



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK CİDARLI KARBON NANOTÜP
VE TiO₂ TABAKA İLAVESİNİN
P3HT:PCBM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN
PERFORMANSINA ETKİLERİ**

Okan DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Okan DEMİR tarafından hazırlanan “Çok Cidarlı Karbon Nanotüp ve TiO₂ Tabaka İlavesinin P3HT:PCBM Organik Güneş Pillerinin Performansına Etkileri” adlı tez çalışması 29/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

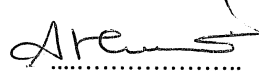
Jüri Üyeleri

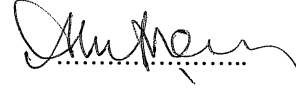
Başkan
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

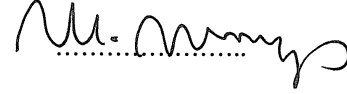
Danışman
Prof. Dr. Ahmet AVCI

Üye
Doç. Dr. Mesut UYANER

İmza







Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Bayram SADE
FBE Müdürü

Bu tez çalışması S.Ü. BAP Koordinatörlüğü tarafından 09201135 no'lu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Okan DEMİR

25/08/2011

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK CİDARLI KARBON NANOTÜP VE TiO₂ TABAKA İLAVESİNİN P3HT:PCBM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİ

Okan DEMİR

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2011, 82 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Doç. Dr. Mesut UYANER

Bu çalışmada, aktif tabakasına kütlece % 0,05 oranında çok cidarlı karbon nanotüp eklenen organik güneş pilleri hava ortamında üretilerek, karbon nanotüpün pil verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Pil katmanları spin kaplama yöntemiyle kaplanmış ve belirli sıcaklıklarda tavlansmıştır. Ayrıca aktif tabakanın üzeri kimyasal olarak sentezlenen titanyum dioksit (TiO₂) katmanıyla kaplanarak fotovoltaik özelliklerdeki değişim incelenmiştir. Üretilen güneş pillerinin karakterizasyonunda Taramalı Elektron Mikroskobu ve Atomik Kuvvet Mikroskobu görüntüleri alınarak morfolojik özellikleri belirlenmiş, güneş pillerinin absorptans ölçümleri alınarak optik özellikleri incelenmiştir. Aktif tabakaya karbon nanotüp ilavesiyle akım yoğunluğu, verim ve dolun faktöründe artış sağlanmıştır. Ayrıca, aktif tabaka üzerine kaplanan TiO₂ katmanının pilin dolun faktörünü artırdığı gözlemlenmiştir. Aktif tabakanın havada kaplanması sonucunda tabakanın kısa sürede bozunmaya uğradığı absorptans analizleriyle belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon nanotüp, Organik fotovoltaik, PEDOT:PSS, P3HT:PCBM, Titanyum dioksit

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF MULTIWALL CARBON NANOTUBE AND TiO₂ LAYER ADDITION ON THE PERFORMANCE OF P3HT:PCBM ORGANIC SOLAR CELLS

Okan DEMİR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2011, 82 Pages

Jury

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER

In this study organic solar cells whose active layers were added with 0,05 % (wt) multiwall carbon nanotube were produced in ambient atmosphere and the effect of carbon nanotube on the cell efficiency was investigated. Cell layers were coated via spin coating method and were annealed at certain temperatures. Additionally, active layer surface was coated with chemically synthesized titanium dioxide (TiO₂) and the variation in photovoltaic properties were investigated. Morphological characterization of the produced solar cells were carried out by Scanning Electron Microscope and Atomic Force Microscope, and the optical characterization was carried out by absorbance measurements. By addition of carbon nanotube to the active layer current density, efficiency and fill factor values increased. Further, it was observed that coating TiO₂ layer onto the active layer increased the fill factor. Absorbance analyses showed that coating the active layer in ambient atmosphere caused cells to degrade.

Keywords: Carbon nanotube, Organic photovoltaics, PEDOT:PSS, P3HT:PCBM, Titanium dioxide

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım da bana yardımcı olan danışmanım Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya, tezle ilgili görüş ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR, Arş. Gör. Volkan ESKİZEYBEK ve Dr. Amor Toumiat'a, deneysel çalışmaları birlikte yürüttüğümüz Arş. Gör. Adem YAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca, gerekli çalışma ve ölçümleri yaptığımız S.Ü. İleri Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi genel müdür yardımcısı Doç. Dr. Mahmut KUŞ'a ve ekibine, SEM ölçümleri konusunda yardımcı olan kimyacı Fatih ÖZCAN'a, AFM ölçümleri konusunda yardımcı olan fizikçi N. Mehmet VARAL'a, I-V ölçümler konusunda yardımcı olan Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nden Doç. Dr. Serap GÜNEŞ'e ve Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Ali Kemal OKYAY'a, glovebox konusunda yardımcı olan Orta Doğu Teknik Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Hüsni Emrah ÜNALAN'a, teşekkür ederim.

Konya'daki çalışmalarım esnasında her konuda bana destek olan Sultan KURTULUŞ, Ahmet KURTULUŞ ve Şeniz KURTULUŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak da, bu noktalara gelmemde en büyük pay sahibi olan, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen değerli annem, babam ve kardeşime şükranlarımı sunarım.

Okan DEMİR
KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	2
1.1. Işık	4
1.2. Güneş Enerjisi	5
1.3. Güneş Pilleri	6
1.4. Güneş Pili Çeşitleri	7
1.4.1. Birinci nesil güneş pilleri	7
1.4.1.1. Tek kristal silisyum güneş pilleri	7
1.4.1.2. Çok kristal silisyum güneş pilleri	8
1.4.2. İkinci nesil (ince film) güneş pilleri.....	9
1.4.2.1. Amorf silisyum güneş pilleri.....	9
1.4.2.2. Diğer ince film güneş pilleri	10
1.4.2.3. Boya hassasiyetli güneş pilleri.....	10
1.4.3. Üçüncü nesil güneş pilleri.....	11
1.4.3.1. Çok eklemlili (tandem) güneş pilleri	11
1.4.3.2. Kuantum parçacık güneş pilleri	13
2. ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ.....	14
2.1. İletken Polimerler	14
2.2. Organik Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi	17
2.3. İki Katmanlı Organik Güneş Pilleri	22
2.4. Yığın Heteroeklem Organik Güneş Pilleri.....	22
2.5. Güneş Pillerinin Karakteristiği	27
2.5.1. Güç dönüşüm verimi.....	27
2.5.2. Açık devre gerilimi	28
2.5.3. Kısa devre akımı	28
2.5.4. Dolum faktörü.....	29
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	31
4. MATERYAL VE METOT.....	35
4.1. ITO Kaplı Cam	35
4.2. PEDOT:PSS:.....	35
4.3. P3HT:PCBM:.....	36
4.4. Titanyum Dioksit:	37
4.5. Karbon Nanotüp.....	39

4.5.1. Tek cidarlı karbon nanotüp	39
4.5.1. Çok cidarlı karbon nanotüp.....	40
4.6. Güneş Pillerinin Hazırlanması	41
4.6.1. ITO kaplı camların hazırlanması	41
4.6.2. Cam üzerine kaplanacak çözeltilerin hazırlanması.....	42
4.6.2.1. PEDOT:PSS'nin hazırlanması	42
4.6.2.2. P3HT:PCBM'nin hazırlanması	42
4.6.2.3. P3HT:PCBM:MWCNT'nin hazırlanması.....	42
4.6.2.4. Titanyum dioksitin hazırlanması.....	43
4.6.3. Hazırlanan çözeltilerin cam üzerine kaplanması	43
4.6.3.1. PEDOT:PSS'nin kaplanması	43
4.6.3.2. P3HT:PCBM ve P3HT:PCBM:MWCNT'nin kaplanması	43
4.6.3.3. Titanyum dioksitin kaplanması	44
4.6.4. Alüminyum elektrotların kaplanması	44
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47
5.1. I-V Ölçümleri.....	47
5.2. SEM Görüntüleri.....	51
5.2. AFM Görüntüleri	54
5.4. Absorbans Ölçümü	57
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
6.1. Sonuçlar	61
6.2. Öneriler	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Akseptör
D	: Donör
c	: Işık hızı
C_h	: Kiral vektörü
e^-	: Elektron
h	: Planck sabiti
h^+	: Boşluk (kovuk)
E_g	: Bant aralığı
I	: Akım
I_F	: İleri yön akımı
I_{MPP}	: Maksimum güç noktasındaki akım
I_L	: Sızıntı akımı
I_{PH}	: Fotoakım
I_{SC}	: Kısa devre akımı
J	: Akım yoğunluğu
R	: Direnç
R_S	: Seri direnç
R_{SH}	: Paralel direnç
V	: Gerilim
V_{MPP}	: Maksimum güç noktasındaki gerilim
V_{OC}	: Açık devre gerilimi
Φ	: İş fonksiyonu
η	: Verim
λ	: Dalga boyu

Kısaltmalar

AC	: Alternatif akım
AM 1.5	: Hava kütlesi katsayısı
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
CB	: İletkenlik bandı
CN-PPV	: Siyano-para-fenilenvinilen

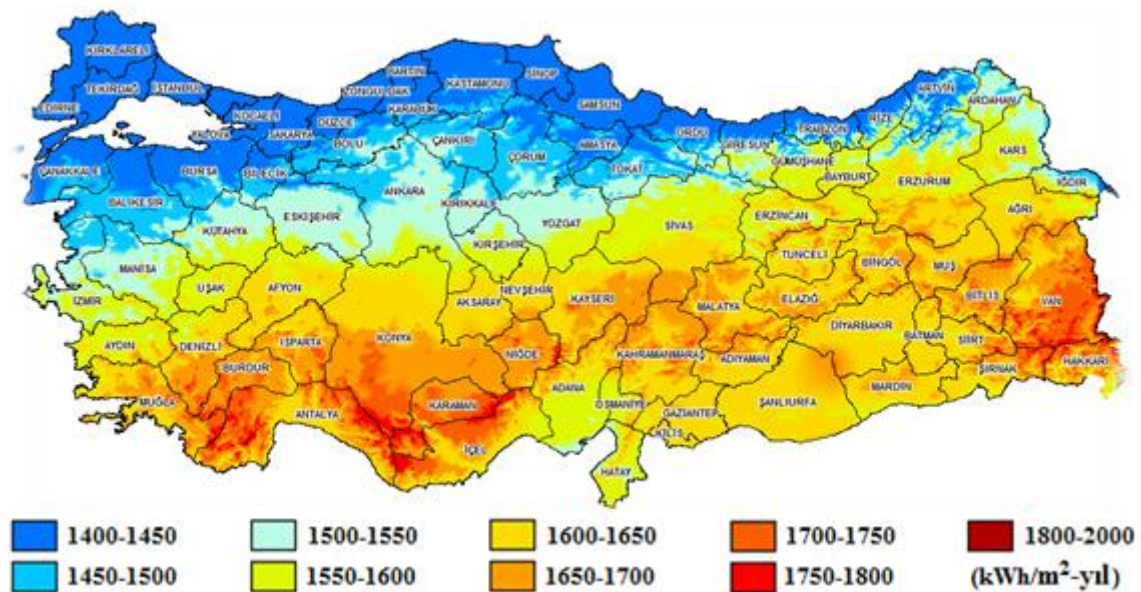
CNT	: Karbon nanotüp
DC	: Doğru akım
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
F8BT	: Poli (9,9-dioktilflore-2,7-dil-ko-benzotiadiazol)
FF	: Dolum faktörü
HOMO	: En yüksek enerjili dolu molekül orbitali
IPCE	: Fotonun akıma dönüşme verimliliği
IP	: İyonlaşma potansiyeli
IR	: Kızılötesi
ITO	: İndiyum kalay oksit
LCD	: Likit kristal ekran
LED	: Işık yayan diyot
LUMO	: En düşük enerjili boş molekül orbitali
MIM	: Metal-İletken-Metal
MWCNT	: Çok cidarlı karbon nanotüp
MDMO-PPV	: Poli [2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilenvinilen
MEH-PPV	: Poli [2-metoksi-5-(2-etil-hekziloksi)-1,4-fenilenvinilen]
NREL	: Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NWS	: Ulusal Hava Servisi
OLED	: Organik ışık yayan diyot
PCBM	: [6,6]-fenil-C ₆₁ bütirik asit metil ester
PEDOT:PSS	: Poli (3,4 etilendioksitiyofen)poli (stirensülfonat)
PFB	: Poli(9,9-dioktilflore-2,7-dil-ko-bis-N,NN'-(4-bütülfenil)-bis-N,N'-fenil-1,4-fenilenediamin
PF1CVTP	: Poli [9,9-dioktilflore-2,7-dil-alt-2,5-bis(2-tbienil-1-siyanovini)-1-(3,7-dimetiloktiloksi)-4-metoksibenzene-5',5'-dil]
PTFE	: Politetrafloroetilen (Teflon)
P3HT	: Poli (3-hekziltiyofen)
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
STM	: Taramalı tünelleme mikroskobu
SWCNT	: Tek cidarlı karbon nanotüp
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
UV	: Ultraviyole (Mor ötesi)

- UW-MRSC : Wisconsin Üniversitesi Madison Malzeme Araştırmaları Bilimi ve
Mühendisliği Merkezi
- X-AFM : Kesitsel atomik kuvvet mikroskobu
- VB : Valans bandı

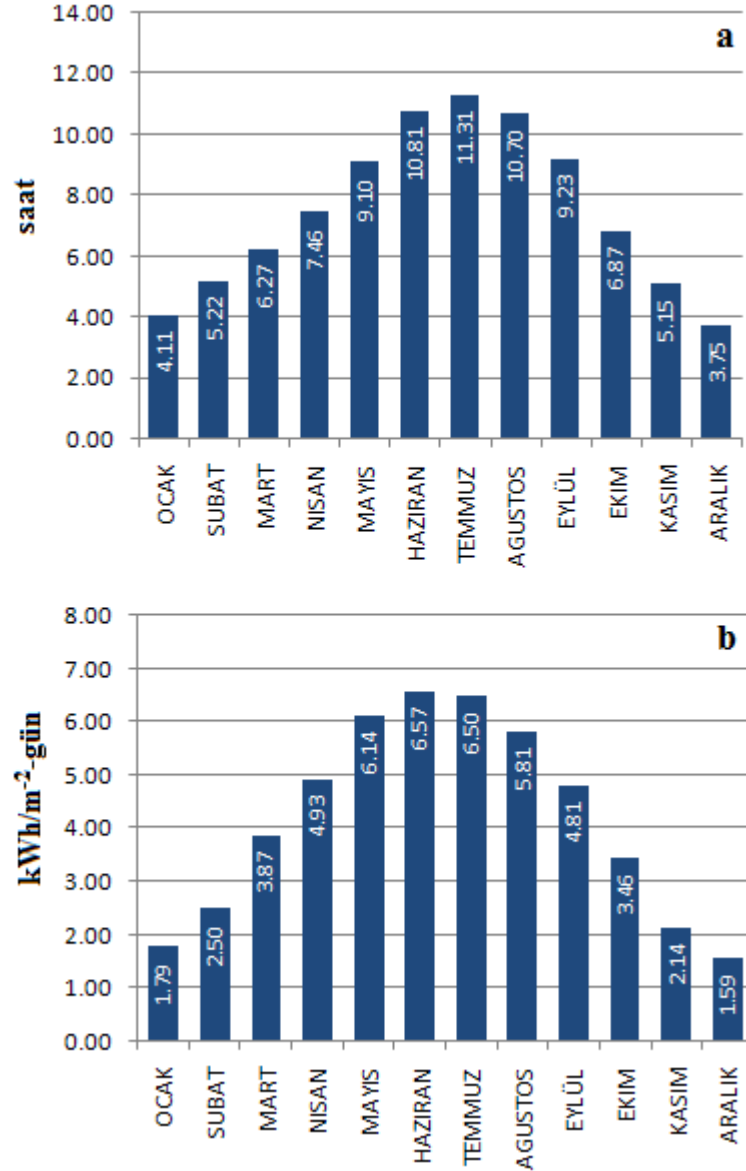
1. GİRİŞ

Petrol esaslı enerji kaynaklarının hızla tükeniyor olması ve bu kaynakların hava kirliliğinde, küresel ısınmada etkin rol oynaması yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Bu bağlamda güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, dalga enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi gibi alternatif kaynaklar üzerinde geniş çaplı araştırmalar yürütülmektedir. Kyoto Protokolü gibi uluslararası anlaşmaların, ülkelerin karbondioksit salınımlarına bir sınırlama getirmesi de ülkeleri daha temiz enerji kaynakları kullanmaya sevk etmektedir. Nitekim 2005 yılında Meclisimizce kabul edilen “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” un 1. Maddesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliğinin artırılarak sera gazı emisyonlarının azaltılması hususu ele alınmış ve 2009 tarihli 5836 no’lu kanunla Kyoto Protokolü’ne katılmamız uygun görülmüştür.

Sınırsız ve kesintisiz bir kaynak olması, güneş enerjisini diğer alternatif enerjilere göre bir adım öne çıkarmaktadır. Ülkemizde güneşlenme potansiyeli yüksek şehirlerin bulunması güneş enerjisinden yararlanma konusunda bize büyük bir artı sağlamaktadır. Şekil 1.1.’deki ülkemizin güneşlenme durumu incelendiğinde yüzölçümünün yarıdan fazlasının yıllık yaklaşık 1600 kW/m²’lik güneş radyasyonuna maruz kaldığı görülmektedir. Şekil 1.2.’de ise ülkemizin aylara göre güneşlenme süreleri gösterilmiştir. Buradan, ülkemizin yıl içerisinde günlük olarak ortalama 3,7



Şekil 1.1. Güneş radyasyonunun Türkiye’deki dağılımı (EİE)



Şekil 1.2. a) Türkiye’deki güneşlenme süresinin aylara göre değişimi, b) Türkiye’deki güneş radyasyonunun aylara göre değişimi (EİE)

kW/m^2 ’lik güneş radyasyonuna maruz kaldığı anlaşılmaktadır.

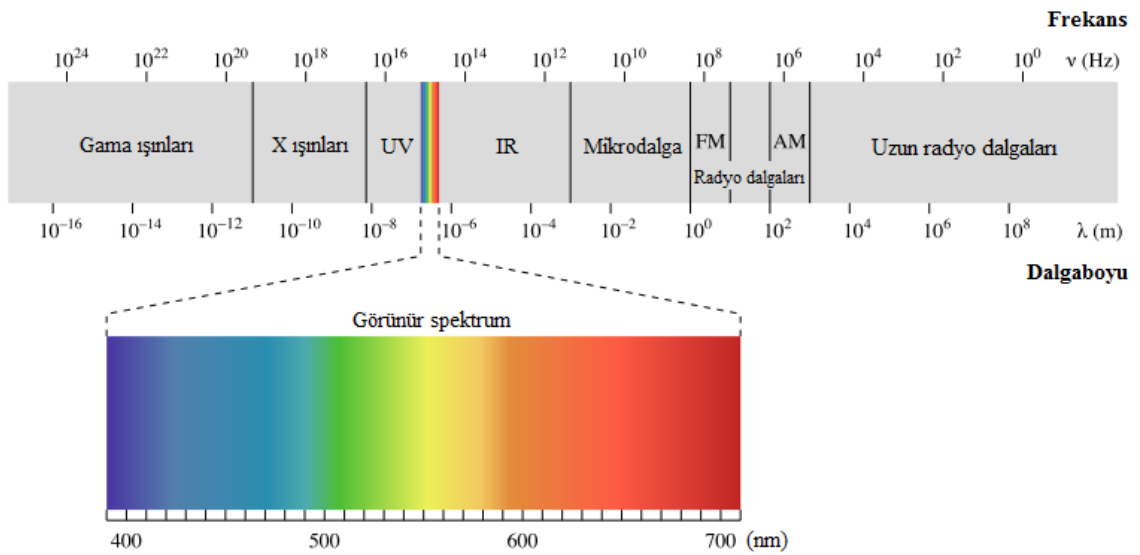
Güneşin ısı enerjisinden faydalanarak termodinamik çevrimlere göre çalışan sistemler ve kollektör sistemlerinin yanında, foton enerjisine dayalı fotovoltaik güneş pilleri üzerinde de yoğun çalışmalar sürdürülmektedir. Fotovoltaik sistemlerle güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi mümkün olmaktadır. Böylece, ısı çevrimlere dayalı olarak güneşten elektrik elde eden bir sisteme göre mekanik enerji kayıpları minimuma indirilmektedir. Ayrıca fotovoltaik pillerle üretilen elektrik enerjisi bataryalarda kimyasal enerji şeklinde depolanabilirken, ısı enerjisinin uzun süre depolanması mümkün değildir. Fotovoltaik teknolojinin önündeki engeller, inorganik

güneş pillerinde verimin yeterli seviyede olmasına rağmen silisyum malzeme üretim maliyetinin yüksek olması; organik güneş pillerinde ise malzeme maliyetinin düşük olmasına rağmen verimin yeterli seviyede olmamasıdır. Bu sorunların da, nanoteknoloji alanındaki gelişmelere paralel olarak aşılması beklenmektedir.

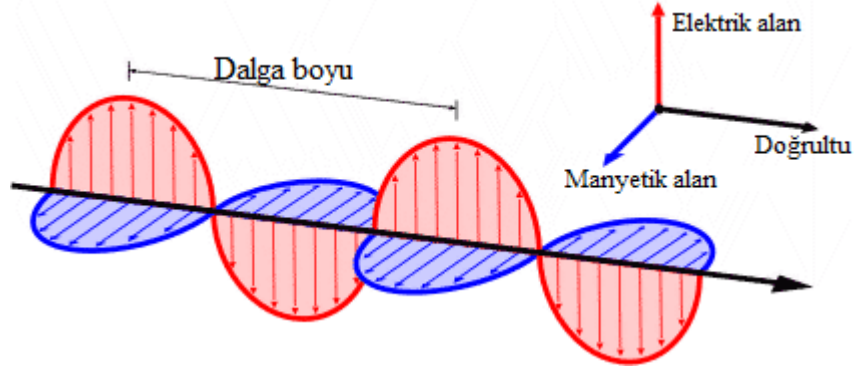
Nanoteknoloji, son yıllarda üzerinde önemli çalışmalar yapıldığı ve gelecek 10-20 yılı şekillendirmesine kesin gözüyle bakılan yeni bir bilimsel alandır. Malzemelerin makro büyüklükteyken sahip oldukları özelliklerden, çok farklı özellikler göstermeye başladığı, metrenin milyarda biri boyutlarındaki yapıların davranışlarıyla ilgilenen bu teknolojinin, malzeme bilimi ve mühendisliği, tıp, kozmetik, kimya, endüstri, enerji gibi alanlarda büyük gelişmelere yol açması beklenmektedir.

1.1. Işık

Her gün gördüğümüz ışık, güneş tarafından dünya üzerine yayımlanan toplam enerjinin küçük bir kısmıdır. Güneş ışığı Şekil 1.3.'te görülen elektromanyetik radyasyonun bir formudur. Elektromanyetik spektrum, ışığı belirli bir dalga boyuna sahip bir dalga olarak açıklar. 1800'lü yıllarda ışıkla yapılan deneyler sonucunda gözlenen girişim etkileri, ışığın dalgalardan meydana geldiği fikrinin kabul görmesine yol açmıştır. Fakat 1800'lerin sonuna doğru bu görüşte bir problem ortaya çıktı. Isıtılan cisimlerden yayılan ışığın dalga boyu ışığın dalga temelli eşitlikleri ile açıklanamıyordu. Planck yaptığı çalışmayla ışığın toplam enerjisinin belirlenemeyen enerji



Şekil 1.3. Elektromanyetik spektrum (Ronan, 2007)



Şekil 1.4. Elektromanyetik dalganın yapısı (NWS,2010)

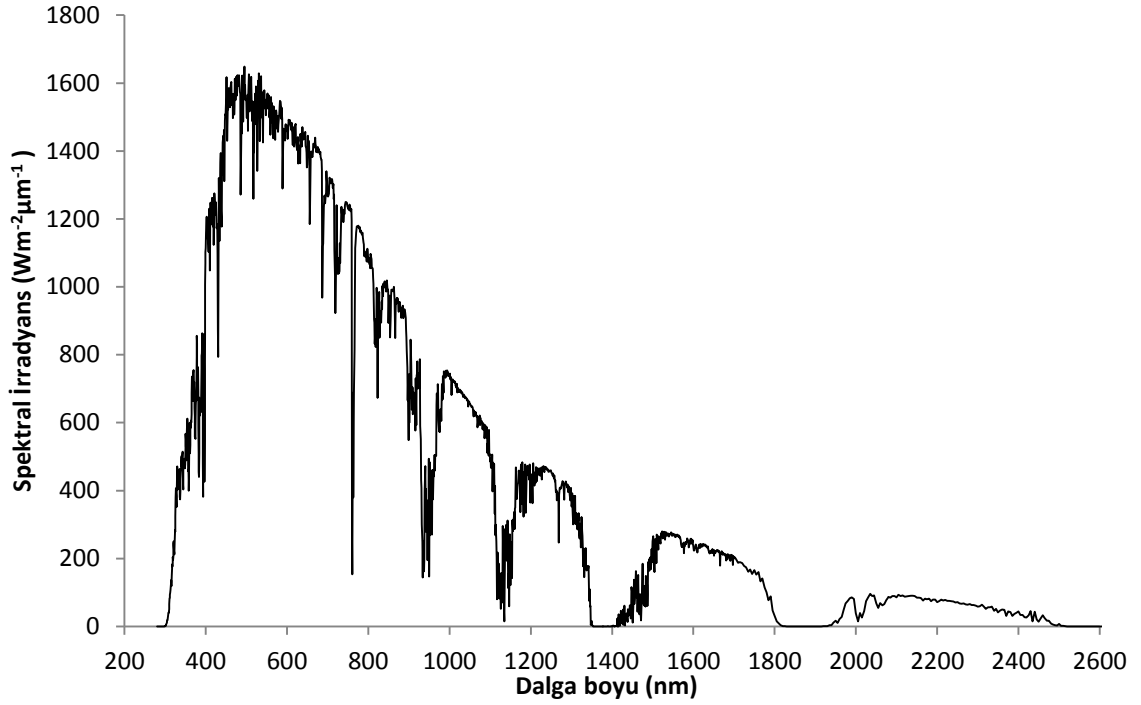
elementlerinden veya enerji kuantlarından meydana geldiğini ileri sürdü. Einstein da fotoelektrik etki üzerine çalışmalarını yürütürken bu kuantum enerji elementlerinin değerlerini doğru bir şekilde belirledi. Bu çalışmalar sonucunda ışığın foton denilen enerji parçacıklarından oluştuğu anlaşıldı. Kuantum mekaniğinde elektron, proton ve diğer tüm kuantum mekanişel parçacıklar gibi foton da hem dalga hem de parçacık özelliğe sahip olarak açıklanmaktadır. Fotonun enerjisi;

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (1.1)$$

denklemleri ile verilir. Burada h, Planck sabiti olup değeri $6,626 \times 10^{-34}$ J.s'dir. c, ışık hızı olup değeri boşlukta 299.792.458 m/s'dir. λ ise ışığın dalga boyudur. Denklem 1.1. incelendiğinde yüksek enerjili fotonlara sahip ışığın (mavi ışık gibi) dalga boyunun küçük olduğu, düşük enerjili fotonlara sahip ışığın (kırmızı ışık gibi) dalga boyunun büyük olduğu görülmektedir (Honsberg ve Bowden, 2010). Işığın dalga yapısı Şekil 1.4.'te görüldüğü gibi birbirine dik olarak titreşen ve bir doğrultuda ilerleyen elektrik ve manyetik alanlardan meydana gelmektedir.

1.2. Güneş Enerjisi

Dünyamızın da içinde bulunduğu Güneş Sistemi'nin merkezini oluşturan Güneş'in yüzey sıcaklığı 5500 °C, çekirdek sıcaklığı ise 15,6 milyon °C civarındadır. Güneş'in kütesinin yaklaşık 1/3'ünü hidrojen geriye kalan kısmın da büyük bölümünü helyum oluşturmaktadır. Az miktarlarda karbon, oksijen, demir gibi daha ağır elementler mevcuttur. Güneş, enerjisini hidrojenin helyuma dönüştürüldüğü nükleer füzyon ile sağlamaktadır. Güneş'te meydana gelen termonükleer enerjinin ancak

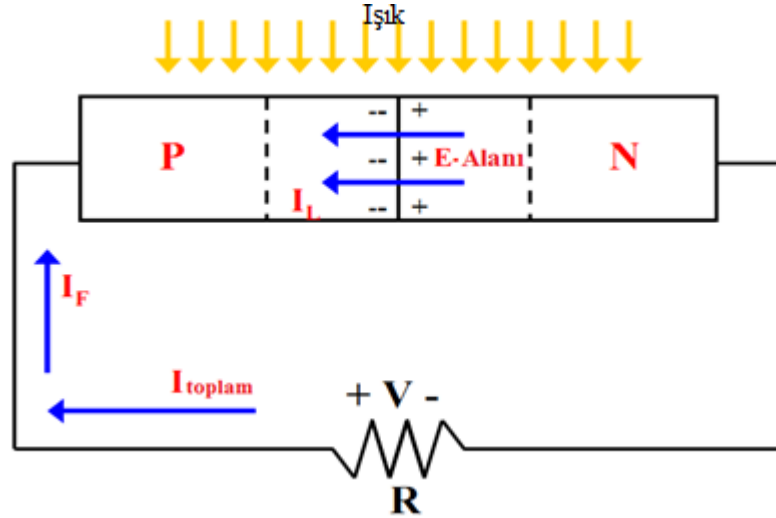


Şekil 1.5. Global solar spektrum (NREL)

1/2000000 kadarı dünya üzerine ulaşabilmektedir. Dünya atmosferi dışında ışınım şiddeti yaklaşık 1300 W/m^2 iken Dünya üzerinde bu değer $0-1100 \text{ W/m}^2$ arasında değişkenlik göstermektedir. Bu düşüş, atmosferdeki oksijen, azot, ozon, su buharı gibi gazların ışınımı yutmasından ileri gelmektedir. Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşması 8,44 dakika sürmektedir. Şekil 1.5.'te Güneş'ten Dünya yüzeyine gelen ışığın dalgaboyuna göre irradyansı gösterilmiştir (Wikipedia).

1.3. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, üzerine düşen ışığı direkt olarak elektriğe çeviren aygıtlardır. Yarı iletken diyot olarak çalışan güneş pilinde, ışığın elektriğe dönüşmesi fotovoltaiik etki ile olmaktadır. Fotovoltaiik etki, bir malzemenin ışığa maruz kalmasıyla bazı elektronların daha yüksek seviyeli yörüngelere yerleşmesi ve bunun sonucunda da bir gerilim meydana gelmesidir (Şekil 1.6.). Güneş pilleri yüzey geometrisi olarak genellikle kare, dikdörtgen veya daire şeklinde üretilirler. Alanları 100 cm^2 civarında, kalınlıkları da $0,2- 0,4 \text{ mm}$ arasındadır. İstenilen seviyede güç elde etmek için güneş pilleri birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak güneş pili modülleri oluşturulabilir. Bu modüller de birbirleriyle bağlanarak daha fazla güç elde edilmesi sağlanabilir. Güneş pilleri DC



Şekil 1.6. Bir P-N eklemde fotovoltajik etki (Trybus, 2008)

elektrik üretir fakat kullanım ihtiyacına göre invertörler ile AC elektriğe dönüştürülebilir.

Güneş pilleri, iletim hatlarıyla elektriğin taşınmasının zor veya yüksek maliyetli olduğu orman gözetleme kuleleri, deniz fenerleri, yerleşim merkezlerinden uzakta olanevler, tarlalar, meteoroloji gözetleme istasyonları gibi yerlerde; yeni nesil akıllı binalarda, metalik yapıların korozyona karşı korunmasında, trafikte ışıklı uyarıcı levhalarda, cep telefonu dizüstü bilgisayar gibi elektronik cihazların şarj edilmesinde ve daha birçok alanda taşınabilir elektrik kaynağı olarak kullanılmaktadır.

