



**P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK
GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE ZnO
İNCE FİLM TABAKASININ INVERTED YAPIYA
UYGULANMASI**

Yasin NUHOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

2019

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN
FABRİKASYONU VE ZnO İNCE FİLM TABAKASININ INVERTED YAPIYA
UYGULANMASI**

Yasin NUHOĞLU

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2019

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN
FABRİKASYONU VE ZnO İNCE FİLM TABAKASININ INVERTED YAPIYA
UYGULANMASI

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Yasin NUHOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 03 / 09 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Zakir ÇALDIRAN

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 212T012 nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

03 / 09 / 2019

Yasin NUHOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE ZnO İNCE FİLM TABAKASININ INVERTED YAPIYA UYGULANMASI

Yasin NUHOĞLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Yüksek Lisans tezi kapsamında yaptığım bu çalışmanın amacı düşük maliyetli ekosisteme zarar vermeyen ve kolay elde edilebilir malzemeler (ITO, PEDOT:PSS, ZnO, P3HT:PCBM, MoO₃, Al) kullanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren klasik heteroeklem OPV fabrikasyonu ve ZnO ince film tabakasının ters çevrilmiş yapıya uygulanması ile ters çevrilmiş (inverted) OPV fabrikasyonlarını yapmaktır. İlk olarak, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV fabrikasyonu yapıldı ve bu heteroeklem OPV aygıtının güç dönüşüm verimi **%2,29** olarak elde edildi. Ters çevrilmiş OPV fabrikasyonu iki yöntem ile gerçekleştirildi. İlk yöntemde, ZnO çözeltisi ITO yüzeyine 2500 rpm'de 50 saniye boyunca dönel kaplama yöntemi ile kaplandı ve ardından bir sıcak tabla üzerinde temiz oda koşullarında 10 dakika boyunca 150 °C'de tavlandı. Bu kaplama ve tavlama işlemleri üç kez tekrarlandı ve ITO/ZnO ince filmi elde edildi. İkinci yöntemde, %99 saflığa sahip olan çinko oksit ITO yüzeyi üzerine RF magnetron püskürtme yöntemi ile kaplandı ve ITO/ZnO ince filmi elde edildi. Her iki yöntem ile elde edilen ITO/ZnO ince filmleri ile ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV yapısı elde edildi. Dönel kaplama yöntemi elde edilen ters çevrilmiş OPV'nin güç dönüşüm verimi **%0,92** ve püskürtme yöntemi elde edilen ters çevrilmiş OPV'nin güç dönüşüm verimi **%0,69** olarak hesaplandı. Ayrıca ters çevrilmiş OPV'lerin üretiminde kullanılan tabakaların soğurma, profilometre, XRD ve AFM ölçümleri alınarak bu tabakaların optiksel, morfolojik ve yapısal karakterizasyonları yapıldı.

2019, 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Organik Güneş Pilleri, Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pili, P3HT:PCBM, ZnO

ABSTRACT

MS. Thesis

FABRICATION OF P3HT:PCBM BASED HETEROJUNCTION ORGANIC SOLAR CELLS AND APPLICATION OF ZnO THIN FILM LAYER TO INVERTED STRUCTURE

Yasin NUHOĞLU

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

The purpose of this study, which I did within the scope of the Master's thesis, traditional heterojunction OPV fabrication and by application of the ZnO thin film layer to the reverse structure I-OPV fabrications are made using materials (ITO, PEDOT:PSS, ZnO, P3HT:PCBM, MoO₃, Al) that convert solar energy into electrical energy and which are easy to obtain and do not harm the cost-effective ecosystem. Firstly, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al conventional heterojunction OPV fabrication was performed and the power conversion efficiency of this heterojunction OPV device was obtained as **2,29%**. I-OPV fabrication was performed by two methods. In the first method, the ZnO solution was coated to the ITO surface at 2500 rpm for 50 sec. and then was annealed on a hot plate at 150 °C for 10 minutes in clean room conditions. These coating and annealing processes were repeated three times and ITO/ZnO thin film obtained. In the second method, 99% pure zinc oxide was coated onto ITO surface by RF magnetron sputtering method and ITO/ZnO thin film was obtained. With the ITO/ZnO thin films obtained by both methods obtained the ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al inverted OPV structure. The power conversion efficiency of I-OPV obtained by spin coating method was calculated as **0,92%** and the power conversion efficiency of I-OPV obtained by sputtering method was calculated as **0,69%**. In addition, absorption, profilometer, XRD and AFM measurements of the layers used in the production of inverted organic solar cells were carried out by optical, morphological and structural characterization.

2019, 95 pages

Keywords: Organic Solar Cells, Inverted Organic Solar Cell, P3HT:PCBM, ZnO

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Nanoaygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında yapılmıştır. Çalışmalarım süresince her türlü desteğini gördüğüm, saygın kişiliği ve akademik vizyonu ile örnek aldığım tez danışmanım çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca teorik ve pratik bilgisinden istifade ettiğim, akademik çalışmalarını ve mütevazı kişiliği ile her zaman bizlere örnek olan ve yol gösteren çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zakir ÇALDIRAN'a teşekkür ederim.

Nanoaygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında çalışma imkânı sağlayan ve organik güneş pilleri ile ilgili çalışmalara öncülük eden çok kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN ve Sayın Prof. Dr. Mehmet BİBER'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince katkılarından dolayı değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Emre GÜR, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevda SARITAŞ, Sayın Dr. Hatice KAÇUŞ ve değerli meslektaşım Elektrik Elektronik Yüksek Mühendisi M. Fatih AKKAMIŞ'a teşekkür ederim.

Araştırma olanaklarından dolayı Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca beni sabırla destekleyen aileme teşekkür ederim.

Yasin NUHOĞLU
Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Pillerinin Tarihçesi.....	4
1.2. Fotovoltaik Güneş Enerji Dönüşümü.....	5
1.2.1. Etkin Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Şartları.....	6
1.2.2. Bir Güneş Pili Aygıtının Verimini Artırmak için Gerekli Koşullar.....	7
1.3. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları.....	7
1.4. Heteroeklemler.....	8
1.5. Fotovoltaik (PV) Güneş Pili Çeşitleri.....	9
1.5.1. Tek Katmanlı İnorganik Fotovoltaik Teknolojisi.....	9
1.5.2. İki Katmanlı İnorganik Fotovoltaik Teknolojisi.....	10
1.5.3. Tek Kristal Silisyum Fotovoltaik Teknolojisi.....	10
1.5.4. Çok Kristal Silisyum Fotovoltaik Teknolojisi.....	11
1.5.5. İnce Film Fotovoltaik Teknolojisi.....	11
1.5.6. Amorf Silisyum Fotovoltaik Teknolojisi.....	11
1.5.7. Çok Kristalli İnce Film Fotovoltaik Teknolojisi.....	12
1.5.8. İnce Film Kalgonit Fotovoltaik Teknolojisi.....	12
1.5.9. Kadmiyum Tellür (CdTe) Fotovoltaik Teknolojisi.....	12
1.5.10. Bakır İndiyum Diseleneid (CIS) Fotovoltaik Teknolojisi.....	13
1.5.11. Bakır İndiyum Galyum Diseleneid (CIGS) Fotovoltaik Teknolojisi.....	13
1.5.12. Esnek Bakır İndiyum Galyum Diseleneid (CIGS) Fotovoltaik Teknolojisi.....	14
1.5.13. Çok Eklemlerli Fotovoltaik Teknolojisi.....	14
1.5.14. Nano Fotovoltaik (NanoPV) Teknolojisi.....	14
1.5.15. Kuantum Noktalı Fotovoltaik Teknolojisi.....	15

1.6. Organik Güneş Pili Teknolojisinin İnorganik Güneş Pili Teknolojisine Göre Avantajları.....	16
1.7. Organik Güneş Pilleri.....	16
1.7.1. Organik Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışma İlkesi	16
1.7.2. Ters Çevrilmiş (Inverted) Organik Güneş Pilleri.....	19
1.8. Güneş Pili Karakteristikleri.....	21
1.8.1. Güneş Pili Verimi	22
1.8.2. Kısa Devre Akımı (I_{sc})	22
1.8.3. Açık Devre Voltajı (V_{oc})	23
1.8.4. Dolu Faktörü (FF)	23
1.8.5. Maksimum Güç Noktası (M_{pp}).....	24
1.8.6. Güneş Pillerinin Elektriksel Eşdeğer Devresi	24
2. KAYNAK ÖZETLERİ	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	44
3.1. Materyal	44
3.1.1. P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Geleneksel Organik Güneş Pili ve Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Materyaller	44
3.1.1.1. Eldivenli Kabin	45
3.1.1.2. ITO (İndiyum Kalay Oksit).....	46
3.1.1.3. P3HT:PCBM.....	47
3.1.1.4. PEDOT:PSS	48
3.1.1.5. Çinko Oksit (ZnO)	49
3.1.1.6. Molibden Oksit (MoO_3)	51
3.2. Yöntem.....	52
3.2.1. P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyon ve Karakterizasyon Aşamaları	52
3.2.1.1. ITO'nun Temizlik Aşamaları.....	52
3.2.1.2. PEDOT:PSS'in Hazırlanması	53
3.2.1.3. P3HT:PCBM Aktif Tabaka Malzemelerinin Hazırlanması	53
3.2.1.4. P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Organik Güneş Pili Fabrikasyonu	54
3.2.2. P3HT:PCBM Tabanlı Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyon ve Karakterizasyon Aşamaları	56
3.2.2.1. Çinko Oksit (ZnO) Çözeltisinin Hazırlanması.....	56
3.2.2.2. P3HT:PCBM Tabanlı Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pili Fabrikasyonu	56

3.2.3. Organik Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyonu	59
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	61
4.1. Giriş.....	61
4.2. Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Tabakaların Optiksel, Morfolojik ve Yapısal Karakterizasyonu	61
4.2.1. Profilometre Ölçümleri	62
4.2.2. AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) Görüntüleri	65
4.2.3. XRD (X-Işını Kırınımı) Ölçümleri	71
4.2.4. Soğurma Ölçümleri	74
4.3. P3HT:PCBM Tabanlı Organik Güneş Pillerinin J-V Ölçümlerinden Temel Güneş Pili Parametrelerinin Elde Edilmesi.....	80
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Au	Altın
eV	ElektronVolt
MoO ₃	Molibden Oksit
TiO ₂	Titanyum Oksit
V ₂ O ₅	Vanadyum Oksit
WO ₃	Tungsten Oksit
ZnO	Çinko Oksit

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
FF	Dolum Faktörü
I-OPV	Inverted Organik Fotovoltaik
Isc	Kısa Devre Akımı
ITO	İndiyum Kalay Oksit
I-V	Akım-Voltaj
Φ	İş Fonksiyonu
J-V	Akım Yoğunluğu-Voltaj
OPV	Organik Fotovoltaik
P3HT	poly 3-hexylthiophene
PCBM	6,6-phenyl C61 butyric acid methyl ester
PCE	Güç Dönüşüm Verimi
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Voc	Açık Devre Voltajı
XRD	X-Işımı Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. AM 1.5 şartı altında güneş (solar) spektrumun tahmini şekli.....	6
Şekil 1.2. Güneş pili tarlası	8
Şekil 1.3. P3HT:PCBM tabanlı klasik OPV'nin aygıt yapısı	18
Şekil 1.4. P3HT:PCBM tabanlı klasik OPV tabakalarının enerji band diyagramı	19
Şekil 1.5. P3HT:PCBM tabanlı ters çevrilmiş OPV tabakalarının enerji band diyagramı	20
Şekil 1.6. P3HT:PCBM tabanlı ters çevrilmiş OPV'nin aygıt yapısı	21
Şekil 1.7. Karanlıkta ve ışık altında bir güneş pilinin I-V grafiği.....	22
Şekil 1.8. Fotovoltaik güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi.....	25
Şekil 2.1. Esnek bir tabaka üzerinde hazırlanan ters çevrilmiş (inverted) tipi organik güneş hücresinin aygıt mimarisi	31
Şekil 2.2. (a) Aygıt yapısı (b) aygıt üretimi için kullanılan bileşen malzemelerinin enerji band diyagramı	32
Şekil 2.3. Güneş pili yapısının şematığı.....	34
Şekil 2.4. (a) Elektron taşıma tabakası olarak kullanılan TiO_x , bir katı heteroeklem ters çevrilmiş organik güneş pilinin aygıt yapısı (b) I-OPV aygıtının enerji seviye şeması	35
Şekil 2.5. (a) Farklı anotlara sahip olan ters çevrilmiş OPV hücresinin şematik yapısı (b) ters çevrilmiş OPV yapısına karşılık gelen enerji band diyagramları	38
Şekil 2.6. (a) Geleneksel aygıt yapısının şematığı (b) ve bu yapıya karşılık gelen enerji band diyagramı (c) ters çevrilmiş aygıt yapısının şematığı (d) ve bu yapıya karşılık gelen enerji band diyagramı	40
Şekil 2.7. (a) Aygıt yapısı (b) ve bu yapıya karşılık gelen enerji band diyagramı	43
Şekil 3.1. Eldivenli kabin ünitesi	45
Şekil 3.2. İndiyum Kalay Oksit (ITO)	46
Şekil 3.3. P3HT ve PCBM'in kimyasal yapıları.....	47
Şekil 3.4. Sigma Aldrich firmasından alınan P3HT ve PCBM malzemeleri.....	48
Şekil 3.5. PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı.	49
Şekil 3.6. ZnO'nun kristal yapıları (a) kübik kaya tuzu (b) kübik çinko sülfür (c) hegzagonal wurtzite. Gri küreler oksijen atomunu siyah küreler ise çinko atomlarını göstermektedir.....	50
Şekil 3.7. ZnO'nun hegzagonal bir birim hücrede düzlem ve doğrultuları	50
Şekil 3.8. MoO_3 'ün kristal yapısı.....	51
Şekil 3.9. ITO/PEDOT:PSS'in kesit görüntüsü.....	54
Şekil 3.10. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM'in kesit görüntüsü ve numunenin sıcak tabla üzerinde tavlama işlemi	55

Şekil 3.11. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem organik güneş pili yapısı ve 2x4 mm ² alana sahip kesit görüntüsü.	55
Şekil 3.12. ITO/ZnO ince filminin kesit görüntüsü	57
Şekil 3.13. Püskürtme yöntemiyle ITO yüzeyine ZnO'nun kaplanması ile oluşan ITO/ZnO ince filminin kesit görüntüsü	58
Şekil 3.14. ITO/ZnO/P3HT:PCBM kesit görüntüsü ve numunelerin sıcak tabla üzerindeki tavlama işlemi	58
Şekil 3.15. Elde edilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Al ters çevrilmiş heteroeklem organik güneş pillerinin aygıt yapısı ve 2x4 mm ² alana sahip kesit görüntüleri	59
Şekil 3.16. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Al ters çevrilmiş OPV aygıtlarının karakterizasyon sisteminin şematik gösterimi	60
Şekil 4.1. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin profilometre görüntüleri	62
Şekil 4.2. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin profilometre görüntüleri	63
Şekil 4.3. Cam yüzeyine kaplanmış MoO ₃ ince filminin profilometre görüntüleri.....	64
Şekil 4.4. Dönel kaplama (spin coating) cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin AFM görüntüleri.....	66
Şekil 4.5. Püskürtme (sputtering) cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin AFM görüntüleri.....	67
Şekil 4.6. Cam yüzeyine kaplanmış P3HT:PCBM ince filminin AFM görüntüleri.....	68
Şekil 4.7. Cam yüzeyine kaplanmış MoO ₃ ince filminin AFM görüntüleri	70
Şekil 4.8. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin XRD ölçümleri.....	71
Şekil 4.9. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin XRD grafiği	72
Şekil 4.10. Cam yüzeyine kaplanmış P3HT:PCBM ince filminin XRD grafiği	73
Şekil 4.11. Cam yüzeyine kaplanmış MoO ₃ ince filminin XRD grafiği	74
Şekil 4.12. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumu	75
Şekil 4.13. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin oda sıcaklığında (αhv) ² 'nin hv 'ye karşı grafiği	76
Şekil 4.14. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumu	77
Şekil 4.15. Püskürtme (sputtering) cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin oda sıcaklığında (αhv) ² 'nin hv 'ye karşı grafiği.	77
Şekil 4.16. P3HT:PCBM, P3HT ve PCBM'in soğurma spektrumları.....	78
Şekil 4.17. Cam yüzeyine kaplanmış MoO ₃ ince filminin soğurma spektrumu.....	79

Şekil 4.18. Cam yüzeyine kaplanmış MoO ₃ ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği.....	79
Şekil 4.19. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği.....	80
Şekil 4.20. ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Al dönel kaplama yöntemi kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği	82
Şekil 4.21. ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Al püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği	83



ÇİZELGELER DİZİNİ

- Çizelge 4.1.** ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem organik güneş pilinin ışık altındaki temel güneş pili parametreleri 81
- Çizelge 4.2.** ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al püskürtme ve dönel kaplama yöntemleri kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş OPV aygıtlarının ışık altındaki temel güneş pili parametreleri 84



1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji, kaynakları çeşitlendirerek sürdürülebilir enerji kullanımının sağlanması, ülkelerin enerji gereksinimlerini yerli kaynaklarla karşılaması ile dışa bağımlılığın düşürülmesi ve enerji kullanımı sonucunda doğaya verilen zararları minimuma düşürmesinden dolayı çok önemlidir. Günümüzde dünya genelinde kullanılan enerjinin yaklaşık olarak beşte biri yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşturulmaktadır. Günümüzde fosil kaynaklara olan bağımlılık önemli bir seviyede olmasına rağmen son yıllarda yenilenebilir enerjinin tüketim miktarları gitgide artış göstermektedir. Küresel yükselişe uyum sağlayan Türkiye’de de son dönemde yenilenebilir enerji sektöründe önemli gelişmeler söz konusudur. 2016 yılı itibarı ile Türkiye’nin yenilenebilir enerji toplam kurulu gücü yaklaşık olarak 35 GW olup, toplam elektrik üretiminin ise %35’i yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla sağlanmaktadır (Karagöl ve Kavaz 2017). 2018 yılı sonunda Türkiye’deki kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı ise şu şekildedir; %21,5’i kömür, %25,6’sı doğal gaz, %31,9’u hidroelektrik enerji, %5,7’si güneş, %7,9’u rüzgâr, %1,4’ü jeotermal ve %5,9’u ise diğer enerji kaynakları olmak üzere toplam elektrik üretiminin ise %47’si yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla sağlanmaktadır (Anonim 2019). Hidroelektrik enerji bu kurulu gücün önemli bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Modern yenilenebilir enerji çeşitleri olarak tanımlanan güneş ve rüzgâr gibi enerji kaynaklarının oranları ise seneler içinde çoğalmıştır fakat hâlâ beklenen düzeylerde değildir. Türkiye’nin jeopolitik yapısı ve bulunduğu coğrafi konumu itibarıyla bütün yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma olanağına sahiptir. Türkiye’nin bilhassa güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerjisi potansiyelleri bakımından AB ülkeleri ile kıyaslandığında, son derece uygun bir konuma sahip olduğu görülmüştür. Fakat bu kaynaklardan faydalanma oranı çok düşük düzeydedir. Bu vaziyetin önünde bazı hukuki ve ekonomik kısıtlamalar olsa da memnun edici gelişmeler olmuştur. Türkiye’nin bilhassa 2023 amaçları ve gelecek planlamaları kapsamında yenilenebilir enerji konusuna ayrı bir önem vermesi bunu ispatlar nitelikte olmaktadır. Bu yönde yapılan girişimler sonucunda Türkiye sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyelini değerlendirmeye öncelik vermektedir. Elektrik kullanımının günümüze oranla 2023 yılında yaklaşık olarak iki katına çıkacağı öngörülmekte ve elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji payının (hidroelektrik enerji dâhil) ise en az %30 olması amaçlanmaktadır. Türkiye’nin sahip olduğu

1. GİRİŞ

yenilenebilir enerji potansiyelini daha verimli ve etkin bir biçimde kullanması adına bilhassa son yıllarda yaşanan pozitif gelişmeler, gelecek yıllarda amaçların gerçekleştirilmesi anlamında katkı sağlamaktadır. Türkiye'nin gelecekte enerji faturasını ve enerjide dışa bağımlılığı önemli miktarda düşürecek olan yenilenebilir enerji, yatırım alanlarından çevresel etkenlere, milli gelirden istihdama, kaynak çeşitlendirmesinden enerji arz güvenliğine kadar pek çok alanda da önemli katkı sağlayacaktır. Bunun sayesinde Türkiye enerjide kendi kendine yetebilen bir ülke olmanın yanında enerji ticaretinde merkez ülke konumuna gelebilecektir (Karagöl ve Kavaz 2017). Doğaya ve çevreye zarar vermeden doğal kaynaklardan yararlanılması ile üretilen enerji kaynağına yenilenebilir enerji denir. Bu yenilenebilir doğal enerji kaynakları ise fotovoltaik güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidro elektrik, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi ve piezoelektrik enerjisidir. Yenilenebilir enerji dünya var olduğu sürece her daim kendi kendini yenileyebilen ve tükenmeyen bir enerji olmasından ötürü diğer enerji çeşitlerinden farklıdır. Elde edilen enerji neticesinde zararlı maddeleri ve herhangi bir atık maddeyi çevreye bırakmadıklarından dolayı temiz enerji kaynağıdır. Gelecek nesillerin enerji gereksinimini karşılamak ve doğaya verilen zararı minimuma indirebilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz gerekiyor. Yenilenebilir enerji kaynakları, gerekli olan ihtiyacı karşılamak için enerji kaynaklarını riske atmadan elde edilen enerjiye denilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ihtiyacı ve devamlılığı karşılama hususunda en mühim rolü oynamaktadır.

Bunların haricinde;

- ✓ Ülkelerin zenginleşmesi ve gelişmesi için en mühim maddelerden biri enerji olduğundan dolayı yenilenebilir enerji kaynakları mühimdir,
- ✓ Fosil kaynak tüketimini önemli ölçüde azalttığından dolayı çevresel yönden mühimdir,
- ✓ Yerli kaynakların geliştirilmesinde önemi çok büyüktür,
- ✓ Dışa bağımlılığı düşürdüğü için mühimdir,
- ✓ Milletlerarası anlaşmalarla uyumlu olduğu için mühimdir,
- ✓ İşsizliği önemli ölçüde azaltır ve yeni iş olanağı sağlar,
- ✓ Elektriğin olmadığı coğrafi bölgelere elektrik temin ettiği için mühimdir.

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları özetle şunlardır;

Dünyaya gelen güneş ışınlarının güneş panelleri vasıtasıyla elektrik ve ısıya dönüştürülmesi sonucunda elde edilen enerjiye **fotovoltaik güneş enerjisi** denir. Doğaya herhangi bir zararı olmadan elde edilebilen fotovoltaik güneş enerjisi doğal enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Bu enerji türünün maliyeti önceleri çok daha yüksek iken günümüzde maliyetlerinin daha uygun olması sayesinde kullanımı hızla artmaktadır. Bundan dolayı fotovoltaik güneş enerjisinin kullanımı her geçen gün artmakta ve kullanım alanları da çok fazladır.

Güneş ışınlarının dünyaya geliş açısındaki farklılıklar sebebiyle meydana gelen basınç ve dünyanın dönüşü ile oluşan rüzgârlar yardımıyla üretilen enerji çeşidine **rüzgâr enerjisi** denir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan ve yoğun rüzgâr olan yerlerde kurulan rüzgâr türbinleri yardımıyla rüzgâr enerjisi elde edilmektedir. Günümüzde rüzgârın teknolojik gelişmeler yardımıyla tahmin edilebilmesinden dolayı rüzgâr enerjisinin daha etkin bir biçimde kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Suyun akış gücü kullanılması ile oluşan ve sera gazı salınımı yapmaması nedeniyle dünyaya herhangi bir zararı olmayan enerji türüne **hidroelektrik (hidrolik) enerji** denir. Hidroelektrik enerji, suyun akışının oluşturduğu kinetik enerjinin kanallar vasıtasıyla türbinlere iletilmesi ile elde edilir. Bilhassa suyun akış hızının ve yüksekliğin fazla olduğu yerlerde hidrolik enerji üretimi yapılması önemli bir üstünlük sağlar.

Jeotermal kaynakların olduğu yerlerde dolaylı ya da direkt yollardan üretilen enerji çeşidine **jeotermal enerji** denir. Elektrik üretimi, soğutma, ısıtma ve mineral üretimi gibi farklı sektörlerle hizmet eden bu enerji çeşidi aynı zamanda kaplıcalar vasıtasıyla turizm sektörüne de katkıda bulunmaktadır.

Biyokütle, tarımsal ve tarım amaçlı üretilen bitkiler, ağaç ve ormancılık artıkları, belediye veya endüstriyel atık ürünleri gibi yenilenebilir enerji ve ısıya dönüşebilen bitkilerden türetilen geniş bir biyolojik malzemedir. Biyokütle atıklarının farklı işlemlerden geçirilerek kullanılması veya yakılması neticesinde üretilen enerji türüne **biyokütle enerjisi** denir.

1. GİRİŞ

Doğada bileşikler halinde bulunan hidrojen gazının işlenmesi ve dönüştürülmesiyle meydana gelen enerji kaynağına **hidrojen enerjisi** denir. Hidrojen enerjisi alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında yer almasına rağmen doğal enerji kaynağı değildir.

Dalgaların oluşturduğu basınçtan ve denizlerde oluşan dalgalanma hareketinden üretilen enerji türüne **dalga enerjisi** denir. Dalga jeneratörleri yardımıyla sürdürülebilir ve doğal enerji üretimi dalga enerjisinden temin edilmektedir.

Tüm bu yenilenebilir enerji kaynaklarının haricinde, piezoelektrik enerjisinden şu anda yeterli miktarda enerji elde edilememesine rağmen yenilenebilir enerji kaynakları arasında gösterilmektedir. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yenilenebilir enerji kaynağına **piezoelektrik enerji** denir (Öztürk 2013).

1.1. Güneş Pillerinin Tarihçesi

1893 yılında fotovoltajik (PV) etkiyi ilk kez Fransız Fizikçi Alexandre-Edmond Becquerel inceledi. Güneş pili ilk olarak 1883 yılında Charless Fritss tarafından üretilmiştir. Elde edilen bu güneş pili %1'lik verime sahip olup altın tabakaların yarıiletken selenyum malzemesi ile kaplanarak yapılmıştır. 1946 yılında Russell Ohl, modern güneş pillerinin patentini almıştır. Yarıiletken malzemelerle Bell Laboratuvarı'nda deney yapılmakta iken güneş pilleri için silisyumun iyi bir materyal olduğu saptandı ve çağdaş güneş pili teknolojisine ulaşmak amacıyla ilk adım 1954 yılında atılmış oldu. Bu çalışmaların sonuçları çabucak hissedilmeye başlanmıştır. 1957 yılında Rusya uydu programını başlattı ve ardından 1958 yılında ABD'de yapay uydu programını Peter Iles'in öncülüğünü yaptığı Hoffman Elektronik aracılığıyla fotovoltajik hücrelerin üretilmesiyle başlanmıştır. Fotovoltajik güneş pilleri, ilk uzay aracı olan Explorer'da 1 Ocak 1958'de kullanılmıştır. Güneş pillerinin gelişmesi böylece diğer önemli buluşlarda yol açmıştır. Özetle güneş pili yapımı uzay çalışmalarına çok önemli bir etkisi olmuştur. İlk kez galyum arsenik (GaAs) katkılı güneş pilleri Sovyet Rusya (SSCB)'dan Zhores Alferov tarafından 1970 yılında üretilmiştir. Metal Organik Kimyasal Buhar Katkısıyla (MOCVD) elde edilen malzemelerin 1980'li yıllara doğru ancak geliştirilmesine kadar firmaların GaAs katkılı güneş pillerinin üretimleri kısıtlıydı. 1988

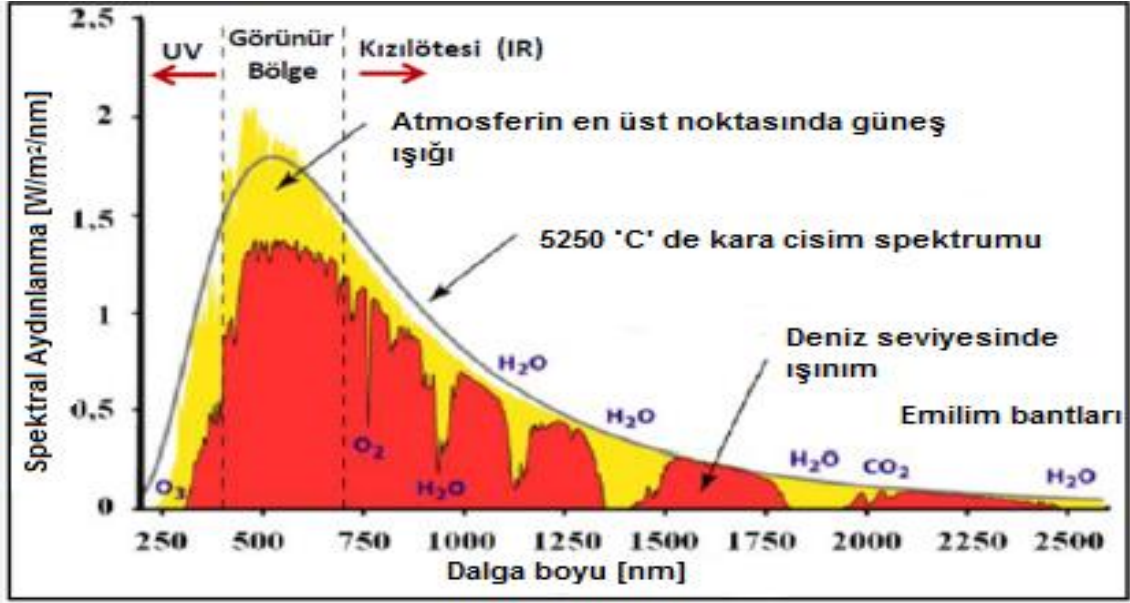
1. GİRİŞ

yılında ABD’de %17 verime sahip tek eklemli GaAs katkılı gibi özelliklere sahip Güneş Enerji Uygulamaları Kurumu (ASEC) tarafından güneş pilleri üretilmiştir. 1989 yılında çift eklemli GaAs katkılı güneş pilleriye çok geçmeden tekrardan aynı kuruluş aracılığıyla GaAs’in haricinde Germanyum (Ge) yarıiletken materyalinin kullanılması ile de üretilmiştir. ABD, 1993 senesinde uzay araçlarında ASEC’in yaptığı çift eklemli, %20 verime sahip olan güneş pillerini kullanmakta iken, AM0 yapımı tek eklemli GaAs katkılı güneş pili %19’luk bir verime ancak ulaşılabilmektedir. Uzay araçlarında kullanılan güneş pilleri GaAs temelli olmasına rağmen ikinci bir hücre Ge katkılıdır. Nihayetinde GaAs katkılı çift eklemli güneş pillerinde %22’lik bir verime ulaşılmıştır. Üç eklemli AM0 tarzı güneş pillerinin verimleri takribi olarak 2000 yılında %24, 2002 yılında %26, 2005 yılında %28 ve 2007 yılında %30’a ulaşılmıştır. 2007 yılında iki Amerikan firması Spectrolab ve Emcore Photovoltaics’in yaptığı yaklaşık olarak %28 verime sahip olan güneş pilleriyle dünyada güneş pili üretiminin %95’ini karşılamaktadır (Anonim 2008).

1.2. Fotovoltaik Güneş Enerji Dönüşümü

Güneş ışığı; morötesi (UV), görünür ışık, kızılötesi (IR) ışıma bölgelerinde elektromanyetik radyasyondan oluşur. Dünyanın yüzeyine ulaşan solar spektrum hava atmosferinde çeşitli soğurmalara uğrar ve dünyanın yüzeyine düşen ortalama güneş enerjisi genellikle yaklaşık olarak 100 mWcm^{-2} ye eşit olan hava kütlesi 1.5 (AM1.5) ışınlama olarak bilinmektedir. Bu nicelik insanoğlu tarafından henüz etkin bir şekilde kullanılmayan her metrekare üzerine düşen yaklaşık 1,0 kW’lık güce eşittir. Güneş (solar) spektrumun şekli ve AM1.5 şartları altında çeşitli dalga boylarının soğurması Şekil 1.1’de verilmiştir.

1. GİRİŞ



Şekil 1.1. AM 1.5 şartı altında güneş (solar) spektrumun tahmini şekli.

Geleneksel olarak, güneş enerjisini yakalamanın iki yolu vardır. Birinci metot temelde ısı enerjisini (ya da kızılötesi ışıması) soğurmaktır ve bu genellikle 'güneş ısı teknolojisi' olarak bilinmektedir. İkinci metot morötesi (UV) ve görünür ışığı (fotonları) doğrudan elektriğe dönüştürmektir. Fotonlar doğrudan voltaja dönüştürüldüğü için, bu metot 'fotovoltaik dönüşüm' (kısaltması PV dönüşüm) olarak bilinmektedir.

1.2.1. Etkin Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Şartları

Etkin fotovoltaik enerji dönüşüm işleminde dört temel adım aynı anda gerçekleşmelidir.

- Uygun bir malzeme kullanarak gelen fotonları soğurması,
- Atomlar arasında kırılan bağlar tarafından yük taşıyıcıların elektron-hole çiftleri oluşturması,
- Rekombine olmadan önce ters yönde yüklü serbest taşıyıcıların ayrışması,
- Kullanışlı elektrik akımını oluşturmak için dış bir devre boyunca ışığın oluşturduğu yük taşıyıcılarının taşınımı ya da birikmesi.

Eğer bu dört adımın her biri engellenirse ya da oluşmazsa, aygıt zayıf dönüşüm verimi gösterecek ya da fotovoltaik (PV) etki sıfır olacaktır.

1.2.2. Bir Güneş Pili Aygıtının Verimini Artırmak için Gerekli Koşullar

- Yüksek kalitede yarıiletken malzeme kullanılmalıdır,
- Kullanılan yarıiletken malzemenin yüksek soğurma katsayısına ve düşük rekombinasyon merkezine sahip olmalıdır ki elektron-hole çiftleri oluşturduğu zaman devreden aktığında hemen başka taşıyıcılarla rekombine olmasın ve güçlü built-in elektrik alanlı bir deplasyon bölgesi oluştursun,
- Gelen fotonların enerjilerine bağlı olarak hem düşük bant aralıklı hem de yüksek bant aralıklı yüksek kalitede yarıiletken malzeme kullanılmalıdır,
- Yüzeğe gelen fotonların soğurulmasını artırmak için yüzeyi tırtıklı ya da saydam bir tabaka yapılmalıdır,
- Gelen fotonların daha çok soğurulması için aktif tabaka yüzeye yakın yapılabilir ancak aktif tabakayı yüzeye yakın yapmak bir direnç oluşturur. Bu direnci azaltmak için yüzeydeki akım ölçümünü yaptığımız kompaktların yüzey alanı artırılarak direnç azaltılabilir. Fakat bu defada yüzeyden fazla kaçak akım geçer. Kaçak akımın oluşmasını engellemek için de hidrojeni pasifize edilerek yapılan bir güneş pili aygıtının verimi artırılabilir.

1.3. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları

Fotovoltaik güneş pilleri yüzeylerine düşen güneş ışınlarını direkt olarak elektrik enerjisine çeviren yarıiletken malzemelerdir. Dikdörtgen, kare ve daire biçiminde yüzeylere sahip olan güneş pilleri 0,2-0,4 mm arasında kalınlıklara sahip olup alanlarıysa çoğunlukla 100 cm²'dir. Bu güneş pillerinin paralel ve seri bağlanmaları ile yüksek güce sahip güneş pilleri elde edilmektedir. Güneş pilleri 'fotovoltaik etki' prensibine bağlı olarak çalışmaktadırlar. Öyle ki güneş pillerinin üzerine fotonlar düştüğünde uçlarında bir elektrik voltajı meydana gelir. Güneş pilinin vermiş olduğu elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine düşen fotonların sahip olduğu enerjidir. Güneş pilleri çeşidine göre %5 ila %40 aralığında bir verimle güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedirler. Güç çıkışını artırmak için çok sayıda güneş pili birbirine seri veya paralel bağlanması ile bir yüzey üzerine monte edilmesiyle oluşan bu yapıya fotovoltaik modül veya güneş pili modülü adı verilmektedir. Güç talebine bağlı olarak bu modüller birbirlerine paralel veya seri bağlanması ile birkaç Watt'tan megaWatt'lara kadar sistem oluşturulmaktadır. Şekil

1. GİRİŞ

1.2’de örnek bir güneş pili tarlası gösterilmektedir. Günümüzde fotovoltaik güneş pilleri birçok alanda kullanılmaktadır ve yaygın olarak kullanıldığı yerler ise şöyledir;

- ✓ İletişim sistemleri,
- ✓ Doğalgaz boru hatları,
- ✓ Elektrik iletim şebekeleri,
- ✓ Su ısıtma sistemleri,
- ✓ Hava tahmin istasyonları,
- ✓ Aydınlatmalar,
- ✓ Gözetim kuleleri,
- ✓ Taşınabilir cihazlarda,
- ✓ Otomotiv sektörü,
- ✓ Güvenlik sistemleri,
- ✓ Elektriğin olmadığı hobi evleri ya da bahçelerinde (Anonim 2005).



Şekil 1.2. Güneş pili tarlası.

1.4. Heteroeklemler

Yasak enerji aralıkları farklı iki yarıiletkenin meydana getirdiği ekleme heteroeklem denir. Diğer bir deyişle bir tarafı p-tipi diğer tarafı n-tipi olan iki yarıiletkenin meydana getirdiği p-n yapısı bir heteroeklemdir. Transistör, tristör, diyot ve bazı optoelektronik cihazlar gibi yarıiletken tabanlı cihazlar heteroeklem yapılarına örnek verilebilir. Bu yapıların en büyük özelliği ve avantajı enerji engellerinin kontrol edilmesi

sayesinde yük taşıyıcıların iletimlerinin kontrol edilmesi ve özellikle optoelektronik cihazlarda heteroyapının optik ışımayı hapsedebilme yeteneğidir. Heteroyapılar anizotip ve izotip olmak üzere iki türde incelenebilmektedir. Şayet her iki yarıiletken katkı tipleri farklı ise (biri n-tipi diğeri p-tipi) bu tip yapılar anizotip heteroeklemler, şayet her ikisi de aynı tipte katkıya sahipse (n-tipi veya p-tipi) bu tip yapılar izotip heteroeklemler olarak adlandırılır. Işık yayan diyotlar (LED) ile fotovoltaj aygıtlar (PV), yüksek verimli cihaz tasarımları sağlayan en önemli optik ve elektrik özelliklere sahip heteroeklemlerdir. Cihazı terk eden veya cihaza giren bölgedeki fotonların yolu üzerinde geniş band aralıklı bir yarıiletken tasarımı yapılarak foton soğurması önemli ölçüde azaltılabilir. Örneğin 250 nm dalga boyunda soğurma gerçekleştiren ve yaklaşık 5 eV yasak enerji aralığına sahip bir malzeme bu işlevi görebilir. Band aralıkları farklı olan biri n ve diğeri p-tipi yarıiletken ile oluşturulan bir LED heteroyapıda (p-tipi) $E_{g1} < (n\text{-tipi}) E_{g2}$ ise küçük band aralıklı yapıda elektron ile boşlukların rekombinasyonu sonucu ortaya çıkan fotonlar önemli ölçüde büyük band aralıklı yarıiletken tarafından yeniden soğurulmayacaktır. Güneş pili uygulamalarında belirli bir dalga boyundaki foton (örneğin elektromanyetik dalga spektrumunda görünür bölge spektrumundaki ışık) geniş band aralıklı bir yarıiletkeninden geçerek bir dar band aralıklı yarıiletkenindeki eklemeye ulaşır. Bu şekilde rekombinasyon verimi artırılır ve eklemenden uzakta istenmeyen ışık soğurulmalarından kaçınılmış olur (Aydoğan 2015).

