elektrik enerjisi üretirler. Bu işlemi yaparken de doğadaki enerji çevrimini doğaya hiçbir zarar vermeden gerçekleştirir. Günümüzde silikona dayalı güneş hücreleri kullanılmaktadır. Bu pillerin üretimi maliyetli ve zor proseslerdir. Bu yüzden alternatif güneş pilleri çalışmaları devam etmektedir. Organik yapılı güneş pilleri ve organik-anorganik hibrit güneş pilleri, silikona dayalı güneş hücrelerine göre daha hafif, düşük maliyet ve kolayca işlenebilirlikleri gibi avantajlara sahiptirler. Son yıllarda yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalarda organik-anorganik hibrit güneş hücresi (perovskit) tipi güneş hücrelerinde %20 yakın ve hatta aşkın verimler elde edilmiştir (Green, 2015).

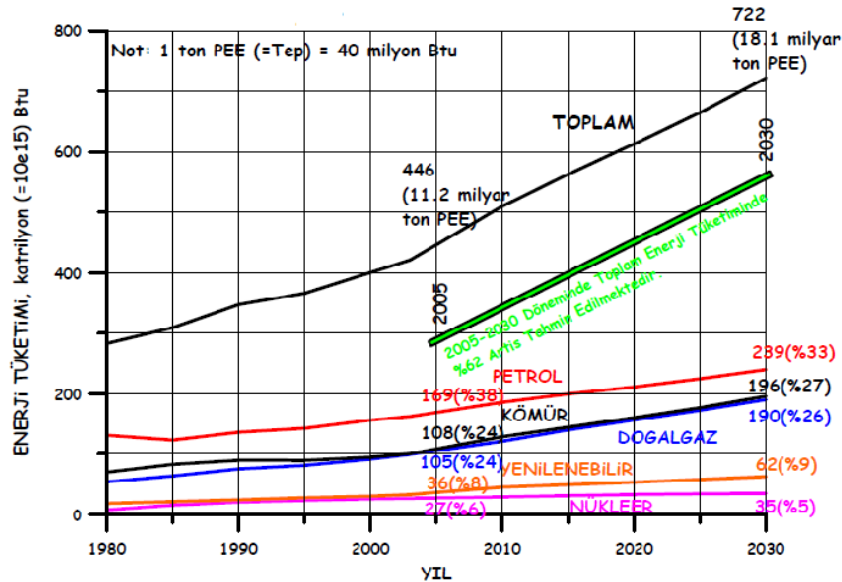
Bu tez kapsamında anorganik boşluk taşıyıcılı perovskit tipi güneş hücresi sentezi amaçlanmıştır. Ayrıca piyasada kullanılan maliyeti fazla olan spiro-OMETAD boşluk taşıyıcı tabaka yerine maliyeti düşük ve kolay proseslenebilen anorganik boşluk taşıyıcı (NiO) tabakası sentezlenmiş ve verimleri kıyaslanmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ

Çağımızda yeni veya yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği artmakta, bir kısmı ekonomik alternatiflik açısından değer kazanmakta, bir kısmı üzerinde ekonomik analizler yapılmakta ve her gün başka enerji kaynakları ortaya çıkmaktadır. Bu kaynakların neredeyse tamamının ortak yönü çevreye kısa ve uzun vadede olumsuz etki oluşturmamasıdır. Yapılan incelemelere göre, 2020 yılındaki enerji talebinin, bugünkü enerji talebine göre % 65, 2050 yılındaki enerji talebinin ise % 250 daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. Bugünkü bilinen üretilebilir fosil yakıt rezervleri, petrolde 40 yıl doğalgazda 62 yıl, kömürde ise 216 yıl yetecek düzeyde olacağını tahmin edilmektedir (U.E.A.).

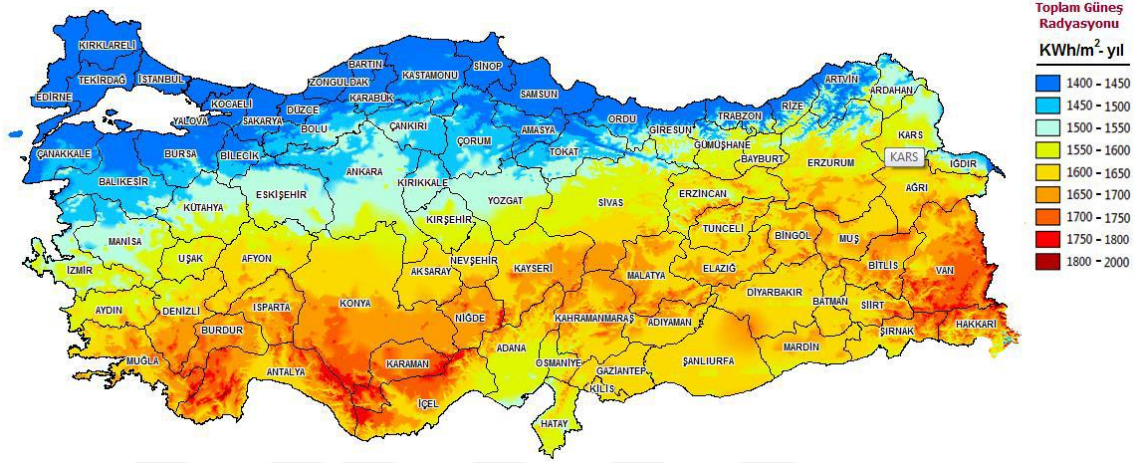
Şekil 2.1’de yıllara göre enerji ihtiyacının artmasına bağlı olarak enerji türlerinin kullanımı gösterilmektedir. 2030 yılına kadar yapılan enerji tüketim senaryosunu göre dünyada %6,2’lik bir enerji tüketim artışı gerçekleşmesi beklenmektedir (İTÜ, 2007). Bu yüzden fosil kaynaklara alternatif olarak yenilenebilir enerji türleri araştırma konusu olmaktadır.



Şekil 2.1: Fosil enerji kaynakları açısından dünya enerji kullanımı (İTÜ, 2007).

Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal, biyokütle, gel-git vb. olaylardır. Güneş enerjisi, Türkiye’de mevcut olanaklarla uygulamaya alınabilecek en önemli alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Yenilenebilir enerji genel müdürlüğü verilerine göre Türkiye’nin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2734 saat ve ortalama toplam

ışınım şiddeti $1727 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$ (günlük toplam $4,2 \text{ kWh/m}^2$) olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.2’de Türkiye’nin toplam güneş radyasyonu gösterilmektedir. (Y.E.G.M).



Şekil 2.2: Türkiye’nin toplam güneş radyasyonu (Y.E.G.M).

Ülkemizin özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri güneş enerjisi kullanımı açısından oldukça elverişlidir. Günümüzde Türkiye’de güneş enerjisi daha çok ısıtma ve sıcak su amaçlı kullanılmakta çok düşük miktarlarda da lisansız elektrik üretim amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni güneş pillerinin verimlerinin çok düşük ve üretim maliyetlerinin çok pahalı olmasıdır. Bu yüzden, hem güneş pilleri yapmak için ucuz yöntem bulunması hem de mevcut yöntemlerle üretilen güneş pillerinin verimlerini artırıcı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

2.2. FOTOVOLTAİK PİLLER

2.2.1. Fotovoltaik Pillerin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik piller, birden fazla yarı iletken malzemelerden oluşan gelen güneş ışığını absorbe ederek doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Edmond Becquerel’in 1839 yılında gerçekleştirdiği çalışmada plantinlenmiş elektrodu gümüş klorür ile aydınlatarak kaplamıştır (Fahrenbruch, 2012). Bu deney sonucunda fotoelektrokimyasal etkiyi gözlemlemiştir. Bu çalışma sonrası fotovoltaik sistemler hem alternatif enerji için hem de bilim dünyası için ciddi bir ilgi alanı haline gelmiştir.

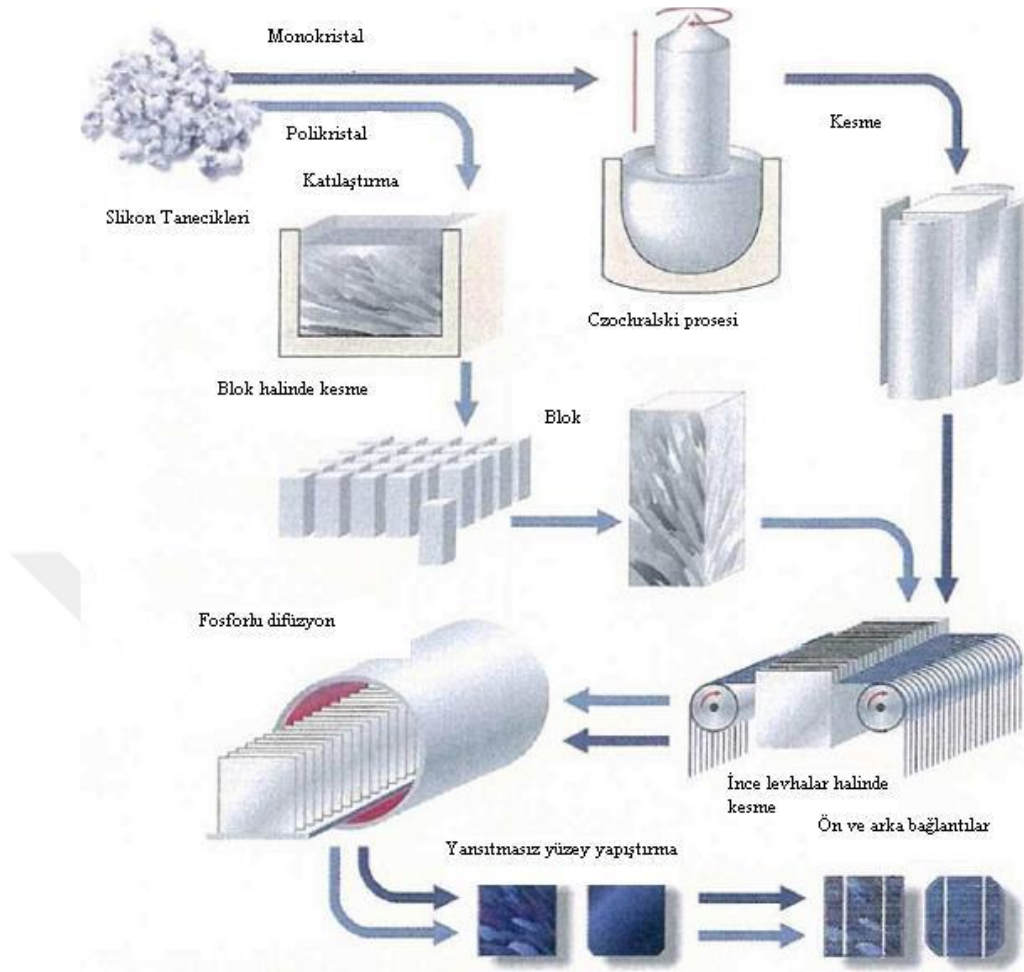
Tarihsel gelişim sırasına göre fotovoltaik pilleri çeşitli malzemelerin kullanıldığı 4 farklı jenerasyonda gruplandırmak mümkündür. Güneş pilleri alanındaki başlıca çalışma alanları,

verimlerini ve kararlılıklarını arttırmak ve maliyetlerini düşürmek üzere çalışmalar devam etmektedir.

2.2.1.1. Birinci Nesil Fotovoltaik Piller

Tekli ve çoklu kristal silikon güneş pilleri olarak bilinen 1. nesil güneş pilleri, bu nesile ait fotovoltaik türlerdendir. Bu nesil fotovoltaikler de Si elementi kullanılmıştır. Bunun nedeni öncelikle doğada çok kolay bulunulması, veriminin yüksek olması, uzun ömürlü olmasıdır. İlk ticari güneş pillerinde, Czochralski kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapıli silisyum kullanılmıştır. Günümüzde halen endüstride en çok kullanılan yöntemdir. Üretimde öncelikle saf silisyum eldesi için ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli termal ve kimyasal reaksiyonlara tabi tutulmaktadır. Oluşan silisyum eriyiğe çekirdek denen tek (mono) kristal yapıli bir silisyum parçası batırılıp, bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış halde olmaktadır. Bu silisyum külçe bir keski ile dilimlere ayrıldıktan sonra önce dikdörtgen bloklar şeklinde kesilmekte, takiben bu bloklar dilimlere ayrılarak güneş pili şeklinde işlenmektedir (Ojanperä, 2015).

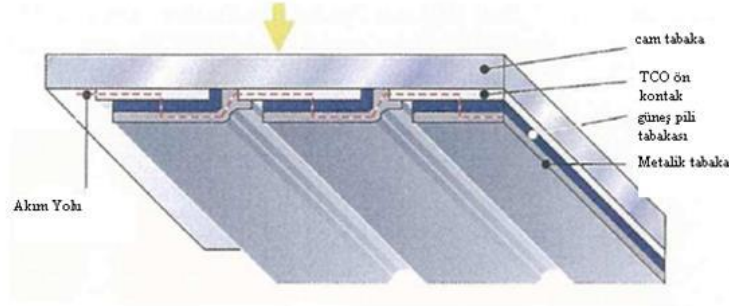
Çoklu kristal yöntemiyle fotovoltaik hücre üretimi daha fazladır çünkü polikristal üretimi daha kolay proseslenebilmektedir. Çok kristalli silisyumun üretilmesinde dökme yöntemi daha çok kullanılmaktadır. Çok kristalli silisyumda başlangıç malzemesi tek kristalli silisyumda olduğu gibi hazırlanmaktadır. Silisyumun saflık derecesi de aynı değerde olmalıdır. Kalıplara dökülerek erimiş yarıiletken silisyum soğumaya bırakılıp takiben elde edilen bloklar kare şeklinde kesilmektedir. Tek kristal fotovoltaik hücrelerin dezavantajı olan üretim maliyeti, bu teknoloji ile önemli ölçüde aşağıya çekilebilmektedir. Fakat üretilen malzemelerden elde edilen güneş pillerinin güç dönüşüm verimlilikleri daha azdır (Ojanperä, 2015). Şekil 2.3’de üretim prosesleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Tek ve çok kristal silisyumun üretim metotlarından çekme ve kesme yöntemi (Ardağ,2012).

2.2.1.2. İkinci Nesil Fotovoltaik Piller

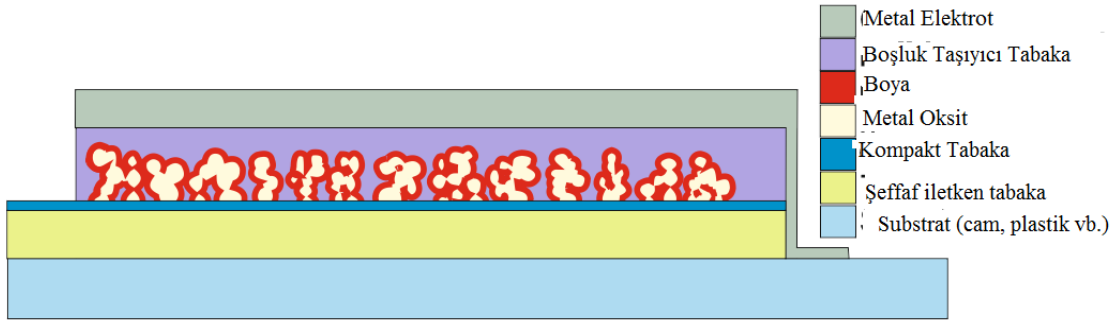
Amorf silisyum (a-Si), kadmiyum sülfür/kadmiyum tellür (CdS/CdTe), kadmiyum selen (CdSe), bakır indiyum galyum diselenür (CIGS) ve ince film Si gibi malzemeler ince ikinci nesil fotovoltaik hücrelerde kullanılan önemli malzemeler olarak dikkat çekmektedir. Bu malzemeler ince film teknikleriyle öncelikle üzerinde saydam oksit iletken tabaka ile kaplanmış olan ön alt malzemeye (cam vb.) fiziksel yada kimyasal yöntemlerle hazırlanmaktadır. Bunlar; iyon demetli püskürtme, fiziksel buhar biriktirme ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemleridir. Bu yöntemlerle 1.nesil fotovoltaik hücrelere göre üretim maliyetlerinde düşüş gerçekleşmiştir. İkinci nesil fotovoltaik pillerin güç dönüşüm verimleri, tek kristal silisyum pillerin etkinliği kadar yüksek olmasa da, bakır indiyum galyum diselenür pillerinin verimi %19,6 değeriyle aradaki uçurumu oldukça azaltmıştır (Ojanperä, 2015). Şekil 2.4’de ince film fotovoltaik hücre yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4: İnce film güneş pilinin panel yapısı (Ardağ,2012).

2.2.1.3. Katı Hal Boya Duyarlı Güneş Pilleri

Katı hal boya duyarlı güneş hücreleri 1991 yılında O'Regan ve Grätzel tarafından moleküler bir boya ile kaplanmış nanokristalin titanyum filmi ile ortaya çıkmıştır. Boya duyarlı hale getirilmiş güneş pillerinin üretim maliyeti düşük olduğu için geleneksel anorganik silikon esaslı güneş pillerine potansiyel bir alternatif olarak düşünülmüştür. Fakat bu güneş hücrelerini bir dezavantajı, sıvı bir elektrolitin varlığına bağlı olarak kaçak problemleri gerçekleşmesidir. 1998 yılında yapılan çalışmalarda sıvı elektrolit, katı bir boşluk taşıyıcı malzeme ile değiştirilmiş ve katı haldeki boya duyarlı güneş pilleri olarak adlandırılmıştır (Shi,2015). Boya duyarlı güneş pillerinde, cam ya da plastik üzerine kaplanmış olan şeffaf iletken oksit malzemesinin üstüne elektron taşıyıcı tabaka olarak nanoyapılı TiO_2 ve mezo-gözenekli tabaka kullanılmaktadır. Ayrıca elektron taşıyıcı tabaka olarak çinko oksit yada kalay oksit de kullanılabilir. Işık absorblayıcı olarak kullanılan boya elektron iletici tabakanın üstüne kaplanır. Daha sonraki tabaka, boya rejenerasyonu için sıvı redoks elektrolitidir. Katı hal boya duyarlı güneş pillerinde bu tabaka katı boşluk taşıyıcı malzeme ile kaplanmaktadır. En üst tabaka olarak elektronları toplamak için kullanılan elektrottur. (Hagfeldt 2010, Kazim 2014). Şekil 2.5'de katı hal boya duyarlı güneş hücrelerinin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Katı hal boya duyarlı güneş hücreleri yapısı (Ojanperä, 2015).

Bir katı hal boya duyarlı güneş hücresinin işlevi bir p-n birleşim tabanlı güneş pillerinden farklıdır. Çalışma prensibi, fotosentez prensibine dayanır. Fotonlar moleküller tarafından absorbe edilerek uyarılırlar, elektron ve boşluk tabakanının arayüzeyinde paylaşılır. Elektronlar anorganik yarıiletkenin iletim bandına enjekte edilir ve çalışma elektroduna göç ederler. Oksitlenmiş boya, redoks ortamının donör türlerinden elektron taşıyıcı ile yenilenir. Boşluklar kontak elektrotuna göç eder. Donör azaltılır ve boyanın uyarılmış hali bozulur. Enjekte edilen elektronlar, alıcıda redoks ortamında yenilenir (Docampo, 2014).

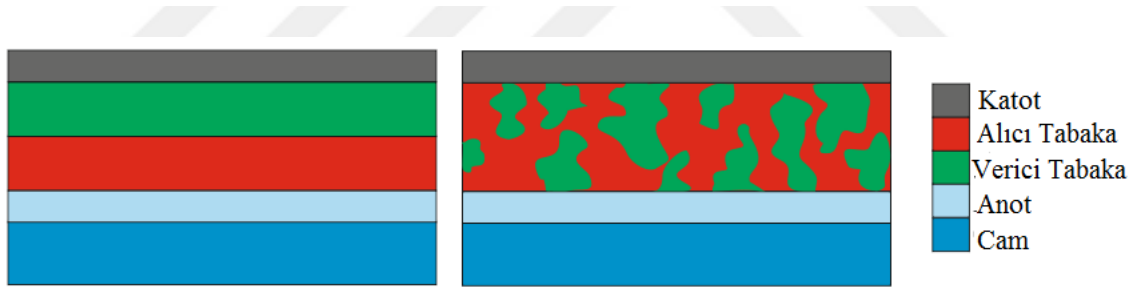
2.2.1.4. Organik Güneş Pilleri

Alan Heeger ve diğ. 1974 yılında yarıiletken polimerler keşifleri ile organik fotovoltaiik hücreler için ilk adımı atmış olmaktadırlar. İletken polimerler, diğer ismiyle konjuge polimerler, yarıiletken malzeme gibi davranır ve elektronik yapıları anorganik yarıiletkenlere benzer gözükür. Organik güneş pillerinin çalışma prensibi, anorganik pillerin p-n eklem sandiviç prensibine temel alınarak açıklanmaktadır. Işığın absorblanması, eksitonların difüzyonu, elektron ve boşlukların ayrılması, boşlukların anoda ve elektronların katoda ulaşmasıyla devre tamamlanmaktadır. Organik güneş pillerinde konjuge polimer olarak PCBM ((6,6)-fenil-C₆₁-butirik asit metil ester), PEDOT:PSS (poli(3,4-etilen dioksi tiyofen):poli (stiren sülfonat), P₃HT (poli (3-hekzil tiyofen-2,5-diyl) vb. malzemeler kullanılmaktadır. Fakat organik güneş pillerin de eksitonların ayrışması için iç elektrik alan yeterli olmamakla beraber polimer malzemelerin absorpsiyon bandının dar olması ışık absorplama etkinliğini azaltmaktadır ve mobilite özellikleri düşüktür (Şelçuk, 2017).

2.2.1.5. Hibrid Güneş Hücreleri

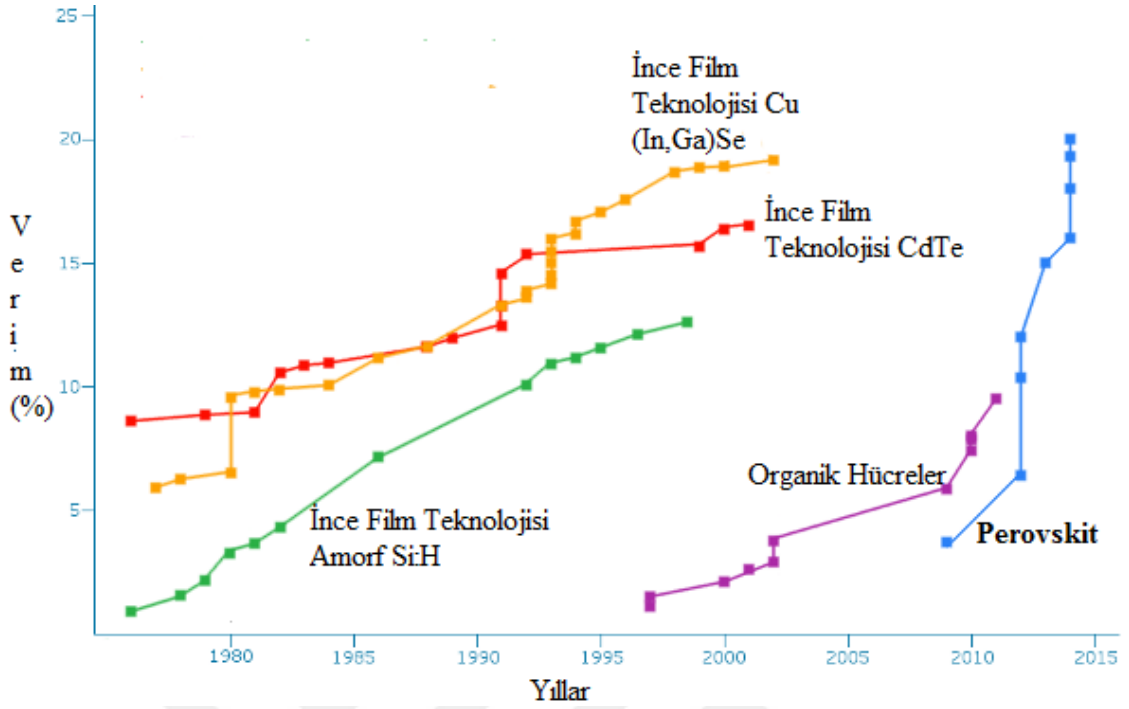
Hibrid güneş pilleri organik maddeleri anorganik malzemelerle birleştirerek her iki maddenin de avantajlarının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Organik yapıli molekülleer ile anorganik yapıli molekülleer karşılaştıırıldığında daha iyi kararlılık, daha yüksek taşıyıcı hareketliliği ve farklı nanoyapılar halinde düzenlenebilmesi anorganik yapıli molekülleeri daha fazla esneklik sağlamaktadır. Organik yapıli molekülleerin ışık emme özellikleri ve basit çözelti işlenebilirliği gibi avantajları da hibrit güneş pillerine avantaj sağlamaktadır.

Hibrid polimer güneş pillerinin çalışması, eksitonların vericinin uygun HOMO (değerlik bandının en yüksek enerjili orbitali), seviyesi enerjisi ve alıcı maddenin değerlik band kenarından ayrışmasını gerektirir. Donör malzeme, eksiton oluşumu ile sonuçlanan bir fotonu absorbe eder. Hibrid güneş pillerinde eksitonlar verici-alıcı arayüzünde elektronlara ve boşluklara ayrışır. Elektronlar, nihai olarak katoda toplanacak alıcı malzeme boyunca ilerlemektedir. Boşluklar donör materyali boyunca anot yönünde hareket eder. Şekil 2.6'da hibrit güneş hücrelerinin yapısı gösterilmektedir. (Fan, 2013).



Şekil 2.6: Hibrit güneş pilleri yapısı (Ojanperä, 2015).

Bölüm 2'de anlattığı gibi güneş pilleri ilk keşfinden bu yana önemli katkılarla günümüze kadar gelmiştir. Şekil 2.7'de güneş hücrelerinin gelişim sürecini tiplerine ve güç dönüşüm verimlerine göre özet olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Güneş hücreleri gelişim süreci (Green, 2015).

2.3. YARI İLETKENLER

Bir maddenin elektriği iletme oranı, serbest elektron üretme yeteneğine bağlıdır. Elektronların hareket davranışlarına göre malzemeler 3'e ayrılırlar.

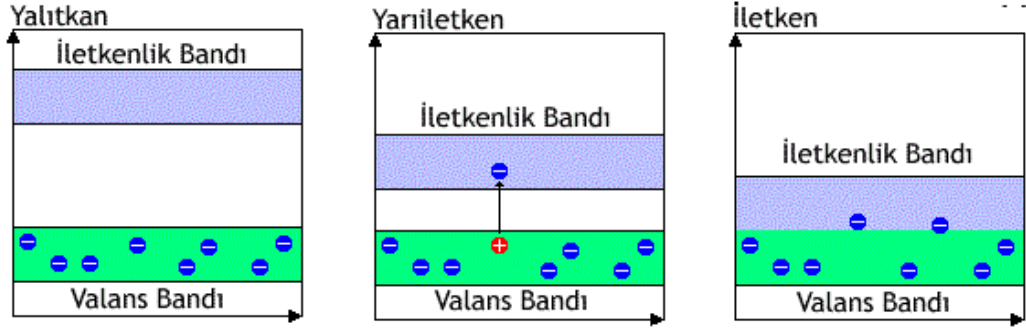
- İletkenler
- Yarı İletkenler
- Yalıtkanlar

Boşluk Bandı: Elektron bakımından boş bulunan ve valans bandındaki elektronların iletkenlik bandına geçmesini zorlaştıran boşluğa denir.

İletkenlik Bandı: Valans bandından kopan ve akım taşıyabilecek durumda olan elektronların yer aldığı banttır. Maddeler, elektronlarının bu banda geçmesiyle iletken hale geçebilirler.

Valans Bandı: Çekirdeğe yakın olan elektronlar tarafından işgal edilmiş enerji seviyelerinden oluşan banttır. Valans bandının elektronlarca dolu olan enerji seviyelerinin en yüksek orbitaline HOMO tamamen boş olan iletkenlik bandının en alt seviyesine ise LUMO (iletkenlik bandının en düşük enerji orbitali) denir (Şelçuk, 2017).

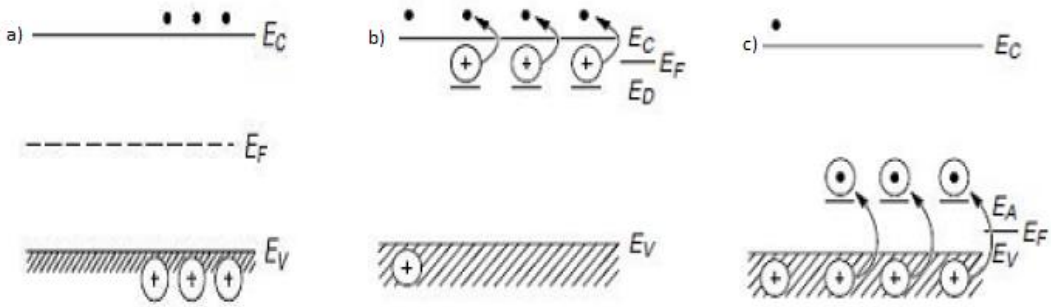
Şekil 2.8’de bant seviyelerine göre malzeme davranışı gösterilmektedir.



Şekil 2.8: İletkenlik derecesine göre değişen bant enerjileri (Şelçuk, 2017).

Yarı iletkenler üstün elektronik özellikleri sayesinde fotovoltaik hücreler kullanılmaktadırlar. Katı fazdaki malzemeler için fermi seviyesi önemli terimdir. Fermi seviyesi, enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme ihtimalinin $\frac{1}{2}$ olan olarak ifade edilebilir. Yarı iletkenlerin fermi seviyeleri yasak bant aralığındaki konumlarına göre üçe ayrılırlar. Şekil 2.9’da fermi seviyeleri gösterilmektedir.

- Fermi seviyesi, yasak bant aralığının ortasında bulunuyor ise saf (intrinsic) yarı iletkenler,
- Fermi seviyesi, iletkenlik bandı yakınında ise n-tipi yarı iletkenler,
- Fermi seviyesi, valens bandına yakın ise p-tipi yarı iletkenler adı verilir (Şelçuk, 2017).



Şekil 2.9: Fermi seviyeleri (Şelçuk, 2017).

2.3.1. Şeffaf İletken Oksit Tabaka (ITO, FTO)

Son tasarım güneş hücrelerinde kullanılan substratlar (PET, cam vb.) malzemelerde elektrik iletkenliğinin sağlanması için flor katkılı kalay oksit (FTO) veya indiyum katkılı kalay oksit (ITO) kaplanılır. Her bir şeffaf iletken oksit tabakanın kendine ait özellikleri ve güneş pili uygulaması için iyi veya kötü olan film oluşumu, yük taşıyıcı ve şarj rekombinasyonunda farklı özellikler gösterir.