1.4. Güneş Pili Çeşitleri

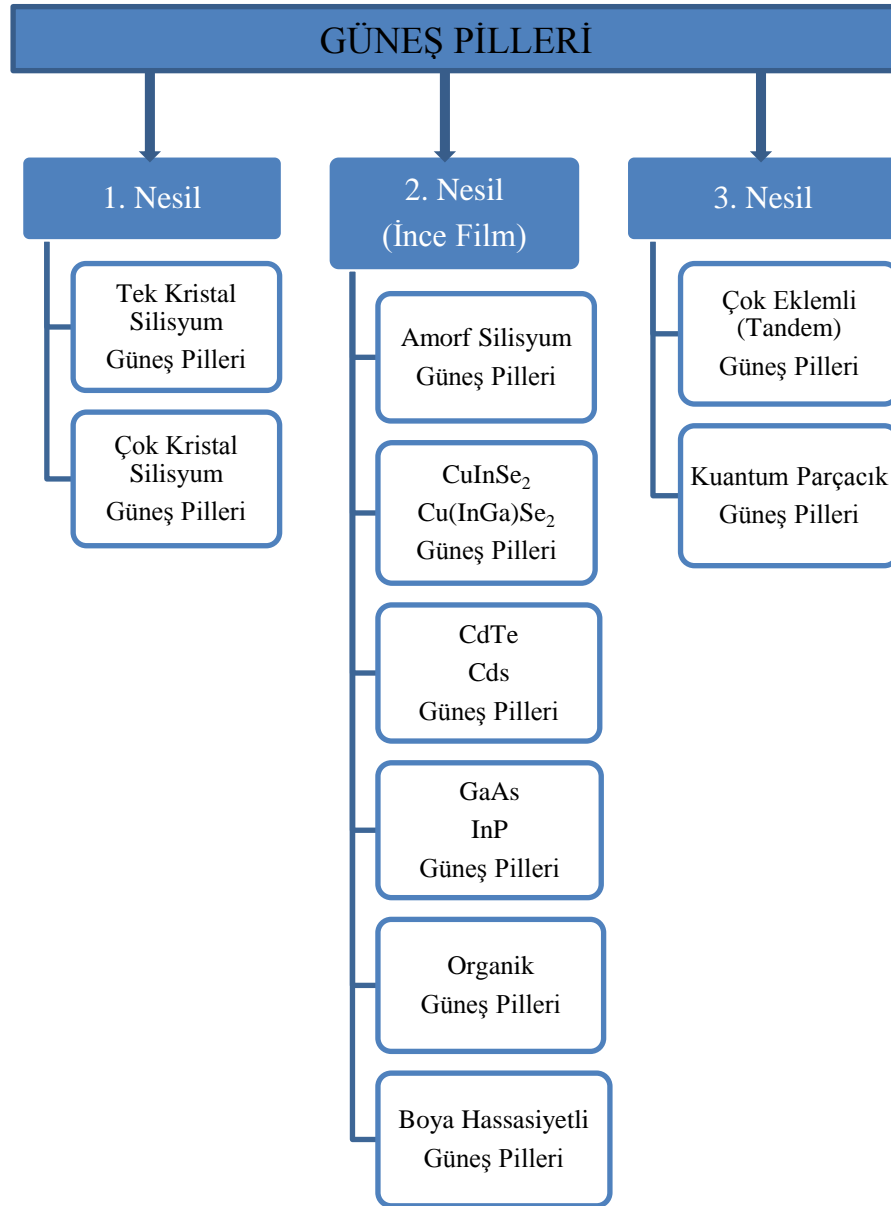
Güneş pillerinin kullanılan malzeme tipine göre birçok çeşidi mevcuttur. Bunlar Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

1.4.1. Birinci nesil güneş pilleri

1.4.1.1. Tek kristal silisyum güneş pilleri

Güneş pillerinde en çok kullanılan malzeme tek kristal silisyumdur. Bu tip malzemeye üretilen güneş pilleri en çok kızılötesi ışığa duyarlıdırlar, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgedeki radyasyonu da diğerlerine göre daha düşük enerjili olduğundan bu pillerin verimi yaklaşık % 25 ile sınırlıdır Tek kristalin üretimi

Çizelge 1.1. Güneş pili çeşitleri



Chrozalski kristal çekme tekniği (Smith, 2001) ile gerçekleştirilir. Pahalı bir yöntem olması dezavantajdır. Silindirik şekilli ingottan kesilerek oluşturulduğu için tam kare değil de köşeleri çentikli bir geometriye sahiptirler. Dolayısıyla bu pillerle oluşturulacak modüllerde köşeleri kapanmamış bölgeler meydana gelir (Şekil 1.7.a).

1.4.1.2. Çok kristal silisyum güneş pilleri

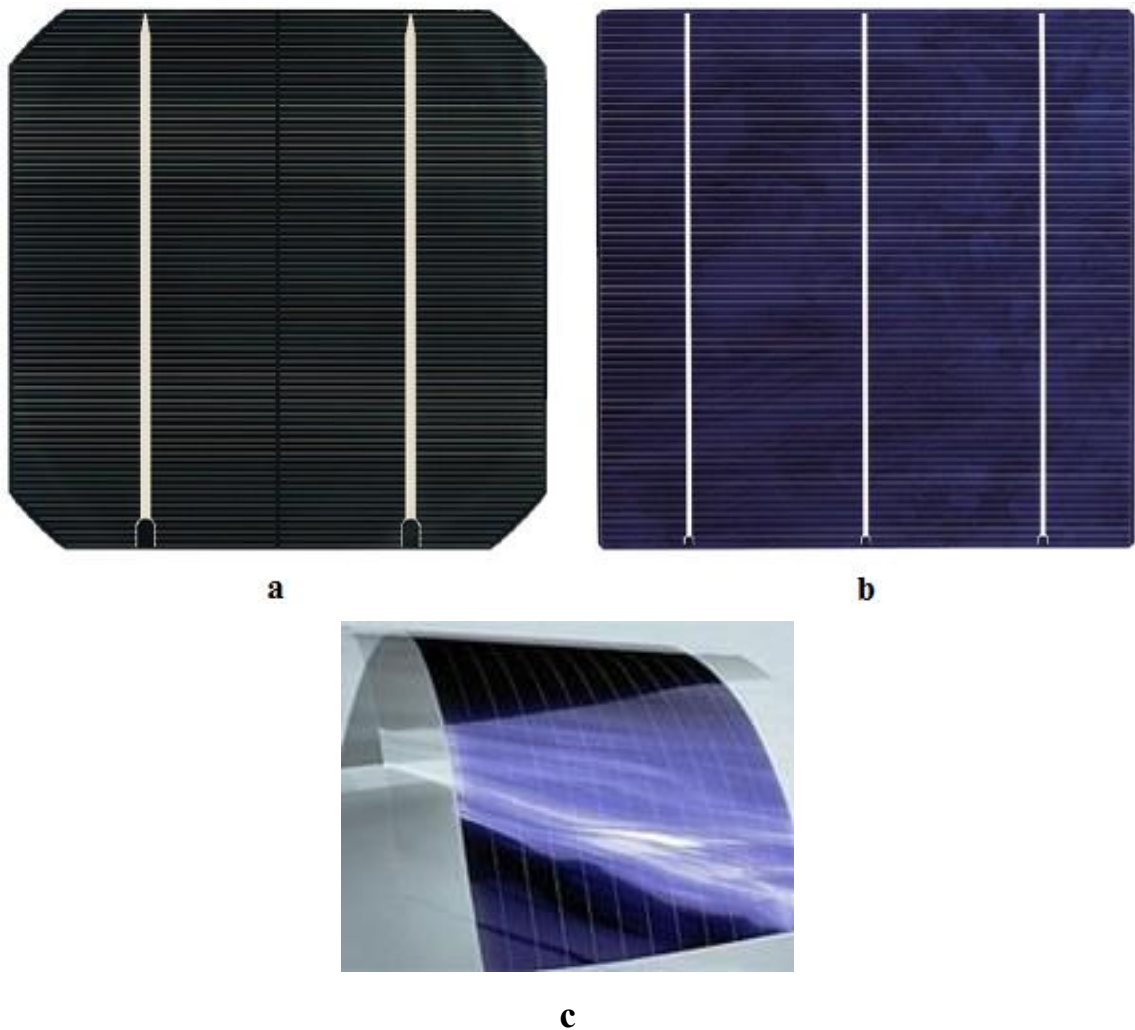
Erimiş silisyumun kalıba dökülerek soğumaya bırakılmasıyla çok kristal silisyum üretilir daha sonra da ince levhalar halinde kesilirler. Dolayısıyla üretimleri tek

kristalin üretimine göre çok daha ucuzdur fakat silisyum kristallerin sınır bölgelerindeki iç dirençlerin meydana gelmesi nedeniyle verimleri ortalama % 15 civarındadır. Kare şeklinde ingottan kesildiği için modül oluşturulduğunda kapanmamış alan meydana gelmez (Şekil 1.7.b).

1.4.2. İkinci nesil (ince film) güneş pilleri

1.4.2.1. Amorf silisyum güneş pilleri

Amorf silisyum(a-Si), silisyumun silan(SiH_4) gibi reaktif bir gazdan cam alt tabaka üzerine biriktirilmesiyle üretilir. Verimleri % 10 seviyesindedir. Verimin diğer tiplere göre düşük olması, kristal yapıya sahip olmamaları nedeniyle önemli miktarda iç



Şekil 1.7. a) Tek kristal silisyum b) Çok kristal silisyum (Saga, 2010, SANYO) c) Amorf silisyum esnek güneş pili (Comel)

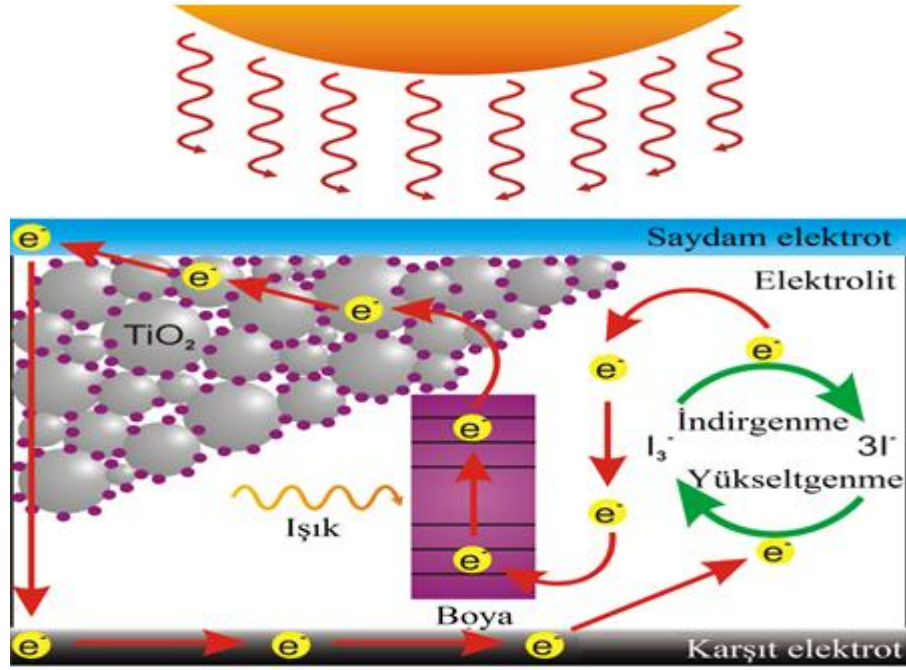
enerji kayıpları oluşmasından ileri gelmektedir. Cam, plastik gibi ucuz alt katmanların üzerine ince film halinde kolaylıkla kaplanabilmesi kitle üretimine ve geniş yüzeylere uygulanabilmesine olanak tanımaktadır. Amorf silisyumun absorpsiyon katsayısı kristal silisyumlara göre daha fazladır, bundan dolayı aynı miktarda ışık absorpsiyonu kristal silisyuma göre daha ince amorf silisyum kullanılarak sağlanabilir (Şekil 1.7.c).

1.4.2.2. Diğer ince film güneş pilleri

İnce film güneş pilleri bir veya daha fazla fotovoltaik katmanın bir alt katman üzerinde biriktirilmesiyle oluşur. Oluşan filmin kalınlığı birkaç nanometreden mikrometre seviyesine kadar değişkenlik gösterir. Kullanılan fotovoltaik materyale göre sınıflandırılırlar. Bakır indiyum selenür (CIS), bakır indiyum galyum diselenür (CIGS), kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS), galyum arsenit (GaAs), indiyum fosfür (InP) gibi çeşitleri mevcuttur. Verimleri tipine göre ortalama % 10- % 24 arası değişkenlik gösterir. Bu pillerin yapımında kullanılan indiyum nadir bulunan elementlerdendir, galyum doğada element halinde bulunmaz, kadmiyum ve bileşikleri toksik, tellür ise az toksik özellik gösterir. Bazı tiplerin üretimi oldukça maliyetli olduğu için yalnızca uzay çalışmaları gibi durumlarda kullanılır.

1.4.2.3. Boya hassasiyetli güneş pilleri

Fotoelektrokimyasal güneş pili veya Grätzel pili olarak da adlandırılırlar. İnce film sınıfında olan bu pillerin üretimi diğer katı hal pillerine göre daha ucuzdur. Çünkü yapımında kullanılan malzemeler ucuzdur ve üretimi için kompleks sistemlere gerek yoktur. Diğer ince film pillerde olduğu gibi esnek alt katmanlar üzerine kaplanabilirler. Mekanik olarak da oldukça sağlam olmakla birlikte zararlı dış etmenlere karşı da dayanıklıdırlar. Güç dönüşüm verimleri ince filmlere nazaran düşük olsa da teorik olarak maliyet/performans oranı fosil yakıta dayalı elektrik üretimiyle yarışacak seviyededir. Boya hassasiyetli güneş pilleri, gözenekli nanokristal TiO_2 kaplı, saydam ve iletken cam elektrot, TiO_2 nanokristal yüzeyine bağlanmış boya molekülleri, I^-/I_3^- gibi bir indirgenme-yükseltgenme çiftini içeren elektrolit ve katalizör kaplı bir karşıttan oluşur. Işığın soğurulması boya molekülleri tarafından, yük ayrışması da yarı iletken-elektrolit arayüzeyinde boyadan TiO_2 'ye elektron enjeksiyonu ile gerçekleştirilir (Halme, 2002). Şekil 1.8.'de boya hassasiyetli bir güneş pilinin yapısı ve çalışma ilkesi



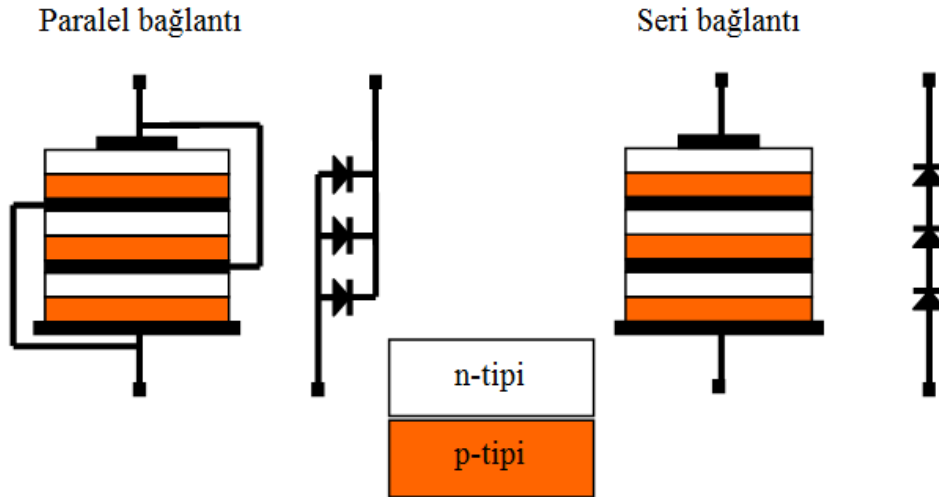
Şekil 1.8. Boya hassasiyetli güneş pilinin yapısı

görülmektedir. Bu pillerin çalışma ilkesi yaprakların fotosentezine benzer. Işık, saydam elektrottan girer ve TiO_2 yüzeyindeki boya molekülleri tarafından absorbe edilir. Boya moleküllerindeki uyarılmış elektronlar TiO_2 'nin iletkenlik bandına buradan da saydam elektrotta geçer. Elektronunu kaybeden boya molekülü elektrolitteki tri iyodürü iyodüre indirgeyerek elektron kazanır. Devreyi tamamlayarak karşıt elektrottan gelen elektron da iyodürü yükseltgeyerek tekrar iyodür oluşturur. Bu işlemler ışık olduğu sürece bir döngü halinde devam eder.

1.4.3. Üçüncü nesil güneş pilleri

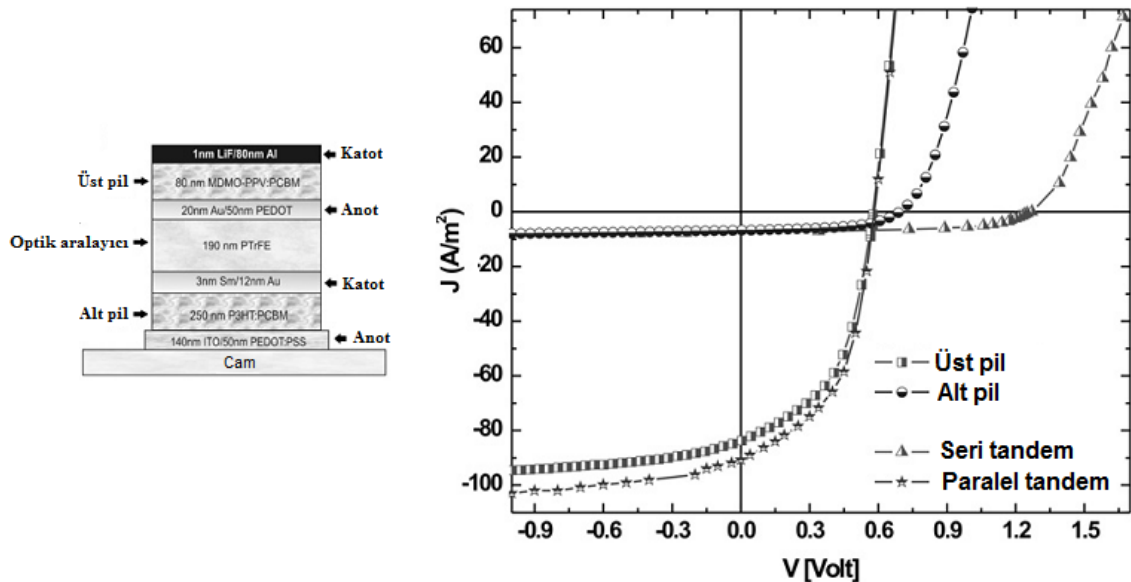
1.4.3.1. Çok eklemli (tandem) güneş pilleri

Birden çok aktif katmana sahip tandem güneş pillerinin yapılış amacı, her katmanı farklı dalga boyuna duyarlı olacak şekilde tasarlayarak ışık spektrumunun daha geniş kısmından yararlanmayı sağlamaktır. Böylece tek katmanlı bir güneş pilene göre daha fazla verim elde edilmiş olur. Katmanlar organik, inorganik veya hem organik hem de inorganik (hibrit) olabilir. Paralel ve seri olmak üzere iki farklı biçimde bağlantı yapılabilir (Şekil 1.9.). Paralel bağlantılarda, ara elektrotlar her münferit pilden yük toplanmasını sağlarlar. Bu elektrotlar foton kayıplarını en aza indirmek için



Şekil 1.9. İnorganik tandem güneş pilinde seri ve paralel bağlantı (Prall, 2005)

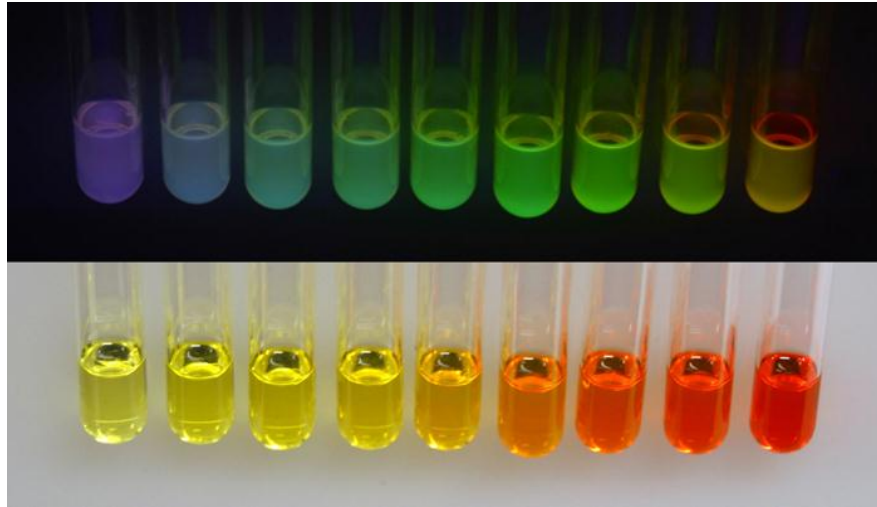
saydam, yük taşıyıcılarının toplanmasını sağlamak için de yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Seri bağlantılarda, münferit pilleri ayırmak için ince, kesintisiz, ışığı soğurmayan metalik katmanlara gerek duyulmaz Şekil 1.10.'dan da görüldüğü gibi paralel bağlantıda kısa devre akımı artarken, seri bağlantıda açık devre gerilimi artar (Prall, 2005). Tandem güneş pilleriyle % 40 ve daha üzerinde verim elde etmek mümkündür (Green ve ark., 2011).



Şekil 1.10. Organik tandem güneş pilinde J-V grafiği (Hadipour ve ark., 2008)

1.4.3.2. Kuantum parçacık güneş pilleri

Kuantum parçacıklar, çapları 2-10 nm arasında değişen, yarı iletken özellik gösteren parçacıklardır. Bu büyüklükteki materyaller yığın hallerine göre farklı optik ve elektronik özelliklere sahiptirler (Günes, 2006). Kuantum parçacıklar silikon germanyum gibi elementlerden üretilebildiği gibi CdS, CdSe, CdTe gibi bileşiklerden de üretilebilir. Parçacıkların üretimi sırasında kristallerin boyutunu kontrol edebilme imkanı olduğu için, materyalin iletkenlik özelliklerini de hassas bir şekilde kontrol etmek mümkün olmaktadır. Bu da kuantum parçacıkların güneş pillerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Yığın haldeki materyalde sabit bir bant aralığı mevcutken kuantum parçacıklar boyuta göre değişen bant aralığına sahiptirler. Büyük boyutlu parçacıklar küçük olanlara göre daha dar bir enerji seviyesine sahiptir dolayısıyla daha düşük enerjili fotonları soğururlar. Bu durum Şekil 1.11.'deki UV ışık ve ortam ışığı altındaki CdSe kuantum parçacıkların fotoğrafından görülebilir. Kuantum parçacık güneş pillerinin verimleri % 5 civarındadır.



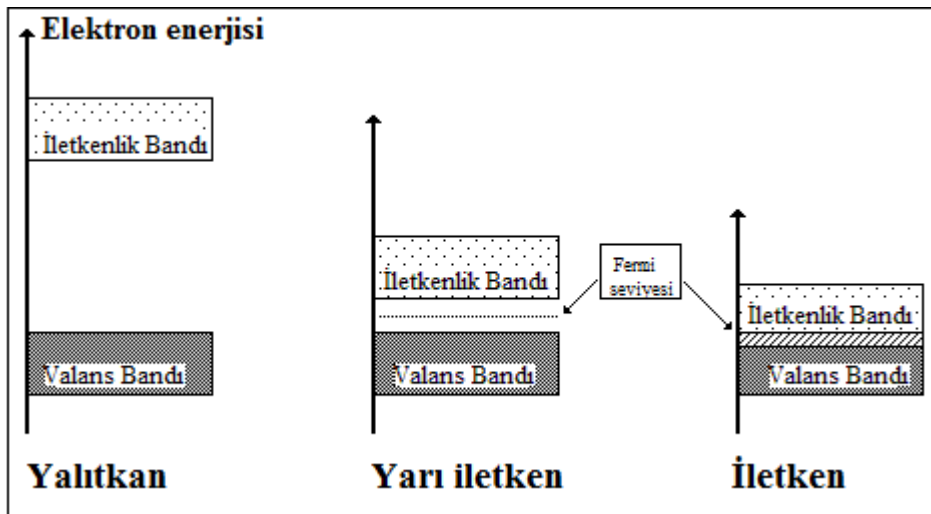
Şekil 1.11. UV ışık(üstte) ve ortam ışığı altındaki(altta) CdSe kuantum parçacıklar (Parçacık boyutu sağa doğru artmaktadır) (UW MRSEC)

2. ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ

2.1. İletken Polimerler

Polimerler monomer denen çok sayıda basit birimlerin birbirlerine eklenmesiyle oluşur. Polimerik malzemeler bant yapılarından dolayı elektriksel yalıtkan maddeler olarak bilinmekteyken Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid, Hideki Skirakawa'nın başı çektiği araştırmacılar bir polimer olan poliasetilenin metal gibi iletken hale getirilebileceğini gösterdiler. Günümüzde iletken polimerler güneş pillerinde, OLED'lerde, çeşitli sensörlerde, transistörlerde ve diğer elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Ayrıca polimer esaslı güneş pilleri düşük maliyetli, daha az toksik olan üretim metotları sunmakta ve geniş alanlı, hafif, esnek panellerin üretimine olanak sağlamaktadır (Kymakis ve ark., 2003). Brabec (2004) fotovoltaiğin öne çıkan özelliklerini; esnek ve yarı saydam olmaları, sürekli baskı tekniğiyle üretilibilmeleri, geniş alanların bunlarla kaplanabilmesi, farklı aygıtlara kolaylıkla entegre edilebilir olmaları, ekolojik ve ekonomik olarak uygunlukları, olarak vurgulamıştır. Işığı etkili olarak toplayacak bir fotovoltaiğin, etkili yük ayrışmasını ve yük transportunu sağlaması gerektiğini, bunun için de aygıtta kullanılacak iki malzemenin enerji bantlarının, foto uyarımdan sonra yük üretimini temin edecek şekilde uyumlu olması gerektiğini, ayrışan yüklerin de kutuplara ulaşabilmesi için malzemelerde kesintisiz geçitlerin olması gerektiğini belirtmiştir.

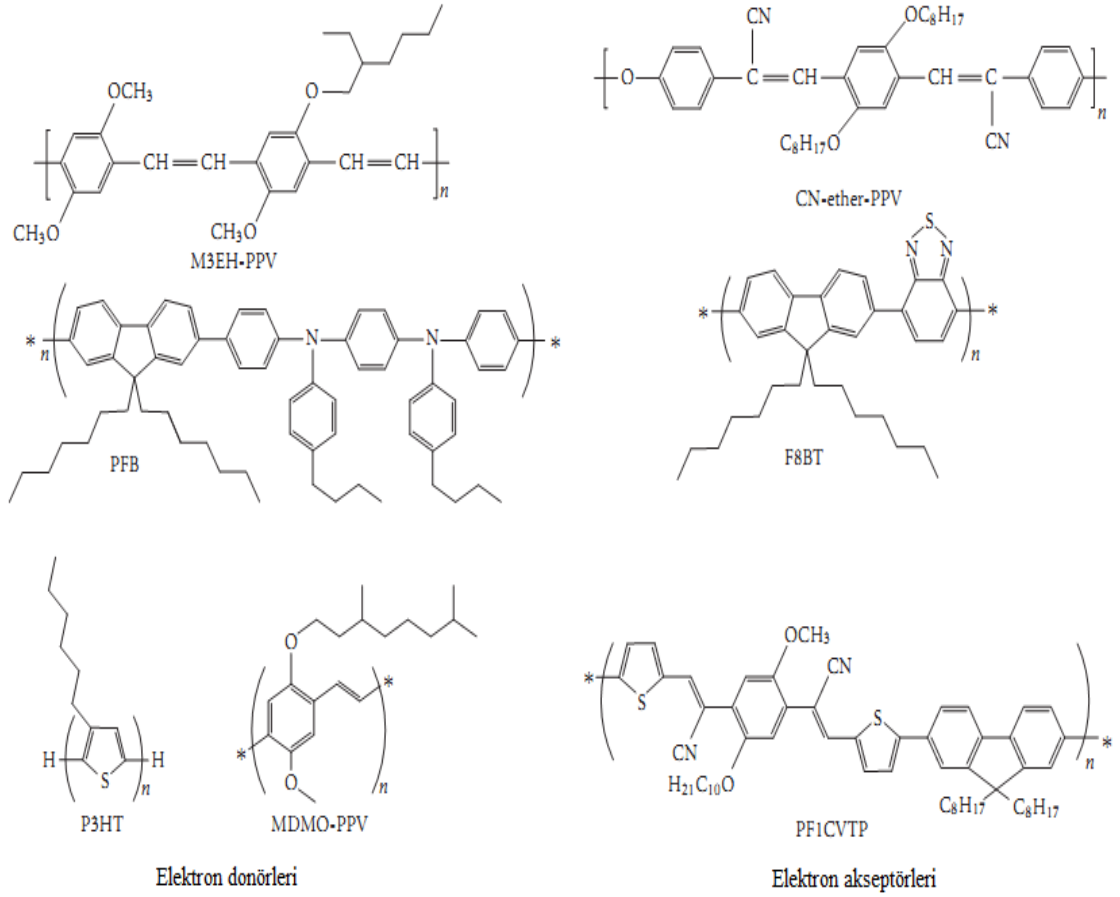
Metallerde iletkenlik, bant teorisi ile açıklanabilir. Bant teorisinde Şekil 2.1.'de



Şekil 2.1. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerin bant yapısı (Jones, 2001)

görüldüğü gibi valans (değerlik) bandı ile iletkenlik bandı olmak üzere iki ayrı elektronseviyesi mevcuttur. Metallerde bu iki seviye çakışık olduğu için, metaller daimi iletkenlerdir. Yalıtkanlarda valans ve iletkenlik bandı arasında metallere göre büyük bir seviye farkı bulunduğundan elektronlar normal durumda valans bandından iletkenlik bandına geçemez dolayısıyla elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Yarı iletkenlerde ise bu seviye farkı yalıtkanlara göre daha azdır dolayısıyla ısı, ışık gibi bir etki ile valans bandından iletkenlik bandına elektronun uyarılarak geçmesi sağlanabilir. Bu durumda, normalde yalıtkan olan yarı iletken, iletken hale geçmiş olur. Polimerik iletken malzemelerde valans ve iletkenlik bandı sırasıyla HOMO ve LUMO seviyeleri olarak adlandırılır. Bu seviyeler arasındaki farka ise bant aralığı denilir.