1.5. Fotovoltajik (PV) Güneş Pili Çeşitleri

PV güneş pilleri; ince film, kristal yapı, birleşik ve nanoteknoloji olmak üzere dört ana bölüme ayrılmıştır. Bütün bu PV güneş pili türleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

1.5.1. Tek Katmanlı İnorganik Fotovoltajik Teknolojisi

Tek katmanlı inorganik PV güneş pillerinde Si ve Ge gibi yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Bu tek katmanlı güneş pillerinde farklı iş fonksiyonuna sahip iki metal elektrot arasına Si gibi inorganik yarıiletkenlerin yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu fotovoltajik güneş pilleri tek katmanlı bir yapıya sahip olduğundan verimleri düşüktür.

1.5.2. İki Katmanlı İnorganik Fotovoltaik Teknolojisi

İki katmanlı inorganik PV güneş pili p-tipi ve n-tipi olmak üzere iki yarı iletkenin kullanılması ile elde edilmektedir. Bu güneş pillerinde yük ayrımı, p-tipi ve n-tipi yarı iletkenleri arasındaki sınıra yakın bölgede gerçekleşmektedir. İnorganik güneş pilleri kimyasal ve ısı bakımından oldukça kararlı güneş pilleridir. Günümüzde bu güneş pillerinden yaklaşık %30'a yakın verim elde edilmektedir.

1.5.3. Tek Kristal Silisyum Fotovoltaik Teknolojisi

Tek kristal silisyum (Si) fotovoltaik güneş pilleri, güneş paneli üretiminde çokça kullanılmaktadır. Tek kristal Si materyalinin maliyeti oldukça yüksek olduğundan dolayı çok kristalli fotovoltaik güneş pilleri daha yoğun kullanılmaktadır. Si malzemesinin güneş pili yapımında yaygın olarak kullanılmasının birçok nedeni vardır. Bunlardan biri de silisyumun optiksel, yapısal ve elektriksel özelliklerini daha uzun süre koruyabilmesidir. Saf tek kristal PV güneş pillerinin üretimi bir hayli zor ve pahalıdır. Oksijenin ardından silisyum dünyada en çok bulunan elementtir. Kuvars ve kum biçimleri ise bu elementin en yaygın olanlarıdır. Kum çok az saflığa sahip olduğu için pek fazla tercih edilmez. Fakat kuvars malzemesinin yaklaşık olarak %90'ı silisyumdan oluşmaktadır. %99 saflıkta bir silisyum elde etmek için kuvars birçok işlemden geçirilmektedir. Daha sonra SiO₂'den de silisyum üretilir. Bu işlemlerin ardından Si malzemesi saflaştırılması ile yarı iletken özellik gösteren çok kristalli silisyum üretilir. Çok kristalli silisyum tekrar eritilip ve büyütülerek yarı iletken özelliğe sahip saf çok kristalli silisyum üretilir. Çok düşük hızda ergimiş silisyum banyosundan çekirdeklerin çekilmesi ile ince tek kristalli tabakaların büyümesi sağlanır. Tek kristal dilimlerden (kalınlığı yaklaşık 400 µm) Czochralski (CZ) yöntemiyle üretilip ticari olarak kullanılan Si güneş pillerinin birçoğu bor katkıdır. Güneş pillerinde kafes bozuklukları oluşmamasının sebebi Czochralski (CZ) yöntemiyle üretilmesidir. Güneş pillerinin yaklaşık olarak %80'ini kristal silikon güneş pilleri oluşturur. Bu güneş pilinin verimi yaklaşık olarak %15 ila %23 arasında değişmektedir.

1.5.4. Çok Kristal Silisyum Fotovoltaik Teknolojisi

Çok kristal silisyum fotovoltaik güneş pillerinin tek kristal silisyum fotovoltaik güneş pillerine göre elde edilmesi daha basit ve az maliyetlidir. Çok kristalli silisyum güneş pilleri üretiminde dökme metodu kullanılmaktadır. Çok kristalli silisyum güneş pillerinin elde edilme prosesi kısaca şöyledir. Birinci olarak tek kristalli silisyumun üretilmesi için yapılan aşamaların birçoğu aynı şekilde tekrar edilir. Erimiş yarı iletken silisyum, uygun miktarlarda kalıplara dökülür ve soğuması için bekletilir. Kalıplardan elde edilen bloklar kare biçiminde kesilir. Bu metotla elde edilen güneş pili daha az verimli olmalarına rağmen maliyetleri oldukça düşüktür. Çok kristal silisyum fotovoltaik pillerinin verimleri yaklaşık olarak %12 ila %15 arasında değişmektedir.

1.5.5. İnce Film Fotovoltaik Teknolojisi

Aşırı ince yarı iletken katmanların birbiri üzerine yerleştirilmesiyle oluşan güneş piline ince film güneş pili denir. Çok çeşitli malzemelerden ince film güneş pilleri yapılmaktadır. Ticari amaçlı kullanılan ince film güneş pilleri amorf silisyumdan yapılmıştır. Bunun haricinde üretiminde CdTe ve çok kristal CIS'da kullanılmaktadır. İnce film güneş pillerinde değişik çökeltme metotları kullanılmaktadır. Bu metotların maliyetleri düşüktür. Ayrıca bu yöntemin kullanılmasıyla 2×2 inç ebatlarında güneş pilleri üretilir. Tabakalar ucuz maliyetli plastik ya da cam temelli malzeme üzerine çökeltilebilmektedir. Tek kristal silisyum normalde, güneş modülü içerisinde ayrı ayrı bir biçimde birbirlerine bağlanması tasarlanmış iken ince film aygıtlar sadece bir ünite biçiminde tasarlanmıştır. İnce film fotovoltaik güneş pilleri yaklaşık olarak %8 ila %12 arasında bir verime sahiptir.

1.5.6. Amorf Silisyum Fotovoltaik Teknolojisi

Amorf silisyum, yalıtkan malzemelerle aynı elektriksel özelliklere sahiptir. Bilim insanları tarafından son yıllarda yapılan araştırmalarda amorf silisyumun güneş pillerinde kullanılması gerektiği düşünülmüştür. Amorf silisyum günümüzde düşük güçlü cihazlarda kullanılmaktadır. Günümüzde düşük güçteki aygıtlarda amorf silisyum yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çok fonksiyonlu aygıtlar geliştirmek amacıyla amorf

1. GİRİŞ

silisyum alaşımlarıyla germanyum, azot, karbon ve kalay gibi malzemeler kullanılmaktadır. Amorf silisyum fotovoltaik güneş pillerinden laboratuvar şartlarında %13'den daha fazla verim elde edilmektedir.

1.5.7. Çok Kristalli İnce Film Fotovoltaik Teknolojisi

Yarı iletken materyallerin çok küçük kristal taneciklerinden meydana gelen yapıya çok kristalli ince film güneş pili denir. Bu tip güneş hücrelerinde silikondan farklı özelliklere sahip malzemeler kullanılmaktadır. Değişik iki yarı iletken materyal arasındaki ara tabaka ile bu güneş pillerinde kolaylıkla elektrik alanı oluşturulur. Çok kristalli ince film güneş pilleri, pencere olarak adlandırılan 0,1 μm 'den daha ince kalınlığa sahip bir üst tabakaya sahiptir. Yüksek enerji taşıyan ışınım enerjisini soğurmak pencere katmanının görevidir. Bu katmanın yeterli bant boşluğuna sahip olması için, olabildiğince ince olması gerekir.

1.5.8. İnce Film Kalgonit Fotovoltaik Teknolojisi

Cu_xTe - CdTe , Cu_xSe - CdSe ve Cu_xS - CdS ince film güneş pilleri 1960 yıllarında geliştirilmiş olup bu güneş hücrelerinin elde edilmesi bir hayli kolaydır. CdTe , CdS ve CdSe ince filmleri kimyasal çökeltme yöntemiyle elde edilir. Cu_xTe , Cu_xSe ve Cu_xS tabakaları ise CdTe , CdSe ve CdS filmleriyle beraber bakır klorür (CuCl) çözeltisi içerisinde 1-2 dakika daldırılması ile elde edilir. Bu üç tür güneş pili hücreleri de yaklaşık olarak %10'nun üzerinde bir verim verebilmektedir. Fakat bakır kalgonit tabakalar ile ilgili Ar-Ge çalışmalarına bakır difüzyonuyla bozulduğundan dolayı son verilmiştir ve artık günümüzde bu ince film güneş pili çeşidi üretilmemektedir.

1.5.9. Kadmiyum Tellür (CdTe) Fotovoltaik Teknolojisi

Kadmiyum tellür (CdTe) güneş pilleri güneşten gelen fotonları soğurma katsayısı yüksek ve ideal band aralığına sahiptir. İnce film fotovoltaik teknolojisinde gelecek vaat eden güneş pili materyali türlerinden birisi olan CdTe 'ün güneş pili verimi %15'in üzerinde olup ve bu güneş pili hücreleriyle elde edilen güneş panellerinin verimi ise %9'dan fazladır. CdTe diğer ince film güneş pillerine göre geniş ölçekli üretime daha

1. GİRİŞ

uygun ve daha kolay depolanabilir olması gibi avantajlara sahiptir. Periyodik tablonun 6.grup elementi olan Tellür (Te) ve 2.grup elementi olan kadmiyum (Cd) elementlerinin birleşmesiyle elde edilen yarı iletkene kadmiyum tellür (CdTe) denir. 1,45 eV seviyesinde band boşluğuna sahip olan CdTe bu değeri ile güneş pilleriyle elektrik üretmek için çok elverişli bir değerdir. Kadmiyum tellürün optik soğurma seviyesi ise $10^5/cm$ olup, gayet iyi bir değerdir. P-tipi iletkenlik sağlamak amacıyla güneş pilleri uygulamaları için çok uygun bir malzeme olmasının sebebi bu özelliğinden dolayıdır.

1.5.10. Bakır İndiyum Diseleneid (CIS) Fotovoltaik Teknolojisi

Periyodik tablonun 1., 3. ve 6. grup elementlerinin üçünün ya da daha çoğunun birleşmesiyle elde edilen yarı iletkene CIS güneş pili denir. Soğurma katsayısı bir hayli yüksek bir yarı iletken olan CIS güneş pilleri, selenyum, indiyum ve bakır ile elde edilen birleşik yarı iletken materyallerden üretilirler.

Bu CIS fotovoltaik teknolojisinin diğerlerine göre avantajları şöyledir;

- Yüksek optik soğurma katsayısına sahiptir,
- Özdirenci ve iletkenliği değiştirilebilmektedir,
- Fabrika ortamında da yüksek verimli güneş pilleri üretilebilir.

Bakır indiyum diseleneid güneş pili bir hayli yüksek soğurma avantajına sahip olup bu materyalin ilk 1 μm kalınlığındaki tabakası, güneşten gelen fotonların %99'unu soğurabilmektedir. CIS güneş pillerinin ticari olarak yaygın kullanılmasının nedeni dış ortam testlerinde çok iyi kararlılığa sahip olmasıdır. Öte yandan CIS güneş pillerine galyum (Ga) malzemesi katkılanırsa daha yüksek güç dönüşüm verimi elde edilebilmektedir.

1.5.11. Bakır İndiyum Galyum Diseleneid (CIGS) Fotovoltaik Teknolojisi

İnce film fotovoltaik teknoloji türlerinden biriside CIGS güneş pilleridir. Esnek yarı iletken bir tabakanın üstüne bu güneş pili üretilir. Diğer ince film güneş pillerine göre CIGS güneş pilinin verimi daha yüksektir. CIGS güneş pili %10 civarında verimliliğe sahipken çoğu ince film güneş pilleri %8 verime sahiptir. CIGS ve CdTe güneş pilleri uygulama koşullarında en fazla %25 verim elde edilirken teoride %30 verime ulaşılmıştır.

1.5.12. Esnek Bakır İndiyum Galyum Diseleneid (CIGS) Fotovoltaik Teknolojisi

Ucuz üretim yöntemi ile ince film fotovoltaik teknolojisi için çok önemli bir avantaja sahiptir. Bu güneş panelleri elektriksel olarak içerden bağlantılı olup ve tek modül halinde üretilebilirler. Son yıllarda esnek güneş pillerinin rulo halinde olması oldukça popülerdir ve bundan dolayı özellikle güneş çatı sistemlerinde esnek CIGS fotovoltaik türü kullanılmaktadır. Rulo şeklini alabilen ve hafif bu esnek CIGS fotovoltaik teknolojisi, uzay teknolojisinde yüksek bir potansiyele sahiptir.

1.5.13. Çok Eklemlerli Fotovoltaik Teknolojisi

Monotip malzemelerle üretilen güneş pillerinde uygulamada %25 verim elde edilirken teoride %30 verim sağlayabilmektedir. Bundan dolayı çok eklemlerli fotovoltaik teknolojisi üzerine yapılan araştırmaların artış göstermesinin temel nedeni yüksek verim elde edilmesinden dolayıdır. Çok eklemlerli güneş pilleri iki veya ikiden çok yarı iletken tabakalardan yapılmaktadır. Bu tabakaların biri kırmızı ışığı daha iyi soğurmakta iken ötekiyse mavi ışığı gayet iyi soğurur. Bu yüzden çok eklemlerli güneş pillerinin verimi monotip malzemededen elde edilen güneş pillerinin veriminden yüksektir. Teoride ideal bir güneş pili, kızıl ötesi ve mor ötesi arasında bulunan farklı dalga boylarına ayarlanmış yüzlerce tabakadan oluşabilmektedir. Böyle bir durumda %70 gibi inanılması güç bir verime ulaşabilir. Fakat bu ideal güneş pilinin uygulamada yapılması imkânsızdır. Bundan dolayı, birkaç tabakalı olan güneş pillerine bilim adamları yoğunlaşmış durumdadır. Son yıllarda çok eklemlerli güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %35 ila %40 seviyelerine ulaşılabilmiştir.

1.5.14. Nano Fotovoltaik (NanoPV) Teknolojisi

Nano fotovoltaik teknolojisi gelecek vadede güneş pili teknolojisi olup mikro-nano kristalli yüksek verimli güneş pillerini oluşturmaktadırlar. Nano fotovoltaik güneş pilleri, yapılarındaki nano kristal hidrojen amorf silikon (a-Si:H) ve şeffaf iletken (TCLO) teknolojisiyle öteki güneş pili türlerine göre %8-10'dan daha fazla verime sahiptir. Nanomalzemeler, elektrik, kimyasal ve optik özellikleri bakımından gayet iyidir ve

1. GİRİŞ

bundan dolayı güneş pili hücrelerinin veriminde artış olur. Nano fotovoltaik güneş pili teknolojisinde üç tür materyal kullanılmaktadır;

- III-V grubu kristal yarı iletken malzemeler,
- Polimer malzemeler,
- Karbon temelli nano yapılar.

Bu malzemelerin kullanılmasıyla üretilen güneş pillerinde, uygulama ve maliyet bakımından farklı çözüm önerileri sunmaktadır. Güneş pilinin elde edilmesinde iletken olarak titanyum oksit (TiO_2) ve ZnO nanotelleri kullanılabilmekte olup ve bu nanotellerin her biri saç teline göre 1000 kattan daha fazla ince olabilmesi mümkündür.

Nano fotovoltaik teknolojinin üstünlükleri;

- Nano fotovoltaik güneş pili teknolojisiyle esnek güneş pillerinin kullanımı artacak ve farklı tasarımlara olanak verecektir,
- Kendi kendini temizleyebilecek ve yenileyebilecek olması ile işletim-bakım masrafları azalacaktır,
- Güneş pili verimi nano fotovoltaik teknolojisiyle minimum %8-10 artacaktır,
- Yeni iş sahaları açacak ve işsizliği düşürecektir.

Nano fotovoltaik teknolojinin dezavantajları;

- Nanometre boyutlarında üretim yapılması ve elde edilen bu hücrenin gözlemlenmesi aşırı zorlu olmasından dolayı hususi üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulacaktır,
- İlk yatırım maliyetleri bu teknolojiyle elde edilen güneş pillerinin diğer güneş pillerine oranla bir hayli fazla olmaktadır,
- NanoPV güneş pili teknolojisi alanında çalışabilecek uzmanların yetişmesinde uzun senelere ihtiyaç vardır.

1.5.15. Kuantum Noktalı Fotovoltaik Teknolojisi

Genellikle yapay atomlar olarak isimlendirilen kuantum noktalı fotovoltaik teknolojisinde yer alan kristal yarıiletkenler nanometre boyutundadır ve farklı metotlarla elde edilebilmektedir. Bu fotovoltaik teknolojisinde kuantum noktaları basit bir çapa sahiptir ve ışığın soğurulmasına imkân vermektedir. Kuantum noktaları üç boyutlu

kısıtlama oluşturarak taşıyıcıların kontrol edilmesine imkân sağlar. Elektronlar için üç boyutlu engel işlevi gören bu kuantum noktalar. Kuantum noktalı fotovoltaikler, nanometre seviyesinde olup yasak enerji seviyeleri değiştirilebilir. Kuantum noktalı güneş pillerinin verimini arttırmak için noktaların kaynaştırılması ile daha fazla soğurma yapılmıştır. Bu yöntemle akım sürüldüğünde çok eklemli güneş pillerine göre çok fazla verim sağlayabilir (Öztürk 2013).

1.6. Organik Güneş Pili Teknolojisinin İnorganik Güneş Pili Teknolojisine Göre Avantajları

- Silisyum güneş pili teknolojisinin hücre boyutundan güneş paneli üretim boyutuna hâkim olmadığımız için maliyetler çok fazla iken organik güneş pillerinde hücre boyutundan güneş paneli üretim teknolojisine tamamen hâkim olduğumuz için üretim maliyetleri çok düşüktür.
- Organik güneş pillerinin ilk kurulum maliyeti silisyum tabanlı inorganik güneş pillerine göre daha ucuzdur.
- Silisyum tabanlı inorganik güneş pillerinde amortisman süreleri 3-4 yıl iken organik güneş pillerinde amortisman süreleri 3-4 aydır.
- Silisyum tabanlı inorganik güneş pillerinin geri dönüşümü çevre kirliliğine sebep olurken organik güneş pillerinde kullandığımız nano materyaller tamamen çevre dostu olduğundan geri dönüşümleri daha kolaydır.

1.7. Organik Güneş Pilleri

1.7.1. Organik Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışma İlkesi

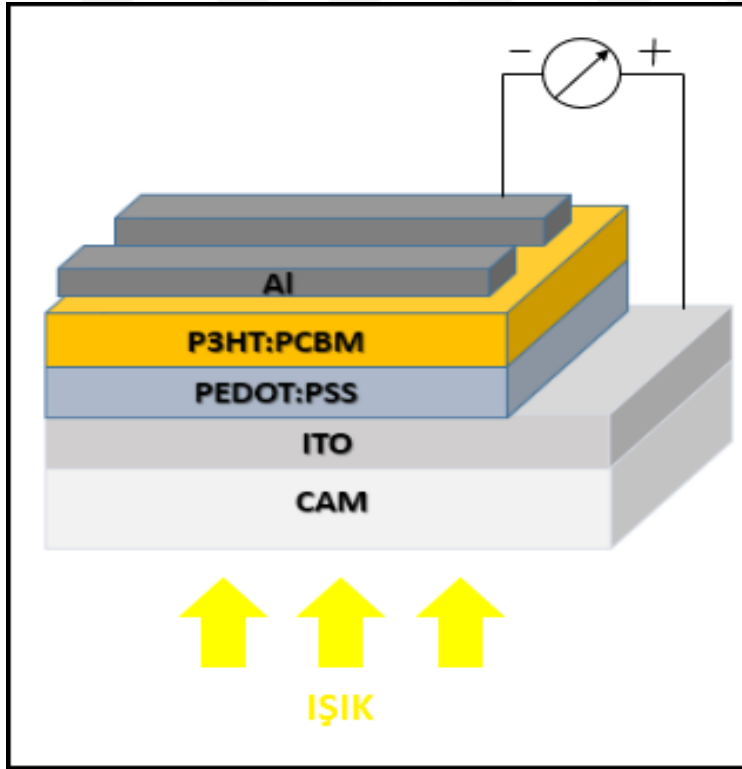
Günümüzde enerji tüketiminin ve ihtiyacının arttığı dünyamızda özellikle son 2-3 yılda organik yarı iletkenlerden elde edilen güneş pilleri ile bu ihtiyacın karşılanmasında önemli rol oynayabileceklerini ispatladılar. İnce filmlerden oluşan güneş pillerinde diğer organik yarı iletken cihazlar gibi farklı film kaplama metotları, birçok polimer ve bunların karışımı denenmiştir. P3HT yarıiletken polimeri ve bir C₆₀ türevidir olan PCBM'in homojen bir çözelti halinde yüzeye kaplandığı metodun şimdiye kadar en yüksek güç dönüşüm verimi sağladığı görülmüştür. ABD'li Konarka firması şu an için %5 olan bu güç

1. GİRİŞ

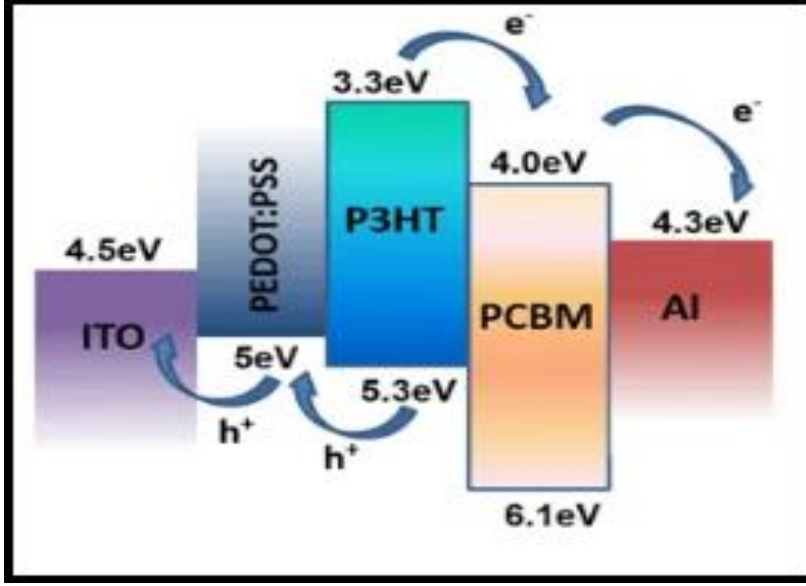
dönüşüm verimine ulaşarak bu tip güneş pillerini geliştirmek ve üretmek amacıyla kurulan ilk firma olma özelliğini taşımaktadır. Birkaç yıl içerisinde güç dönüşüm veriminin %2'lerden %5'lere geldiği düşünülürse ve %10 verimlilik hedefiyle sürdürülen çalışmalarla daha birçok ticarî firmanın organik güneş pillerine yatırım yapması beklenmektedir. Oldukça hafif olmaları sayesinde esnek yüzeyler üzerine kaplanması elde edilen P3HT:PCBM tabanlı organik güneş pilleri, giyilebilir modüller biçiminde kullanılabilir. Organik güneş pillerinin rulodan-ruloğa üretim sistemleriyle düşük maliyetle elde edilebilecek olmasından dolayı ve taşınabilir elektronik aygıtları hareket halindeyken bile şarj edebilecek enerjiyi sağlayabilecek olmasından dolayı bilhassa enerjiye ulaşmakta zorlanan bol güneşli ama fakir Afrika ülkelerinde yaşam kalitesinin artmasına önemli katkı sağlayabilecektir. P3HT:PCBM aktif tabaka karışımının iki elektrodun arasına sandviç edilmesiyle meydana gelen bir organik güneş pilinin aygıt yapısı Şekil 1.3 ve enerji band diyagramı Şekil 1.4'deki gibidir. Saydam ve esnek ITO kaplı cam yüzey üzerine sırasıyla boşluk taşıyıcı tabaka olarak PEDOT:PSS, aktif tabaka karışımı olarak P3HT:PCBM ve ardından son olarak alüminyumun kaplanması ile organik güneş pili üretilmiş olur. Güneş'ten gelen fotonlar cam, ITO ve PEDOT:PSS tabakalarından geçerek P3HT:PCBM aktif tabakasına ulaştıklarında, sahip oldukları enerjiyi elektron-boşluk çiftleri olan eksitonları oluşturmak için kullanırlar. Alüminyum ve ITO elektrodlarının iş fonksiyonu seviyeleri arasındaki farkın neden olduğu elektrik alan etkisiyle, bu elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılarak elektronlar alüminyum, boşluklar ise ITO elektrodu üzerinden taşınmasıyla devrede akımın akmasını sağlayarak foton enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur. Organik güneş pillerinde, güneşten gelen fotonların çoğunun yüzeyden ve alüminyum elektrottan geri yansması ve ITO tabakasının yüksek yüzey direncine sahip olması çözüme kavuşturulması beklenen başlıca problemlerdir. ITO, hem ışığı geçiren hem de iletken bir malzeme olmasından dolayı güneş pilleri, LCD ve OLED gibi optoelektronik uygulamalar için çok önemli bir yere sahiptir. Ancak cam ve PET gibi yüzeylere püskürtülen (sputtering) ITO'nun yüksek yüzey direncine sahip olması nedeniyle organik güneş pili uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan seri bağlı modüllerde önemli güç kayıplarına sebep olmaktadır. Bu problemi gidermek için tavsiye edilen karbon nano-tüp gibi materyaller ticarî beklentilerin karşılanması noktasından çok uzakta bulunmakta birlikte başarılı sonuçlar vermektedir. Güneşten gelen fotonların sadece az bir miktarının P3HT:PCBM ince filmi tarafından soğurulması ise diğer bir sorundur. Yaklaşık olarak 100 nm kalınlığa sahip filmin kalınlığının artırılması soğurulan foton miktarının artmasını sağlar fakat bu da güneş pili

1. GİRİŞ

hücresinin seri direncini arttırdığından dolayı pek ilgi çekici bir yöntem oluşturmamaktadır. Güneşten gelen ışığın daha yüksek bir kısmının hücre içerisine girmesi ve içerisinde daha fazla kalmasını sağlayacak yöntem ve malzemeler üzerinde yapılan araştırmalar bu konuda asıl gelecek vaat eden çalışmalardır. ITO'nun yüzey direncini düşürmek için BUMEMS Laboratuvarı'nda her bir güneş pilinin ITO elektrodu üzerine ince bir altın film kaplanmış olup birbiriyle bağlantılı ince yollar halinde şekillendirilmiştir ve böylece ITO tabakasının uç noktalarından toplanan boşluklar düşük dirençli altın yollar üzerinden taşınması ile seri bağlı güneş pillerinin toplam seri direnci büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Organik güneş pilleri üzerine yapılan yoğun araştırmalarla bu konuda alınacak mesafeyle geleceğin güvenilir ve temiz enerji seçeneklerinden birisi olacağı ve yenilenebilir enerji pazarına hızlı bir giriş yapması beklenmektedir (Mert ve Mutlu 2018).



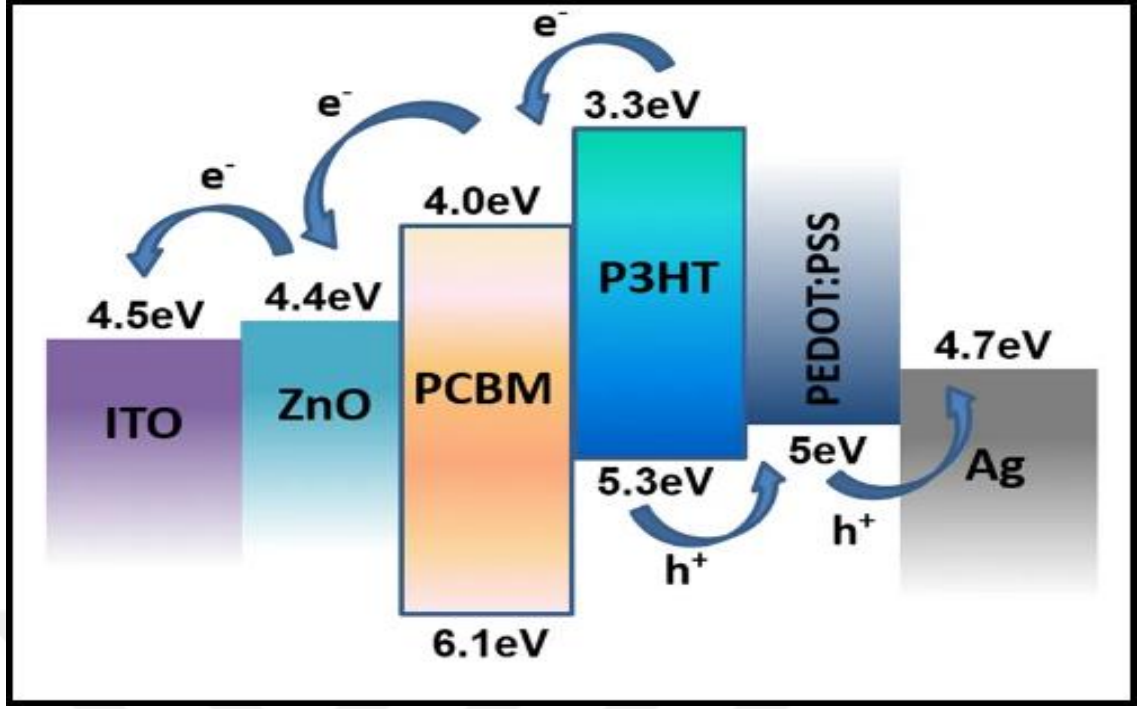
Şekil 1.3. P3HT:PCBM tabanlı klasik OPV'nin aygıt yapısı.



Şekil 1.4. P3HT:PCBM tabanlı klasik OPV tabakalarının enerji band diyagramı.

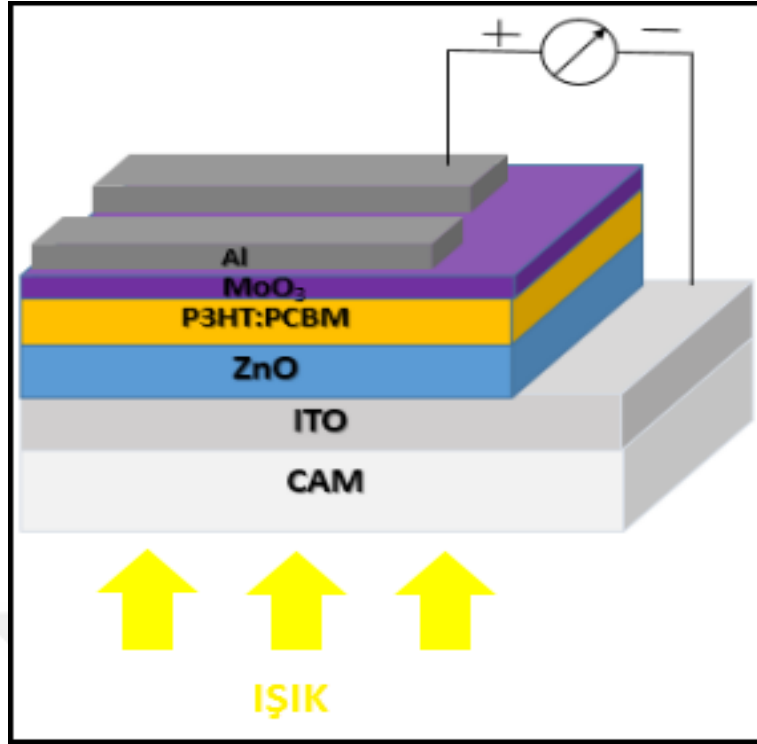
1.7.2. Ters Çevrilmiş (Inverted) Organik Güneş Pilleri

Ters çevrilmiş organik güneş pilleri ya da inverted organik güneş pilleri (I-OPV) olarak bilinen organik güneş pillerinin (OPV) farklı bir tasarım şeklidir. Bir önceki bölümde bahsedilen klasik güneş pili aygıtının arayüzdeki yük birikmesinin neden olduğu rekombinasyon kayıplarını minimuma indirmek, verimini daha da arttırmak ve daha kararlı organik güneş pili elde etmek için ters çevrilmiş (inverted) aygıt adıyla geçen ve yük toplama işleminin ters yüz edildiği bir aygıt tasarımı geliştirilmiştir. Bu aygıtta boşluk toplayıcı tabaka olarak ITO yerine alüminyum (Al), gümüş (Ag) veya altın (Au) gibi metal elektrotlar görev yapar. Elektron taşıma tabakası olarak ITO ve katot olarak da önceki klasik aygıttaki ITO ile aktif tabaka arasında ZnO ya da TiO₂ gibi kararlı iş fonksiyonuna sahip oksitli yarıiletken malzemeler kullanılabilir (Hau et al 2008). Şekil 1.5'de P3HT:PCBM tabanlı bir ters çevrilmiş OPV'nin enerji band diyagramının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.5. P3HT:PCBM tabanlı ters çevrilmiş OPV tabakalarının enerji band diyagramı.

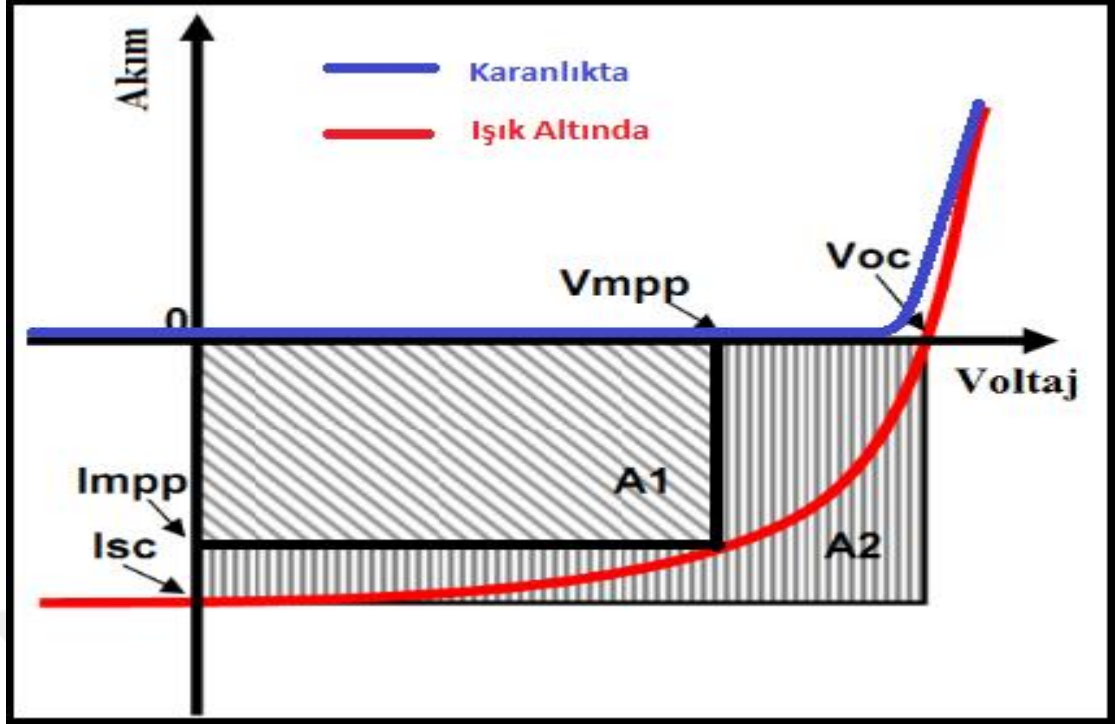
Ters çevrilmiş organik güneş pillerinde elektron ve boşluklar geleneksel organik güneş pillerindeki hareket yönlerinin tam tersine hareket ederler yani elektronlar ITO tarafından toplanır ve ITO katot olur. Yüksek iş fonksiyonuna sahip metal anot tarafından ise boşluklar toplanır. Bu aygıt yapısında ZnO ve TiO_2 gibi kararlı iş fonksiyonuna sahip metal oksit yarıiletkenler ile ITO yüzeyi modifiye edilir ve bu tabaka negatif elektrot gibi davranır. Bu tabaka boşluk engelleme tabakası ya da elektron taşıma tabakası (ETL) olarak görev yapar. Anodik elektrot olarak MoO_3 , V_2O_5 , PEDOT:PSS ve WO_3 gibi bazı yüksek iş fonksiyonlu organik ve geçiş metal oksitler aktif tabakanın üzerine kaplanır ve bu tabaka da elektron engelleyici tabaka ya da boşluk iletim tabakası (HTL) olarak görev yapar. Aynı zamanda bu boşluk iletim tabakası (HTL) oksijen kararsızlığını ortadan kaldırarak metalin aktif tabakaya difüzyonunu engellemektedir (Kim et al. 2014). Daha sonra hava ortamına dayanıklı ve aygıt kararlılığında etkili olan yüksek iş fonksiyonlu alüminyum (Al), gümüş (Ag) veya altın (Au) gibi metaller bunların üzerine kaplanır. Ters çevrilmiş (inverted) yapı, geleneksel organik heteroeklem güneş pillerinde bulunan PEDOT:PSS/ITO arayüzey kararsızlığını ortadan kaldırarak hem hücre verimine hem de hücre ömrüne olumlu etkiler sağlar (Nelson 2011). P3HT:PCBM tabanlı ters çevrilmiş OPV'nin aygıt mimarisi Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. P3HT:PCBM tabanlı ters çevrilmiş OPV'nin aygıt yapısı.