Boya duyarlı güneş hücreleri için gerekli olan yüksek sıcaklık sinterleme adımları nedeniyle yüksek sıcaklıklarda üstün stabilitesi nedeniyle FTO tercih edilir. Yüksek sıcaklıkta sinterleme gerektirmeyen güneş hücreleri (perovskit tipi güneş hücreleri gibi) ITO genellikle bir alt tabaka direnci ve yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu için tercih edilen şeffaf iletken oksit tabakadır (Habibi, 2016). Bu tez kapsamında substrat olarak kullanılan cam üzerine ITO tabakası kullanılmıştır.

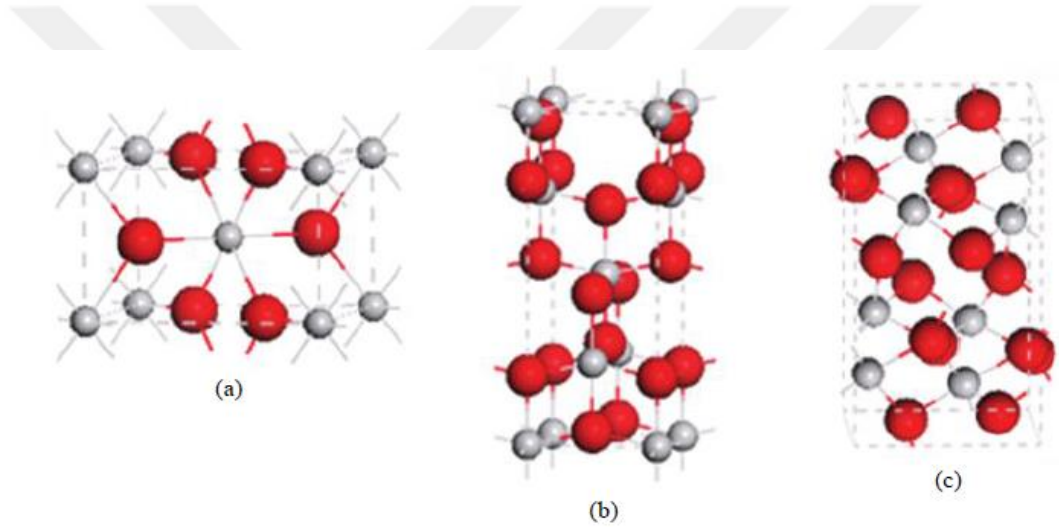
2.3.2. Kompakt Metal Oksit Tabaka (ETM)

Kompakt tabaka, mezoskopik perovskit güneş hücrelerinin önemli bir parçasıdır. Boşluk taşıyıcı tabaka ve şeffaf iletken oksit tabaka arasında hücreyi kısa devre oluşturacak temas önler. Ayrıca perovskite tabakasında veya boşluk taşıyıcı tabaka oluşturulan boşlukların ITO anoduna ulaşmasını engeller, bu da hücreden çıkarılabilen net akıma negatif katkıda bulunacaktır, çünkü boşluklar katotta toplanmalıdır. Kompakt tabaka, elektronları ve boşlukları kendi elektrotlarına yönlendirdiği için, yük taşıyıcıların rekombinasyon riskini azaltır. ITO tabakasının, perovskite veya boşluk taşıyıcı tabaka arasındaki temas alanı azaldıkça rekombinasyon da azaltılır. Perovskit güneş hücrelerinde TiO_2 ve ZnO en yaygın kullanılan kompakt tabaka malzemelerdir (Habibi, 2016).

TiO_2 , periyodik cetvelin IV kolonunda yer alan Ti atomu ile VI kolonunda yer alan O atomunun tepkimeye girmesiyle oluşur. Geniş bir yasak bant boşluğuna sahip olması, yüksek dielektrik sabiti, yüksek kırılma indisi yarı iletken metal oksit olarak kolay bulunabilmesi, pahalı olmaması, çevreyi kirletmemesi, zehirli olmaması nedeniyle son yıllarda TiO_2 üzerine yoğun çalışmalar başlamıştır.

TiO₂ güneş spektrumunun 100-400 nm arasında ki ışınları absorblayarak fotoaktif olan yari iletken bir malzemedir. Günümüzde bu özelliği sayesinde TiO₂ her türlü alanda özellikle de elektron taşıyıcı tabaka olarak güneş pillerinde rol oynamaktadır.

TiO₂ doğada 3 farklı kristal yapısında ve amorf yapısında bulunmaktadır. Bunlar; anataz, rutil, brokittir. Her bir uygulamada farklı bir kristal yapıda ki TiO₂ kullanılmaktadır. Yapılar arasındaki farkı TiO₆ oktahedralı nedenlidir. Farklı oktahedrallar zincirlerde farklı bükülmeler yaratır. Bu nedenle, TiO₂ nano tanelerinin üretimi sırasında yapısal ve fiziksel özelliklerini etkileyen reaksiyon koşullarının kontrol edilebilir olması önem taşımaktadır. Amorf TiO₂'in fotoaktivitesi yoktur. Şekil 2.10'da TiO₂'in 3 farklı kristal yapısı ve Tablo 2.1'de kristal özellikleri görülmektedir (Mo, 1995).



Şekil 2.10: TiO₂ farklı kristal yapısı (Mo, 1995).

Tablo 2.1: TiO₂'nin yapı parametreleri (Şan, 1997)

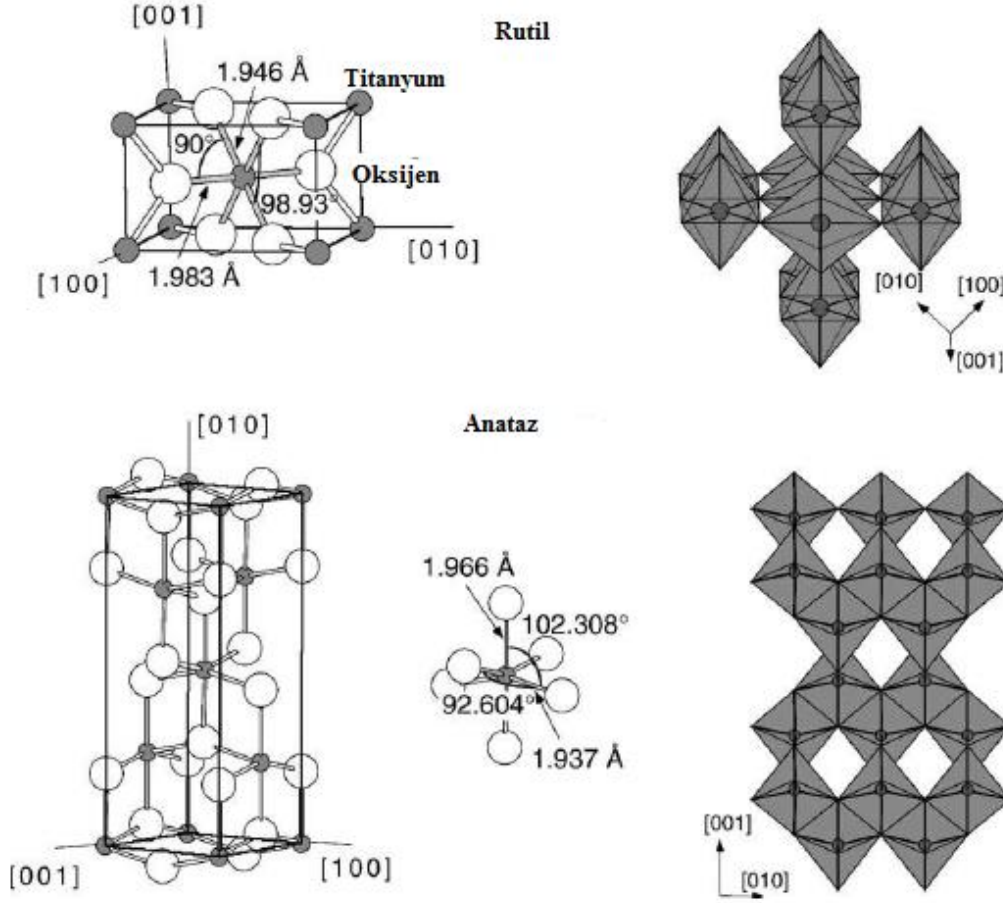
Yapı Parametresi	Anataz	Rutil	Brokit
Kristal Yapısı	Tetragonal	Tetragonal	Ortorombik
Örgü Sabitleri	a=3.782 Å b=3.782 Å c=9.502 Å	a=4.584 Å b=4.584 Å c=2.953 Å	a=9.166 Å b=5.436 Å c=5.135 Å
Molekül/Birim Hücre	4	2	8
Hacim/Molekül	34.061 Å ³	31.216 Å ³	32.172 Å ³
Yoğunluk	3,79 g/cm ³	4,13 g/cm ³	3,99 g/cm ³

Anataz ve rutil formu tetragonal yapıda olup brokit yapısı ortorombik kristal yapısına sahiptir. Tetragonal yapıda her bir Ti⁺⁴ iyonu 6 tane O⁻² iyonu ile çevrelenmiştir. Şan ve diğ.1997 yaptıkları çalışmada her bir farklı TiO₂'in kristal boylarının eşit olduğunda anataz formunun 11

nm küçük, rutil formunun 11-35 nm arasında, brokit formunda ise 35 nm'den büyük olduklarını bulmuşlardır.

Tavlama boyunca Anataz→rutil, anataz→brokit →rutil, brokit →rutil, ve brokit →anataz →rutil şeklinde birden fazla faz geçişi vardır. Geçiş sırası deney şartlarına, kimyasal fazı, substrat türü ve büyüklüğü ve tavlama sıcaklığı gibi özelliklere bağlıdır. Safılık veya parçacık büyüklüğüne bağlı olarak 600 °C ve 1000 °C arasında herhangi bir sıcaklıkta anataz faz, rutil faza geçebilir. Anataz yapısı kristali iğne biçiminde olup düşük sıcaklıklarda kararlı yapı sergilemekte, rutil fazı kristal şekli dik piramit veya yassı biçimde olup ,yüksek sıcaklıklarda kararlı yapı sergilemektedir (Şan, 1997).

Yapısal formlar arasında ki fotoaktivite özelliklerinin farklı olmasının nedeni formlar arasındaki band enerjilerinin farklı olmasındandır. Örneğin; anataz formunun yasak band aralığı enerjisi 3.2 eV olması ve 388 nm ve daha düşük dalga boylarında ışınları absorbe edebilir fakat rutil formunun 3.0eV olması 413nm ve daha düşük dalga boylarındaki ışınları soğurması demektir (Diebold ve diğ. 2003). Şekil 2.11'de rutil ve anataz TiO₂ kristallerinin atomlar arası bağ uzunlukları ve bağ açıları gösterilmektedir.



Şekil 2.11: TiO₂ kristallerinin atomlar arası bağ uzunlukları ve bağ açıları (Diebold, 2003).

ZnO, II-IV grubunda yer alan minium iletim bandı 4,2 eV, doğrudan bant başluğu 3,3 eV olan oda sıcaklığında 60meV'luk eksiton bağlanma enerjisine sahip bir yarı iletken malzemedir. Perovskitin LUMO ve HOMO'sun 3,6eV ve 5,2 eV olduğundan etkin elektron ekstraksiyonu beklenmektedir (Liu, 2016). ZnO farklı sentezlenme yöntemleri vardır bu tez kapsamında ZnO sentezi hidrotermal yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Hidrotermal büyütme yöntemi diğer kimyasal sentez yöntemleriyle karşılaştırıldığında, sentezde daha yavaş artan sistem içi doygunluk oranı ile kristallerin büyüme davranışı ve şekli daha hassas bir biçimde gerçekleşmektedir (Tuzcu,2015). Bu nedenle hidrotermal yöntem, ZnO kristallerinin oluşum ve büyüme süreçlerinin incelenmesinde kullanılabilecek ideal bir yöntemdir.

2.3.3. Mezopor Metal Oksit Tabakası

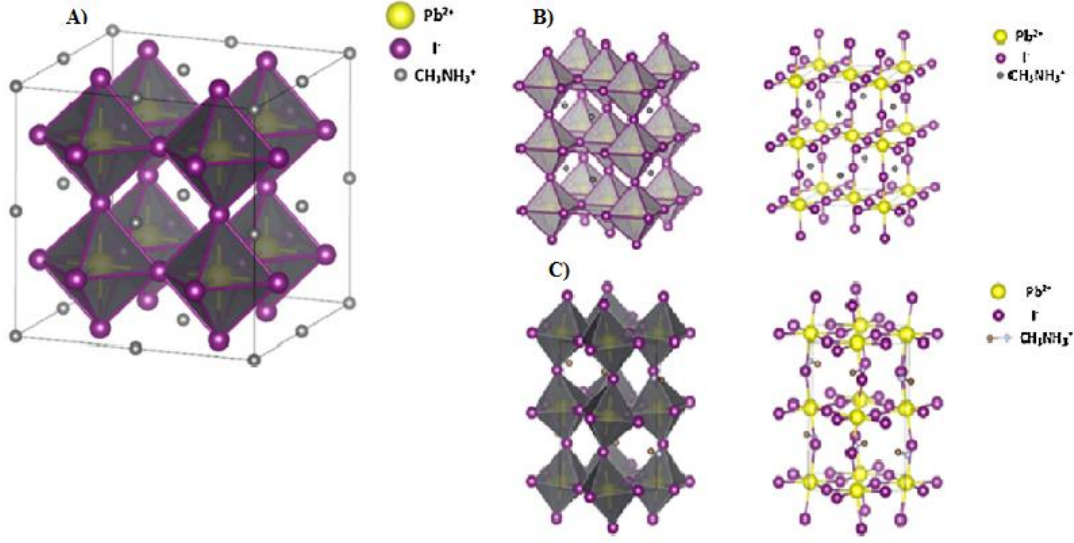
Mezopor malzemeler, atomlar, iyonlar, moleküller ve nanopartiküller ile sadece yüzeylerinde etkileşime girmez aynı zamanda bütün hacim boyunca etkileşime girerler. Bu da onları güneş

pillerinde araştırmayadakil eden özellikleridir. Mezopor güneş pillerinde, n tipi mezo (gözenekli) yarı iletken bir tabaka kullanır. İnorganik yarı iletken malzemeler, farklı ve karmaşık nanoyapılar üretmek için kullanılabilir. Bu tabaka çoğunlukla bölüm 2.3.2’de anlatılan TiO_2 ’dir.

Perovskite'den mezo-gözenekli tabakaya uyarılmış elektronları enjekte etmek için kullanılan metal oksit tabakası, perovskitin uyarılmış halinden daha düşük iletim bandına sahip olmalıdır. Kompak yapıda kullanılan anataz ve rutil TiO_2 yapıları mezopor yapısında da kullanılmaktadır. Anataz TiO_2 , mezoskopik perovskit güneş hücrelerinde en başarılı kullanılan nanoyapı olmuştur. Mezopor TiO_2 katmanları, dönerek kaplama metodu, serigrafi baskı ve doktor-blade ile kaplanabilir. Diğer kullanılan mezopor metal oksit tabakaları ZnO ve Al_2O_3 ’dır (Li, 2013). Bu tez kapsamında mezopor yapılı tabaka için farklı TiO_2 ’ler kullanılmış ve kaplama metodu olarak dönerek kaplama metodu seçilmiştir.

2.3.4. Perovskit Güneş Hücresi

Bilim dünyası perovskit yapısını ilk olarak 1839 yılında Gustav Rose tarafından kalsiyum titanat (CaTiO_3) bileşiğinin tanımlanmasıyla öğrenmiştir. Perovskitler ismini, CaTiO_3 ile aynı kristal yapısına sahip herhangi bir bileşik olup ve adını perovskiti karakterize eden Rus mineralojisti L.A. Perovski'den almaktadır. Genel olarak saf perovskite bileşiğinin ideal yapısı, AMX_3 yapısıyla oluşan bir ağ olup A ve M bir katyon X’ de bir anyondur. Araların da değerlilik oranı 1:2:1 dir. Birlikte oktahedral MX_6 düzenlemesi oluştururlar, burada M, oktahedronun ortasındadır ve X köşelerindedir. A, sekiz MX_6 oktahedra tarafından oluşturulan delikte ortalanmış olan geniş bir metal katyonunu belirtir. Saf perovskite bileşiği, bir küp geometrisine sahiptir, ancak doğal olarak sözde kübik veya çarpık kübik olarak çıkar. Çarpıklıklar, elektronik ve optik özellikler gibi perovskitlerin fiziksel özelliklerini etkiler (Ojanperä, 2015). Şekil 2.12’de perovskit bileşiklerinin genel yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.12: Perovskit yapıları (A) kübik yapı, B) tetragonal yapı, C) ortorombik yapı) (Guo, 2016).

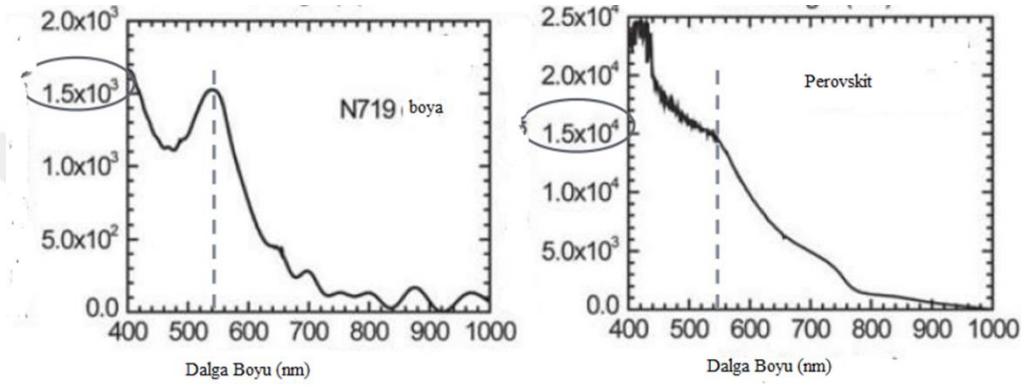
Perovskitleri yapı özelliklerinin ve stabilite özelliklerini belirleyen tolerans faktörü vardır. Bu faktörde RA ve RB katyonların yarıçapları, RX halojenin yarıçapını temsil etmektedir. Bu faktörün yarı deneysel olarak değeri 0.813–1.107 aralığındadır ve değerin 1 olduğu zaman ideal perovskit yapısı olarak kabul edilir (Guo, 2016). Tolerans faktörünün hesaplanması Denklem 2.1’de gösterilmektedir.

$$TF = \frac{(RA+RB)}{\sqrt{2(RB+RX)}} \quad (2.1)$$

İnorganik-organik perovskit bileşiklerinde A bir organik katyon (CH_3NH_3^+), M (Pb, Sn) X ise periyodik cetvelin 7A grubundan bir halojendir (I^- , Cl^- , Br^- vb.) . Güneş pillerinde kullanılan perovskitler, çoğunlukla tekli halid veya karışık halid perovskitlerdir. Tipik tek halid perovskitler metilamonyum kurşun iyodür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ veya MAPbI_3) ve metilamonyum kurşun bromür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ veya MAPbBr_3) 'dir. Güneş pilleri için tipik bir karışık halid perovskite yapısı $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Br}_x$ veya $\text{MAPbBr}_{3-x}\text{Cl}_x$ 'dir. Bu tez çalışmasında metilamonyum kurşun iyodür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ veya MAPbI_3) üzerinde çalışılmıştır.

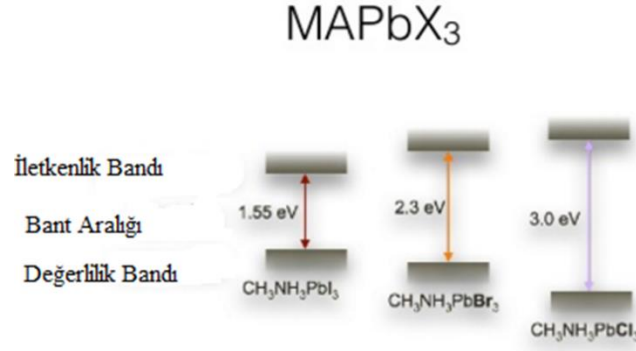
Perovskitlerin yük taşıma özellikleri çift-kutupludur, yani hem p-tipi hem de n-türü davranış sergilemektedir. Bu yapılandırmaları perovskit güneş pillerinin farklı çalışma prensiblerine izin vermektedir. Hibrid perovskitler, güneş pilleri uygulamalarında kullanımlarını destekleyen çeşitli özelliklere sahiptir. Yüksek molar soğurma katsayıları ve gözle görülen ışık aralığına

kıyasla üstün bir ışık performansına sahiptirler. Örneğin, MAPbI_3 'ün molar absorpsiyon katsayısı, katı haldeki boya duyarlılaştırılmış güneş pillerinde kullanılan organik boyalardan 2-3 kat daha yüksektir örneğin 550 nm'de yaklaşık $1.5 \times 10^5 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ civarındadır. Şekil 2.13'de rutenyum bazlı N719 boya ile perovskit absorpsiyon karşılaştırılması gösterilmektedir. Perovskitlerin eksiton difüzyon uzunlukları büyük olup, difüzyon uzunluğu, elektronlar için 130 nm ve boşluklar için 110 nm civarındadır. Mezopor bir yapıya sahip olan güneş pillerinde, difüzyon uzunluğu ışık emme derinliğinden (500-600 nm) daha kısa olarak tercih edilmektedir.



Şekil 2.13: Rutenyum bazlı N719 boya ile perovskit absorpsiyon karşılaştırılması (Burschka, 2013).

Ek olarak, organolead halid perovskit esaslı güneş pilleri, ultra hızlı bir şarj üretimine, yüksek taşıyıcı hareketliliğine, dengeli yük taşıyıcı hareketliliğine ve yavaş birleştirme hızlarına sahiptir. Örneğin, perovskitlerin titanyumdan 3-4 kat daha fazla hareketliliği olup, perovskitlerin eksiton bağlanma enerjileri düşüktür. Perovskitlerin band seviyesi özellikleri de güneş pilleri için uygundur. MAPbI_3 'ün band aralığı 1,55 eV'dir. Teorik olarak 1.5 eV'lik bir band aralığına sahip bir yarı iletken, 27 mA/cm^2 kadar yüksek bir fotokupram elde edebilir (Yang, 2014). Şekil 2.14'de hibrid kurşun halojenür perovskit tiplerinin band aralıkları gösterilmektedir.

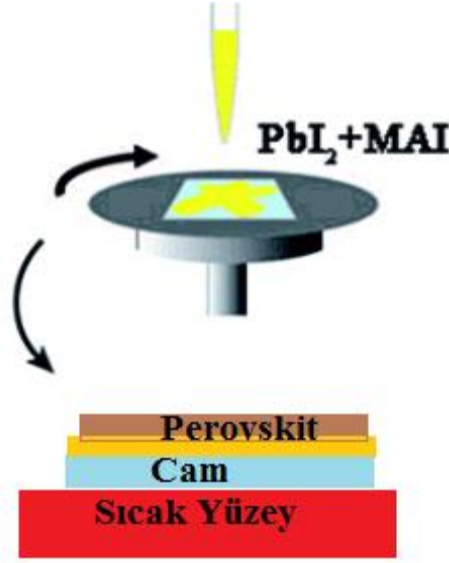


Şekil 2.14: Hibrid kurşun halojenür perovskit tiplerinin bant aralıkları (Popov, 2014)

Literatürde şu ana kadar perovskit kaplama metotları temel olarak iki ayrılmıştır.

- Solüsyon Fazında Kaplama Metotları
- Gaz Fazında Kaplama Metotları

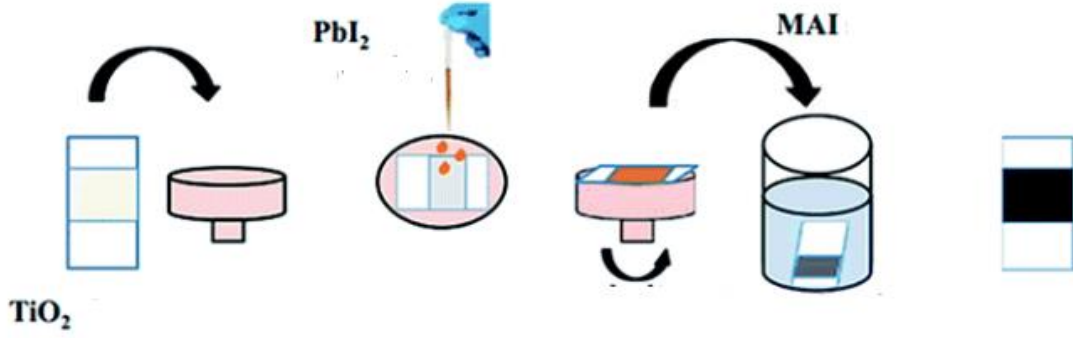
Tek kademe kaplama yöntemi Miyasaka ve diğ.(2009). tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemde PbX_2 ($\text{X}=\text{I}, \text{Cl}$) ve metil amonyum iyodür (MAI), I kullanımında 1:1 molar oranda, Cl kullanımında 1:3 molar oranında γ -butirolakton (GBL) ya da dimetilforamid (DMF) içinde çözülerek 80°C , 12 saat boyunca karıştırılır. Oluşan perovskit çözeltisi substratın üzerine dönerek kaplama metodu ile kaplanır ve 100°C tavlanarak çözeltinin uçması ve perovskit kristallerinin oluşumu sağlanır. Perovskite filminin kalınlığı, perovskit solüsyonunun konsantrasyonunu ve kaplama hızı değiştirilerek ayarlanır. Bu yöntemin avantajı kolay proseslenmesi ve maliyetinin düşük olmasıdır (Shi, 2015). Şekil 2.15’de tek kademe perovskit kaplama gösterilmektedir. Bu tez kapsamında perovskit kaplaması için bu yöntem tercih edilmiştir.



Şekil 2.15: Perovskit tek kademe kaplama (Kojima, 2009).

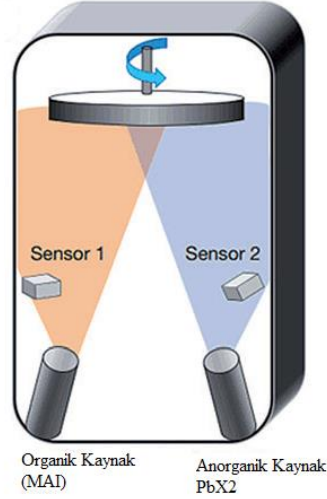
Ardışık sıralı kaplama yönteminde şeffaf iletken tabaka üzerinde kaplı olan elektron yada boşluk taşıyıcı tabaka üzerine ilk önce PbX_2 ($X=I, Cl$) çözeltisi kaplama işlemi bir veya birden fazla olarak gerçekleştirilir. Daha sonra isopropil alkolde çözülmüş olan metil amonyum iyodür çözeltisinin içine daldırılır. Burada önemli olan parametreler, döndürerek kaplama hızı, daldırma zamanı ve metil amonyum iyodür çözeltisinin konsantrasyonudur. Bu method kullanılarak yapılan mezopor metal oksitli temelli, planar (düzlemsel) yapılı, mezo-superiskelet yapılı güneş hücrelerinde en yüksek güç dönüşüm verimi %15, % 15,7, % 10,8 olarak bulunmuştur (Burschka, 2013, Liu, 2014, Bi, 2013).

Ardışık sıralı kaplama ile tek kademe kaplama karşılaştırıldığında, porlu substratlarda perovskitin daha iyi kaplanmasına, gözenek doldurulmasına ve morfolojisini iyileştirmesinin böylece cihaz performansını daha da arttırmak için daha yararlıdır. fakat bu avantajlarının yanında yukarıda belirtilen parametrelerin doğru sağlanmaması durumunda düzgün film yapısının oluşmaması bunun sonunda oluşan pin boşluk denilen yapısal bozukluklar ile yapıda kısa devre olayı gerçekleşir. Şekil 2.16'da perovskit ardışık sıralı kaplama gösterilmektedir.



Şekil 2.16: Perovskit ardışık sıralı kaplama (Kojima, 2009).

Gaz fazlı kaplama metodları, solüsyon bazlı kaplama metodlarına göre daha az kullanışlıdır. Bunun nedeni artan işleme maliyetidir. İlk olarak Liu ve diğ. 2013 tarafından $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ perovskitinin kaplanması için kullanılmışlar ve % 15,4 güç dönüşüm verimi bulmuşlardır. Bu yöntemde MAI ve PbX_2 (I,Cl) eş zamanlı olarak ayrı kaynaklardan buharlaştırılarak perovskit film tabakası elde edilir. Şekil 2.17’de perovskit çift kaynak kaplama gösterilmektedir.



Şekil 2.17: Perovskit çift kaynak kaplama (Kojima, 2009).

Ardışık buhar kaplama yöntemi (Hu ve diğ. 2014) tarafında geliştirilmiştir. Bu yöntemde ve PbX_2 (I,Cl) ilk katman olarak buhar fazında yüzeye kaplanır daha sonra MAI buharı sayesinde reaksiyon gerçekleştirilerek termal tavlama işlemi sayesinde perovskit kristalleri elde edilmiştir. Ardışık buhar kaplama işlemi temel olarak çift kaynak vakum ile kaplama işlemiyle aynıdır. Fakat ardışık buhar kaplama yöntemiyle, çift kaynak vakum ile kaplama işlemleri

karşılaştırıldığında , ardışık buhar kaplama yöntemiyle oluşturulan perovskit kristallerinin alan boyutlarının daha büyük olduğunu ve taşıma özelliklerinin daha yararlı olmaktadır. Şekil 2.18’de ardışık sıralı buhar kaplama gösterilmektedir.



Şekil 2.18: Ardışık sıralı buhar kaplama (Kojima, 2009).

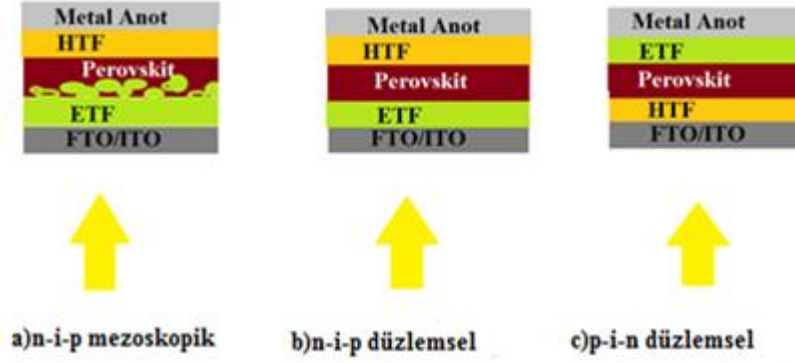
Solüsyon buharlı birikim ile kaplama yönteminden ilk olarak şeffaf iletken tabakaya DMF içinde hazırlanmış olan PbX₂ (I,Cl) çözeltisi kaplanır ve 110 °C 15 dakika kadar termal olarak tavlansın film tabakası oluşturulur. Daha sonra PbX₂ kaplı substratlar, perovskite filmlerin elde edilmesi için belli bir süre boyunca N₂ atmosferinde 150° C 'de MAI buharında tavlansın. Soğutulduktan sonra, hazırlanan substratlar izopropanol ile yıkanır, kurutulur ve perovskit kristal oluşumunu tamamlamak için tavlansın. Bu yaklaşımdan elde edilen perovskite filmleri, tam yüzey kaplaması, tekdüze tane yapısı sergilemiştir (Chen, 2013). Şekil 2.19’de solüsyon buharlı birikim yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.19: Solüsyon buharlı birikim (Kojima, 2009).