Konjuge polimerler, birbirilerine, ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, tekrarlanan gruptan oluşmuş, uzun zincirli organik moleküler yapılarıdır. Tekli bağ σ -bağı (sigma) olarak adlandırılan kovalent bağlıdır. σ -bağı ve π -bağından oluşan bağa çift bağ denmektedir. Konjugasyon olarak adlandırılan karbon atomları arasındaki tek ve çift bağların birbirini izlemesi polimere elektriksel özellikler kazandırmaktadır (Miller, 2005). Konjuge sistem üzerinde delokalize durumunda olan elektronlar polimer maddeyi iletken yapmak için yeterli olmadığından uygun katkılandırma (doplama) ile iletken hale getirilebilmektedir. Yükseltgenerek p-tipi polimer ve indirgenerek n-tipi polimer elde edilebilmektedir (Zafer, 2006). Konjuge polimerler yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptirler ve bunun için oksidasyon, tepkime veya asit-baz kimyasıyla doplanırlar (Salaneck ve ark., 1999). Konjugasyon arttıkça HOMO ve LUMO seviyeleri arasındaki enerji farkı azalacağı için iletkenlik artar. İletkenlik ise konjuge polimer zinciri üzerindeki yüklerin hareketleriyle olmaktadır. Konjuge polimerlerin ışığı absorbe etmesi sonucunda elektronların π seviyesinden π^* seviyesine geçmesiyle, birbirine Coulomb etkileşimiyle bağlı olan elektron-boşluk çifti denilen eksitonlar oluşmaktadır. HOMO seviyesinden LUMO seviyesine geçen elektronlar geride boşluk (kovuk) bırakırlar. Eksitonlar belirli bir bağlanma enerjisine sahip olduğundan yük taşıyıcıların elektroda ulaşmadan ayrılmaları gerekmektedir. Eksitonların bağlanma enerjisi konjuge polimerleri ve organiklerin opto-elektronik özelliklerini anlamak için önemli bir parametredir. Eksitonların bağlanma enerjisi oldukça büyükse yük taşıyıcıların fotoüretimi endotermiktir. Fotovoltaik aygıtlarda eksiton bağlanma enerjisi küçük olmasına rağmen ışık yayan diyotlarda (LED) bu durum tam tersinedir (Schweitzer, 2000). Eksitonlar yaklaşık 0,4 eV bağlanma enerjisine sahip güçlü bağlardan oluşmaktadır ve bu bağlanma enerjisinden dolayı



Şekil 2.2. Organik güneş pillerinde kullanılan konjuge polimerlerin kimyasal yapısı (Kietzke, 2007)

eksitonlar ayrılmamak için direnç göstermektedirler. Konjuge polimerlerin çoğu, düşük yük taşıyıcı mobilitesine sahip olduğundan elektronların elektrota taşınmadan önce rekombinasyona uğrama olasılığı vardır. Rekombinasyon ve düşük yük taşıyıcı mobilitesi, polimer karışımlardan elde edilen güneş pillerinin performansını kısıtlamaktadır. Şekil 2.2.'de güneş pillerinde akseptör ve donör olarak kullanılan bazı konjuge polimerlerin yapısı görülmektedir. Geniş dalga boylarına sahip düşük bant boşluklu polimer malzemeler daha çok foton absorbe ederek V_{OC} 'yi artırır ve buna bağlı olarak verim de artar. Elektronlar donörden akseptöre taşınırlar. Akseptör ve donörün LUMO seviyeleri elektron transferini gerçekleştirmeye yetecek kadar yeterli uzaklıkta olmalıdır. Organik güneş pillerinde enerji seviyelerinin dizilimi polimerden fullerene yeterli yükü taşımak ve yüksek bir V_{OC} elde etmek için oldukça önemlidir (Bundgaard ve Krebs, 2007). Eksitonlar güneş enerjisi dönüşümü için hayati önem arz ederler. İstenilen fotovoltaj dönüşümün olması için eksitonların güçlü bir elektrik alanıyla ayrılması gerekmektedir. Organik yarıiletkenlerin çoğu boşluk iletkenliğine sahiptir ve yaklaşık optik bant boşluğu 2 eV'dir. Bu bant boşluğu silikona göre oldukça yüksektir

ve bu durum güneş spektrumunun toplanmasını sınırlandırmaktadır. Ancak organik yarıiletken malzemelerin kimyasal sentez yoluyla kimyasal yapıları değiştirilebilir (Hoppe ve Sariciftci, 2004).

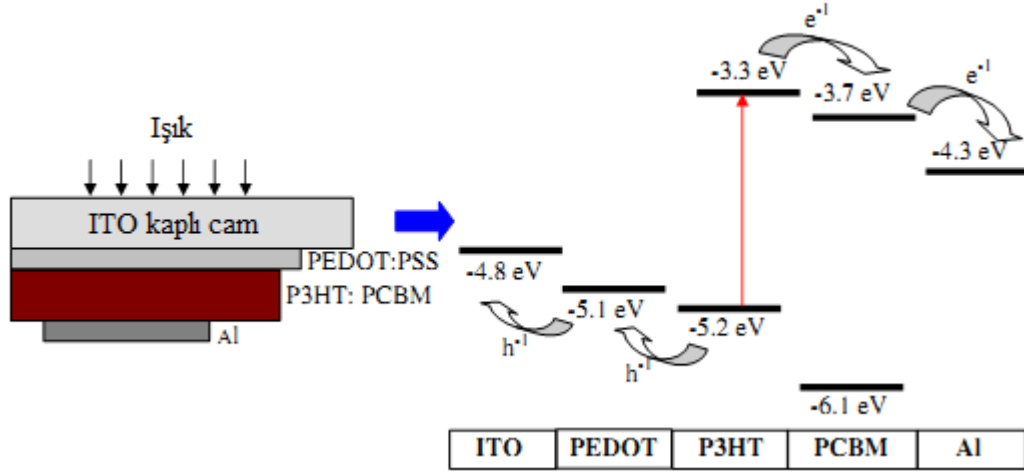
2.2. Organik Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi

Organik güneş pillerinde ışığın elektrik akımına dönüşmesi dört basamakta gerçekleşir. Bunlar;

- 1- Fotonların absorbe edilmesiyle eksitonların oluşumu,
- 2- Eksitonların polimer içerisine difüze olması,
- 3- Yük ayrışımının oluşması,
- 4- Yük ayrıştıktan sonra elektronların katota, boşlukların da anota taşınması.

Ayrılmış olan pozitif ve negatif yüklerin bir çiftinde depolanan potansiyel enerji, yüklerin Fermi seviyelerinin farkına veya elektrokimyasal potansiyel farklarına eşittir. Elektronları elektrota ulaştırmak için yük taşıyıcılar bir itici kuvvete gereksinim duymaktadırlar. Genellikle bu itici kuvvet elektron ve boşlukların elektrokimyasal potansiyelindeki bir eğimden oluşmaktadır (Hoppe ve Sariciftci, 2004).

Konjuge polimerlerde π -bağlarını oluşturan delokalize P_z orbitalleri, gerçekte iki farklı orbital meydana getirmektedirler, düşük enerjili bağlayıcı orbitaller (π) ve yüksek enerjili karşıt bağlayıcı orbitaller (π^*). Bu iki orbital arasındaki enerji farkı organik yarı iletken malzemenin enerji bant aralığına karşılık gelir. Enerji bant aralığına eşit veya daha büyük enerjide ışığın soğurulması ile π^* -orbitallerinde ve π -orbitallerinde elektron boşluğu meydana gelmektedir. İletkenlik bandındaki elektronları ve valans bandındaki elektron boşluklarının serbest olduğu inorganik yarıiletkenlerdekinin tersine, organik yarıiletken malzemelerde uyarılmış haldeki elektronlar ile temel haldeki elektron boşlukları arasında zayıf bir kulombik bağ mevcuttur. Eksiton difüzyon mesafesi organik malzemenin yapısına göre farklılık gösterirken genelde 10 nm civarındadır Şekil 2.3.'te organik güneş pilindeki tabakaların enerji bant diyagramı görülmektedir. Işığın absorbe edilmesiyle uyarılan P3HT'nin HOMO'sundaki elektronlar LUMO seviyesine çıkarlar. LUMO seviyesindeki uyarılmış elektron daha düşük enerji seviyesine sahip donör PCBM'nin LUMO'suna geçer oradan da en düşük enerjili Al elektrota geçer. P3HT'nin HOMO'sundaki elektron boşluğu ise PEDOT:PSS'nin HOMO'sundaki elektronlar tarafından doldurulur. PEDOT:PSS'nin HOMO'sunda oluşan boşluk ise ITO'daki elektronlar tarafından doldurulur. Bu durum elektronların

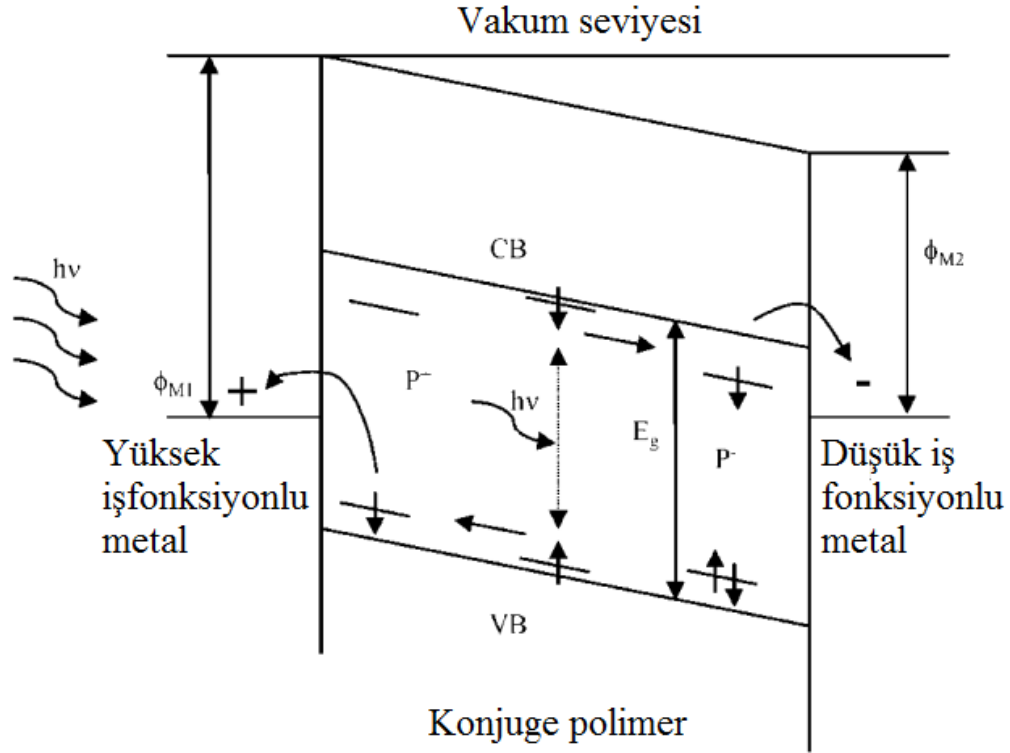


Şekil 2.3. Organik bir güneş pili ve tabakalarının enerji diyagramı (Kalita ve ark., 2009) organik malzemenin yapısına göre farklılık gösterirken genelde 10 nm civarındadır.

boşlukları doldurması şeklinde değil de boşluğun taşınması olarak da düşünülebilir. Güneş piline bir devre elemanı bağlanması durumunda Al'deki elektron devre üzerinden geçerek ITO'daki elektron boşluğunu doldurur ve süreç başa döner.

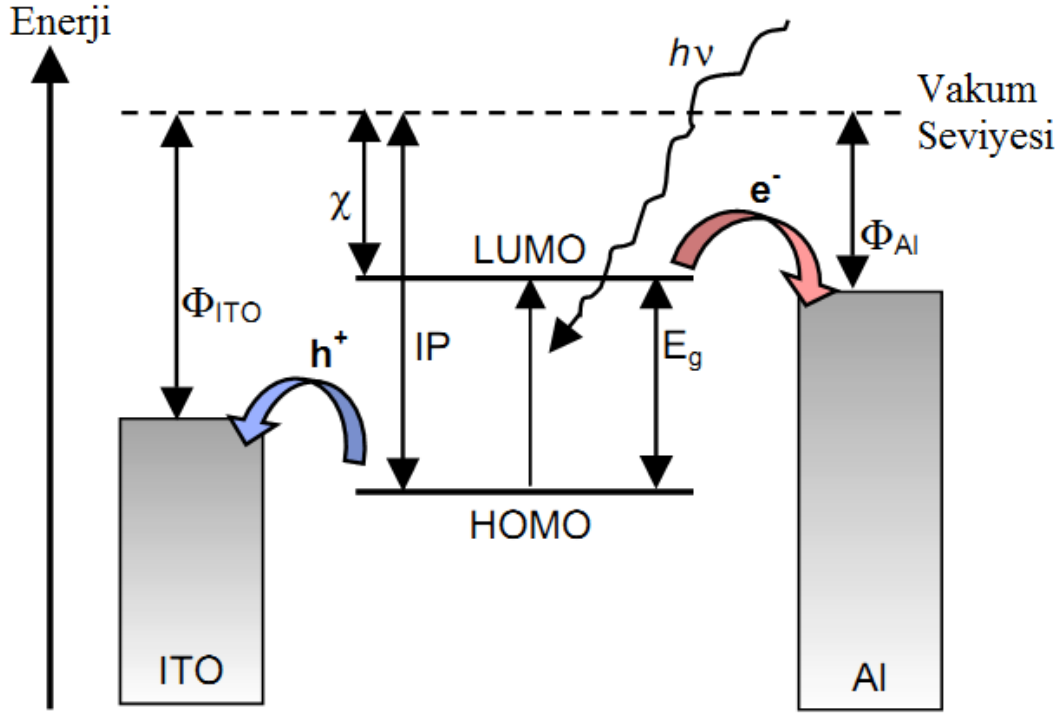
Organik güneş pillerinin çalışma prensibine göre eksitonun ayrışması gerekmektedir. Bu ayrışma ışığın soğurulduğu noktadan 10 nm'lik bir mesafe içerisinde gerçekleşmelidir. Eksitonun ayrışması elektron transferi ile gerçekleşmektedir. Bu elektron transferi metal kontak ile organik yarıiletken ara yüzeyinde veya farklı elektron akseptör veya donör özellikteki molekül ara yüzeyinde gerçekleşir. Elektron, yüksek elektron ilgisi olan malzeme (akseptör) tarafından, elektron boşluğu ise düşük iyonlaşma potansiyeline sahip malzeme (donör) tarafından kabul edilmektedir. Ayrıca eksiton, elektron ve elektron boşluğu arasındaki Coulomb çekim kuvvetinden daha güçlü elektrik alan tarafından da ayrıştırılabilir.

Organik güneş pillerinin büyük çoğunluğunda oluşan elektron ve elektron boşlukları zıt kutuplara taşınmaktadır. Bu taşınma işlemi, elektrotların asimetrisi (farklı iş fonksiyonları) veya uygulanan potansiyel sebebi ile oluşan içsel elektrik alanda gerçekleşmektedir. Geri yük transferlerini önlemek amacı ile elektron ve elektron boşlukları tercihen farklı malzemelerde veya fazlarda taşınmaktadır. Örneğin donör-akseptör hücrelerde, elektron iletkenliği iyi olan akseptör ve boşluk iletkenliği iyi olan donör malzeme kullanımı idealdir. Yüksek yük toplama verimliliği için organik yarıiletken malzeme ile metal elektrot arasında enerji bariyeri olmaması gerekmektedir. Bazı durumlarda iki malzeme arasındaki enerji bariyerini gidermek için ilave bir malzeme daha kullanılması yük toplama verimliliğini arttırmaktadır (Zafer, 2006). PPV



Şekil 2.4. MIM modelin kısa devre şartları altındaki tek tabakalı konjuge polimer pilin yük üretim süreci (Brabec ve ark., 2001)

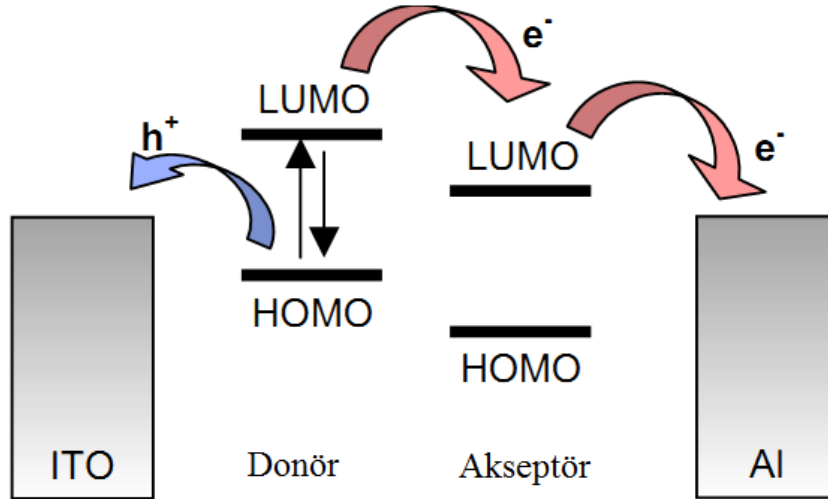
ve PT'nin (polythiophene) eksiton bağlanma enerjisi yaklaşık 0,4eV'dir (Conwell ve Mizes, 1995). Bu yüzden yük taşıyıcıların elektroda taşınmadan ve toplanmadan önce eksitonların ayrılması gerekmektedir. Tek tabakalı organik yarı iletken ince bir filmde elektronlar düşük iş fonksiyonlu metale, boşluklar da yüksek iş fonksiyonlu metale taşınmaktadır. Şekil 2.4. tek tabakalı konjuge polimerin yük üretim sürecini göstermektedir. Taşıma işlemi anot ve katotun farklı iş fonksiyonlarından oluşan voltajla sağlanmaktadır. Bu voltaj Coulomb kanunuyla bağlı olan eksitonları ayırmak için yeterli olmalıdır. Aksi halde absorbe edilen fotonlar birbirinden ayrılmayan bozuk eksitonları oluşturur. Böyle bir durum fotoakım verimini sınırlandırdığından dolayı güneş pillerinde istenmemektedir. Katot ve anodun asimetrik iş fonksiyonlarından dolayı tek tabakalı güneş pilindeki ileriye eğilimli akımlar düşük voltajda geriye eğilimli akımlardan oldukça geniştir. Eksitonlar, eksiton difüzyon uzunluğuna bağlı olarak taşınırlar. Tek tabakalı güneş pilinde oluşan voltaj, eksitonların bağlanma enerjisini aşmak için yeterli olmadığından taşıma sürecini sınırlandırmaktadır (Brabec ve ark., 2001). Bir foton $h\nu$ enerjisine sahiptir ve bu enerjinin bant boşluğu enerjisinden büyük olması halinde foton, yarı iletken malzeme tarafından absorbe edilir ve elektron



Şekil 2.5. Foton absorpsiyonu ve yük taşıyıcı transferleri (Spanggaard ve Krebs, 2004)

arkasında boşluk bırakarak HOMO seviyesinden LUMO seviyesine çıkar ve eksiton olarak şekillenir. Enerji seviyesi ve ışığın absorbe edilmesi sürecindeki işlemler Şekil 2.5.'te gösterilmektedir. Organik güneş pillerinde bu süreç eksitonların ayrılmasıyla devam eder. Yük ayrımını yapabilmek için elektriksel alana ihtiyaç vardır. Elektriksel alan ise asimetrik olan iyonlaşma enerjisi veya iş fonksiyonlarından sağlanır. İş fonksiyonlarında asimetri olmasının nedeni elektron-boşluk çiftini ayırarak düşük iş fonksiyonlu elektrottan yüksek iş fonksiyonlu elektrota gitmelerini sağlamaktır (Spanggaard ve Krebs, 2004).

Tek polimer tabaka ve iki elektrottan yapılan tek tabakalı güneş pillerinden yeterli bir verim elde edilemedi. Çünkü iki elektrottun iş fonksiyonları arasındaki farklardan oluşan elektrik alanı eksitonları ayırmak için yeterli değildir. Bunun yerine iki katmanlı ve polimer karışımlardan oluşan güneş pilleri yapılmıştır. İki yarı iletken arasındaki ara yüzeyde enerji seviyelerinin dengelenmesi eksitonları ayırarak verimi artırmaktadır. C₆₀ türevleri, CdSe, TiO₂ gibi elektron-akseptör malzemeler olan polimerler karıştırılarak verim % 4 elde edilmiştir. Solar spektrumun geniş bir bölümünü absorbe etmek için polimerin bant boşluğunun azaltılması, yük transferi ve eksitonların ayrılması gibi işlemler verimi yükseltmektedir (Coakley ve McGehee, 2004).



Şekil 2.6. Donör-Akseptör ara yüzeyinde eksitonların ayrılması (Spanggaard ve Krebs, 2004)

Bakır ve perilenin türevlerinden oluşan iki katmanlı ilk heteroeklem güneş pillerinin verimi yaklaşık % 1'e kadar artmıştır. Heteroeklem ara yüzeyinde oluşan alan iki farklı yarı iletkenin birbirine karşı olan etkileşimini artırmaktadır. Bu alan ara yüzeye dağılan eksitonların ayrılmasını sağlamaktadır (Tang, 1986). Şekil 2.6.'da donör-akseptör ara yüzeyindeki eksitonların ayrılması gösterilmektedir. Fotonlar donör tabaka tarafından absorbe edilerek elektron HOMO seviyesinden LUMO seviyesine yükselirken arkasında boşluk bırakmaktadır. Elektron-boşluk çifti donör-akseptör ara yüzeyinde oluşan elektrik alanıyla birbirinden ayrılır. Bu olay güneş pillerinde fotonların elektrik enerjisine dönüşümlerinde önemli bir süreçtir. Eğer akseptörün LUMO seviyesi donörün LUMO seviyesinden yeteri kadar düşükse uyarılmış olan elektronlar akseptörün LUMO seviyesine rahat bir şekilde geçebilirler. Ayrıca donör-akseptör ara yüzeyindeki yük ayrımı elektrotun ara yüzeyindekinden oldukça fazladır (Spanggaard ve Krebs, 2004). Birçok organik güneş pilinde, yükler ışık etkili elektron transferi ile oluşmaktadır. Bu reaksiyonda, bir elektron vericiden (p-tipi yarı iletken) bir elektron alıcıya (n-tipi yarı iletken) elektron transfer olur. Verimli bir yük oluşumu için yük ayrımının, ışıkla uyarılmadan sonra termodinamik ve kinetik açıdan tercih edilen yol olması önemlidir. Elektronun, uyarılmış haldeki elektron vericiden daha elektronegatif alıcıya transferi sadece enerjetik olarak tercih edilebilir olduğu zaman mümkündür. Bu nedenle, absorplanan foton enerjisinin, yük ayrışmasının oluşumunda kullanımı ve ışımasız enerji kaybı, sistem içi enerji dönüşümü ya da sistemler arası geçiş gibi süreçlerde kaybedilmemesi önemlidir. Ek olarak, yük ayrımı halinin kararlı olması da önemlidir. Böylece ışıkla üretilen yükler elektrotlardan birine göç edebilirler.

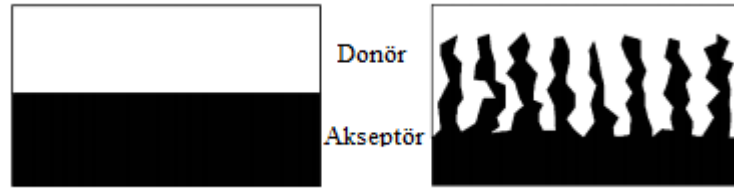
Bu nedenle geri elektron transferi mümkün olduğunca yavaşlatılmalıdır. Boşluk anota ulaşmalıdır ve aynı zamanda elektron da katota ulaşmalıdır. Yük ayrımını sağlamak için, elektrotların asimetrik iş fonksiyonu ile elde edilen bir elektrik alanına ihtiyaç vardır. Bu asimetrinin nedeni, elektron akışının düşük iş fonksiyonlu elektrottan yüksek iş fonksiyonlu elektrota doğru tercihli olmasındandır (Koyuncu, 2008).

2.3. İki Katmanlı Organik Güneş Pilleri

İki katmanlı güneş pilleri p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin birbirlerinin üzerine yığılmasıyla oluşmaktadır. Birçok farklı malzemelerin birleşmesiyle yapılan bu iki katmanlı güneş pillerinde yalnızca ara yüzeyden 10-20 nm uzaklıkta oluşan eksitonlar heteroeklem ara yüzeyine ulaşabilmektedir. Bu durum ara yüzeyden oldukça uzakta bulunan absorbe edilmiş fotonların kaybına yol açmaktadır ve aynı zamanda verimin düşük olmasına neden olmaktadır. Donör-akseptör ara yüzeyinin 10-20 nm etrafındaki yük oluşumu iki katmanlı güneş pillerinin verimini sınırlamaktadır. Film kalınlığı ışığın absorbe edilmesini artırmaktadır ama minimum fotoakım oluşturmaktadır (Günes ve ark., 2007). Heteroeklemin yapısından dolayı yeterli bir yük ayrımı yalnızca donör ve akseptörün ara yüzeyine yakın yerde oluşmaktadır. Donör-akseptör ara yüzeyine uzak olan yerlerde ise yük ayrımı olmayıp elektron-boşluk çifti tekrar birleşmektedirler. Bu bölgede absorbe edilen fotonların miktarı fotovoltaiik verimi sınırlandırmaktadır. Çünkü yük ayrımı fotoaktif pilin oldukça küçük bir bölümünde gerçekleşmektedir (Brabec ve ark., 2001).

2.4. Yığın Heteroeklem Organik Güneş Pilleri

Yığın heteroeklem yapısının temel özelliği, Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi donör ve akseptör fazlar arasındaki yüzey alanını büyük ölçüde artırmasıdır bu sayede yük ayrışmasının, iki katmanlı yapılardaki gibi sadece düzlemsel arayüzey yerine, yığın içerisinde gerçekleşmesi sağlanır (Hoppe ve Sariciftci., 2004). Yığın heteroeklem güneş pilleri donör ve akseptör malzemelerinin belirli bir oranda birbiriyle karıştırılmasıyla yapılmaktadır. Aktif tabaka belli bir bölgede değil donör-akseptör ara yüzeyel alanın tamamında oluşmaktadır ve bu durumda güneş pillerinin verimini artırmaktadır (Günes ve ark., 2007). Yığın heteroeklem güneş pilleri donör-akseptör içeriği bakımından iki katmanlı güneş pillerine benzemektedir. Ara yüzey, karışımdan meydana geldiği için



Şekil 2.7. İki katmanlı(solda) ve yığın heteroeklem(sağda) güneş pillerinin aktif tabaka yapısı (Benanti ve Venkataraman, 2006)

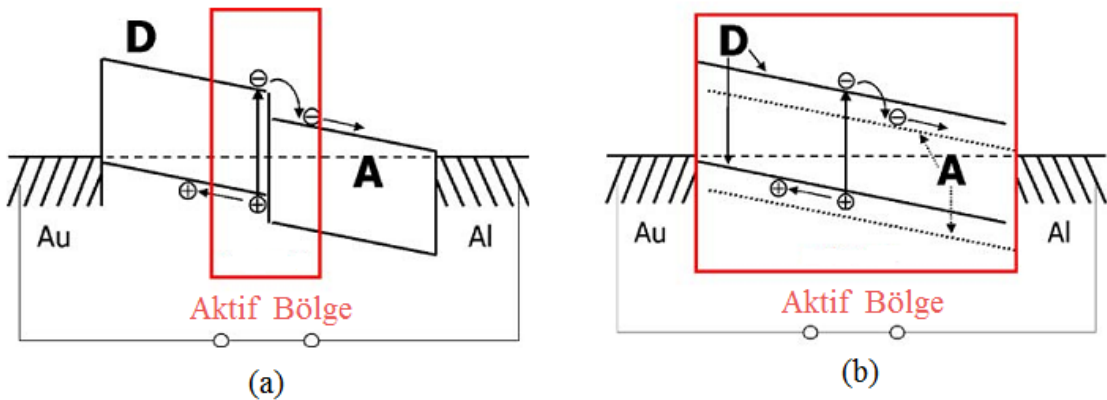
küçük eksiton difüzyon uzunluğunun kayıpları beklenilmemektedir. Çünkü eksitonlar ara yüzey içerisinde olduğu sürece ayrılacaklardır. Ayrıca bu güneş pillerinde yükler farklı fazlar içerisinde ayrılırlar. Bundan dolayı pilin geniş bir kısmında rekombinasyon azalır ve fotoakım oluşur. Tek katmanlı güneş pillerinde donör ve akseptörün temasından sonra elektron-boşluk çifti anot ve katoda giderken yığın heteroeklem güneş pillerinde boşluk ve elektronun taşınması için perkolasyon geçitlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yani donör ve akseptör fazları sürekli ve iç içe girmiş bağlarla şekillenmek zorundadır. Bu yüzden yığın heteroeklem güneş pillerinde karışımın nano boyuttaki morfolojisi oldukça önemli bir hassasiyete sahiptir (Hoppe ve Sariciftci, 2004). Yığın heteroeklem güneş pillerinde yük taşıyıcılar aktif tabaka boyunca ayrılmaktadır. Böylece aktif tabakada emilen her foton fotoakım oluşturma potansiyeline sahiptir. İki katmanlı güneş pillerinde ise donör ve akseptörün temas ettiği alanlarda yük taşıyıcılar ayrılmaktadır ve sadece ara yüzeyde emilen fotonlar fotoakım oluşturmaktadır (Hoppe ve Sariciftci, 2008). MEH-PPV ve PCBM karışımından yapılan yığın heteroeklem güneş pilinde eksiton ayrımı gerçekleşmiş ve karışımın tamamı boyunca yük taşıyıcıların üretimi gerçekleşmiştir (Yu ve ark., 1995).

Donör-akseptör ara yüzeyinde maksimum eksiton ayrımını oluşturmak ve yük taşıyıcı üretimini gerçekleştirmek için yığın heteroeklem güneş pillerinin morfolojisi kontrol edilerek yüksek performans elde edilmesi oldukça önemlidir (Dennler ve ark., 2009). Çözücüler, polimer ve fulleren arasındaki karışım, solüsyonun konsantrasyonu, termal tavlama ile faz ayrımı ve kristalizasyon, malzemelerin kimyasal yapıları gibi parametreler güneş pillerinin morfolojisini belirlemede ve performansını etkilemektedir (Hoppe ve Sariciftci, 2006).

Yığın heteroeklem güneş pilleri genellikle yüksek V_{OC} değerleri göstermektedir. Bu V_{OC} değerleri organik ışık yayan diyotlarda kullanılan MIM modeli ile açıklanamaz. Brabec ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada V_{OC} 'nin akseptörün dayanıklılığıyla ilgili olduğunu ifade etmiştir. Akseptör olarak kullanılan PCBM yığın heteroeklem güneş

pilindeki V_{OC} donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi tarafından belirlendiğinden MIM modeli yığın heteroeklem güneş pillerinde uygulanamaz (Scharber ve ark., 2006). Yük transferi donör-akseptör ara yüzeyinde oluşmaktadır ve yük transferi fotovoltaik performans için oldukça önemlidir. Çünkü fotoakım ve V_{OC} doğrudan yük transferine bağlıdır. Yük transferindeki en önemli adım eksitonun ayrılıp uygun elektrotlara gitmesidir. V_{OC} yük transferinin enerjisiyle belirlenmektedir. Yük transferi enerjisinin artmasıyla açık devre voltajı da artmaktadır (Deibel ve ark., 2010). Şekil 2.8.'de iki katmanlı ve yığın heteroeklem güneş pillerinde aktif bölgeler görülmektedir. Heteroeklem güneş pilinde aktif bölge alanı iki katmanlıya göre daha fazladır ve yük ayrımı tüm alanda gerçekleşmektedir. İki katmanlı pilde ise yük ayrımı sadece katmanların ara yüzeyleri civarında gerçekleşmektedir.