1.8. Güneş Pili Karakteristikleri

Güneşten gelen fotonlara benzer bir ışık altında akım-voltaj (I-V) grafiğiyle güneş pillerinin karakterizasyonu yapılmaktadır. Akım-voltaj eğrisiyle güneş pilinin verimi (η), açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası (M_{pp}) ve dolun faktörü (FF) gibi güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri elde edilir (Kietzke 2007). Şekil 1.7'de güneş pillerinin karanlıkta ve ışık altındaki I-V grafiği gösterilmiş olup bu I-V grafiğiyle elde edilen güneş pili parametreleri birbiriyle ilişkilidir. Şekil 1.7'de gösterildiği üzere küçük dikdörtgenin (A1) alanının büyük dikdörtgenin (A2) alanına oranı dolun faktörünü (FF) vermektedir.



Şekil 1.7. Karanlıkta ve ışık altında bir güneş pilinin I-V grafiği.

1.8.1. Güneş Pilinin Verimi

Güneş pilinin verimi, çıkış gücünün (P_{out}) güneş piline uygulanan giriş gücüne (P_{in}) oranı şeklinde ifade edilir ve η sembolüyle gösterilir. Yani kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}) ile dolum faktörünün (FF) çarpımının yani güneş pilinden çıkan toplam gücün (P_{out}) güneş piline uygulanan güneş ışığının gücüne (P_{in}) oranı ile hesaplanır. Güneş pilinin verimi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{IN}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

1.8.2. Kısa Devre Akımı (I_{sc})

Bir güneş pilinde gerilimin oluşmadığı ($V=0$) durumundaki akım değerine kısa devre akımı (I_{sc}) denir. Güneş pillerinde güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde önemli parametrelerden biride kısa devre akımıdır. Güneş pilleri tarafından soğurulan foton miktarı ve bu fotonun taşıyıcılara dönüşme oranı (dâhili kuantum verimi-IPCE) kısa

1. GİRİŞ

devre akımını belirler. Yük direnci sıfır iken meydana gelen akıma kısa devre akımı denir ve bundan dolayı güneş pilinin seri direnci (R_s) olabildiğince küçük olmalıdır.

1.8.3. Açık Devre Voltajı (V_{oc})

Açık devre voltajı, güneş pilinin açık devre olduğu zamandaki yani kısa devre akımının sıfır olduğu ($I_{sc}=0$) andaki ölçülen gerilim değerine denir ve V_{oc} ile gösterilir. Genellikle açık devre gerilimi 0,5-1,5 V aralığında değerler alır. Güneş pili devresi açık olduğu durumda yani kapalı değilken aydınlatılırsa elektron ve boşluklar ayrılır. Sırasıyla bu elektron ile boşluklar düşük ve yüksek iş fonksiyonlarına doğru akarlar. İki elektrodun iş fonksiyonları arasındaki fark açık devre geriliminin ulaşacağı en yüksek değerdir. Organik materyallerde alıcının LUMO seviyesinin azaltılması ve HOMO seviyesinin artırılması açık devre geriliminin (V_{oc}) artmasına neden olur. Organik tabanlı güneş pillerinde V_{oc} , aktif katmanın nano-morfolojisinden etkilenebilmektedir (Liu et al. 2001). Açık devre geriliminin dolaylı yoldan ısınım şiddetine bağlı olmasının nedeni devreden akım akmadığı anda ölçüm alınmasından dolayıdır.

1.8.4. Dolum Faktörü (FF)

Güneş pillerinin seri direnci ve organik katmanlardaki yük taşıyıcıların hareketliliği ile güneş pillerinin dolum faktörü belirlenir. Güneş pillerinin kalitesini dolum faktörü belirler. OPV'lerde dolum faktörünün değeri yaklaşık olarak 0,55-0,75 arasında değişmektedir. Dolum faktörü (FF), maksimum voltaj (V_{mpp}) ile maksimum akımın (I_{mpp}) çarpımının açık devre voltajı (V_{oc}) ile kısa devre akımının (I_{sc}) çarpımının oranına direkt olarak bağlı olup aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (2.2)$$

Dolum faktörünün 0,8 ve üzerindeki değerlerdeki dolum faktörü oranı iyi bir değer olarak kabul edilmektedir çünkü dolum faktörünün 1'e eşit olması yalnızca teoride mümkündür. Üretilen güneş pili cihazları ideal diyot karakteristiğine ne kadar yakın ise dolum faktörü oranında bir o kadar yüksek değere sahip olur ve bu FF oranı ne kadar yüksek olursa üretilen güneş pili cihazlarının verimi de büyük olur. Güneş pili üretiminde kullanılan

1. GİRİŞ

materyallerin kontak durumunda oluşturduğu paralel ve iç direncin dolun faktörüne çok önemli etkileri vardır. Elde edilen güneş pilinde akımın aygıt üzerinden akmasının sebebi paralel direncin çok yüksek olmasından kaynaklanır. Güneş pilinin dolun faktörü ile verimi doğru orantılı olup dolun faktörünün artmasıyla güneş pilinin verimi artar. Taşıyıcı mobilitelerinin artması, yüksek FF değerlerinin elde edilmesinde çok önemli bir etkiye sahiptir (Kietzke 2007).

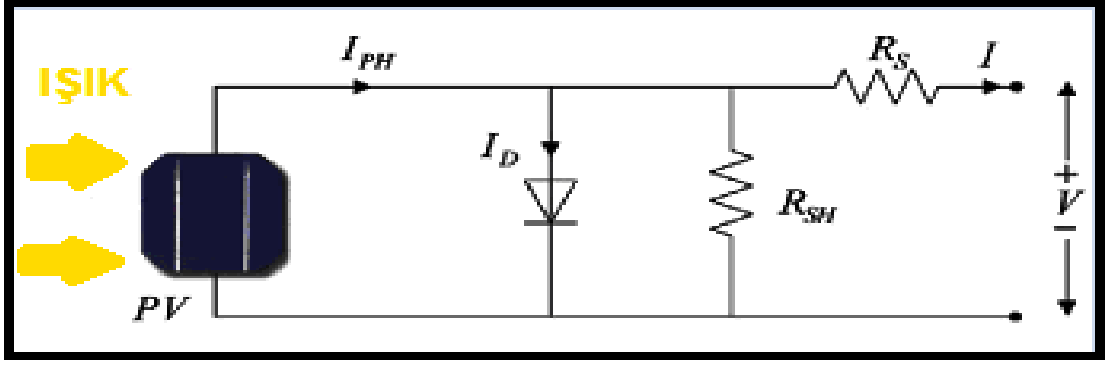
1.8.5. Maksimum Güç Noktası (M_{pp})

Güneş pilinin I-V eğrisinde voltajın ve akımın maksimum olduğu nokta maksimum güç noktası (M_{pp}) olarak adlandırılır. Bu noktada elde edilen voltajın güneş pilinin maksimum voltajı (V_{mpp}), elde edilen akımın güneş pilinin maksimum akımı (I_{mpp}) olup bu ikisinin çarpımı ile maksimum güç elde edilir. Güneş pili veriminin hesaplanmasında kullanılan maksimum güç değeri aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$M_{pp} = V_{mpp} \times I_{mpp} \text{ (mW)} \quad (2.3)$$

1.8.6. Güneş Pillerinin Elektriksel Eşdeğer Devresi

Şekil 1.8'de fotovoltaik güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi gösterilmektedir. Fotovoltaik güneş pilini doğrultucu bir diyoda paralel bağlanmış bir akım kaynağı olarak güneş pili eşdeğer devresinde gösterilmiştir. Bu eşdeğer devrede R_{sh} ve R_s güneş pilinin verimine etki eden paralel direnç ve seri direnç değerlerini gösterir. Paralel direnci kristal içerisindeki kusurlar meydana getirirken, seri direnci ise yarı iletken malzeme içerisindeki katmanların ve yarı iletkene yapılan kontaklar iç dirençleri meydana getirmektedir. Güneş pillerinin açık devre voltajı ve dolun faktörünü, paralel direnç (R_{sh}) düşürürken seri direnç (R_s) ise güneş pillerinin kısa devre akımı ve dolun faktörünü düşürmektedir. Güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresindeki tüm parametreler ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlıdır.



Şekil 1.8. Fotovoltaik güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi.

Yüksek Lisans tezi kapsamında yaptığım bu çalışmanın amacı düşük maliyetli ekosisteme zarar vermeyen ve kolay elde edilebilir malzemeler (ITO, PEDOT:PSS, çinko oksit, P3HT:PCBM, molibden oksit, alüminyum) kullanılarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren geleneksel heteroeklem organik güneş pili ve ters çevrilmiş (inverted) organik güneş pili aygıtlarının fabrikasyonları ve karakterizasyonlarını yapmaktır. Çalışma kapsamında ters çevrilmiş organik güneş pili yapısını oluşturan elektron taşıyıcı tabaka, boşluk taşıyıcı tabaka ve aktif tabakalarının optiksel, morfolojik ve yapısal karakterizasyonları yapıldı. Daha sonra elde edilen bu ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pili aygıtlarının karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık altındaki J-V ölçümleri ile elde edilen organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri incelendi.

Yüksek Lisans tez çalışmasının birinci kısmı, konunun amacı ve önemini belirten ve teorik bilgi içeren “Giriş” kısmından oluşmaktadır. İkinci kısımda ise konu ile ilgili yapılan literatür çalışmalarını içeren “Kaynak Özetleri” kısmından oluşmaktadır. Üçüncü kısım deneysel olarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pillerinin (I-OPV) elde edilmesi için numune hazırlanması ve fabrikasyon aşamalarını anlatan “Materyal ve Yöntem” kısmından oluşmaktadır. Dördüncü kısımda ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pili aygıtında kullanılan elektron taşıyıcı tabaka, boşluk taşıyıcı tabaka ve aktif tabaka malzemelerinin AFM, XRD, soğurma ve profilometre ölçümleri ve fabrikasyonu yapılan ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV aygıtlarının karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık altındaki J-V ölçümlerini içeren “Araştırma Bulguları ve Tartışma”

1. GİRİŞ

kısımından oluşmaktadır. Sonuç ve Öneriler kısmında ise elde edilen araştırma bulgularının genel değerlendirilmesi yapılarak tez çalışması tamamlanmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Park et al. (2010) tarafından yapılan çalışmada ilk önce kaynak olarak çinko asetat ($Zn(CH_3COO)_2$), bir çözücü olarak 2-metoksi etanol ($C_3H_8O_2$), bir dengeleyici madde olarak mono-etanol amin (C_2H_7NO) kullanılarak ZnO sol hazırlandı. Bunlar $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir saat boyunca karıştırıldı. Çözeltideki çinko asetatın molar konsantrasyonu $0,05\text{ M}$ idi. ZnO ince filmleri, esnek alt tabaka (ITO/PES) üzerine 4000 rpm 'de 50 s boyunca dönel kaplama kullanılarak kaplandı. Kaplanan filmler, her bir kaplamada $150\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika boyunca ısı işlem görmüştür. İkinci olarak, 2000 rpm 'de 120 saniye boyunca dönel kaplama ile aktif tabakayı kaplamak için bir P3HT:PCBM karışımı çözelti hazırlandı. P tipi bir malzeme olarak kullanılan poli (3-hekziltiyofen) (P3HT) ve n tipi bir malzeme olarak kullanılan [6,6] – fenil C_{61} bütirik asit metil ester (PCBM), bir gün boyunca 1:1 bir ağırlık oranında klorobenzen'de çözüldürüldü, bu da P3HT:PCBM klorobenzen içinde karıştı. Aktif tabakanın $150\text{ }^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklıkta 30 dakika boyunca tavlanmasından sonra boşluk seçici bir tabaka olarak 20 nm 'lik bir MoO_3 tabakası ve bir 100 nm Au tabakası bir gölge maskesi vasıtasıyla termal buharlaştırma ile kaplandı. Ters çevrilmiş organik güneş pilinin (IOSC) yapısı (ITO)/ZnO/P3HT:PCBM/ MoO_3 /Au idi. Optik geçirgenlik spektrumları bir UV-VIS spektrofotometresi (Shimadza UV-3600) kullanılarak kaydedildi. ZnO ince filmlerinin kalınlığı ve mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ölçüldü. Ayrıca fotovoltaiik performans ölçüldü. Sonuç olarak bu makalede sol-jel yöntemiyle hazırlanan ZnO ince filmlerin yüzey morfolojileri ve optik nitelikleri araştırılmış ve inorganik-organik güneş pili yapıları için optimize edilmiştir. Bir ZnO ince film tabakasının geçirgenliği ITO/PES alt tabakasının geçirgenliğinden yaklaşık %10 daha fazla gelişme gösterdi. Geçirgenlik üç kat tabakaya kadar yaklaşık %10 daha fazla gelişme göstermiştir. Sol-jel metodunu kullanarak ZnO ara tabakasının geçirgenliği ve optimum kalınlığı bulundu. ZnO ara tabakasının ışıktaki toplama ve elektron hareketliliğini karışık olarak etkilediğinden dolayı ters çevrilmiş organik güneş pillerinin (I-OSC) kısa devre akım yoğunluğunu (J_{sc}) etkiledi.

Zhang et al. (2010) tarafından yapılan çalışmada organik güneş pili (OPV) aygıtları metanol, aseton, TCE ve DI-su'da ultrasonik olarak temizliği yapılmış cam yüzeyi üzerine kaplanmış elektriksel direnci $15\ \Omega$ olan desenli indiyum kalay oksit (ITO) üzerine fabrikasyonu yapıldı. Elektron seçici bir ZnO tabakası için 5 dakika boyunca

2. KAYNAK ÖZETLERİ

oksijen plazma işleminden sonra bir sol-jel türevinin ilki olan ZnO döndürülerek kaplandı. Bir çinko kaynağı olarak, çinko asetat ($Zn(O_2CCH_3)_2$) kullanılmıştır. Kullanılan çözücü ve dengeleyici sırasıyla 2-metoksi etanol ($CH_3OC_2H_4OH$) ve mono-etanol amin (MEA, C_2H_7NO) dir. İlk olarak ZnO, ITO camı üzerine 5000 rpm'de 30 s boyunca döndürülerek kaplandı ve daha sonra 250 °C sıcaklıkta ZnO ince filmi imal edilmesi için tavlandı. ZnO tabakasının kalınlığını kontrol etmek için döndürülerek kaplama işlemi dört kez tekrar edildi. Aktif tabakayı hazırlamak için, P3HT (poli (3-heksiltiyofen), Rieke Metals. Inc.) and PCBM ((6,6) – fenil C_{61} bütirik asit metil ester, Nano-C) klorobenzen içinde 40 °C'de 24 saat boyunca 20 mg/ml'lik bir nihai konsantrasyon verecek şekilde ayrı ayrı çözüldü. Elde edilen çözeltiler daha sonra 1:0,6 (% hacim) oranında karıştırıldı ve döndürülerek kaplama için hazırlandı. Katı heteroeklem organik güneş pili (OPV) aygıtları için aktif tabaka 1500 rpm'de 30 s boyunca döndürülerek kaplandı. Daha sonra aktif tabakanın üzerine MoO_3 ve 100 nm kalınlığındaki Al tabakaları vakumlu buharlaştırma ile kaplandı. Üretilen organik güneş pili (OPV) aygıtlarının aktif alanı 0,09 cm^2 'dir. Son olarak, üretilen aygıtlar içi azot ile dolu bir eldivenli kabin içinde 150 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca tavlansmıştır. Aygıtların güç dönüşüm verimi (PCE) ölçümleri AM 1.5 ortam koşullarında güneş simülatörü (ABET Sun2000 Solar Simulator) ile beyaz ışık aydınlatması altında gerçekleştirildi. Burada bildirilen PCE değerleri spektral uyumsuzluk için düzeltilmiştir ancak sertifikalandırılmamıştır. Sonuç olarak MoO_3 boşluk seçici bir tabaka olarak ve bir sol-jel türevi olan ZnO ise elektron seçici tabaka olarak ters çevrilmiş (inverted) yapı organik güneş pilleri üretildi. Ters çevrilmiş yapı ITO/ZnO/P3HT:PCBM/ MoO_3 /Al dir. ZnO ve MoO_3 tabakalarının en uygun kalınlıkları sırasıyla 100 nm ve 5 nm olarak bulundu. En yüksek güç dönüşüm verimi, tabaka kalınlığı optimize edilmiş AM 1.5 1000 W/m^2 ışık altında %3,32 olarak elde edildi.

Zhang et al. (2011) tarafından yapılan çalışmada ZnO prekürsor çözeltisini üretme prosedürü şöyledir: öncü olarak çinko asetat dehidrat [$Zn(CH_3COO) \cdot 2H_2O$] (%99,95 Fluka) ve çözücü olarak etanol [CH_3CH_2OH] (%99,5+%Aldrich) karışımı hazırlandı. 0,05, 0,1, 0,2 ila 0,3 M arasında farklı konsantrasyonlarda çinko asetat dehidrat kullanılmıştır. Çözelti dikkatli bir şekilde 3 saat boyunca karıştırıldı ve 80 °C'de ısıtıldı. Daha sonra çözeltilere bir sol dengeleyici olarak etanolamin [$NH_2CH_2CH_2OH$] (%99 + %Sigma-Aldrich) eklenmiştir. Ardından çözelti tam karışması için 20 saatten fazla bir

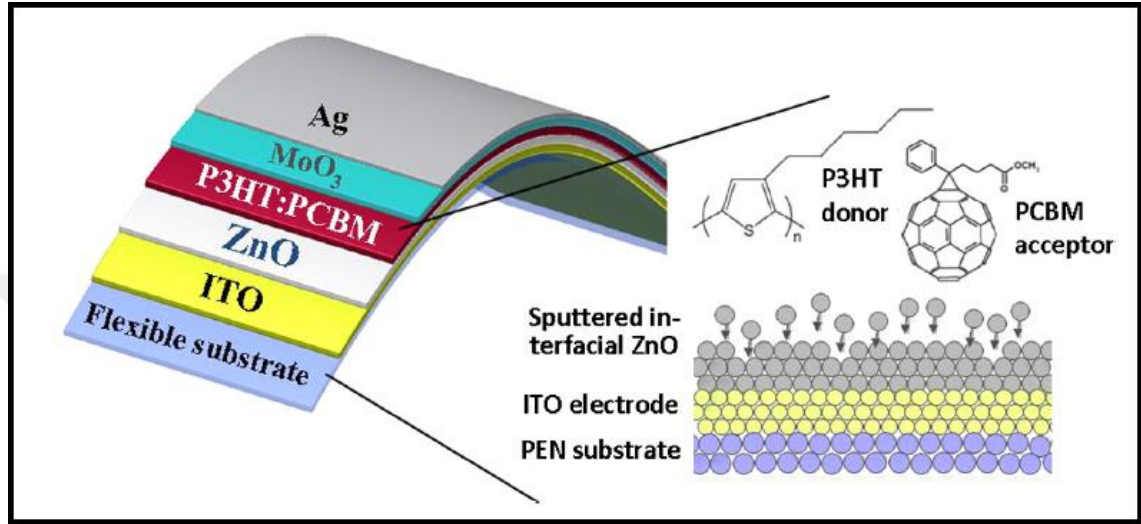
süre boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırıldı ve 80 °C’de ısıtıldı. Aygıt fabrikasyon süreci ise şöyledir: ITO kaplı cam yüzeyler ilk önce yaklaşık 15 dakika boyunca ultrasonik bir banyoda sırasıyla deterjan, deiyonize su, aseton ve izopropanol ile temizlendi. Daha sonra ZnO prekürsör çözeltisi ITO yüzeyinin üzerine döndürülerek kaplandı ve ardından ortam koşulları altında topaklaştırma yapıldı. Kaplama adımı kalınlığı yaklaşık 110 nm’de kontrol etmek için birkaç kez tekrar edildi. Daha sonra alt tabakalar fotoaktif tabakanın döndürülerek kaplanması için eldivenli kabin içerisine aktarıldı. P3HT:PCBM çözeltisi 1:0,8 ağırlık oranında 1,2-diklorobenzen içinde 100 nm kalınlığında bir karışım tabakası oluşturmak için eldivenli kabin içinde ZnO arayüzey tabakasının üstüne döndürülerek kaplandı. 10 nm kalınlıkta MoO₃ ve 80 nm kalınlıkta Ag tabakaları 2x10⁻⁴ Pa taban basıncı altında bir gölge maskesi vasıtasıyla termal olarak buharlaştırılmıştır. Sonunda tamamlanan aygıtlar azot içerisinde tavlanmıştır. Akım yoğunluğu-voltaj (J-V) karakteristikleri bir Thorlabs optik güç ölçer tarafından kalibre edilmiş, 100 mW/cm² güneş ışığı şiddetinde AM 1.5 altında bir Keithley 2400 kaynak ölçüm ünitesi kullanılarak ölçülmüştür. Sonuç olarak ZnO filmleri basitçe bir prekürsör çözeltisinin döndürülerek kaplanması, ardından ortam koşulları altında topaklanması ile elde edildi. Ters çevrilmiş organik güneş pili hücrelerinin performansının büyük ölçüde ZnO prekürsör çözeltisinin konsantrasyonuna ve topaklanma sıcaklığına bağlı olduğu tespit edilmiştir. 0,1 M’lık bir sol konsantrasyonundan türetilen ve 10 dakika boyunca 350 °C’de topaklanan ZnO elektron seçici tabakasını kullanarak ters çevrilmiş organik güneş pili (OPV) hücresi V_{oc} = 0,613 V, J_{sc} = 8,64 mA/cm², FF = %53,2 ve PCE = %2,82’lik bir optimum performans gösterdi.

Jouane et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada anodik ve organik aktif tabakaları birleştiren, esnek alt tabaka içeren aygıt yapısı Şekil 2.1’de gösterilmiştir. ZnO filmi bir ITO kaplı esnek tabaka ve katı heteroeklem organik güneş pillerinin karışımı olarak bir P3HT:PCBM aktif tabaka arasına entegre edildi. Yapının üst metalik anodu gümüşten (Ag) yapılmıştır ve molibden oksit (MoO₃) tabanlı bir arayüzey tabaka üzerine kaplanmıştır. Organik güneş pilinin (OSC) fabrikasyon aşamaları bundan sonra ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. ITO kaplı PEN (esnek) tabakaları (20 x 20 mm², < 15 Ω/sq.) (PECF-IP – Peccel Technologies, Inc.) ilk önce bir ultrasonik banyoda daha sonra deterjan, izopropil alkol ve deiyonize su (DI-su) ile temizlendi. UV ozon temizliği 30 dakika boyunca ayrıca uygulandı. Püskürtme için kullanılan ZnO target’i (Neyco

Co.'dan) %99,99 saflığa sahiptir. ZnO filmleri önceki çalışmalarda ayrıntılı olarak açıklandığı gibi çalışma basıncı, yüzey sıcaklığı ve kaplama gücü gibi farklı kaplama koşulları altında RF magnetron püskürtme ile PEN/ITO tabaları üzerine kaplandı. Püskürtme işlemi bir Argon (Ar) plazması kullanılarak yapıldı. Kaplamadan önce target yüzeyini temizlemek için 5 dakika boyunca bir ön püskürtme işlemi gerçekleştirildi. ZnO tabakaları, 100 W sabit bir RF gücünde püskürtülmüştür. Kaplama boyunca basınç yaklaşık 8×10^{-3} Torr'a sabitlendi ve alt tabaka sıcaklığı kabaca $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında tutuldu. ZnO'nun kalınlığı yaklaşık 54 nm'dir. ZnO kaplama işleminden sonra PEN/ITO/ZnO yapısı gibi hazırlanan numuneler 140 ve $180 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki farklı sıcaklıklarda bir kuvars tüp içinde sürekli bir oksijen akışı altında 1 saat boyunca tavlandı. Karşılaştırma yapmak için hazırlanan bir numune tavlansam ve referans olarak kullanılmıştır. Yapının geri kalanı (P3HT:PCBM/MoO₃/Ag) tüm numuneler için aynı şartlarda büyütüldü. P3HT:PCBM tabanlı fotoaktif tabaka, 120 nm kalınlığında bir tabaka oluşturmak için ZnO üzerine hava ortamında 2000 rpm'de döndürülerek kaplandı. Ağırlıkça 1:1 oranındaki P3HT ve PCBM çözeltileri 40 mg/ml konsantrasyonları kullanılarak diklorobenzen içinde hazırlandı. P3HT (Sigma Aldrich GmbH firmasından %98,5) ve PCBM (Nano-C, ABD üreticisinden PC₆₁BM) daha fazla arıtılmadan alındığı gibi kullanılmıştır. PEN/ITO/ZnO/P3HT:PCBM yapısı daha sonra azot ortamı altındaki eldivenli kabinde $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika boyunca tavlandı. Son olarak, MoO₃ (Sigma – Aldrich GmbH firmasından %99,99 saflığa sahip) ve Ag tabakaları bir gölge maskesi sayesinde sırasıyla yaklaşık 2×10^{-6} Torr bir vakumdaki termal buharlaştırma ile kaplandı. Molibden oksit (MoO₃) ve gümüş (Ag)'ün kalınlıkları sırasıyla 5 nm ve 120 nm olduğu tahmin edilmektedir. MoO₃'ü kaplama oranı 0,2 nm/sn dir. Son olarak aygıtın aktif alanı 9 mm^2 'dir. Sonuç olarak, esnek tabakaların (PEN/ITO) üzerine düşük sıcaklıkta püskürtme işlemiyle büyütülmüş ve farklı sıcaklıklarda tavlansam ara yüzey ZnO tabakalarını birleştiren ters çevrilmiş (inverted) organik güneş pillerinin performansları incelenmiştir. AFM ve XRD tekniklerini kullanarak, ZnO ve P3HT kristalit boyutlarının artmasına neden olan modifikasyonun sebep olduğunu, esnek alt tabakalar üzerine kaplanan ZnO filmlerinin uygun sıcaklıklar aralığında termal tavlama işlemleri ortaya koyuldu. Bu etkiler, ZnO/Aktif tabaka ara yüzeyinde P3HT ve PCBM arasında uygun faz ayrılmasına yol açar, bu etkiler hem PCBM difüzyonuna hem de P3HT kristalizasyonuna dayandırılabilir, alt tabakanın termal büyümesi ile ITO ve ZnO partikülleri difüzyon ile ayrıldı. Bunun bir sonucu olarak, ters çevrilmiş (inverted) organik güneş pillerinin fotovoltaj performansları J-V eğrilerinde gözlemlenen S-şekilli bükülmelerin 160 ve

2. KAYNAK ÖZETLERİ

180 °C arasında değişen termal tavlama sıcaklıkları ile ortadan kalkmasıyla kuvvetlice iyileştirildi. 160 °C’de ters çevrilmiş organik güneş pillerine uyan benzer koşullarda katı tabakalar üzerine hazırlanan hücrelerle benzer performans gösterdi. Bu sonuçlar esnek alt tabakalarda kuru büyütme teknikleriyle büyütülen ara yüzey malzemelerinin önemli yönlerinin altını çizer.

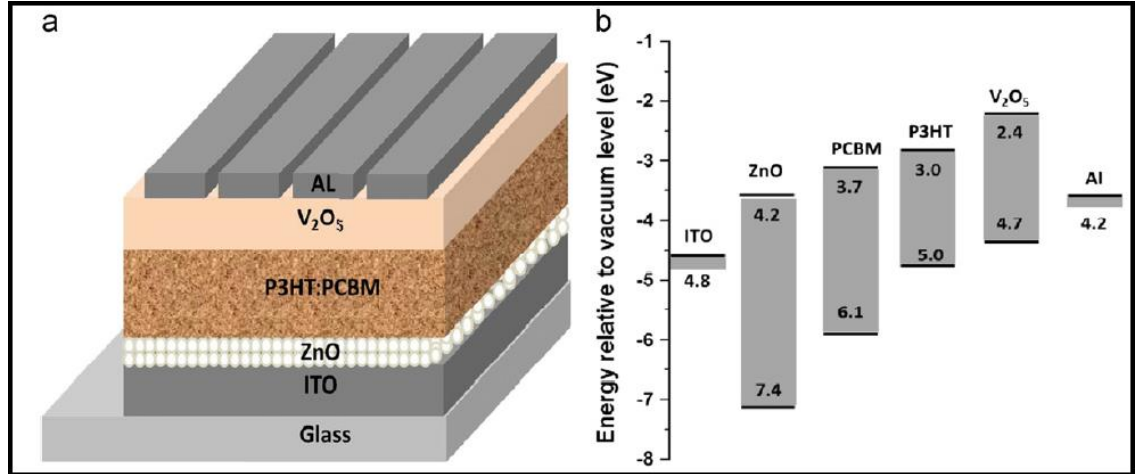


Şekil 2.1. Esnek bir tabaka üzerinde hazırlanan ters çevrilmiş (inverted) tipi organik güneş hücresinin aygıt mimarisi (Jouane et al. 2013).

Ibrahim et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada ters çevrilmiş (inverted) bir yapıda ZnO arayüzey tabakasına sahip aygıtlar (Şekil 2.2’de ITO/ZnO/P3HT:PCBM/V₂O₅/Al; bileşen malzemelerinin temel enerji seviyesi diyagramı ile birlikte gösterildi), aktif tabakanın katılaşması için farklı yöntemler kullanılarak üretildi. A aygıtındaki aktif tabakayı kaplama “yavaş-büyütme” tekniği ile hazırlandı. ZnO filminin üstüne 1,2 diklorobenzen içindeki bir P3HT:PCBM (1:1, w/w)’li çözeltisi döndürülerek kaplandı ve daha sonra çözücü buharlaştırma için kapalı bir Petri cam tabağı içerisinde 30 dakika boyunca kurutuldu; daha sonra filmler 30 dakika boyunca 130 °C’de tavlandı. B aygıtında “hızlı-büyütme” belirtilen aktif tabaka çözücü buharlaşması olmaksızın 30 dakika boyunca 130 °C’de doğrudan termal olarak tavlandı. C aygıtının aktif tabakası çözücü veya termal tavlama olmaksızın hazırlanırken, D aygıtının aktif tabakası A aygıtında olduğu gibi, sadece ITO yüzeyinde (yani ZnO ara tabakası olmaksızın) hazırlandı. Düzenli E aygıtının (ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/V₂O₅/Al) aktif tabakası A aygıtına benzer tarzda hazırlandı. Her aygıttaki aktif tabakanın kalınlığı yaklaşık olarak 200 nm’dir. V₂O₅ (%99,6 Alfa Aesar; 10 nm) ve Al (100 nm) tabakaları

2. KAYNAK ÖZETLERİ

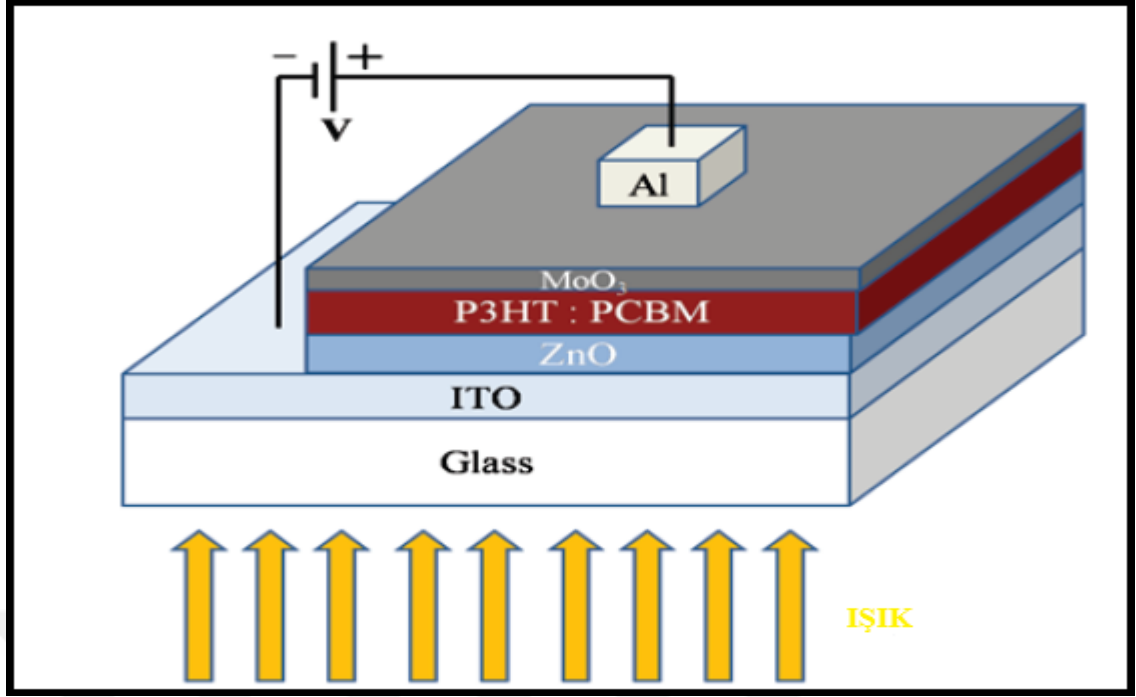
vakum altında (basınç: $< 6 \times 10^{-6}$ Torr) bir gölge maskesi yardımıyla sırasıyla termal olarak buharlaştırıldı. Her aygıtın aktif alanı 10 mm^2 idi; Xenon (Xe) lamba tabanlı güneş simülatörünü (Thermal Oriol 1000 W) kullanarak AM 1.5 G aydınlatma koşulları altında bir eldivenli kabin içinde simule edilen aygıtların performansları test edildi. Dış olay foton-akım verimliliği (IPCE) spektrumları kısa devre koşulları altında kaydedildi. Aygıtlar eldivenli kabinden çıkarılmadan önce UV jel ve şeffaf cam içinde kapsüllenmiştir. Işık kaynağı bir 450 W Xe lamba (Oriol Instruments, Model 6123NS) idi. Monokromotörden (Oriol Instruments, Model 74100) çıkan ışık test edilen fotovoltaiik hücreye odaklandı. Sonuç olarak ZnO nano partiküllerini temiz ıslak öğütme yöntemi, ucuz ve basit bir şekilde başarıyla sentezlendi. Hazırlanmış ilgili çözelti ZnO ara tabakaları PCBM'den elektronları toplar ve boşlukları etkili bir şekilde engeller. Bu üretim süreci vakum işlemi gerektirmez, oldukça düşük bir tavlama sıcaklığı ($150 \text{ }^\circ\text{C}$) gerektirir ve PEDOT:PSS'e olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Ayrıca, hızla büyüyen aktif tabakadaki dikey faz ayrılmasının derecesi, ZnO tabakasının yüzey morfolojisinden bağımsızdır ve yavaş büyüyen verimli bir aygıt ile kıyaslanması sağlandı; böylece elde edilen güneş pillerinin maliyeti ve fabrikasyon süresi azaldı. Böylece nano partikül hazırlama yöntemi, PV teknolojilerinin maliyetini düşürmeye katkıda bulunabilecek çok umut verici bir yöntemdir.



Şekil 2.2. (a) Aygıt yapısı (b) Aygıt üretimi için kullanılan bileşen malzemelerinin enerji band diyagramı (Ibrahim et al. 2013).

Gollu et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada P3HT:PCBM fotoaktif karışımı eldivenli kabinde hazırlandı. Fotoaktif karışımın hazırlanmasında düzenli olarak P3HT (Ortalama 64000 Mw, (Aldrich)) ve PCBM (Nano C) kullanıldı. P3HT:PCBM fotoaktif

karışımı (1:1 ağırlık oranında) diklorobenzen içinde 20 mg/ml'lik konsantrasyon hazırlandı. Daha sonra fotoaktif karışım, homojen karışımları elde etmek için 60 °C'de gece boyunca karıştırılarak tutuldu. Güneş pili fabrikasyonu için, ilk önce geçirgen elektrot ITO kaplı camlar, 15 dakika boyunca sırasıyla sabun çözeltisi, aseton, izopropil alkol ve metanol içerisinde ultrasonik olarak temizlendi ve daha sonra %99,99 saflıkta azot gazı akışı altında kurutuldu. Bu oksijen plazmasından sonra temizlenmiş ITO kaplı camlar 100 W gücünde 10 dakika boyunca işleminden geçirildi. Daha sonra ZnO nano partikülleri ITO cam alt tabakalar üzerine döndürülerek kaplandı ve 150 °C'de 15 dakika boyunca tavlandı. Daha sonra fotoaktif P3HT:PCBM karışımı 2000 rpm'de 1 dakika boyunca döndürülerek kaplandı ve filmler daha sonra çeşitli koşullarda tavlandı. Daha sonra, ince bir boşluk taşıma tabakası olan MoO₃, fotoaktif malzeme üzerine termal olarak ($<3 \times 10^{-6}$ mbar) buharlaştırıldı ve ardından fotoaktif malzeme üzerine gölge maskesi kullanılarak Al üst elektrodu buharlaştırıldı ve Şekil 2.3'de gösterildiği gibi hücrelere son cihaz konfigürasyonu verildi. Filmler, çeşitli tavlama koşullarının aşağıda belirtildiği gibi tanımlandıktan sonra karakterize edildi. P3HT:PCBM fotoaktif karışımının soğurması, UV-VIS-NIR spektrofotometresi (Perkin-Elmer Lambda 750) ile araştırıldı. P3HT:PCBM filmlerinin fotoaktif karışımlarının yüzey morfolojisi, mod atomik kuvvet mikroskobu (AFM) (nano kapsam IV, Veeco System) ile incelenmiştir. Empedans spektroskopisi (IS) ölçümleri, oda sıcaklığında, Alfa A frekans analizörü (Novocontrol Technologies Germany) kullanılarak 1 Hz – 1 MHz frekans aralığında oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

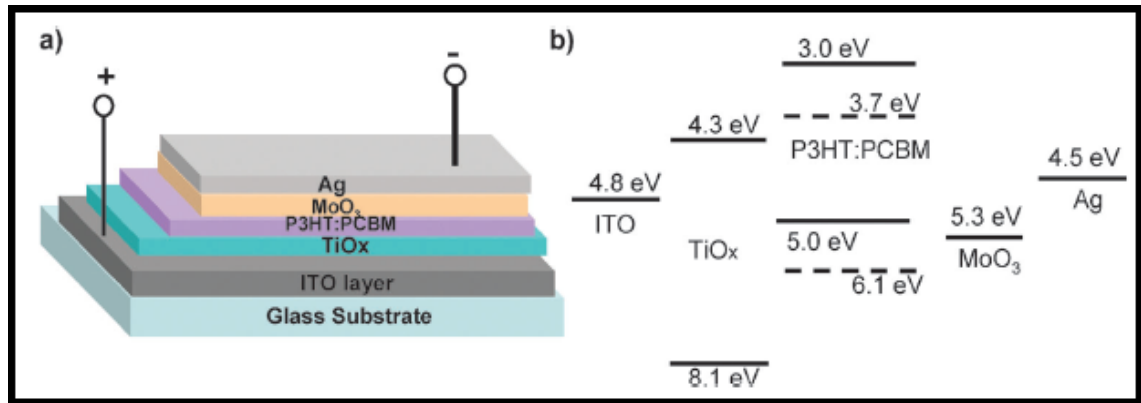


Şekil 2.3. Güneş pili yapısının şematığı (Gollu et al. 2014).