2.3.4.1. Perovskit Güneş Hücresi Tipleri

Perovskit güneş hücreleri tipleri, elektron taşıyıcı tabaka ve boşluk taşıyıcı tabakanın perovskitin alt ya da üst katman pozisyonuna veya organik yada anorganik kökenli olmasına göre adlandırılır. Şekil 2.20’de perovskit güneş hücresi tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.20: Perovskit güneş hücresi tipleri (Song, 2016).

n-i-p mezoskopik yapı; geleneksel perovskit güneş hücresi tipidir. ITO yada FTO tabaka üzerinde ince film (40-50 nm kalınlığında) kompakt yapıda TiO_2 , 150-300 nm kalınlığında mezopor TiO_2 pastası, 300 nm kalınlığında perovskit ve boşluk taşıyıcı tabaka olarak 200 nm kalınlığında spiro-OMETAD, elektrot olarak Ag veya Al kaplanarak elde edilmiştir. Bu yapıda mezopor TiO_2 pastasının kaplanmasıyla, perovskit ile ITO veya FTO arasında elektron taşınımı kolaylaştırıldığı ve doğru akım kaçaklarının düşürüldüğü düşünülmektedir. Mezopor yapıların kullanılması perovskite güneş pilleri cihaz performansında bir artışa yol açmış birkaç dönemde %3,8'den %17'ye kadar güç dönüşüm verimi artışı görülmüştür (Song, 2016). Şekil 2.20(a)'da teorik yapısı gösterilmektedir.

n-i-p düzlemsel yapı, mezoskopik yapıların evrimleşmiş halleridir. Bu yapıda ITO yada FTO tabaka üzerinde ince film kompakt yapıda TiO_2 , perovskit ve boşluk taşıyıcı tabaka, elektrot olarak Ag veya Al kaplanmıştır. Bu yapının avantajı daha basit bir hücre konfigürasyonu, proses kolaylığı sağlanmıştır. Fakat kompakt yapıda olan elektron taşıyıcı tabaka ile sınırlı temas alanı olması perovskitte oluşan elektronların taşınımı etkilemiştir. Ayrıca kötü kaplanan elektron taşıyıcı tabaka ile perovskit ve ITO/FTO arasında kısa devre oluşmasına neden olmuştur (Heikkilä, 2017). Şekil 2.20 (b)'de teorik yapısı gösterilmektedir.

p-i-n yapısı, ITO/FTO üzerine ilk olarak genellikle 50-80 nm kalınlığında PEDOT:PSS boşluk taşıyıcı tabaka olarak kaplanmış daha sonra 300 nm kalınlığında perovskit, 10-60 nm kalınlığında PCBM (elektron taşıyıcı tabaka olarak) ve elektrot olarak ta Al kaplanarak yapı elde edilmiştir. PEDOT:PSS gibi organik boşluk taşıyıcı tabaka yerine anorganik boşluk taşıyıcı tabaka olarak NiO vb. malzemeler kaplanarak elde edilmiştir (Song, 2016). Şekil 2.20 c kısmında teorik yapısı gösterilmektedir.

2.3.4.2. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) ile Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar

Li ve diğ. (2016) çalışmalarında FTO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-OMETAD/Au güneş hücresi tasarlamışlar ve CH₃NH₃PbI₃ ardışık sıralı depolama yöntemiyle sentezlemişlerdir. PbI₂ konsantrasyonu, CH₃NH₃I çözeltisinin ön kaplanması, reaksiyon sıcaklığı ve kaplama zamanı parametrelerini incelemişlerdir. En yüksek verimlerini PbI₂ (1 M) , CH₃NH₃I ön kaplanması olduğu, reaksiyon sıcaklığı 25 °C, daldırma zamanının 10 dakika olduğu hücrede bulmuşlardır. Güç dönüşüm verimi %12,9 ve dolum faktörü %65,8 hesaplamışlardır.

Shi ve diğ. (2015) çalışmalarında boşluk taşıyıcı yüzeyinin olmadığı ve PbI₂ çözeltisinin (1.2 M) bir defa ve iki defa TiO₂ üzerine kaplanmasının güneş hücresinin güç dönüşüm verimine olan etkisini araştırmışlardır. Deneylerini oda sıcaklığında nemin %20'nin altında olduğu koşullarda gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda güç dönüşüm verimi % 10.47 elde etmişlerdir.

Ren ve diğ. (2014) çalışmalarında FTO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-OMETAD/MoO₃-Al güneş hücresi tasarlamışlar ve metal kontak kaplaması öncesi hücreyi N₂ ortamında veya kuru O₂ ortamında farklı sıcaklıklara 45 °C, 65 °C 85 °C'de 12 saat tavlamışlardır. 65 °C, 12 saat boyunca tavlanan hücreden güç dönüşüm verimi %12 olarak elde etmişlerdir

Im ve diğ.(2011) çalışmalarında eşit molar oranda PbI₂ ve CH₃NH₃I γ -butirolaktan içinde farklı konsantrasyon (10.05, 20.13, 30.18, 40.26 ve 41.22 % kütlece) tanecik boyutu 2-3 nm boyutlarında sentezlemişlerdir. Farklı TiO₂ kalınlığında ve % 40.26'lık perovskit solusyonunda farklı tavlama süreleri üzerinde çalışmışlardır. Artan konsantrasyon ile perovskit kaplamasının renginin sarıdan siyaha dönüş yaptığını gözlemlemişlerdir. Güç dönüşüm verimini 3,6 μ m TiO₂ kalınlığında konsantrasyonun %41,22 olduğu hücrede güç dönüşüm verimini % 6,20 elde etmişlerdir

Liu ve diğ. (2014) kompakt TiO₂ üzerine ardışık.sıralı solüsyon yöntemi ile perovskit kaplamışlardır ve farklı boşluk taşıyıcıların (P₃HT, spiro-OMETAD, tetrathiafulvalene (TTF)) güç dönüşüm verimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Güç dönüşüm verimleri sırasıyla % 6,22, % 11,4, % 11,03, olarak bulmuşlardır.

Casaluci ve diğ. (2015) çalışmalarında FTO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-OMETAD/Au yapısını düzlemsel ve mezoyapılı şeklinde tasarlamışlardır. PbI₂'ü DMF, DMSO, GBL içinde 400 mg/ml konsantrasyonunda hazırlamışlar ve 70 °C farklı sürelerde (30dak., 1 sa., 2 sa.) tavlamışlardır. XRD sonuçlarında DMSO ile hazırlanan PbI₂ kristal boyutlarının diğerlerine göre daha küçük olduğunu elde etmişlerdir. Perovskit büyütmede CH₃NH₃I vakum depolama yöntemiyle kaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda güç dönüşüm verimini DMF ile hazırlanan perovskit büyütme süresinin 1 saat yapıldığı hücrede %12,7 olarak elde etmişlerdir.

Fei ve diğ. (2016) çalışmalarında SnO₂ substrat olarak kullanmışlar ve perovskit sentezini antisolvent çöktürme yöntemiyle sentezlemişlerdir. 159 mg CH₃NH₃I , 461 mg PbI₂ 1ml DMF içinde ortam sıcaklığında karıştırmışlar sonra 69 mg CH₃NH₃Cl eklemişler ve belli bir süre karıştırmışlardır. Hazırlanan perovskit solüsyonunda 30 µl'sinin elektron taşıyıcı tabaka yüzeyine ilave etmişler, 4000rpm'de 4-15sn döndürerek kaplamışlardır. Kaplama sonrası 100 µl etil asetat perovskit kaplamasının merkezine damlatılmış yüksek kristalize olmuş perovskit yapısını elde etmişlerdir. Son haldeki perovskit filmini hava ortamında 100 °C 1,5 saat tavlamışlardır. Boşluk taşıyıcı yüzey olarak spiro-OMETAD kaplanmasıyla güç dönüşüm verimini %17,22 olarak elde etmişlerdir.

Liu ve diğ.(2014) çalışmalarında planar heterojunction ITO/ZnO/CH₃NH₃PbI₃/P₃HT/Ag yapısında CH₃NH₃PbI₃ film kalınlığı ve PbI₂'ün döndürerek kaplama ve termal evaporasyon yöntemi ile kaplanmasını çalışmışlardır. Çalışma sonrası optimum CH₃NH₃PbI₃ kalınlığının 330µm olduğunu, film kalınlığının ince olduğunda düşük absorpsiyon gerçekleştiğini artan kalınlıkla beraber de rekombinasyon problemlerinin ortaya çıktığını elde etmişlerdir. PbI₂'ün kaplanmasında döndürerek kaplamada termal evaporasyon yöntemine göre daha yüksek güç dönüşüm verimi elde etmişlerdir.

Ng ve diğ.(2015) çalışmalarında FTO substratın üzerine farklı ortam koşullarında (hava, O₂ ve N₂) c-TiO₂/ CH₃NH₃PbI₃/Spiro-OMETAD yapılarını muamele etmişlerdir. Ayrıca perovskiti eşit molar oranda CH₃NH₃I, PbI₂ ile termal evaporasyon yöntemi ile sentezlemişlerdir. En iyi güç dönüşüm verimini N₂ ortamında %11,5 olduğunu hesaplamışlardır.

Nagarjuna ve diğ.(2014) çalışmalarında FTO/TiO₂/CH₃NH₃Pb_{3-x} Cl_x/P₃HT/Ag hücre yapısı üzerinde çalışmışlardır. CH₃NH₃Pb_{3-x} Cl_x perovskit sentezini CH₃NH₃I, PbCl₂ 3:1 molar oranda

dimetilforamid içinde %30-%40'lık küttelece şekilde sentezlemişlerdir. Döndürerek kaplama yöntemiyle kaplanan filmi 100 °C 90 dak. hava ortamında % 50'den daha fazla nem ortamında tavlamışlardır. %40'lık perovskit solüsyonu ile hazırlanan perovskit filminden % 5.67 güç dönüşüm verimi, J_{sc} 18.85 mA/ cm⁻², V_{oc} 640 mV ve dolum faktörü 0.41 olarak elde etmişlerdir.

Liu ve diğ. (2013) çalışmalarında FTO/TiO₂/CH₃NH₃Pb_{3-x}Cl_x/Spiro-OMETAD/Ag hücre yapısı üzerinde çalışmışlardır. CH₃NH₃Pb_{3-x}Cl_x perovskit sentezini CH₃NH₃I, PbCl₂ 4:1 molar oranda termal evaporasyon ile N₂ ortamında sentezlemişler ve sonuçlarını solüsyon yöntemiyle sentezlenmiş CH₃NH₃Pb_{3-x}Cl_x perovskit ile karşılaştırmışlardır. Termal evaporasyon ile güç dönüşüm verimini % 15,6 ,solüsyon ile hazırlanan yapıda güç dönüşüm verimini % 8,6 olarak elde etmişlerdir. SEM sonuçlarında ise termal evaporasyon yöntemiyle daha iyi bir film yüzey kaplamasının olduğu görülmüştür.

Huang ve diğ. (2014) çalışmalarında FTO/c-TiO₂/mp-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-OMETAD/Ag yapısında çalışmışlar ve CH₃NH₃PbI₃ sentezini küttelece %45'lik molar oranı 1:1 olacak şekilde DMF içinde sentezlemişlerdir. Döndürerek kaplama yöntemiyle 25 µl perovskit solüsyonunu 6500 rpm'de 30 sn boyunca, gaz destek yöntemi ile de 6500 rpm'de 2 sn boyunca 40 psi Argon gazı altında kaplamışlardır. Filmleri 35-100 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca tavlamışlardır. Gaz destekli kaplama yöntemiyle 100 °C'de tavlanan hücrede güç dönüşüm verimini %14,1 olarak elde etmişlerdir.

Wang ve diğ. (2015) çalışmalarında perovskitin (CH₃NH₃Pb_{3-x}Cl_x) farklı polimerik elektron taşıyıcı yüzeyleri üzerinde güç dönüşüm verimleri elde etmişlerdir. Polimerik elektron taşıyıcı yüzeyleri olarak PCBM, N2200, PNUT-8, PND120D-TT kullanmışlardır. Perovskiti (CH₃NH₃Pb_{3-x}Cl_x) susuz DMF içinde molar oranı 3:1 olacak şekilde 60 °C 12 saat boyunca karıştırmışlardır. Daha sonra döndürerek kaplama yöntemiyle 2000, 3000, 4000 rpm'de 40 sn. boyunca kaplamışlardır. Kaplanan filmleri 90 °C'de minimum 30 dakika tavlamışlardır. PCBM'li olan hücrede (ITO/PEDOT:PSS/CH₃NH₃Pb_{3-x}Cl_x/PCBM/ZnO/Al) güç dönüşüm verimini %8,51 olarak elde etmişlerdir.

Kojima ve diğ. (2009) TiO₂ üzerine CH₃NH₃PbBr₃ perovskitini ve CH₃NH₃PbI₃ perovskitinin güç dönüşüm verimi üzerine etkisini çalışmışlardır. CH₃NH₃PbBr₃ perovskitini küttelece %20'lik

DMF içinde, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskitini kütlege %8'lik γ -bütirolakton içinde sentezlemişlerdir. Güç dönüşüm verimleri %3,13, %3,81 olarak elde etmişlerdir.

Kim ve diğ. (2012) çalışmalarında elektron taşıyıcı yüzeyi olarak TiO_2 film kalınlığının, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskitinin güç dönüşüm verimi üzerine etkisini çalışmışlardır. TiO_2 kalınlıkları 0,6-0,8-0,9-1,0-1,1-1,2-,1,3-1,4-1,5 μm olarak belirlemişler ve $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskitini $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (0.395 g) , PbI_2 (1.157 g) γ -bütirolakton içinde (2 mL) 60°C, 12 saat boyunca karıştırarak sentezlemişlerdir. 0,6 μm kalınlığında ki TiO_2 film için güç dönüşüm verimini %9,7 elde etmişlerdir.

You ve diğ. (2014) çalışmalarında substrat olarak cam, PET ve ITO olarak, boşluk taşıyıcı tabaka olarak PEDOT:PSS, perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{3-x}\text{Cl}_x$), elektron taşıyıcı tabaka olarak PCBM kullanmışlardır. Perovskit $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{3-x}\text{Cl}_x$ molar oranları 3:1 olan $\text{PbCl}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ olarak kullanmışlardır. Bütün filmler 120 °C altında solüsyon prosesi olarak gerçekleştirmişlerdir. PET/ITO fleksibil güneş hücresinin güç dönüşüm verimi % 9,2, cam/ITO rijit güneş hücresinin güç dönüşüm verimi % 11,5 olarak elde etmişlerdir.

Song ve diğer (2016) çalışmalarında FTO/c- $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{HTM}/\text{Au}$ yapısını kullanmışlar ve perovskitin yeni sentezlenmiş ve 24 saat sonra, 96 saat sonra, 168 saat sonunda ki kısa devre akımı, açık devre voltajı, güç dönüşüm verimlerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda artan zaman sonunda voltaj ve akım değerlerinde azalma görülmüştür.

Qiu ve diğ. (2013) çalışmalarında FTO üzerine hidrotermal proses ile 1 boyutlu nanotel TiO_2 sentezlemişlerdir. Bunun üzerine farklı perovskit yapılarını ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2\text{Br}$) kaplamışlar ve ışık altındaki davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonunda güç dönüşüm verimini %4,87, %4,29 olarak hesaplamışlardır.

Guo ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmalarında $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_2$ perovskitini DMF içinde sentezlemişler ve boşluk taşıyıcı tabaka olarak kullandıkları P3HT içine farklı kimyasalların eklenmesiyle güç dönüşüm verimi üzerinde ki etkisini araştırmışlardır. P3HT içine iyonik dopant Li-TFSI eklenmesiyle yük taşıma yoğunluğunda artış olduğu, D-TBP katkılanmasıyla ise devingenlikte artış olduğu görülmüştür.

Guo ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmalarında perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) farklı tavlama sıcaklıkların (40-100 C°) ve farklı tavlama sürelerin perovskit yapısı üzerindeki etkisini

araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda artan sıcaklık hazırlanan perovskit filminin (110) oryantasyonunu tercih ettiğinin ve çekirdek boyutunda artış olduğunu, 40-80 °C arafaz evresi olduğunu, XPS sonuçlarında ara fazda $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_4\text{PbI}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ yapısına rastlanılmıştır. >100 °C tavlama sıcaklarında yüzey saflığının arttığını gözlemişlerdir.

Zhang ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmalarında ITO/PEDOT:PSS/perovskite/PCBM/Al planar yapılu güneş hücresi tasarlamışlardır. Perovskit yapısında oluşan ve güç dönüşüm verimi etkileyen pin boşluk denilen küçük yapıları azaltmak için 3 farklı kimyasal (toluen, klorobenzen, izopropil alkol) ile perovskit kaplama sonrası bunlarla yüzey yıkaması yapmışlardır. Güç dönüşüm verimleri sırasıyla % 6.86, % 7.77, and % 7.68, olarak hesaplamışlardır.

Wei ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmalarında iletken oksit tabaka cinsilerinin perovskit güneş hücresi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İletken oksit tabaka olarak FTO, ITO, AZO yapılarını kullanmışlardır. İletken oksit tabakalara aynı temizleme işlemleri ve UV altında muamale yapmışlardır. MAPbI_3 4000 rpm'de 30 sn boyunca N_2 ortamında döndürülerek kaplanmıştır, 100 °C, 10 dakika kalsine edilmiştir. Şonuçlara bakıldığında farklı yüzey enerjilerine sahip iletken oksit tabakaların perovskit yapısını etkilediğini bulmuşlardır.

Adam ve diğ. (2016) çalışmalarında ITO/PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ /PCBM/Al yapısında çalışma yapmışlardır. PEDOT:PSS boşluk taşıyıcı tabaka çözeltisi içine 0.7%v/v Zonyls FS-300 ve farklı oranlarda dimetilsülfoksit (DMSO) ilave etmişler ve yüzey kaplama farklılıklarını incelemişlerdir. En iyi verimi 0.7% v/v Zonyls FS-300 ve %5 v/v oranında hazırlanmış boşluk taşıyıcı tabakada hesaplamışlardır .

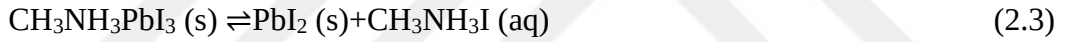
2.3.4.3. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) Kararlılığı

Perovskitlerin göze çarpan potansiyellerine rağmen bazı dezavantajları da vardır. Perovskit güneş hücrelerinde kurşun, en iyi performansı göstermektedir. Fakat kurşun, insan sağlığına ve çevre sağlığı için toksik bir kimyasal malzeme olup bu da cihazın imalatı, kurulumu ve çevre sağlığı için bir takım sorunları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle Avrupa Birliği ve bazı ülkeler kurşunun elektronik cihazlarda kullanımını kısıtlanmıştır. Bu nedenle yeni gerçekleştirilen çalışmalar da kurşun yerine kullanılabilecek metal katyonu üzerine yoğunlaşmışlardır. Kurşun yerine kalay halojenürlü perovskitlerin performans çalışmaları başlamıştır. Bunlar SnI_2 , SnCl_2 , SnBr_2 'dür (Noel, 2014).

Perovskitler, O₂, neme, mor ötesi ışınlarla maruz kaldıklarında bozunma reaksiyonuna girmektedir. Bozulma, perovskite güneş pillerinin tekrarlanabilirliği ve uzun ömür süreleri için bir engel teşkil etmektedir. Perovskit laboratuvar koşullarında sentezlenirken farklı kimyasal reaksiyonlara maruz kalmaktadır. Çevresel koşullara bağlı olarak, bu çalışmada kullanılan perovskit, aşağıdaki reaksiyona göre bileşenleri ile bir denge içinde bulunur. Bu denge reaksiyonu Denklem 2.2’de gösterilmektedir.



Kurşun iyodür ve metil amonyum iyodür reaksiyona girmekte ve bu da dengeyi başlangıç maddelerine doğru yönlendirir. Perovskiti bozunmaya yönlendiren belirli koşullar altında diğer bileşiklere de indirgenebilmektedir Nem ve oksijen denge denkleminin (2.3, 2.4) bileşenlerinin kararlılığını etkileyebilmektedir Nem varsa, perovskite aşağıdaki gibi hidrolize olmakta ve parçalanma reaksiyonu aşağıda ki denklemlerde gösterilmektedir.



Bu reaksiyonların sonuncusu UV ışıınımı altında gerçekleşmektedir. Neme duyarlılığından ve oksijen duyarlılığından ötürü, perovskit güneş pillerinin kaplama işlemleri N₂ ortamı içinde gerçekleştirilmesi tercih edilir. Özellikle nem varlığında perovskitin bozunumu hızlı olmaktadır ve bozulma birkaç dakika içinde tamamlanmaktadır (Ojanperä, 2015). Ayrıca TiO₂, perovskit güneş pillerinde en yaygın fotoanod malzemesi olarak kullanılmaktadır. Su oksidasyonu için katalizör görevi gören TiO₂ varlığı, UV ışığı altında perovskitin bozunumunu uyarmaktadır Perovskite güneş pillerinin korunması amaçlı gerçekleştirilen kapsüllenme işlemi onları nemden korumaktadır. Çözeltilerin hazırlanmasında ham maddelerin safsızlıkları, çözüldükleri çözücüler, katkı maddeleri vb perovskitin kararlılığını bozmaktadır. Örneğin boşluk taşıyıcı tabakada olarak kullanılan spiro-OMETAD içinde bulunan katkı malzemesi 4-ter-s-bütıl piridin ve bis (trifloro-metan) sülfonimid lityum tuzlarının asetonitril içinde çözünmesi perovskitte korozyona neden olmaktadır (Niu, 2015).

Bununla birlikte, perovskit kristallerinin oluşumu için perovskit filmlerin kaplanma sonrası gereken tavlama sıcaklığına da dikkat edilmelidir. Eğer sıcaklık 300° C'nin üstünde olursa perovskit yapısı PbI₂, CH₃NH₂ ve HI'ye indirgenmektedir (Wang, 2014).

2.3.5. Boşluk Taşıyıcı Tabaka (HTM)

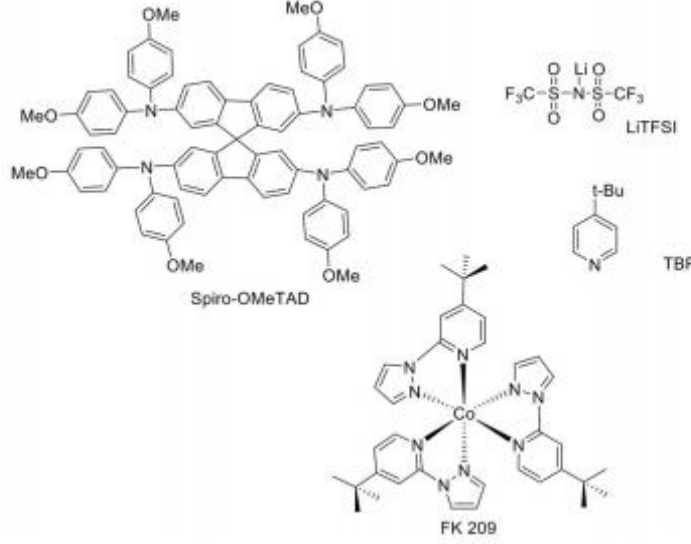
HTM, perovskit katmanı ile buharlaştırılmış metal elektrot arasında yer almaktadır. Bu tabakanın önemli özellikleri vardır birincisi perovskit ve metal kontak arasında doğrudan teması önlemek, şarj rekombinasyonunu en aza indirmek ve metal-perovskite arayüzünde bozulmayı önlemek, ikincisi perovskit de oluşan boşluklar üst elektrota taşımaktır.

Perovskit güneş hücrelerinde eksiton ayrışma sonucunda oluşan boşlukların iletilmesi için kullanılan HTM olarak organik ve anorganik yapılar kullanılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan organik kökenli yapılar PEDOT:PSS, Spiro-OMETAD vb. anorganik yapılar NiO, CuO CuSCN vb.'dir.

PEDOT:PSS, Poli (etilenedioksitofen): poli (stirensülfonik asit) genellikle bir organik kökenli boşluk taşıyıcı tabaka olarak güneş hücreleri için su çözeltisi veya süspansiyonu halinde hazırlanan ve son zamanlarda bir tersine yapılar da kullanılmaktadır. Higroskopik yapıları nedeniyle hücre içinde bozulmalara ve aktif tabakaya zayıf bağ yapmalarına neden olmaktadır. PEDOT:PSS karışımında genellikle PSS miktarı karışımın baskın olarak bulunmaktadır ve bunun sonucunda PSS'nin diğer tabakalara difüzyonu meydana gelmekte ve hücre içi bozulmalara neden olmaktadır (Adam, 2016).

Spiro-OMETAD, boşluk taşıyıcı tabaka olarak perovskit güneş hücreleri için çözelti şeklinde hazırlanabilmesi, kaplama prosesinin kolay olması ayrıca kimyasal özelliği olarak boşluk taşıma kapasitesinin iyi olma özelliğine sahip olması ona avantaj kazandırmaktadır. Fakat buna rağmen yerine daha ucuz ve daha istikrarlı maddelerle değiştirmek için çok çaba sarf edilmektedir. Nedeni; yüksek maliyeti (500\$/gr), hücrenin performans kararlılığı üzerinde olumsuz etkiye sahip olmasıdır. Spiro-OMETAD'ın O₂'den ve nemden etkilenmesi pillerin uzun vadeli istikrarını sınırlamak ta böylece fotovoltaik endüstrisinde yükseltme uygulamasını engellemektedir. Spiro-OMETAD'ın boşluk taşıma hızı ve iletkenliği sırasıyla $1.67 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $3.54 \times 10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$ 'dur. Boşluk iletkenliğinin 10 kat artırılması için eklenen dopant malzemeler yüksek iletkenlik, daha iyi elektron enjeksiyonu ve geciktirilmiş

rekombinasyon açısında özellikleri iyileştirirken, kararlılığı olumsuz etkilemektedir (Vivo, 2017). Şekil 2.21’de spiro-OMETAD ve katkı malzemeleri gösterilmektedir.



Şekil 2.21: Spiro-OMETAD, LiTFSI, FK209, TBP’ın molekül yapısı (Vivo, 2017).

Perovskit güneş pilinde araştırmaların çoğunda organik kökenli HTM’ler kullanılırken büyük ölçekli uygulamalar için yüksek mobiliteye sahip, düşük üretim maliyetleri ve iyi kimyasal stabiliteyi olan anorganik p tipi HTM’ler umut verici olmaktadır. Literatürde en yaygın çalışan anorganik kökenli HTM NiO, CuSCN CuI vb.’dir.

CuI’nin enerji seviyesi, perovskit kristalleri ile uygun şekilde eşleşmemektedir, pil de voltaj düşüşüne neden olmaktadır. CuSCN yüksek mobilitesi olması, perovskit güneş pillerinde iyi bir verim vermesine rağmen kaplama yöntemlerinin NiO’ye göre daha zor olması ve veriminin NiO’ye göre düşük olması nedeniyle bu tez kapsamında HTM olarak NiO kullanılmıştır. Bunun nedeni NiO’in kolay sentezlenmesi, ucuz olması, p-tipi bir yarı iletken olup geniş bant aralığı (3.2-3.8 eV), küp kaya tuzu kristal yapısı, antiiferomanyetik malzeme yapısı farklı şekilde güneş hücresine kombine edilebiliyor olmasıdır. Nanometre boyuttaki nikel oksidin sentezi için çok farklı yöntemler vardır bunlar; sol-gel metodu, piroliz, katı hal tepkimesi, mikroemülsiyon, sulu çözeltide çöktürme gibi farklı yöntemler bilinmektedir. Bu tezde NiO sentezi için sol gel metodu kullanılmıştır. Sol gel metodunun seçilmesinin nedeni homojen karıştırma sayesinde tanecik dağılımının düzgünlüğü ve küçük partikül boyutun da iyi kristallik, düşük sıcaklık ve düşük basınçlı ortamlarda NiO nanopartiküllerini sentezlemek için uygun bir yöntem olmasıdır.

Saf NiO nanoparçacıklarının üretilmesi için kontrol edilmesi gerekenler, kalsinasyon sıcaklığı, süresi ve pH değeri, bileşenler arasındaki molar bağlantıdır (Qin, 2014).

2.3.5.1. NiO ile Çalışılan Perovskit Tipi Güneş Hücresi Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar

Wang ve diğ.(2016) yaptıkları çalışmada FTO/c-TiO₂/mp-TiO₂/MAPbI₃-NiO/Au güneş hücresi tasarlamışlardır. Hava ortamına dayanıklı, boşluk taşıyısız olarak MAPbI₃-NiO kompozit olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda en yüksek güç dönüşüm verimini %12,14 olarak hesaplamışlardır.

Yin ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada ITO(Cam/PEN)/NiO_x /MAPbI₃/PCBM/Ag güneş hücresi tasarlamışlardır. ITO altlık değişiminin güneş pili verimi üzerindeki etkisini ve NiO yerine PEDOT:PSS kullanılmasının verim üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Cam altlıklı güneş hücresinde verim %16,47, PEN altlıklı güneş hücresinde verim %13,43 olarak bulmuşlardır. PEDOT:PSS' in boşluk taşıyıcı olarak kullanıldığı güneş hücresinde %11,13 olarak bulmuşlardır.

Wang ve diğ. (2017) FTO/c-TiO₂/mp-TiO₂/Al₂O₃/NiO/MAPbI_{3-x}Cl_x-NiO/spiroOMeTAD/Au güneş hücresi tasarlamışlardır. NiO ve MAPbI_{3-x}Cl_x kompozit malzeme olarak kullanmışlardır. Ayrıca ara yüzde kullandıkları Al₂O₃/NiO ile perovskitin kristal kalitesini arttırdığını, yük taşımını arttırdığını ve rekombinasyonu azalttıklarını görmüşlerdir. Çalışmaları sonucunda en yüksek güç dönüşüm verimini %18,14 olarak bulmuşlardır.