Yığın heteroeklem güneş pilinde ayrılmış yüklerin transferi boyunca rekombinasyona yol açan diğer yüklerle karşılaşma potansiyeli vardır. Bundan dolayı yığın heteroeklem pilinin yük transferi azalabilir ve yüklerin rekombinasyonundan dolayı pilin ara yüzey direnci artabilir. Ancak düzgün sıralanmış yığın heteroeklem güneş pillerinin ara yüzeyinde eksiton ayrımı ve ayrılmış yüklerin taşınması artabilir. Bu pillerin donör-akseptör ara yüzeyinde sürekli bir yol oluşur. Bu oluşan yollar sayesinde yükler kolaylıkla diğer elektrotlara taşınır ve yüklerin rekombinasyon oluşturması ortadan kalkmış olur. P3HT nano çubuklar düzlemsel P3HT filminden yaklaşık on kat daha fazla yüksek bir akım oluşturmuştur. P3HT nano çubukların akım kapasitesi P3HT zincirlerinin yüksek derecede hizalanmasından kaynaklanmaktadır. P3HT nano çubuk/ C_{60} bileşenlerinden oluşan yığın heteroeklem pilin verimi düzlemsel

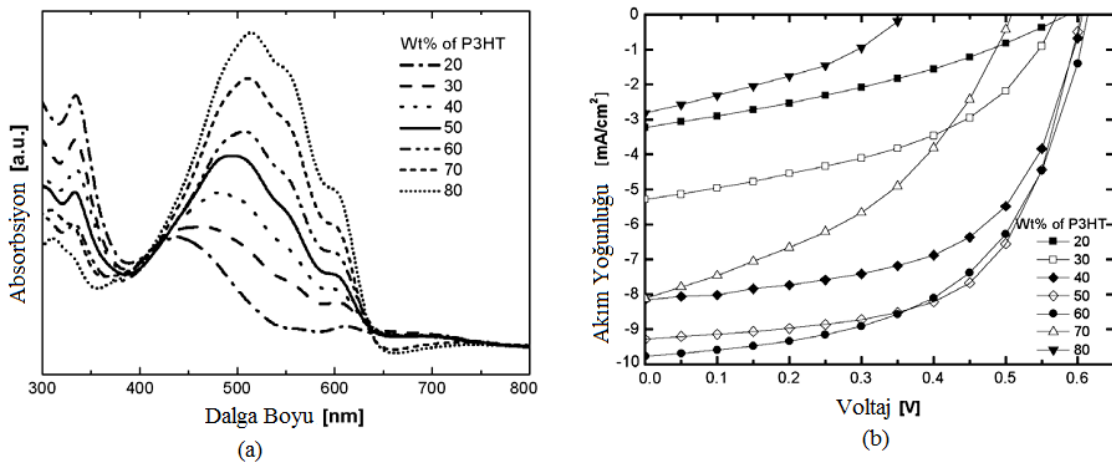


Şekil 2.8. İki katmanlı (a) ve yığın heteroeklem (b) güneş pillerindeki ara yüzey (Hoppe ve Sariciftci, 2008)

olarak yapılan pile göre artış sağlamıştır. Donör ve akseptör arasındaki geniş ara yüzey alanından dolayı iyi bir yük ayrımı yapılmış ve nano çubuklardan dolayı iletkenlik artmıştır (Kim ve ark., 2010).

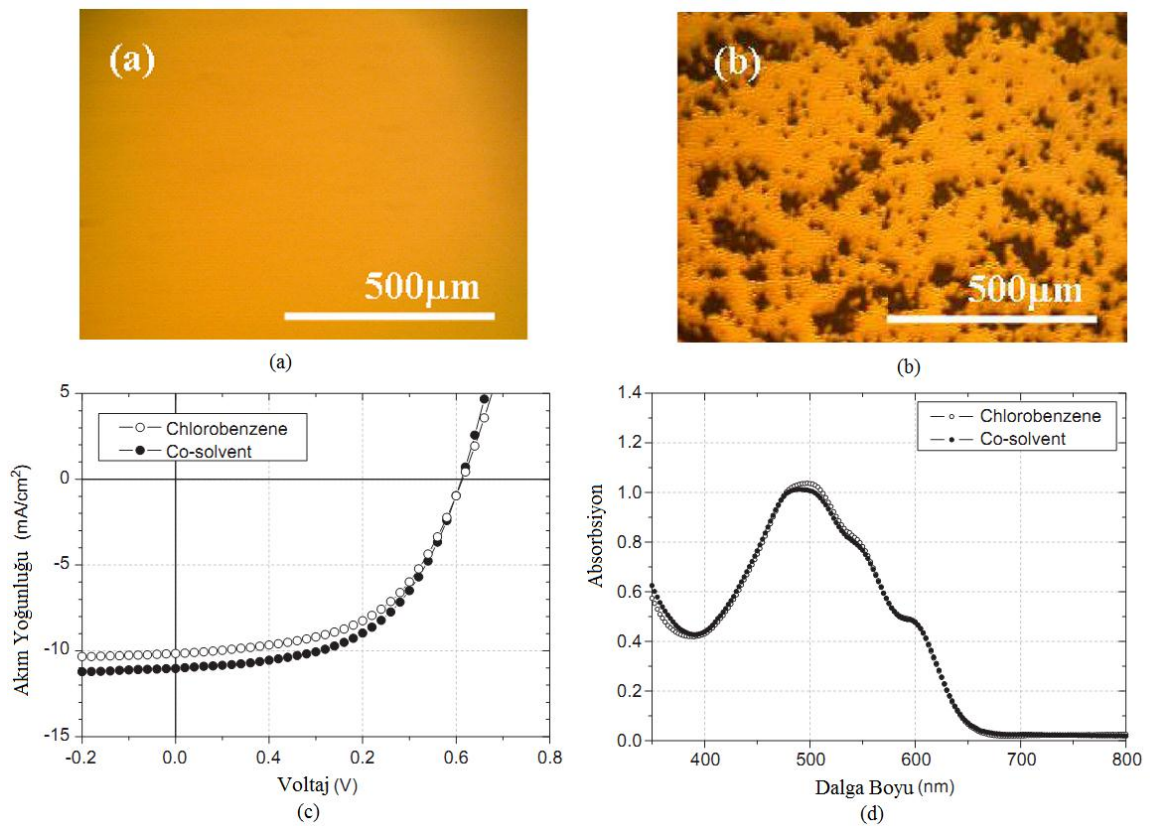
P3HT:PCBM esaslı güneş pillerinin performansını moleküler ağırlık, çoklu dağıtma, tavlama sıcaklığının optimize edilmesi (Hioms ve ark., 2006), ısıl işlem uygulamadan karıştırılan çözücüler (Moule ve Meerholz, 2008), DC gerilim uygulamak (Padinger ve ark., 2003), uygun çözücü kullanmak (Al-Ibrahim ve ark., 2005), çözücü buharlaştırma işlemi (Zhao ve ark., 2007), ikincil elektron donör malzemesi kullanmak (Zhao ve ark., 2011), küçük molekül katkı maddesi kullanmak (Sharma, 2011), titanyum oksit tabanlı solüsyon kullanmak (Kim ve ark., 2006), oleik asit ilave edilmesi (Wang ve ark., 2007), kristalleşebilir çözücü (Keawprajak ve ark., 2010) gibi durumlar etkilemektedir.

Farklı tavlama sıcaklıkları optik özellikleri değiştirmektedir. Ayrıca tavlama ile P3HT:PCBM'in kristalizasyonu ve düzgün bir şekilde yönelmesinden dolayı boşluk mobilitesi artırılabilir ve aktif tabakada oluşan elektron-boşluk rekombinasyonu azaltılarak verim de artırılabilir (Lee ve ark., 2010). Tavlama sonrası filmin kristalimsi yapısının iyileşmesi ve iki bileşen arasındaki karışımın kontrol edilmesi P3HT:PCBM güneş pillerinde verimi artıran neden olarak gösterilmiştir (Yang ve ark., 2005). P3HT:PCBM güneş pillerinin verimi doğrudan, kullanılan malzemelerin yapıları ve faz ayrımıyla ilgilidir. Nano kompozitin mekanik özellikleri de pilin ömrünü etkilemektedir. P3HT:PCBM'in farklı oranlarda karıştırılması pil performansını etkilemektedir. P3HT'nin kristalleşmesi, karışımdaki P3HT'nin % 50'ye kadar



Şekil 2.9. Aktif tabakanın farklı oranlardaki absorpsiyon spektrumu (a) ve J-V grafikleri (b) (Baek ve ark., 2010)

artmasıyla iyileşir. Fakat % 50'den sonra P3HT'nin kristalleşmesi bozulmaktadır. Yani P3HT oranı % 50'yi aştığında, P3HT'nin fibril yapısı PCBM molekülleri tarafından çöktürülmekte ve bundan dolayı P3HT fazının kristalleşmesi önlenmektedir. Şekil 2.9'da farklı oranlardaki P3HT ve PCBM'in absorpsiyon ve I-V karakteristiği üzerine etkisi gösterilmiştir (Baek ve ark., 2010). P3HT:PCBM güneş pillerinin üretim sonrası tavlama sıcaklığının ve tavlama zamanının belirlenmesi güneş pilinin verimini artırmaktadır. Aynı zamanda P3HT ve PCBM arasındaki faz ayrımı kısa sürede oluşmakta ve kararlı bir hale gelmektedir (Inoue ve ark., 2005). P3HT:PCBM güneş pillerinde klorobenzen, kloroform, diklorobenzen ve kloroform karışımından oluşan farklı çözücüler kullanmak pilin performansını etkilemektedir. Çözücü olarak klorobenzen kullanıldığında aktif tabaka filminin içerisinde çözülmeyen kalıntılar oluşmaktadır. PCBM, diklorobenzen ve kloroform karışımından oluşan çözücü içerisinde homojen bir şekilde çözünmekte ve P3HT polimer matriks yapının içerisinde dengeli bir şekilde dağılmaktadır. Bu şekilde P3HT ve PCBM homojen bir karışım oluşturmakta ve iki fotoaktif malzeme arasındaki ara yüzey alanını artırmaktadır. Ara



Şekil 2.10. Klorobenzen çözücüsü (a) ve o-diklorobenzen – kloroform karışımından oluşan çözücüyle (b) hazırlanan karışımların optik mikroskop görüntüsü. Farklı çözücülerle hazırlanan pillerin J-V (c) ve absorpsiyon grafikleri (d) (Kawano ve ark., 2009)

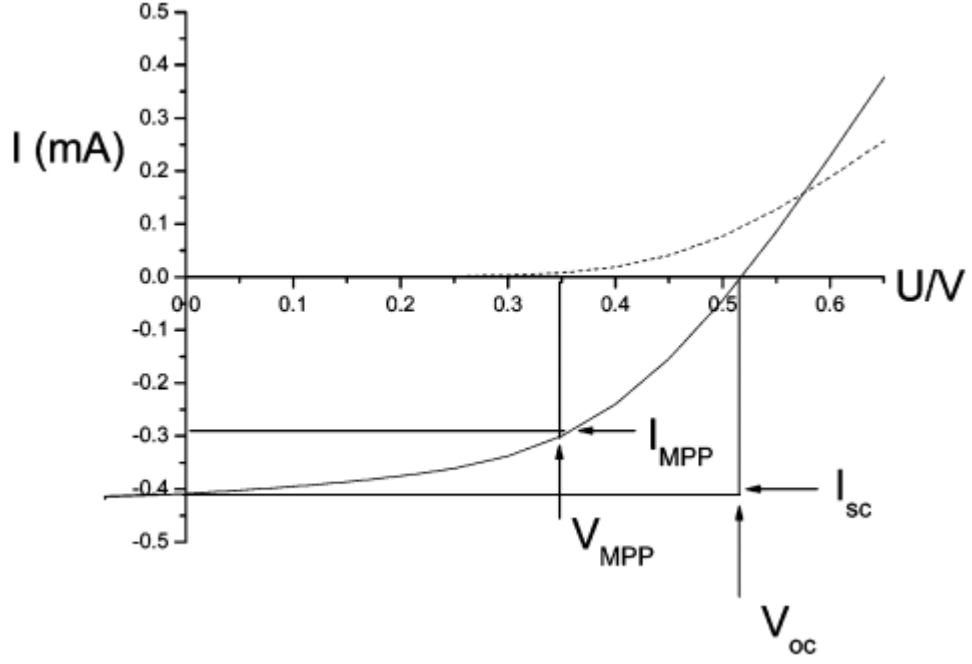
yüzey alanın artmasıyla da akım yoğunluğu artmaktadır. Şekil 2.10'da P3HT:PCBM için farklı çözücüler kullanıldığında optik görüntüleri, J-V ve absorpsiyon grafikleri görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı gibi farklı çözücü kullanıldığında absorpsiyonda önemli bir farklılık görülmemektedir (Kawano ve ark., 2009). Çözücü olarak diklorobenzen kullanılan güneş pilleri tavlama süresince P3HT'ye bağlı olarak farklı karakteristikler göstermiştir. Kısa devre akımı, açık devre voltajı tavlama ile düşmüştür. P3HT'nin yüksek kristallenme özelliği PCBM moleküllerini ayırmış ve yığın heteroeklem güneş pilinin nano boyuttaki ara yüzeyini azaltmıştır. Donör ve akseptörün HOMO-LUMO seviyesi arasındaki enerji farkından dolayı oluşan elektrik alanının etkisi PCBM moleküllerinin ayrılmasını azaltmıştır. Aynı zamanda bu enerji elektron-boşluk çiftini ayırmak için de gereklidir. P3HT:PCBM güneş pillerinin verimi tavlama sonrası artmıştır. Kristallenme ve faz arasındaki değişim güneş pilinin optimum verimini ve kararlılığını sağlamaktadır (Ebadaen, 2010). Kristalleşme tavlama ile artar ve kristalleşmenin artması ise düşük foton enerji bölgesindeki optik absorpsiyonun artmasına neden olur (Erb ve ark., 2006). P3HT:PCBM güneş pillerinin üretim sonrası tavlama tabii tutulması pilin performansını artırmakta ve hatta havaya maruz kaldığında bile (Nam ve ark., 2009) pilin aktif tabakasındaki fotoelektriksel süreç devam etmektedir (Yar, 2011).

2.5. Güneş Pillerinin Karakteristiği

Fotovoltaik aygıtlar için temel karakterizasyon aracı akım-gerilim (I-V) eğrisidir. Şekil 2.11. karanlıkta ve ışıklandırma altındaki tipik bir fotovoltaik aygıtın I-V eğrisini göstermektedir. Burada, I_{MPP} maksimum güç noktasındaki akımı, V_{MPP} maksimum güç noktasındaki gerilimi, I_{SC} kısa devre akımını, V_{OC} açık devre gerilimini göstermektedir. Şekilde görülen küçük dikdörtgenin büyük dikdörtgene oranı dolum faktörünü vermektedir.

2.5.1. Güç dönüşüm verimi

Güç dönüşüm verimi, η aygıt tarafından maksimum güç noktasında üretilen elektrik gücünün, gelen ışığın oluşturduğu giriş gücüne oranıdır. Şu şekilde tanımlanır:



Şekil 2.11. Fotovoltaik aygıtın akım- gerilim eğrisi (Günes ve ark., 2007)

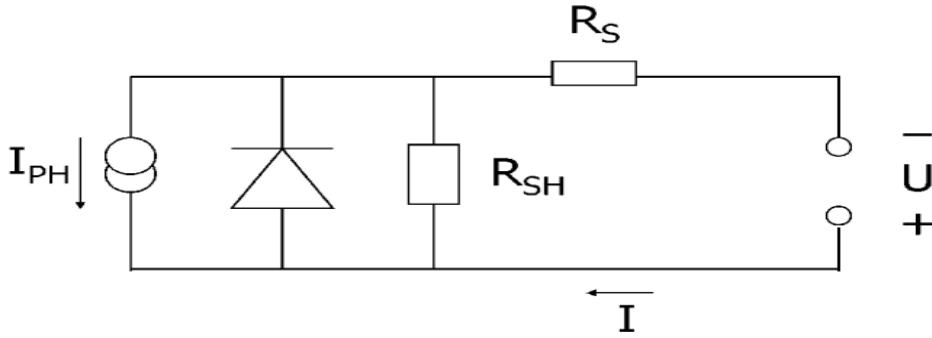
$$\eta = \frac{P_{\text{çıkan}}}{P_{\text{giren}}} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{\text{giren}}} \quad (2.1)$$

2.5.2. Açık devre gerilimi

Fotovoltaik aygıtlarda açık devre gerilimi (V_{oc}), güneş ışığı veya eşdeğer bir ışıkta aygıttan bir akım geçmiyorken olabilecek en yüksek gerilimdir. Bu, yüksüz durum olarak da ifade edilir. Açık devre gerilimi, güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde temel bir parametredir. Anot ve katotun iş fonksiyonları farkı olarak da tanımlanabilir.

2.5.3. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı (I_{sc}) fotovoltaik aygıt boyunca hiçbir gerilimin olmadığı zamanki akımdır. Kısa devre akımı da, güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde temel bir parametredir. Kısa devre akımı absorbe edilen ışığın miktarı ve iç dönüşüm verimi tarafından belirlenmektedir.



Şekil 2.12. Güneş pilinin eşdeğer devresi (Hoppe, 2004)

2.5.4. Dolum faktörü

Dolum faktörü güneş pilinin diyot karakteristiğine ne kadar yakın olduğuyula ilgili bilgi verir. Dolum faktörü her zaman 1'den küçüktür. Dolum faktörü 1'e yakınlaştıkça aygıtın kalitesi artar. Şu şekilde formülize edilir:

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

Şekil 2.12 tek tabakalı güneş pilinin eşdeğer devresini göstermektedir. Burada I_{PH} güneş ışığı tarafından üretilen akımı, R_S seri direnci, R_{SH} paralel direnci göstermektedir. Seri ve paralel dirençler dolum faktörünü etkilemektedir (Winder, 2004). Güneş pilinin elektrik üretimi bir akım kaynağı olarak temsil edilmektedir. Buradaki akım gerilime bağlıdır. Seri direnç elektrotların ohmik katkılarını kapsamaktadır. Yani metal ve organik yarı iletken malzeme arasındaki temastır. Maksimum verim için bu direnç minimize edilmelidir. Ayrıca bu direnç kalınlığın azalmasıyla, sıcaklık ve ışık yoğunluğunun artmasıyla azalır (Prall, 2005).

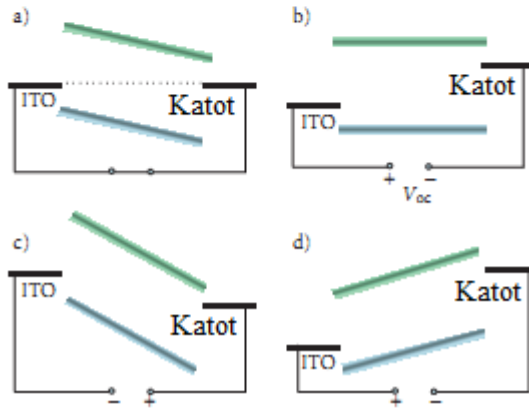
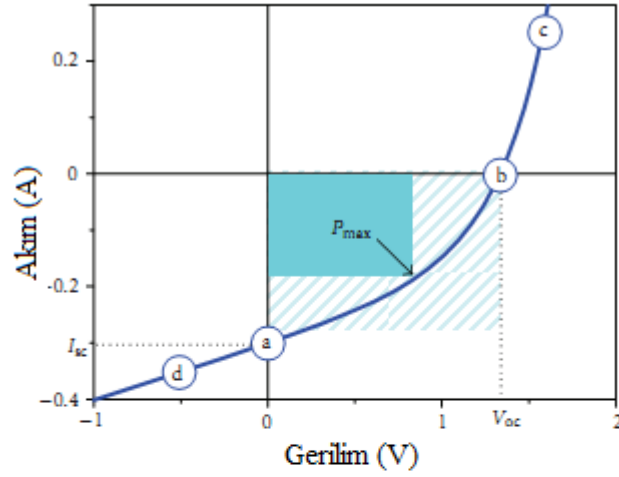
Güneş pillerinin akım-voltaj karakteristiğinin açıklanmasında bant yapısı oldukça önemlidir. Şekil 2.13'te güneş pilinin farklı çalışma koşullarındaki bant yapılarının durumu verilmiştir.

a) Sıfır bias altında güneş pilinin ürettiği akım kısa devre akımı olarak adlandırılır. Bu durumda, eksiton ayrımı ve yük taşınımı yerleşik potansiyel ile sağlanır. MIM resminden görüldüğü gibi bu potansiyel, boşluk ve elektron toplayıcı elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir.

b) Akımın sıfır olduğu gerilim değeri açık devre gerilimi olarak adlandırılır. MIM resminde bant düz olarak gösterilmiştir çünkü uygulanan gerilim elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir (difüzyon etkileri ihmal edilmiştir).

c) $V > V_{OC}$ olduğunda diyot ileri yönde bias durumuna geçer. Bu durumda elektronlar düşük iş fonksiyonlu elektrottan LUMO'ya, boşluklar da yüksek iş fonksiyonlu elektrottan HOMO'ya enjekte edilmektedir.

d) $V < 0$ olduğunda diyot ters bias durumuna geçer. Güneş pili bir fotodiyot olarak çalışır. Elektrik alanı (a)'dakinden daha yüksektir bu da genellikle yük oluşumu ve/veya toplanmasının iyileşmesini sağlar (Kietzke, 2007).



Şekil 2.13. Organik bir güneş pilini I-V karakteristiği ve MIM resmi (Kietzke, 2007)

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Brabec ve ark. (2001) klasik p-n kavşaklarındakine benzer olarak, birbirinden düzlemsel olarak ayrılmış donör ve akseptör katmanlardan oluşan iki katmanlı aygıtların aksine, yığın-heteroeklemin iki boyutlu ara yüzeyde yük oluşumu sınırlamalarının üstesinden geldiğini bunu da akseptör malzemenin donör matriks içerisine homojen bir biçimde dağıtılmasıyla, fotoindüklenmiş yük oluşturan yüzeylerden üç boyutlu bir ağ meydana getirmek suretiyle başardığını belirtmişlerdir. Akseptör olarak, fulleren türevi olan farklı malzemeler kullanarak yaptıkları çalışmayla güneş pillerinde açık devre geriliminin fullerenin akseptör gücüyle (birinci indirgenme potansiyeli) orantılı olduğunu göstermişlerdir. Bu görüş de yığın heteroeklem güneş pillerinde açık devre geriliminin donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi arasındaki enerji farkıyla doğrudan ilişkili olduğunu desteklemiştir.

Chirvase ve ark. (2004) P3HT:PCBM kompozitinin ağırlıkça oranları 1:0,7; 1:0,8; 1:0,9; 1:1; 1:1,5; 1:2 ve 1:3 olacak şekilde bir çalışma yapmışlardır. Fotoakımın ve güç dönüşüm veriminin 1:1 ve 1:0,9 oranları arasında en yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca P3HT:PCBM bazlı güneş pillerinin belirli sıcaklıklarda tavlansının P3HT:PCBM'in absorpsiyon karakteristiğini olumlu yönde etkileyerek fotovoltaj verimi önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Hoppe ve ark. (2004) aktif tabaka malzemesi olarak kullandıkları MDMO-PPV ve PCBM'i ayrı ayrı hem toluen hem de klorobenzen içerisinde çözerek, çözücünün güneş pili karakteristiklerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sonuçta, toluen içerisinde hazırlanan çözeltiden yapılan pillerin klorobenzen içerisinde hazırlanana göre daha az fotoakım ürettiği dolayısıyla daha düşük güç dönüşüm verimine sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Açık devre gerilimi ve dolum faktörü değerleri ise birbirine yakın çıkmıştır. Spin kaplama işleminde klorobenzenli çözeltilerin toluenli çözeltilere göre daha iyi faz dağılımı sağladığı gözlenmiştir. Ayrıca toluen içerisinde çözünen PCBM konsantrasyonu optimum değer üzerine çıkarıldığında fotoakımın doyuma ulaştığı, klorobenzen içerisinde çözünen PCBM konsantrasyonu optimum değer üzerine çıkarıldığında ise fotoakımda düşüş olduğu görülmüştür.

Ma ve ark. (2005) ITO/PEDOT/P3HT:PCBM/Al mimarisine sahip güneş pillerinde üretim sonrası tavlama işleminin güneş pili karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. 20 °C ile 180 °C arasında değişen sıcaklıklarda ve 0 dk. ile 60 dk. arasında değişen sürelerde tavlama yapmışlar ve dolum faktörü ile verimin en yüksek

olduğu sıcaklığı 150 °C, süreyi de 30 dk. bulmuşlardır. Bu işlem aynı zamanda termal kararlılığı artırmış, pilin seri direncini de düşürmüştür.

Kim ve ark. (2006) Aktif tabaka ve alüminyum elektrot arasını TiO_x “optik aralayıcı” katmanla kaplamışlar ve güç dönüşüm veriminde, TiO_x tabakasına sahip olmayan pillere nazaran yaklaşık % 50’lik bir artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Bunun sebebini de TiO_x ’den dolayı yığın heteroeklem katmanda absorpsiyonun artmasına ve daha fazla yük taşıyıcısının oluşumuna bağlamışlardır.

Pradhan ve ark. (2006) fotovoltaik pillerinde MWCNT’yi fonksiyonelleştirerek kullanmışlardır. P3HT içerisine nanotüplerin eklenmesinin film kalınlığını artırdığını ve aynı zamanda CNT boyunca yük taşımını sağladığını belirtmişlerdir. Polimer içerisindeki CNT’ler, polimer-CNT ara yüzeyinde eksiton ayırımı için geniş bir bölge oluşturduğunu ve nanotüp boyunca ITO elektroda boşluk taşımının sağlandığını gözlemlemişlerdir. Polimer içerisinde CNT olmadığında eksiton ayırımı yalnızca P3HT- C_{60} ara yüzeyinde oluştuğunu ve böylece polimerin düşük mobilitesinden dolayı boşluk taşımının sınırlı kaldığını belirtmişlerdir. CNT’li pillerin nanotüp içermeyen pillerle kıyaslandığında V_{OC} ve I_{SC} ’nin arttığını belirtmişlerdir.

Berson ve ark. (2007) SWCNT ve MWCNT’ den hazırladıkları solüsyonu P3HT:PCBM karışımının içesine homojen bir şekilde dağıtmışlar ve CNT ile P3HT arasındaki yük transferini incelemişlerdir. P3HT:PCBM içerisine % 0’dan % 0,3’e kadar MWCNT ekleyip, maksimum kısa devre akım yoğunluğunu % 0,1’lik karışımdan elde ettiklerini ve verimin % 2 olduğunu belirtmişlerdir. CNT’nin ilave edilmesiyle V_{OC} ile dolun faktörünün azalmasına rağmen akım yoğunluğundan dolayı verimin arttığını gözlemlemişlerdir. P3HT matriks bir yapıya CNT ilave edildiğinde polimerin yapısına zarar vermediğini ve P3HT’nin yapısını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Lee ve ark. (2007) polimer LED ve güneş pillerinde aktif tabaka ile alüminyum katot arasını, solüsyon olarak hazırlanmış titanyum oksit (TiO_x) tabakası ile kaplamışlar ve bu tabakanın, performansı ve havaya karşı kararlılığı iyileştirdiğini göstermişlerdir. TiO_x tabakasının, oksijen ve nemin elektronik olarak aktif olan tabakaya nüfuz etmesini önleyen perdeleyici ve istenmeyen maddeleri ortadan kaldıracı bir katman olarak vazife gördüğünü bu sayede, havaya maruz kalan pillerin ömrünü yaklaşık olarak iki kat artırdığını belirtmişlerdir.

Arranz-Andres ve ark. (2008) farklı karbon nanotüpler kullanarak organik güneş pillerindeki etkilerini ve P3HT içerisindeki karbon nanotüplerin farklı karışımlarını incelemişlerdir. CNT’lerin P3HT’ye ilave edilmesinin polimer yapıyı değiştirerek güneş

pilinin özelliklerine etki ettiğini ve verimini artırdığını belirtmişlerdir. En yüksek açık devre voltajını ve en iyi verimini % 5'lik MWCNT kullanarak elde etmişlerdir. MWCNT'nin karışım yoğunluğunun artmasına bağlı olarak açık devre voltajının düştüğünü gözlemlemişlerdir. P3HT havaya maruz kaldığında elektriksel taşıma özelliğini kaybetmeye başladığını gözlemlemişlerdir.

Kalita ve ark. (2009) farklı oranlarda P3HT ve PCBM karışımından oluşan güneş pilleri yapmışlar ve bu pillerin tabaka morfolojisini incelemişlerdir. 1:0.5,1:1 ve 1:2 oranlarında P3HT ve PCBM karışımı yapmışlar ve 1:1 oranındaki karışımın diğerleriyle kıyaslandığında pil performansının daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Burada PCBM oranının azalmasıyla elektronlar için süzülmenin (perkolasyon) yetersiz olduğunu ve PCBM oranının artmasıyla da moleküller arasını zayıf hale getirerek düşük pil performansına yol açtığını incelemişlerdir. Ayrıca 150 °C'de tavlama yaptıkları güneş pillerinin tavlama yapılmayan güneş pillerinden çok daha iyi performans elde ettiklerini ve tavlama yapılmış P3HT kompozit filmdeki PCBM nanokristallerinin oluşumu elektronlar için sağlayarak pil performansını artırdığını göstermişlerdir.

Liu ve ark. (2009) heteroeklemlili organik güneş pillerinde P3HT ve metanofullerene % 1, % 3 ve % 5 oranlarında SWCNT karıştırarak yaptıkları çalışmada % 1'lik SWCNT karıştırılmış örneklerin kısa devre akımında % 30 civarında bir artış gözlemlemişlerdir. %3'lük SWCNT'ye sahip örneklerin kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve dolayısıyla dolum faktöründe düşüş olmuştur. Bunun sebebinin de aktif katmandaki metalik SWCNT'nin çokluğundan ileri geldiğini belirtmişlerdir. % 5'lik SWCNT karıştırılmış örneklerde ise kısa devre olmuştur.

Wu ve ark. (2009) MWCNT'leri P3HT içerisine katkılandırarak güneş pilinin performansını iyileştirmiş ve yükün hızlı taşınımından dolayı verimin diğer pillere nazaran % 29 arttığını belirtmişlerdir. P3HT/PCBM içerisine % 0,01 oranında MWCNT katkılandırmışlar ve MWCNT'lerin % 0,01 oranından fazla katkılandırılması halinde pilin kısa devre yaptığını göstermişlerdir.

Stylianakis ve ark. (2010) SWCNT'yi kimyasal reaksiyonlardan geçirerek aminotiyofenle fonksiyonelleştirmişler ve SWCNT-CONHTh yapıyı elde etmişlerdir. SWCNT-CONHTh'ı kloroform içerisinde çözdükten sonra P3HT:PCBM'in içerisine % 0.5 oranında ekleyip karıştırmışlar ve % 1 oranından fazla olması halinde kısa devreye yol açtığını belirtmişlerdir. SWCNT'nin kimyasal değişimi pilin kısa devre akımını, dolum faktörünü artırdığını ve diğer referans pillere kıyaslandığında verimde % 26'lık bir artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda SWCNT'nin kimyasal değişimi

eksiton ayırım alanını genişlettiğini ve fotoaktif tabakadaki nanotüplerin dağılımından dolayı nanotüp boyunca elektron transferinin hızlandığını belirtmişlerdir.

Li ve ark. (2011) P3HT:PCBM organik güneş pilinin havaya ve UV ışınımına maruz kaldığındaki etkilerini birlikte inceledikleri gibi ayrı ayrıda incelemişler ve aktif tabaka ile metal elektrot arasındaki TiO_x tabakasının güneş pilindeki bozulmayı önlediğini gözlemlemişlerdir. Organik güneş pilleri havaya maruz kaldığında pil veriminin düştüğünü, azot atmosferi altında verimde herhangi bir değişiklik olmadığını ve aktif tabakanın yüzeyindeki TiO_x filminin bozulmaya karşı önemli bir koruma sağladığını belirtmişlerdir. Güneş pilleri azot atmosferi altında UV ışınımına maruz kaldığında pil performansının düştüğünü ve TiO_x filminin pili UV ışınlarından koruduğunu belirtmişlerdir.