Li et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada [6-6]-fenil-C₆₁-bütirik asit metil ester (PCBM) ile karıştırılmış poli (3-heksiltiyofen) (P3HT), ETL (elektron taşıma tabakası) olarak kullanılan TiO_x model sistemi üzerine dayalı ters çevrilmiş (inverted) OPV aygıtları üretildi. Şekil 2.4 (a)'da aygıt yapısının bir şematik diyagramını göstermektedir. Şekil 2.4 (b)'de literatür değerlerine dayanarak yaklaşık enerji seviyesi yapısını göstermektedir. Bu yapıda boşluk toplama elektrodu olarak Ag ve elektron toplama elektrodu olarak ITO tabakası görev yapar. 20 nm kalınlığındaki amorf TiO_x filmler, temizlenmiş ITO alt tabakalarının üzerine bir prekürsör (titanyum izopropoksit (Ti [OCH (CH₃)₂]₄)) döndürülerek kaplandı, ardından hava ortamında 1 saat boyunca 150 °C'de tavlandı. Klorobenzen içinde çözündürülmüş P3HT:PCBM (30 mg/ml, 1:0,8 ağırlık oranında) azot içeren bir eldivenli kabin içinde TiO_x tabakası üzerine döndürülerek kaplandı. Elde edilen yaklaşık 100 nm kalınlığındaki fotoaktif tabaka azot altında 10 dakika boyunca 140 °C'de tavlandı. Daha sonra MoO₃ (8 nm) ve Ag (100 nm) ince filmleri vakumlu buharlaştırma (2×10^{-6} mbar) ile kaplandı. ITO ve Ag elektrotları arasına kaplanan etkin aygıt alanı 1,5 mm²'dir. Aygıtların fotovoltaj performansları kapsülleme olmaksızın 100 mWcm⁻² (ABET Sun 2000) AM 1.5G durum koşulları altında simüle edilmiş hava ortamında karakterize edildi. TiO_x bant aralığı boyunca önemli bir uyarma olmadan görünür aydınlatma altında akım yoğunluğu-voltaj (J-V) karakteristiklerini elde etmek için bir 380 nm UV kesme filtresi kullanıldı. Filtre daha sonra UV bileşeni

2. KAYNAK ÖZETLERİ

eklenmiş halde 30 saniye aralıklarla aygıt performansının gelişimini incelemek için çıkarılmıştır (bundan böyle ‘‘UV aydınlatma’’ olarak adlandırılacaktır). Arayüz direnci, hem doğrudan TiO_x üzerine kaplanmış 100 nm kalınlığında buharlaştırılmış Al elektrotları ile hem de aygıt bir 1 mm^2 'lik alana sahip bir dönele kaplama PCBM tampon tabakası ile yalnızca elektronlu cihazların üretilmesine çalışılmıştır. Düzlem içi direnç yalıtkan SiO_2 üzerine kaplanmış ince TiO_2 filmler kullanılarak üstte yanlamasına yerleştirilmiş Al elektrotları kullanılarak incelenmiştir. Özet olarak, TiO_x tampon tabakalarının ters çevrilmiş (inverted) P3HT:PCBM güneş pillerindeki rolü incelendi. UV aydınlatmasıyla ilgili aygıt performansındaki iyileşmenin, TiO_x filmi içindeki elektron yoğunluğundaki artıştan, fotojelenmiş taşıyıcıların derin tuzakları pasifleştirmesinden kaynaklanmaktadır. Artan bu elektron yoğunluğu TiO_x 'un çalışma fonksiyonunda ve yığın dirençliliğinde bir düşüşe, TiO_x ve ITO arasındaki Schottky engelini daraltmasına neden olur. Bu nedenle, TiO_x 'e bağlı temas direncindeki düşüş dolmuş faktörü (FF) ve kısa devre akım yoğunluğunda (J_{sc}) önemli bir artışa neden olurken, iş fonksiyonlarındaki değişiklik açık devre voltajı (V_{oc}) ile birlikte yerleşik potansiyelde bir artışa neden olur. Bu gözlemler sadece TiO_x elektron taşıma tabakalarına sahip OPV aygıtları için değil, aynı zamanda dengeyi sağlamak için önemli bir yük aktarımı gerektiren diğer tabakalar arası sistemler için de önemlidir. Özellikle, ITO'ya TiO_x kaplanarak gerçekleştirilen iş fonksiyonu modifikasyonu, ters çevrilmiş aygıtların elde edilmesi için çok önemlidir. Bu ITO'dan daha düşük bir iş fonksiyonuna sahip şeffaf elektrotların, kararlı ters çevrilmiş aygıtlarda TiO_x ile daha iyi eşleştirilebileceğini ve TiO_x , Al gibi daha düşük bir iş fonksiyonlu metalin altında bir elektron toplama tampon tabakası olarak kullanıldığında, bu etkilerin nadiren görüldüğünü açıklar.



Şekil 2.4. (a) Elektron taşıma tabakası olarak kullanılan TiO_x , bir katı heteroeklem ters çevrilmiş organik güneş pilinin aygıt yapısı (b) I-OPV aygıtının enerji seviye şeması (Li et al. 2014).

Zhu et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada düzenli poli (3-heksiltiyofen) (P3HT) ve [6,6]-fenil-C₆₁-bütirik asit metil ester (PCBM) daha fazla saflaştırma olmadan satın alındı. ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al bir organik güneş pili yapısı imal edildi. ITO alt tabakaları sırasıyla 10 dakika boyunca izopropanol, aseton, deiyonize su ve deterjan ile ultrasonik banyo işlemleriyle temizlendi. ITO camı hava ortamında kurutulduktan sonra magnetron püskürtme odası (magnetron sputtering chamber)'na aktarılmadan önce 15 dk. boyunca ultraviyole-ozon işlemi uygulandı. ZnO tabakası %99,99 saflıkta ticari bir ZnO target'i kullanarak $1,1 \times 10^{-5}$ Torr taban basıncı altında 0,3 Pa çalışma basıncında ve RF 50 W ile kaplandı. Püskürtülen numunelerin tümünde O₂/Ar farklı gaz oranıyla 20 sscm'lik toplam karışık gaz akışı tutuldu. ZnO'nun püskürtme hızı $0,8 \text{ \AA s}^{-1}$ 'e sabitlendi. Diklorobenzen içindeki P3HT:PCBM (1:0.8) karışım çözeltisi, ZnO yüzeyi üzerine 800 rpm'de 60 s boyunca döndürülerek kaplandı ve daha sonra yavaş büyümesi için petri kabında tutuldu. Ardından 5 saat sonra P3HT:PCBM filmleri, bir fırın içerisinde 120 °C'de 10 dakika boyunca tavlandı. Son olarak, 15 nm kalınlığında bir MoO₃ anot ara yüzey tabakası ve 150 nm Al elektrot P3HT:PCBM fotoaktif tabakanın üzerine $2,5 \times 10^{-6}$ Torr bir arka plan basıncı altında kaplandı. P3HT:PC₆₁BM karışım tabakanın kalınlığı yaklaşık 180 nm ve aygıtın aktif alanı $0,10 \text{ cm}^2$ dir. Akım-voltaj karakteristikleri bir Newport solar simulator sistemini kullanarak 100 mWcm^{-2} aydınlatma yoğunluğu AM 1.5G altında ölçüldü. Tüm numuneler kapsülleme olmaksızın hava ortamında ölçüldü. ZnO filmlerinin yüzey morfolojileri atomik kuvvet mikroskobu (AFM, NanoWizard II) kullanılarak ölçüldü. ZnO/ITO filmlerinin iş fonksiyonu helyum hattı (21,2 eV) ile ultraviyole fotoelektron spektroskopisi (UPS) kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak katot ara yüzey tabakası ZnO ile verimli ters çevrilmiş (inverted) organik güneş pilleri ZnO tabakasının iki adımlı magnetron püskürtme yöntemiyle ispatlandı. 11 nm/4nm ZnO tabakasına sahip organik güneş pillerinin verimi (%4,08) O₂/Ar (1:7) gaz oranıyla püskürtme yöntemiyle kaplanmış 15 nm kalınlığındaki ZnO tabakasına sahip organik güneş pillerinin verimlerinden daha yüksek olduğu açıktır. Ar gazı ile püskürtülmüş ilk adım ZnO tabakası daha düşük kütle direnci gösterir ve ZnO tabakasının elektron taşıma yeteneğini geliştirir. Doğru kalınlıktaki ikinci adım ZnO tabakasıyla püskürtülmüş (sputtered) O₂/Ar (1:7) gazı üstün yüzey özellikleri ile elde edilebilir ve oksijen gazı katılımı nedeniyle iletim bandı seviyelerini iyileştirebilir. Bütün ZnO katod arayüzey tabakasına nüfuz eden kusurlar, iki aşamalı püskürtülmüş ZnO katman yöntemi ile engellenebilir veya yer değiştirebilir. ZnO tabakasını iki aşamalı püskürtme yöntemi, PCBM ve ZnO arasındaki enerji farkını azaltır, ZnO tabakasının

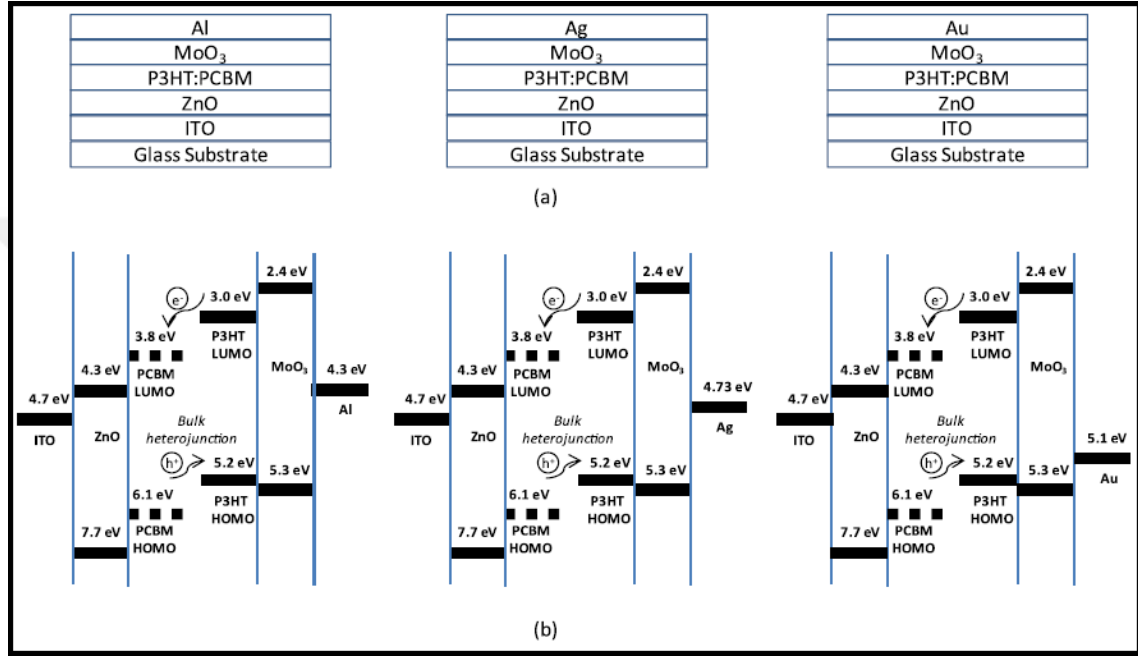
2. KAYNAK ÖZETLERİ

tamamına nüfuz eden kusurları engelleyen entegre bir avantaja sahiptir, O₂/Ar gazı veya Ar gazı ile püskürtülen ZnO tabakasına kıyasla ZnO katod arayüzey tabakasının taşıyıcı taşıma yeteneğini artırır ve yüzey özelliklerini iyileştirir.

Kumar et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada ters çevrilmiş organik güneş pili aygıtları dönel kaplama yöntemi ile üretildi. Bu çalışmada kullanılan farklı elektrotlarla güneş pili yapıları ve enerji band diyagramları sırasıyla Şekil 2.5 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Bu yapıda, ITO bir katot materyali olarak işlev görür, ZnO elektron taşıma tabakası olarak işlev görürken, P3HT:PCBM tabakası cihazın fotovoltaiik davranışını incelemek için aktif bir malzeme olarak kullanılmıştır. MoO₃ boşluk taşıma tabakası olarak seçilmiş ve anot malzemeleri olarak Al, Ag ve Au gibi farklı elektrotlar kullanılmıştır. ITO alt tabakaları 5:1:1 oranında DI-H₂O:sıvı ve NH₃:H₂O₂ karışımını içeren Radio Corporation of Amerika (RCA) (Yarıiletken endüstrilerinde alt tabakaları temizlemek için standart bir çözüm takip edildi) temizleme prosedürü kullanılarak 65-80 °C sıcaklıkta yaklaşık 20 dakika ve DI-H₂O ile ultrasonik temizlendi. Alt tabakalar daha sonra N₂ gazı kullanılarak kurutuldu ve alt tabakanın ıslaklığını artırmak için 40 dakika boyunca bir UV-O₃ temizleyicisinde temizlendi. Bir ZnO tabakası daha sonra temizlenmiş ITO alt tabakaları üzerine 2000 rpm'de 60 saniye boyunca döndürülerek kaplandı ve ardından yaklaşık 20 dakika boyunca 250 °C sıcaklıkta tavlandı. Aktif tabaka, P3HT ve PCBM'in 40 °C'de muhafaza edilen kloroform içerisinde ayrı ayrı çözündürülmesi ile hazırlandı. Daha sonra, yaklaşık 10 mg/ml'lik bir nihai konsantrasyon elde etmek için gece boyunca karıştırıldı. Elde edilen çözelti dönel kaplamadan önce 40 °C'de 2 saat boyunca 1:0,7 oranlarında bir hacim oranında karıştırıldı. Karıştırılmış P3HT:PCBM çözeltisi, 0,1 µ PTFE filtresi kullanılarak filtrelendi ve 1 dakika boyunca 1000 rpm'de döndürülerek kaplandı. 6 nm kalınlığında ince bir tabaka boşluk taşıma malzemesi olan molibden oksit (MoO₃), 0,1-0,2 Å/s oranında termal olarak kaplandı. Üstteki metal elektrodun önerilen çalışmadaki rolünü incelemek için, yüksek iş fonksiyonlarına sahip farklı metaller 100 nm kalınlığında 0,5-1 Å/s oranında termal olarak kaplandı. Al, Ag ve Au gibi yüksek iş fonksiyonlu üç metal ITO/MD-ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃ katmanlarına sahip üç farklı alt tabaka üzerine kaplandı. Aygıtlar, I-V ölçümü alınmadan önce 150 °C'de 15 dakika boyunca bir vakumlu fırında tavlandı. Sonuç olarak mono dağılım ZnO nano partikülleri sentezlendi ve optik özellikleri detaylı olarak araştırıldı. Ortalama partikül boyutları, soğurmaya karşı dalga

2. KAYNAK ÖZETLERİ

boyu spektrumu kullanılarak hesaplandı ve Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu görüntüleri ile elde edilen değerle karşılaştırıldı. P-tipi ara tabaka üzerine üç farklı metal elektrot termal olarak kaplandı, optik ve elektriksel özellikleri detaylı olarak tartışıldı. Daha iyi optik özelliklere sahip olma özel özellikleri ve ortam maruziyetine karşı nispeten iyi kararlılığı ile gümüş (Ag)'nin ters çevrilmiş (inverted) aygıtlarda kullanım için en uygun üst elektrot malzemesi olduğu sonucuna varmıştır.



Şekil 2.5. (a) Farklı anotlara sahip olan ters çevrilmiş OPV hücrelerinin şematik yapıları (b) ters çevrilmiş OPV yapısına karşılık gelen enerji band diyagramları (Kumar et al. 2016).

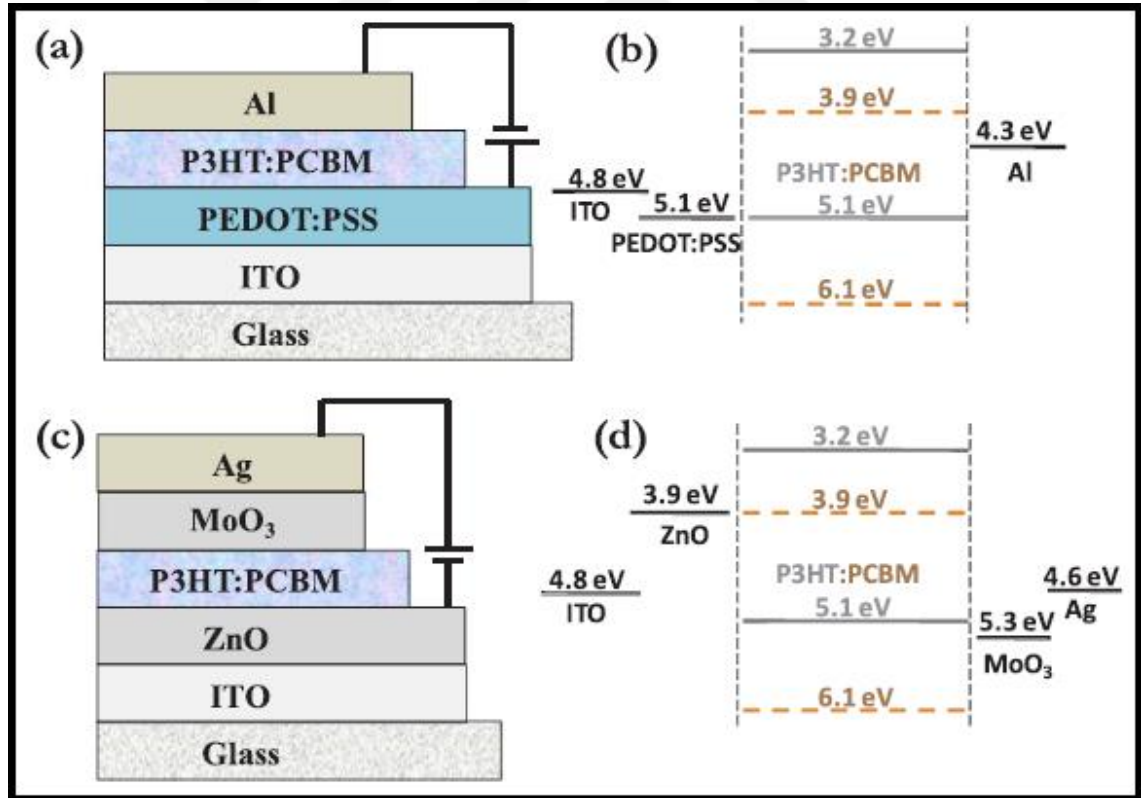
Verma et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada kullanılan yapılar, aktif tabaka olarak PCBM ve P3HT karışımlarını içeren geleneksel ve ters çevrilmiş heteroeklem güneş pilleridir. Ters çevrilmiş yapıda elektron taşıma tabakası olarak ZnO görev yaparken, ters çevrilmiş ve geleneksel yapılarda boşluk taşıma tabakaları olarak sırasıyla PEDOT:PSS ve MoO₃ kullanıldı. Geleneksel organik güneş pili için aygıt yapısı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ve ters çevrilmiş organik güneş pili için aygıt yapısı ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag şeklindedir. Şekil 2.6'da her iki aygıt yapısını ve bu yapılar karşılık gelen enerji band diyagramlarını göstermektedir. Işık geleneksel yapıda artı (anot) tarafa gelirken, ters çevrilmiş (inverted) yapıda eksi (katot) tarafına gelmektedir. P3HT:PCBM malzemeleri ticari Sigma Aldrich şirketinden alınmaktadır. PEDOT:PSS Clevios'dan alınmaktadır. Geleneksel organik heteroeklem güneş pillerinin fabrikasyonu için dönele kaplama (spin coating) metodu ile ITO desenli cam yüzeyler

2. KAYNAK ÖZETLERİ

üzerine PEDOT:PSS tabakası kaplandıktan hemen sonra ortamdaki sıcak bir tabla üzerinde 120 °C'de 20 dakika boyunca tavlannmıştır. PEDOT:PSS çözeltisi 0,45 µm PVDF filtresi ile filtrelendi. PEDOT:PSS deiyonize suyun 2:1 oranında karıştırılmasıyla seyreltildi, döndürülerek kaplama boyunca yüzey pürüzsüzlüğü ve kalınlığı optimize edildi. PEDOT:PSS ince filminin kalınlığı yaklaşık 35-40 nm idi. P3HT:PCBM tabakası, PEDOT:PSS tabakası üzerine döndürülerek kaplandı ve azot (N₂) içeren eldivenli kabin içerisinde sıcak bir tabla üzerinde 20 dakika boyunca 140 °C'de tavlandı. Son olarak, 100 nm kalınlığında alüminyum (Al) yüksek vakumda termal buharlaştırma yoluyla kaplandı. P3HT:PCBM karışımı çözeltisi, 20 mg P3HT:PCBM karışımını 1 ml klorobenzen içinde 1:1 ağırlık oranında çözündürülerek hazırlandı. İşleme tabi tutulan çözelti tabakalarının kalınlık ölçümü Dektak'ın stylus tabanlı profilometresi kullanılarak yapıldı. Ters çevrilmiş bir yapı olması halinde ise, ZnO tabakası çözelti işlemi kullanılarak ITO kaplı cam tabakaların üstüne kaplandı ve ortam sıcaklığında sıcak tabla üzerinde 10 dakika boyunca 250 °C'de tavlandı ve bir 30 nm'lik kalınlığa ulaşıldı. ZnO çözeltisi sol-jel yöntemi kullanılarak hazırlanmaktadır. ZnO çözeltisinin hazırlanması için gerekli malzemeler öncü malzeme olarak çinko asetat dihidrat (Zn(CH₃COO)₂ · 2H₂O) ve dengeleyici malzeme olarak mono-etanol amin (H₂NCH₂CH₂OH), 2 metoksi etanol (CH₃OCH₂CH₂OH)'de çözünmüştür. İlk olarak, 0,384 gr. çinko asetat dihidrat, 4,895 ml 2-metoksi etanol ve ardından 0,105 ml mono-etanol amin içerisinde çözündürülür ve çözeltiliye eklenir. Son olarak, çözelti gece boyunca karıştırılır ve işlemden önce 0,45 µm PVDF filtresi kullanılarak filtrelendi. P3HT:PCBM tabakası üzerine dönel kaplama ile kaplandı ve azot (N₂) içeren eldivenli kabin içerisinde sıcak tabla üzerinde 20 dakika boyunca 140 °C'de tavlandı. Daha sonra 5 nm kalınlığında molibden oksit (MoO₃) ve 100 nm kalınlığında gümüş (Ag) yüksek vakumda sırasıyla termal buharlaştırma kullanılarak kaplandı. J-V ve C-V karakteristikleri sırasıyla Keithley 2061 kaynak metre ve Agilent 4294A empedans analizörü kullanarak karanlıkta olduğu gibi bir güneş kadar değişen çeşitli aydınlatma yoğunluklarında kaydedildi. Güneş simülatörü AM1.5 (ABB sınıfı, LCS-100, Newport Ariel, ABD) aydınlatma amacıyla ve nötr yoğunluk filtreleri aydınlatma yoğunluğunu değiştirmek için kullanılır. Sonuç olarak aydınlatma altında gerilim kaybını belirlemede kontakların rolü organik güneş pillerinde eksik anlaşılmıştır. Özel olarak, şu anda, bu kaybı ölçmek için deneysel bir yöntem yoktur. Bu metinde P3HT:PCBM tabanlı geleneksel hem de ters çevrilmiş (inverted) heteroeklem organik güneş pillerinin hem beyaz ışık aydınlatması hem de karanlıktaki C-V karakteristiklerini analiz ederek böyle bir yöntem gösterilmiştir. Yüzey fotovoltajı ve arayüzeye enjekte

2. KAYNAK ÖZETLERİ

edilen taşıyıcı konsantrasyonu, C-V karakteristiklerinin yoğunluğa bağlılığını analiz ederek aydınlatma yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Geleneksel yapının karanlıktaki C-V karakteristikleri enjeksiyon için iki ayrı eşik voltajının oluştuğunu göstermektedir. Daha düşük olan elektron enjeksiyonuna atfedilir ve ikincisi ise yerleşik potansiyelden önce yük taşıyıcılarının yaygın olarak depolanmasından dolayıdır. Kontaklarda taşıyıcı birikmesi nedeniyle oluşan yüzey fotovoltajı açık devre voltajındaki kayıplardan sorumludur. Aygıt mimarisini değiştirerek ya da bu kayba neden olan mekanizmaları öğrenerek önlenbilir ya da azaltılabilir. Geleneksel bir yapıda, yüzey fotovoltajı ve enjekte edilen elektrottaki taşıyıcı konsantrasyonu, ters çevrilmiş (inverted) yapıya göre önemli ölçüde daha yüksektir. Geleneksel yapı bağlantısındaki bu kayıp, her iki durumda da aynı karışım malzemesi kullanılmasına rağmen cihazın verimliliğini azaltmada önemli bir rol oynar. Bu yazıda gösterilen yöntem, gelişmekte olan teknolojilerin veya optimizasyon programlarının herhangi birinde kontakların voltaj kaybına katkısının analiz edilmesinde ve izole edilmesinde yardımcı olacaktır.



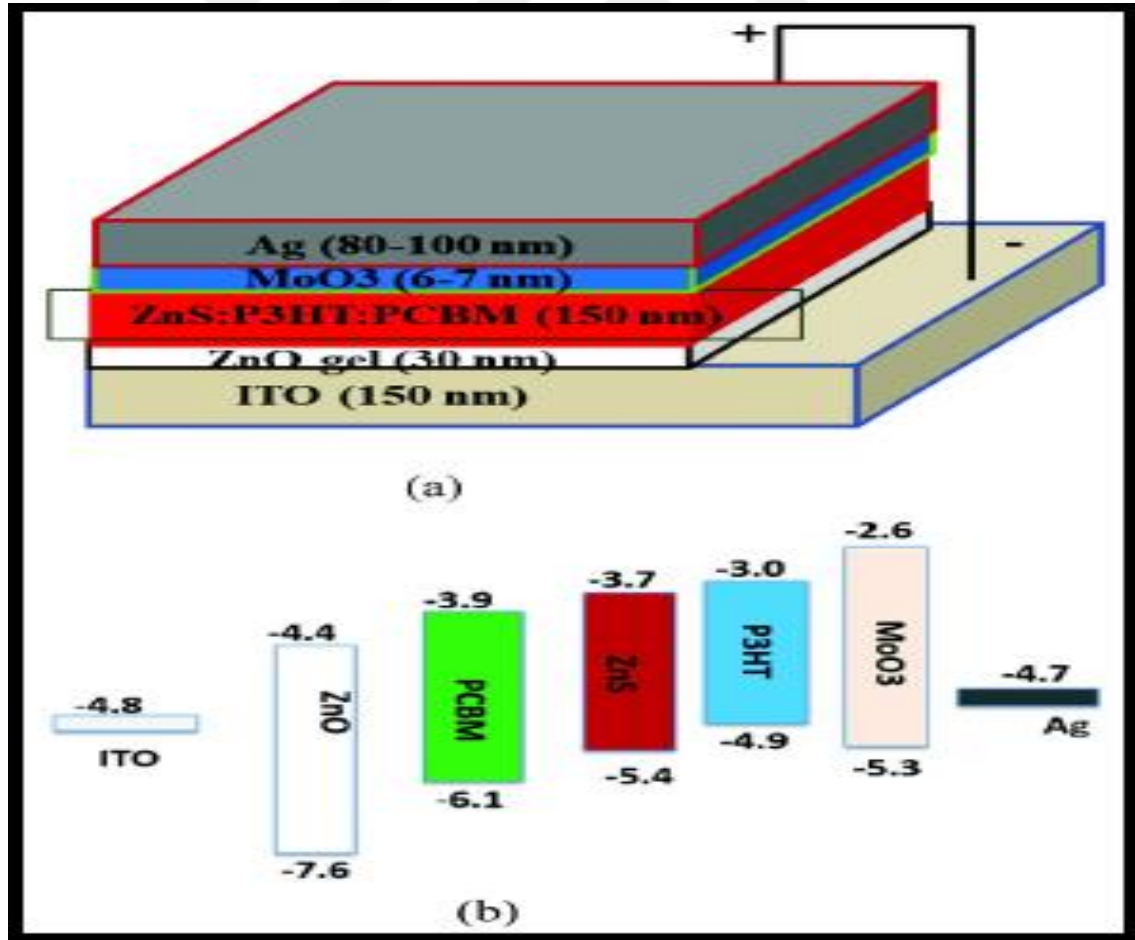
Şekil 2.6. (a) Geleneksel aygıt yapısının şematığı (b) ve bu yapıya karşılık gelen enerji band diyagramı (c) ters çevrilmiş aygıt yapısının şematığı (d) ve bu yapıya karşılık gelen enerji band diyagramı (Verma et al. 2017).

Zhang et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada ters çevrilmiş (inverted) OSC'lerde cam yüzeyleri üzerine kaplanmış desenli ITO'lar (yaklaşık $2 \times 2,5 \text{ cm}^2$ boyutunda, metre başına 10 W, 2-3 nm yüzey pürüzlülüğünde) üretildi. Cam yüzeyine kaplı desenli ITO tabakaları sırasıyla 20 dakika boyunca $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir ultrasonik banyoda deterjan, deiyonize su, aseton, alkol ve izopropil alkol ile temizlendi. Daha sonra, temizlenmiş ITO tabakaları azotla kurutulmuştur ve 15 dakika boyunca bir UV ozon fırınında işlemden geçirilmiştir. Bundan sonra ITO tabakaların üstüne ZnO çözeltisi 3000 rpm'de 45 saniye boyunca döndürülerek kaplanmış ve 30 dakika boyunca $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de fırında termal olarak tavlansmıştır. Ardından, tabakalar azot ile dolu eldivenli kabin içerisine aktarıldı. Kullanılan aktif tabaka çözeltisi, P3HT ve PC₆₁BM'in 1,2-diklorobenzen (1,2-DCB) (20 mg/ml) içinde 1:1 oranında karıştırılmasıyla oluşmaktadır. Karıştırılmış çözelti ZnO tabakası üzerine 800 rpm'de 120 saniye boyunca döndürülerek kaplandı ve bu aktif tabaka $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika boyunca tavlandı. Son olarak, bu aygıtlar 8 nm MoO₃ tabakası ve 80 nm Ag elektrodunun termal buharlaştırılmasıyla tamamlandı. Aygıt alanı 7 mm^2 'dir. PTB-7:PC₇₁BM tabanlı organik güneş pilleri (OSC)'ler için PTB-7:PC₇₁BM (%3 hacim DIO ile klorobenzen içinde 2:3 ağırlık oranında) karışımının 1000 rpm'de 60 saniye boyunca döndürülerek kaplama ve en az 5 saat boyunca gölgede kurutma haricinde aynı fabrikasyon prosedürleri kullanılmıştır. TFT'ler güneş pillerinde kullanılan aynı ZnO çözeltisi ile üretildi. Film üretiminden önce, temizlenmiş Si/SiO₂ yarı iletken tabakası, yüzey kalıntılarını çıkarmak ve ince film oluşumunu kolaylaştırmak için 10 dakika boyunca O₂ plazma ile işlemine tabi tutulmalıdır. ZnO çözeltisi yarı iletken tabaka üzerine 3000 rpm'de 30 saniye boyunca döndürülerek kaplandı, $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 5 dakika boyunca tavlandı ve aynı koşullarda ikinci kez döndürülerek kaplandı. Son olarak, kaynak ve drain kontaklarını oluşturmak için ZnO'nun üzerine bir 100 nm Al tabakası kaplandı. Özetle, ters çevrilmiş OSC'lerde ETL olarak ZnO'ya Al katkılanmış AZO ince filmi, düşük sıcaklıkta işleme tabi tutulan sulu çözeltinin döndürülerek kaplanması ile üretilmiştir. AZO (daldırma süresi 8 dk.), P3HT:PC₆₁BM sisteminde tampon tabaka olarak kullanıldığında, güç dönüşüm verimi (PCE), aynı koşullar altında katkısız bir ZnO aygıtının güç dönüşüm verimi (PCE) %2,79 sahip bir aygıtla %3,09'a yükselir. Ayrıca, bir PTB-7:PC₇₁BM sisteminde, AZO (daldırma süresi 8 dk.) içeren aygıtın güç dönüşüm verimi (PCE) %7,86 (katkısız ZnO aygıtının güç dönüşüm verimi PCE %7,39) olacak şekilde geliştirilebilir.

Jabeen et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada desenli ITO alt tabakaları sıvı deterjan ile yıkandı. Bundan sonra alt tabakalar, musluk suyu ile tamamen temizlendi. Daha sonra alt tabakalar, bir ultrasonik banyoda tekrar tekrar saf su, aseton ve etil alkol ile yıkandı ve son olarak, her biri 20 dakika boyunca kloroform ile yıkandı ve hava ile kurutuldu. Daha sonra ITO alt tabakaları 90 °C'de 20 dakika boyunca ısıtıldı. Fırınlama işleminden sonra ITO alt tabakalarının daha fazla temizlenmesi için 20 dakika boyunca plazma temizleme işlemi gerçekleştirildi. Ortam koşulları altında, çinko oksit jeli bir 3000 rpm hızında 30 saniye boyunca ITO alt tabakası üzerine döndürülerek kaplama işlemi ile yerleştirildi. Çözelti 0,45 µm gözenek boyutuna sahip poli (tetrafloroetilen) (PTFE) filtresi kullanılarak filtrelendi. Daha sonra ZnO kaplı ITO tabakaları 160 °C'de 30 dakika boyunca bir sıcak tabla üzerinde tavlandı. ITO tabakası üzerindeki çinko oksit jel tabakası yaklaşık 30 nm kalınlığındadır. P3HT:PCBM ve kuantum noktalarının (katkısız çinko sülfid, Ag katkılı ve Au katkılı çinko sülfid) karışım çözeltileri diklorobenzen içinde sabit bir sıcaklıkta 70 °C'de 26 saat boyunca karıştırıldı. Organik polimerlerin ve kuantum noktalarının karışım çözeltisi 1500 rpm'de döndürülerek kaplandı ve 110 °C'de 20 dakika boyunca tavlandı. Aktif tabakanın kalınlığını bulmak için, bir Sloan Dektak II profilometresi kullanılmış, aktif tabakanın kalınlığı yaklaşık 150-170 nm'dir. Ayrıca, aygıtların alt ve üst elektrotlarına temas etmek için kloroform kullanılarak dikkatlice temizlendi. Güneş pili 0,06 cm²'lik aktif alana sahiptir. Son olarak, sırasıyla 0,5 A/s ve 1,5 A/s kaplama oranları ile MoO₃ (6-10 nm) ve Ag'nin (80-100 nm) kaplanması için fiziksel buhar kaplama sistemi (PVD) çalıştırıldı. Tüm buharlaştırma işlemi 1x10⁻⁶ mbar bir basınçta yüksek vakum altında yapıldı. Her bir bileşenin hücre tasarımı ve enerji konumu Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Özetlemek gerekirse, katkısız ve soy metal katkılı çinko sülfid kuantum noktalarını ortak çökeltme yöntemiyle sentezlendi ve karakterize edildi. Çinko sülfid ve soy metal katkılı çinko sülfürün optik, yapısal, morfolojik ve fotovoltaik özellikleri üzerine yapılan ayrıntılı bir çalışma, kuantum noktalarının kafesindeki altın ve gümüş safsızlıklarının, katkısız numunenin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ag katkılı ve Au katkılı ZnS QD'lerin soğurma spektrumları sırasıyla 320 nm, 322 nm'de elde edilmiştir ve Ag ve Au'nun katkıları ile yapıda önemli bir kırmızı kayma gözlemlendi. Soğurma spektrumundaki bu kayma, kuantum hapsetme etkisinden kaynaklanmaktadır. ZnS, Ag katkılı ve Au katkılı ZnS QD'lerin yasak enerji aralıkları sırasıyla 2,5 eV, 2,4 eV ve 2,2 eV olarak bulunmuştur. PL spektrumu, Au katkılı ZnS örneğinde mavi ışık bantları ile birlikte ortaya çıkan yeşil ışık emisyon bandını ortaya çıkardı. Ag ve Au (0,05 M) nano

2. KAYNAK ÖZETLERİ

kristallerle katkılı ZnS ve ZnS'nin XRD difraktogramı (1 1 1), (2 2 0) ve (3 1 1)'in kafes düzlemleri ve elde edilen kübik yapı ile eşleşen üç farklı kırılma tepesi noktası gösterdi. Ek olarak, Ag ve Au'nun ZnS örgüsüne başarıyla dâhil olduğunu gösteren katkılı numunelerin XRD modellerinde başka hiçbir belirgin tepe görülmedi. QD'lerin TEM görüntüleri hiç şüphesiz yaklaşık 8 nm'lik küçük parçacık boyutuna sahip nano boyutlu partiküllerin oluşumunu göstermektedir. Katkısız ve soy metal katkılı QD'ler ile üretilmiş tüm aygıtlar %1,46 ile %2,01 arasında değişen bazı fotovoltaiik performans verimleri gösterdi. P3HT:PCBM:Au katkılı ZnS ile üretilen en iyi aygıtın kısa devre akım yoğunluğu $6,06 \text{ mA/cm}^2$, açık devre voltajı 0,60 V, dolun faktörü %55,5 ve %2,01 güç dönüşüm verimliliği gösterir. Burada belirtilen sonuçlar ortak çökeltme yöntemiyle sentezlenen P3HT:PCBM karışımındaki Au katkılı ZnS için en yüksek hücre dönüşüm verimliliğidir. Günümüzdeki araştırmalar, esnek aygıtlar için gerekli olan ortak çökeltme kuantum noktalarını kullanarak ters çevrilmiş güneş pillerini üretmek için umut verici olacaktır.



Şekil 2.7. (a) Aygıt yapısı (b) ve bu yapıya karşılık gelen enerji band diyagramı (Jabeen et al. 2019).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

P3HT:PCBM tabanlı heteroeklem geleneksel organik güneş pili ve ters çevrilmiş organik güneş pillerinin üretiminde kullanılan materyallere bu bölümde yer verilmiştir. Ayrıca ters çevrilmiş organik güneş pili ve geleneksel güneş pili aygıtlarının fabrikasyonları ve J-V (akım yoğunluğu-voltaj) karakteristik parametrelerinin ölçümünde kullanılan cihaz ve teknikler de bu bölümde anlatılmıştır.