Park ve diğ (2017) yaptıkları çalışmada ITO/NiO_x /MAPbI₃/PCBM/Ag güneş hücresi tasarlamışlardır. Boşluk taşıyıcılı tabaka olan NiO_x içine Li doplamasını (%0-2-5-10-15 kütlece) güneş pili verimi üzerindeki verimi araştırmışlardır. En yüksek güç dönüşüm verimini %5 kütlece Li doplanmış hücrede %14,66 olarak bulmuşlardır.

Tang ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada FTO/ NiO /MAPbI₃/PC₆₁BM/Au güneş hücresi tasarlamışlardır. Farklı kalınlıktaki (30-55-70-100-170 nm) NiO kaplamasının güneş pili verimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 55nm kalınlığında kaplanan NiO'in en yüksek güneş pili verimi vermiştir. Çalışma sonuçları Tablo 2.2 'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2: NiO tabaka kalınlığının güç dönüşüm verimi üzerine etkisi (Tang, 2018).

NiO kalınlığı (nm)	Voc (V)	Jsc(mA/cm ²)	FF (%)	PCE(%)
30	1,02	17,23	66,96	11,82
55	1,06	19,41	75,02	15,47
70	1,03	18,61	70,33	13,47
100	1,00	18,66	66,22	12,35
170	0,96	18,05	52,69	9,13

2.3.6. Karşıt Metal Elektrot

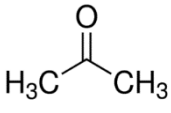
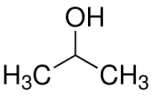
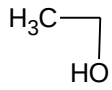
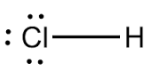
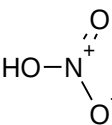
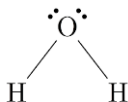
Güneş hücrelerinde metal kontağın kullanım amacı elektronları devreden ve boşluk taşıyıcı tabakadan da taşınan boşlukları toplamaktır. Karşıt metal kontağın seçiminde; yük taşıma kapasitesi, iyi elektro katalitik aktivite ve yüksek kararlılık için yüksek iletkenlik önemli olmaktadır. En yaygın elektrot malzemeleri olarak, platin, gümüş ve altın gibi asil metaller kullanılmaktadır. Özellikle altın ve gümüş, yaygın olarak kabul edilen HTM malzemeleriyle kullanılacak etkili boşluk toplayıcılardır. Asil metallerin (Au, Pt) iş fonksiyonları yüksek olmasına rağmen görünür ışığı düşük absorblamaları ve yüksek maliyetli olmaları onların dezavantajı olmaktadır (Habibi, 2016). Bu tez kapsamında karşıt metal elektrot olarak iş fonksiyonu yüksek, görünür bölgede daha etkin nispeten daha düşük maliyetli olan Ag, Al kullanılmıştır

3. MALZEME VE YÖNTEM

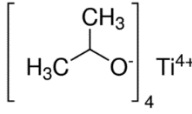
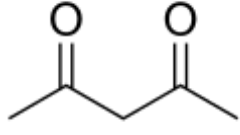
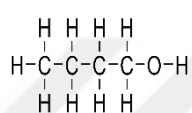
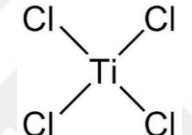
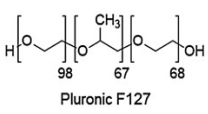
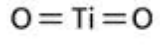
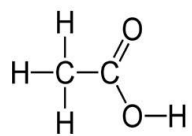
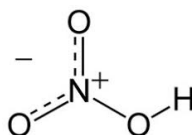
3.1 MALZEME

Bu tez kapsamında kullanılan bütün kimyasal malzemeler Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

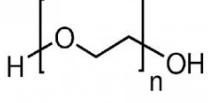
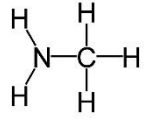
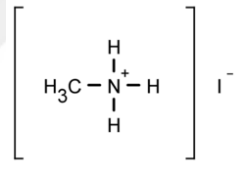
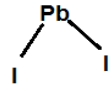
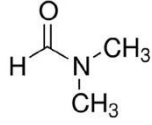
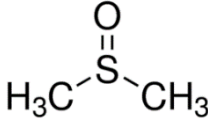
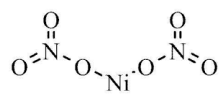
Tablo 3.1: Güneş hücrelerinin hazırlanması için kullanılan kimyasal malzemeler.

Kimyasal Malzemeler	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Kimyasal Yapı	Temin Edilen Firma
İletken cam substratlar (ITO)			Kintec
Aseton (C_3H_6O) $\geq 99,5$ %,	58,08		Sigma-Aldrich,
2-Propanol (C_3H_7OH) $\geq 99,5$ %	60,01		Sigma-Aldrich,
Etanol (C_2H_5OH) ≥ 99	46,07		Sigma-Aldrich,
HCL ≥ 37	36,46		Sigma-Aldrich,
$HNO_3 \geq 65$	63,01		Sigma-Aldrich,
Deiyonize su	18		
Kuru Hava	28,96		

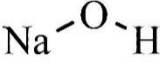
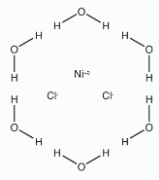
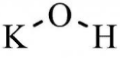
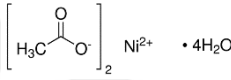
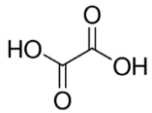
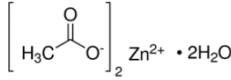
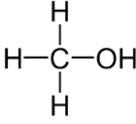
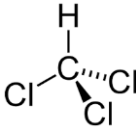
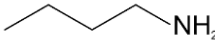
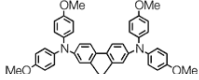
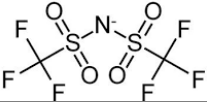
Tablo 3.1 (Devam): Güneş hücrelerinin hazırlanması için kullanılan kimyasal malzemeler.

Titanyum İsopropoksit ≥ 98	284,22		Sigma-Aldrich
Asetilaseton $\geq 99,5$ %,	100,13		Merck
Bütanol $\geq 99,4$	74,12		Sigma-Aldrich
TiCl ₄ $\geq 99,9$	189,679		Sigma-Aldrich
HO(CH ₂ CH ₂ O) ₁₀₆ -(CH ₂ -CH(CH ₃)O) ₇₀ (CH ₂ CH ₂ O) ₁₀₆ H (Pluronic F127). $\geq 99,9$	12500 (Dalton)		Sigma-Aldrich
TiO ₂ ticari pasta	79,86		Sigma-Aldrich
P25 nanotitan $\geq 99,9$	79,86		Sigma-Aldrich
Asetik Asit ≥ 100	60,05		Sigma-Aldrich
Nitrik Asit ≥ 65	63,01		Sigma-Aldrich

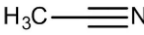
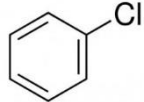
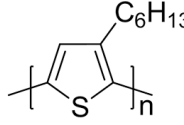
Tablo 3.1 (Devam): Güneş hücrelerinin hazırlanması için kullanılan kimyasal malzemeler.

Polietilen oksit ≥ 98	~ 300.000)		Sigma-Aldrich
Metil Amin (CH_3NH_2) ≥ 99	31,06		Sigma-Aldrich,
Hidrojen İyodür ≥ 99	127,93	H-I	Sigma-Aldrich,
Azot	28,014	N-N	
Dietil Eter ≥ 99	74,12		Sigma-Aldrich,
Metil Amonyum İyodür (MAI) ≥ 99	158,97		Dyesol,
$\text{PbI}_2 \geq 99$	461,01		Sigma-Aldrich,
DMF ≥ 99	73,09		Sigma-Aldrich,
DMSO ≥ 99	78.13		Sigma-Alrich
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \geq 99$	182,703		Sigma-Aldrich,

Tablo 3.1.(Devam): Güneş hücrelerinin hazırlanması için kullanılan kimyasal malzemeler

NaOH ≥ 99	39,99		Sigma-Aldrich,
Ni(Cl) $_2$ ·6H $_2$ O ≥ 99	237,59		Sigma-Aldrich,
KOH ≥ 99	56,11		Sigma-Aldrich,
Ni(OCOCH $_3$) $_2$ ·4H $_2$ O ≥ 99	248,84		Sigma-Aldrich
C $_2$ H $_2$ O $_4$ ≥ 99	90,03		Sigma-Aldrich
Zn(CH $_3$ COO) $_2$ · 2H $_2$ O ≥ 99	219,51		Sigma-Aldrich
CH $_3$ OH ≥ 99	32,04		Sigma-Aldrich
Kloroform ≥ 99	119,38		Sigma-Aldrich
n-bütülin ≥ 99	73,41		Sigma-Aldrich
Spiro-OMeTAD ≥ 99	1225,43		Sigma-Aldrich,
Li-TFSL ≥ 99	287,09		Sigma-Aldrich,

Tablo 3.1.(Devam): Güneş hücrelerinin hazırlanması için kullanılan kimyasal malzemeler

Asetonitril ≥ 99	41,05		Sigma-Aldrich
Klorobenzen ≥ 99	112,56		Sigma-Aldrich,
P3HT ≥ 99	50,000-100,000		Sigma-Aldrich,
4-tert bütıl piridin ≥ 99	135,21		Sigma-Aldrich,

3.2. YÖNTEM

3.2.1. İletken Cam Substratlarının Hazırlanması

Hibrit güneş pillerini yapmak için öncelikle altlık malzemesi olarak kullanılan ITO (indiyum kalay oksit) kaplı iletken camlar en ve boyu 1,5 cm olacak şekilde kesilerek hazırlanılır. Bu hazırlanan camların yaklaşık üçte birlik kısmı sülfürik asit ve hidroklorik asit ile hazırlanan karışımla 40 dakika boyunca bekletilerek kaldırılır. Bu işlemden sonra hazırlanan camlar sırasıyla, deiyonize su, aseton ve isopropanol ile ayrı ayrı yirmişer dakika boyunca ultrasonik banyoda bekletilip temizlenilir. Bu işlemler deneysel her aşamada aynı şekilde tekrarlanır.

3.2.2. TiO₂ (1) İnce Filmlerin Sentezi

TiO₂ ince filmlerin sentezi için Şelçuk ve diğ. (2017) yaptıkları çalışma referans alınarak 0,2ml deiyonize su, 0,125 ml HNO₃, 1,25 ml etil alkol alınır ve karıştırılarak bir nolu çözelti elde edilir. Ayrıca 1,625 ml titanyum bütoksit, 4,375 ml etil alkol alınır ve karıştırılarak iki nolu çözelti elde edilir. 2 nolu çözelti bir nolu çözelti üzerine damla damla ilave edilerek 2saat boyunca karıştırılır ve TiO₂ solü elde edilir. Oluşturulan bu çözeltiye PEG 2000, asetil aseton ile modifiye edilmiştir.

TiO₂ ince filmlerin sentezi için Oku ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmaları modifiye edilerek iki farklı molaritede (0,15 ve 0,30 M olarak) 0,045 ml ve 0,089 ml titanyum isopropoksit, 10 µl ve 21 µl asetil aseton 1 ml bütanol ile karıştırılarak çözeltiler hazırlanır. İlk olarak ITO tabakasının üzerine 1000 rpm’de 5 saniye, 3000 rpm ‘de 30 saniye 0,15 M’lık çözelti kaplanır ve 125 °C, 5 dakika kurtulur soğumaya bırakılır. Daha sonra 0,30 M’lık çözelti 1000 rpm’de 5 saniye, 3000 rpm’de 30 saniye kaplanır ve 125 °C 5 dakika kurutulur. 500 °C 30 dakika boyunca kalsine edilir.

3.2.3. TiO₂ (2) İnce Filmlerin Sentezi

TiO₂ ince filmlerin sentezi için Sakatani ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmaları modifiye edilerek molar oranları (1:10:40:0,005) olacak şekilde TiCl₄, H₂O, C₂H₅OH, HO(CH₂CH₂O)₁₀₆-(CH₂-CH(CH₃)O)₇₀(CH₂CH₂O)₁₀₆H (Pluronic F127) çözelti hazırlanır. ITO tabakasının üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle 1000 rpm’de 5 saniye, 3000 rpm’de 30 saniye’de kaplanır. Oda sıcaklığında 15 dakika, 100 °C 5 dakika bekletilir ve 450 °C 2 saat boyunca kalsine edilir.

3.2.4. Ticari TiO₂ Mezopor İnce Filmlerin Sentezi

Ticari TiO₂ mezopor ince filmlerin sentezi için TiO₂ pastası ve etanol molar olarak 1:5 oranında bir gece karıştırılır. Oluşan pasta karışımı daha önceden kaplanmış olan kompakt TiO₂ ince filmi üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle 3000 rpm 60 saniye boyunca kaplanır ve 500 °C 30 dakika boyunca kalsine edilir.

3.2.5. Asidik Temelli TiO₂ Mezopor İnce Filmlerin Sentezi

Asidik temelli nanokristal TiO₂ nanoparçacıkları için Adams ve diğ. (2015) yaptıkları çalışma referans alınarak 20 ml titanyum isopropoksitin içine 5,5 ml susuz asetik asit ile 10 dakika boyunca yüksek hızda karıştırılır. Daha sonra karışıma damla damla 0,1 M 120 ml’lik nitrik asit çözeltisi ilave edilir ve karıştırmaya 5 saat boyunca devam edilir. Çözelti 0,45µm PVDF filtreden geçirilir, otoklava konulur 220 °C, 12 saat boyunca reaksiyona devam edilir. Oluşan çözelti 60 saniye boyunca sonik proba konulur. Çözeltiye % 1 kütlece polietilen oksit (PEO) eklenerek, TiO₂ pastası elde edilir, c-TiO₂/ ITO üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle 3000 rpm 60 saniye boyunca kaplanır ve 325 °C 30 dakika, 375 °C 5 dakika, 450 °C 15 dakika, 500 °C 30 dakika boyunca kademeli olarak kalsine edilir.

3.2.6. P25 Temelli TiO₂ Mezopor İnce Filmlerin Sentezi

P25 temelli TiO₂ için Chen ve diğ. (2014) yaptıkları çalışma modifiye edilerek, 6 gr TiO₂ (P25, Degussa), 0,2 ml asetilaseton ve 0,1ml Triton X-100 bir gece boyunca karıştırılır. Hazırlanan karışım ince film c-TiO₂/ITO üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle 3000 rpm 60 saniye boyunca kaplanır ve 500 °C 30 dakika boyunca kalsine edilir.

3.2.7. Metil Amonyum İyodür (CH₃NH₃I) Sentezi

Bu aşamada tez kapsamında literatürde bulunan benzer yöntem kullanıldı. Metil amonyum iyodür sentezinde 4.5ml metil amonyum ve 5 ml HI üç boyunlu reaktör içine konulur. Ortam sıcaklığı 0 °C olacak şekilde küvetin içine buz doldurulur ve çözelti bulunan üç boyunlu reaktör küvetin içine oturtulur. Reaktör bir boyundan N₂ beslemesi başlatılır ve sabit bir karıştırma hızında 2 saat boyunca karıştırma gerçekleştirilir. Daha sonra reaktör yağ banyosuna alınarak çözelti içerisinde bulunan su uçurulur ve bu sırada sabit hızda karıştırılmaya devam edilir. Yaklaşık 3 saatin sonunda siyah-kırmızı çökelti oluşur. Alınan çökelti dietil eter ile çökelti rengi beyaz olana kadar vakum filtreleme sistemi ile yıkanır. Yıkama sonrası oluşan beyaz renkli çökelti vakum etüvünde 60 °C’de 12 saat boyunca kurutulur. Kurutma sonrası oluşan toz renkli cam şişede havayla temas etmeyecek şekilde saklanır.

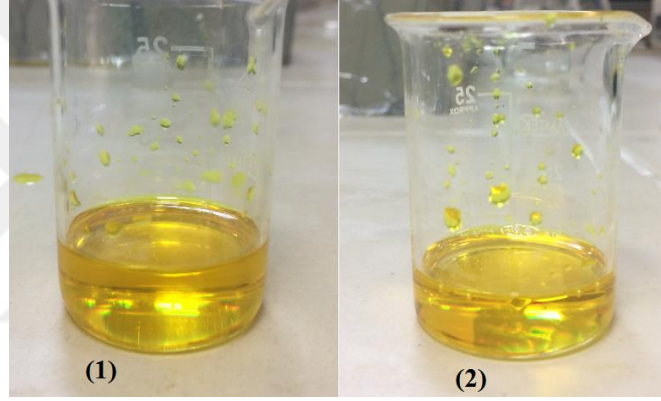
Ayrıca ticari olarak bulunan metil amonyum iyodürün satın alınması yapıp perovskit yapımında kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Metil amonyum iyodürün sentezi.

3.2.8. Metil Amonyum Kurşun İyodür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İnce Filmlerin Sentezi

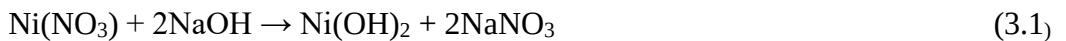
Park ve diğ. (2017) yaptıkları çalışma referans alınarak, metil amonyum iyodür (ticari veya hazırlanan) ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$), kurşun iyodür (PbI_2) ile 1:1 molar oranda ve %40'lık susuz DMF ile üç boyunlu reaktör içinde 12 saat boyunca 60 °C'de sabit bir karıştırma ile reaksiyona sokulur. Reaksiyon sonucu oluşan çözelti 1 defa 0.45 μm PVDF filtreden geçirilir. Döndürerek kaplama cihazı ile 1000 rpm'de 15 saniye, 4000 rpm'de 25 saniye olarak kaplama işlemi gerçekleştirilir. Kaplanmış camlar N_2 ortamı içinde 100 °C 60 dakika boyunca tavlanır. Şekil 3.2'de perovskit çözeltisinin süzme işlemi öncesi ve sonrası gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Perovskit filtre işlemi öncesi (1) ve filtreleme işlemi sonrası (2).

3.2.9. ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ Kaplı Camlar Üzerine Ni(NO₃)₂·6H₂O Başlangıç Reaktif Kimyasal İle NiO Anorganik Boşluk Taşıyıcının Sentezlenmesi

NiO sentezinde Zhang ve diğ. (2016) yaptıkları çalışma referans alınarak 0,5 mol Ni(NO₃)₂·6H₂O 100 ml deiyonize suda çözülür. Karışımın üzerine 10 M'lık NaOH çözeltisi pH değeri 10 olana kadar ilave edilir ve karıştırmaya devam edilir NaOH ilavesi ile birlikte koyu renkli çözeltisi açık yeşil rengine döner. Sentez reaksiyonları Denklem 3.1 ve 3.2'de gösterilmektedir.



Karıştırma işlemi sonrası çözelti bir gece yaşlandırma işlemine bırakılır. Daha sonra kollodial çözelti süzülür ve pH değeri 7 olana kadar deiyonize su ile yıkama işlemine devam edilir. Yıkama sonrası süzöntü 80 °C 12 saat boyunca kurutulur ve 350 °C 2 saat boyunca kalsine edilir. İnce film kaplanması için 50 mg/ml toluen içinde hazırlanılır bir saat boyunca sonik su banyosunda bekletilir. Daha sonra 4000rpm'de 30 sn boyunca perovskit ince filminin üzerine kaplanılır. Şekil 3.3'te kurutma sonrası ve kalsinasyon sonrası NiO gösterilemektedir.



Şekil 3.3: NiO kurutma sonrası ve kalsinasyon sonrası.

3.2.10. ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ Kaplı Camlar Üzerine Ni(Cl)₂·6H₂O Başlangıç Reaktif Kimyasalı İle NiO Anorganik Boşluk Taşıyıcının Sentezlenmesi

NiO sentezinde Sookman ve diğ. (2006) yaptıkları çalışma referans alınarak 0,5 mol Ni(Cl)₂·6H₂O 100 ml deiyonize suda çözülür. Karışımın üzerine 2 M'lık KOH çözeltisi pH değeri 9 olana kadar ilave edilir ve karıştırmaya devam edilir. KOH ilavesi ile birlikte koyu renkli çözelti açık yeşil rengine döner. Karıştırma işlemi sonrası çözelti bir gece yaşlandırma işlemine bırakılır. Daha sonra kollodial çözelti süzülür ve pH değeri 7 olana kadar deiyonize su ile yıkama işlemine devam edilir. Yıkama sonrası süzöntü 80 °C 12 saat boyunca kurutulur ve 350 °C 2 saat boyunca kalsine edilir. İnce film kaplanması için 50 mg/ml toluen içinde hazırlanılır bir saat boyunca sonik su banyosunda bekletilir. Daha sonra 4000rpm'de 30 sn boyunca perovskit ince filminin üzerine kaplanılır. Sentez reaksiyonları Denklem 3.3 ve 3.4'de gösterilmektedir.



3.2.11. ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ Kaplı Camlar Üzerine Ni(OCOCH₃)₂·4H₂O Başlangıç Reaktif Kimyasalı İle NiO Anorganik Boşluk Taşıyıcının Sentezlenmesi

NiO sentezinde, Thota ve diğ.(2007) yaptıkları çalışma referans alınarak 0,3mol Ni(OCOCH₃)₂·4H₂O 100 ml etanolde 2 saat boyunca 50 °C karıştırılır. Hazırlanan nikel karışımına 0,23 M oksalik asit-etanol çözeltisi damla damla ilave edilir, çözelti bir gece yaşlandırma işlemine bırakılır. Daha sonra kollodial çözelti süzülür ve pH değeri 7 olana kadar deiyonize su ile yıkama işlemine devam edilir. Yıkama sonrası süzöntü 80 °C 24 saat boyunca kurutulur ve 350 °C 2 saat boyunca kalsine edilir. İnce film kaplanması için 50 mg/ml toluen içinde hazırlanılır bir saat boyunca sonik su banyosunda bekletilir. Daha sonra 4000rpm'de 30 sn boyunca perovskit ince filminin üzerine kaplanır.

3.2.12. ZnO Elektron Taşıyıcılı İnce Filmlerin Sentezi

ZnO elektron taşıyıcılı ince filmlerin sentezi için Sun ve diğ. (2005) yaptıkları çalışma referans alınarak 0,8182 gr (ZnAc)₂·2H₂O ile 42 ml metanol ve 250µl deiyonize su ile 60 °C'de karıştırılır. 0,4859 gr potasyum hidroksit (KOH), 23 ml metanol ile karıştırılarak damla damla ilk çözeltiye ilave edilerek 5 saat boyunca karıştırılır. Süre sonunda çözelti yaşlandırmaya alınır ve kollodial çözelti süzülür. Alınan çökeltiliye 50 ml metanol ilave edilir ve 5 dakika karıştırılır, yaşlandırmaya alınır bu işlem iki defa tekrar edilir ve son yaşlandırma işleminde 12 saat boyunca beklenir. Kollodial çözelti süzülür, alınan çökeltiliye 3,3 ml kloroform ve 100 µl bütülin ilave edilir ve karıştırılır. 0,45µm PTFE filtreden geçirilerek, ITO tabakasının üzerine 2000 rpm'de 60 saniye boyunca dönerek kaplama metodu ile kaplanır.

3.2.13. ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/ CH₃NH₃PbI₃ Kaplı Camlar Üzerine Spiro-OMeTAD Sentezi

Anorganik boşluk taşıyıcı malzeme olarak kullanılacak spiro-OMETAD çözeltisi için Hawash ve diğ. (2014) yaptıkları çalışma referans alınarak, 3 adet farklı çözelti hazırlanır. 1 nolu çözelti 150 µl klorobenzen ile 150mM spiro-OMETAD, 2 nolu çözelti 7.5 µl ile 1.2M 4-tert bütülin piridin, 3 nolu çözelti 8 µl asetonitril ile 0.3 M Li-TFSL oluşturulur. 2 nolu ve 3 nolu çözelti

1nolu çözeltiye eklenir. Karışım sonunda oluşan çözelti döndürerek kaplama metodu ile 2000 rpm’de 60 sn boyunca perovskit kaplı camlara N₂ ortamında kaplanılır.

3.2.14. Anorganik Boşluk Taşıyıcı Perovskit Tipi Güneş Hücresinin Gümüş Kaplanması

Metal kontakt kısmında gümüş (Ag) metali ve aliminyum (Al), 1×10^{-5} Torr vakum altında ~100 nm kalınlığında metal buharlaştırma cihazında kaplanmıştır. Şekil 3.4’de metal buharlaştırma cihazı gösterilmektedir. Kaplanan güneş hücrelerinin son hali Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Vaksis metal buharlaştırma cihazı.



Şekil 3.5: Gümüş kaplanması sonrası güneş hücresi.

3.2.15. X-Işını Kırınımı Analizi

XRD analizi adında da geçtiği gibi X ışınlarını kullanarak katı malzemenin kristal yapısını belirleyen bir analiz türüdür. Burada kullanılan X ışınlarına gama ışınından daha zayıf olup, UV ışınından daha kuvvetlidir.

Birim hücre üzerine gelen X ışını kırılarak yansıma gerçekleştirmektedir. Bragg yasasına ($n\lambda = 2d\sin\theta$) göre; (d:kristal düzlem arasındaki uzaklık, n: tamsayı, λ : X ışının dalga boyu, θ :gelen ışınla düzlem arasında ki açı) X-ışınlarının sahip olduğu dalga boyu, atomik düzenlenmeler arasındaki boşluklar ve yansıma açısı ile bir ilişki içerisinde. Cihazın gonyometresinin merkezine yerleştirilmiş örnek üzerine paralel X ışınları gönderilerek Bragg yasasına uyan kırınım pikleri elde edilir. Elde edilen bu diyagramlardan pik pozisyonlarına göre hangi fazların mevcut olabileceği, pik yüksekliklerinden fazların derişimi ve pik genişliklerinden de kristalit boyutu hesaplanabilir. Kristalit boyut, Debye Scherer denklemi ($D_{hkl} = k\lambda/\beta.\cos\theta$) kullanılarak hesaplanır. Burada $\lambda_{Cu} = X$ -ışınının dalga boyu olup 1,54 Å° değerindedir. B=radyan cinsinden maksimum yarı pik genişliği (FWHM); θ , yansıma açısı; $k=0,9$, ve D_{hkl} ise kristalit boyut olup birimi angstrom (Å°)'dur.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan ince filmlerinin XRD analizleri, Cu/K α ($\lambda=1.5405$) radyasyonu üreten, Rigaku Ultima+ marka D/Max-2200 model cihazda gerçekleştirilmiştir.

3.2.16. UV-Görünür Bölge Difüz Reflektans Spektroskopisi Analizi

DRS analizinde UV bölgeden IR bölgeye kadar farklı türdeki fotokatalizörlerin absorptans, transmittans ve reflektans ölçümleri gerçekleştirilebilir. Bir fotokatalizöre P_0 şiddetinde bir ışın

gönderilirse bu ışının bir kısmı absorplanır, bir kısmı yansır, bir kısmı da saçılır. Geriye kalanı geldiği doğrultuda şiddeti azalmış olarak yapıyı terk eder. Absorplanan kısım fotokatalizör dış yüzeyinden bulunan elektronların uyarılmasında kullanılır. Bu analiz için Şekil 3.6’da yer alan Ocean Optics USB-4000 marka spektrofotometre kullanılmıştır. Bu analiz yardımıyla numunelere absorbands, reflektans ve tranmittans ölçümü yapılmıştır.

Yarı iletken malzemelerin refraktif indeksleri yüksek olduğundan düzgün bant boşluğu hesaplamalarında UV-Vis DRS kullanılmaktadır.



Şekil 3.6: Ocean Optics USB-4000 marka spektrofotometre.

3.2.17. Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi

Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisinin temeli, bir numuneye gönderilen kızıl ötesi ışının çeşitli moleküller tarafından absorblanmasına dayanmaktadır. Kızıl ötesi bölgesinde soğurma, moleküllerin titreşme ve dönme düzeylerini uyarır. Kızıl ötesi ışımının enerjisi moleküldeki bağları bozmaya yetmez, elektronik uyarma da yapamaz; fakat atomların kütlelerine, bağların gücüne ve molekül geometrisine bağlı olarak bağların titreşme genliklerini artırır. Kimyasal yapılarına ve üç boyutlu oryantasyonuna bağlı olarak, farklı numune molekülleri, kızıl ötesi spektrumun farklı bölümlerini absorblar. Absorblanmış ışın cihaz dedektörü tarafında algılanır ve FTIR grafiğini verir. Farklı grupları karakterize eden IR absorbands ve tranmittansları

literatürde ayrıntılı olarak verilmektedir. Bu tezde sentezlene filmlerin FTIR spektrumları ThermoNicolet 380 FT-IR markalı cihazda gerçekleştirilmiştir.

3.2.18. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

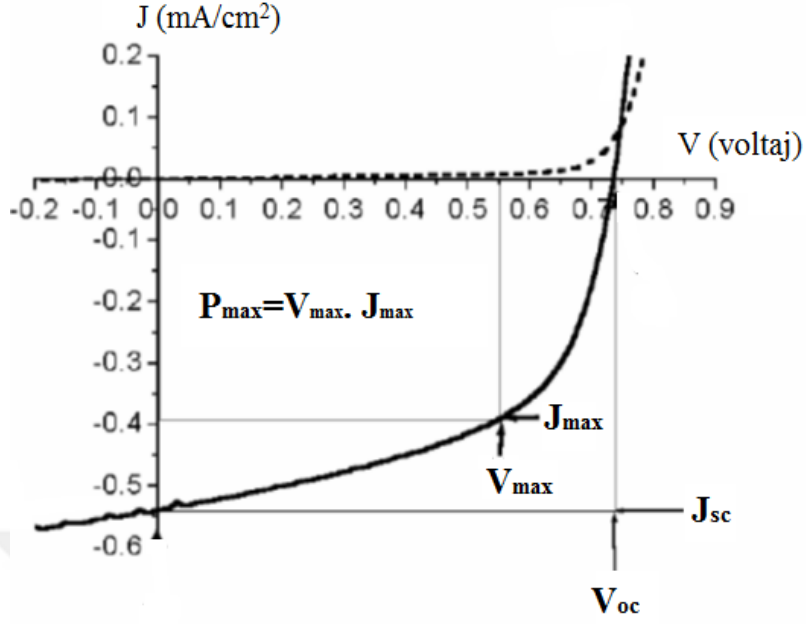
Taramalı elektron mikroskobu, katı örneklerin yüzeyinde çeşitli sinyaller üretmek için odaklanmış bir yüksek enerjili elektron demeti kullanır. Elektron-numune etkileşimlerinden elde edilen sinyaller, dış morfoloji (doku), kimyasal bileşimi ve kristal yapıyı ve numuneyi oluşturan malzemelerin oryantasyonunu içeren numuneyle ilgili bilgileri ortaya koymaktadır. Uygulamada veriler numunenin seçilmiş yüzeyinin bir alanına toplanır, bu özelliklerdeki uzamsal varyasyonları görüntüleyen 2 boyutlu bir görüntü elde edilmektedir. SEM ayrıca örnek üzerinde seçilen nokta konumlarının analizlerini yapabilir; kimyasal bileşimleri, kristal yapı ve kristal yönelimlerini niceliksel veya yarı kantitatif olarak belirlemede özellikle yararlıdır.