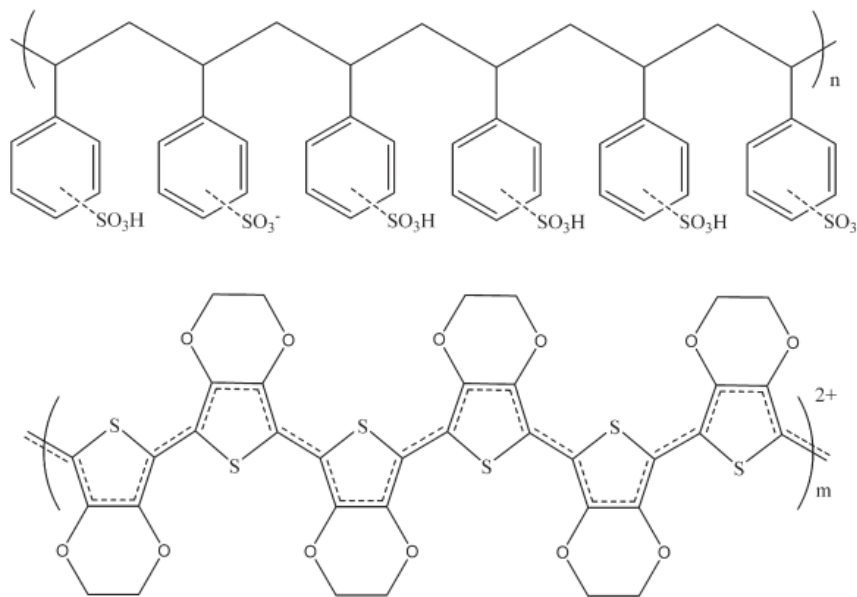
4. MATERYAL VE METOT

4.1. ITO Kaplı Cam

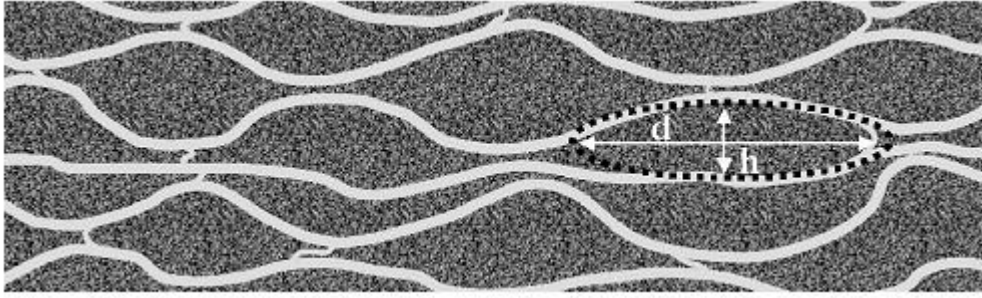
ITO In_2O_3 ve SnO_2 'nin belirli oranlarda karıştırılmasıyla (genellikle 1:9) elde edilen, sarımsı, katı bir çözüldür. ITO elektrik iletkenliği ve saydamlık özelliklerini bir arada bulundurması ve ince film olarak kolaylıkla kaplanabilmesi sebebiyle saydam iletken oksit olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. LCD ekranlar, plazma ekranlar, dokunmatik paneller, OLED'ler, güneş pilleri, gaz sensörleri, gibi elektronik uygulama alanları mevcuttur. Dezavantajları; indiyum tedarığının sınırlı ve pahalı olması, ITO katmanlarının esneklikten yoksun ve kırılğan olması, ITO'yu kaplamanın maliyetli olmasıdır. ITO'nun iş fonksiyonu yaklaşık 4,8 eV civarındadır (Nickel ve ark., 2008).

4.2. PEDOT:PSS:

PEDOT:PSS, sodyum polistiren sülfonat ve konjuge polimer olan poli (3,4 etilendioksitiyofen)'in karışımıyla elde edilir. Yüksek süneklığe sahiptir ve değişik uygulamalarda saydam, iletken polimer olarak kullanılır. PEDOT:PSS çözültisinden elde edilen ince filmler güneş pillerinde, elektrot olarak LED'lerde, antistatik kaplama



Şekil 4.1. PEDOT(alta) ve PSS'nin(üstte) kimyasal yapısı (Vacca ve ark., 2008)



Şekil 4.2. PEDOT:PSS'nin morfolojik modeli (Nardes ve ark., 2007)

yapımında, elektronik hafızalarda, çeşitli sensörlerde, aktif malzeme olarak elektrokromik aletlerde, alan etkili transistörlerde ve genel elektrik devrelerinde kullanılır (Nardes ve ark., 2008). Şekil 4.1.'de PEDOT:PSS'nin kimyasal yapısı, Şekil 4.2.'de ise morfolojik yapısı gösterilmiştir.

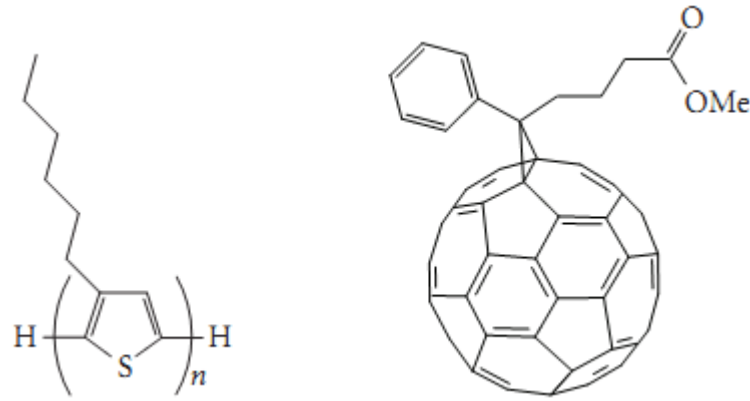
Nardes ve ark. (2007) PEDOT:PSS'nin STM ve X-AFM görüntülerini birleştirerek PEDOT:PSS için bir morfoloji modeli elde etmişlerdir. Şekil 3.2.'de gösterilen modelde koyu renkli kısımlar PEDOT açısından zengin bölgeleri açık renkli lamel şeklindeki kısımlar ise PSS'yi göstermektedir. d ile gösterilen uzunluk 20-25 nm, h ile gösterilen uzunluk ise 5-6 nm civarındadır.

Organik güneş pillerinde açık devre geriliminde artış sağlayan, ITO cam ve aktif tabaka arasında tampon katman olarak kullanılan PEDOT:PSS'nin (Girtan ve ark., 2009) birçok görevi vardır. Sadece boşluk taşıyıcısı ve eksiton bloke edici olarak çalışmaz aynı zamanda üzerine kaplandığı ITO cam yüzeyini pürüzsüzleştirir, aktif tabakayı oksijene karşı korur ve istenmeyen elektron tuzaklarının oluşmasına neden olan, katot materyalinin aktif katmana difüze olmasını engeller (Benanti ve Venkataraman, 2006).

PSS'nin higroskopik yapıda olması ortam havasındaki nemi absorbe ederek asidik yapıdaki PEDOT:PSS'nin zamanla ITO'yu dağlamasını kolaylaştırmaktadır (Jørgensen ve ark., 2008). Bu da güneş pili verimin zamanla düşmesine sebep olmaktadır. ITO cam, PEDOT:PSS yerine ZnO, TiO₂ gibi bir metal oksit tabakayla kaplanarak, normal güneş pillerine göre anot ve katotun yer değiştirdiği, tersine (inverted) güneş pilleri konseptiyle bu soruna çözüm getirilmiştir (Lin ve ark., 2011).

4.3. P3HT:PCBM:

P3HT, Poli (3-hekziltiyofen), tiyofenin polimerizasyonu ile oluşur. Organik



Şekil 4.3. P3HT(solda) ve PCBM'nin(sağda) kimyasal yapısı (Kietzke, 2007)

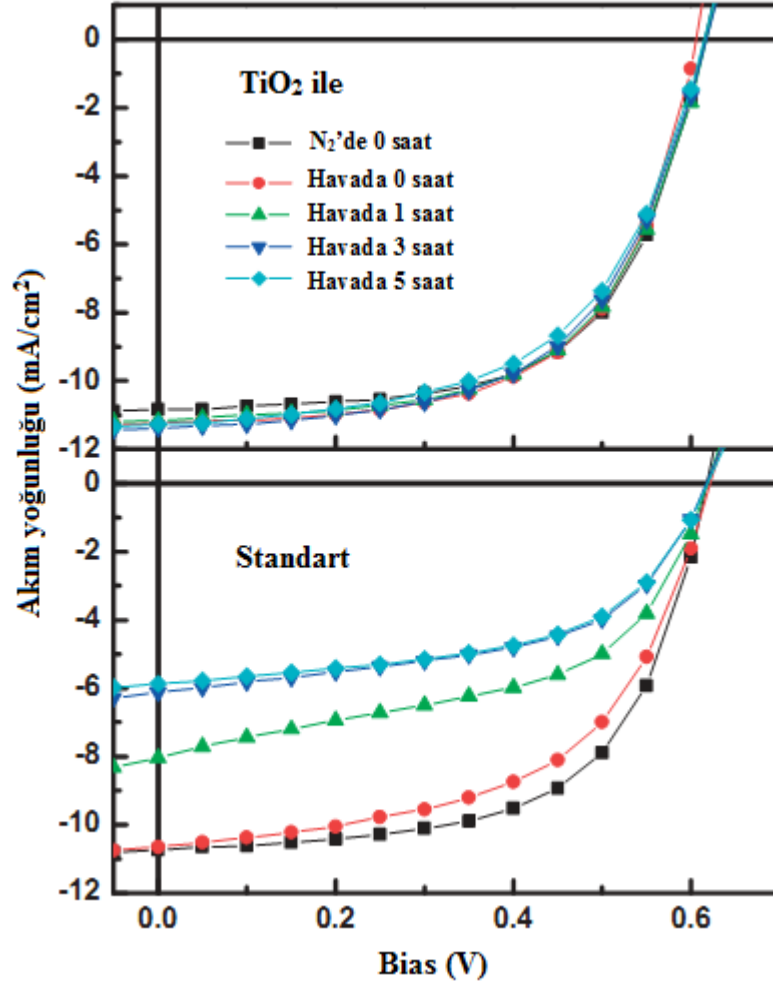
güneş pillerinde donör malzeme olarak kullanılır. PCBM, [6,6]-fenil-C₆₁ bütirik asit metil ester, bir fulleren türevidir. Organik güneş pillerinde elektron akseptör malzeme olarak kullanılır. P3HT ve PCBM'nin klorobenzen, diklorobenzen, kloroform gibi organik çözücülerde çözünebilir olması cam veya plastik yüzeyine ince film olarak kaplanmalarına olanak tanır. P3HT, PCBM güneş pillerinde ayrı katmanlar şeklinde üst üste kaplanabileceği gibi birbirleriyle belirli oranlarda karıştırılmak suretiyle de kaplanabilirler. Şekil 4.3.'te P3HT ve PCBM'nin kimyasal yapısı görülmektedir.

P3HT:PCBM tabakası, AM 1.5 koşullarında yani 280-4000 nm dalga boyu aralığındaki 1000 Wm⁻² ışımaya ve 4,31 x 10²¹ s⁻¹m⁻² foton akımı altında, fotonların en fazla % 27'sini ve ışımaya gücünün de % 44,3'ünü absorbe edebilir. Dış kuantum veriminin % 100 olduğu durum için olabilecek maksimum akım yoğunluğu 18,7 mAcm⁻²'dir. Gerçekte ise fotoaktif bir katmanın ışığı % 100 absorbe etmesi mümkün değildir. Çünkü aktif katman, kırılma indisleri farklı olan birçok farklı katman arasına gömülü vaziyettedir. Bundan dolayı ışık, aktif katmana ulaşmadan önce herhangi bir arayüzeyden yansiyabilir (Dennler ve ark., 2009).

P3HT:PCBM tabakasının havaya ve ışığa maruz kalması yaşlanmaya ve optik ile elektriksel özelliklerinde düşüşe yol açmaktadır (Reese ve ark., 2010).

4.4. Titanyum Dioksit:

Çözelti halindeki TiO₂ güneş pillerinde alüminyum kontak ile aktif tabaka arasına kaplanarak aktif tabakaya oksijen ve nem nüfuzunu engeller ve pilin stabilitesini artırır. Bu da pilin ömrünün uzamasını sağlar (Lee ve ark., 2007). Şekil 4.4.'te TiO₂ tabakasının pil stabilitesine etkisi görülmektedir.



Şekil 4.4 TiO_x 'li ve TiO_x 'siz polimer güneş pillerinin çeşitli periyotlarda, 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında ölçülmüş akım yoğunluğu-gerilim (J-V) karakteristiği (Lee ve ark., 2007)

ITO kısmından gelen ışık ile geri yansıyan ışığın girişim yapmasından dolayı alüminyum elektrot kısmında ışık şiddeti sıfırdır. Aktif katmanın büyük bir kısmı taşıyıcıların fotoüretiminin oldukça düşük olduğu ölü bölgede kalmaktadır. Üstelik bu etki, ITO/PEDOT:PSS katmanına yakın kısımlarda daha çok elektron-boşluk çiftinin oluşmasına neden olarak fotovoltaik güç dönüşüm veriminin düşmesine yol açmaktadır. *Optik girişim etkisi* etkisi bilhassa tabaka kalınlığının, absorpsiyon derinliği ve gelen ışığın dalga boyu ile kıyaslanabilecek büyüklükte olması durumunda önemlidir. Yarıiletken polimerlerden üretilen güneş pillerinde bu durum görülmektedir. Sözü edilen problemlerin üstesinden gelmek için aktif tabaka kalınlığı, daha fazla ışık absorbe etme amacıyla artırılabilir fakat bu durumda da kalınlaşan tabakanın artan direnci dolmuş faktörünün düşmesine yol açacaktır. Diğer bir çözüm ise alüminyum elektrot ile aktif katman arasına “optik aralayıcı” TiO_2 katman yerleştirilerek ışık şiddetinin pil içerisinde yeniden dağılımının sağlanmasıdır “Optik aralayıcı”da

bulunması gereken özellikler; iyi bir akseptör olması, iletkenlik bandının C_{60} 'ın LUMO'sundan daha düşük enerjiye sahip olması ve solar spektrumdaki dalga boylarına sahip ışığa karşı geçirgen olmasıdır (Kim ve ark., 2006).

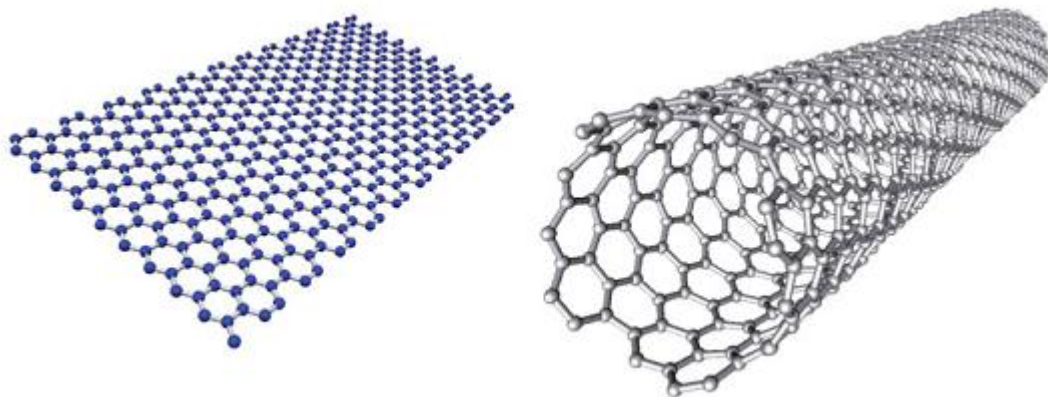
Aktif tabakasına CNT katkılanmış güneş pillerinde TiO_2 katman, metalik CNT'lerden dolayı oluşabilecek kısa devreleri önleyici bir bariyer olarak görev yapmaktadır (Kalita ve ark., 2010).

4.5. Karbon Nanotüp

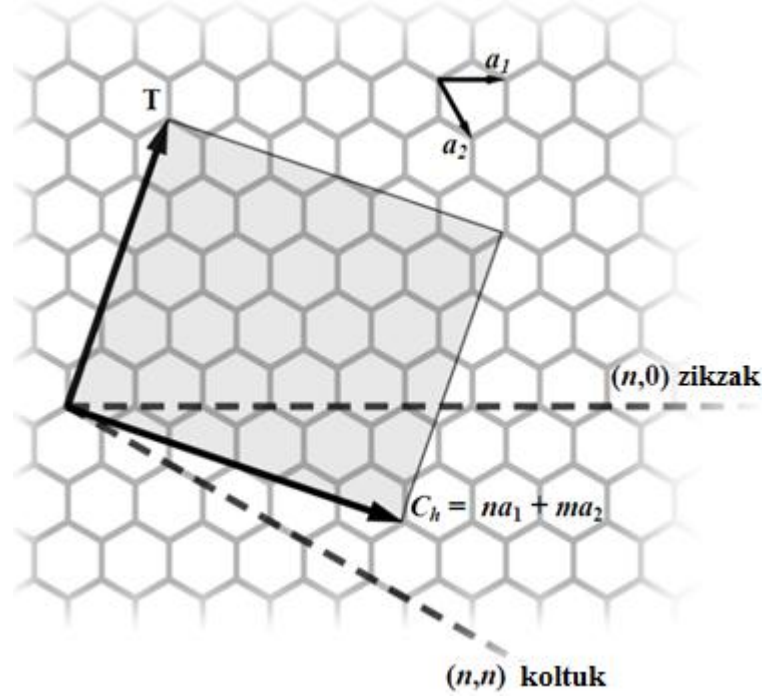
Karbon nanotüpler (CNT) silindirik geometride nano yapıya sahip karbon allotroplarıdır. İlk defa 1991 yılında Sumio Iijima tarafından ark deşarj yöntemiyle üretilerek karakterize edilmiştir (Iijima, 1991). CNT'lerde uzunluk/çap oranı 132 000 000:1'e kadar ulaşabilir. Bu oranı nano boyutta olmayan malzemelerde elde etmek mümkün değildir. CNT'ler elektronik, optik ve malzeme bilimleri açısından sıra dışı özelliklere sahiptir. Şekil 4.5.'te görülen bir atom kalınlığındaki karbon levha olan grafenin kendi üstüne yuvarlanarak katlanması CNT'yi oluşturur. Katlanmanın açısı ve çapı nanotüpün özelliklerini belirler. Buna göre CNT metal veya yarı iletken özellik gösterir. CNT'ler çok cidarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve tek cidarlı karbon nanotüpler (SWCNT) olarak iki gruba ayrılır (Wikipedia).

4.5.1. Tek cidarlı karbon nanotüp

Grafen levhanın SWCNT şeklinde sarmalanması Şekil 4.6.'da gösterilen, *kiral*



Şekil 4.5. Grafen levha(solda) ve tek cidarlı karbon nanotüp modeli (sağda) (Burghard ve ark., 2009)

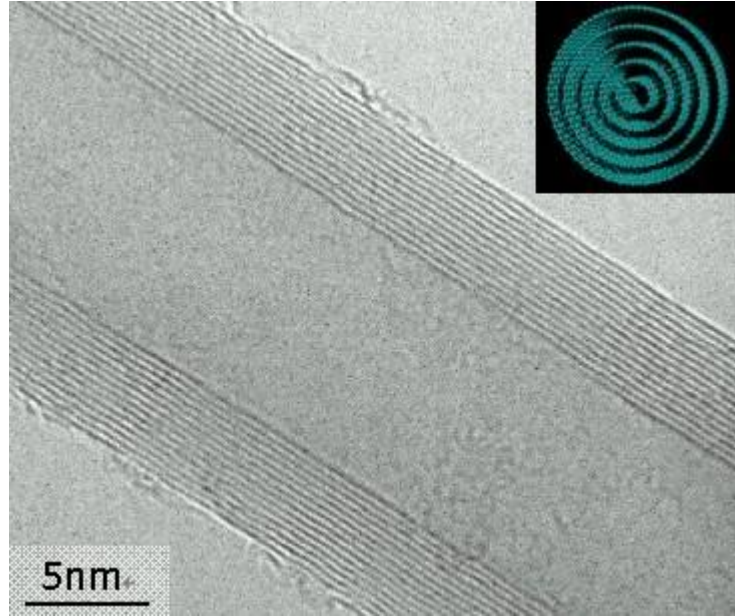


Şekil 4.6. Grafen levhada birim vektörler ve kiral vektörü

vektörü denilen bir çift indis (n,m) ile gösterilir. N ve m tam sayılardır ve bal peteği şeklinde kristal kafese sahip grafende iki ayrı doğrultudaki birim vektörleri temsil eder. $m=0$ ise CNT'ler zikzak nanotüpler olarak, $n=m$ ise koltuk nanotüpler olarak, diğer hallerde ise kiral nanotüpler olarak adlandırılır. (n,m) indisleri SWCNT'nin metalik veya yarı iletkenlik davranışını belirler. Zikzak SWCNT'ler iki farklı davranış gösterebilirler, $n/3$ değeri tamsayı ise nanotüpler metaldir aksi halde yarı iletkendir. Kiral SWCNT'lerde $(2n+m)/3$ değeri tamsayı ise nanotüpler metaldir aksi halde yarı iletkendir. Koltuk SWCNT'ler ise metaldir (Odom ve ark., 1998). SWCNT'ler yaklaşık 1-2 nm'lik çapa sahiptir (Ahlskog ve ark., 2001).

4.5.1. Çok cidarlı karbon nanotüp

MWCNT'ler sarmalanmış grafen levhaların Şekil 4.7.'deki TEM fotoğrafında görüldüğü gibi bir biri içerisine geçmesiyle meydana gelirler. İç içe geçmiş her bir nanotüp arasındaki mesafe yaklaşık 3,4 Å'dır. MWCNT'lerin SWCNT'lere göre avantajı kimyasal etkilere karşı dayanımlarının daha iyi olması ve kafes sisteminde oluşabilecek hasarlardan daha az etkilenmeleridir (Karabulut, 2009). MWCNT'ler metalik karakteristiğe sahiptirler. Akım taşınmasında sadece en dıştaki nanotüp etkilidir.



Şekil 4.7. MWCNT'nin TEM görüntüsü ve MWCNT modeli (üstte) (Endo Lab.)

MWCNT'lerin çapları 20-30 nm'yi bulabilir (Ahlskog ve ark., 2001). Metalik CNT'ler teorik olarak 4×10^9 A/cm² akım yoğunluğu taşıyabilirler. Bu değer bakır gibi iletken metallere göre 1000 kattan daha fazladır. İletken polimerlerde eksitonların difüzyon mesafesinin 10 nm'den az olduğunun ortaya çıkarılmasıyla polimer kompozitlerde yeterli bir elektron-akseptör perkolasyon ağına ihtiyaç olduğu doğrulanmış oldu. CNT'ler kullanılarak perkolasyon geçitlerinin oluşturulması mümkündür. Bu da yüksek taşıyıcı mobilitesi ve verimli yük transferi sağlar. Bu CNT'ler kolaylıkla elektronları alıp eksenleri boyunca transfer edebilirler (Radbeh ve ark., 2010). Öte yandan aktif tabaka içerisine homojen olarak dağıtılmamış CNT'ler kısa devrelere yol açabilir (Lee ve ark., 2011). Ayrıca P3HT içerisine MWCNT karıştırılması P3HT'nin stabilitesini önemli ölçüde artırmaktadır (Griffini ve ark., 2010).

4.6. Güneş Pillerinin Hazırlanması

4.6.1. ITO kaplı camların hazırlanması

Kintec (Hong Kong) firmasından alınan 10 ohm dirence ve 1,1 mm toplam kalınlığa ve yaklaşık 125 nm ITO kalınlığına sahip ITO kaplı camlar kullanılmadan önce bir multimetre ile direnci ölçülerek direncin katalog değeriyle uyduğu teyit edildi. Sonra camlar güneş pili için öngörülen boyutlarda (15mm X 15mm) kesildi. Daha sonra, pillerde meydana gelebilecek kısa devreyi önlemek amacıyla, camların Al

katot kaplanacak kısmının yaklaşık 3 mm'lik bölümü 3:1 oranındaki hidroklorik asit ve nitrik asit çözeltisi karışımı (kral suyu) ile dağlanarak o kısımdaki ITO tabakası kaldırıldı. Bu bölgede multimetre ile iletkenlik ölçümü yapılarak ITO tabakasının tamamen kaldırıldığından emin olduktan sonra camların deterjanlı suyla ön temizliği yapıldı. Bu işlemden sonra camlar sırasıyla hekzan, aseton ve izopropanolde ultrasonik karıştırıcı içerisinde 10 dk. bekletilerek temizlendi. Temizlikten sonra, camlar etüve alınıp 130 °C'de 30 dk. bekletilerek kurutuldu. Kurutulan camlar 15 dk. süreyle UV ozon plazmasında bekletilerek olası kalıntı organik kontaminantlar giderildi.

4.6.2. Cam üzerine kaplanacak çözeltilerin hazırlanması

4.6.2.1. PEDOT:PSS'nin hazırlanması

H.C. Starck (Almanya) firmasından alınan PEDOT:PSS çözeltisi saf olarak kullanılıp kaplandığında ITO cam üzerinde gözle görülecek büyüklükte porlar meydana geldi. Bu porlar filmde süreksizlik oluşturduğu için iletkenlik üzerine olumsuz etkisi olacağı öngörülerek PEDOT:PSS 1:1 oranında saf su eklenerek seyreltildi ve 45µm por gözenekli PTFE filtreden geçirilerek süzüldü. Daha sonra manyetik karıştırıcıda bir süre karıştırılarak kullanıma hazır hale getirildi.

4.6.2.2. P3HT:PCBM'nin hazırlanması

Alfa Aesar firmasından alınan katı toz haldeki P3HT ve PCBM'nin klorobenzen içerisinde 20 mg/ml'lik çözeltileri 1:1 oranında hazırlanarak manyetik karıştırıcıda bir gece boyunca bekletildi. Karışımların hazırlandığı şişelerin etrafı alüminyum folyo ile sarılarak ışığın çözelti üzerindeki olası olumsuz etkileri engellendi.

4.6.2.3. P3HT:PCBM:MWCNT'nin hazırlanması

Cheap Tubes Inc. (ABD) firmasından temin edilen % 95 saflıktaki MWCNT'ler P3HT:PCBM miktarının kütlece % 0,05'i oranında olacak şekilde tartıldı. Tartılan MWCNT'ler sonikatör ve propu homojenizatörle 10'ar dk. klorobenzen içinde karıştırılarak dağıtıldı. 4.6.2.2.'deki gibi hazırlanan P3HT:PCBM çözeltilerinin içine

katıldı ve karışım 10 dk. manyetik karıştırıcıda bekletilerek kullanıma hazır hale getirildi.

Kütlece % 0,5 ve % 0,1 MWCNT içeren P3HT:PCBM karışımları da hazırlanmıştır fakat bu karışımlar kullanılarak üretilen pillerin kısa devre olması veya çok düşük (%0,001'den az) verime sahip olmaları nedeniyle kütlece % 0,05'lik oran kullanılmıştır.

4.6.2.4. Titanyum dioksitin hazırlanması

19 mL'lik iki ayrı bütanolden birisi şişeye diğeri de behere konuldu. Daha sonra şişedeki bütanole 2,5 mL asetik asit konularak manyetik karıştırıcıya yerleştirildi. Beherdeki bütanole de 3 mL titanyum izopropoksit konuldu. Karışmakta olan şişeye beherdeki çözelti damla damla aktarıldı. Aktarma işlemi bittikten sonra oluşan çözelti 5 dk. kadar karıştırıldı. Böylece titanyum dioksit çözeltisi elde edilmiş oldu.

4.6.3. Hazırlanan çözeltilerin cam üzerine kaplanması

4.6.3.1. PEDOT:PSS'nin kaplanması

Bir miktar PEDOT:PSS mikro pipet vasıtasıyla alınarak spin kaplamadaki temizlenmiş cam üzerine damlatıldı ve 2500 d/dk. hızda 60 s.'de kaplama işlemi gerçekleştirildi Spin kaplamadan alınan PEDOT:PSS kaplı camlarda katot elektrotun yerleştirileceği kısım nemli bir pamuklu çubuk ile silindi. PEDOT:PSS'nin bu bölgeden tamamen silinip silinmediği gözle kontrol edildikten sonra camlar vakumlu etüve alınarak 110 °C'de ve -0,07 MPa vakumda yarım saat tavlandı.

4.6.3.2. P3HT:PCBM ve P3HT:PCBM:MWCNT'nin kaplanması

Mikro pipetle bir miktar P3HT:PCBM çözeltisinden alınarak tavllanmış PEDOT:PSS kaplı cam üzerine damlatıldı ve 800 d/dk. hızda, 40 s. süreyle spin kaplamada kaplama işlemi yapıldı. İşlem bittikten sonra camların katot elektrot yerleştirilecek kısmı klorobenzen emdirilmiş bir pamuklu çubuk ile silindi. P3HT:PCBM'nin bu bölgeden tamamen silinip silinmediği gözle kontrol edildikten

sonra camlar vakumlu etüve konularak 80 °C’de ve -0,07 MPa vakumda 15 dk. tavlandı. P3HT:PCBM:MWCNT için de aynı işlemler uygulandı.

4.6.3.3. Titanyum dioksitin kaplanması

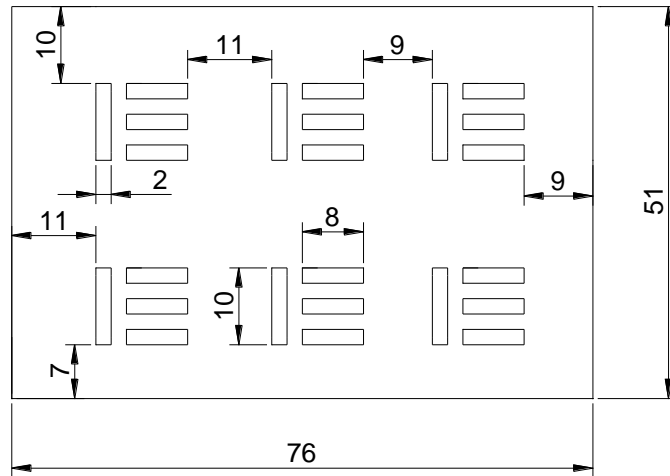
Camlarda TiO₂ kaplanması istenmeyen katot kısımlarının üzerine kimyasala dayanıklı bant yapıştirıldı. Tavlanmış P3HT:PCBM veya P3HT:PCBM:MWCNT üzerine TiO₂ çözeltisi mikro pipetle damlatıldı ve 3000 d/dk. hızda 40 s. süreyle kaplandı. Kaplama sonrasında bantlar kaldırıldı ve bant yapışkanından geçebilecek olası kirlere karşı bu bölge aseton emdirilmiş bir pamuklu çubukla silindi. Daha sonra camlar 150 °C’de 30 dk etüvde tavlandı.