3.1.1. P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Geleneksel Organik Güneş Pili ve Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Materyaller

P3HT:PCBM tabanlı heteroeklem geleneksel organik güneş pillerinin üretiminde alttaş ve boşluk toplayıcı malzeme olarak ITO, elektron engelleyici veya boşluk taşıma tabakası (HTL) PEDOT:PSS, aktif tabaka olarak P3HT:PCBM karışımı ve metalizasyon işlemi (elektron toplayıcı) için Al metali kullanıldı. Ters çevrilmiş organik güneş pillerinin üretiminde alttaş ve elektron toplayıcı olarak ITO, elektron taşıma tabakası (ETL) olarak ZnO, aktif tabaka olarak P3HT:PCBM karışımı, boşluk taşıma katmanı (HTL) olarak molibden oksit (MoO_3) ve hava ortamına dayanıklı ve aygıt kararlılığında etkili olan yüksek iş fonksiyonlu alüminyum (Al) metali kullanıldı.

Tez çalışması Atatürk Üniversitesi Nano Aygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında yapılmıştır. Laboratuvarımız Class 1000 şartlarına sahiptir. Ayrıca class 100 özellikte bölmesi bulunmaktadır. Laboratuvarımızda eldivenli kabine entegre edilmiş döndürmeli kaplama cihazı, tavlama işlemleri için sıcak tabla, güneş simülatörü ve termal buharlaştırma üniteleri bulunmaktadır. Kaplama işlemleri için hem RF hem de DC püskürtme (sputtering) üniteleri laboratuvar içerisinde bulunmaktadır. Çalışma için gerekli sarf malzemelerin birçoğu, yöntem kısmında bahsi geçen cihazlar, ölçümler için gerekli olan yazılımlar ve gerekli diğer kimyasallar çalışmanın yapıldığı Atatürk Üniversitesi Nano Aygıt Üretim ve Karakterizasyon laboratuvarında mevcuttur.

3.1.1.1. Eldivenli Kabin

Eldivenli kabin P3HT ve PCBM gibi organik malzemelerin ve bu malzemeler ile yapılan fotovoltaik aygıtların fabrikasyonu ve karakterizasyonu esnasında organik güneş pili aygıtlarının atmosfer şartlarında oksijen ve nemden etkilenmemesi için gerekli olan temiz bir kabindir. Eldivenli kabinler nem ve oksijen kontrollü olup içerisinde en fazla 0,1 ppm nem ve 0,1 ppm (metreküp başına parçacık sayısı) oksijen barındırırlar. Eldivenli kabinler birleşik bir sistem olup içerisinde organik güneş pillerinin üretiminde ve karakterizasyonunda kullanılan sıcak tabla, dönel kaplama cihazı, güneş simülatörü, termal buharlaştırma ünitesi ve elektriksel karakterizasyon için prob istasyonu bulunmaktadır. Çalışmalarımızda aktif tabaka olarak kullandığımız P3HT:PCBM'in kaplanması ve tavlama işlemleri, metal buharlaştırma işlemleri ve üretilen aygıtların elektriksel ölçümleri bu kabin içinde yapıldı. Deneysel çalışmalarda kullandığımız Innovative Technology marka PL-HE-7GB-CUS model eldivenli kabin Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Eldivenli kabin ünitesi.

3.1.1.2. ITO (İndiyum Kalay Oksit)

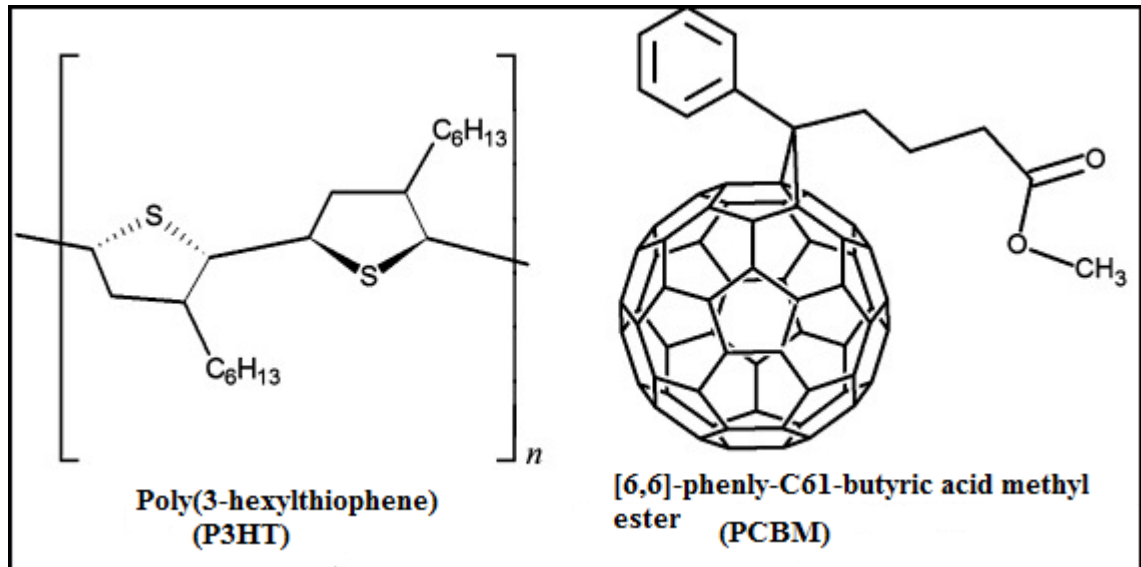
İndiyum kalay oksit (ITO) değişken oranlarda üçlü indiyum, kalay ve oksijen bileşimidir. Oksijen içeriğine bağlı olarak seramik veya alaşım olarak tanımlanabilir. İndiyum kalay oksit tipik olarak ağırlıkça %74 indiyum (In), %18 oksijen (O₂) ve %8 kalay (Sn) formülasyonu ile oksijenle doymuş bir kompozisyon olarak karşımıza çıkmaktadır. İndiyum kalay oksit, ince bir film olarak biriktirilebilmesi kolaylığı ve ayrıca elektriksel iletkenliği ve optik şeffaflığı ile bu iki temel özelliği nedeniyle en yaygın kullanılan şeffaf iletken oksitlerden biridir. Tüm şeffaf iletken filmlerde olduğu gibi iletkenlik ve şeffaflık arasında bir uzlaşma yapılmalıdır. Çünkü kalınlığın arttırılması ve yük taşıyıcı konsantrasyonunun arttırılması malzemenin iletkenliğini arttırmasına rağmen şeffaflığını azaltmaktadır. Çalışmalarda 8-12 Ω dirence, 550 nm dalga boyuna ve %83 geçirgenliğe sahip ITO kullanılmaktadır. İndiyum kalay oksit (ITO) cam yüzeyine 30 nm silisyum dioksit (SiO₂) kaplanarak yüzey pasivasyonu yapılmıştır. Pasivasyonu yapılmış yüzey üzerine kaplanan ITO filminin kalınlığı 120-150 nm arasında olup ve alttaş kalınlığı 1,1 mm'dir. İş fonksiyonu yaklaşık olarak 4,8 elektron-volt (eV) civarındadır (Nickel et al. 2009). İndiyum kalay oksit geleneksel organik güneş pillerinde elektron toplayıcı tabaka ve alttaş olarak kullanılmaktadır ve Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



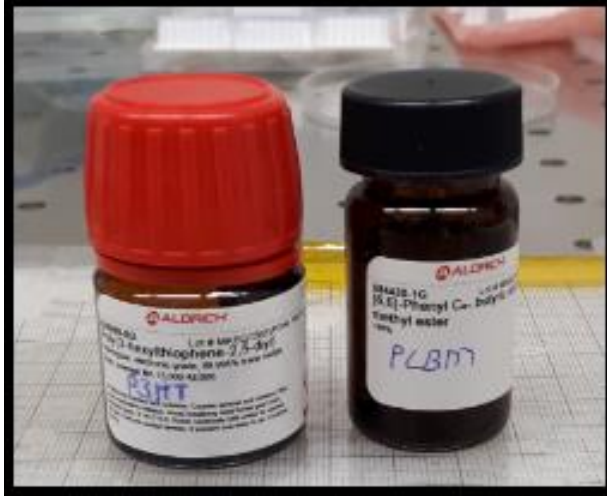
Şekil 3.2. İndiyum Kalay Oksit (ITO).

3.1.1.3. P3HT:PCBM

PCBM, fulleren türevi [6,6]-fenil-C₆₁-butirik asit metil esterin genel bir kısaltmasıdır. Organik güneş pillerinde n-tipi elektron verici (donor) olarak görev yapmaktadır. PCBM ilk kez 1990'larda sentezlenen C₆₀'ın bir fulleren türevidir. PCBM, elektron verici bir malzeme olup diğer iletken polimerler ya da P3HT gibi elektron alıcı malzemelerle birlikte genellikle organik güneş pillerinde kullanılmaktadır. P3HT, poli (3-heksitilyofen)'in polimerizasyonu ile meydana gelir. Organik güneş pillerinde p-tipi elektron alıcı (akseptör) olarak görev yapmaktadır. P3HT, bilinen organik malzemelere göre yüksek mobilite özelliği, iyi çözelti elde etme ve iyi film oluşturma özelliklerinin yanında görünür bölge ile de uyumlu olan oldukça düşük band aralığı ile güneş pilleri uygulamaları için önemli bir malzemedir. Amorf PCBM ile P3HT organik malzemesinin birbirlerine bağlanmaları ile homojen bir yapı meydana getirir. P3HT:PCBM'in bu özelliği ile katı heteroeklemler için ideal bir karışım oluşturmaktadır (Schilinsky et al. 2002). P3HT ve PCBM'in çözücülerini kloroform, klorobenzen ve toluen gibi organik çözücülerdir. Yaptığımız deneysel çalışmalarda Sigma-Aldrich firmasından satın alınan P3HT:PCBM çözeltisi kloroform ile hazırlanmakta olup P3HT:PCBM'in kimyasal yapısı Şekil 3.3'de ve Sigma Aldrich firmasından alınan P3HT ve PCBM malzemeleri Şekil 3.4'de verilmiştir.



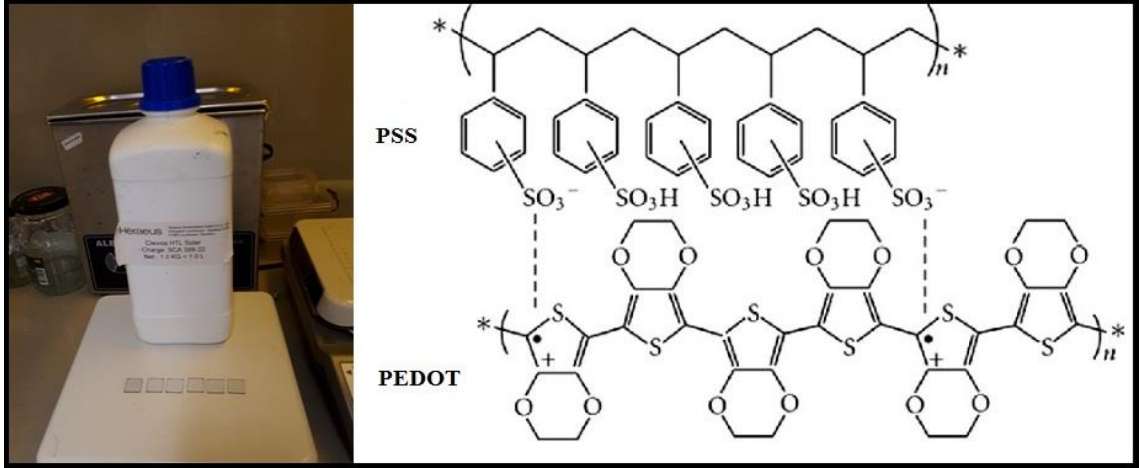
Şekil 3.3. P3HT ve PCBM'in kimyasal yapıları.



Şekil 3.4. Sigma Aldrich firmasından alınan P3HT ve PCBM malzemeleri.

3.1.1.4. PEDOT:PSS

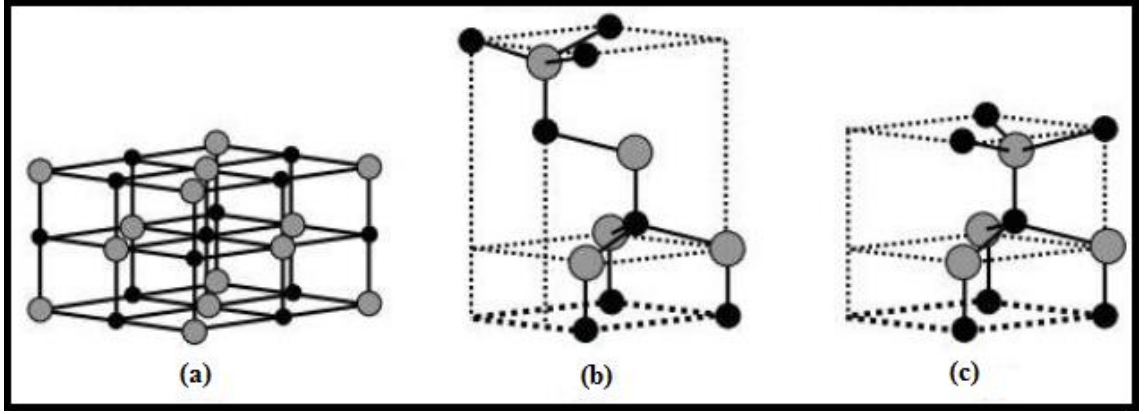
(PEDOT:PSS) poli (3,4-etilendioksityofen):poli (stirensülfonat) organik su bazlı bir çözüldür. Klorobenzen, etanol ve propanol gibi kuvvetli organik çözücüler de dâhil olmak üzere hiçbir sıvıda çözünmemesine rağmen sadece suda çözünür. Klasik organik güneş pillerinde PEDOT:PSS aktif katman olarak görev yapmaz sadece aktif tabaka ve ITO arasında kullanılarak açık devre voltajının artmasını sağlar (Girtan et al. 2009). PEDOT:PSS iletken olması, ITO yüzeyine homojen kaplanabilme ve yüzeye düşen ışığı soğuramayacak kadar şeffaf olması özelliğiyle organik güneş pilleri için önemli bir malzemedir (Pietsch et al. 2013). Geleneksel organik güneş pillerinde elektron engelleyici tabaka ve boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak görev yapar. PEDOT:PSS, pH değerleri farklı olarak piyasada çokça bulunmaktadır. Çalışmalarımızda pH 500 Heraeus-Clevius PEDOT:PSS kullanıldı ve Şekil 3.5'te PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı verilmiştir.



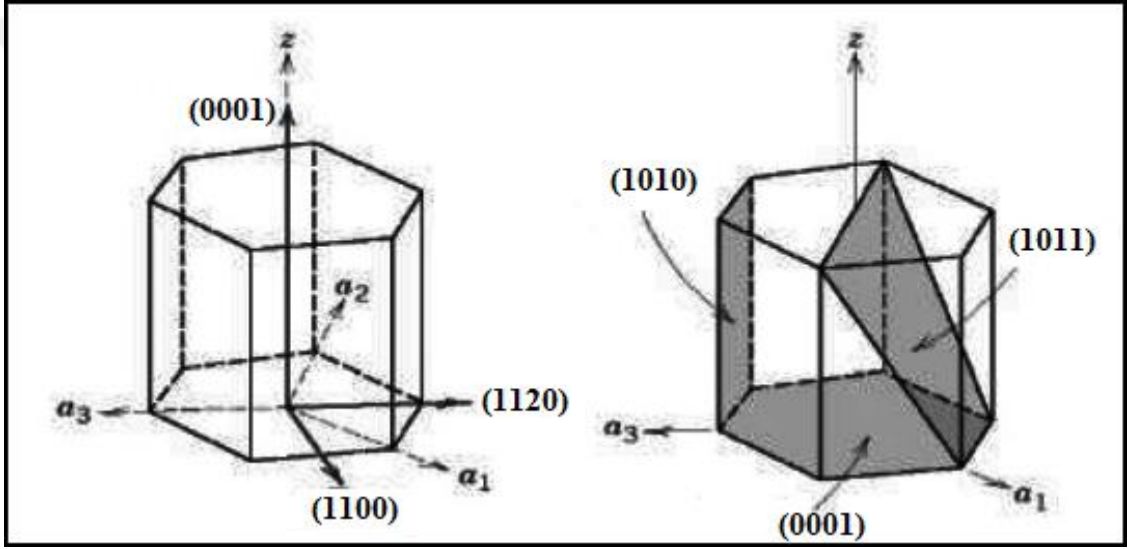
Şekil 3.5. PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı.

3.1.1.5. Çinko Oksit (ZnO)

Çinko oksit, ZnO formülüne sahip olan inorganik bir bileşiktir. Çinko oksit suda çözünmeyen beyaz bir tozdur. Çinko oksit kauçuk, plastik, seramik, cam, çimento yağlayıcılar, boyalar, merhemler, yapıştırıcılar, pigmentler, gıdalar, aküler dâhil olmak üzere birçok malzeme ve üründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Çinko oksit II-VI yarı iletken grubunun geniş bant aralıklı bir yarıiletkenidir. Oksijen boşluklarına ve çinko geçiş maddelerine bağlı olarak bu yarıiletken doğada n-tipi olarak bulunur. Bu yarıiletken iyi geçirgenlik, yüksek elektron hareketliliği, geniş bant aralığı ve yüksek oda sıcaklığında ışıltama dâhil olmak üzere çeşitli avantajlara sahiptir. Son zamanlarda ZnO üzerine yapılan araştırma projelerindeki artışa ve ilgili yayın sayılarına bakıldığında bu alanda yoğun bir ilginin var olduğu gözlemlenmektedir. Bilim adamlarını ve araştırmacıları ZnO ile ilgili alanlarda çalışmalara iten en önemli etken ZnO'nun 300 °K'de yasak enerji aralığı (Eg) yaklaşık olarak 3,33 eV gibi geniş bir direkt bant aralığına sahip olması ve dolayısıyla da optoelektronik uygulamalarda potansiyel bir yarıiletken malzeme olarak görülmektedir. Şekil 3.6'de ZnO'nun kristal yapılarını ve Şekil 3.7'de ZnO'nun hekzagonal bir birim hücrede düzlem ve doğrultularını göstermektedir.



Şekil 3.6. ZnO'nun kristal yapıları (a) kübik kaya tuzu (b) kübik çinko sülfür (c) hekzagonal wurtzite. Gri küreler oksijen atomunu siyah küreler ise çinko atomlarını göstermektedir.

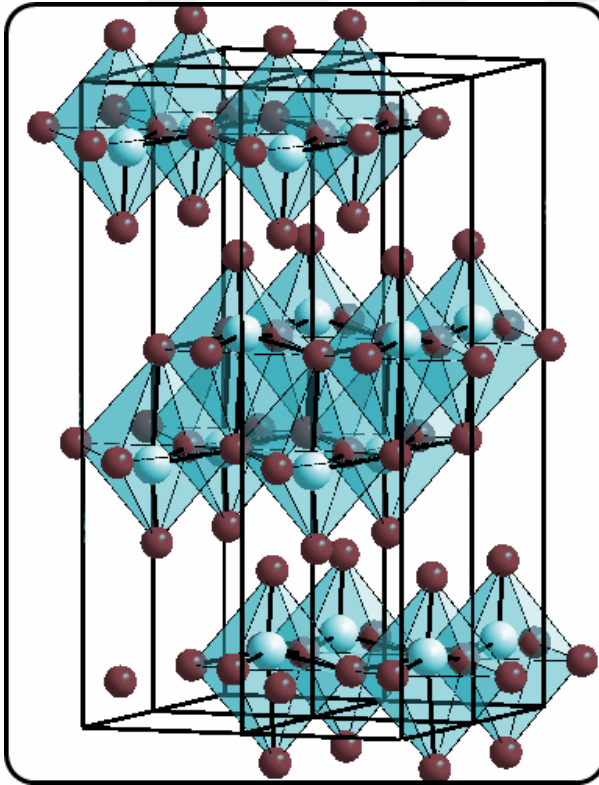


Şekil 3.7. ZnO'nun hekzagonal bir birim hücrede düzlem ve doğrultuları.

Son yıllarda metal oksit yarıiletken filmlerde tampon tabakası olan ZnO üzerinde yaygın bir şekilde çalışılmaktadır. ZnO, yüksek elektron hareketliliği ve görünür dalga boyunda yüksek geçirgenliğinden dolayı güneş pili çalışmaları için idealdir. Buna ek olarak ZnO mükemmel yüzey uyumluluğu, toksik olmayan, farklı ortamlardaki termal kararlılığı ve mükemmel kimyasal gibi ilginç özelliklere sahiptir ve ucuzdurlar. Elektrokimyasal büyütme, püskürtme (sputtering), sol-jel, darbeli lazer büyütme (PLD) ve metal organik kimyasal buhar büyütme (MOCVD) gibi çok çeşitli teknikler ile yüksek kalitedeki ZnO ince filmlerini bu metotlarla büyütüldüğü söylenilmektedir (Park et al. 2010).

3.1.1.6. Molibden Oksit (MoO_3)

Molibden oksit kimyasal bir bileşik olup MoO_3 formülüne sahiptir. Organik güneş pillerinde boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak kullanılmaktadır. Molibden oksite (MoO_3) ek olarak vanadyum oksit (V_2O_5) ve tungsten oksit (WO_3) gibi geçiş metal oksit (TMO) katmanları da organik güneş pillerinde hol taşıma tabakası (HTL) olarak kullanılmaktadır. Son birkaç yılda, yüksek iş fonksiyonuna sahip molibden oksit (MoO_3) güneş pillerinde büyük bir yerleşik voltaj oluşturan, organik elektronikte boşluk enjeksiyon ve ekstraksiyon malzemesi olarak başarıyla kullanılmıştır. Bu aygıtlarda, elektronların doğrudan transferi n-tipi MoO_3 'ün (elektron ilgisi yaklaşık 6,7 eV) çok düşük iletim bandı bitişik aktif tabaka elektron verici (donör) moleküllerinin en yüksek işgal edilmiş moleküler yörüngesinin (HOMO) etkin boşluk ekstraksiyon işleminden sorumludur (Zilberberg et al. 2013). Üstelik MoO_3 ara tabakaları, perovskit alt hücrelere dayanan tandem hücrelerde rekombinasyon tabakalarının gerçekleşmesi için büyük ilgi çekmektedir (Löper et al. 2015). MoO_3 'ün kristal yapısı Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. MoO_3 'ün kristal yapısı.

3.2. Yöntem

Bu bölümde P3HT:PCBM tabanlı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pillerinin fabrikasyonları için gerekli olan malzeme ve numune hazırlanması ile ilgili bilgi ve yöntemleri kapsamaktadır. Organik güneş pilleri ile ilgili çalışmalar; hazırlık, fabrikasyon ve karakterizasyon olmak üzere üç aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada klasik yapı için ITO temizliği, PEDOT:PSS'in süzülmesi, P3HT:PCBM'in uygun oranlarda elde edilmesi işlemleri yapılmakta iken ters çevrilmiş yapı için ITO temizliği, ZnO çözeltisinin hazırlanması, P3HT:PCBM'in uygun oranlarda elde edilmesi işlemleri yapıldı. İkinci aşamada ise ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV'lerin fabrikasyonları yapıldı. Üçüncü aşamada ise ters çevrilmiş organik pili tasarımındaki her bir tabakanın optik, morfolojik, yapısal analizi ile üretilen ters çevrilmiş OPV ve klasik OPV aygıtlarının karanlıkta ve ışık altındaki J-V ölçümleri yapıldı.

3.2.1. P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyon ve Karakterizasyon Aşamaları

Heteroeklem organik güneş pilleri ile ilgili çalışmalar; hazırlık, fabrikasyon ve karakterizasyon olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.1. ITO'nun Temizlik Aşamaları

Daha önce özellikleri belirtilen ITO kaplı cam satın alındı. 15x15 mm² boyutlarında kesildikten sonra aşağıda belirtildiği gibi kimyasal temizleme işlemleri uygulandı.

- 1- İlk önce ultrasonik su banyosu su ile doldurularak 60°C'de ısınması sağlanır,
- 2- 60°C'de 15 dakika boyunca decon çözeltisinde ultrasonik yıkandı,
- 3- 15 dakika boyunca deiyonize su (DI) ile ultrasonik yıkandı,
- 4- Azot (N₂) gazı ile kurutuldu,
- 5- 60°C'de 15 dakika boyunca aseton ile ultrasonik yıkandı,

- 6- İkinci kez N₂ gazı ile kurutuldu,
- 7- 60°C’de 15 dakika boyunca izopropanol ile ultrasonik yıkandı,
- 8- Daha sonra DI ile durulandı,
- 9- 60°C’de 15 dakika boyunca DI ile ultrasonik yıkandı,
- 10- Ve son olarak da N₂ gazı ile kurutulduktan sonra ITO’nun temizlik aşamaları tamamlandı.

Yukarıdaki ITO temizlik aşamaları her iki yapı (hem geleneksel hem de ters çevrilmiş) içinde geçerlidir.

3.2.1.2. PEDOT:PSS’in Hazırlanması

(PEDOT:PSS) poli (3,4-etilendioksityofen):poli (stirensülfonat) (PEDOT:PSS) %1,1 oranında su (H₂O), ticari olarak satın alındı. Satın alınan PEDOT:PSS 0,45 µm gözenekli PVDF filtresi ile filtrelenerek kullanıma hazır hale getirildi.

3.2.1.3. P3HT:PCBM Aktif Tabaka Malzemelerinin Hazırlanması

Heteroeklem organik güneş pillerinde aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM, p-tipi P3HT ve n-tipi PCBM organik malzemelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşmaktadır. P3HT:PCBM’in hazırlanması üç aşamadan oluşmaktadır.

- 1- 30 mg P3HT ve 3 ml kloroform ile çözelti hazırlayarak 60 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılarak çözülmesi sağlandı.
- 2- 24 mg PCBM ve 2,4 ml kloroform ile çözelti hazırlayarak 60 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmasıyla çözülmesi sağlandı.
- 3- Farklı kaplardaki P3HT ve PCBM çözeltilerinin aynı kaba aktarılarak kütlece 1:0,8 oranında P3HT:PCBM 12 saat boyunca manyetik karıştırıcıda bekletildikten sonra kullanıma hazır hale getirildi. P3HT:PCBM’in hazırlanması ile ilgili bütün işlemler eldivenli kabin içerisinde gerçekleştirilmiştir.

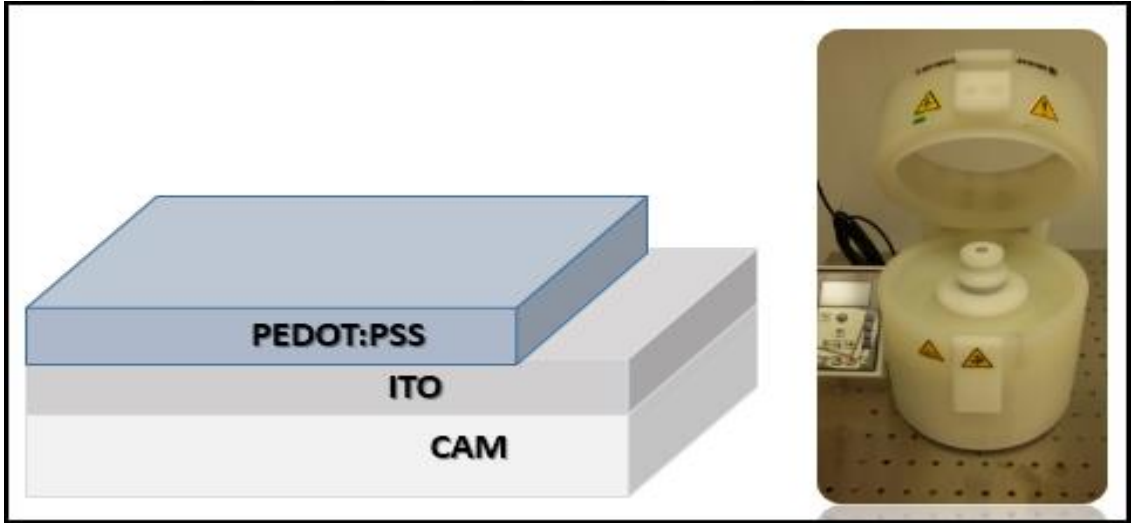
Hazırlanmış olan bu kütlece 1:0,8 oranındaki P3HT:PCBM çözeltisi her iki (hem geleneksel hem de ters çevrilmiş) yapı fabrikasyonu için kullanılmıştır.

3.2.1.4. P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Organik Güneş Pilinin Fabrikasyonu

Kimyasal temizliği yapılmış ITO kaplanmış cam yüzey üzerine aşağıdaki işlemler yapılarak anot/boşluk taşıma tabakası/**aktif tabaka** /katot organik güneş pili yapısı elde edildi.

1.Aşama: PEDOT:PSS'in Kaplanması

ITO yüzeyine PEDOT:PSS dönel kaplama yöntemi ile 4000 rpm'de 45 saniye boyunca kaplandı. Kaplama işlemi bittikten sonra elektriksel ölçümler için numunenin kenarı PEDOT:PSS'in çözücüsü olan su ile silindi. Daha numune 120 °C'de 5 dakika boyunca sıcak tabla üzerinde tavlannmıştır. PEDOT:PSS kaplama işlemi Laurell marka WS-650MZ-23NPPB model dönel kaplama cihazı ile gerçekleştirildi. Şekil 3.9'da ITO/PEDOT:PSS'in kesit görüntüsü gösterilmektedir.



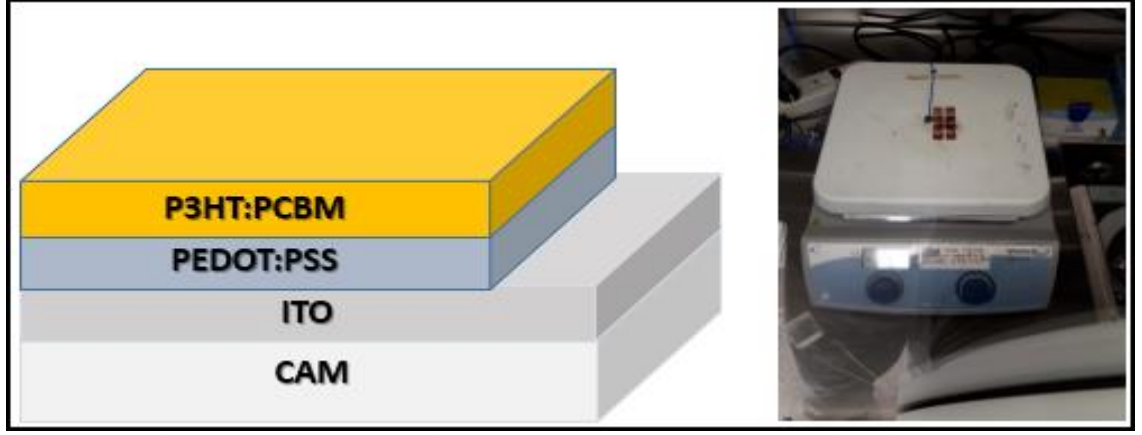
Şekil 3.9. ITO/PEDOT:PSS'in kesit görüntüsü.

2.Aşama: P3HT:PCBM Aktif Tabakasının Kaplanması

PEDOT:PSS kaplanmış ITO, eldivenli kabin içerisine aktarıldı. Numune, eldivenli kabin içerisindeki dönel kaplama cihazı ile 1:0,8 oranındaki P3HT:PCBM karışımı ile 800 rpm'de 50 saniye boyunca kaplandı. Ve hemen ardından sıcak tabla üzerinde 115 °C'de 5 dakika boyunca tavlandı. Şekil 3.10'da görüldüğü üzere ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM yapısı elde edildi. Böylece dönel kaplama yöntemi ile

3. MATERYAL ve YÖNTEM

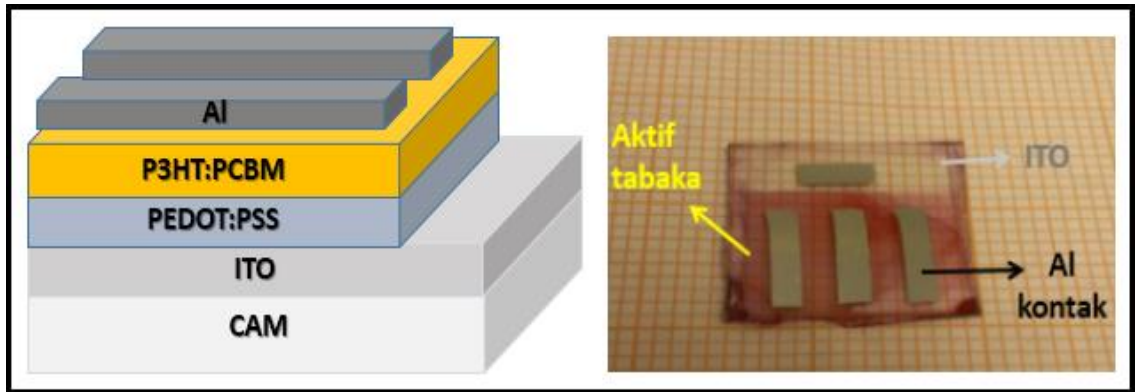
yapılan kaplama işlemleri tamamlandı ve metal kaplama işlemi için numune termal buharlaştırma ünitesine aktarıldı.



Şekil 3.10. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM'in kesit görüntüsü ve numunenin sıcak tabla üzerinde tavlama işlemi.

3.Aşama: Al Metal Kaplama

Eldivenli kabin ünitesine entegre edilen termal buharlaştırma ünitesinde P3HT:PCBM üzerine 1×10^{-7} Torr basınç altında 1 \AA/s oranında 100 nm kalınlığında Al metali kaplandı. Şekil 3.11'de elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem organik güneş pili yapısını ve $2 \times 4 \text{ mm}^2$ alana sahip kesit görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 3.11. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem organik güneş pili yapısı ve $2 \times 4 \text{ mm}^2$ alana sahip kesit görüntüsü.

3.2.2. P3HT:PCBM Tabanlı Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyon ve Karakterizasyon Aşamaları

Ters çevrilmiş organik güneş pilleri ile ilgili çalışmalar; hazırlık, fabrikasyon ve karakterizasyon olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1. Çinko Oksit (ZnO) Çözeltisinin Hazırlanması

ZnO çözeltisinin hazırlanması için öncül olarak çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve mono etanol amin ($\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) dengeleyici olarak 2-metoksi etanol'de ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) çözündürüldü. İlk olarak 0,5 gr. çinko asetat dihidrat 6,38 ml 2-metoksi etanol'de çözündürüldü ve ardından çözeltiliye 0,200 ml monoethanolamin eklendi. Son olarak çözelti oda sıcaklığında bir gün boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılarak çözelti hazır hale getirilmiş olup ve çözelti kullanılmadan önce 0,45 μm gözenekli PVDF filtresi ile filtrelenmiştir.

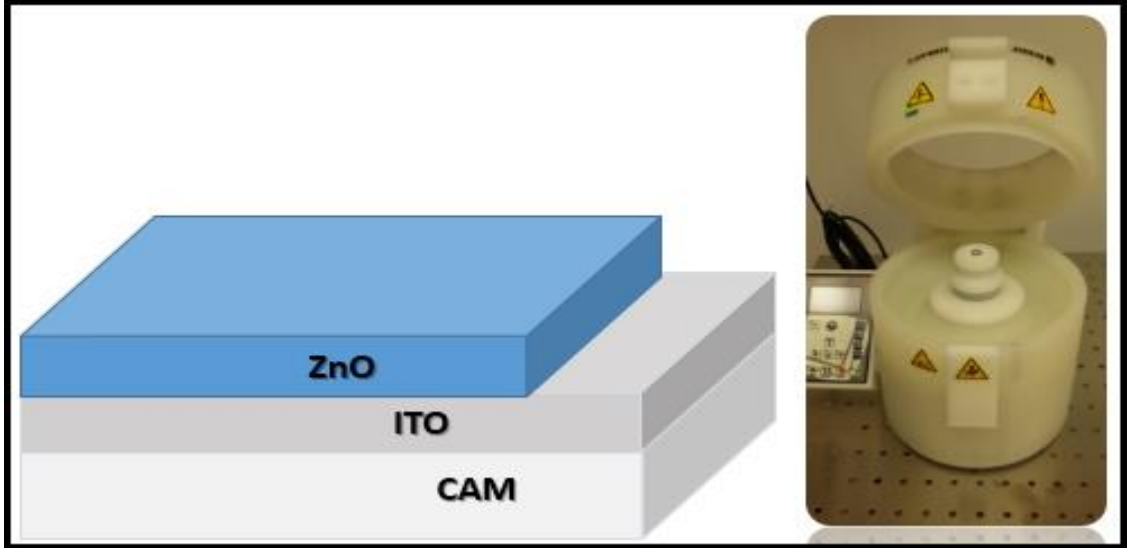
3.2.2.2. P3HT:PCBM Tabanlı Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pilinin Fabrikasyonu

Kimyasal temizliği yapılmış ITO kaplanmış cam yüzey üzerine aşağıdaki işlemler yapılarak katot/elektron taşıma tabakası/**aktif tabaka**/boşluk taşıma tabakası/anot ters çevrilmiş OPV yapısı elde edildi.

ITO yüzeyine ZnO kaplama işlemi dönel kaplama (spin coating) ve püskürtme (sputtering) cihazları ile 2 farklı şekilde kaplanmıştır.

1.a. Aşama: Dönel Kaplama Cihazı ile ZnO Çözeltisinin Kaplanması

Dönel kaplama cihazı ile daha önceden hazırlanmış ZnO çözeltisi ITO yüzeyine 2500 rpm'de 50 saniye kaplandıktan sonra numune 150°C 'de 10 dakika boyunca sıcak tabla üzerinde tavlandı ve bu kaplama ve tavlama işlemi üç kez tekrarlandıktan sonra ZnO çözeltisinin ITO yüzeyine kaplama işlemi tamamlandı. Şekil 3.12'de ITO yüzeyine dönel kaplama yöntemi ile kaplanmış ZnO çözeltisinin kesit görüntüsünü göstermektedir.