3.2.19. Partikül Boyutu Analizi

Parçacık boyutu analizi, belirli bir örnekte parçacıkların boyut dağılımını karakterize etmek için kullanılır. Parçacık boyutu analizi katı materyallere, süspansiyonlara, emülsiyonlara ve hatta aerosollere uygulanabilir. Cihazın çalışma prensibi temel olarak, gönderilen ışının ortamda dağınık halde bulunan partiküllere çarparak kırılmasından kaynaklanan şiddetinin değişimidir. Bu tezde farklı başlangıç reaktif kullanılarak sentezlenen NiO partiküllerinin boyut analizleri Brookhaven 90 Plus Nano Particle Size Analyzer cihazında gerçekleştirilmiştir.

3.2.20. Keithley 2401 Akım- Voltaj Eğrisi Analizi

Fotovoltaik hücre yapısına getirilen numuneler solar simülatör ve Keithley 2401 ile ölçüm alınmıştır. Gönderilen sabit voltaj karşısında devreyi tamamlayan akım karşısına akım voltaj eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan akım voltaj eğrileri yardımıyla, kısa devre akım (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), dolgu faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (η) verileri elde edilmiştir.



Şekil 3.7: Fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim karakteristiği.

Açık devre voltajı (V_{oc}), hücre içinden geçen bir akım olmadığında meydana gelmektedir. Bu değer, aygıt tarafından üretilen en yüksek gerilim olmakla beraber metal kontaklar ve pili oluşturan katmanların özelliğine bağlı olarak değişim göstermektedir.

Kısa devre akımı I_{sc} , empedans düşük olduğunda kısa devre durumuna karşılık gelmekte ve voltajın 0'a eşit olduğunda hesaplanmaktadır. İdeal bir hücre için, maksimum akım değeri foton uyarımı ile güneş pilinde üretilen toplam akıma eşit olmaktadır. Işık şiddeti, dalga boyu, malzemenin soğurma aralığı vb. gibi etmenlere bağlı olmakla birlikte güneş pili tasarımında önemli bir parametredir.

Dolgu Faktörü (FF), esasen güneş pilinin çalışma kalitesinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Hem açık devre voltajında hem de kısa devre akımında birlikte çıkacak olan teorik güce (PT) maksimum gücü karşılaştırmak suretiyle hesaplanmaktadır. FF, grafiksel olarak tasvir edilen dikdörtgen alanların oranı olarak da yorumlanabilmektedir. Dolgu faktörünün değeri 1'e yakın olması fotovoltaik pilin verimli çalışıyor olması anlamına gelmektedir. Dolgu faktörü sıklıkla yüzde olarak temsil edilmektedir. Hesaplanma şekli denklem 3.8'de gösterilmektedir.

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.8)$$

Maksimum güç noktası (P_{MAX}); Işık altında bulunan devrede ki en yüksek akım ile en yüksek voltaj değeri çarpımı şeklinde bulunmaktadır. Farklı ışık şiddetlerinde farklı değerler halinde hesaplanmaktadır. Hesaplanma şekli denklem 3.9’da gösterilmektedir.

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (3.9)$$

Güç Dönüşüm Verimi (η); temel olarak giren güneş ışığı gücünün üretilen elektrik gücüne oranı şeklinde hesaplanmaktadır. Hesaplanma şekli denklem 3.10’da gösterilmektedir.

$$\eta = \frac{V_{oc} * I_{sc} * FF}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (3.10)$$

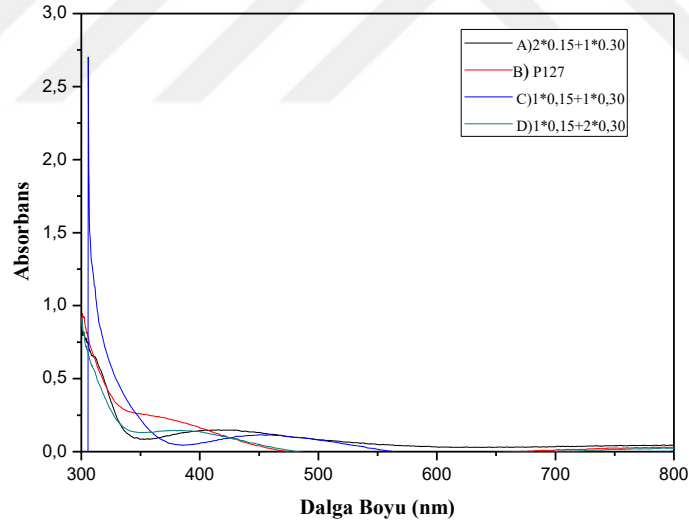
4. BULGULAR

4.1.SENTEZLENEN TiO_2 İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU

ITO üzerine sentezlenen farklı TiO_2 ince film örneklerinin UV-Vis, XRD analizleri ve film yüzeylerini incelemesi gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Farklı Başlangıç Malzemeleri İle Sentezlenmiş TiO_2 İnce Film Örneklerinin UV-Vis Analiz Sonuçları

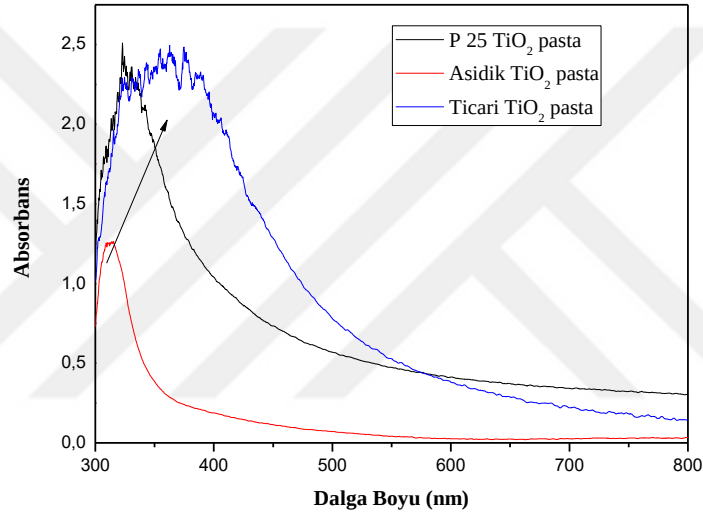
Şekil 4.1’de farklı başlangıç malzemeleriyle sentezlenmiş TiO_2 ince filmlerine ait absorptans grafiği gösterilmektedir. Sentezlenen TiO_2 ince filmlerinin hepsinin görünür bölge alanında iyi bir absorptans gösterdiği görülmektedir. P127 ve $1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M}$ temelli sentezlenen TiO_2 ince filmlerini 460 nm ’ye kadar absorptans gösterirken $2 \times 0,15 \text{ M} + 1 \times 0,30 \text{ M}$ ve $1 \times 0,15 \text{ M} + 1 \times 0,30 \text{ M}$ ince filmleri 550 nm ’ye kadar absorptans göstermiştir.



Şekil 4.1: Farklı başlangıç malzemeleri ile sentezlenmiş TiO_2 ince filmlerinin UV-Vis sonuçları.

4.1.2. Farklı Başlangıç Malzemeleri İle Sentezlenmiş Mezopor TiO₂ Pasta Tabakası Film Örneklerinin UV-Vis Analiz Sonuçları

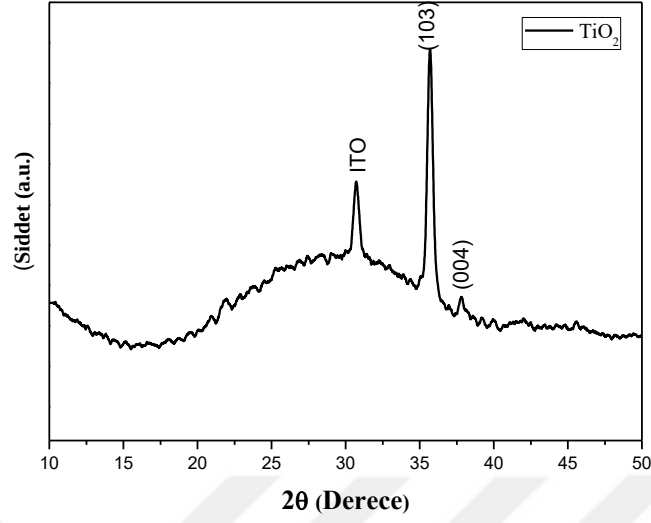
ITO üzerine sentezlenen TiO₂ ince film tabakasının üzerine farklı başlangıç malzemeleri ile oluşturulan TiO₂ pasta tabakaları aynı şartlarda döndürerek kaplama metodu ile 3000 rpm 60 saniye de kaplanmış ve aynı sıcaklıkta 500 C ° kalsine edilmiştir. Şekil 4.2’de elde edilen sonuçlarda ticari TiO₂ pasta tabakasının, P25 ve asidik yöntemle sentezlenen TiO₂’den daha iyi absorbands verdiği görülmüştür.



Şekil 4.2:Farklı TiO₂ pastalarının UV-Vis grafiği.

4.1.3. Sentezlenen TiO₂ İnce Filminin XRD Analiz Sonuçları

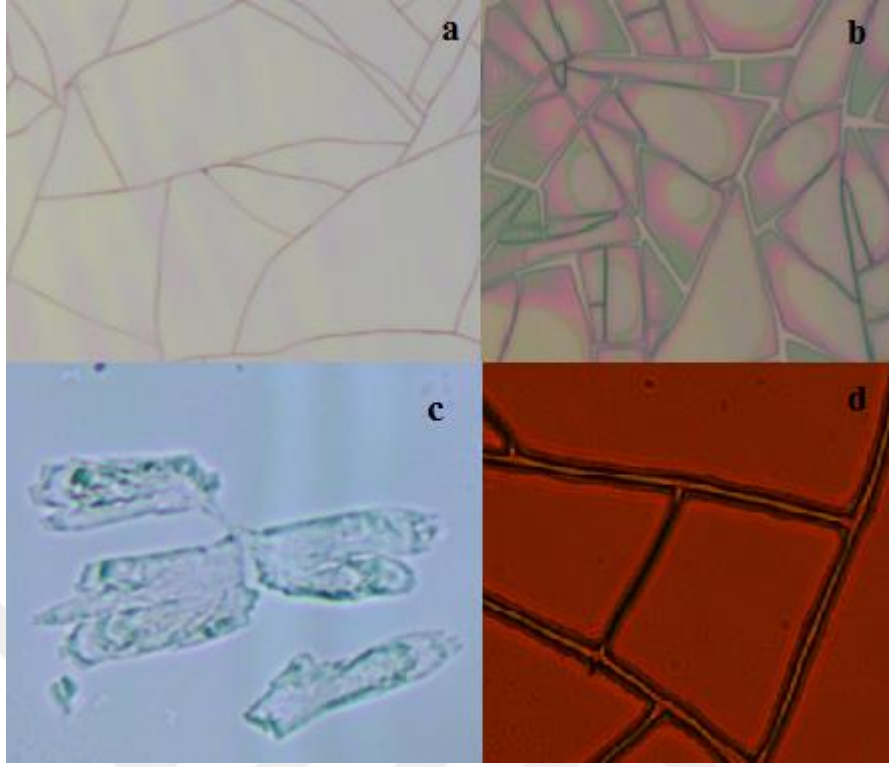
ITO üzerine kaplanmış olan ince film TiO₂ ait XRD grafiği Şekil 4.3’de bulunmaktadır. XRD analiz grafiğinde TiO₂ anataz yapısının oluştuğunu gösteren 2 θ : 35,0, 37,5 pikleri görülmüştür. 2 θ : 30’da ITO’ya ait pikler görülmektedir.



Şekil 4.3: TiO₂ ince film XRD grafiği.

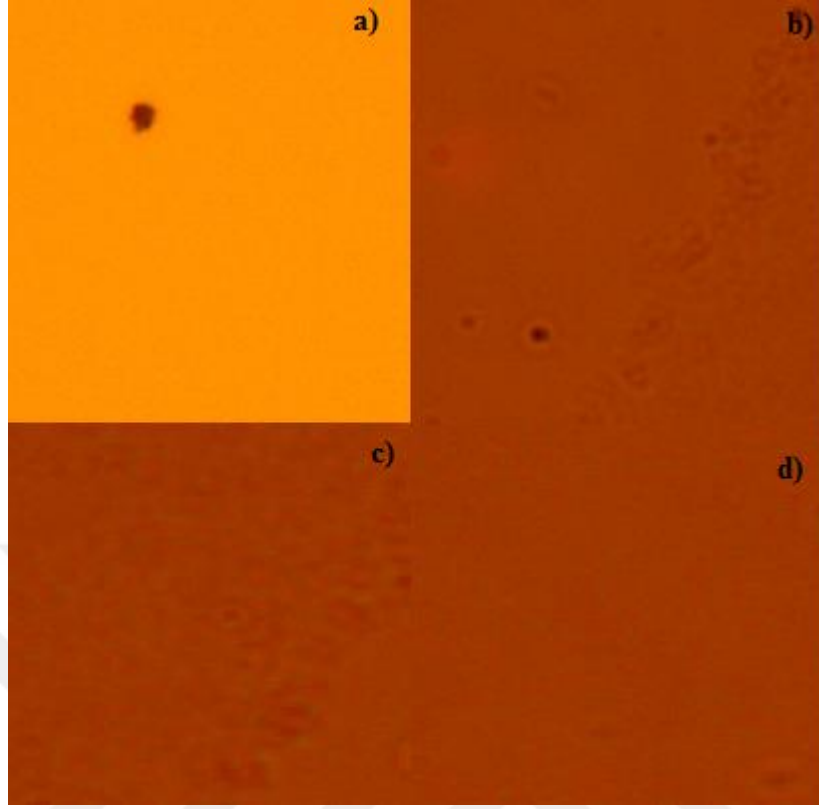
4.1.4. TiO₂ İnce Film Mikroskop Görüntüleri

Farklı yöntemlerde sentezlenen TiO₂ Nikon Eclipse 2000 markalı mikroskop ile x 50 defa büyütme sağlanarak kalsinasyon sonrası yüzeylerine bakılmıştır. Şekil 4.4'de a) 3000 rpm'de tek kaplama işlemi sonrası Şelçuk ve diğ (2017) yöntemi kullanılarak sentezlenen TiO₂ ince filmini, b) 1500 rpm'de tek kaplama işlemi sonrası Şelçuk ve diğ (2017) yöntemi kullanılarak sentezlenen TiO₂ ince filmini, c) PEG 1000 ilavesi ile 3000 rpm'de tek kaplama işlemi sonrası Şelçuk ve diğ (2017) yöntemi kullanılarak sentezlenen TiO₂ ince filmini, d) HCl+ Asetil aseton bağlayıcı ile 3000 rpm'de tek kaplama işlemi sonrası Şelçuk ve diğ (2017) yöntemi kullanılarak sentezlenen TiO₂ ince film mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Bu tür kaplama yöntemlerinde yüzey filminde homojenlik yakalanamamış ve fotovoltaiik hücre karakteristiğinde kısa devre olayı görülmüştür.



Şekil 4.4: a) 3000 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO_2 , b) 1500 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO_2 , c) PEG 1000 ilavesi ile 3000 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO_2 , d) HCl+ Asetil aseton bağlayıcı ile 3000 rpm’de tek kaplama işlemi sonrası TiO_2

Şekil 4.5’de P127 destekli ve 2 farklı konstrasyonda iki çözeltinin farklı kaplama tekrarı sonucunda oluşturulan TiO_2 ince film mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Bu tür yöntemlerle kaplanan TiO_2 ince filmlerinde çatlama olayları olmamıştır.



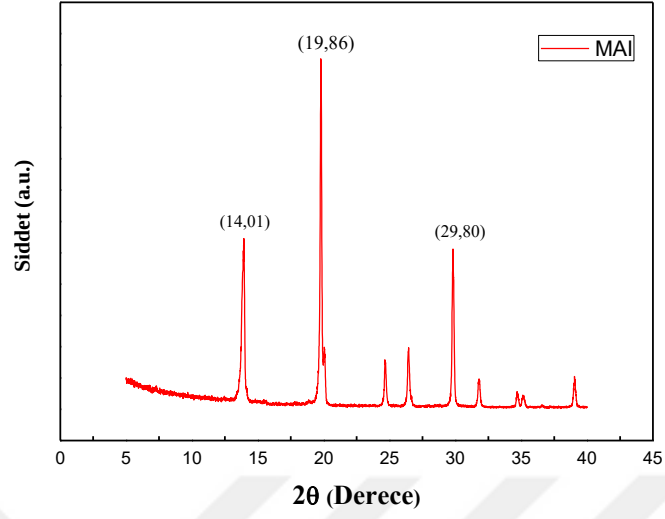
Şekil 4.5: a)P127 temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO_2 ince film, b) $1 \times 0,15 + 1 \times 0,30$ M temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO_2 ince film, c) $2 \times 0,15 + 1 \times 0,30$ M temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO_2 ince film, d) $1 \times 0,15 + 2 \times 0,30$ M temelli yöntem kullanılarak sentezlenen TiO_2 ince film yüzey görüntüsü.

4.2. SENTENZLENEN PEROVSKİT ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU

ITO /c- TiO_2 /m- TiO_2 film örneklerin üzerine kaplanmış perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) UV-Vis, XRD, FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir.

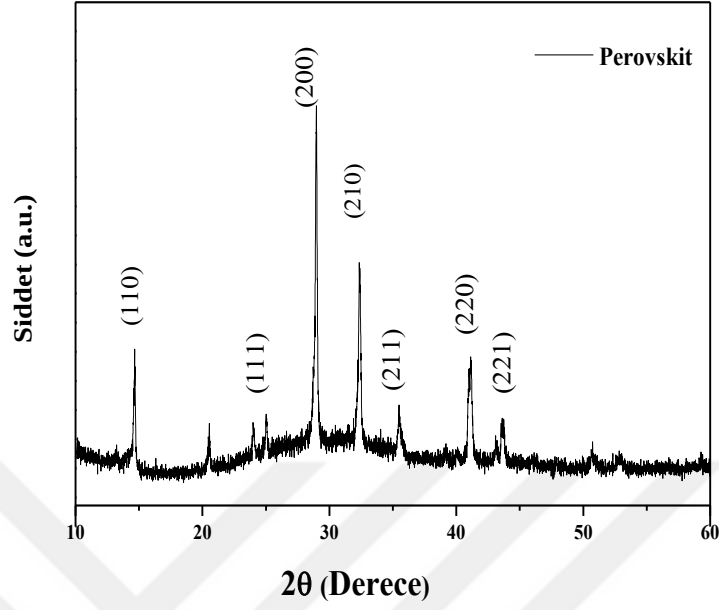
4.2.1. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İnce Filminin XRD Analiz Sonuçları

Tez kapsamında perovskit yapısının oluşması için metil amonyum iyodür sentezi ve satın alınması gerçekleştirilmiştir. Sentezlenmiş olan metil amonyum iyodürün XRD analizi yapılmış ve literatürde Jeon ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada belirtilen metil amonyum iyodür piklerinin (14,01, 19,86, 29,80) olduğu doğrulanmıştır. Şekil 4.6’da sentezlenen metil amonyum iyodürün XRD analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Sentezlenen metil amonyum iyodürün XRD analiz sonuçları.

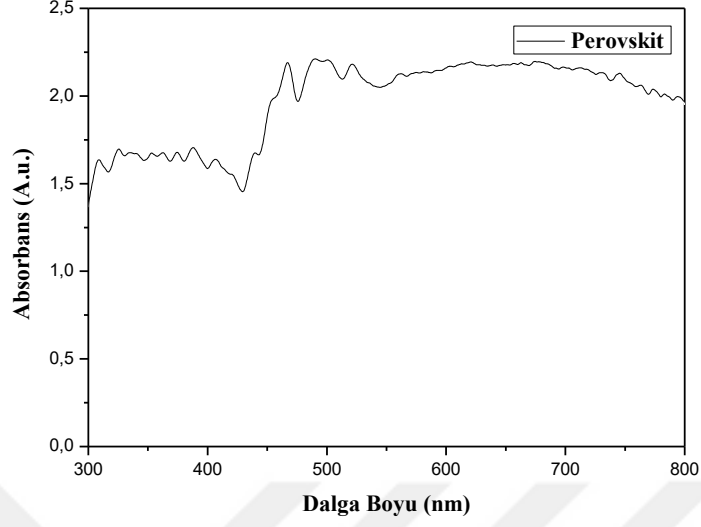
Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) grafiği Şekil 4.7’de gösterilmektedir. XRD analizi sonucunda literatürde Zhao ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada belirtilen perovskit piklerinin (14,01, 24,35, 28,34, 39,86, 42,39) oluştuğu doğrulanmıştır. Sentezlenen perovskit en yüksek şiddetli pik değeri 2θ : $28,34^\circ$ ’de oluşmuştur. Yapıda oluşan diğer piklerde perovskit kristal yapısını karakterize eden piklerdir.



Şekil 4.7: Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) ait XRD grafiği.

4.2.2. Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) İnce Filminin UV-Vis Analiz Sonuçları

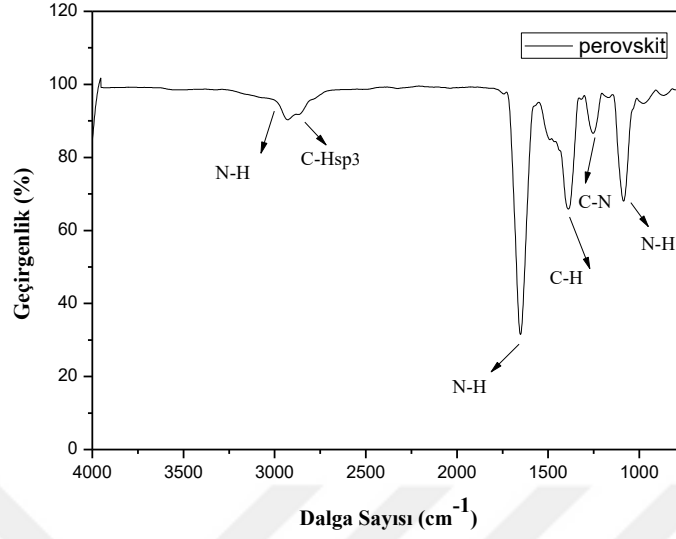
Şekil 4.8’de ITO/c-TiO₂/m-TiO₂ üzerine dönerek kaplama metodu ile elde edilen perovskit ince filmlerinin UV-Vis sonuçları gösterilmektedir. Hazırlanmış perovskit ince filminin absorbansına bakıldığında 300-800 nm arasında foto aktif olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8: Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) UV-VİS grafiği.

4.2.3. Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) İnce Filminin FTIR Analiz Sonuçları

Şekil 4.9’da sentezlenen perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) ait FTIR gösterilmektedir. Shit ve diğ.(2015) yaptıkları çalışmalarında gözledikleri bağ yapıları sentezlenen perovskit yapısında görülmektedir. 3088 cm^{-1} de gözlenen geniş pik hidrojen bağı N-H gerilme titreşimine aittir. 2920 cm^{-1} de gözlenen C-H gerilmesi, 1657 cm^{-1} de gözlenen N-H gerilmesi, 1387 cm^{-1} de gözlenen C-H gerilmesi, 1255 cm^{-1} de gözlenen C-N gerilmesi görülmektedir.

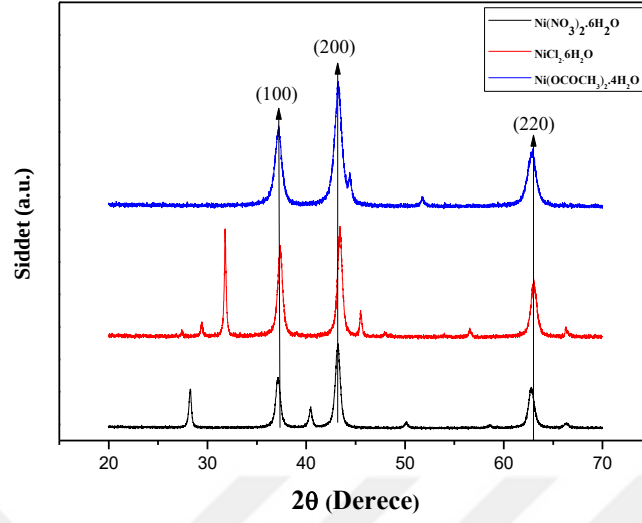


Şekil 4.9: Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) ait FTIR grafiği.

4.3. SENTEZLENEN NiO İNCE FİLM İNCE FİMLERİN KARAKTERİZASYONU
ITO /c-TiO₂/m-TiO₂/ Perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) film örneklerin üzerine kaplanmış NiO ince filmlerinin UV-Vis, XRD, FTIR, DLS analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. NiO İnce Filminin XRD Analiz Sonuçları

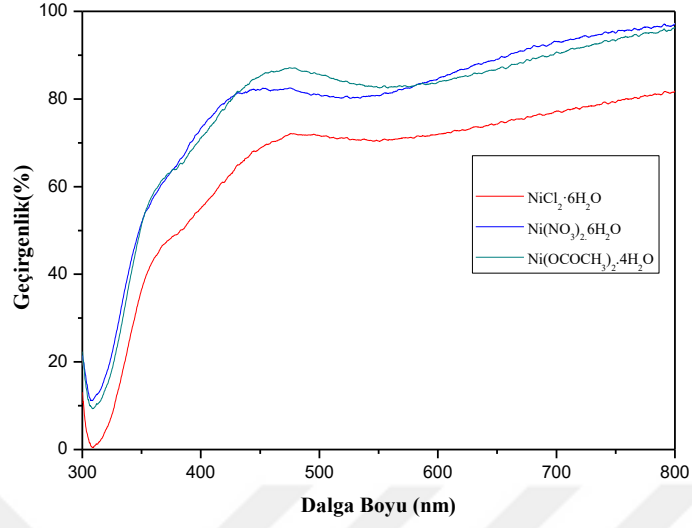
Şekil 4.10'da sentezlenen NiO'lerin XRD grafiği gösterilmektedir. XRD analizi sonucunda Zhang ve diğ (2016), Sookman ve diğ. (2006), Thota ve diğ (2007) yaptıkları çalışmaları sonucunda elde edilen NiO piklerinin saf kübik yapısını oluşturan (2θ : 37,25, 43,17, 62,96) piklerinin farklı nikel başlangıç kimyasallarında oluştuğu doğrulanmıştır. Sentezlenen NiO en yüksek şiddetli pik değeri 2θ : 43,17°'de oluşmuştur.



Şekil 4.10: Farklı başlangıç reaktifleri ile sentezlenen NiO'lerin XRD analizi sonuçları.

4.3.2 NiO İnce Filminin UV-Vis Analiz Sonuçları

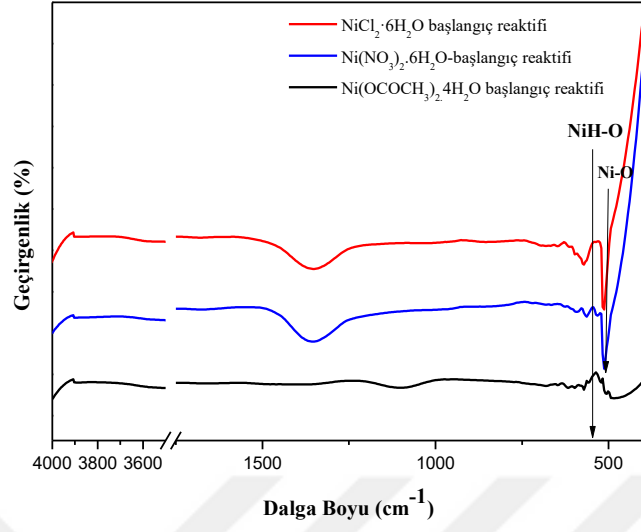
Şekil 4.11'de sentezlenen farklı başlangıç reaktifli NiO'lerin UV-Vis sonuçları gösterilmektedir. Dönerek kaplama metodu ile elde edilen NiO ince filmlerin geçirgenliğine bakıldığında 300-800 nm arasında nitrat kökenli ve asetat kökenli NiO ince filmlerinin % 90'lara ulaşan bir geçirgenlik değeri olduğu, klorür kökenli NiO ince filmlerinin ise 300-800 nm aralığında asetat ve klorür kökenli NiO ince filmlerinin daha düşük bir geçirgenlik değeri olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11: Sentezlenen NiO'lerin UV-Vis sonuçları.

4.3.2. NiO İnce Filminin FTIR Analiz Sonuçları

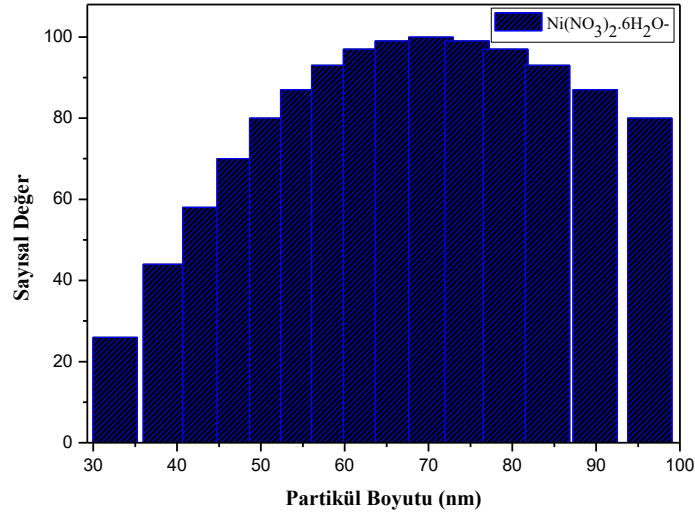
Sentezlenen NiO'lerin ait spektrumları Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Zhang ve diğ (2016), Sookman ve diğ. (2006), Thota ve diğ (2007) yaptıkları çalışmaları sonucunda elde edilen bağ yapıları sentezlenen NiO'lerde görülmektedir. İnorganik yapılar 1000-400 cm^{-1} de gözlenebilen bağ yapmaktadırlar. 607 cm^{-1} de gözlenen NiO-H gerilmesi, 450 cm^{-1} de Ni-O titreşimi görülmektedir.



Şekil 4.12: NiO ince filmlerinin FTIR sonuçları.