4.6.4. Alüminyum elektrotların kaplanması

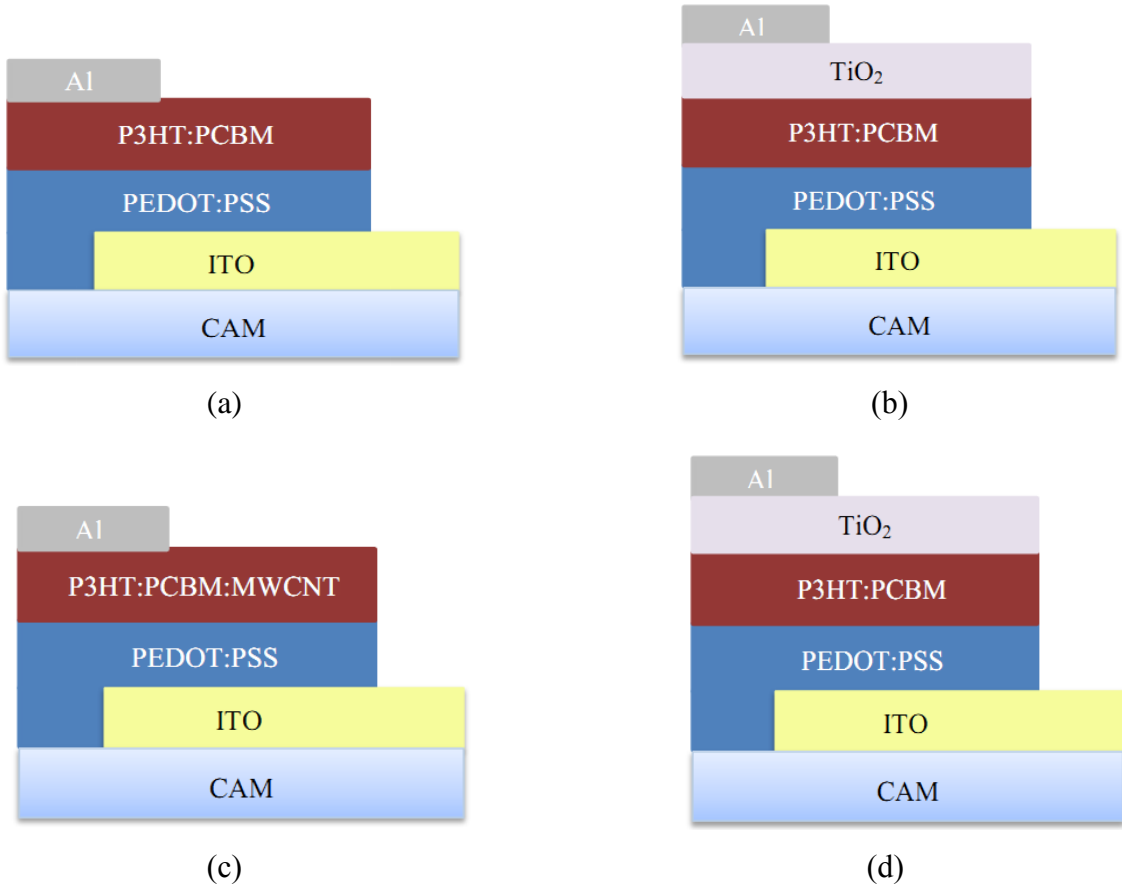
Tüm kaplama işlemleri biten camlar Nanovak (Türkiye) firmasının ürettiği PVD ünitesine alınarak $2,5 \times 10^{-5}$ Torr vakumda gene Nanovak firmasından temin edilen % 99,5 saflıktaki alüminyum buharlaştırma parçaları ile Şekil 4.8.’ de görülen 10mm x 2mm boyutlara sahip bir adet anot ve 8mm x 2mm boyutlara sahip üç adet katot için özel olarak hazırlanmış şablon vasıtasıyla yaklaşık 140 nm kalınlığında kaplandı.

Şekil 4.9.’da şematik olarak çizimi görülen güneş pilleri dört farklı konseptte üretilmiştir, bunlar :

- 1- ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al (a)
- 2- ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/TiO₂/Al (b)



Şekil 4.8. Alüminyum buharlaştırma için kullanılan şablonun teknik resmi (ölçüler mm cinsindedir)



Şekil 4.9. Hazırlanan güneş pili konseptleri

3- ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:MWCNT/Al (c)

4- ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:MWCNT/TiO₂/Al (d)

1 numaralı konsept (a) referans güneş pili olarak alınmıştır. Diğer güneş pillerinin özellikleri bu referansa göre değerlendirilmiştir.

Şekil 4.10.'da güneş pili yapımındaki ana basamaklar resimlerle gösterilmiştir.

Bu basamaklar;

- a) Camların katot kısmını oluşturacak bölgenin kral suyuyla dağlanması,
- b) Camların istenilen ölçülerde kesilmesi,
- c) Camların deterjanlı suyla yıkanması,
- d) Camların sonikatörde sırasıyla hekzan,aseton ve izopropanoldan geçirilmesi,
- e) Camların UV ozonda bekletilmesi,
- f) Spin kaplamada gerekli katmanların kaplanması,
- g) Katodu oluşturacak bölgeden kaplamanın silinmesi,
- h) Etüvde tavlama işleminin yapılması,
- i) PVD'de alüminyum kontakların kaplanması,
- j) İmal edilen güneş pilleri.

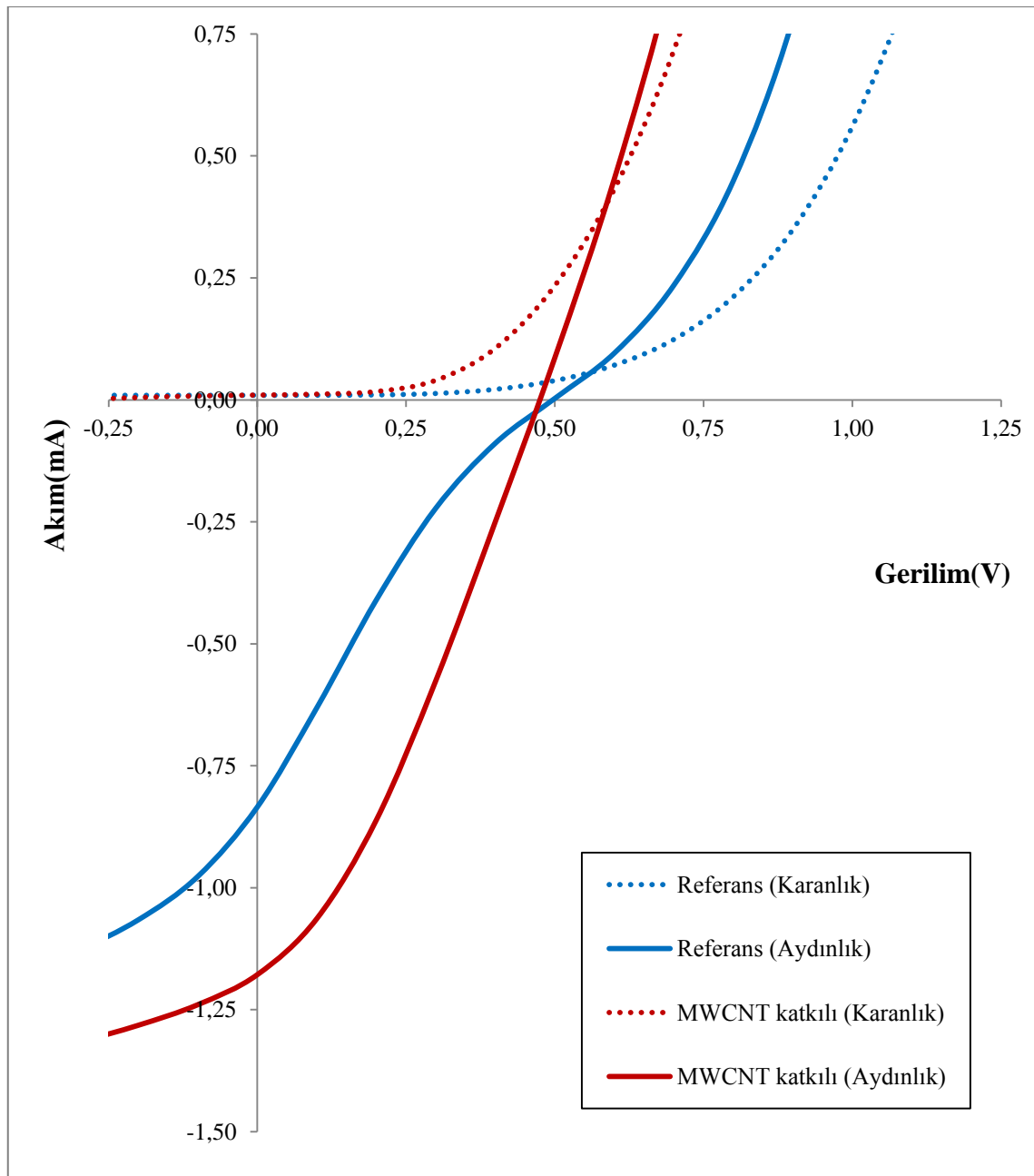


Şekil 4.10. Güneş pili yapım aşamaları

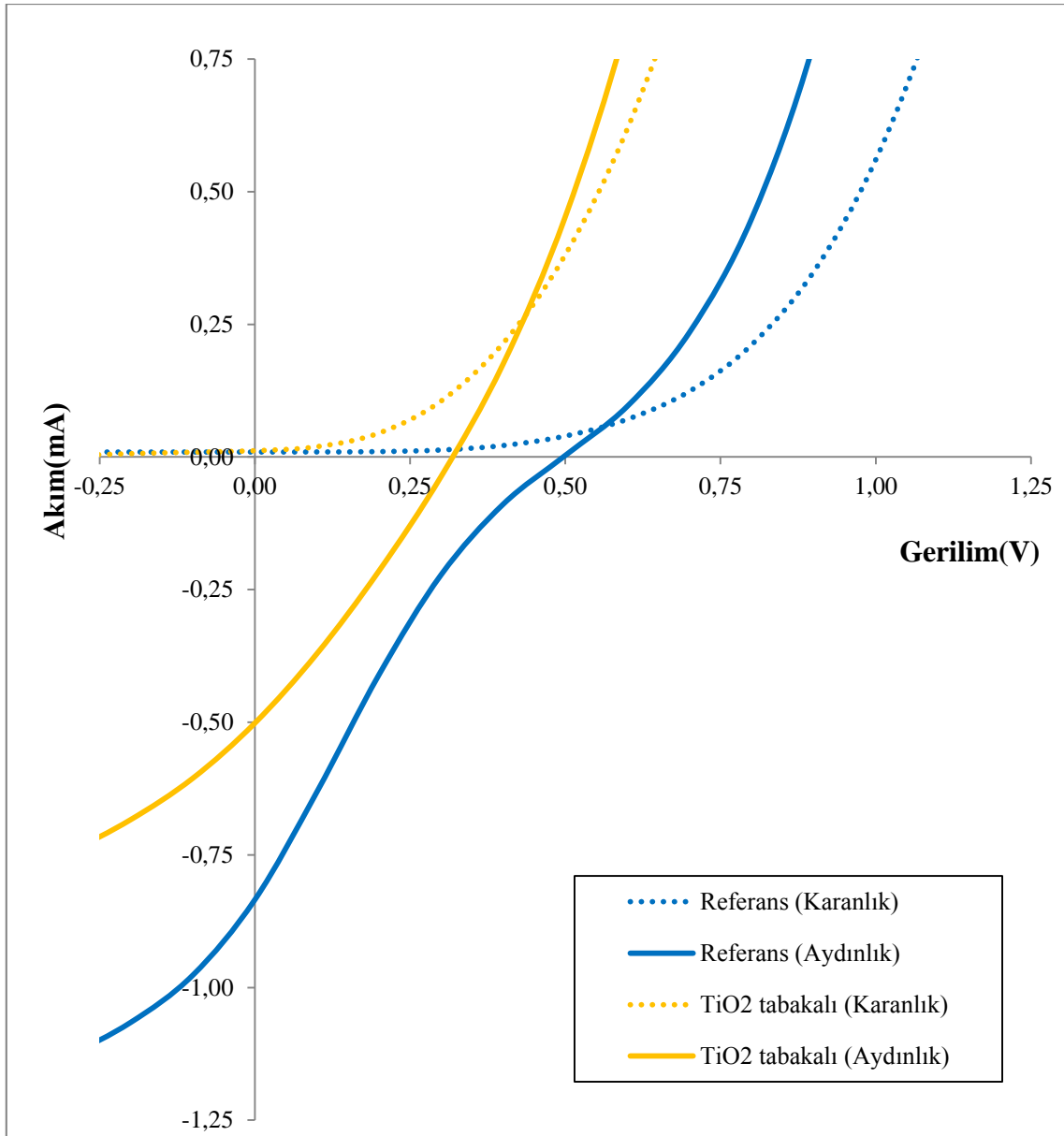
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. I-V Ölçümleri

I-V ölçümleri Keithley 2400 akım ölçer kullanılarak yapılmıştır. Karanlık ölçümleri ışık girmeyen karanlık bir odada, aydınlık ölçümleri de 500 Watt'lık halojen ışık altında alınmıştır. Halojen lambanın spektrumu, P3HT:PCBM'nin absorpsiyonuyla AM 1.5 koşullarındaki solar simülatörünkine göre daha iyi uyduğu için halojenle



Şekil 5.1. Referans ve MWCNT katkılı güneş pillerinin I-V grafikleri



Şekil 5.2. Referans ve TiO₂ tabakalı güneş pillerinin I-V grafikleri

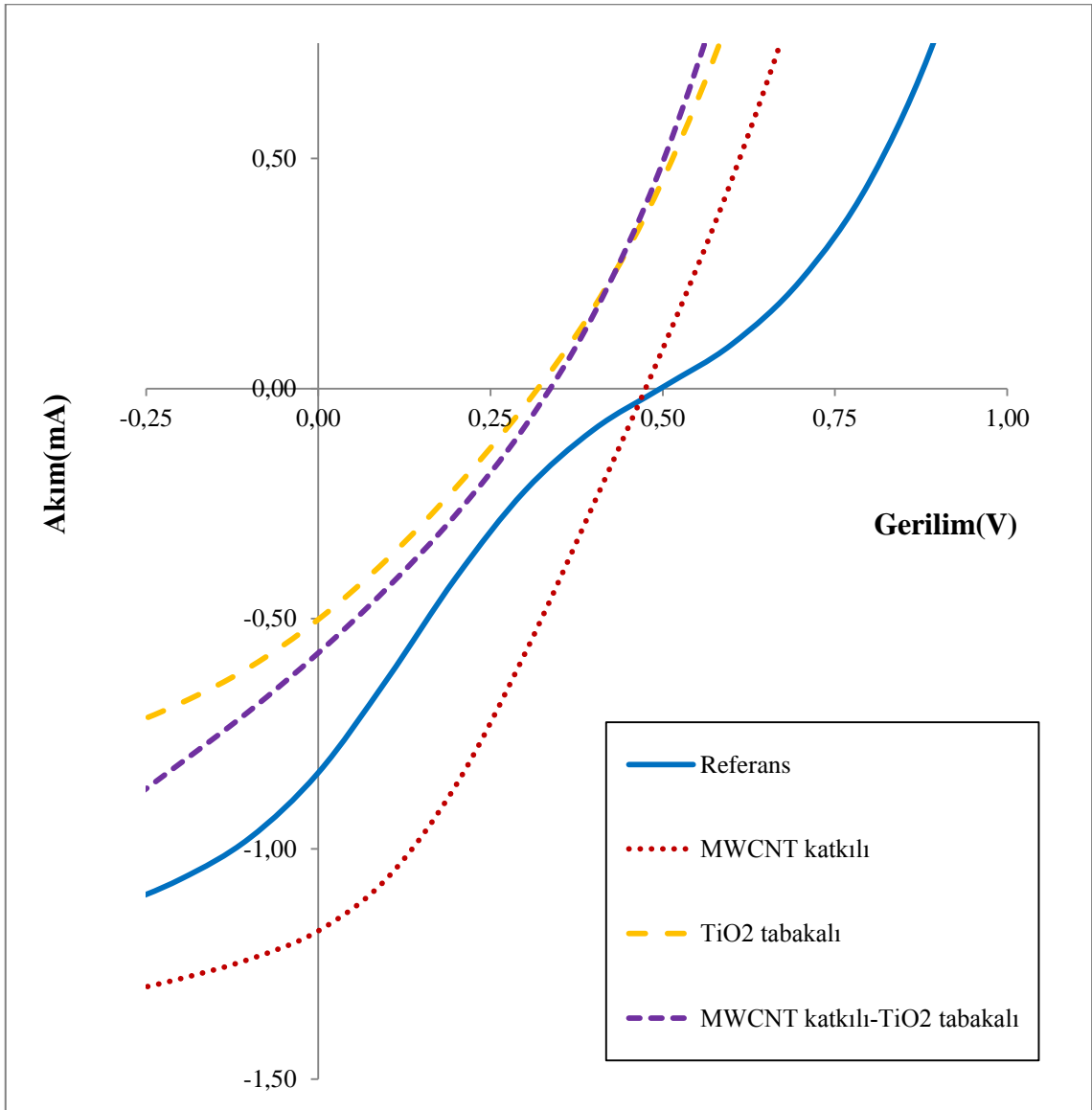
yapılan ölçüm solar simülatörde yapılan ölçüme göre verimde yaklaşık 0,4 kat daha yüksek değer vermektedir (Pasquer ve ark., 2006).

Ölçüm sonuçlarının işlenmesinde LabVIEW programıyla hazırlanan I-V ölçüm modülü kullanılmıştır. % 16'lık standart verime sahip bir silikon güneş piliyle, halojen lambanın pil yüzeyine ne kadar güçte ışık düşürdüğü hesaplanmıştır. Üretilen güneş pilleri bu kalibrasyona göre ölçülmüştür.

Güneş pillerinin I-V ölçümlerine ait grafikler Şekil 5.1., Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.'te verilmiştir. Bu grafikler ve Çizelge 4.1. incelendiğinde güneş pilinin aktif tabakasına MWCNT katkılılandırılmasının açık devre gerilimini değiştirmedeği; dolmuş

faktörünü 0,196'dan 0,263'e çıkardığı yani yaklaşık % 34'lük bir artış sağladığı; akım yoğunluğunu 0,834 mA/cm²'den 1,178 mA/cm²'ye çıkardığı yani yaklaşık % 41'lik bir artış sağladığı; verimi ise % 0,328'den % 0,690'a çıkardığı yani yaklaşık % 110'luk bir artış sağladığı görülmektedir.

Aktif katmanın üzerine TiO₂ tabakası eklenen piller incelendiğinde dolum faktörünün standart pile göre yaklaşık % 45 arttığı, diğer parametrelerin ise düştüğü, aktif katmanına MWCNT katkılandırılmış pillerin üzerine TiO₂ tabakası eklendiğinde dolum faktörünün standart pile göre yaklaşık % 62 arttığı, diğer parametrelerin ise düştüğü görülmektedir.

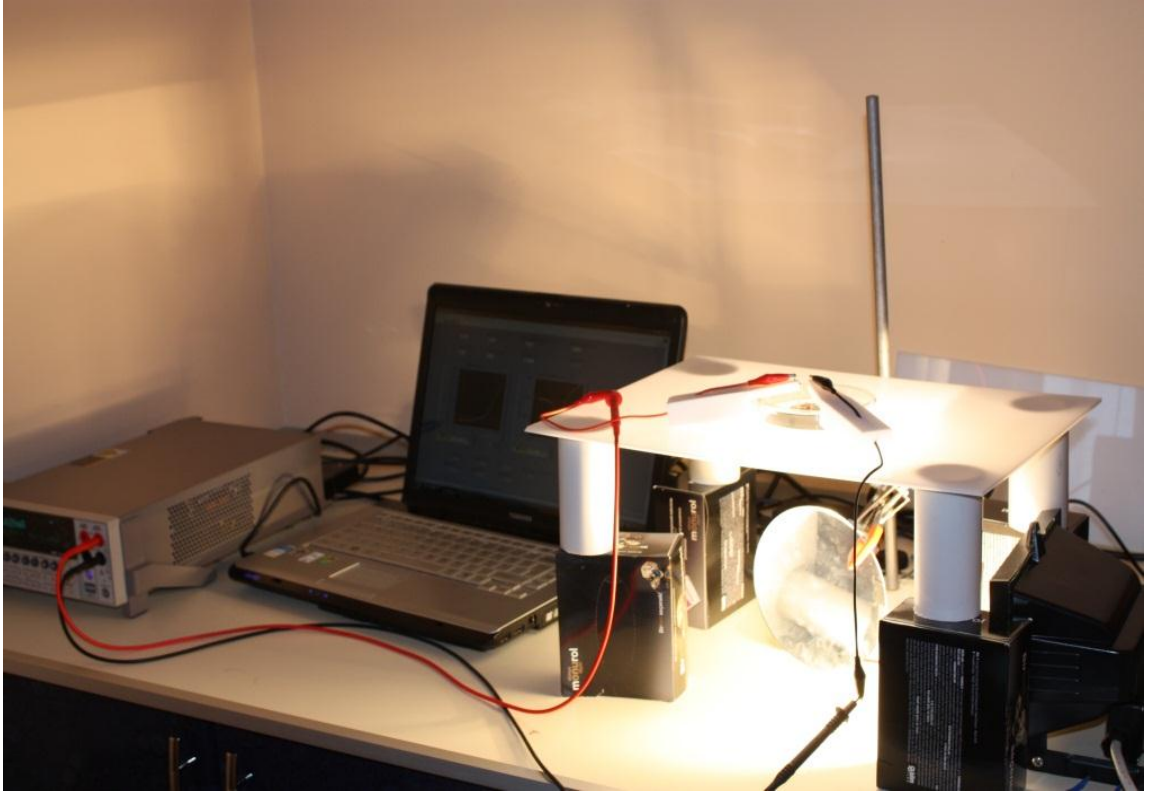


Şekil 5.3. Referans, MWCNT katkı, TiO₂ tabakalı ve hem MWCNT katkı hem TiO₂ tabakalı güneş pillerinin ışık altındaki I-V grafikleri

Çizelge 5.1. Üretilen güneş pillerinin elektriksel özellikleri

Konsept	V_{OC} (mV)	I_{SC} (mA/cm ²)	FF	Verim(%)
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	500	0,834	0,196	0,328
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/ TiO ₂ /Al	300	0,501	0,285	0,171
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: MWCNT/Al	500	1,178	0,293	0,690
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: MWCNT/TiO ₂ /Al	300	0,574	0,317	0,218

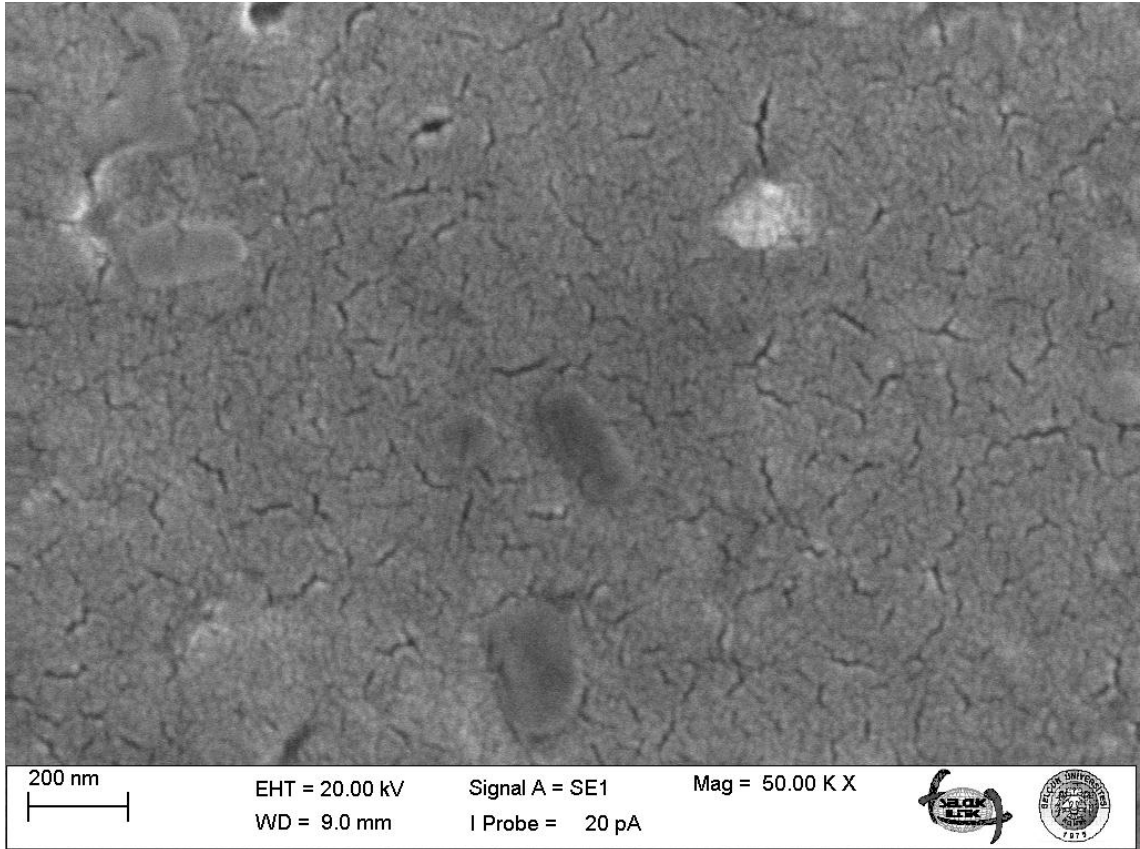
Şekil 5.4.'te ışık ölçümleri için geliştirilen sistem görülmektedir. Halojen lambanın oluşturduğu yüksek sıcaklıkların organik pillere zarar vermesini önlemek için halojen lambanın ışığı direkt olarak pil yüzeyine düşürülmek yerine bir ayna vasıtasıyla düşürülmüştür. Akım ölçerin kutup kablolarına, pil yüzeyindeki alüminyum elektrotların deforme olmasını engellemek için özel olarak geliştirilen küresel başlıklı hassas elektrotlar entegre edilmiştir. Hazırlanan güneş pillerindeki üç ayrı elektrottan alınan ölçümler kıyaslanarak en yüksek parametreleri sağlayan elektrotun değerleri dikkate alınmıştır.

**Şekil 5.4.** Ölçümlerin yapıldığı ışık düzeneği

5.2. SEM Görüntüleri

SEM görüntüleri Zeiss EVO LS10 elektron mikroskopuyla alınmıştır. Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'daki tavllanmış ve tavlansız P3HT:PCBM tabakalarının SEM görüntüleri incelendiğinde her ikisinde de yaklaşık 100 nm boyunda çatlaklar oluştuğu gözlenmektedir. Buradan çatlak oluşumuna tavlamanın neden olmadığı anlaşılmaktadır. Kaplama işlemi sonrasında, çözücü buharlaştıktan sonra meydana gelmiş olduğu düşünülmektedir. Bu oluşumlar üniform film yapısının bozulmasına neden olmuştur. Bu da film yüzeyinde elektron transferini zorlaştırdığından yüzey direncinin artmasına neden olmuş olabilir. Ayrıca tavlansız film yüzeyinde yaklaşık 200 nm'lik boya sahip yapılar görülmektedir. Bu yapıların çözücü içerisinde tam olarak çözünmemiş P3HT:PCBM topakları olduğu düşünülmektedir.

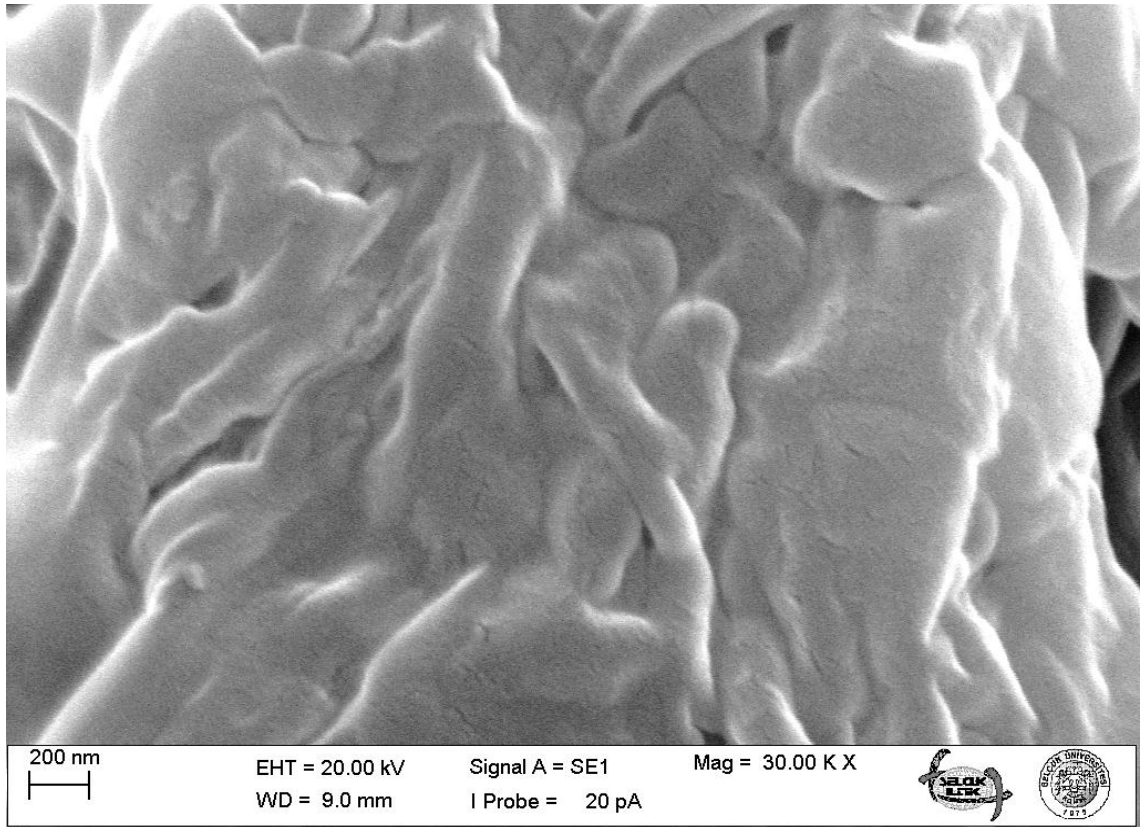
Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'deki P3HT:PCBM: MWCNT tabakaları incelendiğinde ise MWCNT'lerin aglomerleştiği ve etrafını P3HT:PCBM'nin kapladığı görülmektedir. MWCNT'lerin homojen dağılmak yerine bazı bölgelerde aglomer halinde toplanması filmin yüzey direncinde artışa sebep olabilir. Tavlama sonrasında MWCNT'lerin



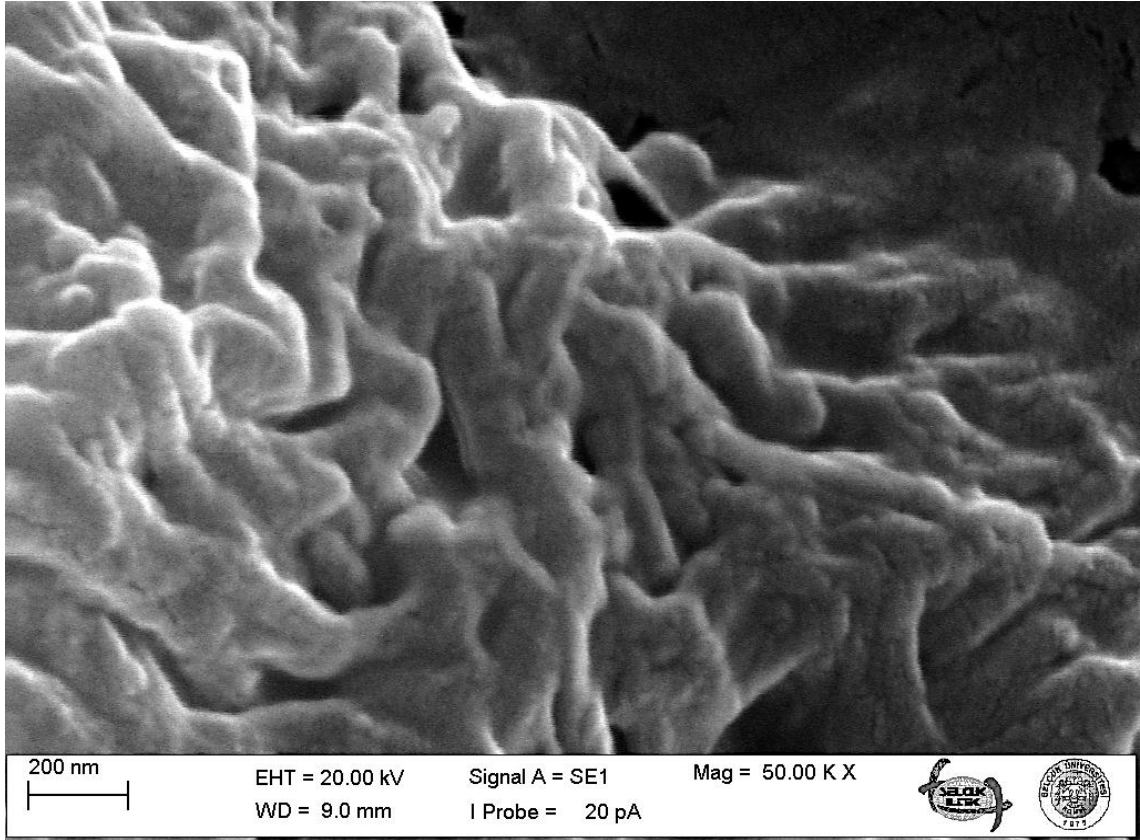
Şekil 5.5. Tavlansız P3HT:PCBM tabakasının SEM fotoğrafı