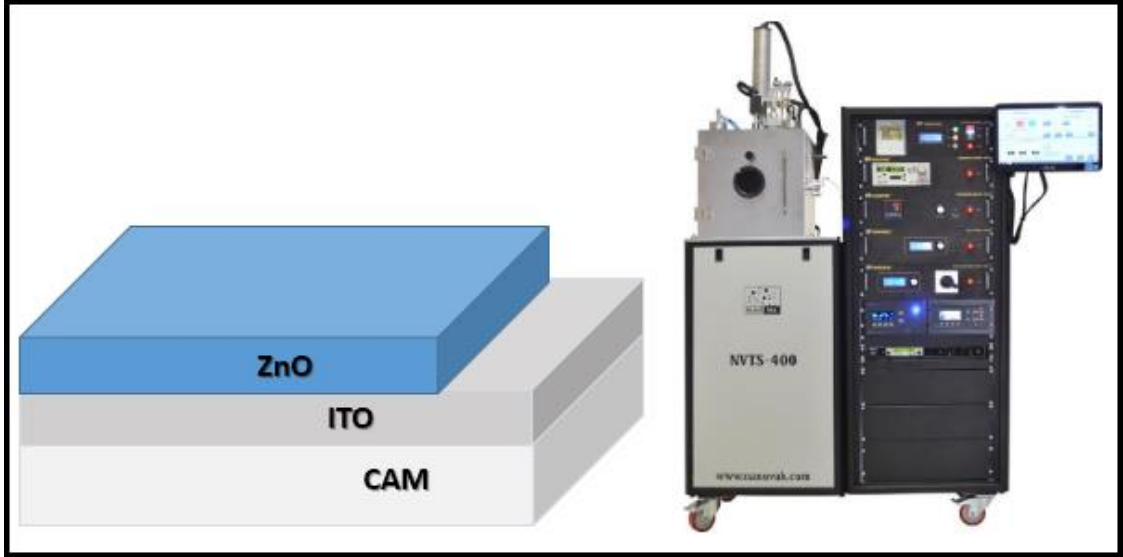


Şekil 3.12. ITO/ZnO ince filminin kesit görüntüsü.

1.b. Aşama: Püskürtme (Sputtering) Cihazı ile ZnO'nun Kaplanması

Püskürtme cihazı ile ITO yüzeyine ZnO kaplamak için ZnO 'target' i kullanılarak ve Nanovak ekranına aşağıda belirtilen değerler girilerek kaplanmıştır. Şekil 3.13'de ITO yüzeyine püskürtme yöntemi ile kaplanmış ITO/ZnO'nun kesit görüntüsünü göstermektedir.

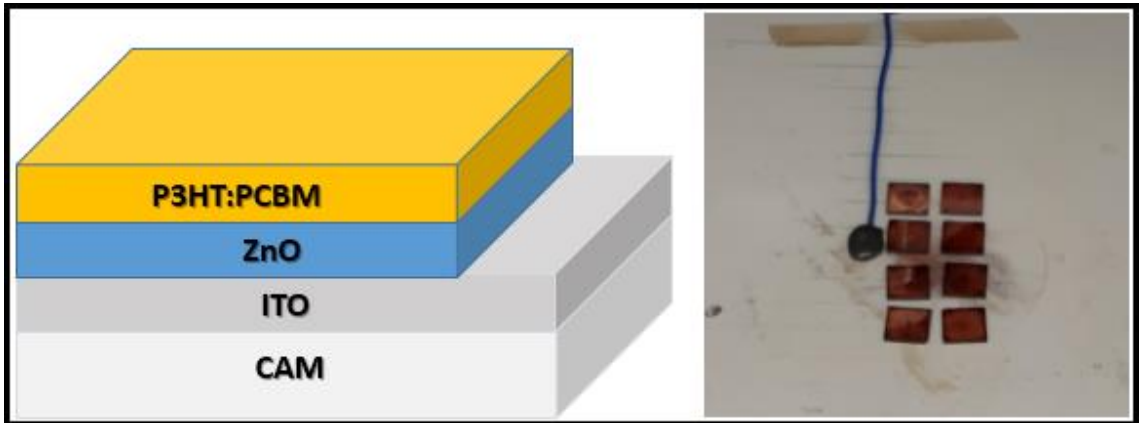
<u>Taban Basıncı(Torr)</u>	<u>Büyüme Basıncı(mTorr)</u>	<u>Sıcaklık(°C)</u>	<u>Gas1 Ar (sccm)</u>	
2×10^{-7} Torr	17,93 mTorr	350 °C	200	
<u>Gas2 O₂ (sccm)</u>	<u>Gas3 N₂(sccm)</u>	<u>Büyüme Hızı (Å/s)</u>	<u>Kalınlık (nm)</u>	<u>Güç (W)</u>
-	-	0,5 Ås ⁻¹	35 nm	60 W
<u>Büyüme Zamanı(dk.)</u>	<u>Alt Tabaka</u>			
8 dk.	Cam/ITO			



Şekil 3.13. Püskürtme yöntemiyle ITO yüzeyine ZnO'nun kaplanması ile oluşan ITO/ZnO ince filminin kesit görüntüsü.

2.Aşama: P3HT:PCBM Aktif Tabakanın Kaplanması

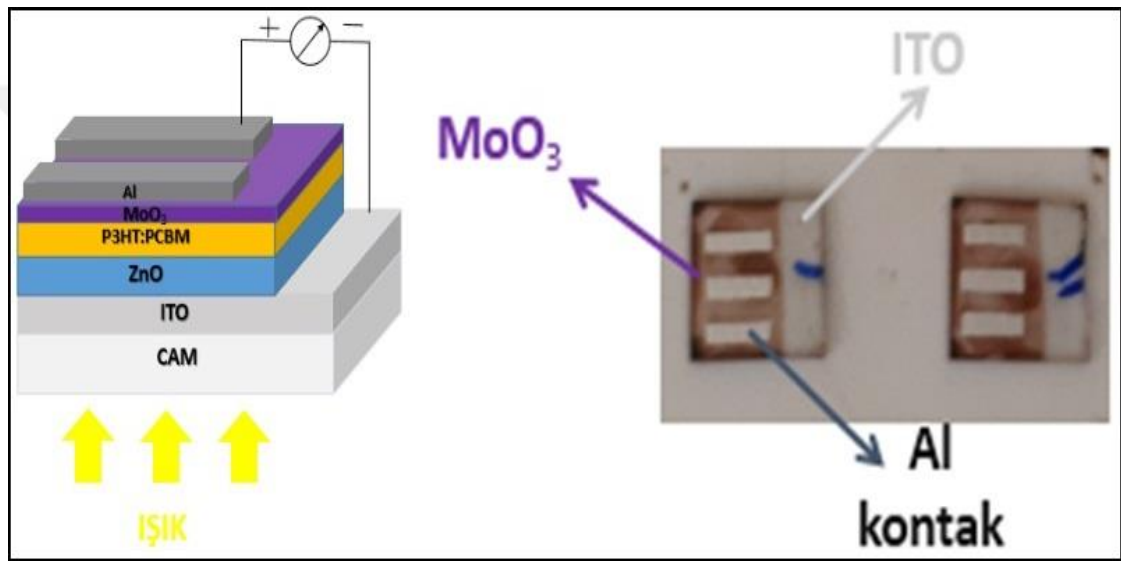
2 farklı yöntemle ZnO kaplanmış ITO'lar eldivenli kabin içerisine aktarıldı. Numuneler eldivenli kabin içerisindeki dönel kaplama cihazı ile 1:0,8 oranındaki P3HT:PCBM karışımı ile 800 rpm'de 50 saniye kaplandıktan sonra sıcak tabla üzerinde 115 °C'de 5 dk. boyunca tavlandı ve numuneleri P3HT:PCBM kaplama işlemi tamamlandı. Böylece dönel kaplama yöntemi ile yapılan kaplama işlemleri tamamlandı ve metal kaplama ile diğer buharlaştırma işlemleri için numuneler termal buharlaştırma ünitesine aktarıldı. Şekil 3.14'de numunelerin sıcak tabla üzerindeki tavlama işlemini ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM kesit görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.14. ITO/ZnO/P3HT:PCBM kesit görüntüsü ve numunelerin sıcak tabla üzerindeki tavlama işlemi.

3.Aşama: Molibden Oksit (MoO_3) ve Al Metal Kaplama

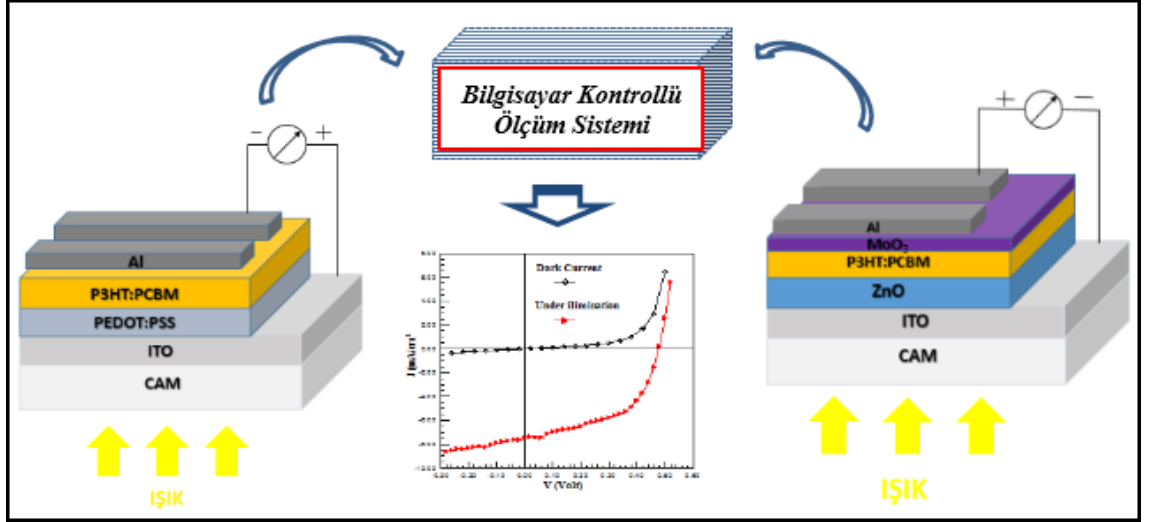
Eldivenli kabin ünitesine entegre edilen termal buharlaştırma ünitesinde P3HT:PCBM üzerine boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak 1×10^{-7} Torr basınç değerinde 1 Å/s oranında 10 nm kalınlığında MoO_3 kaplandı. Daha sonra MoO_3 tabakası üzerine 100 nm kalınlığında Al metali kaplandı. Termal buharlaştırma işlemleri için NANOVAK marka Glove Box Adapted Coating System model termal buharlaştırma ünitesi kullanılmaktadır. Şekil 3.15’de elde edilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/ MoO_3 /Al ters çevrilmiş organik güneş pilini göstermektedir.



Şekil 3.15. Elde edilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/ MoO_3 /Al ters çevrilmiş heteroeklem organik güneş pillerinin aygıt yapısı ve $2 \times 4 \text{ mm}^2$ alana sahip kesit görüntüleri.

3.2.3. Organik Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyonu

Üretilen organik güneş pillerinin J-V ölçümleri eldivenli kabin ünitesinde karanlıkta ve ışık altında alındı. Elde edilen organik güneş pillerinin J-V ölçümleri kabine bağlanmış bilgisayar programı ile kontrol edilen KEITHLEY 4200 ölçüm cihazı ile yapıldı. Yapılan organik güneş pillerinin açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), dolun faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi J-V ölçüm parametreleri sayesinde hesaplandı. Şekil 3.16’da ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/ MoO_3 /Al ters çevrilmiş OPV aygıtlarının karakterizasyon sisteminin şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.16. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV aygıtlarının karakterizasyon sisteminin şematik gösterimi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

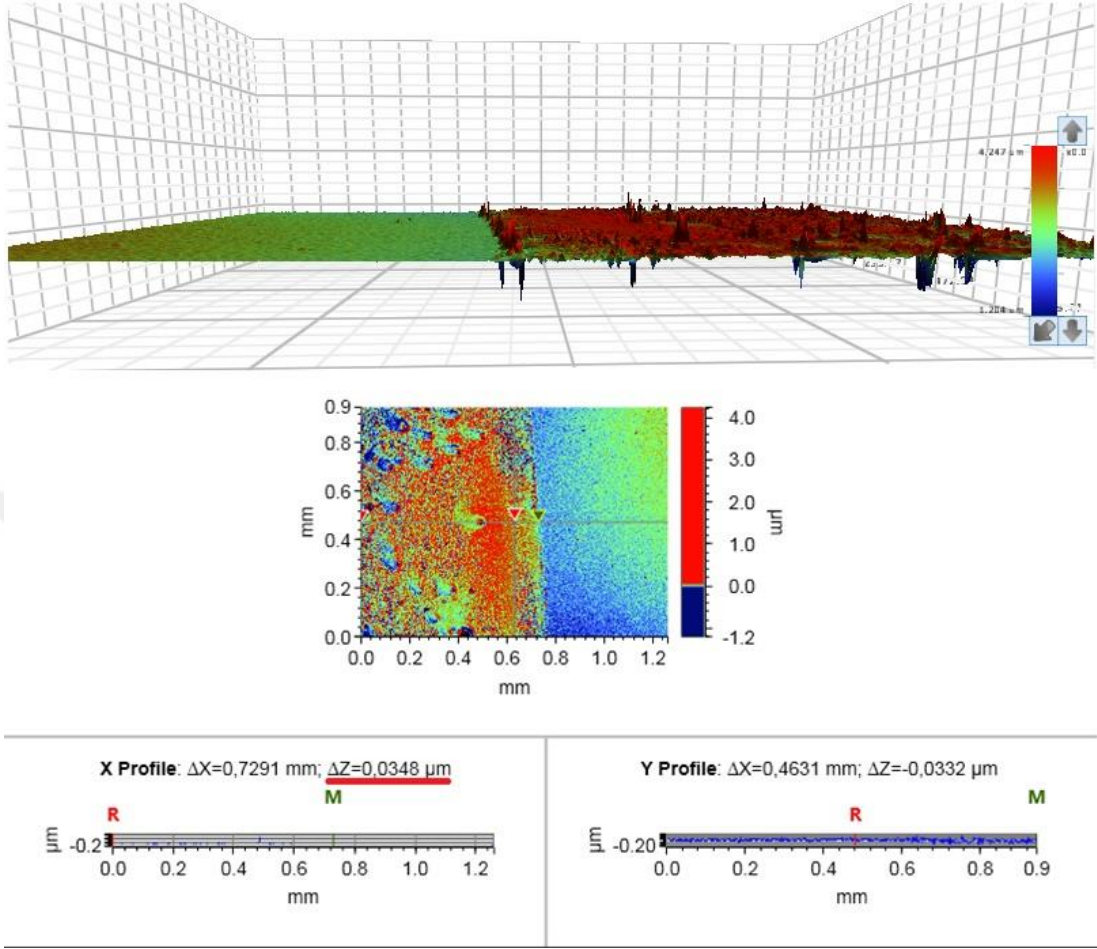
4.1. Giriş

Bu bölümde materyal ve yöntem bölümünde hazırlık, fabrikasyon ve karakterizasyon süreçleri ayrıntılarıyla anlatılmış olan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik OPV ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV aygıtlarının karanlıkta ve ışık altındaki J-V ölçümleri ve bu ölçümlerden elde edilen temel güneş pili parametreleri yer almaktadır. Ayrıca klasik ve ters çevrilmiş organik güneş pillerinin tasarımında aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM ve ters çevrilmiş OPV aygıtı tasarımında elektron taşıma tabakası (ETL) olarak kullanılan ZnO ve boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak kullanılan MoO₃'ün optiksel, morfolojik ve yapısal karakterizasyon sonuçlarına da bu bölümde yer verilmiştir.

4.2. Ters Çevrilmiş Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Tabakaların Optiksel, Morfolojik ve Yapısal Karakterizasyonu

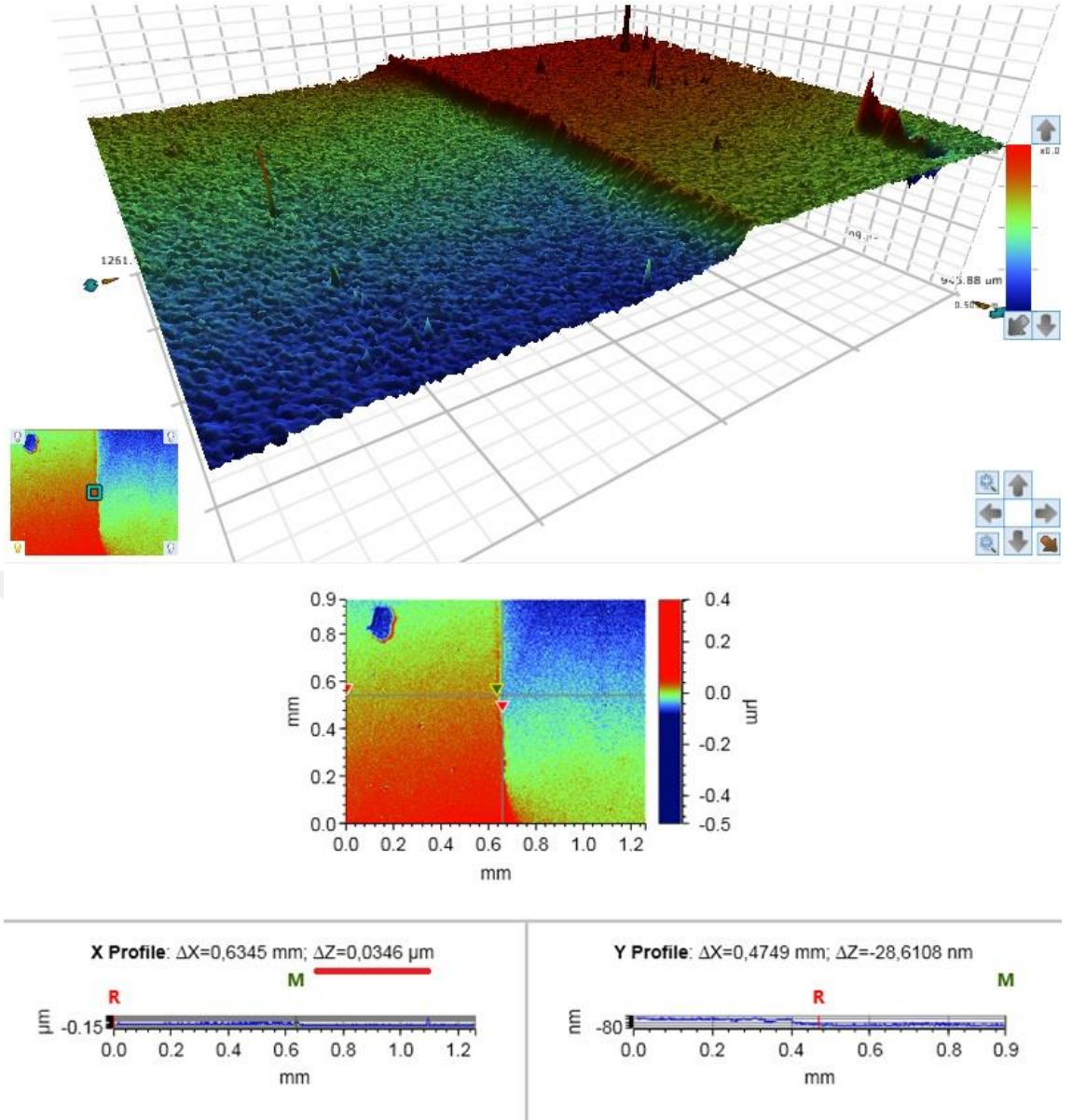
Klasik ve ters çevrilmiş heteroeklem organik güneş pillerinin mimarilerinde aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM'in cam yüzeyine ve ters çevrilmiş organik güneş pili mimarisinde elektron taşıma tabakası (ETL) olarak ZnO'nun hem dönele kaplama ve hem de püskürtme yöntemi ile cam yüzeylerine ve boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak da kullanılan MoO₃ cam yüzeyine ince film olarak kaplandılar. Elde edilen bu ince filmlerin soğurma, profilometre, AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ve XRD (X-Işını Kırınımı) ölçümleri alındı. Tüm bu ölçümler Atatürk Üniversitesi bünyesinde kurulan Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) ve Erzurum Teknik Üniversitesi bünyesinde kurulan Yüksek Teknolojiler Araştırma Merkezi (YÜTAM)'da yapıldı.

4.2.1. Profilometre Ölçümleri



Şekil 4.1. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin profilometre görüntüleri.

0,5 gr. çinko asetat dihidrat 6,38 ml 2-metoksi etanol ile hazırlanan ZnO çözeltisi çeker ocaktaki dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine 2500 rpm'de 50 saniye kaplanıp ve numune 150°C'de 10 dakika boyunca sıcak tabla üzerinde tavlandı. Bu kaplama ve tavlama işlemleri üç kez tekrarlandı. Ve böylece ZnO çözeltisinin cam yüzeyine kaplanması ile cam/ZnO ince filmi edildi. Şekil 4.1'de cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin iki ve üç boyutlu profilometre görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.1'den de görüleceği üzere ZnO ince filminin kalınlığı yaklaşık olarak $\Delta Z=35$ nm'dir.

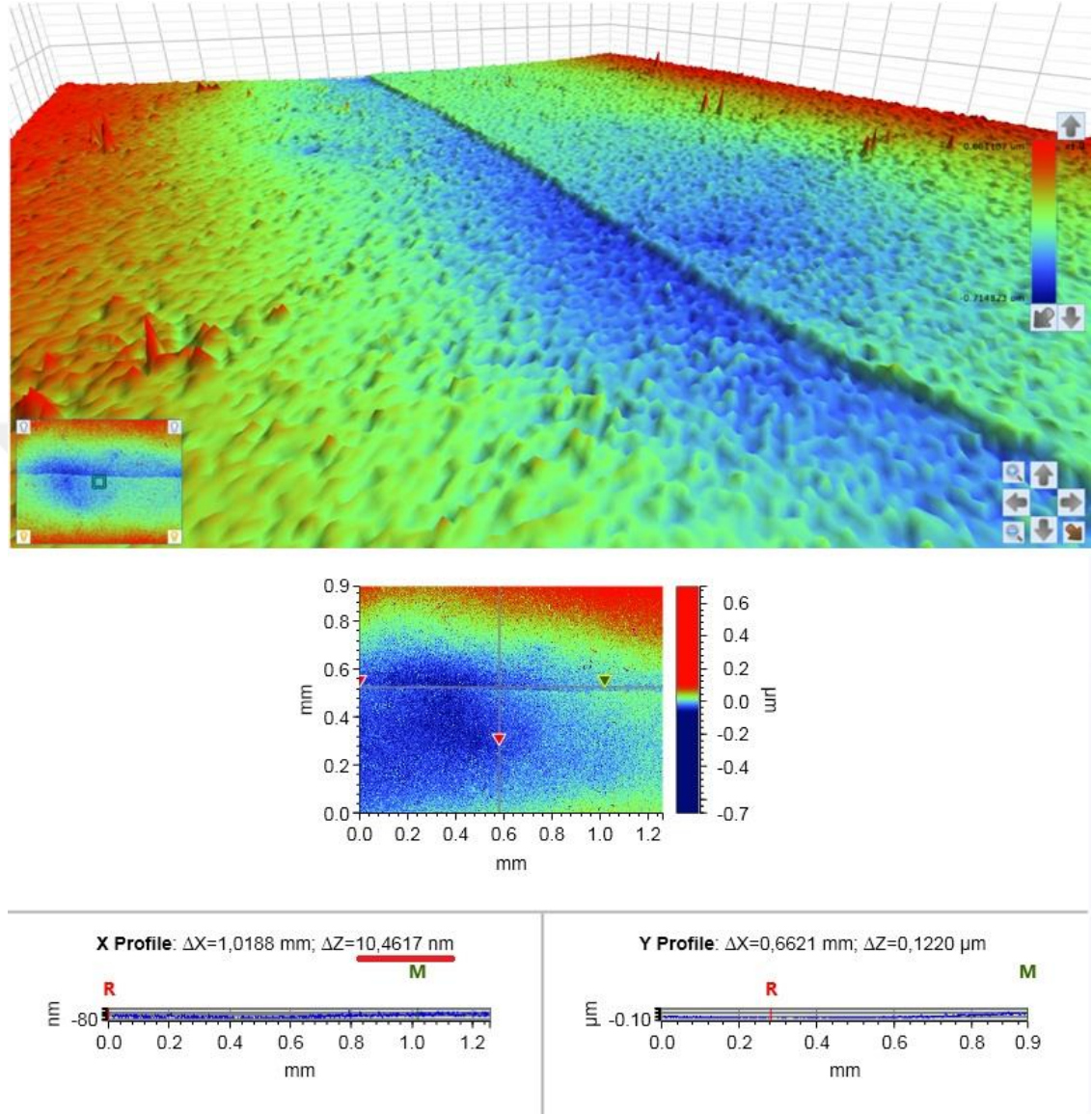


Şekil 4.2. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin profilometre görüntüleri.

Püskürtme için kullanılan ZnO target'i %99,99 saflığa sahiptir. Materyal ve yöntem bölümünde ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere RF magnetron püskürtme cihazı ile cam yüzeyi üzerine ZnO kaplandı. Püskürtme işlemi bir Argon (Ar) plazması kullanılarak yapılmıştır. Kaplamadan önce target yüzeyini temizlemek için 5 dakika boyunca bir ön püskürtme işlemi gerçekleştirildi. ZnO ince film tabakaları, 60 W sabit bir RF gücünde püskürtülmüştür. Kaplama boyunca basınç yaklaşık $1,8 \times 10^{-6}$ Torr'a sabitlendi ve alt tabaka sıcaklığı kabaca 40 °C'nin altında tutuldu. Şekil 4.2'de ZnO ince filminin iki ve üç boyutlu profilometre görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.2'den de görüleceği üzere ZnO ince

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

filminin kalınlığı yaklaşık olarak $\Delta Z= 35$ nm'dir. Elde edilen profilometre ölçüm sonucu kaplama ünitesi sensörlerinin kaplama esnasında belirlediği kalınlık ile uyumludur.



Şekil 4.3. Cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin profilometre görüntüleri.

Eldivenli kabin içindeki termal buharlaştırma ünitesinin içindeki molibden oksit (MoO₃) potasına belirtilen ölçüde molibden oksit tozu konularak ve Nanovak ekranına belirtilen değerler girilerek cam yüzeyine MoO₃ kaplanmıştır. MoO₃'ü kaplama kalınlığı termal buharlaştırma ünitesi içerisinde bulunan kristal sensörler ile belirlendi. Şekil 4.3'de yaklaşık $\Delta Z= 10$ nm kalınlığındaki MoO₃ ince filminin iki ve üç boyutlu profilometre görüntüsü verilmiştir. Elde edilen profilometre ölçüm sonucu kaplama ünitesi sensörlerinin kaplama esnasında belirlediği kalınlık ile uyumludur.

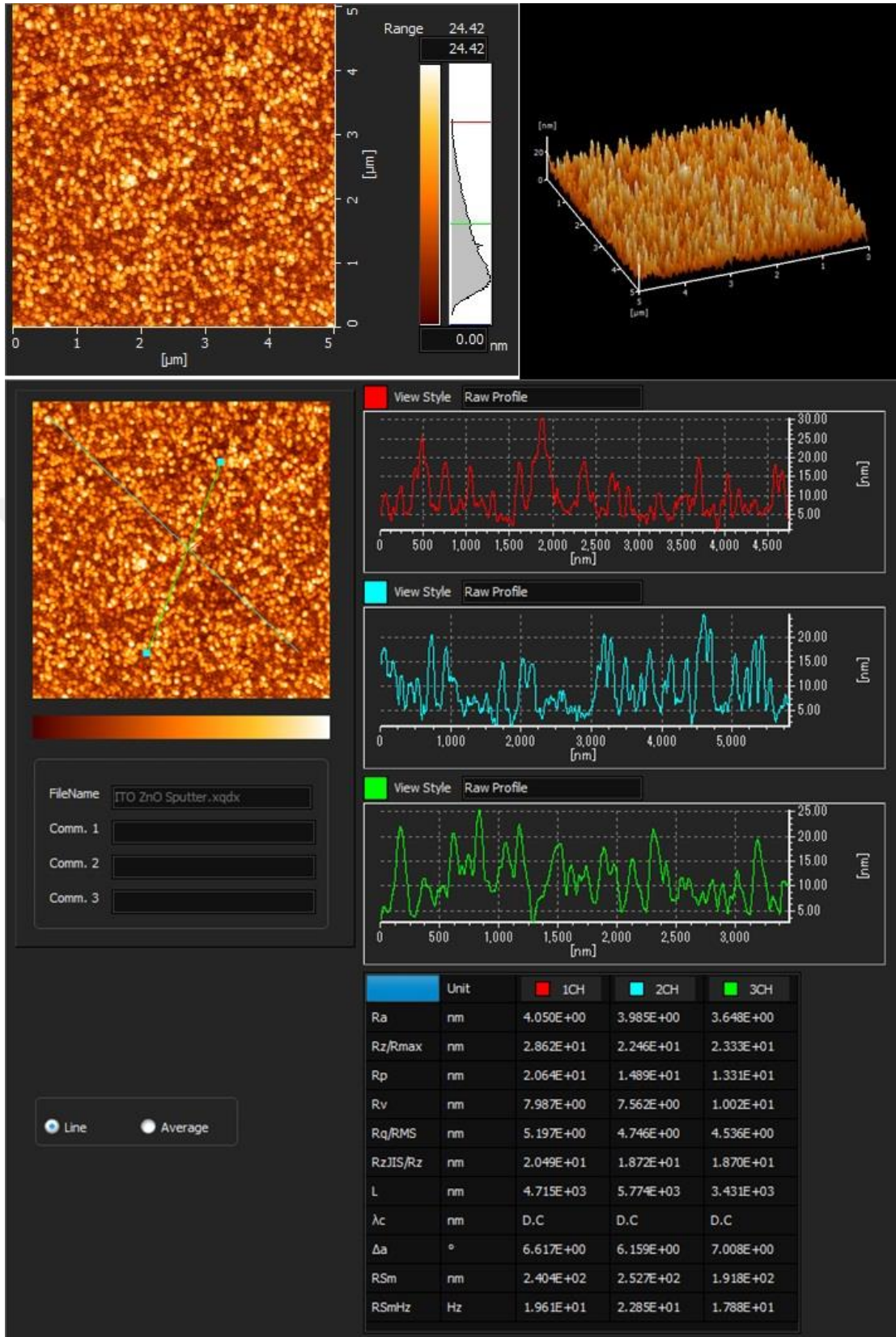
4.2.2. AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) Görüntüleri

Organik tabakaların morfolojik özellikleri güneş pili aygıtlarının performanslarının belirlenmesinde önemli rol oynar. Bu çalışmada AFM görüntüleriyle iki ve üç boyutlu yüzey profilleri elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sırasında elde edilen ince filmlerin yüzey morfolojisini etkileyebilecek herhangi bir metal kaplama yapılmamıştır. Bu bölümde, dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filmi, püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filmi, cam yüzeyine kaplanmış P3HT:PCBM ince filmi ve cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filmlerinin AFM görüntülerine yer verilmiştir.

Şekil 4.4’de dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler temas moduyla Atomik Kuvvet Mikroskobu kullanılarak elde edildi. Tarama alanı 5 µm x 5 µm’dir. Şekil 4.4 numune yüzeyinin nispeten pürüzlü olduğunu ve tane boyutlarının eşit olduğunu ortaya koymaktadır (Shivaraj et al. 2013). AFM görüntüsü gözenekli yapının varlığını göstermektedir. Büyümüş film için rastgele dağılmış yuvarlak şekilli adalardan oluşabilen, birbirleriyle bağlantılı ZnO parçacıkları gözlenebilir (Srinivasan et al. 2008). AFM görüntülerini ve bu görüntülerden belirlenen yüzey parametrelerinin (ortalama pürüzlülük, R_a ve ortalama karekök pürüzlülüğü, R_{rms}) değerlerini gösterir. Filmin mikro yapısı düşük yüzey pürüzlülüğü ile yüksek yoğunluklu sütun yapısı ile karakterize edilir (Smirnov et al. 2010). Şekil 4.4’e bakıldığında ZnO ince filminin ortalama yüzey pürüzlülük değeri $R_a= 2,5$ nm, ortalama karekök pürüzlülüğü yaklaşık $R_{rms}= 2,8$ nm, maksimum yüzey pik yüksekliği yaklaşık $R_p= 5,1$ nm ve yüzeyin maksimum vadi derinliği yaklaşık olarak $R_v= 9,4$ nm olduğu görülmektedir. ZnO ince filmde maksimum yükseltiler ile derinliklerin 5,1 nm ve 9,4 nm arasında değiştiği görülmektedir. AFM görüntüleri, yüksek dereceli kristalli filmlerin ve pürüzsüz ara yüzün taşınmayı etkilediğini, düzenli moleküler sıralamalarının geniş moleküller arası orbital üst üste gelmelerine izin verdiğini göstermektedir (Bekci et al. 2012).



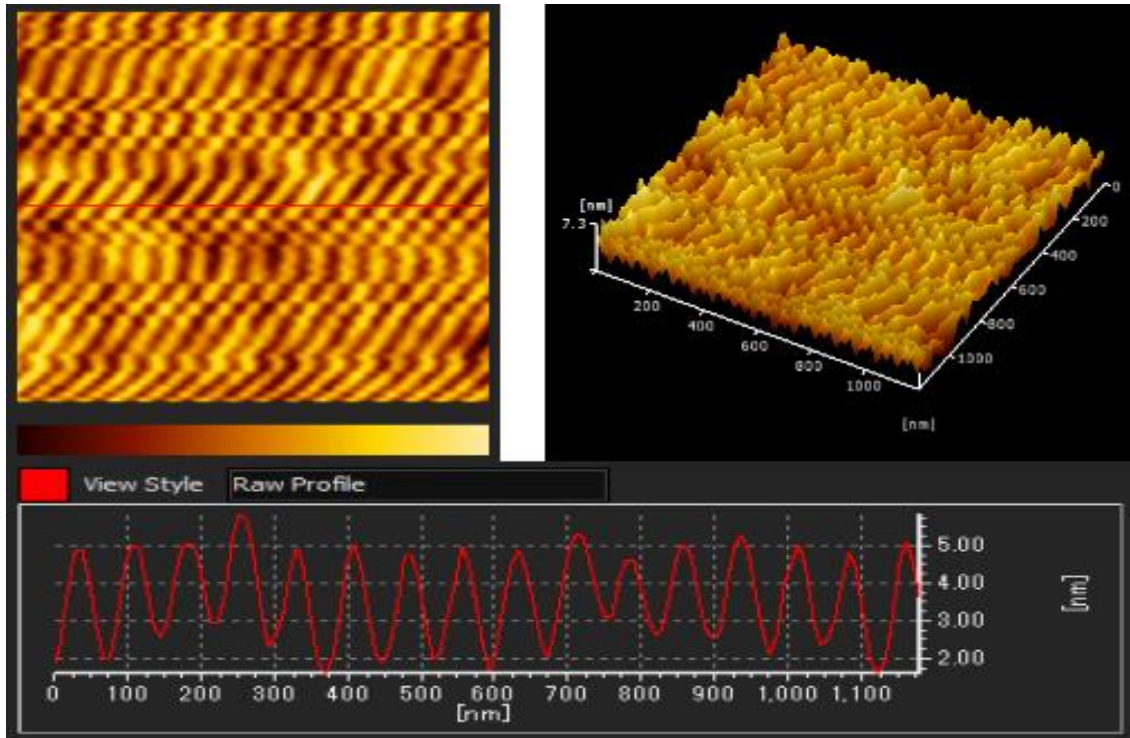
Şekil 4.4. Dönel kaplama (spin coating) cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin AFM görüntüleri.



Şekil 4.5. Püskürtme (sputtering) cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin AFM görüntüleri.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

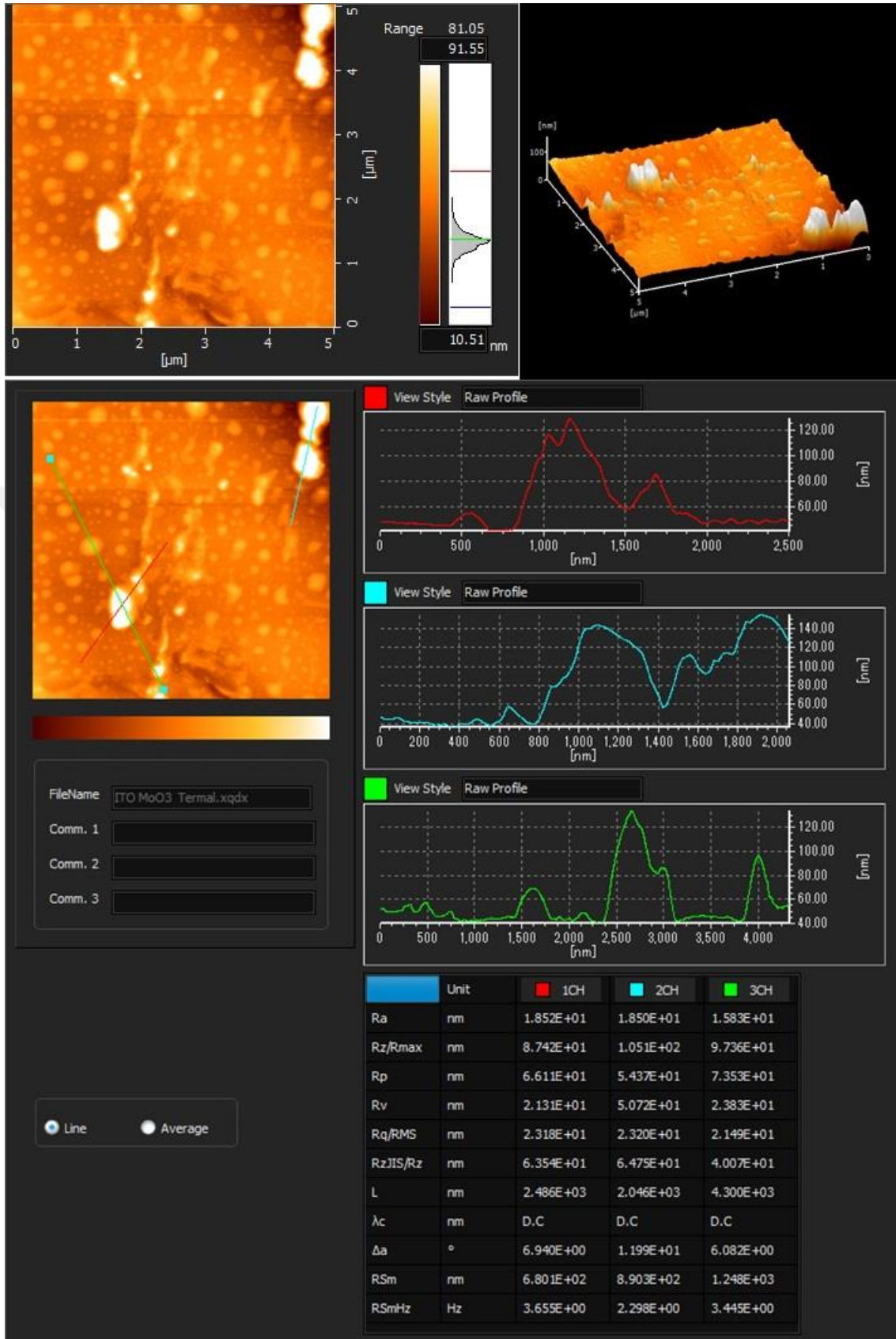
Şekil 4.5’de püskürtme (sputtering) ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO filminin AFM görüntülerini gösterir. Tarama alanı 5 µm x 5 µm’dir. Ar püskürtme gazı ile ZnO filminin ortalama karekök pürüzlülüğü yaklaşık $R_{rms}= 5,19$ nm, ortalama yüzey pürüzlülük değeri $R_a= 4,05$ nm, maksimum yüzey pik yüksekliği yaklaşık $R_p= 2,06$ nm ve yüzeyin maksimum vadi derinliği yaklaşık olarak $R_v= 7,98$ nm’dir. Camın aksine organik alt tabakaların cilalanamayacağına dikkat edilmeli ve bu yüzey pürüzlülüğü için önemli bir dezavantaj oluşturabilir (Jouane et al. 2013). ZnO filminin yüzeye homojen kaplandığını ve maksimum pik yüksekliği ve vadi derinliğinin 2,06 nm ve 7,98 nm arasında değiştiği görülmektedir. $P_{RF}= 60$ W’da biriktirilen numune pürüzsüz bir yüzey ve küçük dairesel taneler gösterir. Bununla birlikte $P_{RF}= 60$ W üstündeki yüzey topografyası önemlidir. Bunun bir nedeni, film yüzeyinin yüksek enerjili püskürtülmüş iyonlarla bombalanması sonucu ortaya çıkan yüzey hasarı olduğu düşünülmektedir. İyon destekli kaplama durumunda, yüzey hasarı meydana gelir ancak iyon enerjisi düşük olduğu durumda hızla tamir edilir. Bununla birlikte, yüzey hasarı oranı onarım oranından daha büyük olduğunda, biraz pürüzlü ve kötü kristalli bir film oluşur. $P_{RF}= 60$ W’da büyüttüğümüz ZnO filminin ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü literatür ile iyi bir uyum içindedir (Ondo-Ndong et al. 2003).