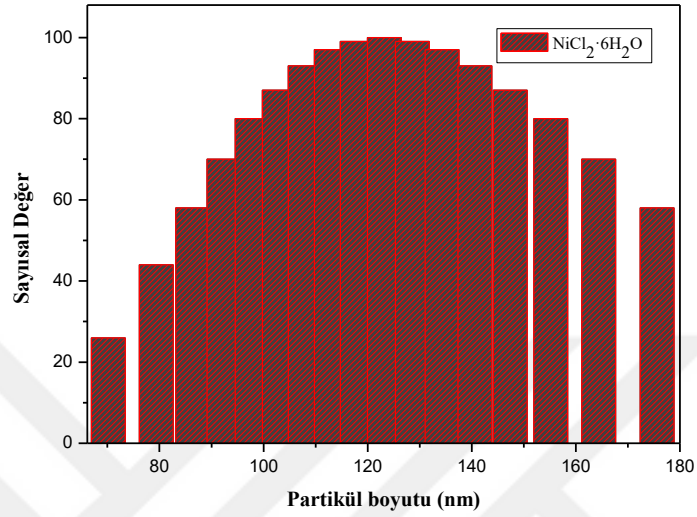
4.3.3. NiO İnce Filmlerinin DLS Analiz Sonuçları

Sentezlenen NiO tozlarının partikül boyut ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.13’de $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -başlangıç reaktifi ile sentezlenen NiO’nin partikül boyutları ortalama olarak ~70 nm olarak bulunmuştur.



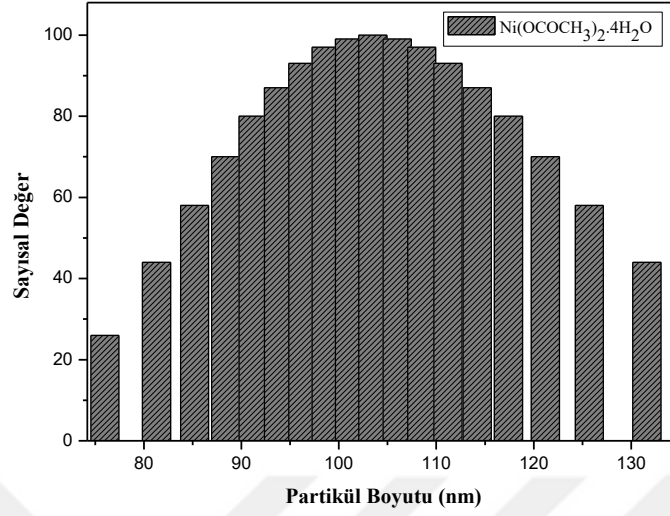
Şekil 4.13: $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -başlangıç reaktifi DLS sonuçları.

Şekil 4.14’de $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -başlangıç reaktifi ile sentezlenen NiO ’in partikül boyutları ortalama olarak ~ 120 nm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.14: $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ başlangıç reaktifi DLS sonuçları.

Şekil 4.15’de $\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ -başlangıç reaktifi ile sentezlenen NiO ’in partikül boyutları ortalama olarak ~ 100 nm olarak bulunmuştur.



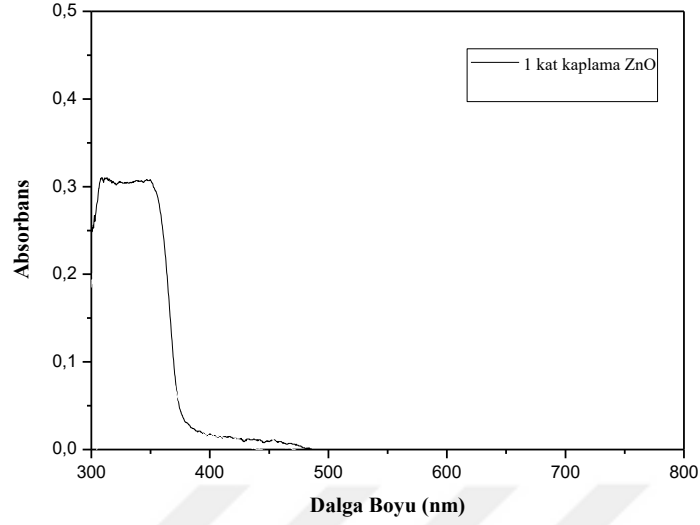
Şekil 4.15: Ni(OCOCH₃)₂.4H₂O DLS sonuçları.

4.4. SENTEZLENEN ZNO İNCE FİMLERİN KARAKTERİZASYONLARI

ITO üzerine sentezlenen n tipi yarı iletken ZnO ince film örneğinin UV-Vis analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.4.1. ZnO İnce Filminin UV-Vis sonuçları

Elektron taşıyıcı tabaka olarak sentezlenen ZnO ince filminin UV-Vis analizi gerçekleştirmiş ve Sun ve diğ. (2005) yaptıkları çalışma referans alınarak görünür bölgede ZnO ait absorbands piki verdiği görülmüştür. Şekil 4.16'da analiz sonucu gösterilmektedir.



Şekil 4.16: ZnO ince film UV-VİS sonuçları.

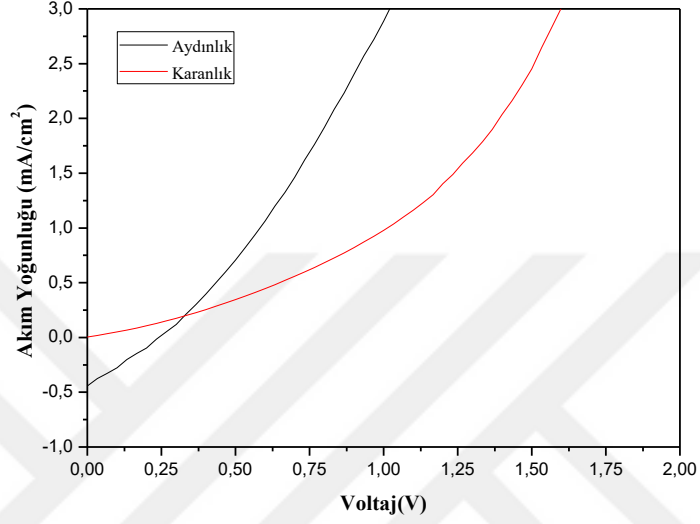
4.5. SENTEZLENEN GÜNEŞ HÜCRELERİNİN AKIM VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

4.5.1. Düzlemsel Yapılı Farklı TiO₂ İnce Filmleriyle Sentezlenen Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi

Farklı kompakt TiO₂ ince filmleri ile düzlemsel yapılı ITO/c-TiO₂/ CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag yapısında fotovoltajik piller oluşturulmuştur ve farklı kompakt yapılı TiO₂'lerin fotovoltajik pil verimine etkisi incelenmiştir. Sentezlenen fotovoltajik pillerde ışığın absorblanmasını gerçekleştiren perovskit (CH₃NH₃PbI₃) çözeltisi DMF içinde hazırlanmış ve dönerek kaplama yöntemi ile ince film olarak kaplanmış ve 100°C 1 saat boyunca N₂ ortamında tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Boşluk taşıyıcı tabaka olarak P3HT kullanılmış, dönerek kaplama yöntemi ile ince film olarak kaplanmıştır. 120°C'de 30 dakika boyunca P3HT ince filmi N₂ ortamında tavlantmıştır. Daha sonra metal buharlaştırma cihazı ile ~100nm kalınlığında Ag kaplanarak güneş hücresi elde edilmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de bu yöntemlerle hazırlanmış fotovoltajik hücrelere ait akım-gerilim grafikleri verilmiştir.

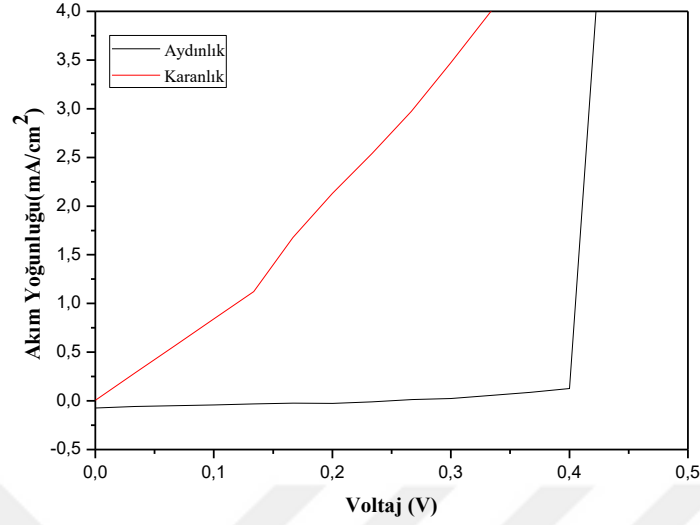
Şekil 4.17'de %0,03 verim elde edilen 1*0,15M+2*0,30 M şeklinde kaplanan TiO₂ ince filmli güneş hücresini akım gerilim grafiği gösterilmektedir. Bu fotovoltajik pil için J_{SC}=0,38 mA/cm²,

$V_{OC}= 267$ mV olarak belirlenmiş ve $FF= 0,27$ olarak hesaplanmıştır. Bu deney grubunda en iyi sonuç bu güneş hücresinden elde edilmiştir.



Şekil 4.17: ITO/(1*0,15M+2*0,3M) TiO_2 / $CH_3NH_3PbI_3$ /P3HT/Ag fotovoltaiik hücresine ait akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.18’de %0,01 verim elde edilen P127 temelli yöntemle sentezlenen TiO_2 ince filmlili güneş hücresini akım gerilim grafiği gösterilmektedir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{SC}=0,10$ mA/cm², $V_{OC}= 267$ mV olarak belirlenmiş ve $FF= 0,20$ olarak hesaplanmıştır



Şekil 4.18: ITO/(P127) TiO₂ /CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag fotovoltaiik hücrelerine ait akım-gerilim grafiği. Tablo 4.1’de ITO/c-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag yapılı fotovoltaiik pillerin akım-gerilim karakteristiklerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1: Düzlemsel yapılı farklı TiO₂ ince filmleriyle pil karakteristiklerinin sonuçları.

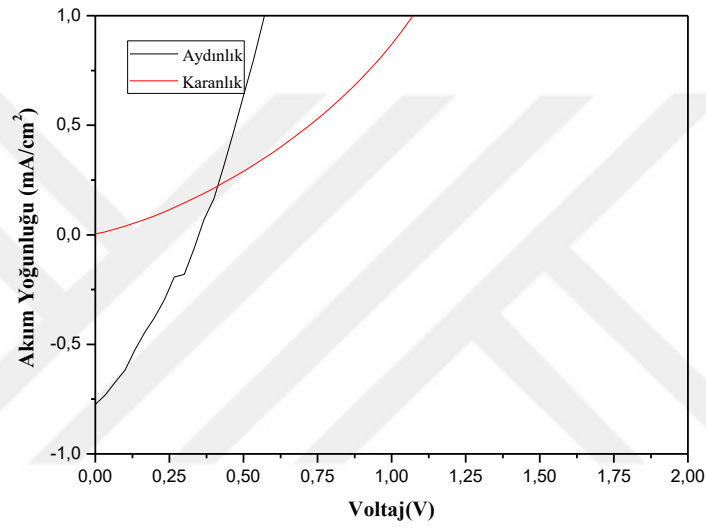
TiO ₂	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
1*0,15+2*0,30	267	0,38	0,27	0,03
P127	267	0,10	0,20	0,01

4.5.2. Mezopor Yapılı Farklı TiO₂ İnce Filmleriyle Sentezlenen Perovskit Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi

Farklı kompakt TiO₂ ince filmlerinin üzerine ticari TiO₂ pastası dönerek kaplama metodu ile kaplanmış ve mezopor yapılı ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag fotovoltaiik pilleri oluşturulmuştur ve mezopor TiO₂ fotovoltaiik pil verimine etkisi incelenmiştir. Sentezlenen fotovoltaiik pillerde ışığın absorblanmasını gerçekleştiren perovskit (CH₃NH₃PbI₃) çözeltisi DMF içinde hazırlanmış ve dönerek kaplama yöntemi ile ince film olarak kaplanmış ve 100°C 1 saat boyunca N₂ ortamında tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Boşluk taşıyıcı tabaka olarak P3HT kullanılmış, dönerek kaplama yöntemi ile ince film olarak kaplanmıştır. 120°C’de 30

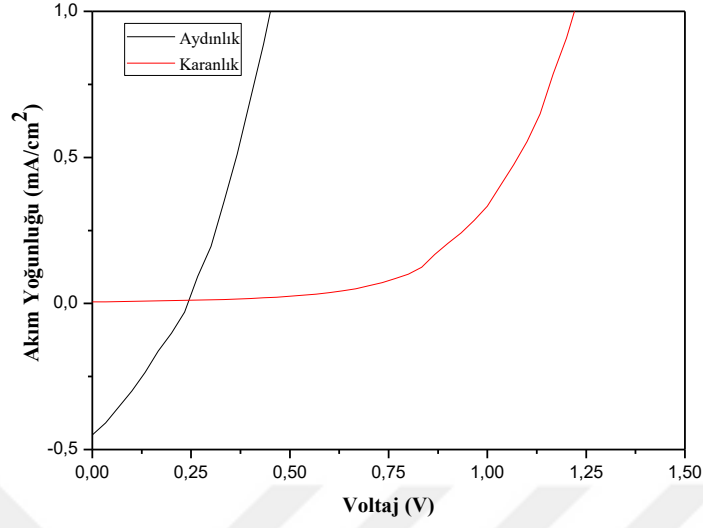
dakika boyunca P3HT ince filmi N_2 ortamında tavlannmıştır. Daha sonra metal buharlaştırma cihazı ile $\sim 100\text{nm}$ kalınlığında Ag kaplanarak güneş hücresi elde edilmiştir.

Şekil 4.19’da %0,08 verim elde edilen $1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M}$ şeklinde kaplanan TiO_2 ince filmine ait akım gerilim grafiğı gösterilmektedir. Bu fotovoltak pil için $J_{SC}=0,73 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=367 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,28$ olarak hesaplanmıştır. Bu deney grubunda en iyi verim bu fotovoltak pilden elde edilmiştir.



Şekil 4.19: ITO/($1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,3 \text{ M}$) TiO_2 / m- TiO_2 /CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag fotovoltak hücresine ait akım-gerilim grafiğı.

Şekil 4.20’de %0,03 verim elde edilen P127 temelli sentezlenen TiO_2 ince filmine ait akım gerilim grafiğı gösterilmektedir. Bu fotovoltak pil için $J_{SC}=0,41 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=267 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,27$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.20: ITO/(P127) TiO₂/ m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag fotovoltaiik hücrelerine ait akım-gerilim grafiği.

Tablo 4.2’de ITO/c-TiO₂/ m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag yapılı fotovoltaiik pillerin akım-gerilim karakteristiklerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.2: Mezopor yapılı farklı TiO₂ ince filmleriyle güneş pillerinin karakteristik sonuçları.

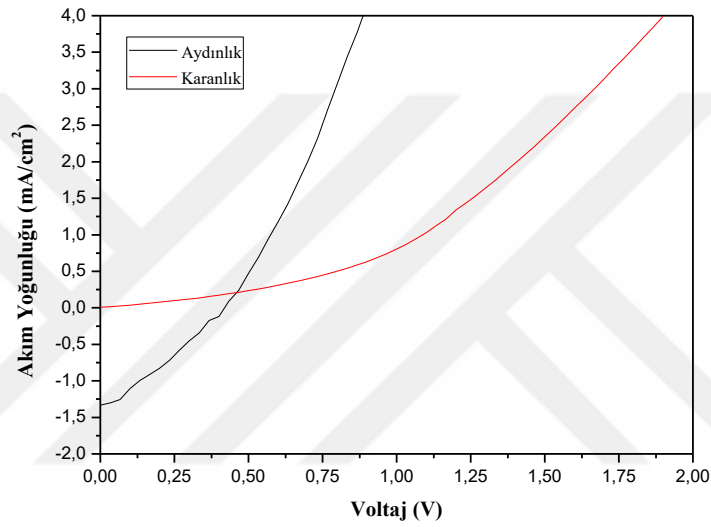
TiO ₂	m-TiO ₂	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
1*0,15 M+2*0,30 M	Ticari	367	0,73	0,28	0,08
P127	Ticari	267	0,41	0,27	0,03

4.5.3. Farklı Çözücü İçinde Sentezlenen Perovskitin Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi

Farklı kompakt yapıda TiO₂’li mezopor yapılı ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag fotovoltaiik pilleri oluşturulmuş ve sentezlenen perovskitin çözücü farkının fotovoltaiik pil verimine etkisi incelenmiştir. Bu deney grubunda perovskit DMF ve DMSO (7:2 v/v) oranında hazırlanmış, dönerek kaplama metodu ile kaplanarak, 100°C 1 saat boyunca N₂ ortamında tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Boşluk taşıyıcı tabaka olarak P3HT kullanılmış, dönerek kaplama yöntemi ile ince film olarak kaplanmıştır. 120°C’de 30 dakika boyunca P3HT ince

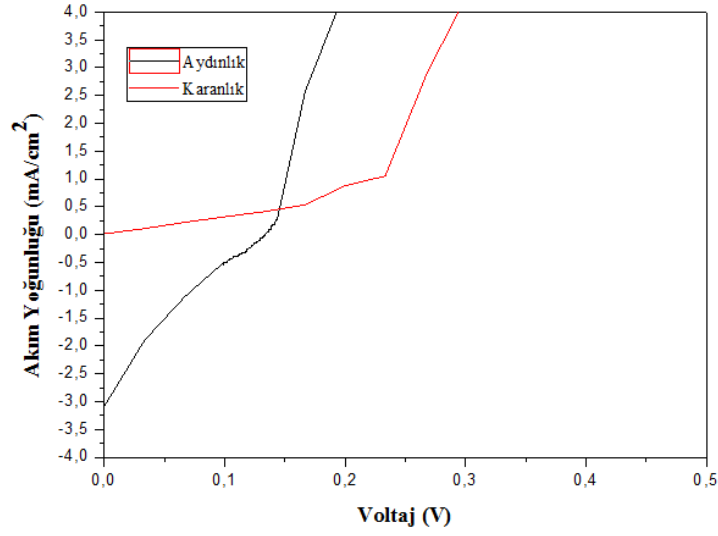
filmi N_2 ortamında tavlannmıştır. Daha sonra metal buharlaştırma cihazı ile $\sim 100\text{nm}$ kalınlığında Ag kaplanarak güneş hücresi elde edilmiştir.

Şekil 4.21’de %0,17 verim elde edilen $1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M}$ şeklinde kaplanan TiO_2 ince filminin akım gerilim grafiğı gösterilmektedir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{SC}=1,3 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=434 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,30$ olarak hesaplanmıştır. Bu deney grubunda en iyi verim bu fotovoltaiik pilden elde edilmiştir.



Şekil 4.21: ITO/($1 \times 0,15\text{M} + 2 \times 0,3\text{M}$) TiO_2 /m- TiO_2 / $CH_3NH_3PbI_3$ (DMF+DMSO)/P3HT/Ag fotovoltaiik hücresine ait akım-gerilim grafiğı.

Şekil 4.22’de %0,10 verim elde edilen P127 temelli sentezlenen TiO_2 ince filminin akım gerilim grafiğı gösterilmektedir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{SC}=3,08 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}= 167 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,23$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.22: ITO/(P127) TiO₂/ m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃(DMF+DMSO)/P3HT/Ag fotovoltaiik hücreesine ait akım-gerilim grafiği.

Tablo 4.4’de ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag yapılı fotovoltaiik pillerin akım-gerilim karakteristiklerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.3:Farklı çözücü etkisinin farklı TiO₂ ince filmleriyle güneş pillerinin karakteristik sonuçları.

TiO ₂	Çözücü	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
1*0,15 M+2*0,3 M	DMF+DMSO	434	1,30	0,30	0,17
P127	DMF+DMSO	167	3,08	0,23	0,10

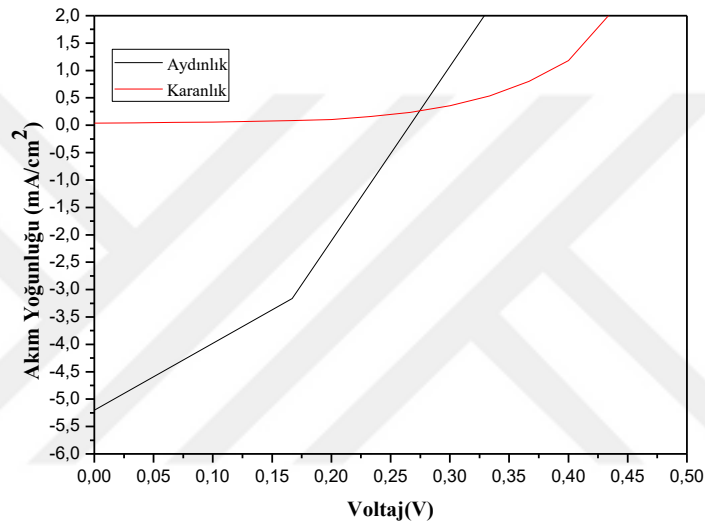
Bu nedenle anorganik yapılı boşluk taşıyıcılı perovskit tipi güneş hücresi yapısında 1*0,15 M+2*0,30 M TiO₂ ince filmi kullanılmıştır.

4.5.4. İnorganik Yapılı Boşluk Taşıyıcı Tabaka NiO’lerin İnce Film Olarak Kaplanması ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/Perovskit (CH₃NH₃PbI₃)/NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi

İnorganik yapılı boşluk taşıyıcı tabakanın fotovoltaiik verim üzerine etkisi için ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/Perovskit (CH₃NH₃PbI₃)/NiO/Ag yapılı fotovoltaiik piller oluşturulmuştur. İnorganik yapılı boşluk taşıyıcı tabaka için 3 farklı NiO sentezlenerek dönerek kaplama metodu ile ince film olarak kaplanmıştır ve akım voltaj ölçümü yapılmıştır. Bu deney grubun da ticari olarak

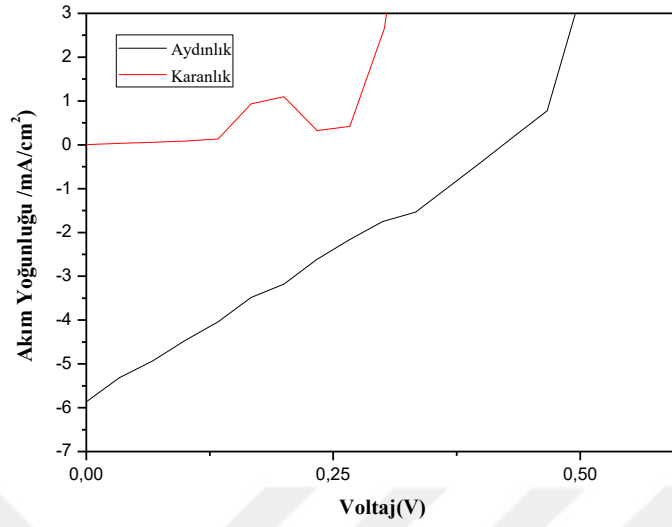
satın alınmış metil amonyum iyodürden sentezlenen perovskit ile laboratuvarında sentezlenerek elde edilen metil amonyum iyodür ile sentezlenen perovskit sonuçları karşılaştırılmıştır. NiCl_2 başlangıç reaktifinden sentezlenen NiO 'ten akım ve voltaj grafiği elde edilememiştir.

Şekil 4.23'de %0,52 verim ile $\text{NiO}(\text{asetat})$ ince filminin akım gerilim grafiği gösterilmektedir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{\text{SC}}=5,20 \text{ mA/cm}^2$, $V_{\text{OC}}= 333 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $\text{FF}= 0,30$ olarak hesaplanmıştır.



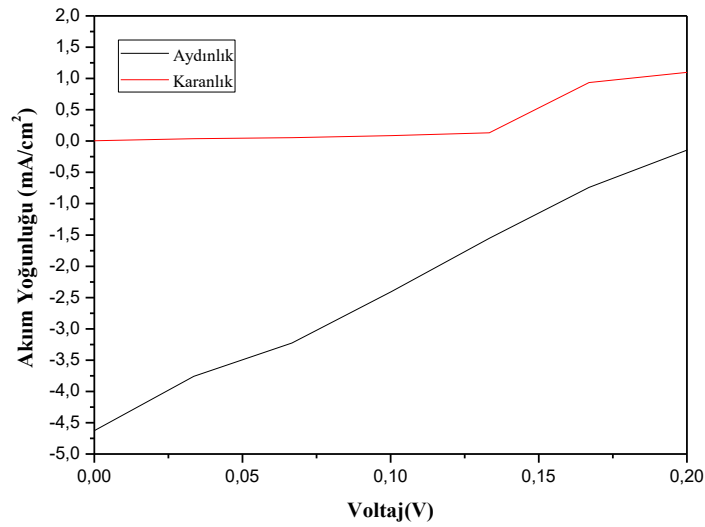
Şekil 4.23: ITO/c-TiO₂/ m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ (ticari)/NiO(asetat)/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.24'de %0,64 verim ile $\text{NiO}(\text{nitratt})$ ince filminin akım gerilim grafiği gösterilmektedir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{\text{SC}}=5,90 \text{ mA/cm}^2$, $V_{\text{OC}}= 434 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $\text{FF}= 0,25$ olarak hesaplanmıştır. Bu deney grubunda en iyi verim bu fotovoltaiik pilden elde edilmiştir.



Şekil 4.24: ITO/c-TiO₂/ m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ (ticari)/NiO(nitrat)/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.

Şekil 4.25’de %0,27 verim ile sentez MAI/ NiO(nitrat) ince filminin akım gerilim grafiğı gösterilmektedir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{SC}=3,80 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}= 233 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,23$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.25: ITO/c-TiO₂/ m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ (sentez)/NiO(nitrat)/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.

Tablo 4.4’de ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag yapılı fotovoltaiik pillerin akım-gerilim karakteristiklerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir.

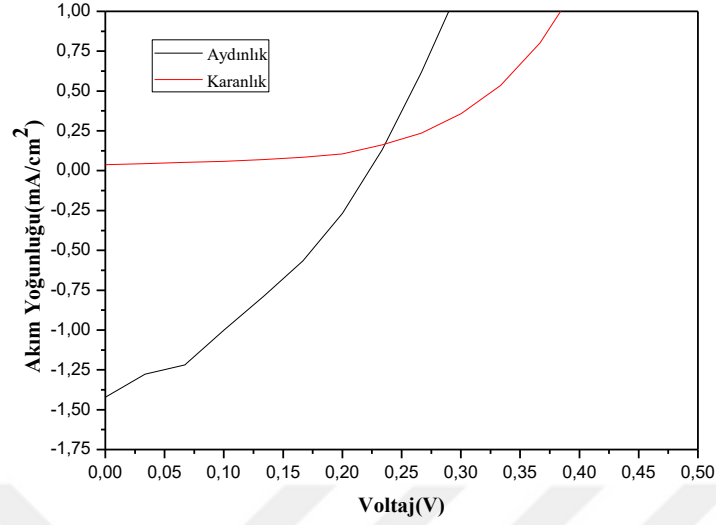
Tablo 4.4: Farklı NiO çözelti ince filmleriyle oluşturulan ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/ Ag hücrelerin pil karakteristikleri.

Yapı	Perovskit	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η%
NiO (asetat)	Ticari	333	5,20	0,30	0,52
NiO (nitrat)	Ticari	434	5,90	0,30	0,64
NiO (nitrat)	Sentez	233	3,80	0,27	0,23

4.5.5. Organik Yapılı Boşluk Taşıyıcı Tabaka Spiro-OMETAD Kullanılarak ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi

Organik yapılu boşluk taşıyıcı tabakanın fotovoltajik verim üzerine etkisi için ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) /spiro-OMETAD/ Ag yapılu fotovoltajik piller oluşturulmuştur. Oluşturulan spiro-OMETAD çözeltisi literatürde belirtilen şekilde hazırlanmış ve dönerek kaplama metodu ile ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) üzerine kaplanmıştır. Kaplama sonunda havaya en az şekilde maruz bırakılarak Ag kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.26’da ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/spiro-OMETAD/Ag yapılu fotovoltajik pilinin akım-gerilim karakteristiğinin sonucu verilmiştir. Bu fotovoltajik pil için J_{sc}=1,28 mA/cm², V_{oc}=233 mV, η=%0,11 olarak belirlenmiş ve FF= 0,37 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.26: ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-OMETAD/Ag fotovoltaiik hücreğine ait akım-gerilim grafiğı.

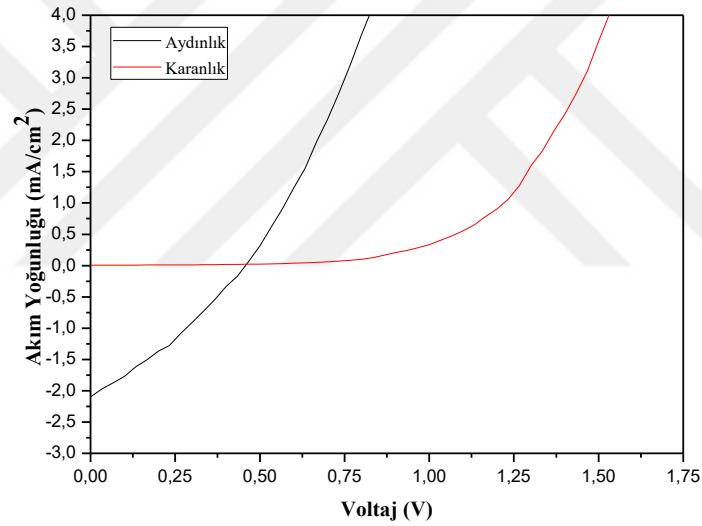
4.5.6. Tersine Çevrilmiş Yapılı Güneş Hücrelerinin Akım-Voltaj Karakteristiğıinin İncelenmesi

Bu tez kapsamında tersine çevrilmiş yapının fotovoltaiik verim üzerine etkisi için ITO/NiO /Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) /ZnO/ Ag yapılı fotovoltaiik piller oluşturulmuştur. NiO sentezi için Ni(NO₃)₂.6H₂O başlangıç reaktifli çözelti kullanılarak ITO üzerine 10 defa olacak şekilde döndürerek kaplama metodu ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında 300°C 3 saat boyunca kalsinasyon yapılarak film yapısı elde edilmiştir. Daha sonra üzerine ticari satın alınımı yapılan MAI'den sentezlenen perovskit çözeltisi dönerek kaplama metodu ile kaplanmış ve 100°C 1 saat boyunca N₂ ortamında tavlanmışır. Elektron taşıyıcı tabaka olarak kullanılacak ZnO çözeltisi dönerek kaplama metodu ile kaplanmışır. Al kaplama işleminden sonra akım gerilim karakteristiğıine bakılmışır. Fakat bu çalışma grubunda bir akım gerilim grafiğı elde edilememiş ve güneş hücresinden kısa devre görölmüştür.