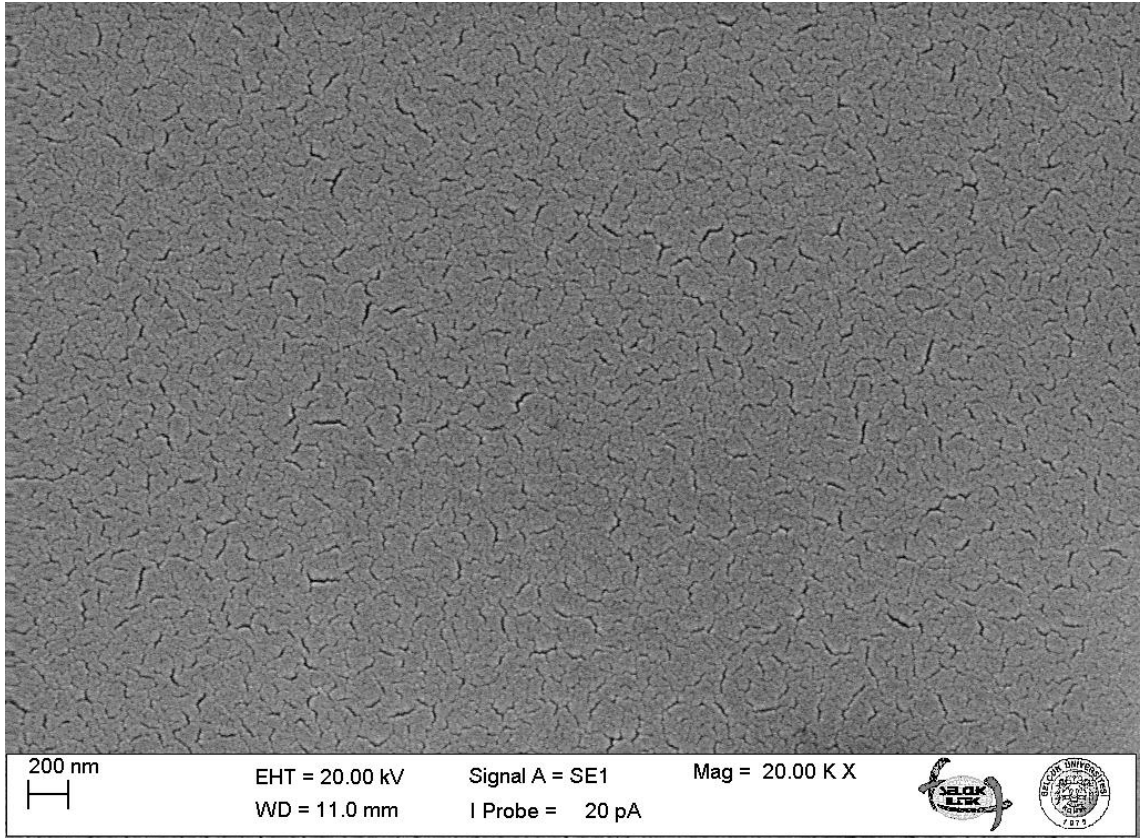
Şekil 5.6. Tavlanmış P3HT:PCBM tabakasının SEM fotoğrafı



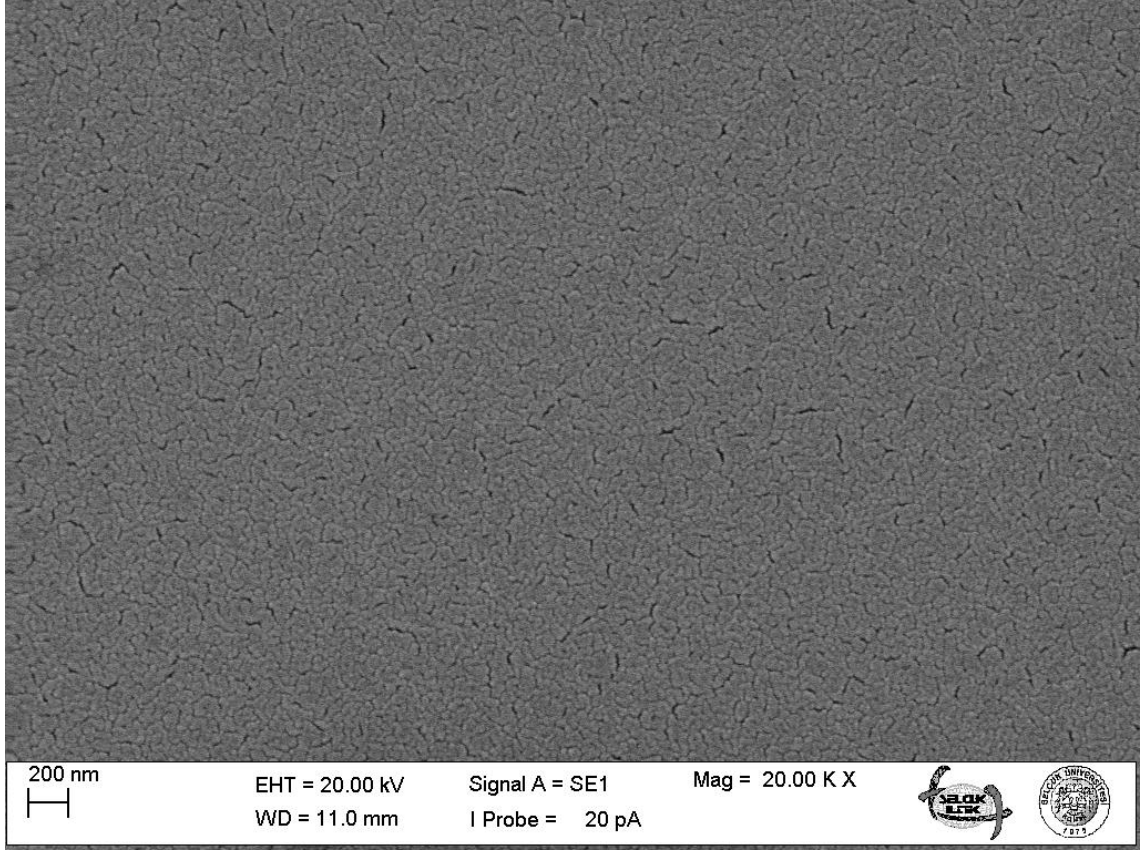
Şekil 5.7. Tavlanmamış P3HT:PCBM:MWCNT tabakasının SEM fotoğrafı



Şekil 5.8. Tavllanmış P3HT:PCBM:MWCNT tabakasının SEM fotoğrafı



Şekil 5.9. Tavlınmamış TiO₂ tabakasının SEM fotoğrafı



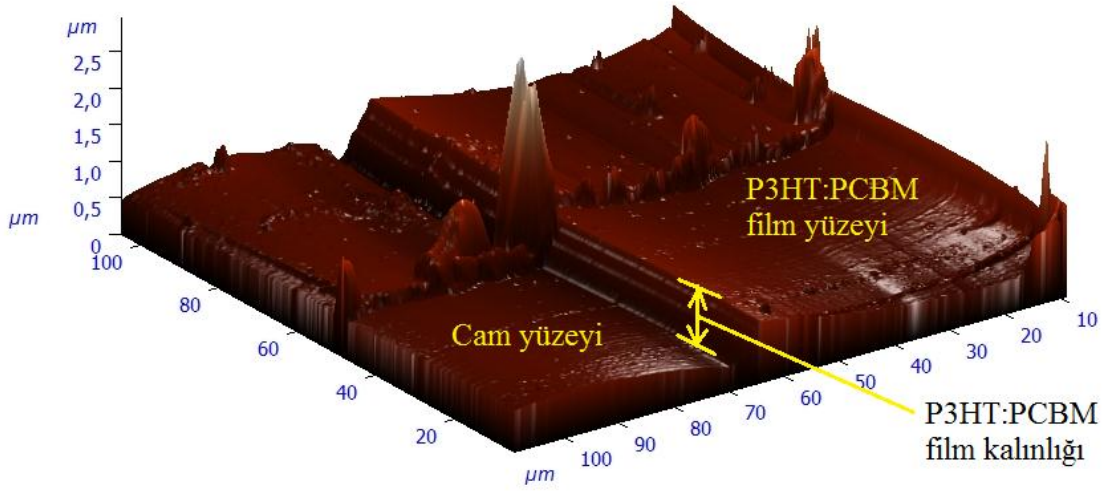
Şekil 5.10. Tavllanmış TiO₂ tabakasının SEM fotoğrafı

etrafını saran P3HT:PCBM'nin daha homojen hale geldiği görülmektedir.

Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'daki TiO₂ kaplı bölgeler incelendiğinde yüzeyde gene çatlakların oluştuğu fakat tavlama işlemi sonrasında belirgin çatlakların azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu çatlakların varlığı TiO₂ tabakasının izole edici özelliğini zayıflatmaktadır. Buralardan oksijen ve nem aktif tabakaya difüze olabilir bu da pilin ömrünün azalmasına neden olur.

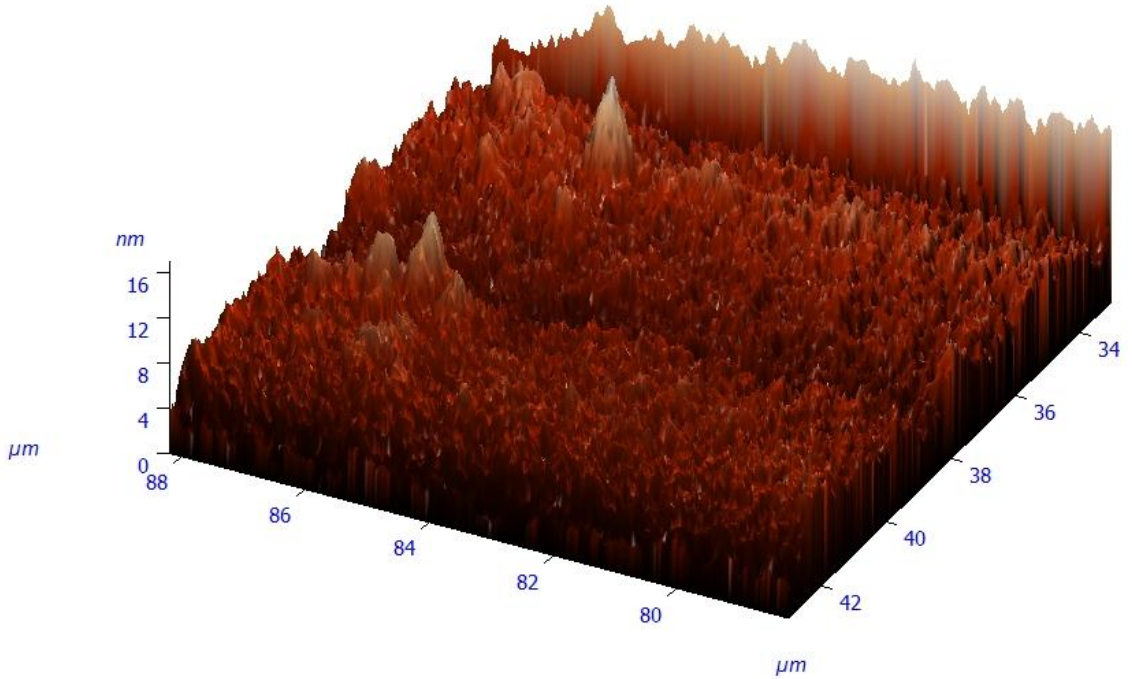
5.2. AFM Görüntüleri

AFM görüntüleri NT-MTD Ntegra AFM cihazıyla yarı kontakt modda alınmıştır. Alınan görüntülerin işlenmesinde Nova paket programı kullanılmıştır. AFM ile yüzey topoğrafyasıyla beraber film kalınlıkları da tespit edilmiştir. P3HT:PCBM'nin film kalınlığını ölçmek için P3HT:PCBM çözeltisi bir mikroskop camı üzerine Materyal ve Metot bölümünde belirtilen yöntemle kaplanmıştır. Daha sonra, kaplanan yüzey üzerindeki belirli bir kısım çok ince bir metalik uçla çizilmiş ve P3HT:PCBM tabakası

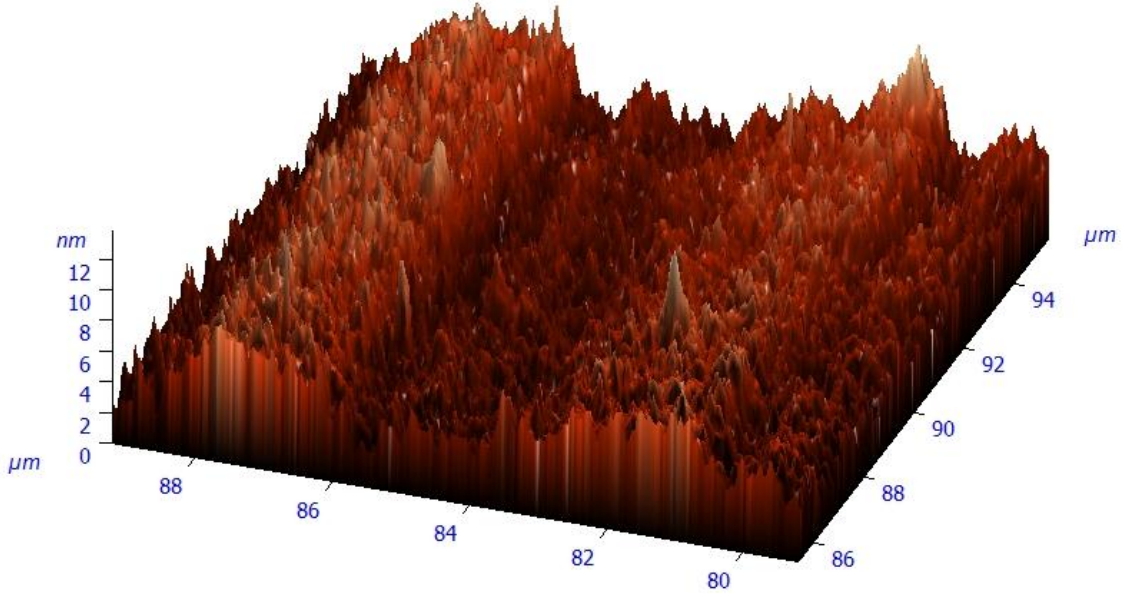


Şekil 5.11. P3HT:PCBM tabakasının kalınlığının belirlenmesi

kaldırılmıştır. AFM’de mevcut olan optik mikroskop vasıtasıyla AFM’nin tarayıcı ucu, çizilen kısımla hemen kenarındaki çizilmemiş kısmın sınırına getirilmiş ve tarama yapılmıştır. Şekil 5.11.’de taranan yüzeylerin AFM görüntüsü görülmektedir. Tarama sonucunda çizilen kısımla çizilmemiş kısım arası ölçülmüş ve ortalama film kalınlığı belirlenmiştir. PEDOT:PSS ve TiO_2 tabakalarının kalınlıkları da benzer şekilde ölçülmüştür. Şekil 5.12.’de tavlansız P3HT:PCBM tabakasının AFM görüntüsü görülmektedir. Ölçüm sonucunda P3HT:PCBM tabakasının kalınlığı 80 nm civarında

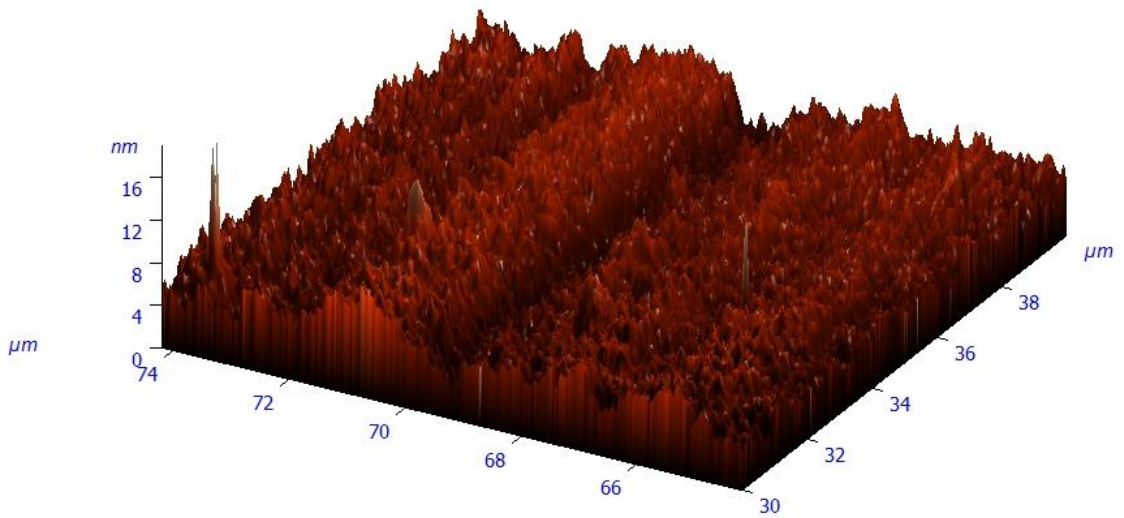


Şekil 5.12. Tavlansız P3HT:PCBM tabakasının AFM görüntüsü

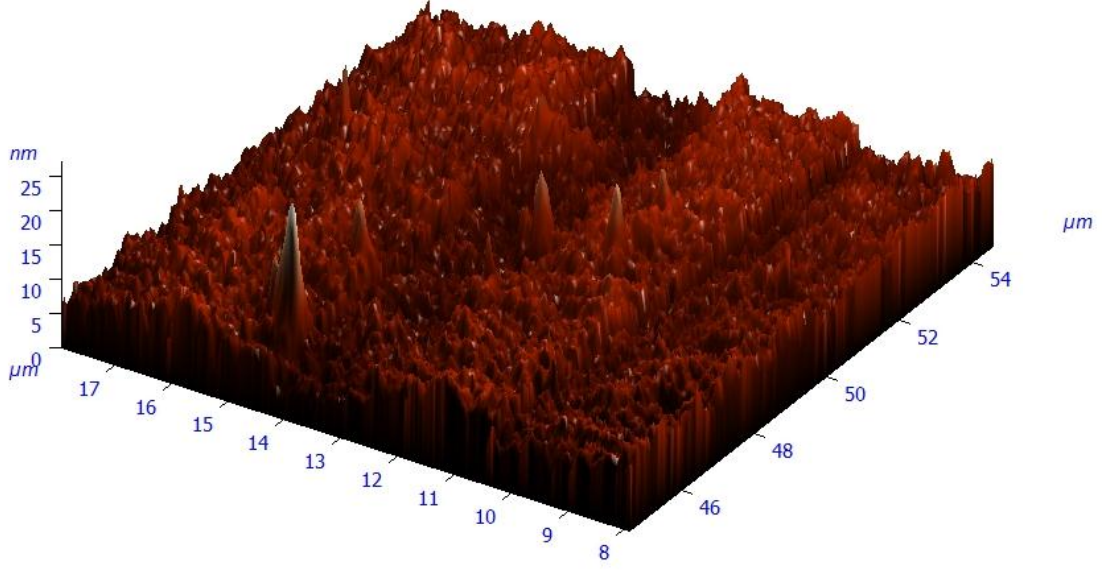


Şekil 5.13. Tavlanmış P3HT:PCBM tabakasının AFM görüntüsü

bulunmuştur. Şekil 5.13.'te ise tavlanmış P3HT:PCBM yapısının AFM'si görülmektedir. SEM fotoğraflarında görülen çatlaklar AFM görüntülerinde çukurluk olarak görülmektedir. Çukurlukların derinlikler 5 nm civarındadır. P3HT:PCBM tabakasının tavlanmasıyla yüzey pürüzlülüğünde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Bu durumun optik özellikleri iyileştirdiğini tavlamayla absorbansta artış olması göstermektedir. Şekil 5.14.'te tavlanmamış P3HT:PCBM:MWCNT tabakasının AFM görüntüsü görülmektedir. Tabaka kalınlığı P3HT:PCBM tabakasınınki ile aynı çıkmıştır. Bu da MWCNT'lerin, tabaka kalınlığı üzerine etki etmeyecek bir miktarda olduğunu göstermektedir. Şekil 5.15.'te ise tavlanmış P3HT:PCBM:MWCNT



Şekil 5.14. Tavlanmamış P3HT:PCBM:MWCNT tabakasının AFM görüntüsü



Şekil 5.15. Tavlanmış P3HT:PCBM:MWCNT tabakasının AFM görüntüsü

tabakasının AFM görüntüsü görülmektedir. Tavlama etkisiyle, yüzeydeki tepelerin keskin uçlarının biraz yuvarlaklaştığı görülmektedir.

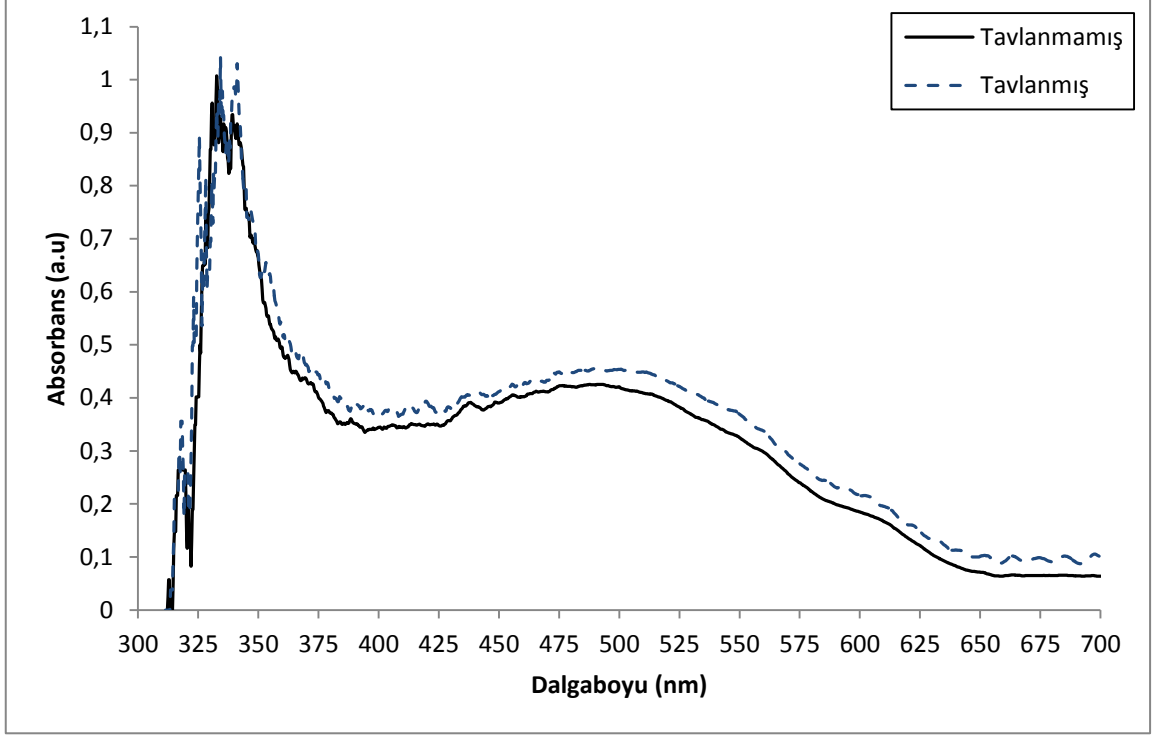
Ölçümler neticesinde PEDOT:PSS katmanının kalınlığı 60 nm, TiO₂ tabakasının kalınlığı da 80 nm civarında bulunmuştur.

5.4. Absorbans Ölçümü

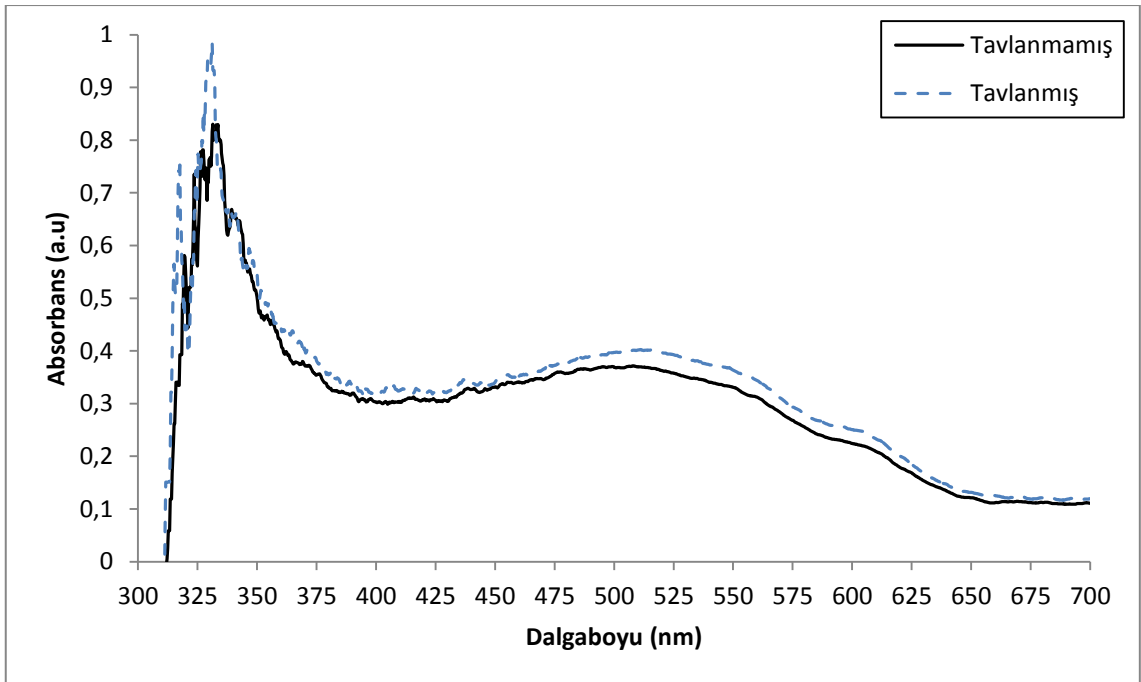
Absorbans ölçümleri UV-vis. spektrometresi ile alınmıştır. Şekil 5.16.'daki absorbans grafiği incelendiğinde PEDOT:PSS/P3HT:PCBM katmanının tavlama ile 350 ile 700 nm dalgaboyu aralığında absorpsiyonda çok az artış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni tavlama ile P3HT:PCBM'nin kristalize olması ve düzenli bir oryantasyon göstermesidir (Lee ve ark., 2010). Absorpsiyonun P3HT:PCBM'nin literatürde mevcut absorbansına göre daha düşük çıkması ve 520 nm ile 580 nm civarındaki omuzların kaybolmuş olması P3HT:PCBM katmanının hazırlanması ile absorbans ölçümlerinin alınması arasında geçen süreden kaynaklanmaktadır. Bu süre zarfında P3HT:PCBM tabakasında ışıktan (Reese ve ark., 2010) ve oksijene maruziyetten dolayı bozunma meydana gelmektedir. Aynı durumlar Şekil 5.17.'de absorbans grafiği gösterilen PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:MWCNT'nin tavlama için de geçerlidir

Aktif tabakaya MWCNT eklenmesi Şekil 5.18.'de görüldüğü gibi absorpsiyonu genel itibariyle düşürmüştür. Aktif tabakaya MWCNT eklenmesiyle absorpsiyonun

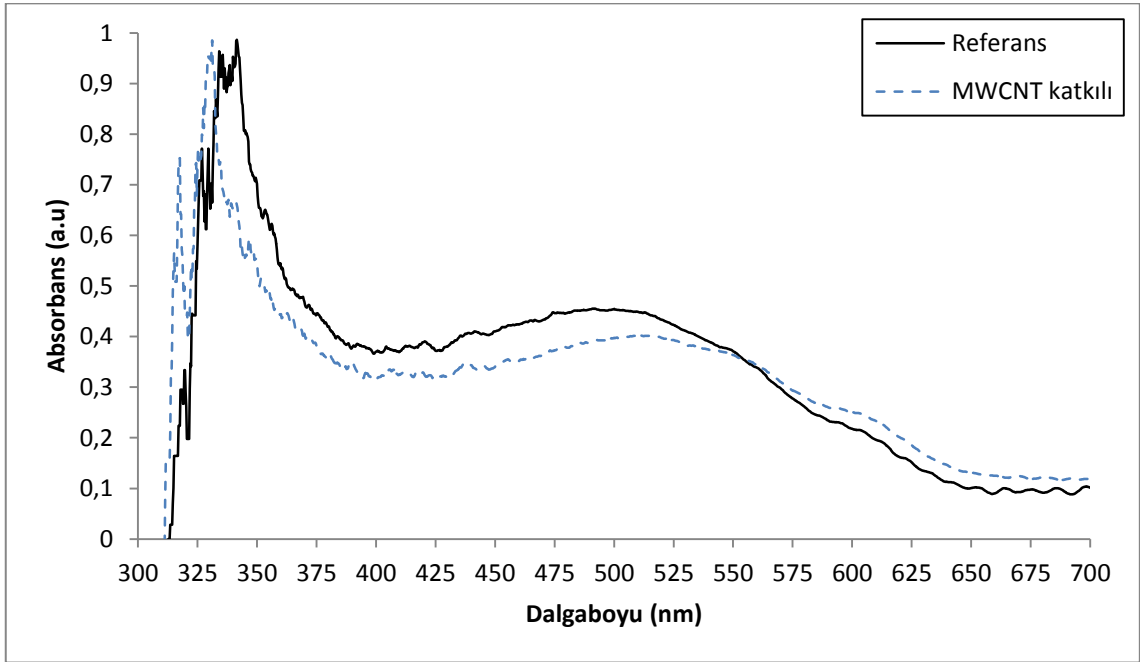
düşmesi MWCNT'nin verim artışını optik özellikleri geliştirerek değil de elektriksel özellikleri iyileştirerek sağladığını göstermektedir.