Şekil 4.6. Cam yüzeyine kaplanmış P3HT:PCBM ince filminin AFM görüntüleri.

P3HT:PCBM aktif tabakası, n tipi P3HT ve p tipi PC₆₁BM organik malzemelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile oluşur. Şekil 4.6'da cam yüzeyine kaplanmış P3HT:PCBM ince filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. Aktif tabaka karışımındaki PCBM oranı arttıkça PCBM'in lokal difüzyonu ve kristalleşmesi sonucunda film yüzeyinde aşırı büyümüş kümeler oluşabilmektedir (Baek et al. 2010). P3HT:PCBM filminin 1:0,8 oranındaki yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak 3 nm olduğu ve film yüzeyinde birbirine yakın yükseltelerin olduğu görülmektedir. Daha iyi bir film oluşturabilmek için organik güneş pillerinin dolum faktörü arttırabilir. Literatürde yapılan çalışmalarda 1:1 oranındaki P3HT:PCBM'in yüzey pürüzlülüğü 1:0,8 oranına göre fazla olduğu saptanmıştır. Literatürde farklı oranlarda ikili P3HT:PCBM ile yapılan organik güneş pillerinin elektriksel ölçümleri de incelendiğinde 1:1 oranına göre 1:0,8 oranındaki aygıtların dolum faktörü ve güç dönüşüm veriminde iyileşmeler olduğu gözlenmiştir. Bu durum 1:0,8 oranının P3HT:PCBM karışımı için ideal bir film yapısına sahip olduğunu göstermektedir (Yagci et al. 2016).

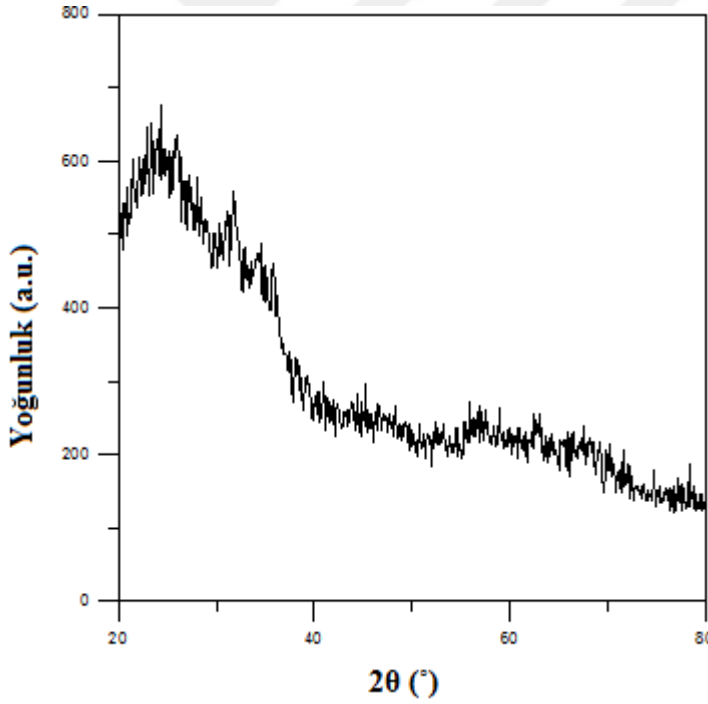
Şekil 4.7'de bir cam yüzeyi üzerine 0,5-1 Å/s buharlaşma hızında termal buharlaştırma ile kaplanmış 10 nm kalınlığında bir MoO₃ ince filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler 5 µm x 5 µm'luk yüzey alanından elde edildi. Yüzeyde yaklaşık 100 nm genişliğe ve yaklaşık 10 nm yüksekliğe sahip küçük adalar gözlemlenebilir. MoO₃ ince filminin ortalama yüzey pürüzlülüğü yaklaşık R_a= 1,85 nm, ortalama karekök pürüzlülüğü yaklaşık R_{rms}= 2,31 nm, maksimum yüzey pik yüksekliği yaklaşık R_p= 6,61 nm ve yüzeyin maksimum vadi derinliği yaklaşık olarak R_v= 2,13 nm olduğu görülmektedir. MoO₃ ince filmde maksimum yüzey pik yüksekliği ile yüzeyin maksimum vadi derinliği 6,61 nm ve 2,13 nm arasında değişmektedir. Bu nedenle biriktirilen MoO₃ filmi yüzeyinin güneş pili üretimi için yeterince düz olduğu düşünülmektedir (Hori et al. 2009).



Şekil 4.7. Cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin AFM görüntüleri.

4.2.3. XRD (X-Işını Kırınımı) Ölçümleri

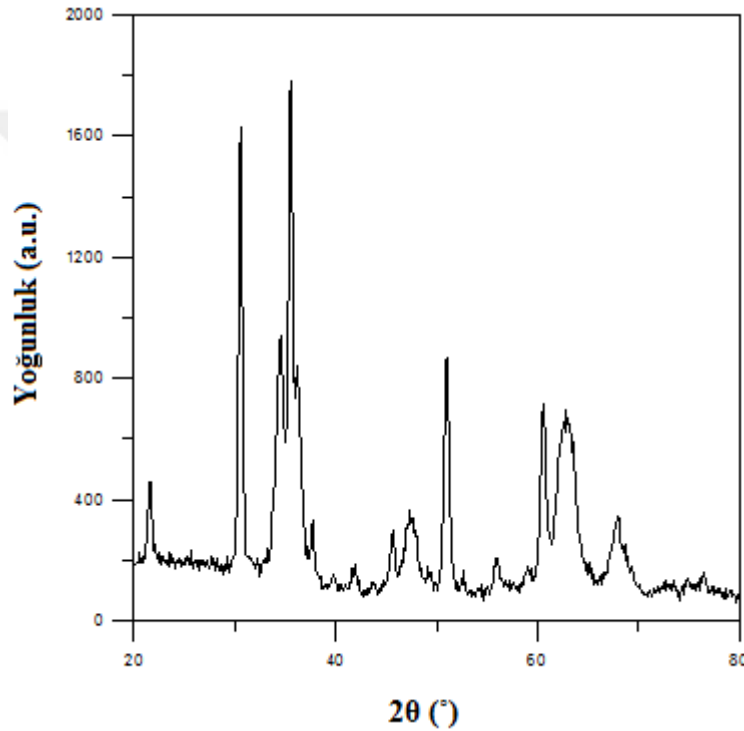
Bir materyalin atomik boyuttaki yapısını incelemek için yüksek çözünürlüğe sahip çeşitli elektron mikroskoplarının kullanımına ihtiyaç vardır. Ama bilinmeyen yapıların yapısal parametrelerini belirlemek için bazı kırınım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım yöntemi ise X-ışını kırınımıdır. Bu yöntemin kullanılmasının temel sebepleri arasında gönderilen X-ışınlarının dalga boyları ve atomik mesafeler ölçüsünde olup yapısal araştırmalarda kullanılma imkânı sağlamaktadır ve ayrıca X-ışını kırınımı yöntemi numunenin yapısını bozmadığında yıkıcı değildirler. Gönderilen X-ışını ile kristalin yapısı X-ışını kırınımı yöntemi ile belirlenir. Ve ayrıca kristaldeki atomların ne kadar mükemmel bir şekilde dizildiğine ve fazın saflığının belirlenmesine, kristaldeki atomların doğrultularını belirlemeye ve kristaldeki atomların örgü sabitlerini belirlemeye yardımcı olur.



Şekil 4.8. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin XRD ölçümleri.

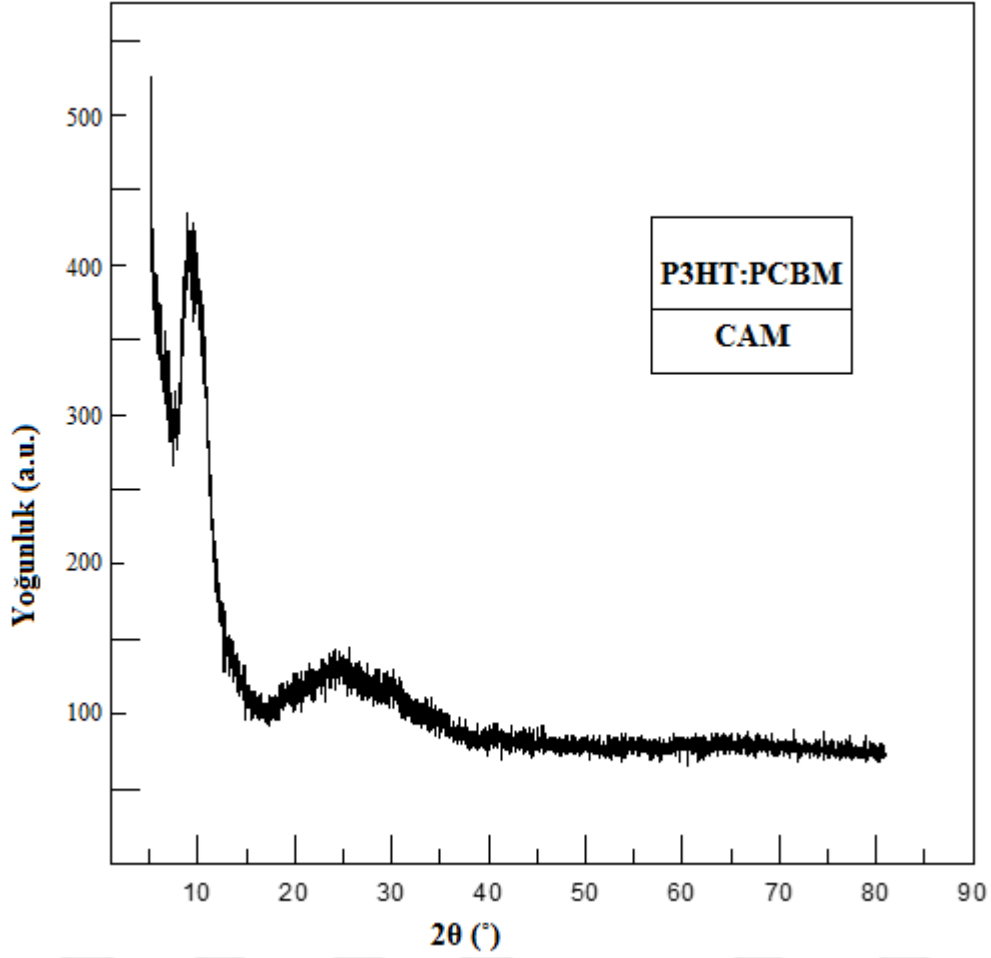
Şekil 4.8’de dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin 20° ile 80° arasındaki XRD ölçümleri verilmiştir. ZnO ince filminin kristal yapısı ve yönelimleri X-ışını kırınımı ile incelenmiştir. XRD görüntüleri, ZnO ince filminin 20° ile

40° arasında pikler yaptığını göstermektedir. ZnO piklerinin $2\theta = 32,60^\circ$, $2\theta = 35,30^\circ$ ve $2\theta = 38,5^\circ$ 'de sırasıyla (1 0 0), (0 0 2) ve (1 0 1) miller indislerine karşılık gelir. XRD desenleri, C-ekseni boyunca tercihli yönelimi gösteren, (1 0 1) düzleme karşılık gelen pikler için geliştirilmiş yoğunlukları göstermiştir. Öne çıkan pik noktalarının varlığı, filmin doğada polikristal olduğunu gösterir (Nagarani et al. 2013). XRD spekturumu, ZnO filminin wurtzite yapıda olduğunu gösterir. Dönel kaplama cihazı ile kaplanmış, sentezlenmiş ZnO filmleri, altıgen bir wurtzite kristal yapıya sahiptir ve yüksek kristallik sergilerler (Kamaruddin et al. 2011).



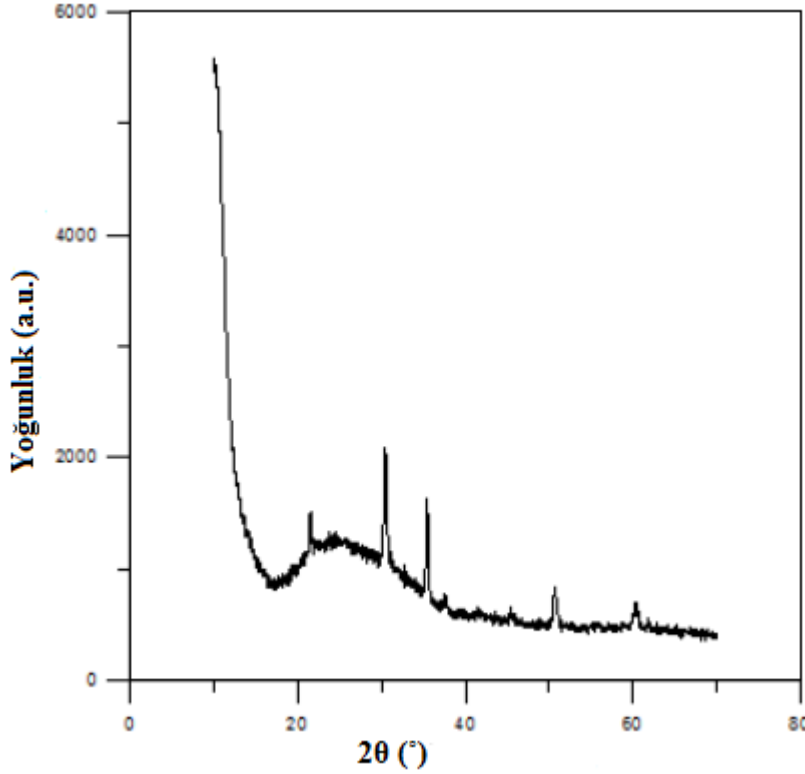
Şekil 4.9. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin XRD grafiği.

Şekil 4.9'da püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin 20° ile 80° arasındaki XRD ölçümleri verilmiştir. XRD analizi polikristalin oluşumunu gösterir. ZnO piklerinin $2\theta = 32,60^\circ$, $2\theta = 35,30^\circ$, $2\theta = 38,5^\circ$, $2\theta = 47,7^\circ$ ve $2\theta = 58,1^\circ$ 'de sırasıyla (1 0 0), (0 0 2), (1 0 1), (1 0 2) ve (1 1 0) miller indislerine karşılık gelir ve farklı yönelimli kristal yapıları mevcuttur (Chiou et al. 2003). Elde edilen ZnO filmi, farklı yönelimli miller indislerine sahip, XRD analiziyle tutarlı bir altıgen polikristal yapı gösterir (Chou et al. 2009). ZnO tampon tabakasının XRD desenleri tarafından incelenen tüm difraksiyon pikleri, ZnO filminin wurtzite yapıya benzediğini ve literatürde bildirilen sonuçlarla iyi bir uyum içindedir (Oh et al. 2011).



Şekil 4.10. Cam yüzeyine kaplanmış P3HT:PCBM ince filminin XRD grafiği.

Şekil 4.10’da 1:0,8 oranında karıştırılmış P3HT:PCBM aktif tabakasının XRD ölçümü gösterilmektedir. P3HT:PCBM’in $2\theta = 5,5^\circ$ civarında (1 0 0) düzleminde keskin XRD piki görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda P3HT:PCBM karışımında artan P3HT oranı ile P3HT:PCBM’in kristalleşme özelliği artar ancak bu oranın çok fazla olması dolayı da kristalleşmede yavaş yavaş bozulabildiği gözlemlenmiştir (Baek et al. 2010). Literatürde yapılan çalışmalarda 1:0,6 ve 1:1 oranına göre 1:0,8 oranındaki P3HT:PCBM aktif tabaka karışımında (%55 P3HT) daha güçlü XRD piklerinin olduğu görülmüştür. Bundan dolayı P3HT’in p-konjuge yüzeylerinin normal yönelimde olduğunu ve P3HT:PCBM yapısında P3HT’in daha etkin olduğu gözlemlenmiştir (Baek et al. 2010; Oku et al. 2014). Ek olarak P3HT daha iyi kristalleşebilme özelliğine sahip olduğundan dolayı P3HT:PCBM aktif tabaka karışımının morfolojisi üzerinde dengeleyici bir etki yapar (Sahare et al. 2015).



Şekil 4.11. Cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin XRD grafiği.

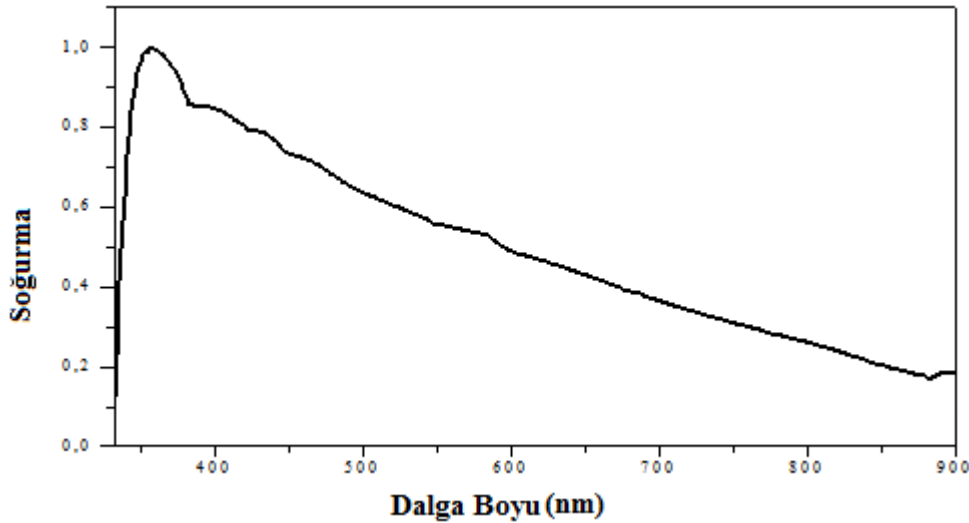
Şekil 4.11’de termal buharlaştırma ile cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin XRD ölçümleri verilmiştir. MoO₃’ün kristal yapısı ve yönelimleri, X-ışını difraktometresi ile incelenmiştir. XRD spektrumu MoO₃ ince filminin 10° ile 70° arasında pikler yaptığını gösterir. MoO₃’ün $2\theta = 23,6^\circ$, $2\theta = 32,4^\circ$, $2\theta = 38,6^\circ$, $2\theta = 51,4^\circ$ ve $2\theta = 61,7^\circ$ piklerinin sırasıyla (0 1 0), (0 4 0), (0 6 0), (0 8 0) ve (0 0 2) miller indislerine karşılık gelir. İlgili pikler ortorombik MoO₃ yapılarının varlığını ve bir fazı gösteren literatürle karşılaştırılmıştır. $k=2,4$ ve 6 ile (0 k 0) yansıma piklerinin kuvvetli yoğunluğu, lamel yapıların varlığını kanıtlar. XRD analizi MoO₃ ince filmlerin ağırlıklı olarak ortorombik kristal yapı olduğunu ortaya koydu (Rahmani et al. 2010). XRD pik noktalarının yoğunluğunun darbe sayısına pozitif bir bağımlılığını göstermektedir (Hojabri et al. 2015).

4.2.4. Soğurma Ölçümleri

Bu bölümde, dönele kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filmi, püskürtme ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filmi, P3HT:PCBM aktif tabakası ve cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filmlerinin soğurma ölçümleri alınmıştır. Mono

dağılımlı-ZnO elektron taşıma tabakasının (n-tipi tampon tabakası), P3HT:PCBM karışım aktif tabakası ve MoO₃ hol taşıma tabakalarının (p-tipi arayüzey tabakası) soğurma özellikleri, 1 Å adım boyutunda NIR (300–900 nm) aralığında alınmış olup ve UV-görünür (UV-visible) soğurma spektroskopisi (T90 Plus) kullanılarak incelenmiştir (Kumar et al. 2016).

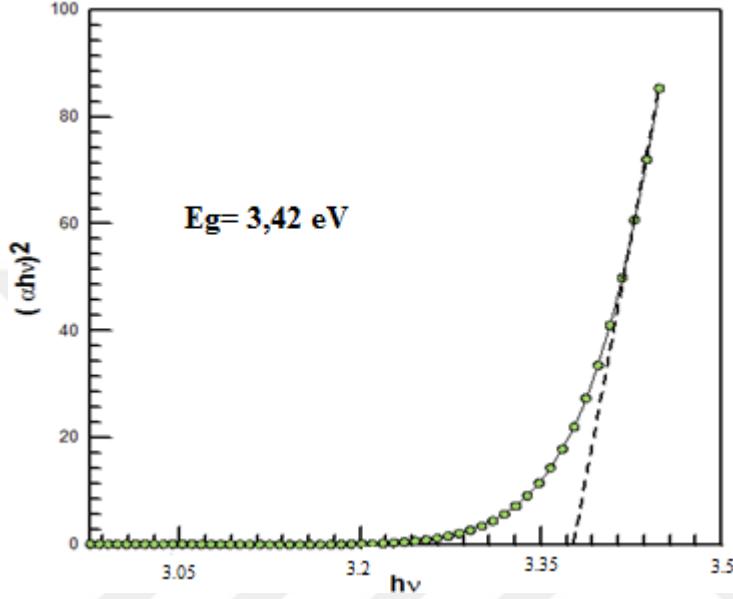
UV-görünür soğurma, nanopartiküllerin optik özelliklerini belirlemede kullanılan tekniklerden biridir. Şekil 4.12’de dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumu verilmiştir. Soğurma spektrumundan görüleceği üzere ZnO tabakasının en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 362 nm dalgaboyunda yapmıştır. Bu soğurma kenarının sistematik olarak ZnO kütlesine kıyasla maviye kayar ve nanoparçacık dağılımının mono dağılımlı yapısını gösterir. Bu hazırlanan ZnO’nun nano yapısal doğasını doğrular. Bu sonuçlar Kumar et al. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyumludur.



Şekil 4.12. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumu.

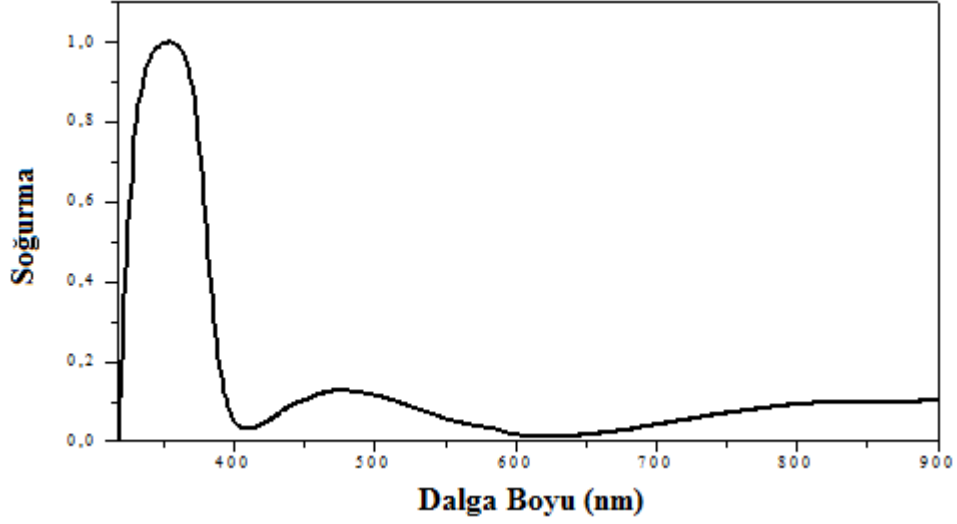
Dâhili soğurma teorisinde soğurmayı belirleyen en önemli faktörler fotonun enerjisi ve soğurma katsayısıdır. $\alpha(h\nu)=A(h\nu-E_g)^{1/2}$ formülünde E_g enerji band aralığı olup A ise sabit bir değerdir. Bu formülde $h\nu$ fotonun enerjisi ve α soğurma katsayısıdır. Bu çalışmada dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin oda sıcaklığında soğurma ölçümleri alındı. Yasak enerji aralığını belirlemek için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği çizildi ve çizilen bu grafiğe uygun fit çizilerek enerji eksenini kestiği

nokta filmin yasak enerji aralığı olarak belirlendi. Şekil 4.13’de ZnO ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye karşı grafiğini göstermektedir. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin yasak enerji band aralığı optik soğurma spektrumunu yardımıyla yaklaşık olarak 3,42 eV olarak hesaplandı. Bu sonuçlar Kumar et al. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyumludur.

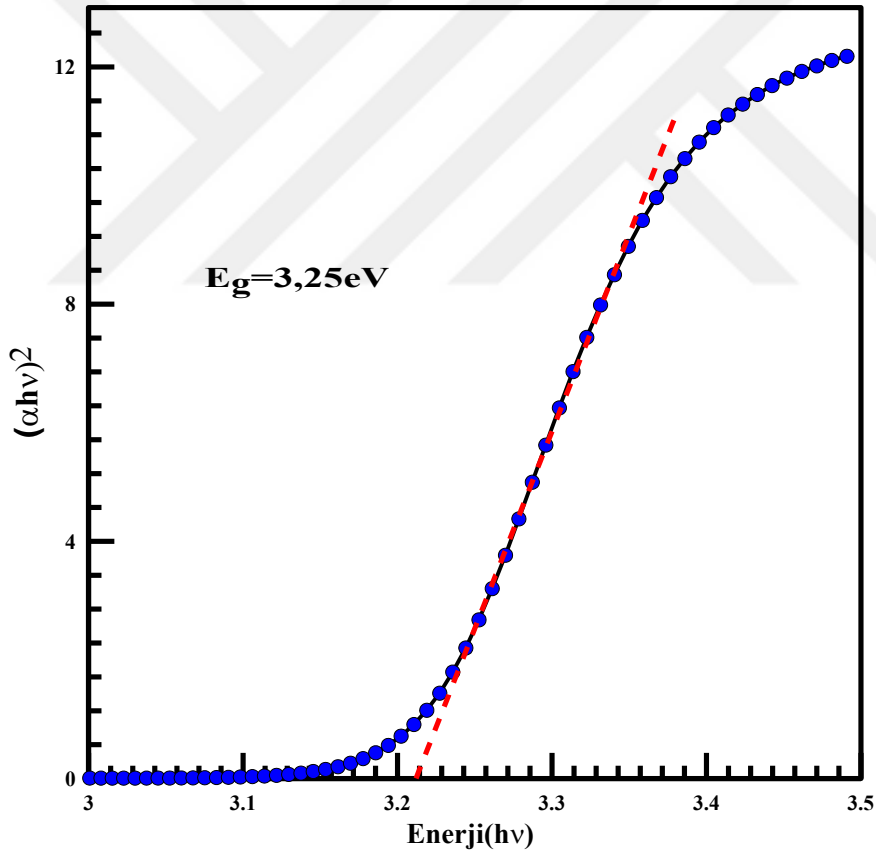


Şekil 4.13. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye karşı grafiği.

Şekil 4.14’de püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumunu verilmiştir. Soğurma spektrumundan görüleceği üzere ZnO tabakasının en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 381 nm dalgaboyunda yapmıştır. Bu değer görünür bölgenin (400 nm – 750 nm) dışındadır. Şekil 4.15’de ZnO ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye karşı grafiğini göstermektedir. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin yasak enerji band aralığı optik soğurma spektrumunu yardımıyla yaklaşık olarak 3,25 eV olarak hesaplandı. Bu sonuçlar Wellings et al. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyumludur. ZnO elektriksel iletkenliğe ve %90 geçirgenliğe sahip n-tipi, şeffaf, toksik olmayan, II-VI, geniş band aralıklı (yaklaşık 3,20 – 3,45 eV) bir yarıiletkenidir (Wellings et al. 2008).



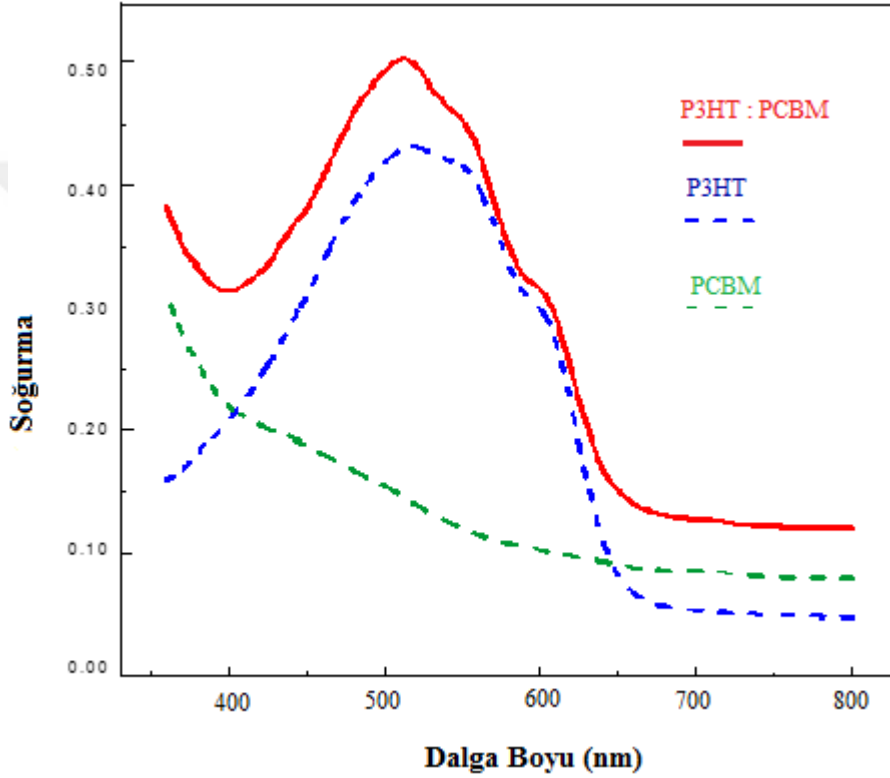
Şekil 4.14. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumu.



Şekil 4.15. Püskürtme (sputtering) cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha hv)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği.

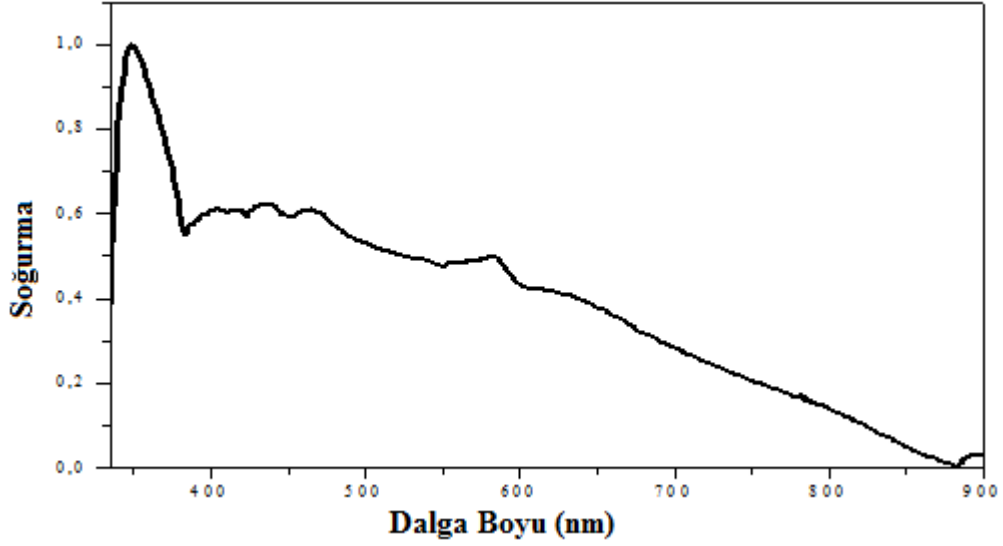
Şekil 4.16'da P3HT ve PCBM organik malzemelerinin aynı oranlarda karıştırılması ile oluşturulan P3HT:PCBM aktif tabakasının dalga boyuna karşılık soğurma şiddeti grafiği verilmiştir. PCBM'in 500 nm ile 600 nm dalga boyu aralığında

zayıf bir soğurma gerçekleştirdiği ve P3HT'nin bu bölgede maksimum soğurma gerçekleştirdiği görülmektedir. P3HT:PCBM'in 503 nm de soğurmasının pik yaptığını ve görünür bölgenin içerisinde geniş bir dalga boyu aralığında (450 nm ile 650 nm) soğurma gerçekleştirdiği sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlar Yue et al. (2011) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyumludur. Soğurma spektrumundan görüleceği üzere P3HT:PCBM'in yapısındaki P3HT organik malzemesi daha geniş bir soğurma spektrumuna sahiptir.



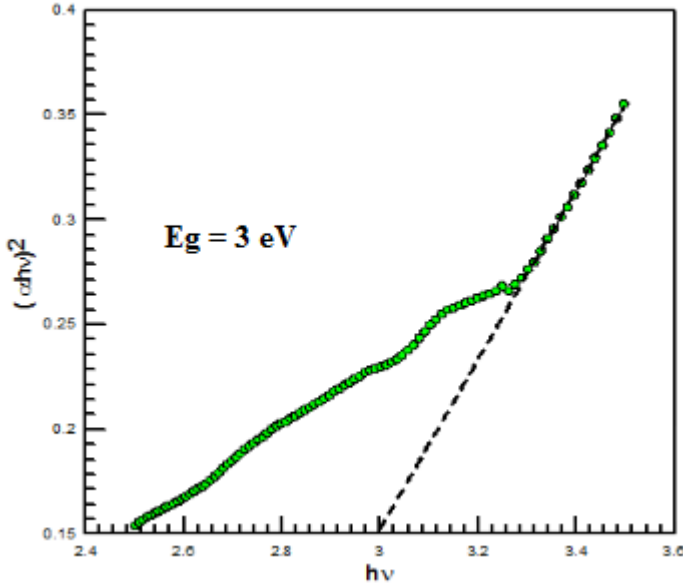
Şekil 4.16. P3HT:PCBM, P3HT ve PCBM'in soğurma spektrumları.

Şekil 4.17'de termal buharlaştırma ile cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin soğurma spektrumunu gösterilmiştir. Soğurma spektrumundan görüleceği üzere MoO₃ ince filminin en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 410 nm dalgaboyunda yapmıştır. Molibden oksit (MoO₃) ince filmi, görünür bölgede yüksek şeffaflık (%90) göstermiştir. Yüksek iş fonksiyonuna sahip olan MoO₃ fotovoltaik aygıtlarda geçirgen anot olarak kullanılmaktadır. Molibden oksit, yüksek iyonik iletkenliği olan geniş bir optik bant aralıklı geçiş metal oksididir (Lee et al. 2009).



Şekil 4.17. Cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin soğurma spekturumu.

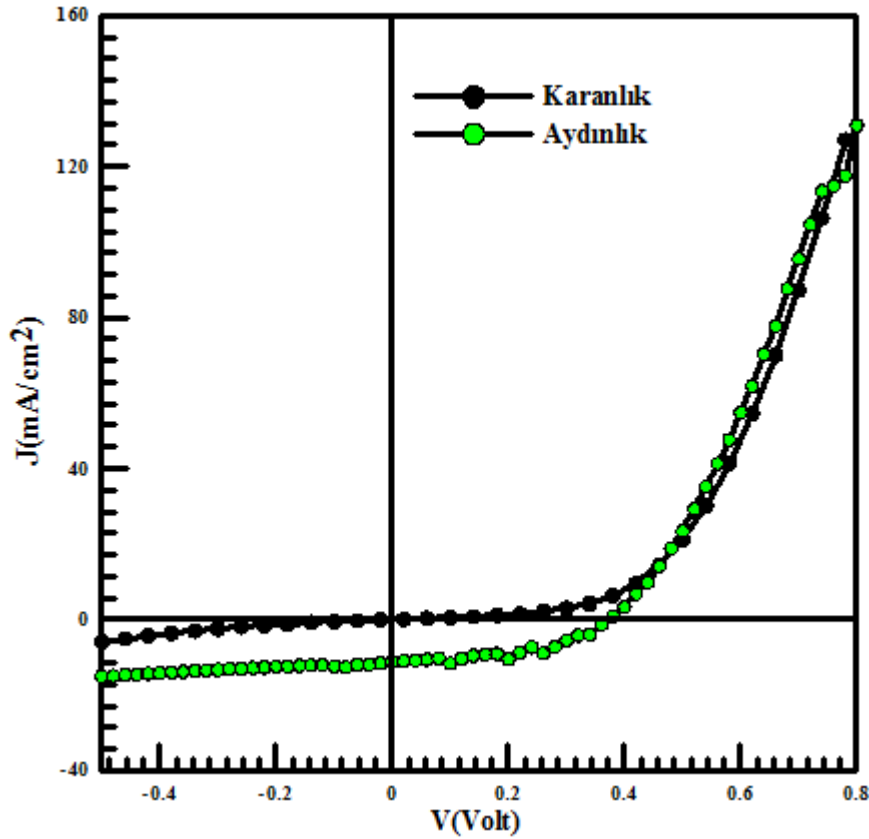
Şekil 4.18’de MoO₃ ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ nin $h\nu$ ’ye karşı grafiğini göstermektedir. Termal buharlaştırma ile cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin yasak enerji band aralığı optik soğurma spekturumu yardımıyla yaklaşık olarak 3,0 eV olarak hesaplandı. Bu sonuçlar Lee et al. (2009) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyumludur.



Şekil 4.18. Cam yüzeyine kaplanmış MoO₃ ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ nin $h\nu$ ’ye karşı grafiği.

4.3. P3HT:PCBM Tabanlı Organik Güneş Pillerinin J-V Ölçümlerinden Temel Güneş Pili Parametrelerinin Elde Edilmesi

Fabrikasyon süreçleri tamamlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ve ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al organik güneş pilinin karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık altında J-V ölçümleri eldivenli kabin içerisinde alındı. Temel güneş pili parametreleri J-V (akım yoğunluğu-voltaj) grafiği kullanılarak hesaplandı. Elde edilen grafikten kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum akım yoğunluğu noktası (J_{mp}), maksimum noktadaki akım yoğunluğuna karşılık gelen maksimum gerilim noktası (V_{mp}) değerleri tespit edilebilmektedir. Grafikten elde edilen veriler kullanılarak üretilen aygıtların paralel direnci (R_{sh}), seri direnci (R_s), dolun faktörü (FF) ve maksimum güç dönüşüm verimi (η - PCE) hesaplandı.



Şekil 4.19. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği.

Şekil 4.19'da ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği verilmiştir. Karanlıkta ve 100 mWcm⁻² ışık

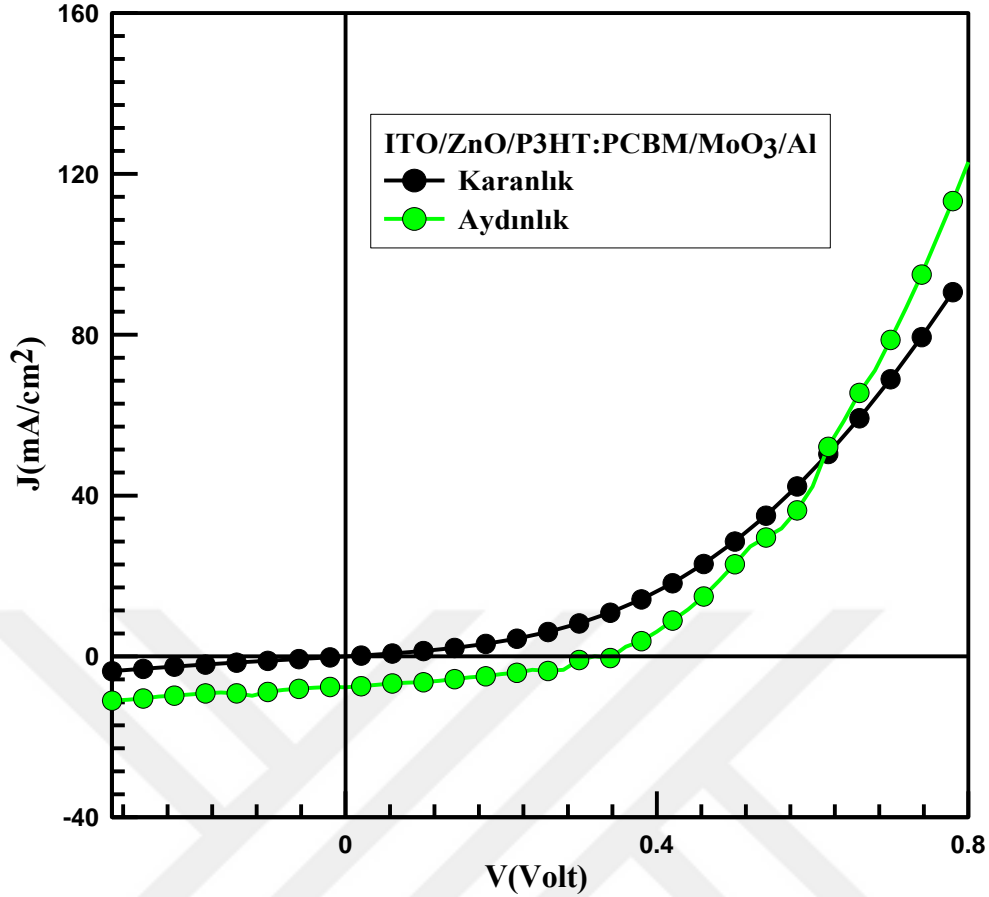
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

altındaki J-V ölçümü -0,4 V ile +0,8 V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alındı. J-V grafiklerinde güneş pili aygıtının performansına göre ters ve düz beslem değerlerinin bir kısmı verilmiştir. Çizelge 4.1’de üretilen organik heteroeklem güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}) açık devre voltajı (V_{oc}), dolun faktörü (FF), paralel direnci (R_{sh}), seri direnci (R_s), ve güç dönüşüm verimi (η) gibi temel karakteristik parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 11,15 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,36 V ve dolun faktörü (FF) %57 olarak görüldüğü ve organik güneş pilinin paralel direnci (R_{sh}) 5150 Ω , seri direnci (R_s) 316 Ω ve güç dönüşüm verimi (η) %2,29 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem OPV aygıtının karanlıkta diyot özelliği ve ışık altında iyi bir fotovoltaiik özellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

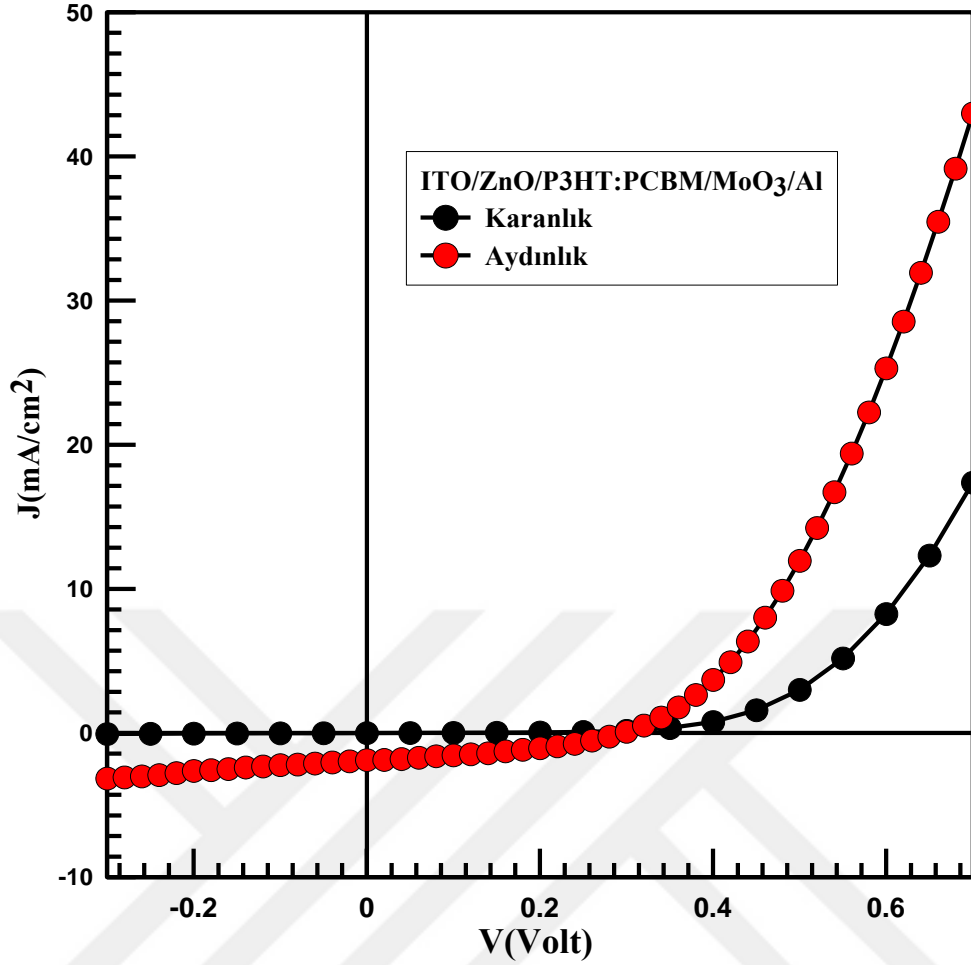
Çizelge 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem organik güneş pilinin ışık altındaki temel güneş pili parametreleri.

Aygit Mimarisi	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (Volt)	FF (%)	PCE (%)	R_s (Ω)	R_{SH} (Ω)
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	11,15	0,36	57	2,29	316	5150



Şekil 4.20. ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al dönele kaplama yöntemi kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği.

Şekil 4.20’de ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al dönele kaplama yöntemi kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği verilmiştir. Karanlıkta ve 100 mWcm⁻² ışık altındaki J-V ölçümü -0,4 V ile +0,8 V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alındı. Çizelge 4.2 incelendiğinde dönele kaplama yöntemiyle üretilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 7,66 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,30 V ve dolun faktörü (FF) %40 olarak görüldüğü ve ters çevrilmiş organik güneş pilinin paralel direnci (R_{sh}) 2760 Ω , seri direnci (R_s) 339 Ω ve güç dönüşüm verimi (η) %0,92 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre dönele kaplama metodu ile ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV aygıtının karanlıkta diyot özelliği ve ışık altında fotovoltajik özellik gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.21. ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği.

Şekil 4.21’de ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki J-V grafiği verilmiştir. Karanlıkta ve 100 mWcm⁻² ışık altındaki J-V ölçümü -0,4 V ile +0,8 V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alındı. Çizelge 4.2 incelendiğinde püskürtme (sputtering) yöntemiyle elde edilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 6,23 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,28 V ve dolum faktörü (FF) %39 olarak görüldüğü ve inverted organik güneş pilinin paralel direnci (R_{sh}) 19870 Ω , seri direnci (R_s) 910 Ω ve güç dönüşüm verimi (η) %0,69 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre püskürtme yöntemi ile ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV aygıtının karanlıkta diyot özelliği ve ışık altında fotovoltajik özellik gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 4.2. ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al püskürtme ve dönel kaplama yöntemleri kullanılarak elde edilen ters çevrilmiş OPV aygıtlarının ışık altındaki temel güneş pili parametreleri.

Aygıt Mimarisi	ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Al					
Kullanılan Yöntem	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (Volt)	FF (%)	PCE (%)	R _s (Ω)	R _{SH} (Ω)
Püskürtme	6,23	0,28	39	0,69	910	19870
Dönel Kaplama	7,66	0,30	40	0,92	339	2760

Çizelge 4.2’de ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al püskürtme ve dönel kaplama yöntemleri kullanılarak üretilen ters çevrilmiş organik güneş pillerinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), dolun faktörü (FF), paralel direnci (R_{sh}), seri direnci (R_s) ve güç dönüşüm verimi (η) gibi ışık altındaki temel karakteristik parametreleri verilmiştir. Çizelge 4.2 incelendiğinde güç dönüşüm verimini olumlu yönde etkileyen pillerinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}) ve dolun faktörü (FF) parametrelerinin dönel kaplama yöntemiyle elde edilmiş ters çevrilmiş organik güneş pilinin püskürtme yöntemiyle elde edilmiş ters çevrilmiş organik güneş piline göre yüksek olmasının sebebi iki farklı yöntemle kaplanan ZnO ince film tabakasının optiksel, morfolojik ve yapısal karakterizasyon sonuçları ile açıklanabilmektedir. Bu optiksel, morfolojik ve yapısal karakterizasyonla ilgili sonuçlara ise ‘‘sonuç ve öneriler’’ kısmında detaylı olarak yer verilmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk olarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik heteroeklem OPV fabrikasyonu yapıldı. Üretilen bu heteroeklem organik güneş pilinin J-V ölçümleri ile bu güneş pilinin temel karakteristik parametreleri hesaplandı. İkinci olarak ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş OPV fabrikasyonu dönel kaplama ve püskürtme olmak üzere iki yöntem ile yapılan bu ters çevrilmiş organik güneş pillerinin J-V ölçümleri ile bu güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri karşılaştırıldı. Dönel kaplama ve püskürtme yöntemleri ile oluşturulan ZnO ince film tabakalarının soğurma, AFM ve XRD ölçümleri dikkate alınarak optik, morfolojik ve yapısal özellikleri karşılaştırıldı.

P3HT:PCBM tabanlı klasik OPV ve ters çevrilmiş organik güneş pili (I-OPV) ile ilgili deneysel çalışmalardan önce birtakım hazırlık işlemleri yapıldı. Bu kapsamda klasik ve ters çevrilmiş OPV tasarımında alttaş olarak görev yapan ITO kaplı camlar piyasadan hazır alındı ve kimyasal temizliği yapıldı. Bunlarla birlikte klasik OPV tasarımında boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak çalışan iletken PEDOT:PSS ve ters çevrilmiş organik güneş pillerinde boşluk taşıma tabakası (HTL) olarak kullanılan MoO₃ malzemeleri piyasadan satın alındı. PEDOT:PSS 0,45 µm gözenekli PVDF filtresi ile süzülerek kullanıma hazır hale getirildi. Hem klasik hem de ters çevrilmiş OPV'lerde aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM fotoaktif tabakanın hazırlanması için farklı kaplarda P3HT ve PCBM organik malzemeleri kloroform ile çözülerek katı malzemeler çözelti haline getirildi. PCBM ve P3HT çözeltileri aynı kaba aktarılarak P3HT:PCBM karışımı elde edildi ve bu karışım 12 saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra kullanıma hazır hale getirildi. Bölüm 3.2.1.3'de ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi ağırlıkça 1:0,8 oranında P3HT:PCBM hazırlandı ve klasik ile ters çevrilmiş OPV tasarımında aktif tabaka olarak kullanıldı. P3HT:PCBM'in hazırlanması ile ilgili tüm prosesler eldivenli kabin içerisinde gerçekleştirildi.

İlk olarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem OPV fabrikasyonu için kimyasal temizliği yapılmış ITO kaplı cam yüzeyine dönel kaplama yöntemi ile 4000 rpm'de ve 45 saniye boyunca PEDOT:PSS kaplandı ve PEDOT:PSS filmi sıcak tabla üzerinde 120 °C'de 5 dakika boyunca tavlansak kaplama işlemi tamamlandı.

PEDOT:PSS hazırlanması, PEDOT:PSS filminin kaplanması ve ITO temizleme işlemleri class 100 ve class 1000 temiz oda şartlarında gerçekleştirildi. ITO yüzeyine PEDOT:PSS filmi kaplanmış numune eldivenli kabine aktarılarak 1:0,8 oranında karıştırılmış P3HT:PCBM kaplandı. P3HT:PCBM kaplama işlemi dönel kaplama yöntemi ile 800 rpm'de ve 50 saniye boyunca yapıldı. Numune 115 °C'de 5 dakika boyunca sıcak tabla üzerinde tavlandı ve dönel kaplama ile organik malzemelerin kaplama işlemi tamamlandı. Son olarak PEDOT:PSS ve P3HT:PCBM aktif tabakası kaplanmış numune eldivenli kabin içerisindeki termal buharlaştırma ünitesine aktarıldı ve P3HT:PCBM organik filmi yüzeyine 1×10^{-7} Torr basınç altında 1 Å/s oranında 100 nm Al metali kaplanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al klasik OPV elde edilmiş oldu. Elde edilen bu heteroeklem OPV aygıtının karanlıkta ve 100 mWcm^{-2} ışık altında J-V ölçümleri alınarak elektriksel karakterizasyonu yapıldı ve temel güneş pili parametreleri elde edildi. Çizelge 4.1 incelendiğinde ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) $11,15 \text{ mA/cm}^2$, açık devre voltajı (V_{oc}) 0,36 V ve dolun faktörü (FF) %57 olarak görüldüğü ve organik güneş pilinin paralel direnci (R_{sh}) 5150Ω , seri direnci (R_s) 316Ω ve güç dönüşüm verimi (η) %2,29 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş pili aygıtının karanlıkta diyot özelliği ve ışık altında iyi bir fotovoltajik özellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Temel karakteristik parametreleri hesaplanan bu heteroeklem organik güneş pilinin literatürde yapılan çalışmalara göre iyi bir güç dönüşüm verimi elde edilmiştir.

İkinci olarak ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pili fabrikasyonu iki yöntemle gerçekleştirildi. Birinci yöntemde, dönel kaplama cihazı ile daha önceden hazırlanmış ZnO çözeltisi ITO yüzeyine 2500 rpm'de 50 saniye kaplandıktan sonra numune 150°C'de 10 dakika boyunca sıcak tabla üzerinde tavlandı ve bu kaplama ve tavlama işlemi üç kez tekrarlandıktan sonra ZnO çözeltisinin ITO yüzeyine kaplama işlemi tamamlandı ve ZnO ince filmi elde edildi. İkinci yöntemde, materyal ve yöntem bölümünde ayrıntılı olarak açıklandığı üzere RF magnetron püskürtme cihazı ile ITO yüzeyi üzerine ZnO kaplandı ve ZnO ince filmi elde edildi. Elde edilen bu ZnO ince filmleri eldivenli kabin içerisine aktarıldı. Numuneler eldivenli kabin içerisindeki dönel kaplama cihazı ile 1:0,8 oranındaki P3HT:PCBM karışımı ile 800 rpm'de 50 saniye kaplandıktan sonra sıcak tabla üzerinde 115 °C'de 5 dk. boyunca

tavlandı ve numuneleri P3HT:PCBM kaplama işlemi tamamlandı. Eldivenli kabin ünitesine entegre edilen termal buharlaştırma ünitesinde P3HT:PCBM üzerine 1×10^{-7} Torr basınç altında 1 \AA/s oranında 10 nm kalınlığında MoO_3 kaplandı. Daha sonra MoO_3 tabakası üzerine 100 nm kalınlığında Al metali kaplanarak ITO/ZnO/P3HT:PCBM/ MoO_3 /Al ters çevrilmiş organik güneş pilleri elde edildi. Elde edilen bu ters çevrilmiş organik güneş pillerinin karanlıkta ve 100 mWcm^{-2} ışık altında J-V ölçümleri alınarak elektriksel karakterizasyonları yapıldı ve temel güneş pili parametreleri elde edildi. Dönel kaplama ve püskürtme yöntemleri ile oluşturulan ZnO ince film tabakalarının optik, morfolojik ve yapısal özellikleri karşılaştırıldı. Şekil 4.12’de dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumunu verilmiştir. Soğurma spektrumundan görüleceği üzere ZnO tabakasının en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 362 nm dalgaboyunda yapmıştır. Şekil 4.14’de püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin soğurma spektrumunu verilmiştir. Soğurma spektrumundan görüleceği üzere ZnO tabakasının en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 381 nm dalgaboyunda yapmıştır. Bu değerler görünür bölgenin (400 nm – 750 nm) dışındadır. Her iki yöntemle elde edilen ZnO ince filmlerinin görünür bölgede soğurma gerçekleştirmemesi ZnO’nun ters çevrilmiş organik güneş pillerinde ITO ile aktif tabaka arasında kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Şekil 4.13’de ZnO ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye karşı grafiğini göstermektedir. Dönel kaplama cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin yasak enerji band aralığı optik soğurma spektrumunu yardımıyla yaklaşık olarak 3,42 eV olarak hesaplandı. Şekil 4.15’de ZnO ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye karşı grafiğini göstermektedir. Püskürtme cihazı ile cam yüzeyine kaplanmış ZnO ince filminin yasak enerji band aralığı optik soğurma spektrumunu yardımıyla yaklaşık olarak 3,25 eV olarak hesaplandı. Her iki yöntemle elde edilen ZnO ince filmlerinin elektriksel iletkenliğe ve %90 geçirgenliğe sahip n-tipi, şeffaf, toksik olmayan, II-VI, geniş band aralıklı (yaklaşık 3,20 – 3,45 eV) bir yarıiletken olduğu söylenebilir (Wellings et al. 2008). Dönel kaplama yöntemi ile elde edilen ZnO ince filminin yasak enerji aralığının püskürtme yöntemi ile elde edilen ZnO ince filminin yasak enerji aralığına göre yüksek olmasından dolayı dönel kaplama yöntemi ile elde edilen güneş pili veriminin püskürtme yöntemi ile elde edilen güneş pilinin verimine göre yüksek olmasının önemli bir nedenidir. Şekil 4.8’de dönel kaplama ile ve şekil 4.9’da püskürtme ile cam yüzeylerine kaplanmış ZnO ince filmlerinin 20° ile 80° arasındaki XRD ölçümleri verilmiştir. Dönel kaplama yöntemi ile elde edilmiş ZnO ince filminin XRD görüntülerine göre 20° ile 40° arasında pikler yaptığını göstermektedir.

Dönel kaplama yöntemi ile elde edilmiş ZnO ince filminin piklerinin $2\theta = 32,60^\circ$, $2\theta = 35,30^\circ$ ve $2\theta = 38,5^\circ$ 'de sırasıyla (1 0 0), (0 0 2) ve (1 0 1) miller indislerine karşılık gelir. Püskürtme yöntemi ile elde edilmiş ZnO ince filminin piklerinin $2\theta = 32,60^\circ$, $2\theta = 35,30^\circ$, $2\theta = 38,5^\circ$, $2\theta = 47,7^\circ$ ve $2\theta = 58,1^\circ$ 'de sırasıyla (1 0 0), (0 0 2), (1 0 1), (1 0 2) ve (1 1 0) miller indislerine karşılık gelir. Her iki yöntem ile edilmiş ZnO ince filmlerinin XRD desenleri, C-ekseni boyunca tercihli yönelimi gösteren, (1 0 1) düzleme karşılık gelen pikler için geliştirilmiş yoğunlukları göstermiştir. Öne çıkan pik noktalarının varlığı, filmin doğada polikristal olduğunu gösterir (Nagarani et al. 2013). Her iki yöntem ile edilmiş ZnO ince filmlerinin XRD spektrumları, ZnO filmlerinin wurtzite yapıda olduğunu gösterir. XRD analizi polikristalin oluşumunu gösterir. Elde edilen ZnO filmlerinin, farklı yönelimli miller indislerine sahip, XRD analiziyle tutarlı bir altıgen polikristal yapı gösterir (Chou et al. 2009). Şekil 4.4'de dönel kaplama ile ve şekil 4.5'de püskürtme yöntemleri ile cam yüzeylerine kaplanmış ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4'e bakıldığında ZnO ince filminin ortalama yüzey pürüzlülük değeri $R_a = 2,5$ nm'dir. Şekil 4.5'de Ar püskürtme gazı ile ZnO ortalama yüzey pürüzlülük değeri $R_a = 4,05$ nm'dir. AFM görüntüleri, yüksek dereceli kristalli filmlerin ve pürüzsüz ara yüzün taşınmayı etkilediğini, düzenli moleküler sıralamalarının geniş moleküller arası orbital üst üste gelmelerine izin verdiğini göstermektedir (Bekci et al. 2012). Bu nedenle elde edilen ZnO ince filmlerinin yüzeylerinin güneş pili üretimi için yeterince düz olması gerekmektedir. Dönel kaplama yöntemi ile elde edilen ZnO ince filminin ortalama yüzey pürüzlülük değeri püskürtme yöntemi ile elde edilen ZnO ince filminin ortalama yüzey pürüzlülük değerine düşük olduğundan dolayı dönel kaplama yöntemi ile elde edilen güneş pili veriminin püskürtme yöntemi ile elde edilen güneş pilinin verimine göre yüksek olmasının önemli bir sebebidir. Çizelge 4.2 incelendiğinde dönel kaplama yöntemiyle üretilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 7,66 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,30 V ve dolum faktörü (FF) %40 olarak görüldüğü ve ters çevrilmiş organik güneş pilinin paralel direnci (R_{sh}) 2760 Ω , seri direnci (R_s) 339 Ω ve güç dönüşüm verimi (η) %0,92 iken püskürtme yöntemiyle elde edilen ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Al ters çevrilmiş organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 6,23 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,28 V ve dolum faktörü (FF) %39 olarak görüldüğü ve ters çevrilmiş organik güneş pilinin paralel direnci (R_{sh}) 19870 Ω , seri direnci (R_s) 910 Ω ve güç dönüşüm verimi (η) %0,69 olarak hesaplanmıştır. Tüm bu sonuçlara göre dönel kaplama metodu ile elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pili aygıtının güç dönüşüm veriminin

püskürtme metodu ile elde edilen ters çevrilmiş organik güneş pili aygıtının güç dönüşüm verimine göre yüksek olmasının sebebi iki ayrı yöntem ile elde edilen ZnO ince film tabakalarının optik, morfolojik ve yapısal özelliklerinin farklı olmasından kaynaklanmıştır.

Son yıllarda malzeme bilimlerindeki araştırmaların çoğu, geniş bant aralığına sahip yarı iletken malzemelere odaklanmaktadır. Bunlardan biri, lineer olmayan yeni optik özellikleri nedeniyle çok işlevsellik gösteren çinko oksittir. ZnO ince filmlerin mikro ve nano yapılarının avantajları, ZnO malzemesinin bolluğu ve toksik olmaması, düşük maliyetli olması gibi önemli özelliklere sahiptir. ZnO, sayısız optoelektronik platformda n tipi yarı iletken olarak büyük ilgi görmesine rağmen, yüzey elektroniği özelliklerinin, bu malzemede var olan zengin kimyasal kusurları sayesinde işleme koşullarına ve kaplama sonrası işlemlere karşı oldukça duyarlıdır. Son zamanlarda, sürekli aygıt iyileştirme ve yüzey stabilizasyonu sağlamak için bu yüzeyi düzenlemeye, dengelemeye ve ayarlamaya odaklanmış muazzam çalışmalar olmuştur. Deneysel ve teorik araştırmalar sayesinde, kusurların ve yüzey durumlarının etkisinin, ZnO'nun doğal elektronik özelliklerini ve sonuç olarak, ZnO'nun arayüzey tabakasının aygıtları önemli ölçüde etkileyebileceği anlaşılmıştır. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında iki farklı yöntemle hazırlanan ZnO ince filmi, ters çevrilmiş organik güneş pillerine uygulanması ile günümüz enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2005. Web Sitesi: <http://www.gunesenerjisi.com>, Erişim Tarihi: 20.04.2019
- Anonim, 2008. Web Sitesi: <http://www.kuark.org>, Erişim Tarihi: 15.06.2019
- Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.enerji.gov.tr>, Erişim Tarihi: 27.07.2019
- Aydoğan, Ş., 2015. Katıhal Elektroniği. Nobel Yayınları, 244, İstanbul.
- Beak, W.H., Yoon, T.S., Lee, H.H., Kim, Y.S., 2010. Composition-dependent phase separation of P3HT:PCBM composites for high performance organic solar cells. *Organic Electronics*, 11, 933–937.
- Bekci, D.R., Karsli, A., Cakir, A.C., Sarica, H., Guloglu, A., Gunes, S., Erten-Ela, Ş., 2012. Comparison of ZnO interlayers in inverted bulk heterojunction solar cells. *Applied Energy*, 96, 417–421.
- Chiou, W.T., Wu, W.Y., Ting, J.M., 2003. Growth of single crystal ZnO nanowires using sputter deposition. *Diamond and Related Materials*, 12, 1841–1844.
- Chou, T.L., Wu, W.Y., Ting, J.M., 2009. Sputter deposited ZnO nanowires/thin film structures on glass substrate. *Thin Solid Films*, 518, 1553–1556.
- Girtan, M., Mallet, R., Caillou, D., Rusu, G.G. and Rusu, M., 2009. Thermal stability of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-polystyrenesulfonic acid films electrical properties. *Superlattices and Microstructures*, 46, 44-51.
- Gollu, S.R., Sharma, R., G. S., Gupta, D., 2014. Thermal Annealing Study on P3HT:PCBM Based Bulk Heterojunction Organic Solar Cells Using Impedance Spectroscopy. *AIP Conference Proceedings*, (DOI: 10.1063/1.4898233).
- Hau, S.K., Yip, H.L., Baek, N.S., Zou, J., Malley, K.O., Jen, A.K.Y., 2008. Air-stable inverted flexible polymer solar cells using zinc oxide nanoparticles as an electron selective layer. *Appl. Phys. Lett.*, 92, 253301–253303.
- Hojabri, A., Hajakbari, F., Meibodi A.E., 2015. Structural and optical properties of nanocrystalline a-MoO₃ thin films prepared at different annealing temperatures. *J. Theor. Appl. Phys.*, 9, 67–73.
- Hori, T., Shibata, T., Kittichungchit, V., Moritou, H., Sakai, J., Kubo, H., Fujii, A., Ozaki, M., 2009. MoO₃ buffer layer effect on photovoltaic properties of interpenetrating heterojunction type organic solar cells. *Thin Solid Films*, 518, 522–525.
- Ibrahim, M.A., Wei, H.Y., Tsai, M.H., Ho, K.C., Shyue, J.J., Chu, C.W., 2013. Solution-processed zinc oxide nanoparticles as interlayer materials for inverted organic solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 108, 156–163.

- Jabeen, U., Adhikari, T., Shah, S.M., Pathak, D., Kumar, V., Nunzi, J.M., Aamir, M., Mushtaq, A., 2019. Synthesis, characterization and photovoltaic applications of noble metal—doped ZnS quantum dots. *Chinese Journal of Physics* 58, 348–362.
- Jouane, Y., Colis, S., Schmerber, G., Dinia, A., Lévêque, P., Heiser, T., Chapuis, Y.A., 2013. Influence of flexible substrates on inverted organic solar cells using sputtered ZnO as cathode interfacial layer. *Organic Electronics*, 14, 1861–1868.
- Kamaruddin, S.A., Chan, K.Y., Yow, H.K., Sahdan, M.Z., Saim, H., Knipp D., 2011. Zinc oxide films prepared by sol–gel spin coating technique. *Appl. Phys. A.*, 104, 263–268.
- Karagöl, E.T. ve Kavaz, İ., 2017. Dünyada ve Türkiye’ de Yenilenebilir Enerji. *Analiz Dergisi*, 197, 1-30.
- Kietzke, T., 2007. Recent Advances in Organic Solar Cells. *Advan. In Opto Electron.*, 12, 1-15.
- Kim, J., Duraisamy, N., Lee, T.M., Kim, I., Choi, K.H., 2014. Hybrid electrohydrodynamic atomization of nanostructured silver top contact for inverted organic solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 130, 156-162.
- Kumar, M.S., Balachander, K., 2016. Performance analysis of different top metal electrodes in inverted polymer solar cells. *Optik*, 127, 2725–2731.
- Lee, Y.J., Nichols, W.T., Kim, D.G. and Kim, Y.D., 2009. Chemical vapour transport synthesis and optical characterization of MoO₃ thin films. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (DOI:10.1088/0022-3727/42/11/115419).
- Li, C., Credginton, D., Ko, D.H., Rong, Z., Wang, J. and Greenham, N.C., 2014. Built-in potential shift and Schottky-barrier narrowing in organic solar cells with UV-sensitive electron transport layers. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16, 12131-12136.
- Liu, L., Shi, Y. ve Yang, Y., 2001. Solvation Induced Morphology Effects on The Performance of Polymer Based Photovoltaic Devices. *Adv. Funct. Mater.*, 11, 420-420.
- Löper, P., Moon, S.J., Nicolas, S.M., Niesen, B., Ledinsky, M., Nicolay, S., Bailat, J., Yum, J.H., Wolfa, S.D. and Ballifab, C., 2015. Organic–inorganic halide perovskite/crystalline silicon four-terminal tandem solar cells. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17, 1619-1629.
- Mert, O. ve Mutlu, Ş., 2018. Organik Elektronik. *Endüstri Otomasyon Dergisi*, 30-35.
- Nagarani, N., 2013. Structural and Optical Characterization of ZnO thin films by Sol- Gel Method. *Journal on Photonics and Spintronics*, 2(2), 19-21.
- Nelson, J., 2011. Polymer:fullerene bulk heterojunction solar cells. *Materials Today*, 2011, 14(10), 462-470.

- Nickel, F., Puetz, A., Reinhard, M., Do, H., Kayser, C., Colsmann, A., Lemmer, U., 2009. Cathodes comprising highly conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) for semi-transparent polymer solar cells. *Organic Electronics*, 11, 535-538.
- Oh, H., Krantz, J., Litzov, I., Stubhan, T., Pinna, L., Brabec, C.J., 2011. Comparison of various sol-gel derived metal oxide layers for inverted organic solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 2194–2199.
- Oku, T., Hori, S., Suzuki, A., Akiyama, T., and Yamasaki, Y., 2014. Fabrication and characterization of PCBM:P3HT:silicon phthalocyanine bulk heterojunction solar cells with inverted structures. *Journal of Applied Physics*, (DOI: 10.7567/JJAP.53.05FJ08).
- Ondo-Ndong, R., Ferblantier, G., Kalfioui, M.A., Boyer, A., Foucaran, A., 2003. Properties of RF magnetron sputtered zinc oxide thin films. *Journal of Crystal Growth*, 255, 130–135.
- Öztürk, H., 2013. Yenilenebilir Enerji Kaynakları. Birsen Yayınevi, 442, İstanbul.
- Park, H.J., Lee, K.H., Kumar, B., Shin, K.S., Jeong, S.W. and Kim, S.W., 2010. Inverted Organic Solar Cells with ZnO Thin Films Prepared by Sol-Gel Method. *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, 5(2), 1–4.
- Pietsch, M., Y. Bashouti, Y. M., and Christiansen, S., 2013. The Role of Hole Transport in Hybrid Inorganic / Organic Silicon / Poly(3,4ethylenedioxythiophene) : Poly(styrenesulfonate) Heterojunction Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry*, 117, 9049–9055.
- Rahmani, M.B., Keshmiri, S.H., Yu, J., Sadek, A.Z., Mashat, L.A., Moafi, A., Latham, K., Li, Y.X., Wlodarski, W., Kalantar-zadeh, K., 2010. Gas sensing properties of thermally evaporated lamellar MoO₃. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 145, 13–19.
- Sahare, S., Veldurthi, N., Datar ,S. and Bhave, T., 2015. Photon assisted conducting atomic force microscopy study of nanostructured additives in P3HT:PCBM. *RSC Advances*, 124, 102126-102952.
- Schilinsky, P., Waldauf, C. and Brabec, C.J., 2002. Recombination and loss analysis in polythiophene based bulkheterojunction photodetectors. *Applied Physics Letters*, (81)20, 3885-3887.
- Shivaraj, B.W., Murthy, H. N. N., Krishna, M. and Sharma, S.C., 2013. Investigation of Influence of Dönel kaplama Parameters on the Morphology of ZnO Thin Films by Taguchi Method. *Int. J. Thin Film Sci.*, 2(2), 143-154.
- Smirnov, M., Baban, C., Rusu, G.I., 2010. Structural and optical characteristics of spin-coated ZnO thin films. *Applied Surface Science*, 256, 2405–2408.

- Srinivasan, G., Gopalakrishnan, N., Yu, Y.S., Kesavamoorthy, R., Kumara, J., 2008. Influence of post-deposition annealing on the structural and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel and spin-coating method. *Superlattices and Microstructures*, 43, 112–119.
- Verma, U.K., Kumar, S., Mohapatra, Y.N., 2017. Measurement of contact surface photovoltage from forward bias C-V characteristics of P3HT:PCBM based BHJ solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 172, 25–33.
- Wellings, J.S., Samantilleke, A.P., Warren, P., Heavens, S.N. and Dharmadasa, I.M., 2008. Comparison of electrodeposited and sputtered intrinsic and aluminium-doped zinc oxide thin films. *Semicond. Sci. Technol.*, (DOI:10.1088/02681242/23/12/125003).
- Yagci, Ö., Yesilkaya, S.S., Yüksel, S.A., Ongül, F., Varal, N.M., Kus, M., Günes, S., İcelli, O., 2016. Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT:PCBM based organic solar cells. *Synthetic Metals*, 212, 12–18.
- Yue, G., Wu, J., Xiao, Y., Lin, J., Huang, M., 2011. Flexible solar cells based on PCBM/P3HT heterojunction. *Front. Optoelectron. China*, 4(1), 108-113.
- Zhang, B., Lee, D.H., Chae, H., Park, C., Cho, S. M., 2010. Optimization of inverted bulk heterojunction polymer solar cells. *Korean J. Chem. Eng.*, 27(3), 999-1002
- Zhang, C., You, H., Lin, Z. and Hao Y., 2011. Inverted Organic Photovoltaic Cells with Solution-Processed Zinc Oxide as Electron Collecting Layer. *Japanese Journal of Applied Physics*, (DOI: 10.1143/JJAP.50.082302).
- Zhang, Q., Peng, R., Zhang, C., Chen, D., Lin, Z., Chang, J., Zhang, J. and Hao, Y., 2018. Inverted Organic Solar Cells with Low-Temperature Al-Doped-ZnO Electron Transport Layer Processed from Aqueous Solution. *Polymers*, (DOI:10.3390/polym10020127).
- Zhu, F., Chen, X., Zhou, J., Lu, Z., Chen, Y., Huang S. and Sun, Z., 2014. Enhanced efficiency of inverted polymer solar cells using two-step sputtered ZnO as cathode interfacial layer. *Materials Research Express*, (DOI:10.1088/2053-1591/1/2/025020).
- Zilberberg, K., Behrendt, A., Kraft, M., Scherf, U., Riedl, T., 2013. Ultra thin interlayers of a conjugated polyelectrolyte for low work-function cathodes in efficient inverted organic solar cells. *Organic Electronics*, 14, 951–957.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Yasin NUHOĞLU
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve : 05.02.1993 Pazaryolu
Yeri
Medeni Hali : Bekâr
Telefon : +90 (552) 503 30 32
e-mail : yasinnuhoglu@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2016
Lise	Erzurum Lisesi	2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Tekin Asansör ve Yürüyen Merdiven Sistemleri 10.05.2018 - 30.06.2019
Aras Elektrik Dağıtım A.Ş. 01.11.2017 - 09.11.2017

Uluslararası Kongre Sunum (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

- 1- Tam metin bildiri, Investigation of The Optical, Morphological and Structural Properties of P3HT:PCBM Based Inverted Solar Cells., **NUHOĞLU YASİN**, ÇALDIRAN ZAKİR, HATİCE KAÇUŞ, ÇAKMAK BÜLENT, International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD 2018), İngilizce, Fen Bilimleri ve Matematik Temel Alanı -> Fizik
- 2- Tam metin bildiri, Fabrication of Organic Bulk Heterojunction Solar Cells and The Effect of Pentacene Material On The Power Conversion Efficiency., ÇALDIRAN ZAKİR, **NUHOĞLU YASİN**, ERKEM ÜMİT, BİBER MEHMET, AYDOĞAN

ŞAKİR, International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD 2018),
İngilizce, Fen Bilimleri ve Matematik Temel Alanı -> Fizik