4.5.7. İnorganik Yapılı Boşluk Taşıyıcı Tabaka NiO Kullanılarak ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi

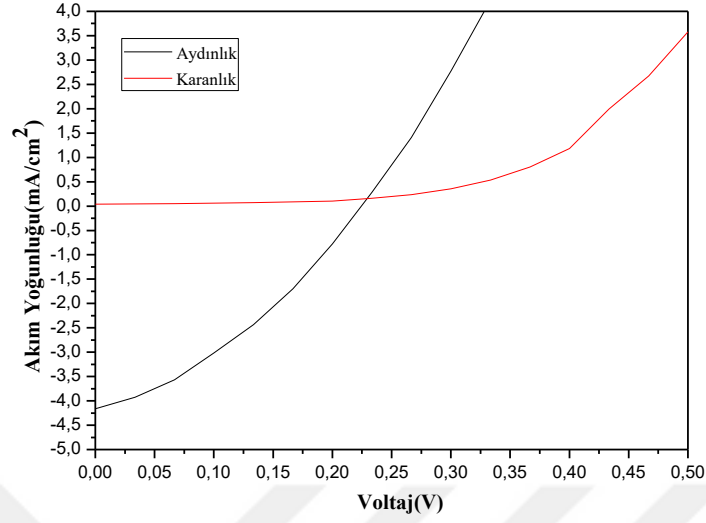
Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda en yüksek verimin elde edildiği fotovoltaiik hücresinin tekrarlanabilirliği aynı proses şartlarında ve aynı yapıda olacak şekilde tekrarlanabilirliğine bakılmıştır.

Şekil 4.27’de ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag yapılı fotovoltaiik pilinin akım-gerilim karakteristiğinin 1.tekrar sonucu verilmiştir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{SC}=1,96 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=467 \text{ mV}$, $\eta=\%0,30$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,33$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.27: ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi (1).

Şekil 4.28’de ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag yapılı fotovoltaiik pilinin akım-gerilim karakteristiğinin 2.tekrar sonucu verilmiştir. Bu fotovoltaiik pil için $J_{SC}=3,93 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=233 \text{ mV}$, $\eta=\%0,33$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,36$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.28: ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi (2).

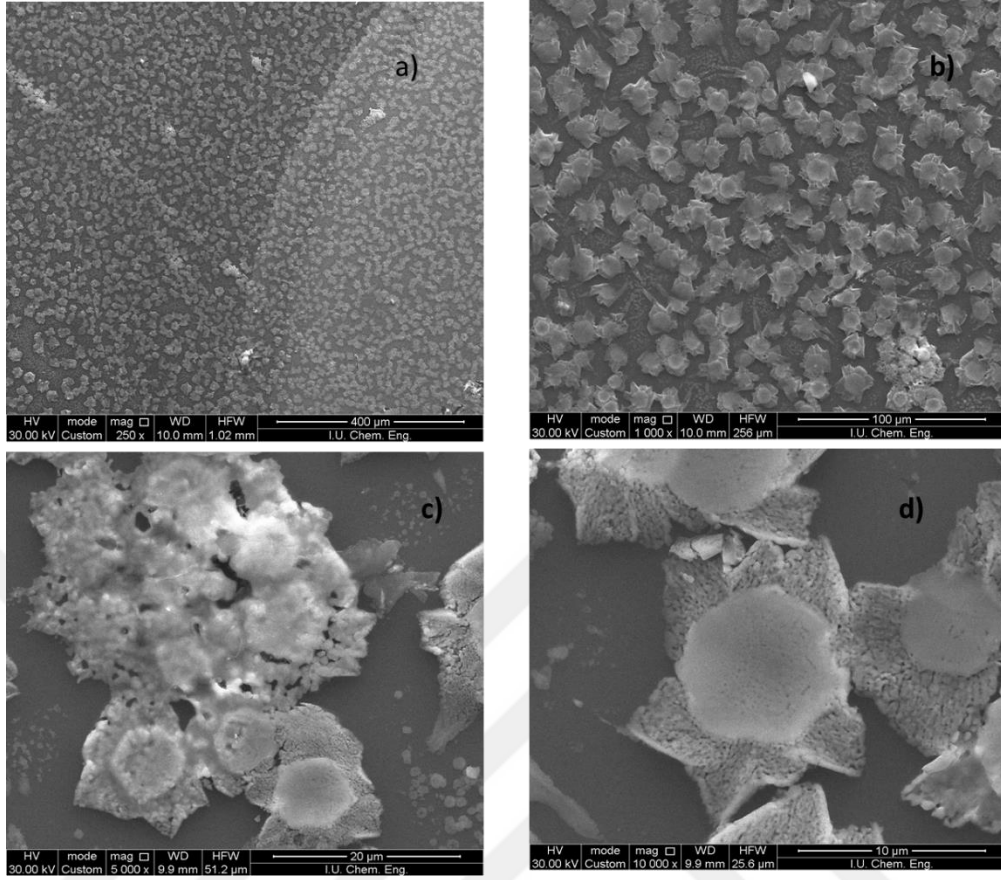
Bu deney grubunda elde edilen sonuçlar Tablo 4.5’de gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında verimlerin birbirine yakın olması fotovoltajik hücre yapısının tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.5: ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag Güneş Hücresi Akım-Voltaj Karakteristiğinin Tekrarlanabilirliğinin İncelenmesi.

Tekrar	NiO Yapısı	Perovskit	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η%
1	NiO (nitrat)	Ticari	467	1,96	0,33	0,30
2	NiO (nitrat)	Ticari	233	3,93	0,36	0,33

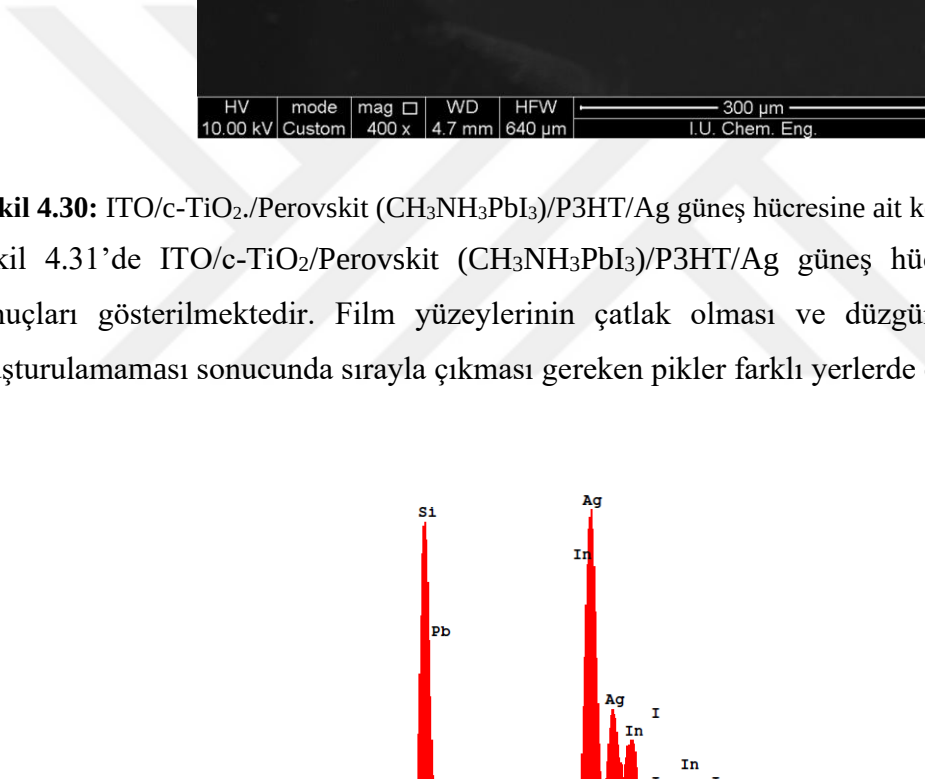
4.5.8. ITO/c-TiO₂/ Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) /P3HT/Ag Güneş Hücresinin SEM Analiz Sonuçları

Şekil 4.29’da TiO₂ ince filminin üzerine kaplanmış olan perovskit filminin farklı büyütme ölçeklerine üstten çekilen SEM görüntüleri gösterilmektedir. Perovskit çekirdeklerinin homojen bir şekilde yüzeye kaplanamadığı ve 12 µm perovskit çekirdek çaplarının oluştuğu ölçülmüştür.

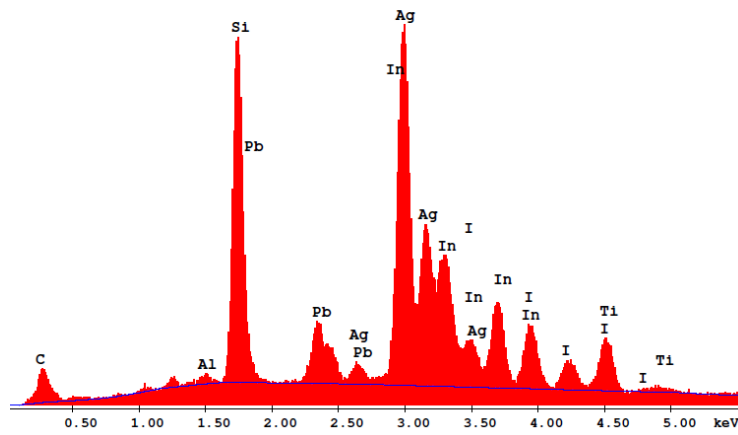


Şekil 4.29: Perovskit ince film örneğinin a)400µm,b)100 µm, c)20 µm, d)10 µm ait SEM görüntüsü.

Şekil 4.30’da ITO/c-TiO₂/ Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) /P3HT/Ag güneş hücresine ait kesit SEM görüntüsü gösterilmektedir. Toplam güneş hücresi film kalınlığı ~100 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.31’de ITO/c-TiO₂/Perovskit (CH₃NH₃PbI₃)/P3HT/Ag güneş hücresine ait EDAX sonuçları gösterilmektedir. Film yüzeylerinin çatlak olması ve düzgün film yapılarının oluşturulamaması sonucunda sırayla çıkması gereken pikler farklı yerlerde çıkmıştır.



Şekil 4.31: ITO/c-TiO₂/Perovskit (CH₃NH₃PbI₃)/P3HT/Ag güneş hücresine ait EDAX sonuçları

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında anorganik boşluklu perovskit güneş hücresi için elektron ve boşluk taşıyıcı ince film tabakaları sentezlenmiş ve dönerek kaplama metodu kullanılarak film yapıları elde edilmiştir.

Bölüm 4.1’de elektron taşıyıcı tabaka olarak kullanılacak TiO_2 için farklı başlangıç reaktifleri ve bağlayıcılar kullanılmasıyla ince filmlerin yüzey özelliklerinde farklılık yaratılmıştır. Gerçekleştirilen bu işlemlerin yüzey morfolojisine, ışık absorpsiyon özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.4’de farklı devir sayılarında ve farklı hazırlanan TiO_2 solünün ince film olarak kaplanması sonucunda oluşan yüzey görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.4.a ve b görüntülerinde bağlayıcı bulunmayan, asit katalizör yardımı ile elde edilen TiO_2 solünün farklı devir sayılarında kaplanmasına rağmen ITO üzerinde çatlakların olmadığı homojen bir yapı meydana getirilemediği görülmektedir. Ayrıca düşük devirlerde çatlak yapısının daha parçalı olduğu görülmektedir. Şekil 4.4.c’de PEG 1000 ilave yapılan TiO_2 solünün yüzey görüntüsü gösterilmektedir ve bu tür kaplama da PEG kaynaklı olduğu düşünülen tek parçalı çatlak yapısı olduğu görülmektedir. Şekil 4.4.d’de asit katalizör ve asetil asetonun bağlayıcı özelliği kullanılarak sentezlenen TiO_2 solünün yüzey görüntüsü gösterilmektedir. Fakat bu yöntemle sentezlenen TiO_2 ince filmi Şekil 4.4.b’de gösterilen yapıyla benzer olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu tür fotovoltaiik hücrelerde elektron taşıyıcı tabaka, homojen film olarak elde edilememiş ve akım gerilim ölçümünde kısa devre olayı meydana gelmiştir. Bu durumun giderilmesi için P127 polimeri veya asetil aseton bağlayıcı olarak kullanılarak farklı kaplama sayılarında denenmiş ve TiO_2 solünün ITO üzerinde homojen dağılım gösteren mümkün olduğunca az çatlakların olduğu ince filmler elde edilmiştir. Şekil 4.5’de gösterilen yüzey filmleri incelendiğinde P127 ve $1*0,15 \text{ M}+2*0,30 \text{ M}$ temelli sentezlenen TiO_2 ince filmlerinin daha iyi bir film yapısı oluşturduğu, $1*0,15 \text{ M}+1*0,30 \text{ M}$. ve $2*0,15 \text{ M}+1*0,30 \text{ M}$ temelli sentezlenen TiO_2 ince filmlerinin yüzeylerinde pürüzlülükler görülmektedir. Bu pürüzlü yapılar kontrast farkından ya da ani buharlaşma ile olduğu düşünülmektedir. Sol-jel yöntemi ile sentezlenen TiO_2 ince filmleri için, kimyasal öncüler, kalsinasyon süresi ve sıcaklığı, ortam koşulları, kaplama yöntemi ve sayısı gibi deneysel parametreler yüzey morfolojisini etkilediği anlaşılmaktadır. Şekil 4.1’de farklı başlangıç malzemeleriyle sentezlenmiş TiO_2 ince filmlerine ait absorbans grafiği gösterilmektedir. Sentezlenen TiO_2 ince filmlerinin hepsinin 200-500 nm arasında absorbans gösterdiği görülmektedir. P127 ve $1*0,15 \text{ M}+2*0,30 \text{ M}$ temelli sentezlenen

TiO₂ ince filmlerini 460 nm'ye kadar absorbands gösterirken 2*0,15 M+1*0,30 M ve 1*0,15 M+1*0,30 M ince filmleri 550 nm'ye kadar absorbands göstermiştir. Oku ve diğ. (2015) yaptıkları çalışma ile karşılaştırıldığında TiO₂ ince filmlerinin benzer değerde absorbands gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.2'de mezopor yapıli TiO₂ için sentezlenen 3 farklı pastanın UV-Vis sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki grafiklere bakıldığında mezopor yapıli TiO₂'in 200-800 nm arasında absorbe edilen ışın miktarının kompakt yapıli TiO₂'e göre artığını bunun da güneş hücresi içinde verimi artıracağı düşünülmektedir. Şekil 4.2 kendi içinde incelenirse sentezlenen mezopor yapılardan ticari TiO₂ pastasının daha iyi absorbands görülmektedir. Nedeninin daha iyi homojen yüzey filminin elde edilmesi ve TiO₂ kristallerinin daha küçük olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Adams ve diğ. (2015) çalışmalarında ticari ve asidik yöntemle sentezlenen TiO₂'leri karşılaştırmış ve ticari TiO₂ daha iyi fotovoltaiik etki gösterdiğini bulmuşlardır. Bu neden ile bu tez kapsamında ticari olan TiO₂ pastası kullanılmıştır. Şekil 4.3'de TiO₂ ince filminin X ışını kırılım diyagramı gösterilmektedir. Sakatani ve diğ.(2016) sentezledikleri TiO₂ ile tez kapsamında yapılan TiO₂ ince filmini benzer X ışının diyagramı vermiştir. Oluşan kristal yapısı anataz olarak belirlenmiştir. Perovskit güneş hücrelerinde genellikle anataz yapı kullanılmaktadır. Rutil yapı güneş ışığının %4'lük bir kısmını soğurmakta ve bu soğurma sonucunda güçlü bir yükseltgen haline geçmektedir. Güçlü yükseltgen yapı istenmeyen reaksiyonlara sebep olarak güneş hücresinin kararlılığını azaltmaktadır.

Güneş hücrelerinde film kalınlıkları önem arz etmektedir. Bu nedenle kaplanan film kalınlıkları denklem 5.1'de gösterilen şekilde hesaplamıştır. D =film kalınlığını, $M_{son}-M_{ilk}$ =kaplanan film ağırlığı, S =kaplama alanı, ρ = yoğunluğu temsil etmektedir.

$$d = \frac{M_{son}-M_{ilk}}{S*\rho} \quad \text{Denklem (5.1)}$$

P127 ve 1*0,15 M+2*0,30 M temelli sentezlenen TiO₂ ince filmleri 1,5µm, 1,4µm olarak kaplanan mezopor film kalınlığı 8,3µm olarak hesaplanılmıştır.

Bölüm 4.2'de ışığın absorblanmasının sağlayarak boşluk ve elektron üretimini gerçekleştiren perovskit ince filmi incelenmiş ve yapı doğrulanması yapılmıştır. Perovskit sentezi için ilk olarak laboratuvarda metil amonyum iyodür sentezi ve ticari olarak satın alınımı

gerçekleştirilmiştir. Jeon ve diğ. (2014) çalışmalarında sentezlenen metil amonyum iyodür ve Park ve diğ. (2017) referans alınarak sentezlenen perovskitin X ışını kırılım diyagramları Şekil 4.6'da ve Şekil 4.7'de gösterilmekte ve literatürde bulunan pik yapısına uygun pikler görülmektedir. Şekil 4.8'de sentezlenen perovskitin UV-Vis analiz sonucu gösterilmektedir. Sentezlenen perovskit ile Li ve diğ. (2014) sentezledikleri perovskit sonuçları karşılaştırıldığında 200-800 nm dalga boylarında benzer bir absorpsiyon verdiği görülmüştür. Absorpsiyon değerlerinin yüksek olması kaplanan perovskit filminin kalın olmasından kaynaklanmaktadır. Artan perovskit film kalınlığı ile absorblanan ışık yoğunluğu artırmakta, elektron taşıyıcı tabaka ve boşluk taşıyıcı tabaka arasındaki doğrudan teması azalmaktadır. Şekil 4.9'da sentezlenen perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) ait FTIR gösterilmektedir. Shit ve diğ. (2015) çalışmalarında gözledikleri bağ yapıları sentezlenen perovskit yapısında görülmektedir. 3088 cm^{-1} de gözlenen geniş pik hidrojen bağı N-H gerilme titreşimine aittir. 2920 cm^{-1} de gözlenen C-H gerilmesi, 1657 cm^{-1} de gözlenen N-H gerilmesi, 1387 cm^{-1} de gözlenen C-H gerilmesi, 1255 cm^{-1} de gözlenen C-N gerilmesi görülmektedir.

Bölüm 4.3'te boşluk taşıyıcı tabaka olarak kullanılacak anorganik kökenli olan NiO sentezi, yapı özellikleri ve doğrulanması yapılmıştır. NiO sentezinde 3 farklı başlangıç reaktifi kullanılmış ve bunun NiO partikül boyutuna dolayısıyla fotovoltaiik hücre verimine etkisine bakılmıştır. Her 3 farklı başlangıç reaktifi ile sentezlenen NiO'lerin X ışını kırılım diyagramı Şekil 4.10'da gösterildiği gibi Zhang ve diğ (2016), Sookman ve diğ. (2006), Thota ve diğ (2007) çalışmalarında belirtilen kübik kristal yapısı oluşturduğu görülmüş ve yapıların doğruluğu kanıtlanmıştır. Şekil 4.11'de gösterilen UV-Vis analiz sonuçları gösterilmektedir. Boşluk taşıyıcı tabakaların geçirgenliği önemli faktördür, çünkü perovskitin absorbe edeceği ışının geçirmesi gerekmektedir. Şekil 4.11'de gösterilen NiO ince filmlerin geçirgenliğine bakıldığında 300-800 nm arasında nitrat kökenli ve asetat kökenli NiO ince filmlerinin % 90'lara ulaşan bir geçirgenlik değeri olduğu, 300-800 nm aralığında klorür kökenli NiO ince filmlerinin % 60'lara ulaşan bir geçirgenlik değeri olduğu görülmektedir. Her üç NiO içinde 450 nm bir pik görülmektedir. Malandrino ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada bu durumu NiO'nun kaya tuzu yapısında altı-kat oktahedral koordinasyona sahip olması nedeniyle, 450 nm'deki absorpsiyonun, temel durumundan uyarılmış duruma geçiş ile ilişkili olabileceği şeklinde açıklamışlardır. Şekil 4.10'a görülen X ışının kırılım diyagramında ki pik yapılarında bizim sentezlediğimiz NiO'lerin altı-kat oktahedral koordinasyona sahip olduğunu görüldüğü için buldukları veriler ile tezimiz desteklenmektedir. Şekil 4.12'de üç farklı başlangıç reaktifi

ile sentezlenen NiO'nin FTIR sonuçları gösterilmektedir. Üç farklı başlangıç reaktifi ile sentezlenen NiO içinde Zhang ve diğ. (2016), Sookman ve diğ. (2006), Thota ve diğ. (2007) çalışmalarında belirtilen dalga boylarında Ni-O, NiO-H bağları olduğu görülmüştür. NiO sentezi için literatür çalışmalarında nikelin tuzları ya da nikelin alkoksitlerinin organik bileşikleri (Ni(OR)_2)_n) kullanılmaktadır, bu tez çalışmasında NiO sentezi için nikelin tuzları ve nikelin alkoksitlerinin organik bileşiği ile NiO sentezlenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Nikel tuzlarının başlangıç reaktifi olarak seçilme nedeni, organik kökenlilere göre yüksek kullanılabilirliğe, su, alkol ve diollerde kolay çözünmesi ve daha düşük maliyetli olmasıdır. Nikel alkoksitlerinin organik bileşiğinin başlangıç reaktifi olarak seçilme nedeni olarak metal tuzlarına göre daha düzenli partikül boyutları elde edilmesi ve daha düşük sıcaklıklarda organik yapıların uzaklaştırılabilmesidir. Nikel tuzlarından $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve $(\text{Ni(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ tercih edilirken, nikelin alkoksit organik bileşiği olarak $\text{Ni(CH}_3\text{COO)}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tercih edilmiştir. Şekil 4.13'de gösterilen nikel nitrattan hazırlanan NiO partikül boyutları ortalama ~70nm, Şekil 4.14'de gösterilen nikel klorürden hazırlanan NiO partikül boyutları ortalama~120 nm, Şekil 4.15'de gösterilen nikel asetatdan hazırlanan NiO partikül boyutları ortalama~100 nm olarak hesaplanmıştır., Partikül boyutu sonuçlarına göre üç farklı NiO'nin ortalama ~96 nm partiküllere sahip olduğu fakat kendi içlerinde partikül boyut sıralaması NiO (klorür)> NiO(asetat)> NiO(nitrat) şeklinde olmuştur. Sentezlenen NiO partiküllerinin nikel nitrat temelli NiO partikül boyutlarının diğerlerinden daha düşük olmasının nedeni nitratların suda çözünürlüğünün iyi olmasıdır. NiO partikül boyutlarının büyümesi çözücü içinde dispersiyon sorununu meydana getirmiş ve ince film oluşumu kötü olarak etkilemektedir. Partikül boyutunun en yüksek olduğu NiO(klorür)'den kullanılarak yapılan fotovoltaiik pillerden akım gerilim grafiği elde edilememiştir.

Bölüm 4.5.1'de düzlemsel yapıda kompakt yapılı farklı TiO_2 ince filmleri ile ITO/c- TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /P3HT/Ag yapısında fotovoltaiik piller oluşturulmuştur ve farklı TiO_2 'lerin fotovoltaiik pil verimine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.17'de bu deney grubunda en yüksek verimi %0,03 gösteren $\text{Voc}=267 \text{ mV}$, $\text{Jsc}=0,38$, $\text{FF}=0,27$ $1 \times 0,15 + 2 \times 0,30 \text{ M TiO}_2$ ile elde edilmiştir Şekil 4.18'de gösterilen P127 temelli TiO_2 ince filmi ile yapılan fotovoltaiik hücrede verim %0,01, $\text{Voc}=267 \text{ mV}$, $\text{Jsc}=0,10$, $\text{FF}=0,20$ olarak elde edilmiştir. Tablo 4.1'de kompakt yapılı farklı TiO_2 ince filmleri ile ITO/c- TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /P3HT/Ag yapısında fotovoltaiik pillerin karşılaştırılması verilmiştir. P127'li fotovoltaiik hücresi veriminin $1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M TiO}_2$ ile yapılan fotovoltaiik hücresi veriminden düşük olmasının nedeni olarak, P127'li TiO_2 ince

filminde tek bir defa kaplama işlemi gerçekleştirilirken, $1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M}$ TiO_2 birden fazla kaplama işlemi yapılarak ITO'nun diğer tabakalar ile kontağının daha aza indirilmiş olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 4.5'de gösterilen ince film yüzeylerinde $1 \times 0,15 + 2 \times 0,30 \text{ M}$ TiO_2 ince filminin P127'e göre daha homojen olduğu gözükmemektedir. Literatür sonuçları ile karşılaştırıldığında elde edilen veriler düşük olarak elde edilmiştir. Liu ve diğ.(2016) çalışmalarına göre kompakt yapılı TiO_2 filmi 50-100 nm kalınlığında olması gerekmektedir. Fakat bu tez kapsamında sentezlenen P127 ve $1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M}$ temelli sentezlenen TiO_2 ince filmleri $1,5 \mu\text{m}$, $1,4 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Verim düşüklüğü olarak literatüre göre kalın kaplanmış olan TiO_2 filmleri olduğu düşünülmektedir.

Bölüm 4.5.2'de farklı kompakt TiO_2 ince filmleri ile mezopor yapılı ITO/c- TiO_2 /m- TiO_2 /CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag fotovoltaiik piller oluşturulmuştur ve mezopor yapının fotovoltaiik pil verimine etkisi incelenmiştir. Mezopor TiO_2 pastasının kullanılması ile kompakt yapıda olan her iki TiO_2 'li fotovoltaiik pillerinde verim artışı ve akım yoğunluğu artışı görülmüştür. Bölüm 4.2'de sentezlenen mezopor yapılı TiO_2 ile güneş hücresi üzerinde verim artışı olacağı düşüncesi kanıtlanmış olmaktadır. Şekil 4.19'da bu deney grubunda en iyi verimi veren ITO/($1 \times 0,15 \text{ M} + 2 \times 0,30 \text{ M}$) TiO_2 /m- TiO_2 /CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag gösterilmektedir. Bu hücre için verim=%0,08, Voc=367 mV, Jsc=0,73 mA/cm², FF=0,28 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.20'de ITO/(P127) TiO_2 /m- TiO_2 /CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag gösterilmektedir. P127'li fotovoltaiik hücrenin verimi %0,03, Voc=267 mV, Jsc=0,41 mA/cm², FF=0,27 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.2'de mezopor yapılı farklı TiO_2 ince filmleri ile ITO/c- TiO_2 /m- TiO_2 /CH₃NH₃PbI₃/P3HT/Ag yapısında fotovoltaiik pillerin karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 karşılaştırılrsa düzlemsel yapılı ve mezopor yapılı fotovoltaiik hücrelerin arasında verim artışı nedeni olarak kompakt TiO_2 ince filmi ile perovskitin sınırlı olan temas alanının artması, kompakt yapıda oluşmuş olan elektronik bozukluğun azaltılmasıyla perovskitte oluşan elektronların taşımını etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca TiO_2 nanopartiküllerinden oluşan mezopor pastanın, perovskit kristallerinin kontrollü büyümesine yardımcı olduğunu ve perovskit kristalleri ile dolu olan gözeneklerin oluşan yüklerin difüzyon uzunluğu dahilinde kısa bir mesafede etkili yük toplamada yardımcı olduğu düşünülmektedir. Fakat literatürde yapılan çalışmalara göre bulunan verimlerin düşük olmasının nedeni olarak kaplanan TiO_2 filmlerinin kalın olmasından kaynaklığı düşünülmektedir. Liu ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada artan TiO_2 film kalınlığının elektron difüzyon uzunluğunu ve rekombinasyon ömrünü kuvvetle etkilediğini ve

bunun da fotovoltaik hücreyi önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır. Denklem 5.1'e göre hesaplandığında TiO_2 mezopor yapının film kalınlığı $8,3\mu\text{m}$ olarak hesaplanmış bu da hücre içinde elektron difüzyon uzunluğunu artırmıştır ve rekombinasyon daha hızlı gerçekleşmiştir.

Bölüm 4.5.3'de perovskitin farklı çözücü ortamında hazırlanmasının fotovoltaik pilin verimi incelenmiştir. DMF içinde hazırlanan perovskiti göre DMF+DMSO ile hazırlanan perovskitin güneş hücrelerinde her iki TiO_2 ince filmi ile oluşturulmuş fotovoltaik hücrelerde verim artışı görülmüştür. Şekil 4.21'de bu deney grubunda en iyi verimi veren $\text{ITO}/(1*0,15 \text{ M}+2*0,30 \text{ M})\text{TiO}_2/\text{m-TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{P3HT}/\text{Ag}$ gösterilmektedir. Bu fotovoltaik hücre için verim %0,17, $V_{oc}=434 \text{ mV}$, $J_{sc}=1,30 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0,30$ olarak bulunmuştur. Şekil 4.22'de $\text{ITO}/(\text{P127})\text{TiO}_2/\text{m-TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{P3HT}/\text{Ag}$ fotovoltaik hücresi gösterilmektedir. Bu fotovoltaik hücre için verim %0,10, $V_{oc}=167 \text{ mV}$, $J_{sc}=3,08 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0,23$ olarak bulunmuştur Tablo 4.3'te DMSO kullanımının $\text{ITO}/\text{c-TiO}_2/\text{m-TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{P3HT}/\text{Ag}$ yapısında fotovoltaik pillerinde etkisinin karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 4.2 ve Tablo 4.3 karşılaştırılırsa, DMSO'nun belli bir oranda DMF içinde kullanılarak hazırlanan perovskitte ki verim artışı PbI_2 'ün literatüre göre çözünürlüğünün $\text{DMSO}>\text{DMF}>\text{GBL}$ şeklinde olması nedeni ile olduğu düşünülmektedir. DMSO'nun DMF göre PbI_2 ile daha iyi bir koordinasyon yeteneğine sahip olması perovskit ince filmi oluşturulurken PbI_2 kristal büyümesini geciktirir ve oluşturulan perovskit ince filmlerini yüzey pürüzlüğünün azalması, daha homojen bir yüzey kaplaması ve iğne delikleri denilen yapı bozukluklarının gideriminde faydalı olduğu düşünülmektedir. Wu ve diğ. (2014) çalışmalarında DMSO ve DMF le hazırlanan perovskit filmlerini incelemişler ve DMSO ile hazırlanan perovskit filmlerinin SEM görüntülerinde daha iyi homojen bir film yapısını, XRD sonuçlarına göre de daha düzgün perovskit kristallerinin oluştuğunu $2\theta=14,01^\circ$ 'de görülen PbI_2 (001) kristal pikinin görülmediği bulmuşlardır. Wu ve diğ. (2014) çalışma sonucu verileri ile sonuçlarımız desteklenmektedir.

Bölüm 4.5.4'de sentezlenen anorganik temelli boşluk taşıyıcı tabakaların fotovoltaik pilin verimi incelenmiştir. Yukarıda gerçekleştirilen deneylerden her koşulda daha iyi sonucu verdiği için $1*0,15 \text{ M}+2*0,30 \text{ M}$ TiO_2 ince filmleri bundan sonra ki deneylerde kullanılmıştır. Bu deney grubunda $\text{ITO}/(1*0,15 \text{ M}+2*0,30 \text{ M})\text{TiO}_2/\text{m-TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{NiO}/\text{Ag}$ fotovoltaik hücreleri hazırlanmıştır.

Şekil 4.23'de $\text{ITO}/(1*0,15 \text{ M}+2*0,30 \text{ M})\text{TiO}_2/\text{m-TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{NiO}(\text{nitrat})/\text{Ag}$ akım voltaj grafiği gösterilmektedir.

ITO/(1*0,15 M+2*0,30 M)TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO(nitrat)/Ag fotovoltaik hücresi için verimi %0,64, Voc=434 mV, Jsc=5,90 mA/cm², FF=0,25 olarak bulunmuştur. Şekil 4.24'te ITO/(1*0,15 M+2*0,30 M)TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO(nitrat)/Ag akım voltaj grafiği gösterilmektedir. ITO/(1*0,15M+2*0,30M)TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO(asetat)/Ag

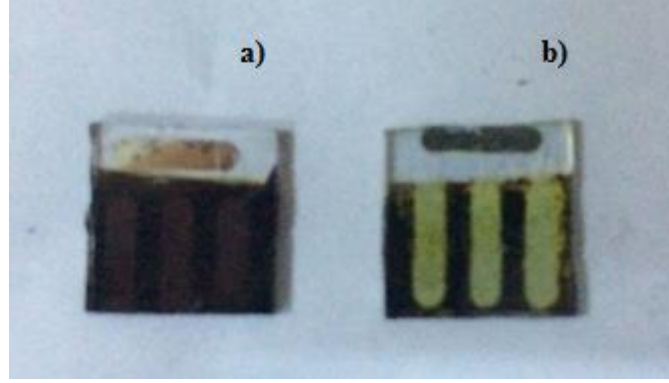
fotovoltaik hücresi için %0,52, Voc=333 mV, Jsc=5,20 mA/cm² FF=0,30 olarak bulunmuştur Tablo 4.4'te ITO/(1*0,15M+2*0,30M)TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Ag fotovoltaik hücrelerinin karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 4.4. incelendiğinde NiO'lerin fotovoltaik hücre verimleri partikül boyutunun küçüldükçe artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar ile literatürde gerçekleştirilen çalışmalar karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak NiO sentezi için kullanılan sol jel yöntemi ile düşük boyutlarda sentezlenememesi, yüksek partikül boyutunun çözelti içinde dispersiyon sorununu ortaya çıkarması ve bunun sonucunda ince film kaplanmasının zorlaşması ve perovskitte oluşan boşlukların metal kontağa taşınımı zorlaştırmasında kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaplanan NiO(nitrat) ince filmi ve NiO(asetat) ince filmi için denklem 5.1'e göre film kalınlıkları 132 nm ve 138 nm olarak hesaplanmıştır. Tang ve diğ. (2018) yaptıkları çalışma sonucunda NiO film kalınlığının artmasının fotovoltaik hücre performansını kötü olarak etkilediğini, artan film kalınlığı ile boşlukların taşınma hızının, sarj rekombinasyonun değişeceğini bulmuşlardır. Literatürde Tang ve diğ. (2018) yaptığı çalışma bulgularımızı desteklemektedir. NiO(klorür) temelli yapıdan akım gerilim grafikleri elde edilememiştir. Bunun nedeni olarak partikül boyutunun çok büyük olması, ince film yapısının elde edilememesine, yüzey pürüzlülüğü artırılarak metal kontak ile bağlantı sorunu yaşatmasıdır. Çalışma kapsamında P3HT kaplanarak elde edilen güneş hücreleri ile NiO kaplanarak elde edilen güneş hücrelerinin karşılaştırdığımızda NiO'li güneş pillerinin performans karakteristiğinin daha iyi bulmaktayız. Bunun nedenlerinden biri NiO boşluk taşıma kapasitesinin, P3HT'ye göre daha yüksek olması diğeri NiO kaplanması sırasında kullanılan tolüenin perovskit üzerinde rekristalizasyon yaparak perovskit kristallerinin tekrar düzenlemesidir.

Ayrıca bu deney grubunda ticari satın alınması yapılan MAI ile laboratuvar şartlarında sentezlenen MAI'ün fotovoltaik hücrede verim etkisine bakılmıştır. Şekil 4.25'te ITO/(1*0,15M+2*0,30M)TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO(nitrat)/Ag akım voltaj grafiği gösterilmektedir. Bu karşılaştırmada ticari satın alınımı yapılan MAI ile sentezlenerek elde edilen perovskit güneş hücresinin verimi %0,64, laboratuvar şartlarında sentezlenen MAI ile

yapılan perovskit güneş hücresinden verim %0,23, $V_{oc}=233$ mV, $J_{sc}=3,80$ mA/cm², FF=0,27 olarak bulunmuştur. Ojanperä ve A. M. M. (2015) çalışmalarında bahsedilen. perovskit çalışma performansında etkili olan ham maddelerin safsızlığı durumu bulunan sonuçlar ile desteklenmektedir. Çünkü laboratuvarında sentezlenen MAI safsızlıkların var olduğu düşünülmekte bu da perovskit kristal yapılarını etkileyerek, verim düşüklüğüne neden olmaktadır.

Bölüm 4.5.5’de organik temelli boşluk taşıyıcı tabaka olarak spiro-OMETAD kullanılarak fotovoltaiik pilinin verimi incelenmiştir. Şekil 4.26’da gösterilen spiro-OMETAD kullanılarak yapılan fotovoltaiik pilinin verimi %0,11, $V_{oc}=233$ mV, $J_{sc}=1,28$ mA/cm², FF=0,37 olarak bulunulmuştur. Literatürde yer alan çalışmalardan daha düşük verimler elde edilmesinin sebeplerinden biri spiro-OMETAD çözelti hazırlanılmasının hava ortamında gerçekleşmesi, ince film olarak kaplanması sonrası havaya maruz kalarak yapısının bozulmasına, ya da film yapısının düzgün oluşmaması sonucunda perovskitte oluşturulan boşlukların hepsinin metal kontağa ulaştırılamaması sonucunda verimin düşük olarak elde edildiği düşünülmektedir.

Ayrıca gerçekleştirilen bu deney sonucunda NiO kaplı güneş hücreleri ile spiro-OMETAD kaplı güneş hücrelerinin havaya maruz kaldığında NiO kaplı hücrelerin yapısal olarak daha kararlı olduğu gözlenmiştir Bunun nedeninin Spiro-OMETAD’nın asidik yapısı ve dopant malzeme olarak kullanılan Li tuzlarının perovskitin kararlılığını bozduğu düşünülmektedir. Sanchez ve diğ. (2016) yaptıkları çalışma sonucunda spiro-OMETAD’a eklenen dopant malzemelerin film yüzeylerinde iğne delikleri denilen yapıları oluşturduğu, oluşan yapıların spiro-MeOTAD boyunca perovskit tabakasına nem geçişini kolaylaştırdığını ve dolayısıyla bozunmaya sebep olduğunu ayrıca iğne delikleri sayesinde perovskitin bileşenlerinden iyodun üst yüzeye taşınmasını sağladığını ve perovskitin ayrışma göstererek bozulmasını kolaylaştırdığını bulmuşlardır. Literatürde bulunan veriler ile yaptığımız çalışma verileri desteklenmektedir. Şekil 5.1’de boşluk taşıyıcı tabaka olarak NiO ve spiro-OMETAD ile kaplanan güneş hücrelerinin kaplama işleminden 24 saat sonra durumu gösterilmektedir.



Şekil 5.1: a) NiO kaplı güneş hücresi, b) spiro-OMETAD kaplı güneş hücresinin kaplama işleminden 24 saat sonra durumu.

Bölüm 4.5.6’da tersine çevrilmiş yapıly ITO/NiO/perovskit/ZnO/Al fotovoltayk pilinin verimi incelenmiştir. Şekil 4.16’da tersine çevrilmiş yapı için elektron taşıyıcı tabaka olarak sentezlenen ZnO’e ait UV-Vis sonucu gösterilmektedir. Sun ve diğ. (2005) yaptıkları çalışma referans alınarak sentezlenen ZnO benzer absorbands piki verdiği görülmüştür. Boşluk taşıyıcı tabaka olarak NiO ince filminin oluşturulmasında dönerek kaplama metodu seçilmiş ve 10 defa kaplama yapılmıştır. Fakat tersine çevrilmiş düzlemsel yapıdan akım gerilim grafiğı kısa devre olarak elde edilmiştir. Bu durum NiO ince filminin ITO yüzeyine düzgün ve homojen şekilde kaplanmamasından kaynaklı olduğı ve NiO pürüzlü yapısı ile perovskitin pürüzlü yapısının uyumlu olmamasından kaynaklı düşünölmektedir. Akım gerilim grafiğın elde edilebilmesi için NiO’in kaplama sayısının artırılması, NiO kaplama çözeltisinin değıştirilmesi ya da film oluşumunun farklı yöntemler ile yapılması (darbeli lazer birleştirme, püskürtme, kimyasal buhar depolama vb.) elde edileceğı düşünölmektedir.

Bölüm 4.5.7’de en iyi performansı veren ITO/c-TiO₂/m-TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO(nitrat)/Ag yapıly fotovoltayk pilinin tekrarlanabilirliğine bakılmıştır. Akım-gerilim karakteristiğinin 1. tekrar sonucu Şekil 4.27’de gösterilmektedir. Bu fotovoltayk pil için $J_{SC}=1,96 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=467 \text{ mV}$, $\eta=\%0,30$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,33$ olarak hesaplanmıştır. Akım-gerilim karakteristiğinin 2. tekrar sonucu Şekil 4.28’de gösterilmektedir. Bu fotovoltayk pil için $J_{SC}=3,93 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC}=233 \text{ mV}$, $\eta=\%0,33$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,36$ olarak hesaplanmıştır. Tekrarlanabilirlik kendi içinde uyumlu olarak ifade edilebilirirken, ilk olarak elde edilen sonuçtan düşük olarak bulunmuştur. Bu verim düşüklüğünün nedeni olarak NiO’in partiköl boyutunun çözöcü içinde her zaman aynı şekilde dispers olamaması olarak düşünölmektedir.

Bölüm 4.5.8’de akım gerilim grafiği elde edilememiş fotovoltaiik hücrenin SEM görüntüleri verilmiştir. Akım gerilim grafiği elde edilemeyen ITO/c-TiO₂/Perovskit/P3HT/Ag fotovoltaiik hücresidir. Bu hücre yapısında akım gerilim grafiği elde edilememesinden temel üç nedeni var olduğu düşünülmektedir. Birincisi; TiO₂ ince film sentezidir. TiO₂ ince filmi, Bölüm 3.2.2’de anlatılan Şelçuk ve diğ.(2017) yaptıkları metot ile sentezlenmiş fakat Şekil 4.4.b gösterildiği gibi ITO üzerinde homojen bir yapı elde edilememiş ve filmde çatlaklar oluşmuştur. Oluşan film çatlaklarından dolayı üzerine kaplanan perovskit ile ITO arasında temas meydana gelerek fotovoltaiik hücrede akım gerilim grafiği kısa devre olarak elde edilmiştir.. Diğer sorun olan perovskit kaplanmasıdır. Perovskit çözeltisi bu hücre için DMF ile hazırlanmış ve tek kademe dönerek kaplama metodu ile kaplanmıştır Şekil 4.29’da gösterildiği gibi perovskit kristallerinin boyutlarının büyük olmasından dolayı yüzeye homojen kaplanamamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Üçüncü neden olarak ta Şekil 4.30’da gösterilen güneş hücresinin kesit görüntüsünden toplam film kalınlığının 100 µm gibi kalın olmasıdır. Ayrıca Şekil 4.31’de gösterilen EDAX grafiğinde de gösterildiği gibi film yüzeylerinin çatlak olması ve düzgün film yapılarının oluşturulamaması sonucunda sırayla çıkması gereken pikler farklı yerlerde çıkması güneş hücresinin kısa devre olayını desteklemektedir.

Tablo 5.1’de ve Tablo 5.2’de tez boyunca her farklı çalışmada en iyi sonuçların alındığı güneş hücrelerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo 5.1: 1*0,15M +2*0,30 M temelli sentezlenen TiO₂ güneş hücrelerini karşılaştırılması

No	Yapı	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
1	ITO/c-TiO ₂ /perovskit/P3HT/Ag	267	0,38	0,27	0,03
2	ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /perovskit/P3HT/Ag	367	0,73	0,28	0,08
3	ITO/cTiO ₂ /mTiO ₂ /perovskit _(DMF+DMSO) /P3HT/Ag	434	1,3	0,30	0,17
4	ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /perovskit/NiO(nitrat)/Ag	434	5,90	0,30	0,64
5	ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /perovskit/NiO(asetat)/Ag	333	5,20	0,30	0,52
6	ITO/cTiO ₂ /mTiO ₂ /perovskit(sntz)/NiO(nitrat)/Ag	233	3,80	0,27	0,23
7	ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /perovskit/NiO(klorür)/Ag	-	-	-	-
8	ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /perovskit/spiro/Ag	213	1,28	0,37	0,11
9	ITO/NiO/perovskit/ZnO/Al	-	-	-	-

Tablo 5.2: P127 temelli sentezlenen TiO₂ güneş hücrelerini karşılaştırılması

No	Yapı	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
1	ITO/c-TiO ₂ /perovskit/P3HT/Ag	267	0,10	0,20	0,01
2	ITO/c-TiO ₂ /m-TiO ₂ /perovskit/P3HT/Ag	267	0,41	0,27	0,03
3	ITO/cTiO ₂ /mTiO ₂ /perovskit _(DMF+DMSO) /P3HT/Ag	167	3,08	0,23	0,10

Her iki tabloda ki sonuçlara bakılacak olursa;özet olarak

- Mezopor yapılı güneş hücrelerinin, düzlemsel yapılı güneş hücrelerine göre Voc, Jsc, FF, η karakteristiğinin daha iyi olduğu
- Perovskit sentezinde DMF ve DMSO'in birlikte kullanılmasının sadece DMF ile sentezlenen perovskit güneş hücrelerine göre Voc, Jsc, FF, η karakteristiğinin daha iyi olduğu
- Anorganik kökenli boşluk taşıyıcılı güneş hücrelerinin, organik kökenli boşluk taşıyıcılı güneş hücrelerine göre Voc, Jsc, FF, η karakteristiğinin daha iyi olduğu
- Artan NiO partikül boyutunun güneş hücresinin Voc, Jsc, FF, η karakteristiğinin kötü yönde etkilediği düşünülmektedir.

Bu tez kapsamına sonuç olarak bakıldığında anorganik boşluk taşıyıcı perovskit tipi güneş hücreleri sentezlenmiş ve en yüksek verim olarak %0,64, Voc=434 mV, Jsc=5,90 mA/cm² FF=0,30 olarak bulunmuştur. Gelecek çalışmalarda verim artışı için, kompakt mezopor TiO₂ filminin kalınlığının nm düzeyine indirgenmesinin, perovskit kaplama metodunun değiştirilmesi, perovskit sentezinde kullanılan çözücü miktarlarının değiştirilmesi ve NiO partikül boyutlarının düşük olarak sentezlenmesinin veya NiO ince filminin farklı yöntemlerle kaplanmasının güneş hücreleri için gelecek çalışmalarda performans karakterlerini artıracığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ardağ, Y. (2012). Güneş pili karakteristiklerinin incelenmesi (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Adam, G., Kaltenbrunner, M., Głowacki, E. D., Apaydin, D. H., White, M. S., Heilbrunner, H., ... & Sariciftci, N. S. (2016). Solution processed perovskite solar cells using highly conductive PEDOT: PSS interfacial layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 318-325.
- Adams, A. M., Marin-Beloqui, J. M., Stoica, G., & Palomares, E. (2015). The influence of the mesoporous TiO₂ scaffold on the performance of methyl ammonium lead iodide (MAPI) perovskite solar cells: charge injection, charge recombination and solar cell efficiency relationship. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(44), 22154-22161.
- Burschka, J., Pellet, N., Moon, S. J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M. K., & Grätzel, M. (2013). Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature*, 499(7458), 316.
- Bi, D., Moon, S. J., Häggman, L., Boschloo, G., Yang, L., Johansson, E. M., ... & Hagfeldt, A. (2013). Using a two-step deposition technique to prepare perovskite (CH₃NH₃PbI₃) for thin film solar cells based on ZrO₂ and TiO₂ mesostructures. *Rsc Advances*, 3(41), 18762-18766.
- Casaluci, S., Cinà, L., Pockett, A., Kubiak, P. S., Niemann, R. G., Reale, A., ... & Cameron, P. J. (2015). A simple approach for the fabrication of perovskite solar cells in air. *Journal of Power Sources*, 297, 504-510.
- Chen, Q., Zhou, H., Hong, Z., Luo, S., Duan, H. S., Wang, H. H., ... & Yang, Y. (2013). Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process. *Journal of the American Chemical Society*, 136(2), 622-625.
- Chen, L. C., Hsu, C. H., Chan, P. S., Zhang, X., & Huang, C. J. (2014). Improving the performance of dye-sensitized solar cells with TiO₂/graphene/TiO₂ sandwich structure. *Nanoscale research letters*, 9(1), 380.
- Diebold, U. (2003). The surface science of titanium dioxide. *Surface science reports*, 48(5-8), 53-229.
- Docampo, P., Guldin, S., Leijtens, T., Noel, N. K., Steiner, U., & Snaith, H. J. (2014). Lessons learned: from dye-sensitized solar cells to all-solid-state hybrid devices. *Advanced Materials*, 26(24), 4013-4030.
- Fahrenbruch, A., & Bube, R. (2012). *Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion*. Elsevier.
- Fan, X., Zhang, M., Wang, X., Yang, F., & Meng, X. (2013). Recent progress in organic-inorganic hybrid solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(31), 8694-8709.

- Fei, C., Guo, L., Li, B., Zhang, R., Fu, H., Tian, J., & Cao, G. (2016). Controlled growth of textured perovskite films towards high performance solar cells. *Nano Energy*, 27, 17-26.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (version 46). *Progress in Photovoltaics*, 23(7), 805-812.
- Guo, X., & Burda, C. (2016). Coordination engineering toward high performance organic–inorganic hybrid perovskites. *Coordination Chemistry Reviews*, 320, 53-65.
- Guo, Y., Liu, C., Inoue, K., Harano, K., Tanaka, H., & Nakamura, E. (2014). Enhancement in the efficiency of an organic–inorganic hybrid solar cell with a doped P3HT boşluke-transporting layer on a void-free perovskite active layer. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(34), 13827-13830.
- Guo, X., McCleese, C., Kolodziej, C., Samia, A. C., Zhao, Y., & Burda, C. (2016). Identification and characterization of the intermediate phase in hybrid organic–inorganic MAPbI₃ perovskite. *Dalton Transactions*, 45(9), 3806-3813.
- Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., & Pettersson, H. (2010). Dye-sensitized solar cells. *Chemical reviews*, 110(11), 6595-6663.
- Habibi, M., Zabihi, F., Ahmadian-Yazdi, M. R., & Eslamian, M. (2016). Progress in emerging solution-processed thin film solar cells–Part II: Perovskite Solar Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1012-1031.
- Hawash, Z., Ono, L. K., Raga, S. R., Lee, M. V., & Qi, Y. (2015). Air-exposure induced dopant redistribution and energy level shifts in spin-coated spiro-MeOTAD films. *Chemistry of Materials*, 27(2), 562-569.
- Heikkilä, N. (2017). Influence of Ambient Working Conditions on the Performance of Planar and Mesoscopic Perovskite Solar Cell Architectures.
- Hu, H., Wang, D., Zhou, Y., Zhang, J., Lv, S., Pang, S., ... & Cui, G. (2014). Vapour-based processing of boşluke-conductor-free CH₃NH₃PbI₃ perovskite/C₆₀ fullerene planar solar cells. *RSC Advances*, 4(55), 28964-28967.
- Huang, F., Dkhissi, Y., Huang, W., Xiao, M., Benesperi, I., Rubanov, S., ... & Gray-Weale, A. (2014). Gas-assisted preparation of lead iodide perovskite films consisting of a monolayer of single crystalline grains for high efficiency planar solar cells. *Nano Energy*, 10, 10-18.
- Im, J. H., Lee, C. R., Lee, J. W., Park, S. W., & Park, N. G. (2011). 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell. *Nanoscale*, 3(10), 4088-4093.
- Kazim, S., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M., & Ahmad, S. (2014). Perovskite as light harvester: a game changer in photovoltaics. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(11), 2812-2824.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050-6051.

- Kim, H. S., Lee, C. R., Im, J. H., Lee, K. B., Moehl, T., Marchioro, A., ... & Grätzel, M. (2012). Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Scientific reports*, 2, 591.
- Liu, H., Huang, Z., Wei, S., Zheng, L., Xiao, L., & Gong, Q. (2016). Nano-structured electron transporting materials for perovskite solar cells. *Nanoscale*, 8(12), 6209-6221.
- Li, W., Wu, Z., Wang, J., Elzatahry, A. A., & Zhao, D. (2013). A perspective on mesoporous TiO₂ materials. *Chemistry of Materials*, 26(1), 287-298.
- Liu, D., & Kelly, T. L. (2014). Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques. *Nature photonics*, 8(2), 133.
- Liu, M., Johnston, M. B., & Snaith, H. J. (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 501(7467), 395.
- Li, H., Li, S., Wang, Y., Sarvari, H., Zhang, P., Wang, M., & Chen, Z. (2016). A modified sequential deposition method for fabrication of perovskite solar cells. *Solar Energy*, 126, 243-251.
- Li, N., Dong, H., Dong, H., Li, J., Li, W., Niu, G., ... & Wang, L. (2014). Multifunctional perovskite capping layers in hybrid solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(36), 14973-14978.
- Liu, D., Gangishetty, M. K., & Kelly, T. L. (2014). Effect of CH₃NH₃PbI₃ thickness on device efficiency in planar heterojunction perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(46), 19873-19881.
- Liu, M., Johnston, M. B., & Snaith, H. J. (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 501(7467), 395.
- Malandrino, G., Perdicaro, L. M., Condorelli, G., Fragala, I. L., Rossi, P., & Dapporto, P. (2006). Synthesis, characterization and application of Ni(tta)₂·tmeda to MOCVD of nickel oxide thin films. *Dalton Transactions*, (8), 1101-1106.
- Mo, S. D., & Ching, W. Y. (1995). Electronic and optical properties of three phases of titanium dioxide: Rutile, anatase, and brookite. *Physical Review B*, 51(19), 13023.
- Ng, A., Ren, Z., Shen, Q., Cheung, S. H., Gokkaya, H. C., Bai, G., ... & Leung, W. W. F. (2015). Efficiency enhancement by defect engineering in perovskite photovoltaic cells prepared using evaporated PbI₂/CH₃NH₃I multilayers. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(17), 9223-9231.
- Nagarjuna, P., Kumar, P. N., Singh, S. P., Deepa, M., & Namboothiry, M. A. (2014). Efficient organic-inorganic hybrid perovskite solar cells processed in air. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(45), 24691-24696.
- Niu, G., Guo, X., & Wang, L. (2015). Review of recent progress in chemical stability of perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(17), 8970-8980.

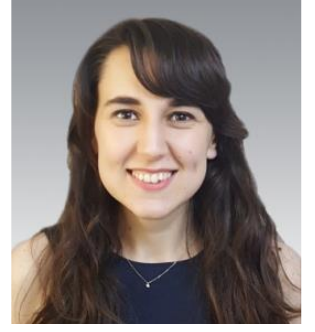
- Noel, N. K., Stranks, S. D., Abate, A., Wehrenfennig, C., Guarnera, S., Haghighirad, A. A., ... & Petrozza, A. (2014). Lead-free organic–inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications. *Energy & Environmental Science*, 7(9), 3061-3068.
- Ojanperä, A. M. M. (2015). Mesoscopic Perovskite Solar Cells: Efficiency Enhancement via Optimization of the Titania Anode.
- Jeon, N. J., Noh, J. H., Kim, Y. C., Yang, W. S., Ryu, S., & Seok, S. I. (2014). Solvent engineering for high-performance inorganic–organic hybrid perovskite solar cells. *Nature materials*, 13(9), 897.
- Oku, T., Matsumoto, T., Suzuki, A., & Suzuki, K. (2015). Fabrication and characterization of a perovskite-type solar cell with a substrate size of 70 mm. *Coatings*, 5(4), 646-655.
- Popov K., Cahen Group D.,(2014). Band gap engineering of hybrid organic inorganic lead-halide perovskites. Department of Materials and Interfaces.
- Park, M. A., Park, I. J., Park, S., Kim, J., Jo, W., Son, H. J., & Kim, J. Y. (2017). Enhanced electrical properties of Li-doped NiO x boşluke extraction layer in p–i–n type perovskite solar cells. *Current Applied Physics*.
- Qiu, J., Qiu, Y., Yan, K., Zhong, M., Mu, C., Yan, H., & Yang, S. (2013). All-solid-state hybrid solar cells based on a new organometal halide perovskite sensitizer and one-dimensional TiO₂ nanowire arrays. *Nanoscale*, 5(8), 3245-3248.
- Ren, Z., Ng, A., Shen, Q., Gokkaya, H. C., Wang, J., Yang, L., ... & Hao, J. (2014). Thermal assisted oxygen annealing for high efficiency planar CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells. *Scientific reports*, 4, 6752.
- Sakatani, Y., Grosso, D., Nicole, L., Boissiere, C., de AA Soler-Illia, G. J., & Sanchez, C. (2006). Optimised photocatalytic activity of grid-like mesoporous TiO₂ films: effect of crystallinity, pore size distribution, and pore accessibility. *Journal of Materials Chemistry*, 16(1), 77-82.
- Sanchez, R. S., & Mas-Marza, E. (2016). Light-induced effects on Spiro-OMeTAD films and hybrid lead halide perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 158, 189-194.
- Shi, S., Li, Y., Li, X., & Wang, H. (2015). Advancements in all-solid-state hybrid solar cells based on organometal halide perovskites. *Materials Horizons*, 2(4), 378-405.
- Selçuk, M. Z., Ongul, F., Boroglu, M. S., Boz, İ., & Yuksel, S. A. (2017). Inverted Polymer Solar Cells Using CdS Thin Film Grown by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Method as Electron Transport Layer. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 12(7), 642-650.
- San, N. (1997). Heterojen Fotokatalitik Degradasyon; Aromatik Kirleticilerin Sulu TiO₂ Suspansiyonlarında Fotokatalitik Degradasyon Kinetiğinin İncelenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul.

- Song, Z., Watthage, S. C., Phillips, A. B., & Heben, M. J. (2016). Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications. *Journal of Photonics for Energy*, 6(2), 022001.
- Shi, J., Luo, Y., Wei, H., Luo, J., Dong, J., Lv, S., ... & Wu, H. (2014). Modified two-step deposition method for high-efficiency $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ heterojunction solar cells. *ACS applied materials & interfaces*, 6(12), 9711-9718.
- Shit, A., & Nandi, A. K. (2016). Interface engineering of hybrid perovskite solar cells with poly (3-thiophene acetic acid) under ambient conditions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(15), 10182-10190.
- Song, D., Ji, J., Li, Y., Li, G., Li, M., Wang, T., ... & Mbengue, J. M. (2016). Degradation of organometallic perovskite solar cells induced by trap states. *Applied Physics Letters*, 108(9), 093901.
- Sookman, C., & Kongkachuichay, P. (2006). Effect of base type on properties of NiO synthesized by sol-gel method. *ADVANCES IN TECHNOLOGY OF MATERIALS AND MATERIALS PROCESSING JOURNAL*, 8(1), 73.
- Sun, B., & Sirringhaus, H. (2005). Solution-processed zinc oxide field-effect transistors based on self-assembly of colloidal nanorods. *Nano letters*, 5(12), 2408-2413.
- Tang, J., Jiao, D., Zhang, L., Zhang, X., Xu, X., Yao, C., ... & Lan, Z. (2018). High-performance inverted planar perovskite solar cells based on efficient boşluke-transporting layers from well-crystalline NiO nanocrystals. *Solar Energy*, 161, 100-108.
- Thota, S., & Kumar, J. (2007). Sol-gel synthesis and anomalous magnetic behaviour of NiO nanoparticles. *Journal of physics and chemistry of solids*, 68(10), 1951-1964.
- Türkiye'de Enerji ve Geleceği, (2007), İstanbul, İTÜ.
- Wang, W., Yuan, J., Shi, G., Zhu, X., Shi, S., Liu, Z., ... & Ma, W. (2015). Inverted planar heterojunction perovskite solar cells employing polymer as the electron conductor. *ACS applied materials & interfaces*, 7(7), 3994-3999.
- Wang, B., Xiao, X., & Chen, T. (2014). Perovskite photovoltaics: a high-efficiency newcomer to the solar cell family. *Nanoscale*, 6(21), 12287-12297.
- www.yegm.gov.tr, [Ziyaret Tarihi: 12.04.2018]
- www.iea.org, [Ziyaret Tarihi: 12.04.2018]
- Wei, Q., Yang, Z., Yang, D., Zi, W., Ren, X., Liu, Y., ... & Liu, S. F. (2016). The effect of transparent conductive oxide on the performance $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cell without electron/boşluke selective layers. *Solar Energy*, 135, 654-661.
- Wu, Y., Islam, A., Yang, X., Qin, C., Liu, J., Zhang, K., ... & Han, L. (2014). Retarding the crystallization of PbI₂ for highly reproducible planar-structured perovskite solar cells via sequential deposition. *Energy & Environmental Science*, 7(9), 2934-2938.

- Yang, Z., & Zhang, W. H. (2014). Organolead halide perovskite: A rising player in high-efficiency solar cells. *催化学报*, 35(7), 983-988.
- You, J., Hong, Z., Yang, Y. M., Chen, Q., Cai, M., Song, T. B., ... & Yang, Y. (2014). Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility.
- Zhang, F., Lian, J., Song, J., Hao, Y., Zeng, P., & Niu, H. (2016). sec-Butyl alcohol assisted pinhole-free perovskite film growth for high-performance solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(9), 3438-3445.
- Zhang, H., Cheng, J., Lin, F., He, H., Mao, J., Wong, K. S., ... & Choy, W. C. (2015). Pinhole-free and surface-nanostructured NiO_x film by room-temperature solution process for high-performance flexible perovskite solar cells with good stability and reproducibility. *ACS nano*, 10(1), 1503-1511.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Büşra Kaya
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Kocaeli Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Kimya Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	11.05.2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Kimya Mühendisliği
Programı	Proses ve Reaktör Tasarımı