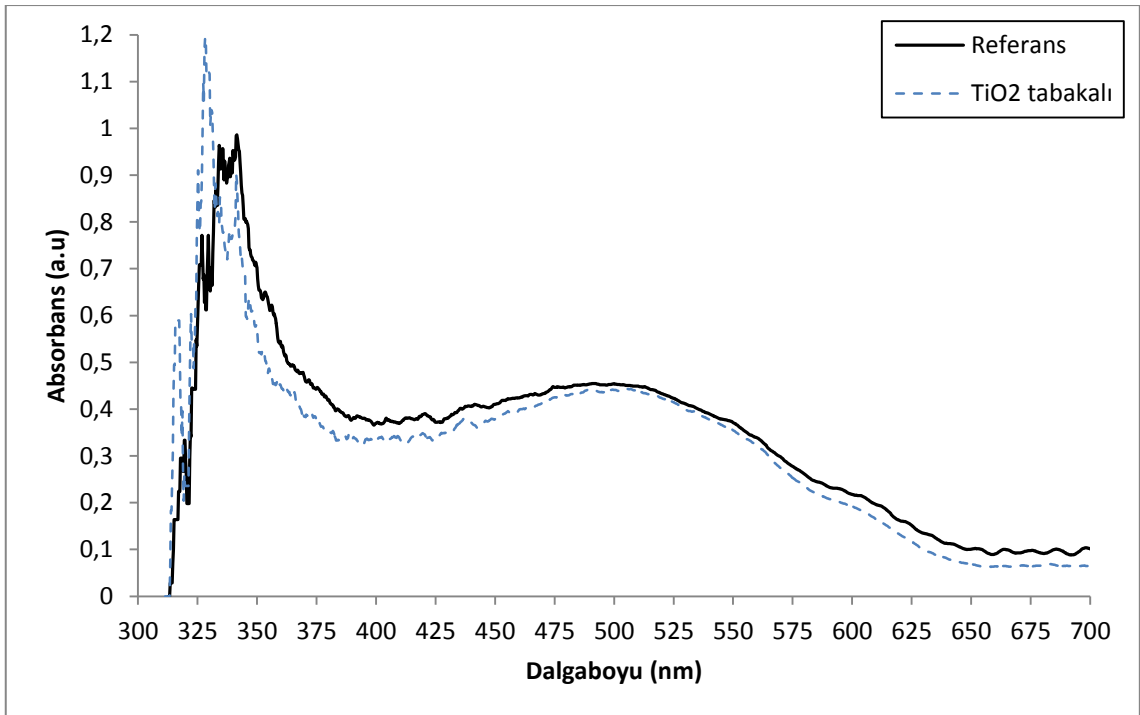
Şekil 5.16. Referans güneş pilinde tavlamanın absorbanza etkisi



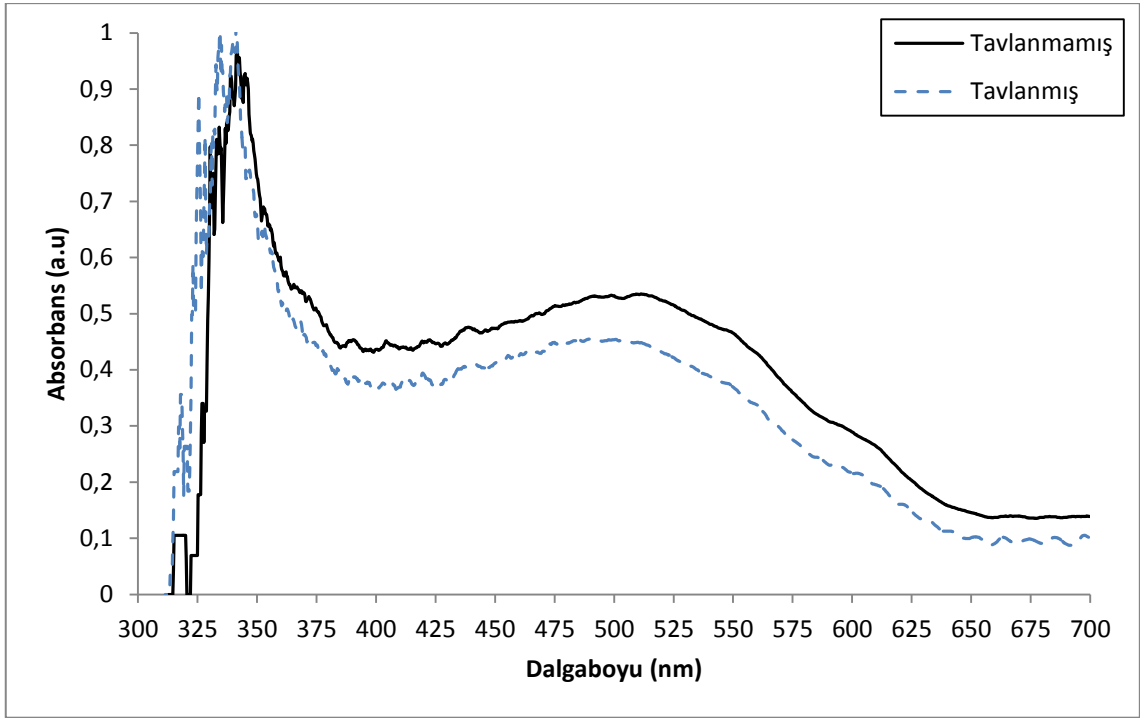
Şekil 5.17. Aktif tabakasına MWCNT eklenmiş güneş pilinde tavlamanın absorbanza etkisi



Şekil 5.18. Referans güneş pili ve aktif tabakasına MWCNT eklenmiş güneş pilinin absorbansı



Şekil 5.19. Referans güneş pili ve aktif tabaka üzerine TiO₂ tabaka kaplanmış güneş pilinin absorbansı



Şekil 5.20. Aktif tabaka üzerine TiO₂ tabaka kaplanmış güneş pilinde tavlamanın absorbansa etkisi

PEDOT:PSS/P3HT:PCBM yapısının üstüne TiO₂ tabakasının kaplanması absorpsiyonu Şekil 5.19.'da görüldüğü gibi biraz düşürmüştür. Bunun nedeninin TiO₂ tabakasının ışığı bir miktar yansıtmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. TiO₂ tabakası tavlendiğinde ise Şekil 5.20.'de görüldüğü gibi absorpsiyonda gene düşüş olmuştur.

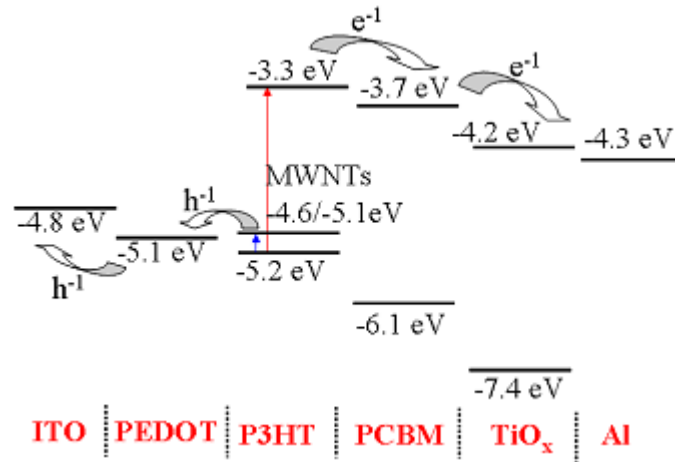
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Aktif tabakasına MWCNT katkılanırılan güneş pillerinde verim, önceden öngöröldüğü gibi artmıştır. Stylianakis ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada aktif tabakaya kütlece % 0,5 miktarda SWCNT katkılanırılmışlar ve inert gaz ortamında üretilen pillerin verimde % 41'lik bir artış sağlamışlardır. Aynı miktarda SWCNT'yi fonksiyonelleştirerek katkılanırılmışlar ve verimi % 78 artırmışlardır. Çalışmamızda ise SWCNT'den daha ucuz olan MWCNT kullanılmış ve aktif tabakaya daha az miktarda (kütlece % 0,05) katkılanırılmıştır. MWCNT'ye herhangi bir ek işlem yapılmamıştır. Çünkü CNT'lerin asitle kimyasal olarak fonksiyonelleştirilmesi CNT'leri hidrofilikleştirir ve CNT'nin fotoaktif polimerlerle karışmasına engel olur. Bunun yanında CNT'nin duvarlarında bir çok kusur meydana getirerek CNT'lerin optoelektronik özelliklerinde düşüşe yol açar (Chaudhary ve ark., 2007). Çalışmamızda fonksiyonelleştirme işlemleri yapılmayarak hem bu dezavantajlardan kaçınılmış hem de zamandan ve maddi olarak kazanç sağlanmıştır.

Yar (2011) hava ortamında aktif tabaka içerisine kütlece % 0,025 oranında % 99,5 saflıkta SWCNT ekleyerek halojen ışık altında ölçüm almış ve I_{SC} 'yi 0,89 mA/cm², V_{OC} 'yi 500 mV, FF'yi 0,34 ve verimi % 0,61 olarak bulmuştur. Çalışmamızda ise I_{SC} 1,178 mA/cm², V_{OC} 500 mV, FF 0,29 ve verim % 0,69 olarak bulunmuştur. Göröldüğü gibi hem SWCNT hem de MWCNT aktif tabaka içerisine eklendiğinde verim ve diğer parametreler üzerinde artış sağlamaktadır. Bunun nedeni her ikisinin de aktif tabaka içerisinde polimer zincirlerini birbirine bağlayan iletken köprü vazifesi görmesidir (Khatri ve ark., 2009).

Aktif tabaka içerisine katkılanırılan MWCNT'ler metalik özelliklerinden dolayı elektron transferini iyileştiren birer geçit vazifesi görmektedir. MWCNT'nin iş fonksiyonunun P3HT'nin HOMO'suna yakın değerde olması MWCNT aracılığıyla boşluk transferinin de iyileştirilebileceğini göstermektedir. Ayrıca MWCNT'ler aktif tabaka içerisinde eksitonların ayrılması için gereken ara yüzey alanını da artırmaktadır (Kalita ve ark., 2010). Şekil 6.1.'de üretilen güneş pillerine ait enerji bant yapısı gösterilmiştir. Işığın absorplanmasıyla uyarılan P3HT'nin HOMO'sundaki elektronlar LUMO seviyesine çıkarlar. Bu elektronlar sırasıyla PCBM'in LUMO'suna ve TiO₂'nin LUMO'suna son olarak da Al'nin iletim bandına geçerler. P3HT'nin HOMO'sunda



Şekil 6.1. Üretilen güneş pillerinin enerji bant yapısı (Kalita ve ark., 2010)

kalan boşluk ise önce MWCNT'ye daha sonra PEDOT:PSS'ye son olarak da ITO'ya geçer.

Titanyum dioksit tabakası dolum faktörünü artırmasına rağmen verim açısından beklenen etkiyi tam olarak oluşturmamıştır. Verimdeki düşüşe titanyum dioksit tabakasında gözlenen çatlakların elektriksel direnci artırmasının sebep olabileceği düşünülmektedir.

6.2. Öneriler

Çalışmalarımızın tamamı havaya açık ortamda yürütülmüştür. Bu durum üretilen güneş pillerinin verimlerinin literatürdeki çalışmalara göre daha düşük çıkmasındaki en önemli etkidir. Bu çalışmanın inert gaz ortamı altında (glove box) yapılması durumunda oksijen ve nem gibi etmenlerin özellikle aktif katman üzerindeki olumsuz etkileri önleneceği için daha yüksek verimlere ulaşılabileceği öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda spin kaplama hızı değiştirilmek suretiyle farklı kalınlıklarda titanyum dioksit tabakası hazırlanarak pil verimi üzerine etkisi incelenebilir. Ayrıca literatürde mevcut olan diğer sol-jel TiO_2 üretim teknikleri incelenerek, bu çalışmadaki üretim tekniği ile kıyaslanabilir. Film yüzeylerinde oluşan çatlakların nedenleri araştırılarak giderilmesi sağlanabilir. Böylece pil verimi ve stabilitesi artırılabilir.

Karbon nanotüplerin aktif tabaka içerisinde aglomere olması engellenerek daha homojen dağılması sağlanabilir. Ayrıca ileriki çalışmalarda ölçümlerin bir solar simülasyon altında ve dünya atmosfer koşullarını modelleyen uygun filtreler kullanılarak yapılması standartlara uygunluğu ve daha sağlıklı sonuçlar alınmasını temin edecektir.

Organik güneş pillerinde pil ömrü ve stabilitesi de önemli bir husustur ve organik güneş pillerinin ticarileşebilmesinin önündeki en önemli sorunlardandır. Pillerde stabiliteyi artırmaya yönelik, pil katmanlarına bozunmayı önleyici katkılandırılmalar yapılması, yeni nesil güneş pili malzemelerinin geliştirilmesi veya organik pillerde enkapsülasyon gibi çalışmalar yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- Ahlskog, M., Hakonen, P., Paalanen, M., Roschier, L. and Tarkiainen, R., 2001, Multiwalled Carbon Nanotubes as Building Blocks in Nanoelectronics, *Low Temperature Physics*, Vol. 124, 1-2, 335-352.
- Al-Ibrahim, M., Ambacher, O., Sensfuss, S., Gobsch, G., 2005, Effects of solvent and annealing on the improved performance of solar cells based on poly (3-hexylthiophene) fullerene, *Applied Physics Letters*, 86: 201120-1-3.
- Anonim, 2005, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun [Online], TBMM, <http://www.tbmm.gov.tr/kanunlar/k5346.html> [Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2011].
- Anonim, 2009, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine Yönelik Kyoto Protokolüne Katılmamızın Uygun Bulunduğuna Dair Kanun [Online], TBMM, <http://www.tbmm.gov.tr/kanunlar/k5836.html> [Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2011].
- Anonim, 2010, EİE Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) [Online], Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü, <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> [Ziyaret tarihi: 7 Mayıs 2011].
- Anonim, 2011, Güneş [Online], Wikipedia, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Güneş> [Ziyaret tarihi: 7 Mayıs 2011].
- Anonymous, 2005, Application to the composite material of carbon fiber [Online], Shinshu University Endo Laboratory, <http://endomoribu.shinshu-u.ac.jp/research/cnt/composit.html> [Ziyaret tarihi: 14 Ağustos 2011].
- Anonymous, 2008, Quantum Dots& Nanoparticles [Online], University of Wisconsin Madison Materials Research Science and Engineering Center, http://mrsec.wisc.edu/Edetc/background/quantum_dots/index.html [Ziyaret tarihi: 29 Mayıs 2011].
- Anonymous, 2009, Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5 [Online], National Renewable Energy Laboratory, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5> [Ziyaret tarihi: 7 Mayıs 2011].
- Anonymous, 2010, High Efficiency Monocrystalline, Polycrystalline, Amorphous Silicon Thin-Film, Just Roof, Light thru and See thru Modules. [Online], ComelNet LTD., http://www.comel.gr/en/solar_suntech.html [Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2011].
- Anonymous, 2010, Remote Sensing. [Online], National Weather Service, http://www.srh.noaa.gov/jetstream/remote/remote_intro.htm [Ziyaret tarihi: 21 Ağustos 2011].
- Anonymous, 2011, Carbon nanotube [Online], Wikipedia., http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube [Ziyaret tarihi: 13 Ağustos 2011].

- Anonymous, 2011, Dye-sensitized solar cell [Online], Wikipedia., http://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell#Degradation [Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2011].
- Anonymous, 2011, Indium tin oxide [Online], Wikipedia., http://en.wikipedia.org/wiki/Indium_tin_oxide [Ziyaret tarihi: 12 Haziran 2011].
- Arranz-Andre's, J., Blau, W.J., 2008, Enhanced device performance using different carbon nanotube types in polymer photovoltaic devices, *Carbon*, 46: 2067 – 2075.
- Baek, 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
- Benanti, T.L. and Venkataraman, D., 2006, Organic solar cells: An overview focusing on active layer morphology, *Photosynthesis Research*, 87: 73-81.
- Brabec, C.J., 2004, Organic photovoltaics: technology and market, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83, 273-292.
- Brabec, C.J., Cravino, A., Meissner, D., Sarıçiftçi N.S., Fromherz, T., Rispiens, M.T., Sanchez, L. and Hummelen, C., 2001, Origin of the open circuit voltage of plastic solar cells, *Advanced Functional Materials*, 11, No. 5.
- Brabec, C.J., Cravino, A., Meissner, D., Sarıçiftçi, N.S., Rispiens, M.T., Sanchez, L., Hummelen, J.C., Fromherz, T., 2002, The Influence of Materials Work Function On The Open Circuit Voltage of Plastic Solar Cells, *Thin Solid Films*, 403: 368–372.
- Brabec, C.J., Sarıçiftçi, N.S., Hummelen, J.C., 2001, Plastic Solar Cells, *Advanced Functional Materials*, 11 No:1.
- Berson, S., Bettignies, R., Bailly, S., Guillerez, S., Jusselme, B., 2007, Elaboration of P3HT/CNT/PCBM Composites for Organic Photovoltaic Cells, *Advanced Functional Materials*, 17:3363–3370.
- Bundgaard, E., Krebs, F.C., 2007, Low Band Gap Polymers For Organic Photovoltaics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91: 954-985.
- Burghard, M., Klauk, H. and Kern, K., 2009, Carbon-Based Field-Effect Transistors for Nanoelectronics, *Advanced Materials*, 21, 1-15.
- Chaudhary, S., Lu, H., Müller, A.M., Bardeen, C.J. and Ozkan, M., 2007, Hierarchical Placement and Associated Optoelectronic Impact of carbon Nanotubes in Polymer-Fullerene Solar Cells, *Nano Letters*, Vol. 7, No. 7, 1973-1979.
- Chirvase, D., Parisi, J., Hummelen J.C. and Dyakonov, V., 2004, Influence of nanomorphology on the photovoltaic action of polymer-fullerene composites, *Nanotechnology*, 15, 1317-1323.
- Coakley, K.M., McGehee, M.D., 2004, Conjugated Polymer Photovoltaic Cells,

Chemical Materials,16:4533-4542.

- Conwell ,E.M., Mizes, H.A., 1995, Photogeneration in polaron pairs in conducting polymers, *Physical Review B*,51: 6953.
- Deibel, C., Strobel, T., Dyakonov, V., 2010, Role of the Charge Transfer State in Organic Donor–Acceptor Solar Cells, *Advanced Materials*, 22: 4097–4111.
- Denler, G., Scharber, M.C. and Brabec, C.J., 2009, Polymer-Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells, *Advanced Materials*, 21, 1323-1338.
- Ebadian, S., Gholamkhash, B., Shambayati, S., Holdcroft, S., Servati, P., 2010, Effects of annealing and degradation on regioregular polythiophene-based bulk heterojunction organic photovoltaic devices, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94: 2258–2264.
- Erb, T., Zhokhavets, U., Hoppe, H., Gobsch, G., Al-Ibrahim, M., Ambacher, O., 2006, Absorption and crystallinity of poly(3-hexylthiophene)/fullerene blends independence on annealing temperature, *Thin Solid Films*, 511-512: 483 – 485.
- 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.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y. and Warta, W., 2011, Solar cell efficiency tables (version 37), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19, 84-92.
- Griffini, G., Turri, S. and Levi, M., 2010, Degradation and stabilization of poly(3-hexylthiophene) thin films for photovoltaic applications, *Polymer Bulletin*, DOI 10.1007/s00289-010-0323-9.
- Günes, S., 2006, Nanostructured Electrodes From Inorganic Materials for Hybrid Solar Cells, Doktora Tezi, *Linz Institute for Solar Cells (LIOS)*, Linz, 41-42.
- Günes, S., Neugebauer, H., Sarıçiftçi, N.S., 2007, Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells, *Chemical Reviews*, 107: 1324–1338.
- Hadipour, A., de Boer, B. and Blom, P.W.M., 2008, Device operation of organic tandem solar cells, *Organic Electronics*, 9, 617-624.
- Halme, J., 2002, Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests, Yüksek Lisans Tezi, *Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics*, Espoo, 29-30.
- Honsberg, C. And Bowden, S., 2010, Photovoltaic Education Network [Online], National Science Foundation, <http://pveducation.org/> [Ziyaret tarihi: 21 Ağustos 2011].
- Hoppe, H., Niggemann, M., Winder, C., Kraut, J., Hiesgen, R., Hinsch, A., Meissner, D.

- and Sariciftci, N.S., 2004, Nanoscale Morphology of Conjugated Polymer/Fullerene-Based Bulk-Heterojunction Solar Cells, *Advanced Functional Materials*, 14, No. 10.
- Hoppe, H., Sarıçiftçi, N.S., 2004, Organic solar cells: An overview, *Journal Materials Research*, Vol. 19, No. 7.
- Hoppe, H., Sarıçiftçi, N.S., 2006, Morphology of Polymer/Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells, *Journal of Materials Chemistry*, 16:45-61.
- Hoppe, H., Sarıçiftçi, N.S., 2008, Polymer Solar Cells, *Advanced Polymer Science*, 214: 1-86.
- Jones, R.V., 2001, Electronic Devices and Circuits Engineering Sciences [Online], Harvard University, http://people.seas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture_2/energy_gap/energy_gap.html [Ziyaret tarihi: 21 Temmuz 2011].
- Jørgensen, M., Norrman, K. and Krebs, F.C., 2008, Stability/degradation of polymer solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 686-714.
- Hioms, R.C., Bettignies, R., Leroy, J., Bailly, S., Firon, M., Sentein, C., Khoukh, A., Preud'homme, H., Dagrón-Lartigau, C., 2006, High molecular weights, polydispersities, and annealing temperatures in the optimization of bulk-heterojunction photovoltaic cells based on poly(3-hexylthiophene) or poly(3-butylthiophene), *Advanced Functional Materials*, 16: 2263–2273.
- Iijima, S., 1991, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol. 354.
- Inoue, K., Ulbricht, R., Madakasira, P.C., Sampson, W.M., Lee, S., Gutierrez, J., Ferraris, J., Zakhidov, A.A., 2005, Temperature and time dependence of heat treatment of RR-P3HT:PCBM solar cells, *Synthetic Metals*, 154:41-44.
- Kalita, G., Masahiro, M., Koichi, W., Umeno, M., 2009, Nanostructured morphology of P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells, *Solid-State Electronics*, 54: 447–451.
- Kalita, G., Wakita, K. and Umeno, M., 2010, Efficient Bulk Heterojunction Solar Cells Incorporating Carbon Nanotubes and with Electron Selective Interlayers, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 000090-000094.
- Karabulut, S.E., 2009, Bor Karbür Nanopartiküllerin ve Karbon Nanotüplerin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 6-7.
- Kawano, K., Sakai, J., Yahiro, M., Adachi, C., 2009, Effect of solvent on fabrication of active layers in organic solar cells based on poly(3-hexylthiophene) and fullerene derivatives, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93: 514–518.
- Keawprajak, A., Piyakulawast, P., Klamchuen, A., Iamraksa, P., Asawapirom, U., 2010,

- Influence of crystallizable solvent on the morphology and performance of P3HT:PCBM bulk-heterojunction solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94: 531–536.
- Khatri, I., Adhikari, S., Aryal, H.R., Soga, T., Jimbo, T. and Umeno, M., 2009, Improving photovoltaic properties by incorporating both single walled carbon nanotubes and functionalized multiwalled carbon nanotubes, *Applied Physics Letters*, 94,093509.
- Kietzke, T., 2007, Recent Advances in Organic Solar Cells, *Advances in Optoelectronics*, 40285.
- Kim, J.S., Park, Y., Lee, D.Y., Lee, J.H., Park, J.H., Kim, J.K., Cho, K., 2010, Poly(3-hexylthiophene) Nanorods with Aligned Chain Orientation for Organic Photovoltaics, *Advanced Functional Materials*,20: 540–545
- Kim, J.Y., Kim, S.H., Lee, H.H., Lee, K., Ma, W., Gong, X. and Heeger, A.J., 2006, New Architecture for High-Efficiency Polymer Photovoltaic Cells Using Solution-Based Titanium Oxide as an Optical Spacer, *Advanced Materials*, 18, 572-576.
- Koyuncu, S., 2008, Güneş Pillerinde Elektrolit Olarak Görev Yapacak İletken Polimerlerin Sentezi, Doktora Tezi, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çanakkale, 39-40.
- Kymakis, E., Alexandrou, I. and Amaratunga, G. J., 2003, High open-circuit voltage photovoltaic devices from carbon-nanotube-polymer composites. *Journal of Applied Physics*, Volume 93, Number 3.
- Lee, J.M., Park, J.S., Lee, S.H., Kim, H., Yoo, S. and Kim, S.O., 2011, Selective Electron- or Hole- Transport Enhancement in Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells with N- or B- Doped Carbon Nanotubes, *Advanced Materials*, 23, 629-633.
- Lee, K., Kim, J.Y., Park, S.H., Kim, S.H., Shinuk, C. and Heeger, A.J., 2007, Air-Stable Polymer Electronic Devices, *Advanced Materials*, 19, 2445-2449.
- Lee, S.H., Kim, J.H., Shim, T.H. and Park, J.G., 2009, Effect of Interface Thickness on Power Conversion Efficiency of Polymer Photovoltaic Cells, *Electronic Materials Letters*, Vol. 5, No. 1, pp. 47-50.
- Lee, W.H., Chuang, S.Y., Chen, H.L., Su, W.F., Lin, C.H., 2010, Exploiting Optical Properties of P3HT:PCBM Films for Organic Solar Cells with Semitransparent Anode, *Thin Solid Films*,518: 7450–7454.
- Li, J., Kim, S., Edington, S., Nedy, J., Cho, S., Lee, K., Heeger, A.J., Gupta, M.C., Yates Jr, J.T., 2011, A study of stabilization of P3HT/PCBM organic solar cells by photochemical active TiOx layer, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95: 1123–1130.
- Lin, Y., Yang, P., Huang, J, Huang, G., Wang, I., Wu, W., Lin, M., Su, W. and Lin, C.,

- 2011, High-efficiency inverted polymer solar cells with solution-processed metal oxides, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 95, Issue 8, p2511-2515.
- Liu, L., Stanchina, W.E. and Li, G., 2009, Effects of semiconducting and metallic single-walled carbon nanotubes on performance of bulk heterojunction organic solar cells, *Applied Physics Letters*, 94, 233309.
- Ma, W., Yang, C., Gong, X., Lee, K. and Heeger, A.J., 2005, Thermally Stable, Efficient Polymer Solar Cells with Nanoscale Control of the Interpenetrating Network Morphology, *Advanced Functional Materials*, 15, 1617-1622.
- Miller, S.L., 2005, Organic Photovoltaic Devices Utilizing Single Wall Carbon Nanotubes, Doktora tez önerisi, *Rutgers University Materials Science and Engineering Department*, USA.
- Moule, A.J., Meerholz, K., 2008, Controlling morphology in polymer-fullerene mixtures, *Advanced Materials*, 20: 240–245.
- Nam, C.Y., Su, D., Black, C.T., 2009, High-Performance Air-Processed Polymer–Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells, *Advanced Functional Materials*, 19:3552–3559.
- Nardes, A.M., Kemerink, M., Janssen, R.A.J., Bastiaansen, J.A.M., Kiggen, N.M.M., Langeveld, B.M.W., van Breemen, A.J.J.M. and de Kok, M.M., 2007, Microscopic Understanding of the Anisotropic Conductivity of PEDOT:PSS Thin Films, *Advanced Materials*, 19, 1196-1200.
- Nardes, A.M., Kemerink, M., de Kok, M.M., Vinken, E., Maturova, K and Janssen, R.A.J., 2008, Conductivity, work function, and environmental stability of PEDOT:PSS thin films treated with sorbitol, *Organic Electronics*, 9, 727-734.
- 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.
- Odom, T.W., Huang, J.L., Kim, P. and Lieber, C.M., 1998, Atomic structure and electronic properties of single-walled carbon nanotubes, *Nature*, Vol. 391.
- Padinger, F., Rittberger, R.S., Sarıçiftçi, N.S., 2003, Effects of postproduction treatment on plastic solar cells, *Advanced Functional Materials*, 13: 85-88.
- Pasquier, A.D., Miller, S. and Chhowalla, M., 2006, On the use of Ga-In eutectic and halogen light source for testing P3HT-PCBM organic solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 1828-1839.
- Pradhan, B., Batabyal, S.K., Pal, A.J., 2006, Functionalized carbon nanotubes in donor/acceptor-type photovoltaic devices, *Applied Physics Letters*, 88: 093106.
- Prall, H.J., 2005, Tandem Solar Cells, Yüksek Lisans Tezi, *Linz Institute for Solar Cells*

(LIOS), Linz, 26-27.

- Radbeh, R., Parbaile, E., Chakaroun, M., Ratier, B., Aldissi, M. and Moliton, A., 2010, Enhanced efficiency of polymeric solar cells via alignment of carbon nanotubes, *Polymer International*, 59, 1514-1519.
- Reese, M.O., Nardes, A.M., Rupert, B.L., Larsen, R.E., Olsan, D.C., Lloyd, M.T., Shaheen, S.E., Ginley, D.S., Rumbles, G. and Kopidakis, N., 2010, Photoinduced Degradation of Polymer and Polymer-Fullerene Active Layers: Experiment and Theory, *Advanced Functional Materials*, 20, 3476-3483.
- Ronan, P., 2007, Light [Online], Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Light> [Ziyaret tarihi: 21 Ağustos 2011].
- Saga, T., 2010, Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production, *NPG Asia Materials*, 2(3), 96-102.
- Salaneck, W.R., Friend, R.H., Bredas, J.L., 1999, Electronic structure of conjugated polymers: consequences of electron-lattice coupling, *Physics Reports*, 319: 231-251.
- Scharber, M.C., Mühlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A.J., Brabec, C.J., 2006, Design Rules for Donors in Bulk-Heterojunction Solar Cells Towards 10 % Energy-Conversion Efficiency, *Advanced Materials*, 18: 789–794.
- Sharma, S.S., Sharma, G.D., Mikroyannidis, J.A., 2011, Improved power conversion efficiency of bulk heterojunction poly(3-hexylthiophene):PCBM photovoltaic devices using smallmolecule additive, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95:1219–1223.
- Smith, W.F., 2001, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 975-8431-61-7, Saadet Özkal /Nihat G. Kınıkoğlu, *Literatür Yayınları*, İstanbul, 121-123.
- Spanggaard, H., Krebs, F.C., 2004, A Brief History of The Development of Organic and Polymeric Photovoltaics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83:125-146.
- Schweitzer, B., Bassler, H., 2000, Excitons in Conjugated Polymers, *Synthetic Metals*, 109: 1–6.
- Tang, C.W., 1986, Two Layer Organic Photovoltaic Cell, *Applied Physics Letters* 48, 183.
- Trybus, E., 2008, Solar Cells [Online], Georgia Institute of Technology, http://users.ece.gatech.edu/~alan/ECE3080/Lectures/ECE3080-L-11c-Solar_Cells.pdf [Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2011].
- Vacca, P., Petrosino, M., Miscioscia, R., Nenna, G., Minarini, C., Sala, D.D., Rubino, A., 2008, Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(4-styrenesulfonate) physical and hole injection properties in organic light emitting diodes, *Thin Solid Films*, 516, 4232-4237.

- Wang, W., Wu, H., Yang, C., Luo, C., Zhang, Y., Chen, J., Cao, Y., 2007, High efficiency polymer photovoltaic devices from regioregular poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl) and [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester processed with oleic acid surfactant, *Applied Physics Letters*, 90: 183512-1-3.
- Wu, M.C., Lin, Y.Y., Chen, S., Liao, H.C., Wu, Y.j., Chen, C.W., Chen, Y.F., Su, W.F., 2009, Enhancing light absorption and carrier transport of P3HT by doping multi-wall carbon nanotubes, *Chemical Physics Letters*, 468: 64–68.
- Yang, X.N., Loos, J., Veenstra, S.C., Verhees, W.J.H., Wieng, M.M., Kroon, J.M., Michels, M.A.J., Janssen, R.A.J., 2005, Nanoscale morphology of high performance polymer solar cells, *Nano Letters*, 5: 579–583.
- Yar, A., 2011, Tek Cidarlı Karbon Nanotüp ve TiO₂ Tabaka İlavesinin P3HT:PCBM Organik Güneş Pillerinin Performansına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-97.
- Yu, G., Gao, J., Hummelen, J.C., Wudl, F., Heeger, A.J., 1995, Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies Via A Network of Internal Donor–Acceptor Heterojunctions, *Science*, 270:1789.
- Zafer, C., 2006, Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 22-24.
- Zhao, Y., Xie, Z., Qu, Y., Geng, Y., Wang, L., 2007, Solvent-vapor treatment induced performance enhancement of poly (3-hexylthiophene): methanofullerene bulk-heterojunction photovoltaic cells, *Applied Physics Letters*, 90: 43504-1-3.
- Zhao, Y., Wang, X., Shu, F., 2011, Investigation of multi-donor bulk-heterojunction photovoltaic cells based on P3HT:PCBM system, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95:684–687.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Okan DEMİR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Banaz, 23.01.1985
Telefon :
Faks :
e-mail : okan.dr@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Şehit Necati Sargın A.L., Banaz, UŞAK	2003
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2008
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2011
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010-2011	S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Makina Müh.	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI
Makina Mühendisliği

YABANCI DİLLER
İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR