T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK CİDARLI KARBON NANOTÜP VE TiO_2 TABAKA İLAVESİNİN P3HT: PCBM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİ

Adem YAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2011

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

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.

Adem YAR

20/07/2011

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEK CİDARLI KARBON NANOTÜP VE TiO_2 TABAKA İLAVESİNİN P3HT: PCBM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİ

Adem YAR

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2011, 97 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Doç.Dr. Mesut UYANER

Bu çalışmada tek cidarlı karbon nanotüp ve polimer P3HT:PCBM'den oluşan kompozit karışımın fotovoltaik özellikleri incelenmiştir. SWNT:P3HT:PCBM kompozit karışımı spin-coating tekniği kullanılarak kaplanmış ve daha sonra tavlanmıştır. Polimer ile SWNT arasındaki yapıyı ve yük transferini anlamak için, yapılan güneş pilleri AFM, SEM, absorbans ile karakterize edilmiştir. Düşük (% 0.025) karbon nanotüp konsantrasyonlu güneş pillerinin fotovoltaik karakteristiği incelenmiş olup kısa devre akımı 0.89 mA/cm^2, açık devre gerilimi 500 mV, dolum faktörü 0.34 olarak belirlenmiş ve verimin % 0.61 olmasına yol açmıştır. SWNT'nin ilave edilmesi hem kısa devre akım yoğunluğunun hem de dolum faktörünün artmasına neden olmuştur. Kısa devre akım yoğunluğunun ve dolum faktörünün artması, verimin artmasını sağlamıştır. TiO_2 tabakası boşluk bloke edici ve elektron seçici olmasına rağmen açık devre gerilimini, kısa devre akımını ve dolum faktörünü azalttığından dolayı güneş pilinin verimini düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler: Heteroeklem, İletken polimerler, Polimer güneş pilleri, SWCNT.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF SWCNT AND TiO_2 LAYER ADDITION ON THE PERFORMANCE OF P3HT: PCBM ORGANIC SOLAR CELLS

Adem YAR

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, 97 Pages

Jury
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Doç.Dr. Mesut UYANER

In this study, photovoltaic proporties of single-walled carbon nanotubes (SWCNT) – conjugated polymers, P3HT:PCBM, blend composites are investigated. The SWNT:P3HT:PCBM composites are deposited using a spin-coating technique and, then annealed. Devices characterized by atomic force microscopy (AFM) , absorbance and scanning electron microscope (SEM) to underline the structure and the charge transfer between the SWCNT and P3HT. Diodes with low nanotube concentration (0.025 %) show photovoltaic behaviour, with a short circuit current of 0.89 mA/cm^2, an open circuit voltage of 500 mV and a fill factor of 0.34, which leads to a power conversion efficiency of 0.61 %. The addition of SWCNTs resulted in an improvement of both the short circuit current density and the fill factor. Enhancement of fill factor and short circuit current density of cells result in increase of efficiency. Although TiO_2 layer act as hole blocking and electron selective, device performance was lessened with the TiO_2 layer due to significant the decrease open circuit voltage, short circuit current and fill factor.

Keywords: Conduction Polymers, Heterojunction, Polymer solar cells, SWCNT.

ÖNSÖZ

Tez çalışmasını birlikte yürüttüğümüz danışman hocam Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya, tezle ilgili önerileri ve yardımlarından dolayı Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR, Arş. Gör. Volkan ESKİZEYBEK ve deneysel çalışmalarda bana yardımcı olan Arş. Gör. Okan DEMİR'e teşekkür ederim.

Bu çalışma sırasında deney ortamının sağlanmasından teorik yardıma kadar her aşamada destek olan S.Ü. İleri Araştırma ve Geliştirme Merkezi genel müdür yardımcısı Doç. Dr. Mahmut KUŞ'a ve ekibine, ölçümler konusunda yardımcı olan Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nden Doç. Dr. Serap GÜNEŞ'e, tezimize yaptığı fikirlerinden ve laboratuar ortamını sağlayan Orta Doğu Teknik Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Hüsnü Emrah ÜNALAN'a, Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Ali Kemal OKYAY'a teşekkür ederim.

Selçuk Üniversitesi BAP koordinatörlüğüne Yüksek Lisans tezimize yaptığı maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Adem YAR

KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Güneş Enerjisi 3
1.2. Güneş Pilleri 4
1.2.1. Güneş pili çeşitleri 5

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **13**

3. ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ **22**

3.1.Işığın Tanecik Modeli 22
3.1.l. Işığın Yayılması: 22
3.1.2. Işığın Birbiri içinden Geçmesi: 22
3.1.3. Işığın Yansıması: 22
3.1.4. Aydınlanma: 22
3.1.5. Işık Basıncı: 23
3.1.6. Işığın Soğurulması: 23
3.1.7. Işığın Kırılması: 23
3.2. Fotoelektrik Olayı 24
3.2.1.Einstein'in Fotoelektrik Denklemi 25
3.2.2.Bağlanma (Eşik) Enerjisi: 25
3.2.3.Eşik Frekansı (fc) ve Eşik Dalga boyu (XB): 26
3.3. İletken Polimerler 26
3.4. Organik Güneş Pillerinin Fiziği 30
3.5. İki Katmanlı (Bilayer) Güneş Pilleri 35
3.6. Bulk Heteroeklem Güneş Pilleri 37
3.7. Hibrid Güneş Pilleri 44
3.8. Güneş Pillerinin Karakteristiği 46

4. MATERYAL VE METOT **50**

4.1. ITO (Indium-Tin-Oksit) 50
4.2. PEDOT: PSS 50
4.3. P3HT:PCBM 51
4.5. Titanyum Dioksit 52
4.6. Tek Cidarlı Karbon Nanotüp 54

4.7. Güneş Pillerinin Hazırlanması 56
4.7.1. ITO camlarının hazırlanması 56
4.7.2. PEDOT: PSS'in hazırlanması ve spin-coat tekniğiyle kaplanması 56
4.7.3. P3HT:PCBM'nin hazırlanması ve spin-coat tekniğiyle kaplanması 56
4.7.4. P3HT:PCBM: SWCNT'nin spin-coat tekniğiyle kaplanması 57
4.7.5. Titanyum dioksitin hazırlanıp kaplanması 57
4.7.6 Aluminyum elektrotların kaplanması 57

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 59

5.1. I-V Ölçümleri 59
5.2.SEM Görüntüleri 64
5.3. Absorbans Ölçümleri 68
5.4. AFM Görüntüleri 71

6.SONUÇ VE ÖNERİLER 74

6.1.Sonuçlar 74
6.2.Öneriler 74

ÖZGEÇMİŞ 85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

IP : İyonlaşma enerjisi
χ :Elektron ilgisi
Φ :İş fonksiyonu
I_{SC} :Kısa devre akımı
V_{OC} :Açık devre gerilimi

Kısaltmalar

Eg : Bant boşluğu
AC : Alternatif akım
AM 1.5:Hava Kütlesi
AFM :Atomik kuvvet mikroskobu
CNT :Karbon nanotüp
DC : Doğru akım
EİE : Elektrik İşleri Etüd İdaresi
FF :Dolum faktörü
HOMO: En yüksek enerjili dolu molekül orbitali
IPCE :Uyarılmış foton dönüşüm verimi
ITO :İndiyum kalay oksit
LCD : Likit kristal ekran
LED :Işık yayan diyot
LUMO:En düşük enerjili boş molekül orbitali
MWCNT: Çok cidarlı karbon nanotüp
MDMO-PPV :Poli [2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilenvinilen
NREL : Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
OLED : Organik ışık yayan diyot
F3Th4 :(2,7-bis[50-(9,9-dioctylfluorene-2-yl)-2,20-dithienyl-5-yl]-9,9-dioctylfluorene)
PCBM :[6,6]-fenil-C_{61} bütirik asit metil ester
PEDOT: PSS :Poli (3,4 etilendioksitiyofen)poli (stirensülfonat)
PTFE : Politetrafloroetilen (Teflon)
P3HT :Poli (3-hekziltiyofen)
PVD : Fiziksel buhar biriktirme
SEM :Taramalı elektron mikroskobu
STM : Taramalı tünelleme mikroskobu
SWCNT: Tek cidarlı karbon nanotüp
UV : Ultraviyole (Mor ötesi)
UW-MRSC: Wisconsin Üniversitesi Madison Malzeme Araştırmaları Bilimi ve Mühendisliği Merkezi
X-AFM: Kesitsel atomik kuvvet mikroskobu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Güneş radyasyonun Avrupa'daki dağılımı (PVGIS) 2
Şekil 1.2. Güneş radyasyonun Türkiyde'ki dağılımı (PVGIS) 2
Şekil 1.3. Global solar spektrum (NREL) 4
Şekil 1.4. Bir P-N eklemde fotovoltaik etki 5
Şekil 1.4. a) Tek kristal silisyum b) Çok kristal silisyum (Saga, 2010, SANYO) c) Amorf silisyum esnek güneş pili (Comel) 7
Şekil 1.5. Boya hassasiyetli güneş pilinin yapısı 9
Şekil 1.6. İnorganik tandem güneş pili (Kim,2011) 10
Şekil 1.7. Organik tandem güneş pilinde I-V grafiği (Hadipour ve ark., 2008) 11
Şekil 1.8 UV ışık(üstte) ve ortam ışığı altındaki(altta) CdSe kuantum parçacıklar (Parçacık boyutu sağa doğru artmaktadır) (UW MRSEC) 12
Şekil 3.1. Kırılma olayının gösterildiği şematik resim 24
Şekil 3.2. İletken, yarı iletken, yalıtkan malzemelerin bant yapısı (Gourdin,2007) 28
Şekil 3.3. Hibrid güneş pilinin şematik diyagramı ve bu güneş pilinde kullanılan malzemelerin bant diyagramı (Peng,2011). 29
Şekil 3.4. Organik güneş pillerinde enerji seviyesinin ayarlanarak V_{oc}'nin artışı (Bundgaard,2007). 30
Şekil 3.5. MIM modelin kısa devre şartları altındaki tek tabakalı konjuge polimer pilin yük üretim süreci. VB valans bant, CB iletim bant, Eg bant boşluğu, P^+ ve P^- pozitif ve negatif polaronlar (Brabec,2001). 32
Şekil 3.6. Enerji seviyesi ve ışığın toplanması. Elektronun HOMO seviyesinde boşluk bırakıp LUMO seviyesine yükselmektedir. Elektronlar Al elektrotta, boşluklar ise ITO elektrotta toplanmaktadır. Φ:İş fonksiyonu, χ:Elektron ilgisi, IP: İyonlaşma enerjisi, Eg: Bant boşluğu (Spanggaard,2004). 33
Şekil 3.7. Donör-Akseptör ara yüzeyinde eksitonların ayrılması. Boşluk donörde kalırken elektronlar akseptöre gitmektedir (Spanggaard,2004). 34
Şekil 3.8. İki katmanlı güneş pilinin ara yüzeydeki yük transferi ve bu güneş pilinin yapısı (a). Açık devre (b) ve kısa devre (c) koşulları altında malzemelerin enerji seviyeleri (Brabec,2001). 36
Şekil 3.9. İki katmanlı (a) ve bulk heteroeklem (b) güneş pillerindeki ara yüzey(Hoppe,2008). 38
Şekil 3.10. F3Th4:PCBM (kare), P3HT:PCBM (daire), P3HT: F3Th4:PCBM (üçgen) karışımlarının J-V grafikleri (a) ve P3HT ve F3Th4 karışımlarının farklı oranlardaki

absorbsiyonu (Zhao,2011). 40
Şekil 3.11. P3HT:PCBM güneş pilinin 100 °C (a) ve 140 °C'de (b) tavlanmış optiksel mikroskop görüntüsü (Karagiannidis,2011). 40
Şekil 3.12. Aktif tabakanın farklı oranlardaki absorbsiyon spektrumu (a) ve J-V grafikleri (b). (Baek,2010). 41
Şekil 3.13. Klorobenzen çözücüsü (a) ve o-diklorobenzen - kloroform karışımından oluşan çözücüyle (b) hazırlanan karışımların optiksel mikroskop görüntüsü. Farklı çözücülerle hazırlanan pillerin J-V (c) ve absorbsiyon (d) grafikleri (Kawano,2009). .. 42
Şekil 3.14. Termal tavlamadan önce yüksek (●) - düşük (■) RR-P3HT güneş pilinin ve tavlamadan sonra yüksek (□)-düşük (○)RR-P3HT güneş pilinin J-V grafikleri (a). Aynı zamanda düşük (●)-yüksek (○) RR güneş pilinin dört ay içerisindeki verimlerin bozulması (b). Termal tavlamadan önce (c) ve sonra (d) P3HT:PCBM filmlerinin TEM görüntüsü (Servati,2010). 43
Şekil 3.15. Hibrid güneş pilinin yapısı (Chandrasekaran,J.,2011). 44
Şekil 3.16. Güneş pillerinin karakteristiğini belirleyen I-V grafiği (Prall,2005)..... 46
Şekil 3.17. V_{OC1} donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi arasındaki farkı gösterirken V_{OC2} elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farkı göstermektedir (Miller,2005). 47
Şekil 3.18. Güneş pilinin eşdeğer devresi (Hoppe,2004). 48
Şekil 3.19. Farklı çalışma durumlarında I-V karakteristiğinin MIM bant yapıları. Kısa devre durumunda boşluklar anoda elektronlarda katoda taşınır (a), açık devre durumunda V_{OC} elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir (b), ters gerilim durumunda diyot foto detektör işlevi yaparken (d) ön gerilim durumunda ışık yayan diyot (LED) işlevini yapmaktadır (c) (Miller,2005). 49
Şekil 4.1. PEDOT(altta) ve PSS'nin(üstte) kimyasal yapısı (Vacca ve ark., 2008) 50
Şekil 4.2. PEDOT:PSS'nin morfolojik modeli (Nardes ve ark., 2007) 51
Şekil 4.3. P3HT(solda) ve PCBM'nin(sağda) kimyasal yapısı (Kietzke, 2007) 52
Şekil 4.4. TiO_x'li ve TiO_x'siz polimer güneş pillerinde güç dönüşüm veriminin zamana göre değişimi (Lee ve ark., 2007) 53
Şekil 4.5. TiO_x'li ve TiO_x'siz polimer güneş pillerinde IPCE'nin ışığın dalga boyuna göre değişimi..... 53
Şekil 4.6. P3HT:PCBM (a) ve P3HT:PCBM: SWCNT (b) aktif tabakasında eksiton oluşumundan sonra yük taşınımını gösteren şematik diyagram (Liu,2008). 55
Şekil 5.1. Standart pil(üstte) ve SWCNT tabanlı(altta) güneş pillerinin I-V grafikleri.. 59

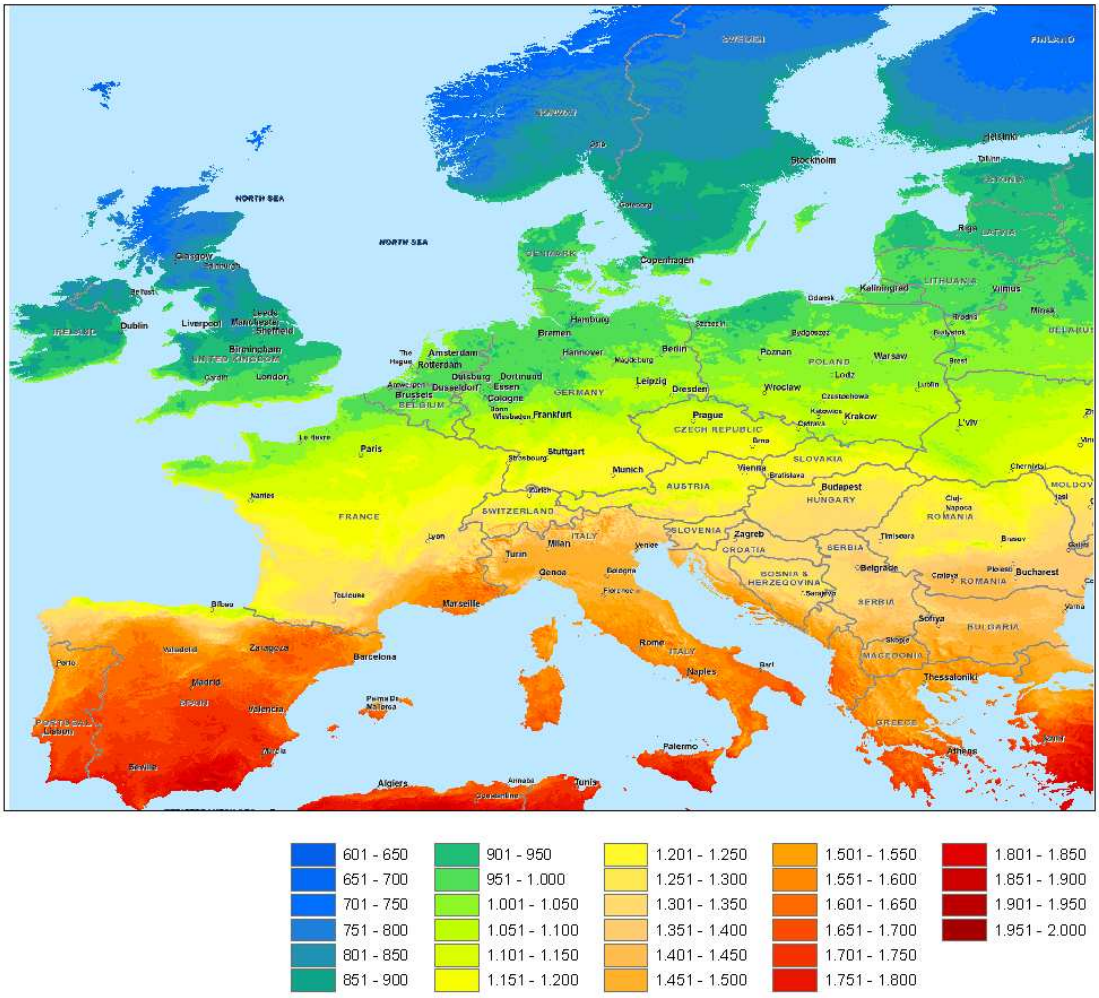
Şekil 5.2.Standart pil ve SWCNT tabanlı güneş pillerinin ışık altında elde edilen I-V grafikleri..... 60
Şekil 5.3.TiO_2 katmanlı güneş pilinin grafiği..... 60
Şekil 5.4.P3HT:PCBM:SWCNT/TiO_2 katmanlı güneş pilinin grafiği..... 61
Şekil 5.5.P3HT:PCBM:SWCNT/TiO_2 ve P3HT:PCBM:SWCNT katmanlı güneş pillerinin grafiği..... 61
Şekil 5.6.Farklı katmanlarda yapılan güneş pillerinin grafiği..... 62
Şekil 5.7. P3HT:PCBM'in tavlanmadan önceki yüzeyi..... 64
Şekil 5.8. P3HT:PCBM'in tavlandıktan sonraki yüzeyi..... 65
Şekil 5.9. P3HT:PCBM:SWNT'nin tavlanmadan önceki yüzeyi..... 66
Şekil 5.10. P3HT:PCBM:SWNT'nin tavlandıktan sonraki yüzeyi..... 66
Şekil 5.11. P3HT:PCBM:SWNT/TiO_2'in tavlandıktan sonraki yüzeyi..... 67
Şekil 5.12. P3HT:PCBM/TiO_2'in tavlanmadan önceki yüzeyi..... 67
Şekil 5.13. P3HT:PCBM/TiO_2'in tavlanma işleminden sonraki yüzeyi..... 68
Şekil 5.14. P3HT:PCBM güneş pillerinin tavlanmadan önceki ve sonraki absorpsiyon grafiği..... 69
Şekil 5.15. Tavlanmış P3HT:PCBM ve SWCNT eklenmiş güneş pillerinin absorpsiyon grafiği..... 69
Şekil 5.16. P3HT:PCBM:SWCNT güneş pillerinin tavlanmadan önceki ve sonraki absorpsiyon grafiği..... 70
Şekil 5.17. P3HT:PCBM:SWCNT ve TiO_2 tabakası ilave edilmiş güneş pillerinin absorpsiyon grafiği..... 71
Şekil 5.18. P3HT:PCBM tavlandıktan sonraki AFM görüntüsü..... 72
Şekil 5.19. P3HT:PCBM tavlanmadan önceki AFM görüntüsü..... 72
Şekil 5.20. P3HT:PCBM ile cam mesafesi arasındaki fark..... 73

1. GİRİŞ

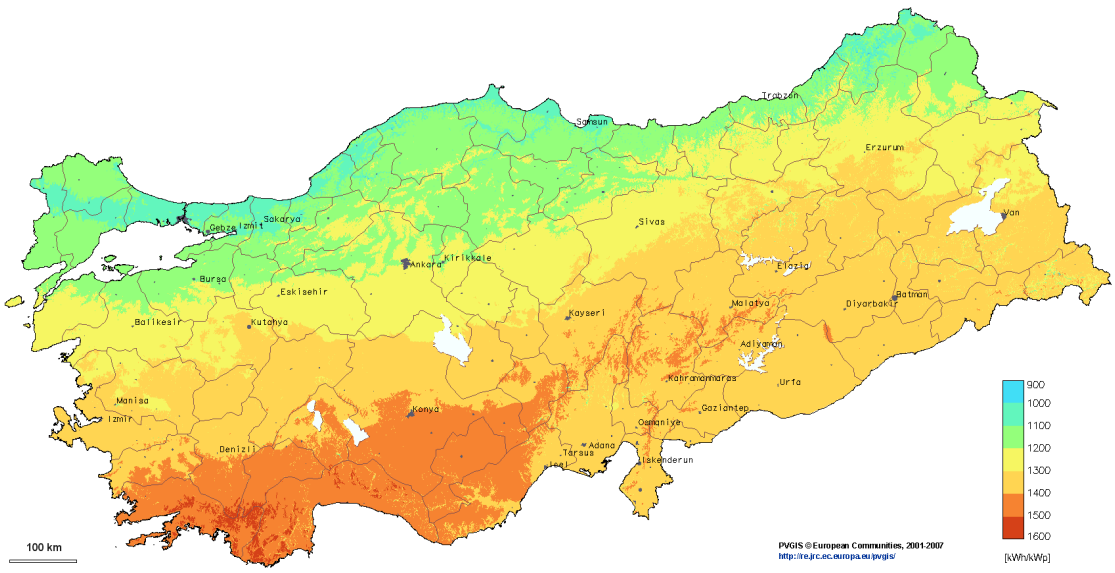
Günümüzde fosil yakıtlara ve petrol ürünlerine dayalı enerji tüketimi giderek artmakta ve yeryüzündeki kaynaklar gitgide tükenmektedir. Ham petrol fiyatlarının varilinin 110 dolar civarlarına ulaştığı günümüzde, eğer ucuz ve kullanılabilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı teknolojilere geçiş olmazsa çok yakın gelecekte dünyadaki tüm kaynaklar tükenecektir. Bunun yanında fosil yakıtların çevre üzerindeki büyük olumsuz etkileri de göz önüne alındığında, dünya giderek büyük bir felaketin eşiğine sürüklenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından en verimli olanı eğer kullanılabilirse güneş enerjisidir. Güneş Enerjini elektrik enerjisine dönüştüren teknoloji güneş pilleri ile sağlanmıştır. Güneş pilleri, yapımında kullanılan malzemeye bağlı olarak, organik ve anorganik güneş pilleri olmak üzere ikiye ayrılırlar. Teknolojisi daha eskilere dayanan, anorganik güneş pilleri mono ve multikristalin silikon gibi anorganik yarıiletkenlerden oluşmaktadır. Günümüzde üretilen anorganik güneş pilleri yüksek vakum şartlarında bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda (400-1400 °C) işlev görmektedir. Teknolojik olarak uzun zamandır üretilen anorganik güneş pillerinden en fazla %24'lük bir verim elde edilmiştir ve bu değerin en fazla %30'a çıkabileceği düşünülmektedir. Silikon bazlı anorganik tabanlı güneş pilleri çok hassas prosesle üretildiklerinden ve buna bağlı olarak yüksek maliyetlerinden ötürü günümüzde ticari olarak yaygın olmalarına karşın daha ucuz alternatiflerinin üretimi kaçınılmazdır. Bu bağlamda, organik malzemelerin, anorganik malzemelere göre, kolay işlenebilirlik, esneklik, estetik görünüm gibi avantalarının bulunması, bilim adamlarını organik güneş pili üretimi üzerine çalışmaya yöneltmiştir. Organik güneş pilleri konusunda gelişim sağlanamamasının en büyük sebeplerinden biri, bu tür malzemelerden üretilen güneş pilinin aktif tabakasının çok dar bir bölgede absorbsiyon yapmasından kaynaklanmaktadır.

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 ve Şekil 1.2'de avrupa ve ülkemizin güneşlenme durumu gösterilmiştir. 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



Şekil 1.1. Güneş radyasyonun Avrupa'daki dağılımı (PVGIS)



Şekil 1.2. Güneş radyasyonun Türkiyde'ki dağılımı (PVGIS)

enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi mümkün olmaktadır. Böylece, ısıl 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.

Avrupa Birliği, 2010 yılı için yenilenebilir enerji alanındaki stratejik hedeflerini şöyle belirlemiştir:1,000,000 fotovoltaik çatı (1000 MWp), 10,000 MW ilave rüzgar enerjisi kapasitesi, 10,000 MWth ilave biyokütle enerjisi kapasitesi enerji ihtiyacının tamamını yenilenebilir kaynaklardan sağlayacak pilot bölgelerin oluşturulması (1500 MW'lık bir artış). Bu hedeflerin gerçekleşmesi ile, CO2 emisyonlarında yıllık toplam 402 milyon tonluk bir düşüş sağlanacağı belirtilmektedir.

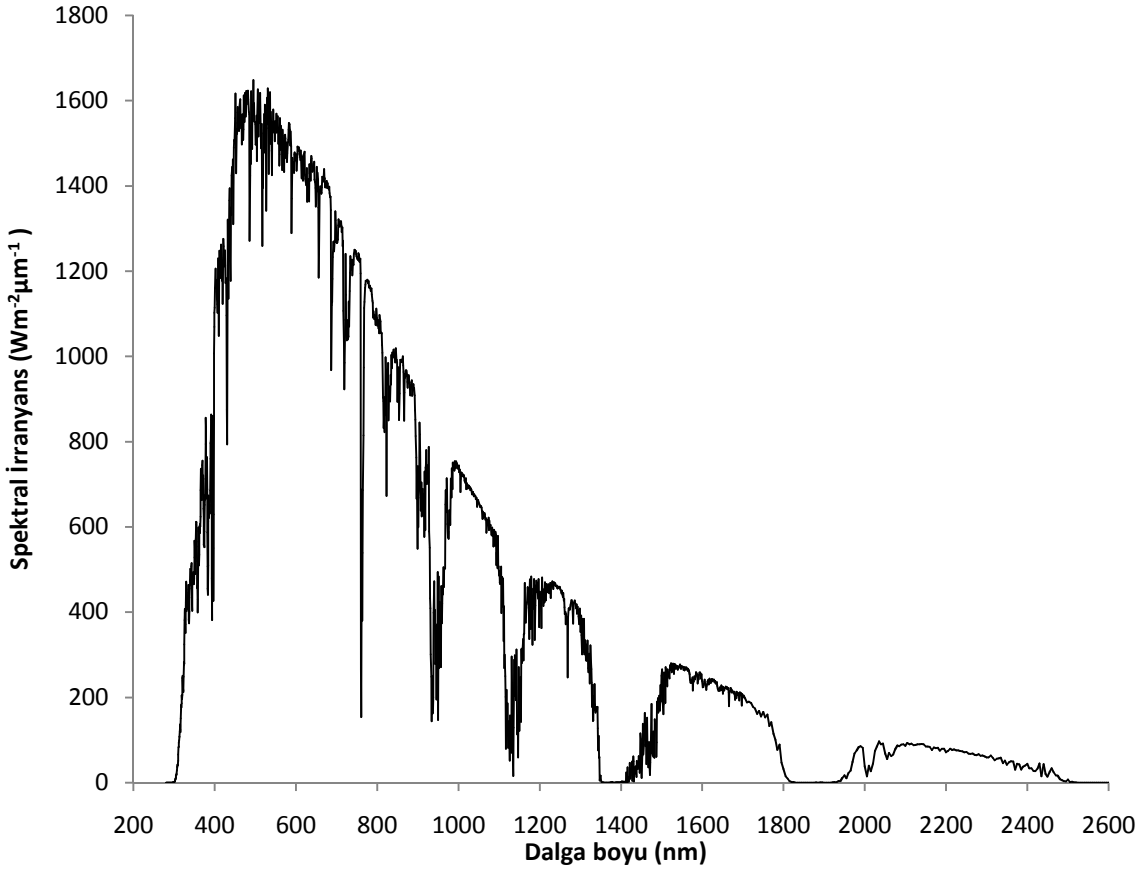
Fotovoltaikler, bu ihtiyacın önemli bir kısmını karşılayabilecektir. Her yıl dünya yüzeyi, mevcut enerji kaynaklarının (kömür, petrol, doğal gaz, uranyum) 10 katı kadar güneş enerjisi almaktadır. Bu enerji, tüm dünyanın yıllık enerji tüketiminin 15000 katıdır. Bu devasa ve kullanıma hazır tertemiz enerji kaynağı, çözmeye çalıştığımız enerji problemi için çok güçlü bir adaydır.

Nanoteknoloji, son yıllarda üzerinde önemli çalışmaların 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. Güneş Enerjisi

Dünyamızın da içinde bulunduğu "Güneş Sistemi" nin merkezini oluşturan güneşin yüzey sıcaklığı 5500 ^{o}C, çekirdek sıcaklığı ise 15,6 milyon ^{o}C civarındadır. Güneşin kütlesinin 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

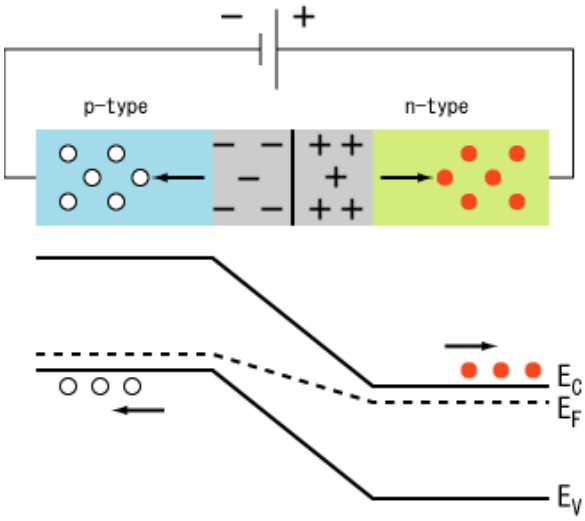
füzyon ile sağlamaktadır. Güneşte meydana gelen termonükleer enerjinin ancak 1/2000000 kadarı dünya üzerine ulaşabilmektedir. Dünya atmosferi dışında ışınım şiddeti yaklaşık 1300 W/m^2 iken dünya üzerinde bu değer 0-1100 W/m^2 arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 1.3). Bu düşüş, atmosferdeki oksijen, azot, ozon, su buharı gibi gazların ışınımı yutmasından ileri gelmektedir. Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşması 8,44 dakika sürmektedir.



Şekil 1.3. Global solar spektrum (NREL)

1.2. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, üzerine düşen ışığı direkt olarak elektriğe çeviren aygıtlardır. Yarı iletken diyot olarak çalışan güneş pilinde, ışığın elektriğe dönüşmesi fotovoltaik etki ile olmaktadır. Fotovoltaik etki, bir malzemenin ışığa maruz kalmasıyla bazı elektronların daha yüksek seviyeli yörüngelere yerleşmesi ve bunun sonucunda da bir gerilim meydana gelmesidir. Güneş pilleri yüzey geometrisi olarak genellikle kare, dikdörtgen veya daire şeklinde üretilirler. Alanları 100 cm^2 civarında, kalınlıkları da 0,2- 0,4 mm arasındadır. İstenilen seviyede güç elde etmek için güneş pilleri birbirlerine seri ya da



Şekil 1.4. Bir P-N eklemde fotovoltaik etki

paralel bağlanarak güneş pili modülleri oluşturulabilir. Bu modüller de birbirleriyle bağlanarak daha fazla güç elde edilmesi sağlanabilir. Güneş pilleri DC elektrik üretir fakat kullanım ihtiyacına göre invertörler ile AC elektriğe dönüştürülebilir.

Güneş ışığının içindeki foton denilen enerji bu birleşmiş malzemeye yansıdığında, elektronları serbest bıraktıracaktır. Serbest kalan elektronların yeri de boş kalacaktır. Eğer bu olay birleşme alanı akınında oluyorsa elektronlar “n” tipe, boşluklarda “p” tipe geçecektir. Eğer bu iki parça bir iletkenle birbirine bağlanırsa, elektronlar tekrar eski yerine, deliklerde eski yerine döneceklerdir. Elektrik enerjisinin temel prensibi olan bu elektron hareketinden dolayı akım, elektrik alanından dolayı da voltaj elde edilir. Bu döngü ışık olduğu sürece devam eder. Şekil 1.4’te fotonların oluşturduğu elektron hareketini göstermektedir (Özgeçmen,2007).

Güneş pilleri, iletim hatlarıyla elektriğin taşınmasının zor veya yüksek maliyetli olduğu orman gözetleme kuleleri, deniz fenerleri, yerleşim merkezlerinden uzakta olan evler, 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 portatif ve mobil elektrik kaynağı olarak kullanılmaktadır.

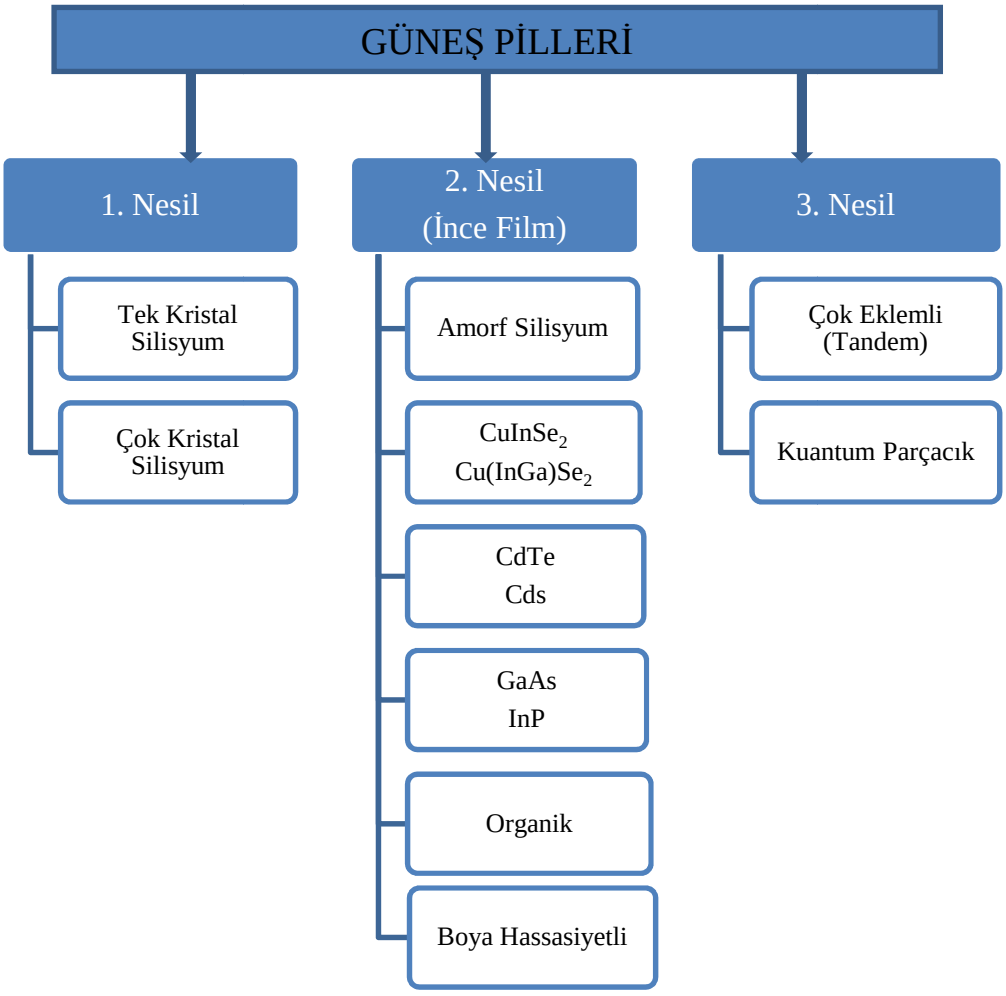
1.2.1. Güneş pili çeşitleri

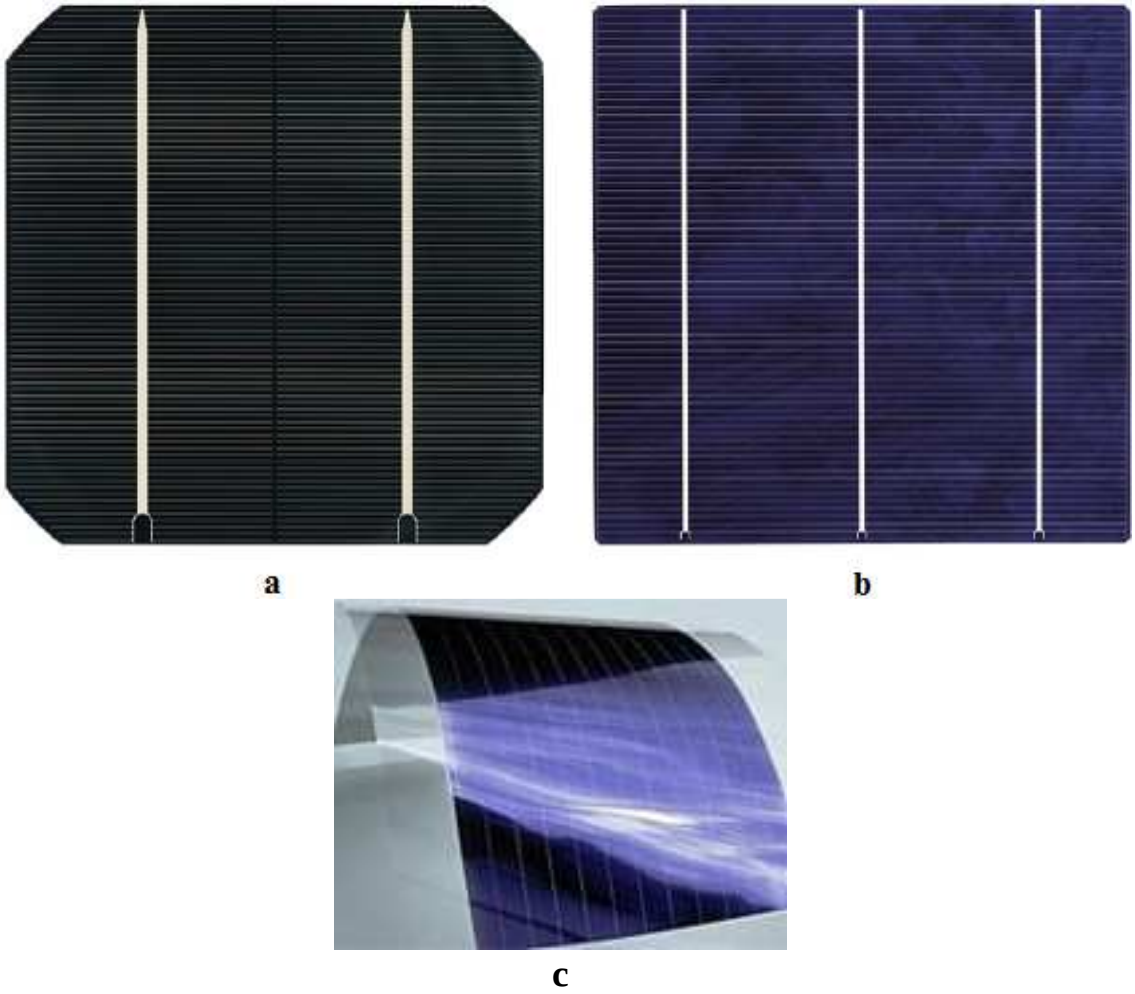
Güneş pillerinin kullanılan malzeme tipine göre birçok çeşidi mevcuttur. Bunlar Tablo 1.1.’de verilmiştir.

1.2.1.1. Tek kristal silisyum güneş pilleri

Güneş pillerinde en çok kullanılan malzeme tek kristal silisyumdur. Bu tip malzemeyle 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 Chrozalski kristal çekme tekniği 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 1.4a).

Tablo 1.1. Güneş pili çeşitleri





Şekil 1.4. a) Tek kristal silisyum b) Çok kristal silisyum (Saga, 2010, SANYO) c) Amorf silisyum esnek güneş pili (Comel)

1.2.1.2. 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 1.4b).

1.2.1.3. 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 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 1.4c).

1.2.1.4. Diğer ince film güneş pilleri

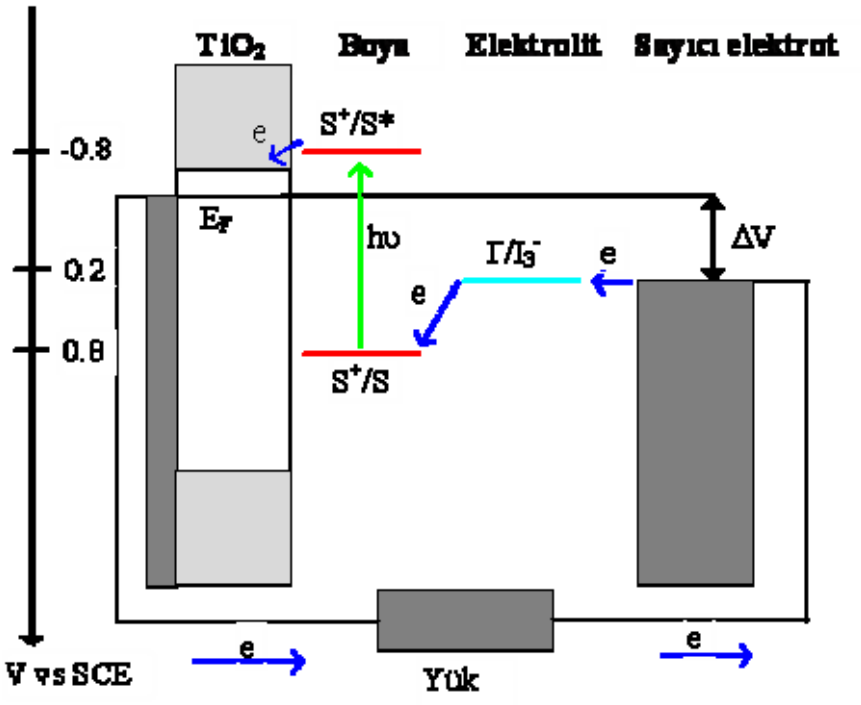
İnce film güneş pilleri bir veya daha fazla fotovoltaik katmanın bir alt katman üzerinde biriktirilmesiyle oluşur. Oluşan filmin kalınlığı birkaç nanometreden mikrometre seviyesine kadar değişkenlik gösterir. Kullanılan fotovoltaik materyale göre sınıflandırılırlar. Bakır indiyum selenür(CIS), bakır 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.

1.2.1.5. 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 karşıt elektrottan oluşur. Işığın soğurulması boya molekülleri tarafından, yük ayrışması da yarı iletken-elektrolit arayüzeyinde boyadan TiO_2'ye elektron enjeksiyonu ile gerçekleştirilir (Halme, 2002).

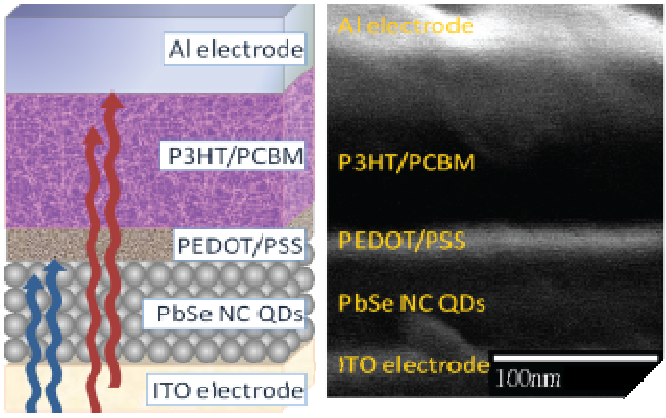
Organik boya esaslı güneş pilinin çalışmaya başlaması, ışığın nano-kristal titanyum oksit üzerine adsorblanmış olan boya molekülleri tarafından soğurulması ile olmaktadır. Işığı soğuran boya uyarılmış hale geçmektedir. Uyarılan boya molekülü bir elektronunu titanyum oksidin iletkenlik bandına (CB) enjekte etmektedir. Enjekte edilen elektronlar, TiO_2 filmindeki nanokristal yapılı ağ boyunca ilerleyerek saydam elektroda ulaşmakta, buradan da dış devreye geçmektedirler. Bir elektronunu TiO_2'in iletkenlik bandına aktarmasıyla oluşan boya katyonları redoks çifti içeren elektrolit tarafından nötral hale indirgenmektedir. Yükseltgenen elektrolit ise dış devre üzerinden platinlenmiş elektroda gelen elektron tarafından indirgenmektedir (Şekil 1.5). Bu şekilde organik boya esaslı güneş pilinin çalışması sırasında net yük her zaman sıfırdır ve kimyasal olarak bir değişme meydana gelmemektedir. Bu elektron aktarım süreçleri sonunda foto-akım meydana gelmektedir. Organik boya esaslı güneş pilinde sürekli akım elde etmek için redoks reaksiyonlarının sürekli tekrarlanması gerekmektedir. (Zafer,2006)



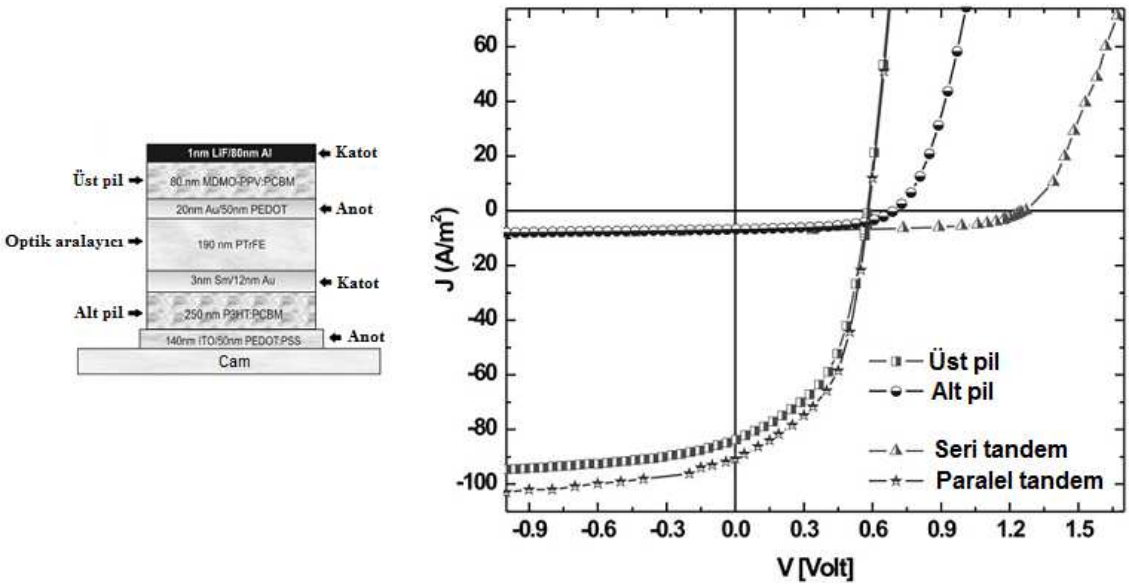
Şekil 1.5. Boya hassasiyetli güneş pilinin yapısı

1.2.1.6. 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 piline göre daha fazla verim elde edilmiş olur. Katmanlar organik, inorganik veya organik/inorganik (hibrit) olabilir (Şekil1.6). Paralel ve seri olmak üzere iki farklı biçimde bağlantı yapılabilir. Paralel bağlantılarda, ara elektrotlar her münferit pilden yük toplanmasını sağlarlar. Bu elektrotlar foton kayıplarını en aza indirgemek için 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 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 (Şekil 1.7).



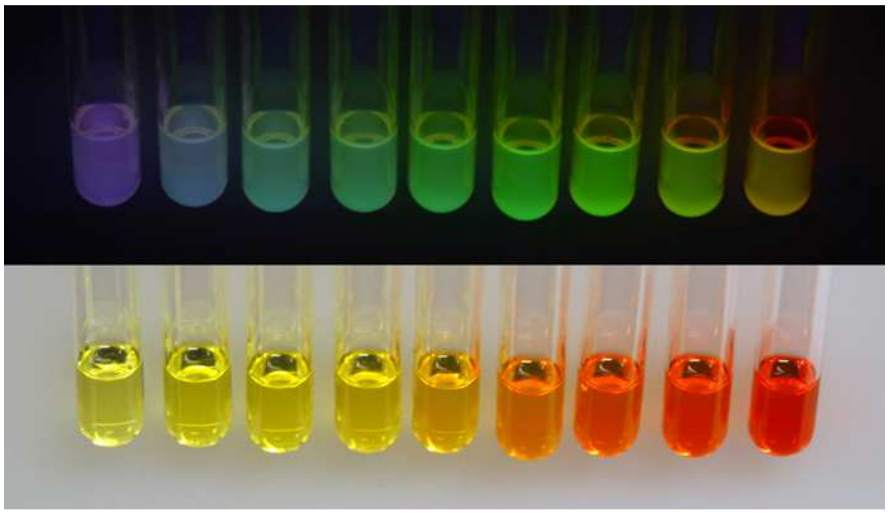
Şekil 1.6. İnorganik tandem güneş pili (Kim,2011)



Şekil 1.7. Organik tandem güneş pilinde I-V grafiği (Hadipour ve ark., 2008)

.2.1.7. 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 (Şekil 1.8). 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. Verimleri %5 civarındadır



Şekil 1.8 UV ışık(üstte) ve ortam ışığı altındaki(altta) CdSe kuantum parçacıklar (Parçacık boyutu sağa doğru artmaktadır) (UW MRSEC)

2. 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 tavlanmasının P3HT:PCBM'in absorbsiyon karakteristiğini olumlu yönde etkileyerek fotovoltaik 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 fill faktörü değerleri ise birbirine yakın çıkmıştır. Spin kaplama işleminde klorobenzenli çözeltinin toluenli çözeltiye göre daha iyi faz dağılımı sağladığı gözlenmiştir. Ayrıca toluen içerisinde çözünen PCBM konsantrasyonu optimum değerin üzerine çıkarıldığında fotoakımın doyuma ulaştığı, klorobenzen içerisinde çözünen PCBM konsantrasyonu optimum değerin 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 ^{o}C ile 180 ^{o}C arasında değişen sıcaklıklarda ve 0 dk. ile 60 dk. arasında değişen sürelerde tavlama yapmışlar ve fill faktörü ile verimin en yüksek

olduğu sıcaklığı 150 ^{o}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 absorbsiyonun artmasına ve daha fazla yük taşıyıcısının oluşumuna bağlamışlardır.

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 kaldırıcı bir katman olarak vazife gördüğünü bu sayede, havaya maruz kalan pillerin ömrünü yaklaşık olarak iki kat artırdığını belirtmişlerdir.

Liu ve ark. (2009) heteroeklemli 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 fill faktöründe düşüş olmuştur. Bunun sebebinin de aktif katmandaki metalik SWCNT'nin çokluğundan ileri geldiğini belirtmişlerdir. %5'lik SWCNT karıştırılmış örneklerde ise kısa devre olmuştur.

Kalita ve ark. (2009) farklı oranlarda P3HT ve PCBM karışımından oluşan güneş pilleri yapmışlar ve bunların nano yapılardaki morfolojisini incelemişlerdir. Bu çalışmada 1:0.5,1:1 ve 1:2 oranlarında P3HT ve PCBM karışım yapmışlar ve 1:1 oranındaki karışımın diğerlerine göre 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 (anneal) yaptıkları güneş pillerinin tavlama (anneal) yapılmayan güneş pillerinden çok daha iyi pil performansı elde ettiklerini ve tavlama (anneal) yapılmış P3HT kompozit filmindeki PCBM nanokristallerinin oluşumu elektronlar için süzülme (perkolasyon) sağlayarak pil performansını artırdığını göstermişlerdir.

Kymakis ve ark. (2005) fonksiyonelleştirilmiş SWCNT ve P3OT'den oluşan karışımın fotovoltaik özelliklerini incelemişlerdir. ITO üzerine, yaptıkları kompozit solüsyonu spin yöntemiyle kaplamışlardır. Fonksiyonelleştirmeyi karbon nanotüpün çözünürlüğünü ve dağılımını artırmak için yapmışlardır.% 1 oranında kullandıkları SWCNT, polimer matriks içerisinde polimer-nanotüp birleşimi yaparak pilin fotovoltaik özelliklerini artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu birleşmeler, eksitonları ayırarak elektronların negatif elektrota taşınması için sürekli bir yol oluşturduğunu ve bunun sonucu olarak da elektron mobilitesini artırdığını belirtmişlerdir. Farklı oranlarda hazırladıkları polimer-nanotüp karışımları % 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 5 şeklinde olup fotoakım % 1 oranındaki karışıma kadar artıp sonra düştüğünü ve maksimum verimi de % 1 oranındaki karışımdan elde etmişlerdir. Daha yüksek oranlardaki karışımda fotoüretim oranının düşük olması fotoakımı sınırladığını ve eksiton üretiminin sadece polimerde oluştuğunu belirtmişlerdir.

Chen ve ark. (2010) P3HT:PCBM karışımın solvent tavlama süresince morfolojisini ve farklı oranlarda PCBM karıştırarak pil karakteristiğindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı oranlarda yaptıkları P3HT:PCBM'in1:1 oranındaki karışımdan diğer karışımlara göredaha iyi bir verim elde edildiğini ve P3HT'nin yüksek bir foton absorbe etme yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Karışımdaki bu oranlar fotovoltaik pillerdeki elektriksel özellikleri önemli bir şekilde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Termal tavlamayı 30 dakika 150°C'de yaparak P3HT:PCBM'in morfolojisini gözlemlemişler ve PCBM moleküllerinin karışımdan ayrıldığını incelemişlerdir. Ayrıca PCBM moleküllerinin yüksek bir mobiliteye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Stylianakis ve ark. (2010) SWCNT'yi kimyasal reaksiyonlardan geçirerek aminotiyofenle (AT)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'ninkimyasal değişimi pilin kısa devre akımını, fill faktörünü artırdığını ve diğer referans pillere kıyaslandığında verimde % 26'lık bir artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda SWCNT'nin kimyasal değişimi eksiton ayrım alanını genişlettiğini ve fotoaktif tabakadaki nanotüplerin dağılımından dolayı nanotüp boyunca elektron transferinin hızlandırdığını 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 pil performansını UV ışınlarından koruduğunu belirtmişlerdir.

Kymakis ve ark. (2007) farklı kalınlıklardaki SWCNT filmlerinin iletkenliğini ve geçirgenliğini inceleyerek güneş pili üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Film kalınlığının artmasına karşılık geçirgenliğin azaldığını ve en iyi fotovoltaik performansın % 64 geçirgenliğe, 362 Ω /sq direncine sahip olan 80 nm kalınlığındaki filmden elde ettiklerini belirtmişlerdir. Güneş pillerini karşılaştırdıklarında SWCNT elektrot, ITO elektrot ile aynı V_{OC} değerini gösterdiğini ama ITO elektrottan daha düşük açık devre akımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir SWCNT filminin geçirgenliğinin azalmasına rağmen ITO elektrotlu güneş piliyle aynı fotovoltaik performansı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bagienski ve ark. (2011) P3HT ve PCBM'den oluşan organik güneş pillerinin sıcaklığa bağlı etkilerini incelemişlerdir. P3HT'nin tavlanmasından sonra absorbesinin arttığını ve P3HT'de bazı kristalleşme oluştuğunu belirtmişlerdir. PCBM'in farklı sıcaklıklarda absorbesinde önemli bir değişiklik olmadığını, sıcaklıkla yapısının değişmediğini ve PCBM bu sıcaklıklarda kararlı bir sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Tavlanmamış P3HT:PCBM güneş pilinde verim başlangıçta düşükken sıcaklığın yaklaşık 60°C'ye artmasıyla veriminde artmaya başladığını ve P3HT'deki mobilite arttığından dolayı verimin arttığını belirtmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla tavlanmamış güneş pillerinde fotolüminesans ve absorbenin değiştiğini incelemişlerdir. Maksimum verim, kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, fill faktörü 140°C'de oluştuğunu ve açık devre voltajı diğer parametrelere göre düşük sıcaklıkta artmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Tavlanmamış P3HT:PCBM güneş pili soğutulduğunda maksimum verim 20°C'de, maksimum akım yoğunluğu 60°C'de, açık devre voltajı sıcaklığın lineer bir şekilde azalmasıyla artıp maksimum -10°C'de ve maksimum fill faktörü 80°C'de oluştuğunu 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 FF'nin azalmasına rağmen akım yoğunluğundan dolayı verimin arttığını gözlemlemişlerdir. P3HT matrix bir yapıya CNT ilave edildiğinde polimerin yapısına zarar vermediğini ve P3HT'nin yapısını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Kymakis ve ark. (2002) SWCNT ve P3OT arasındaki yapısal etkileşimi inceleyerek SWCNT'nin farklı yoğunluklardaki elektriksel iletkenliğini araştırmışlardır. SWCNT'nin karışımdaki yoğunluğu % 12'yi aştığında elektrik iletkenliğinin arttığını ve % 12'nin altındaki değerlerde nanotüpler elektriksel iletkenlikle izole edildiğini gözlemlemişlerdir. SWCNT'nin polimer yapıya karıştırılması iletkenliği beş kat daha artırdığını ve nanotüp içeriğinin polimerdeki dielektrik ile elektriksel tepkimeyi değiştirdiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada iletkenliğin artmasını perkolasyon teorisiyle açıklamışlar ve deneysel verileri perkolasyon teorisinde kullanarak perkolasyon başlangıcını % 11 oranında bulmuşlardır.

Li ve ark. (2007) SWCNT'nin sulu solüsyonu ile tolüen içerisindeki C_{60}'ın karışımını mikrodalga ışınımıyla gerçekleştirerek P3HT'ye ilave etmişler ve yaptıkları bu karışımı fotovoltaik güneş pilinde fotoaktif tabaka olarak kullanmışlardır. P3HT: C_{60}, P3HT: C_{60} –SWCNT karışımlarını hazırlayarak morfolojisini incelediklerinde P3HT: C_{60} –SWCNT'nin yüzeyi P3HT: C_{60} tabakasının yüzeyinden daha pürüzlü olduğunu gözlemlemişlerdir. Pürüzlü bir yüzeyin aktif film ve katot tabakası arasındaki temas alanını etkili bir şekilde artırdığını ve iyi bir fill faktörüne yol açtığını belirtmişlerdir. Bu pilleri 120°C'de 10 dakika tavladıktan sonra Al kaplamışlar ve karanlık ölçümünü aldıklarında normal diyot karakteristiği elde etmişlerdir. Yaptıkları güneş pillerini 120°C ve 135°C'de 10 dakika tavlayarak pil performanslarını karşılaştırmışlar ve 120°C'deki tavlanan pilin performansının daha iyi çıktığını belirtmişlerdir. SWCNT eklenmeyen güneş pilinde polimer-C_{60} ara yüzeyinde yük ayrımı oluştuktan sonra elektronlar C_{60} molekülleri arasından atlayarak (hopping) yalnızca katoda doğru hareket ettiğini ve C_{60} molekülleri tarafından yakalanan elektronlar SWCNT'e geçtiğini gözlemlemişlerdir.P3HT: C_{60} –SWCNT fotovoltaik güneş pilinin verimini yapılan P3HT:PCBM pillerinin verimiyle karşılaştırdıklarında oldukça düşük çıktığını belirtmişlerdir. SWCNT'nin kompozit yapıya katılması kısa

devre akım yoğunluğunu artırdığı gibi aynı zamanda morfolojiyi değiştirdiğinden dolayı fill faktörünü iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Zhokhavets ve ark (2006) plastik güneş pillerinde aktif tabaka olarak kullandıkları P3HT:PCBM karışımının tavlama yapıldıktan sonra yapısını ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Tavlanmamış P3HT:PCBM karışımında kristal bir yapı bulunmadığı, tavlamadan sonra karışım içerisinde kısmen bir kristal yapı oluştuğunu ve bu kristalin 9,2 nm boyutunda olduğunu gözlemlemişlerdir. Fotolüminesans ölçümleriyle tavlamaya karşın polimer kristalleşmesini doğrulamışlardır. Polimer kristalleşmesinin düşük foton enerji bölgesindeki absorbsiyonu artırdığını ve optik anizotropideki artışı sağladığını gözlemlemişlerdir.

Baek ve ark. (2009) solvent içerisindeki P3HT:PCBM yoğunlunun fotovoltaik performanstaki etkisini ve aktif tabakanın faz ayrımını ve morfolojisini incelemişlerdir. Pillerin performansı, aynı kalınlıkta olmasına rağmen solvent içerisindeki aktif tabakanın yoğunluğuna bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. P3HT:PCBM'in % 1, % 2 ve % 3 oranındaki yoğunluklarını karşılaştırmışlar ve % 1 oranındaki yoğunluğun pil performansının daha iyi olduğunu ve tavlamadan sonra pil performansının arttığını gözlemlemişlerdir. Solventin yavaş buharlaştırılmasından dolayı P3HT:PCBM yoğunlunun azalması P3HT kristalleşmesini artırdığını, polimer zincirleri arasındaki etkileşimi güçlendirdiğini ve tavlamadan sonra yüksek oranda kristalleşmiş polimer elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Yamanari ve ark. (2006) termal tavlama ile farklı oranlardaki P3HT:PCBM 'in güneş piline etkisini incelemişler ve maksimum verimi 1:0,66 oranındaki karışımdan elde etmişlerdir. Termal tavlama pilin karakteristiğini artırdığını, fotoakımın bozulmasını önlediğini ve pil verimini artırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca termal tavlama, sürekli ışık altındaki güneş pilinin kararlılığını artırdığını incelemişlerdir. Güneş pilinin hava ortamına maruz kaldığında kısa devre akım yoğunluğunu bozduğunu ve termal tavlamanın ise bunu önlediğini gözlemlemişlerdir.

Vanlaeke ve ark. (2006) termal tavlamanın ve kompozit yapının organik güneş pilinin performansına etkisini incelemişlerdir. Farklı oranlarda yaptıkları P3HT:PCBM karışımdan en iyi pil verimini 1:1 ve 1:2 oranından elde etmişlerdir. Güneş pili tamamlandıktan sonra verimini artırmak için termal tavlama uygulamışlar ve optimum tavlama koşulunu 100 C 'de 5 dak. olarak belirlemişlerdir. Kısa devre akımı ve fill faktörü tavlamdan dolayı artarken açık devre voltajının azaldığını gözlemlemişlerdir. Tavlamanın kristalleşmeyi artırdığını ve P3HT'nin kristalizasyonu yalnızca

spektroskopik etkiye sahip değil aynı zamanda karışımın boşluk mobilitesini artırdığını gözlemlemişlerdir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla P3HT:PCBM'in boşluk mobilitesinin artması, P3HT'nin kristalizasyonun artmasına bağlı olarak açıklamışlardır.

Padinger ve ark. (2003) güneş piline yaptıkları tavlama ve uyguladıkları dc voltaj ile sıcaklığı artırarak yaptıkları çalışmada pilin performansını artırmışlar ve açık devre akımında önemli bir artış elde etmişlerdir. Voltaj uygulaması ve tavlama süreci polimerin kristalleşmesini ilerlettiğini ve kısa devre akımındaki artşın fotoaktif tabakadaki yük taşıyıcıların mobilitesini artırdığını gözlemlemişlerdir. Güneş pili tamamlandıktan sonra uyguladıkları gerilim 2,7 V ve optimum tavlama sıcaklığıda 75 C olarak belirtmişlerdir. Polimer güneş pillerinin fotoaktif tabakasında yer alan yüklerin düşük mobilitesinden dolayı pilin verimini sınırlandırdığını ve tavlamanın mobiliteyi artırdığını gözlemlemişlerdir. Tavlama ve gerilim uygulayarak yaptıkları güneş pilinin I-V grafiğini diğer pillerle karşılaştırdıklarında pil veriminin yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Guo ve ark. (2008) aktif tabakanın morfolojik özellikleri arasındaki ilişkileri incelemişler ve aktif tabakayı farklı koşullar altında kaplayıp karakterize etmişlerdir. Yavaş çözücü buharlaştırma (slow solvent vapor), hızlı tavlama (fast anneal) ve hiçbir işleme tabi tutulmayan (as-cast) üç farklı numuneler hazırlamışlardır. Bu numunelerin I-V grafiklerini karşılaştırmışlar ve yavaş çözücü buharlaştırma ile yapılan numunenin veriminin yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir. Yavaş çözücü buharlaştırma polimerin morfolojisini değiştirerek elektriksel karakteristiğini artırdığını gözlemlemişlerdir.

Nagata ve ark. (2011) UV-ozonun PEDOT: PSS'nin elektriksel özelliklerine etkisini incelemişlerdir. UV-ozon uygulamasıyla PEDOT: PSS'in hem iş fonksiyonunu hem de direncini artırmışlardır. UV-ozon işleminden sonra PEDOT: PSS'nin direncinin arttığını fakat yalnızca ozona maruz bıraktıklarında ise PEDOT: PSS'nin direncinin sabit kaldığını gözlemlemişlerdir. PEDOT: PSS'yi ozona maruz bıraktıklarında oksijen moleküllerinin şekillendiğini ve absorbe edilen oksijen molekülleri PEDOT: PSS'nin yüzeyinden elektronları çektiğini gözlemlemişlerdir. Absorbe edilen oksijen yüzeyde negatif yükler oluştururken yüzeyin altındaki tabakada pozitif boşluk-yük oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek bağlanma enerjisine doğru kaldırılan HOMO seviyesinin yüzey bölgesinde dipollerin oluştuğunu ve bu durumun da iş fonksiyonunu artırdığını belirtmişlerdir. UV-ozon uygulaması oksijenin tüm filme düzenli bir şekilde dağılmasını sağlayarak direnci ve iş fonksiyonunu artırdığını belirtmişlerdir.

Kim ve ark. (2009) polimer güneş pillerindeki PEDOT: PSS katmanına termal tavlamanın ve kalınlığın etkisini incelemişlerdir. PEDOT: PSS katmanı P3HT ve PEDOT: PSS arasındaki boşluk transferinin verimini artırdığını belirtmişlerdir. P3HT ve ITO arasındaki boşluk transferinin veriminin düşük olduğunu ve bunun nedenin de ITO'nun iş fonksiyonunun P3HT'den düşük olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. PEDOT: PSS film kalınlığının güneş pilinin performansına herhangi bir etki yapmadığını ve tavlamanın pilin karakteristiğini değiştirdiğini ancak tavlamanın iş fonksiyonunu düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. İletkenliğin, tavlama sıcaklığının 100°C'nin üstüne çıkıncaya kadar artığını ve bundan sonraki tavlama sıcaklıklarında ise iletkenliğin azaldığını belirtmişlerdir. 100°C ve 200°C arasındaki tavlama sıcaklığında polimerin oksidasyon yapısının değiştiğini ve 200°C'nin üstündeki sıcaklıkta ise filmin bozulmasına yol açtığını ileri sürmüşlerdir. PEDOT: PSS'nin kullanılması güneş pilinin verimini artırdığını belirtmişlerdir.

Balderrama ve ark. (2011) farklı koşullar altında P3HT:PCBM hazırlayarak güneş pilindeki etkisini incelemişlerdir. Karışımdaki bileşenlerin faz ayırımı aktif tabakada farklı bölgelerin oluşmasına sebep olduğunu ve bu farklı bölgelerin ise;

PCBM bölgesinin Al elektrot ve P3HT ile teması

PCBM bölgesinin PEDOT: PSS elektrot ve P3HT ile teması

PCBM bölgesinin her iki elektrot ile teması olmayıp P3HT ile çevrili olması

PCBM bölgesinin her iki elektrot ve P3HT ile teması olduğunu belirtmişlerdir.

PCBM, Al elektrot ve P3HT ile temas ettiğinde P3HT'den elektronları alarak Al elektrotta ve boşluklarında PEDOT: PSS katmanında toplandığını belirtmişlerdir. Pillerin uzun süre hava ortamında kaldığında polimerin su ve oksijenle etkileşimi yük yoğunlunu ve mobiliteyi azalttığından dolayı pilin ömrünü sınırladığını belirtmişlerdir.

Huang ve ark. (2009) tavlama sürecinin fotovoltaik güneş pillerine etkisini incelemişlerdir. Saf P3HT'nin soğurması 10 dakika tavlamadan sonra iki katına kadar çıktığını ve sonra tavlama süresinin artmasıyla yavaş yavaş arttığını gözlemlemişlerdir. Saf PCBM, 60 dakika tavlandıktan sonra C_{60}'ın toplanması soğurmayı azalttığını ve P3HT:PCBM karışımında tavlamanın soğurmayı artırdığını gözlemlemişlerdir. P3HT:PCBM karışımı 60 dakika 140°C'de tavlandıktan sonra soğurmanın ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir. Güneş pillerinin tavlanması pilin performansını artırdığını ve ayrıca yeniden birleşim kayıplarını azaltıp akım yoğunlunu artırdığını gözlemlemişlerdir. 60 dakika 140°C'de tavlama süresince güneş pilinin performansının düştüğünü ve bunun nedenini olarak da pilin performansını zayıflatan, kısa devre

oluşumunu artıran PCBM'lerin geniş bir alanda toplanmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Derbal-Habak ve ark. (2011) P3HT:PCBM içerisine farklı oranlarda SWCNT ekleyerek güneş pilin performansını ve optiksel özelliklerini incelemişlerdir. SWCNT oranlarının değişmesiyle performansın da değiştiğini gözlemlemişlerdir. Fotoaktif tabakadaki düşük oranda SWCNT'nin tavlamadan önce kullanımı akım yoğunluğunu artırdığını ve bu artışın P3HT ile SWCNT arsındaki etkileşimden dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Tavlamadan sonra standart güneş pilinde verim aynı şekilde kalırken SWCNT'nin eklenmesiyle verimin arttığını gözlemlemişlerdir. SWCNT'nin farklı oranlarda karışıma katılmasıyla kompozit yapının soğurum spektrumunu değiştirdiğini ve absorbsiyon yoğunluğunu artırdığını belirtmişlerdir. SWCNT ile polimer arasındaki etkileşiminden kovalent bağın oluşmaması konjuge polimerlerin kristalizasyonunu sağlayarak boşluk mobilitesini ve güneş pilinin performansını artırdığını belirtmişlerdir.

3. ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ

3.1.Işığın Tanecik Modeli

Işığın tanecik modeline göre ışık foton adı verilen çok küçük taneciklerden meydana gelmiştir. Bu tanecikler çok küçük yapıya sahip olup kaynaklardan oldukça fazla çıkarlar. Tanecik modelinin bazı ışık olaylarını açıklamada yeterli ve başarılı olmasının yanı sıra bazı olaylarda başarılı olamamıştır. Şimdi tanecik modeline göre, ışığın bazı davranışlarını açıklayalım.

3.1.l. Işığın Yayılması:

Işık doğrusal yolla yayılıp boşluktaki hızı ~3.10^5 km/sn dir. Tanecik modeline göre fotonlar oldukça küçük olup hızı çok yüksek olduğundan yörüngeleri doğrusaldır. Tanecik yavaş hareket ettiğinde parabolik yörünge çizer.

3.1.2. Işığın Birbiri içinden Geçmesi:

Işık ışınları birbiri içinden birbirlerini etkilemeden geçerler. Tanecik modeline göre de tanecikler çok küçük ve hızlı olduklarından birbirleri içinden geçerler.

3.1.3. Işığın Yansıması:

Işık bir yansıtıcı yüzeye düşünce yansımaya uğrar. Aynı şekilde tanecik modeline göre fotonları pin-pong topuna benzetirsek bir yüzeye çarptığında yansımaya uğrar.

3.1.4. Aydınlanma:

Birim yüzeye düşen ışık miktarı o yüzeydeki aydınlanmayı verir. Aynı şekilde tanecik modeline göre birim yüzeye düşen foton sayısı o yüzeydeki aydınlanma şiddetini verir.

Işık kaynağından uzaklaşıldıkça aydınlanma azalır. Tanecik modeline göre aydınlanmanın azalması ters kare kanunu (aydınlanma uzaklığın karesi ile ters orantılıdır.) gereği izah edilir, örneğin kaynaktan 2 kat uzağa gidilince aydınlanma

dörtte birine düşer. Kaynaktan d uzaklığında aydınlanma E ise 2 d uzaklığında $\frac{E}{4}$ dür. Çünkü yüzeyden geçen tanecik sayısı dörtte birine düşer.

3.1.5. Işık Basıncı:

Nasıl ki duvara fırlatılan bir top basınç uygularsa, tanecik modeline göre taneciklerden oluşan ışıkta düştüğü yüzeye basınç uygular. Işık basıncı dünyada fark edilemeyecek kadar az olmasına rağmen güneşin yüzeyine yakın yerlerde dünyaya göre oldukça fazladır. Işık basıncı aydınlanma ile doğru orantılı olup Radyometre denilen aygıtla ölçülür.

3.1.6. Işığın Soğurulması:

Işığın vurduğu yüzeyden yansımayıp tutulması olayına soğurulma denir. Koyu renkli cisimler açık renkli cisimlere göre ışığı daha çok tutarlar. Dolayısıyla koyu renkli cisimler açık renkli cisimlere göre daha çok ısınırlar, örneğin; üzerine kül dökülmüş kar, hiçbir şey dökülmemiş kardan daha erken erir. Koyu elbise açık elbiseden daha sıcak olur. Onun için yazlık elbiseler genelde açık renkli olmalarına rağmen kışlık elbiseler biraz daha koyudur. Soğurulma olayı tanecik modeline göre; çekicin çelik bilyeye vurulunca sıçraması, yumuşak demire vurulunca demirin ezilip çekicin sıçramaması şeklinde izah edilir. Çelik bilye beyaz zemin yumuşak demir siyah zemin gibi kabul edilir.

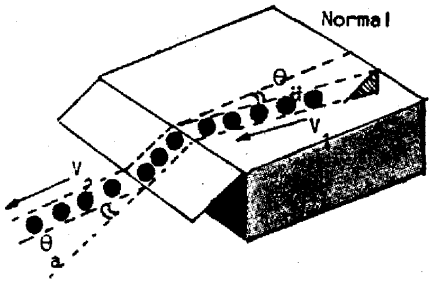
3.1.7. Işığın Kırılması:

Işığın tanecik modelinin başarı ile açıklandığı olaylardan biridir. Bu modelin olaya uygunluğunu anlamak için açılar ve indisler arasındaki ilişkiyi kurmak için bir deney sistemi kuralım. Şekil 3.1'deki kutunun üzerinden V1, hızıyla $\theta_{ü}$ açısı altında yollanan bilyanın, alt yüzeyde V_2 hızı ile θ_a açısı altında hareketi görülmektedir. $\theta_{ü}$ gelme açısı, θ_a kırılma açısı olarak düşünülürse ışık için bu olay az kırıcı ortamdan çok kırıcı ortama geçen bir ışını temsil edebilir.

O halde; kutunun üst yüzeyi az kırıcı (hava) alt yüzeyi çok kırıcı (cam) ortamlara eşdeğer sayılabilir. Modelde yapılan çeşitli deneyler, bu açıların sinüsleri arasındaki oranın sabit olduğunu göstermiştir.

$$\frac{\text{Sin } \theta_{ü}}{\text{Sin } \theta_{a}} = \text{Sabit} \qquad \frac{\text{Sin } \theta_{ü}}{\text{Sin } \theta_{a}} = \frac{V_1}{V_2} = \text{Sabit (kırılma yasası)}$$

Modelin kırılma yasasına uymasına rağmen alt yüzeyde bilyanın daha hızlı hareket ettiğine inanıyorsak, $V_2 > V_1$ için $\frac{V_1}{V_2} > 1$ sonucuna varılır. Ancak deneysel sonuçlar, kırıcı ortamda hızın daha küçük olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Kırılma olayının gösterildiği şematik resim

3.2. Fotoelektrik Olayı

Işığın metal yüzeylerinden elektron sökmesine fotoelektrik olay, sökülen elektronlara ise fotoelektron adı verilir. Fotoelektronların oluşturacağı elektrik akımına ise fotoelektron akımı adı verilir. Fotoelektron akımı fotoelektronların sayısı ile doğru orantılıdır.

Işığın yüzeyden elektron sökebilmesi için dalga boyunun belli bir değerin altında olması gerekir. Dalga boyunun küçülmesi frekansın büyümesi ile mümkündür.

v → ışık hızı
λ → ışığın dalga boyu
f → ışığın frekansı

$\lambda = \frac{v}{f}$ olup λ nın küçülmesi için f nin artması gerekir. Çünkü; ışık hızı (v) sabittir.

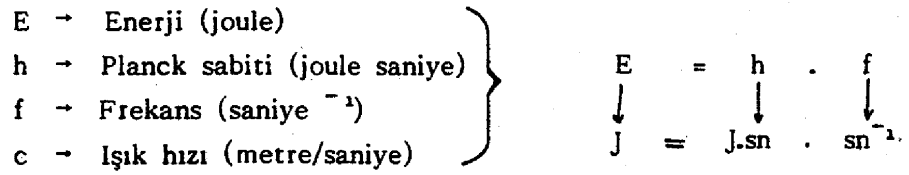
Fotoelektronların sayısı, dolayısıyla fotoelektrik akımı, ışık akısı ile doğru orantılıdır. Işık akısı arttıkça sökülen elektronların sayısı da artar.

Işık bir elektronu metalden kopardıktan sonra artan enerjisini elektrona kinetik enerji olarak aktarır. Bu kinetik enerji ışığın frekansı ile doğru orantılıdır. Frekans arttıkça ışığın enerjisi artacağından fotoelektronların kinetik enerjisi de artar.

3.2.1.Einstein'in Fotoelektrik Denklemi

Bilim adamı Planck'a göre ışık kaynaklarından kuantum veya foton adı verilen tanecikler salınır. Bu tanecikler birer enerji paketleri şeklinde olduğunu Enstein daha da geliştirerek fotoelektrik olayını açıkladı.

Planck'a göre bir ışık kuantumunun enerjisi E = h.f bağıntısı ile bulunur.



Burada h Planck sabiti olup, değeri h=6,62.10 J.sn dir. Diğer bir enerji birimi de elektronvolttur. (eV)

l Elektronvolt (eV): Bir elektronun l voltluk potansiyel farkı altında kazandığı enerjidir. leV = $1,6.10^{19}$ J ve lJ = $6,25.10^{18}$ eV dur.

E = h $\frac{c}{\lambda}$ bağıntısında h.c çarpımı sabittir.

h.c = $6,62.10^{-34}$ J.sn.3.10^{8}m/sn = $19,86.10^{-26}$J.m = 12400 eV.A° dur. Böylece E = h $\frac{c}{\lambda}$ bağıntısı; E = $\frac{12400.eV.A^{0}}{\lambda}$ şeklini alır.

3.2.2.Bağlanma (Eşik) Enerjisi:

Bir foton yüzeye çarptığı zaman enerjisini yüzeyin bir tek elektronuna verir ve kendisi kaybolur. Fotonun enerjisinin bir kısmı elektronu sökmek için diğer kalan kısmı ise elektrona kinetik enerji kazandırmak için aktarılır. Fotoelektronların yüzeyden sökülmesi için gerekli en küçük enerjiye bağlanma enerjisi ve eşik enerjisi adı verilir. Bir fotonun enerjisi bağlanma enerjisinden (Eb) az olursa yüzeyden elektron sökemez. Örneğin; fotonun enerjisi 5eV, bağlanma enerjisi 6eV ise yüzeyden elektron sökülemez. Fotonun enerjisi 5eV, bağlanma enerjisi 3eV ise fotoelektronların kinetik enerjisi 5eV - 3eV = 2eV olur.

3.2.3.Eşik Frekansı (fc) ve Eşik Dalga boyu (XB):

Bir yüzeyden elektron sökebilecek minimum enerjili fotonun frekansına eşik frekansı, dalga boyuna ise eşik dalga boyu adı verilir. Frekansı eşik frekansının altında olan fotonlar elektron sökemezler. Yukarıda da izah ettiğimiz gibi fotonun bağlanma enerjisinden fazla olan enerjisi elektrona kinetik enerji olarak aktarılır.

Einstein enerjisinin korunumundan giderek E = Eb + Ek denklemini çıkarmıştır. Bu denkleme Einstein'in genel fotoelektrik denklemi denir. (Ek = Kinetik enerji)

$$E = Eb + Ek$$

$$h.f = h.f_0 + \frac{1}{2} mv_m^2$$

Kinetik enerjisi Ek = $\frac{1}{2}$ mv^a olan fotoelektronu kesme potansiyeli sınırında hareketsiz tutan enerji kinetik enerjiye eşit olup, eV_k dir. Buna göre;

Kinetik enerji Ek = $\frac{1}{2}$ $m v_m^2 = eV_k$, olur.

Genel denklem ise $E = EB + eV_k$ şeklini alır.

Metalin yüzeyinden daha derinlerde sökülen elektronların hızları enerji kaybından dolayı yüzeyden sökülen elektronların hızlarına göre; daha az olur. Çünkü çarpışmalarla enerji kaybına uğrarlar.

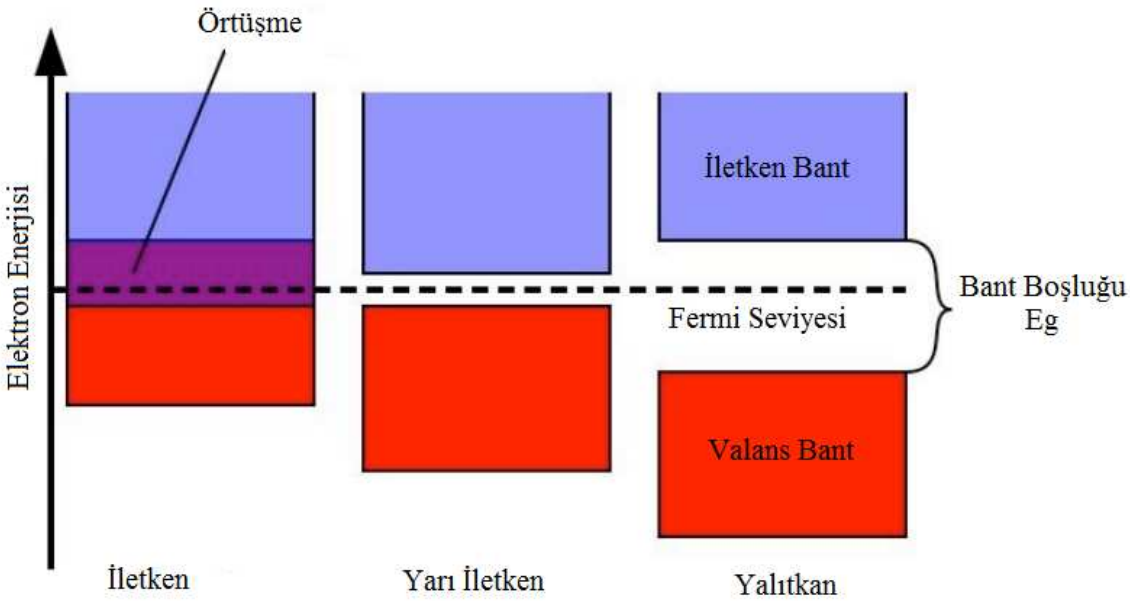
3.3. İletken Polimerler

Makro moleküller olarak bilinen polimerler manomer denen çok sayıda basit birimlerin birbirlerine eklenmesiyle oluşan yapılardır. Polimerler, yani plastikler metallerin aksine yalıtkan ve elektriği iletmeyen maddeler olarak bilinmekteyken Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid, Hideki Skirakawa isimli bilim adamları yaptıkları buluşlarıyla bir polimer olan poliasetilenin (polyacetylene) hemen hemen bir metal gibi iletken olabileceğini gösterdiler. Ayrıca polifenilenvinilen kullanılarak polimerik bazlı ışık yayma diyotu (PLED) (Burroughes,1990), organik boya sensörlü ilk güneş pili 1991 yılında (O'Reagen ve Gratzel, 1991) ve ilk polimerik güneş pili ise çift katmanlı olarak 1992 yılında üretilmiştir (Sariciftci,1992). Deneysel ve teokriksel çalışmaların büyük bir çoğunlu polimerlerin elektriksel, fiziksel, yapısal ve optiksel özellilerini

belirlemekteyken günümüzde biyosensörler, ışık yayan diyotlar, organik güneş pilleri, foto diyotlar, transistorlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Elektrik akımının elektronlarla iletilmesine elektronik (metalik) iletkenlik, iyonlar yardımıyla iletilmesine elektrolitik iletkenlik adı verilir. İletkenliğin birimi S cm-1' dir. Elektronik iletkenlik olan metallerin iletkenliği bant teorisi yardımıyla açıklanabilir. Bant teorisinde esas olan valans bant (değerlik elektronlarının bulunduğu bant) ile iletim bant (boş bant) arasındaki enerji farkından dolayı elektronlar valans banttan iletim banda geçerek bu hareketleriyle iletkenliği oluşturmaktadır. Elektronların valans banttan iletim banda geçme durumlarına göre malzemeler yalıtkan, yarı iletken ve iletken özelliği gösterirler. Şekil 3.2 malzemelerin bant yapısını göstermektedir. Bant teorisinde en düşük enerjili boş π^* banda iletim bandı (LUMO) ve en yüksek enerjili dolu π banda da valans bant (HOMO) denilmektedir. HOMO ve LUMO arsındaki enerji farkına bant boşluğu (bandgap) denilir ve Eg ile gösterilir. İletkenlerde bu boşluk sıfıra yakınken yalıtkanlarda elektronların geçişine olanak vermeyecek kadar büyük olduğundan elektrik iletkenliği yoktur. Yarı iletkenlerde ise elektronların geçebileceği büyüklüktedir.

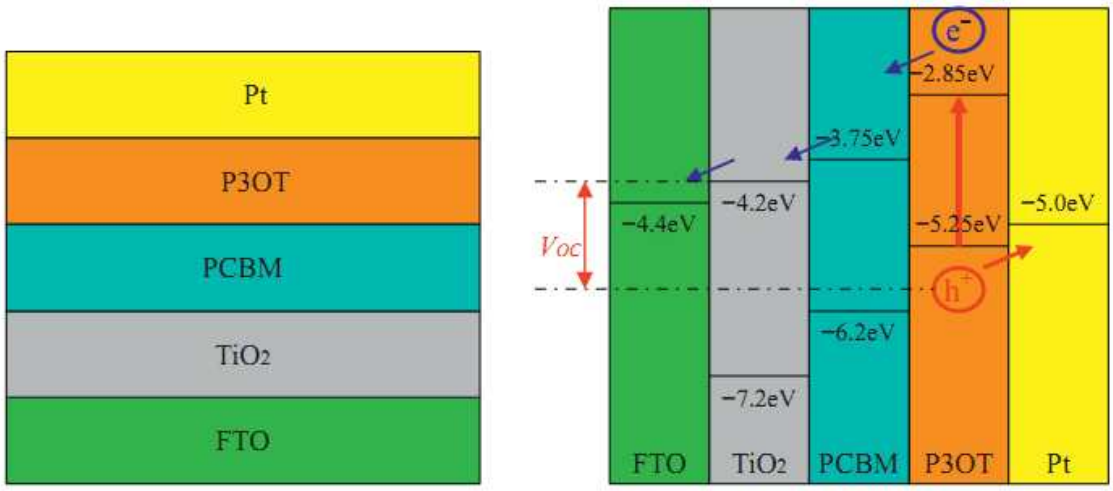
Konjüge polimerler, birbirilerine, ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, tekrarlanan gruplardan oluşmuş, uzun zincirli organik moleküler yapılardır. Tekli bağ σ-bağı (sigma) olarak adlandırılan kovalent bağdır. σ-bağı (sigma) ve π-bağından oluşan bağa çift bağ denmektedir. Konjugasyon olarak adlandırılan karbon atomları arsındaki tek ve çift bağların birbirini izlemesi polimere elektriksel özellikler kazandırmaktadır (Miller,2005). Konjüge 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). Konjüge polimerler yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptirler ve bunun için oksidasyon, tepkime veya asit-baz kimyasıyla doplanırlar (Salaneck,1999).



Şekil 3.2. İletken, yarı iletken, yalıtkan malzemelerin bant yapısı (Gourdin,2007)

Konjugasyon arttıkça HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkı azalacağı için iletkenlik artar. İletkenlik ise konjüge polimer zinciri üzerindeki yüklerin hareketleriyle olmaktadır. Konjuge polimerlerin ışığı absorbe etmesi sonucunda elektronlar π seviyesinden π^* seviyesine geçmesiyle birbirine Coulomb etkileşmine bağlı olan elektron-boşluk çifti denilen eksitonları oluşturmaktadır. Elektronlar HOMO seviyesinden LUMO seviyesine geçerken HOMO seviyesinde boşluk bırakırlar. Eksitonlar belirli bir bağlanma enerjisine sahip olduğundan yük taşıcıların elektroda ulaşmadan ayrılmaları gerekmektedir.

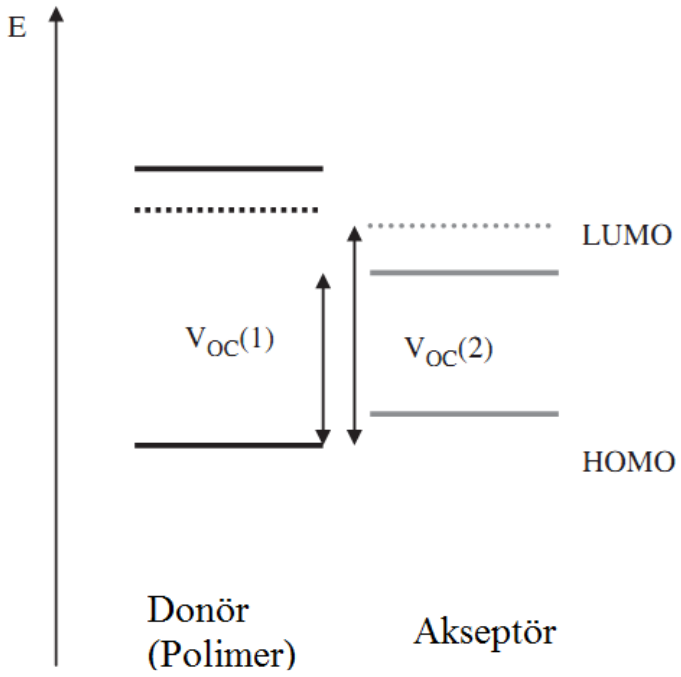
Eksitonların bağlanma enerjisi konjuge polimerleri ve organiklerin opto-elektronik özelliklerini anlamak için önemli bir parametredir. Eksitonların bağlanma enerjisi oldukça büyükse yük taşıyıcıların fotoüretimi endotermiktir. Fotovoltaik aygıtlarda eksiton bağlanma enerjisi küçük olmasına rağmen ışık yayan diyotlarda (LED) bu durum tam tersinedir (Schweitzer,2000).



Şekil 3.3. Hibrid güneş pilinin şematik diyagramı ve bu güneş pilinde kullanılan malzemelerin bant diyagramı (Peng,2011).

Ekisitonlar yaklaşık 0,4 eV bağlanma enerjisine sahip güçlü bağlardan oluşmaktadır ve bu bağlanma enerjisinden dolayı eksitonlar (elektron-boşluk çifti) ayrılmamak için direnç göstermektedirler. Konjuge polimerlerin çoğu düşük yük taşıcıyıcı mobilitesine sahip olduğundan elektronlar elektroda taşınmadan önce rekombinasyon olasılığını artırmaktadır. Rekombinasyon ve düşük yük taşıyıcı mobilite, polimer karışımlardan elde edilen güneş pillerinin performansını kısıtlamaktadır. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi P3OT eksiton denilen elektron-boşluk çiftini oluşturur ve daha sonra serbest yük taşıyıcı şeklinde ayırır. Elektronlar PCBM'in HOMO seviyesine ve TiO_2'in iletim bandına ve daha sonra FTO'ya (anot) taşınırken boşluklar karşı elektrot olan Pt'ye indirgenir. Burada V_{OC}, PCBM-P3OT'nin LUMO ve TiO_2'in iletim bandı arasındaki enerji farkından dolayı kaynaklanmaktadır (Peng,2011). V_{OC} donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanabilir. V_{OC} (1)'e sahip sıradan bir polimerde, Şekil 3.4'deki gibi donörün LUMO'su siyah çizgiden noktalı çizgiye kadar olduğundan V_{OC} bu durumda değişmez. Ancak düşük bant boşluğuna sahip bir akseptör ile birleştirildiğinde V_{OC} (2) olan açık devre voltajının artmasına sebep olur ve böylece yük ayrımı gerçekleştirilmiş olur. Geniş dalga boylarına sahip düşük bant boşluklu polimer malzemeler daha çok foton absorbe ederek V_{OC}'yi artırır ve buna bağlı olarak verimde artar. Burada elektronlar donörden akseptöre taşınırlar. Akseptör ve donörün LUMO seviyeleri elektron transferini gerçekleştirecek kadar yeterli uzaklıktadır. Organik güneş pillerinin enerji seviyelerinin dizilimi polimerden fullerene yeteri kadar yük taşımak ve yüksek bir V_{OC} elde etmek için oldukça önemlidir (Bundgaard,2007). Eksitonlar güneş enerjisi

dönüşümü için oldukça önemlidir. İstenilen fotovoltaik dönüşümün olması için eksitonların güçlü bir elektrik alanıyla ayrılması gerekmektedir. Organik yarıiletkenlerin çoğu boşluk iletkenliğine sahip ve yaklaşık optiksel bant boşluğu 2 eV'tur. Bu bant boşluğu silikonlardan oldukça yüksektir ve bu durum güneş spektrumunun toplanmasını sınırlandırmaktadır. Ancak organik yarıiletken malzemeler kimyasal sentez yoluyla kimyasal yapıları değiştirilebilir(Hoppe,2004).



Şekil 3.4. Organik güneş pillerinde enerji seviyesinin ayarlanarak V_{oc}'nin artışı (Bundgaard,2007).

3.4. Organik Güneş Pillerinin Fiziği

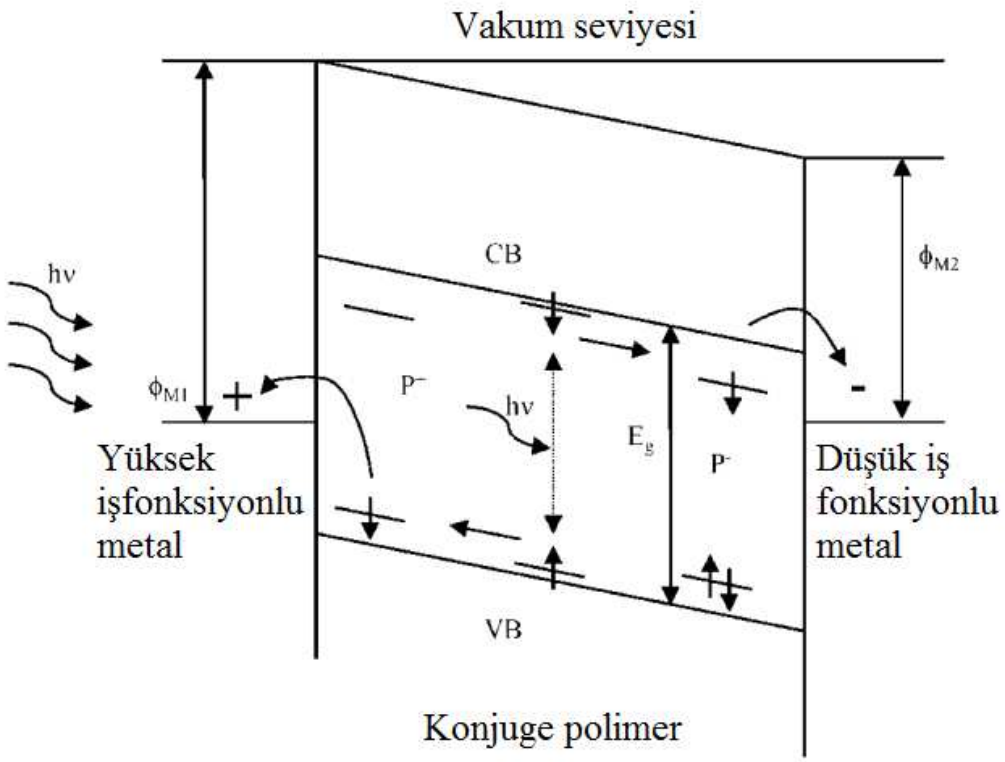
Organik güneş pillerinde ışığın elektrik akımına dönüşme süreci dört adımda gerçekleşmektedir. Elektron-boşluk çifti olan eksitonların oluşmasına yol açan fotonun emilimi, eksitonların polimer içerisinde yayılması, yük ayrımının oluşması ve yük ayrıştıktan sonra boşlukların anoda, elektronların da katoda taşınmasıdır. Ayrılmış olan pozitif ve negatif yüklerin bir çiftinde depolanan potansiyel enerji yüklerin fermi seviyelerinin farkına veya elektrokimyasal potansiyel farklarına eşittir. Elektronları elektroda ulaştırmak için yük taşıyıcılar bir itici kuvvete gereksinim duymaktadırlar. Genellikle bu itici kuvvet elektron ve boşlukların elektrokimyasal potansiyelindeki bir eğimden oluşmaktadır (Hoppe,2004).

Konjuge polimerlerde π-bağlarını oluşturan delokalize Pz – 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 yarıiletken 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 getirilmektedir. İletkenlik bandındaki elektronları ve valens bandındaki elektron boşluklarının serbest olduğu inorganik yarıiletkenlerdekinin tersine, organik yarıiletken malzemelerde uyarılmış haldeki elektronlar ile temel haldeki elektron boşlukları arasında zayıf bir kulonmbik bağ mevcuttur. Bu elektron-boşluk çiftine eksiton adı verilir ve organik yarıiletken malzeme içerisinde tek bir tür gibi hareket etmektedir. Eksiton difüzyon mesafesi organik malzemenin yapısına göre farklılık gösterirken genelde 10 nm civarındadır.

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 poly(p-phenylene vinylene) ve PT'nin (polythiophene) eksiton bağlanma enerjisi yaklaşık 0.4eV'tur (Conwell,1995). Bu yüzden yük taşıyıcıların elektroda taşınmadan ve toplanmadan önce eksitonların ayrılması gerekmektedir.

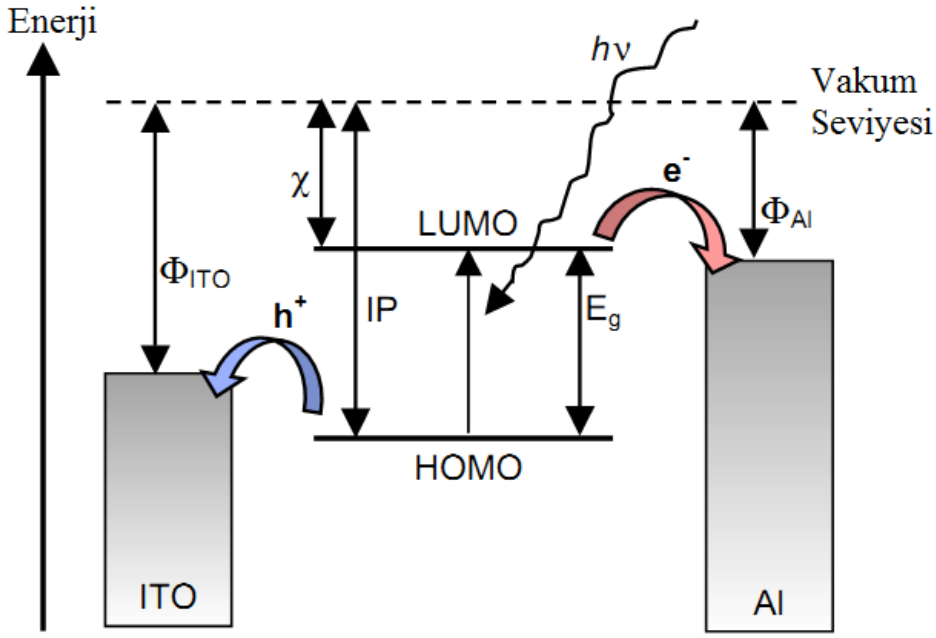


Şekil 3.5. MIM modelin kısa devre şartları altındaki tek tabakalı konjuge polimer pilin yük üretim süreci. VB valans bant, CB iletim bant, Eg bant boşluğu, P^+ ve P^- pozitif ve negatif polaronlar (Brabec,2001).

Tek tabakalı organik yarı iletken ince bir filmden elektronlar düşük iş fonksiyonlu metale, boşluklarda yüksek iş fonksiyonlu metale taşınmaktadır. Şekil 3.5 tek tabakalı konjuge polimerin yük üretim sürecini göstermektedir. Taşıma işlemi anot ve katodun 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 olukça 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,2001).

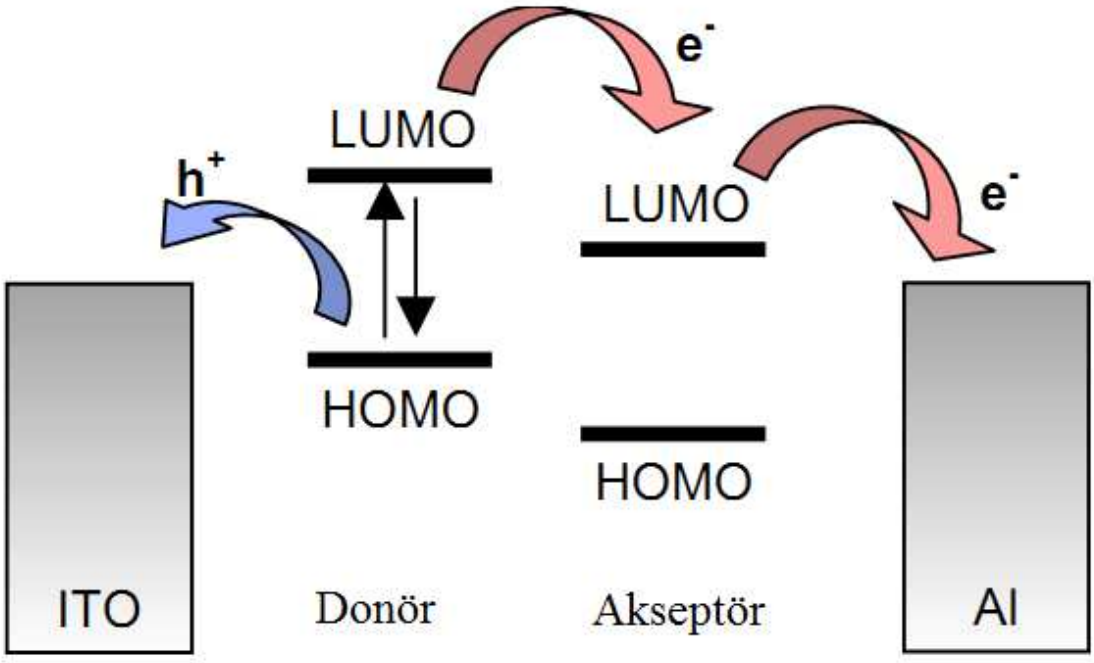
Bir foton hν enerjisine sahiptir ve eğer bu enerjinin bant boşluğu enerjisinden büyük olması halinde foton yarı iletken malzeme tarafından absorbe edilerek elektron arkasında boşluk bırakarak HOMO seviyesinden LUMO seviyesine çıkar ve eksiton

olarak şekillenir. Enerji seviyesi ve ışığın absorbe edilmesi sürecindeki işlemler Şekil 3.6'da 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 fonksiyonlarının asimetri olmasının nedeni elektron-boşluk çiftini ayırarak düşük iş fonksiyonlu elektrottan yüksek iş fonksiyonlu elektroda gitmelerini sağlamaktır (Spanggaard,2004).



Şekil 3.6. Enerji seviyesi ve ışığın toplanması. Elektronun HOMO seviyesinde boşluk bırakıp LUMO seviyesine yükselmektedir. Elektronlar Al elektrotta, boşluklar ise ITO elektrotta toplanmaktadır. Φ:İş fonksiyonu, χ:Elektron ilgisi, IP: İyonlaşma enerjisi, Eg: Bant boşluğu (Spanggaard,2004).

Tek polimer tabaka ve iki elektrottan yapılan tek tabakalı güneş pillerinden yeterli bir verim elde edilemedi. Çünkü iki elektrotun 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. C_{60} türevleri, CdSe, TiO_2 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,2004).



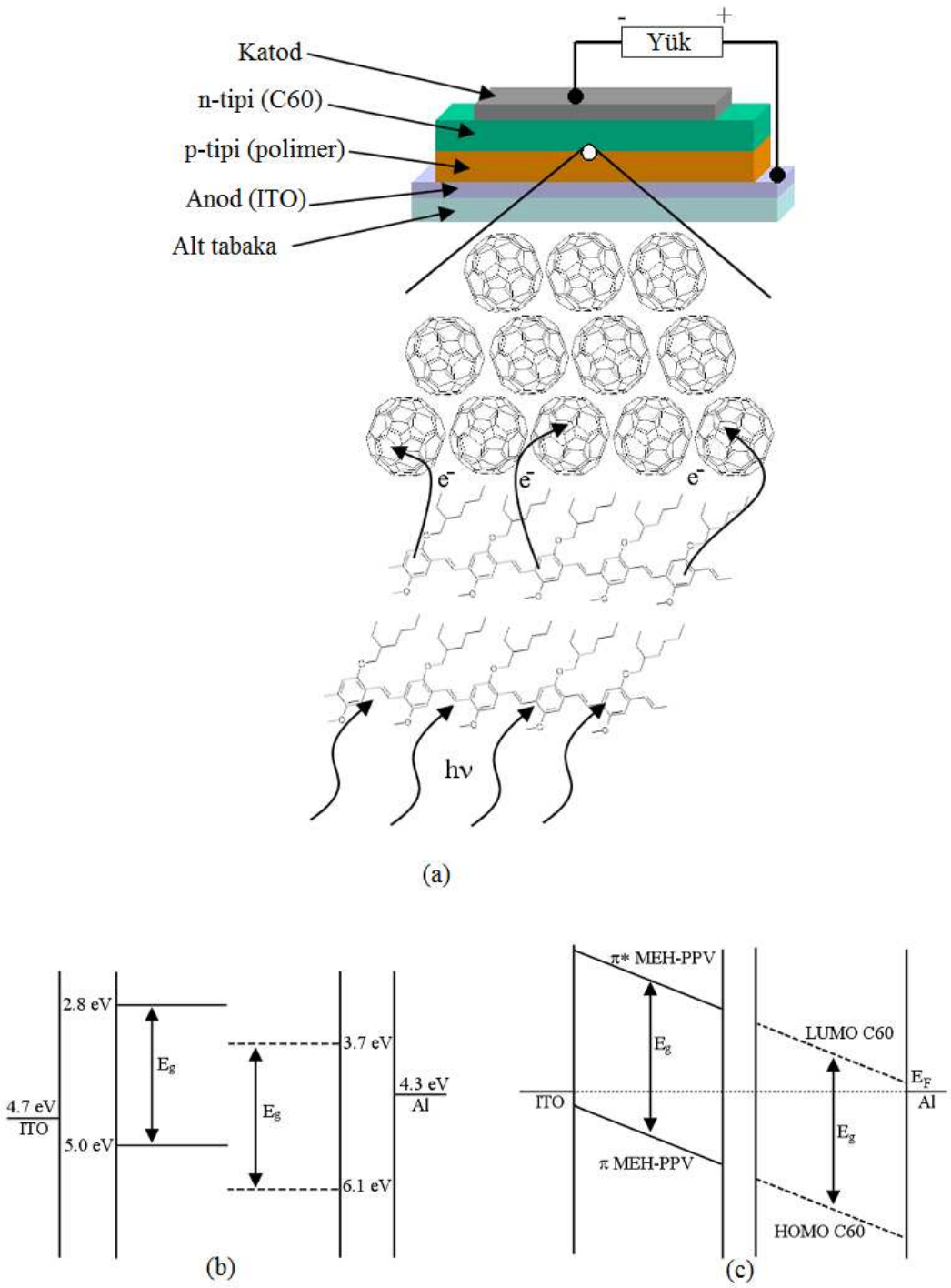
Şekil 3.7. Donör-Akseptör ara yüzeyinde eksitonların ayrılması. Boşluk donörde kalırken elektronlar akseptöre gitmektedir (Spanggaard,2004).

İlk bakır ve perilinin türevlerinden oluşan iki katmanlı 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 3.7'de donör-akseptör ara yüzeyindeki eksitonların ayrılması gösterilmektedir. Fotonlar donör tabaka tarafından absorbe edilerek elektron HOMO seviyesinden LUMO seviyesine yükselirken arkasında boşluk bırakmaktadır. Eksiton olarak ifade edilen elektron-boşluk çifti oluşur ve 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,2004). Birçok organik güneş pilinde, yükler ışık etkili elektron transferi ile oluşmaktadır. Bu reaksiyonda, bir elektron vericiden (bir p-tipi yarıiletkenden) bir elektron alıcıya (bir n-tipi yarıiletkene) 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, bu durum sadece enerjitik olarak tercih edilebilir olduğu zaman mümkündür. Bu nedenle, absorblanan fotonun enerjisinin, yük ayrışmasının oluşumunda kullanımı ve fluoresans, 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 anoda ulaşmalıdır ve aynı zamanda elektron da katoda 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).

3.5. İki Katmanlı (Bilayer) Güneş Pilleri

İki katmanlı güneş pilleri p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin sıralı olarak 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 minumum fotoakım oluşturmaktadır (Güneş,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 fotovoltaik verimi sınırlandırmaktadır. Çünkü yük ayrımı foto aktif pilin oldukça küçük bir bölümünde gerçekleşmektedir (Brabec,2001). MEH-PPV görülebilir ışığı emmek ve eksitonların ayrılması sonucu oluşan boşluğu ITO elektroda taşımak için iki katmanlı güneş pillerinde kullanılmıştır. Şekil 3.8'de MEH-PPV ve C_{60}'ın enerji seviyeleri görülmektedir. Yaklaşık 0.7 eV elektron ilgisine sahip ve elektron ilgisi MEH-PPV'den büyük olan C_{60} ise konjuge polimerden elektronları alıp Al veya Au elektroda taşımaktadır (Coakley,2004).



Şekil 3.8. İki katmanlı güneş pilinin ara yüzeydeki yük transferi ve bu güneş pilinin yapısı (a). Açık devre (b) ve kısa devre (c) koşulları altında malzemelerin enerji seviyeleri (Brabec,2001).

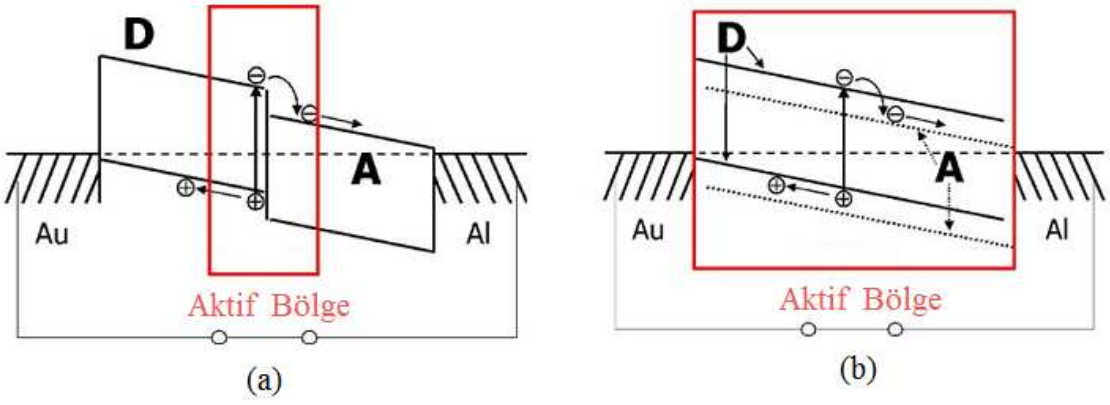
Yarı iletken polimerden C_{60}'a olan ultra hızlı uyarılmış elektron transferi, yalnızca polimerde yük taşıyıcı oluşumu değil aynı zamanda yükler ayrıldıktan sonra tekrar birleşmesini önlemekte ve yüklerin kararlı olmasını sağlamaktadır (Brabec,2001). İki katmanlı güneş pillerinde eksitonlar donör ve akseptör ara yüzeyinde ayrılarak boşluk donöre ve elektronlar akseptöre gitmektedir. Böylece elektron ve boşluk

arasındaki tekrar birleşme ortadan kalkmış oluyor. Ara yüzeydeki difüzyon mesafesi boyunca oluşan eksitonlar fotoakım oluşumunu sağlarken aktif bölgenin haricinde kalan yerlerde bu durum oluşmamaktadır (Hoppe,2008). MEH-PPV ve C_{60} belirli sıcaklıklarda tavlanmasıyla fotoakım oranı artmıştır. Bu artışın MEH-PPV ve C_{60} arasındaki geniş bir ara yüzeysel temas alanında sıcaklıkla kontrol edilen difüzyonun sonucu olarak ortaya çıkmıştır (Drees,2002).

3.6. Bulk Heteroeklem Güneş Pilleri

Bulk heteroeklem güneş pilleri donör ve akseptör malzemelerinin belirli bir oranda karıştırılmasıyla yapılmaktadır. Bulk heteroeklem güneş pillerini oluşturan malzemelerin içeriği donör ve akseptör fazı arasındaki ara yüzeysel alanı artırmaktadır. Aktif tabaka belli bir bölgede değil donör-akseptör ara yüzeysel alanın tamamında oluşmaktadır ve bu durumda güneş pillerinin verimini artırmaktadır (Güneş,2007). Bulk heteroeklem güneş pilleri donör-akseptör içeriği bakımından iki katmanlı güneş pillerine benzemektedir. Ancak bulk heteroeklem güneş pilleri yük ayrımının oluştuğu yer olan geniş bir ara yüzeysel alana sahiptir. Ara yüzey, karışımdan meydana geldiği için 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 bulk 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 bulk heteroeklem güneş pillerinde karışımın nano boyuttaki morfolojisi oldukça önemli bir hassasiyete sahiptir (Hoppe,2004). Şekil 3.9'da gösterildiği gibi iki katmanlı güneş pillerindeki aktif tabaka sınırlı olmasına rağmen bulk heteroeklem güneş pillerinde aktif tabaka donör-akseptör malzemesinin tamamını kapsamaktadır. Bulk heteroekelem 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,2008). MEH-PPV ve PCBM

karışımından yapılan bulk heteroeklem güneş pilinde eksiton ayrımı gerçekleşmiş ve karışımın tamamı boyunca yük taşıyıcıların üretimi gerçekleşmiştir (Yu,1995).



Şekil 3.9. İki katmanlı (a) ve bulk heteroeklem (b) güneş pillerindeki ara yüzey(Hoppe,2008).

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

Konjuge polimer-fullerene güneş pilleri iki farklı tabakadan meydana gelen pillerdir. Polimer ve fullerene bileşenleri karıştırılarak iç içe girmiş bağlarla tek bir katman haline getirilip daha sonra yavaş bir şekilde geliştirilmiştir. Bu gelişmeler iki katmanlı güneş piline bulk difüzyon yaklaşımı ve donör-akseptörün difüze edilmiş ara yüzeyinin oluşumudur. Bulk heteroeklem güneş pilleri genellikle yüksek V_{OC} değerleri göstermektedir. Bu V_{OC} değerleri organik ışık yayan diyotlarda kullanılan MIM modeli ile açıklanamaz. Brabec ve arkadaşları yaptıkları çalışmada V_{OC}'nin akseptörün dayanıklılığıyla ilgili olduğunu ifade etmiştir (Brabec,2002). Akseptör olarak kullanılan PCBM bulk heteroeklem güneş pilindeki V_{OC} donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyle belirlendiğinden MIM model bulk heteroeklem güneş pillerinde uygulanamaz (Scharber,2006).

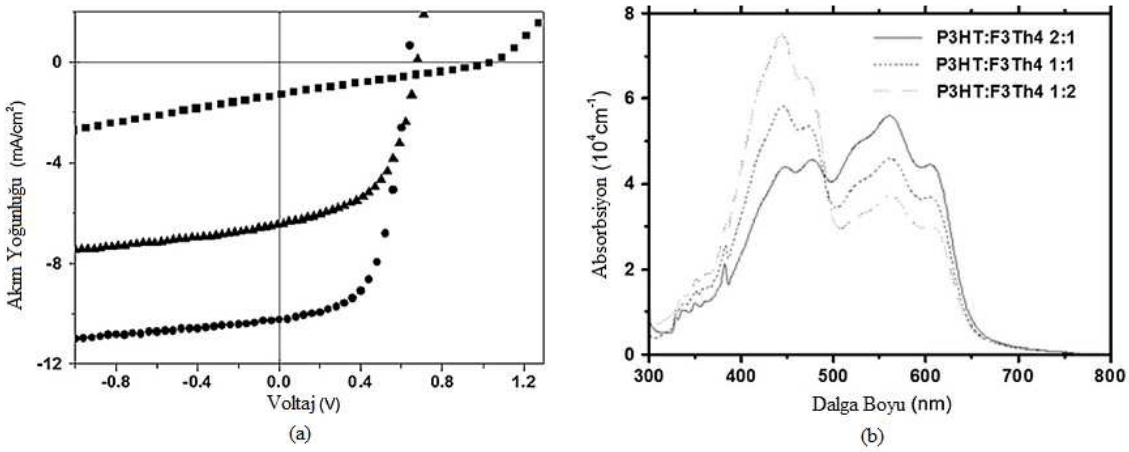
Yük transferi donör- akseptör ara yüzeyinde oluşmaktadır ve yük transferi fotovoltaik performans için oldukça önemlidir. Çünkü fotoakım ve açık devre voltajı (V_{OC}) doğrudan yük transferine bağlıdır. Yük transferindeki en önemli adım eksitonun

ayrılıp uygun elektrotlara gitmesidir. Açık devre voltajı yük transferinin enerjisiyle belirlenmektedir. Yük transferi enerjisinin artmasıyla açık devre voltajı da artmaktadır (Deibel,2010). Bulk heteroeklem güneş pilinde ayrılmış yüklerin transferi boyunca rekombibasyona yol açan diğer yüklerle karşılaşma potansiyeli vardır. Bundan dolayı bulk heteroeklem pilinin yük transferi azalabilir ve yüklerin rekombinasyonundan dolayı pilin ara yüzeysel direnci artabilir. Ancak düzgün sıralanmış bulk 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 bulk heteroeklem pilinin verimi düzlemsel olarak yapılan pile göre artış sağlamıştır. Donör ve akseptör arasındaki geniş ara yüzeysel alandan dolayı iyi bir yük ayrımı yapılmış ve nano çubuklardan dolayı iletkenlik artmıştır (Kim,2010).

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

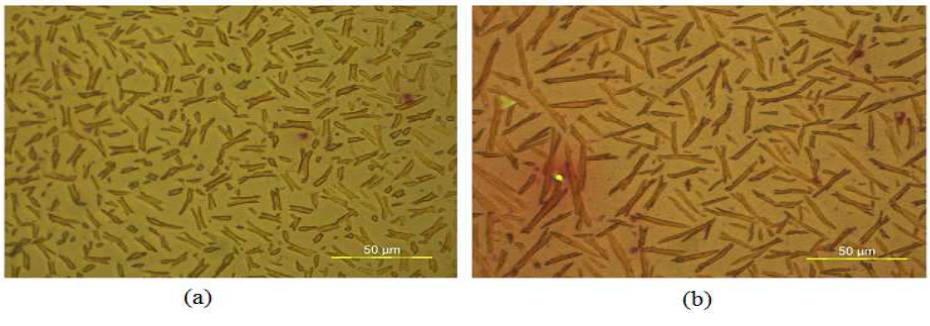
P3HT:PCBM güneş pillerinde ikincil bir donör malzeme olan F3Th4 (2,7-bis[50-(9,9-dioctylfluorene-2-yl)-2,20-dithienyl-5-yl]-9,9-dioctylfluorene) kullanılarak güçlü bir ışığın absorblanması sağlanmıştır. İkincil donör tabakalı güneş pilinin yük transfer mekanizması incelendiğinde enerji transferinin F3Th4'den P3HT'ye gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Ancak bu güneş pilinin kısa devre akımı azalmıştır. F3Th4 ilave edilmesinden sonra taşıma özelliğinin azalmasıyla fotoakım azalmıştır. Şekil 3.10'da farklı karışım ve farklı oranlarda oluşan pillerin verim ve absorbsiyon grafikleri verilmiştir (Zhao,2011). P3HT:PCBM esaslı güneş pillerinde altın gibi yarı iletken anot kullanılarak farklı tavlama sıcaklıkları optiksel özellikleri değişmektedir. Optiksel absorbsiyon tavlamayla artırılmıştır. Aktif tabaka ve yarı iletken anot ara

yüzeyinde elektrik alan genliği yarı iletkene yakın bir yerde absorbsiyona bağlı olarak termal tavlamadan sonra artırılmıştır. Aktif tabakanın kalınlığı optiksel ince film modeliyle güneş pillerinin verimini artırmak için optimize edilmiştir. P3HT:PCBM'in kristalizasyonu ve düzgün bir şekilde yönlenmesinden dolayı boşluk mobilitesi artmış ve aktif tabakada oluşan elektron-boşluk rekombinasyonu azalmıştır. Bu yüzden tavlama güneş pillerindeki verimi artırmıştır (Lee,2010).

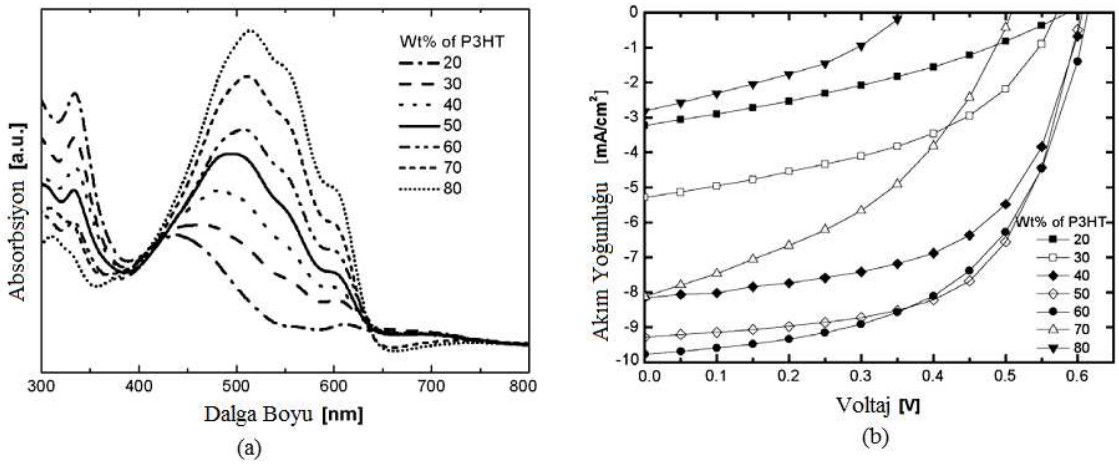


Şekil 3.10. F3Th4:PCBM (kare), P3HT:PCBM (daire), P3HT: F3Th4:PCBM (üçgen) karışımlarının J-V grafikleri (a) ve P3HT ve F3Th4 karışımlarının farklı oranlardaki absorbsiyonu (Zhao,2011).

Tavlamadan sonra filmin kristalimsi yapısının iyileşmesi ve iki bileşen arasındaki karışımın kontrol edilmesi P3HT:PCBM güneş pillerinde verimi artıran neden olarak gösterilmiştir (Yang,2005). P3HT:PCBM güneş pillerinin verimi doğrudan kullanılan malzemelerin yapıları ve faz ayırımıyla ilgilidir. Nano kompozit mekaniksel özellikler pilin ömrünü etkilemektedir. P3HT:PCBM güneş pillerinin özellikleri geniş bir şekilde çalışılmasına rağmen malzemelerin ışığa karşı nano mekaniksel özellikleri çok daha az çalışılmıştır. P3HT:PCBM güneş pillerine 100 °C ve 145 °C'de 30 dakika



Şekil 3.11. P3HT:PCBM güneş pilinin 100 °C (a) ve 140 °C'de (b) tavlanmış optiksel mikroskop görüntüsü (Karagiannidis,2011).

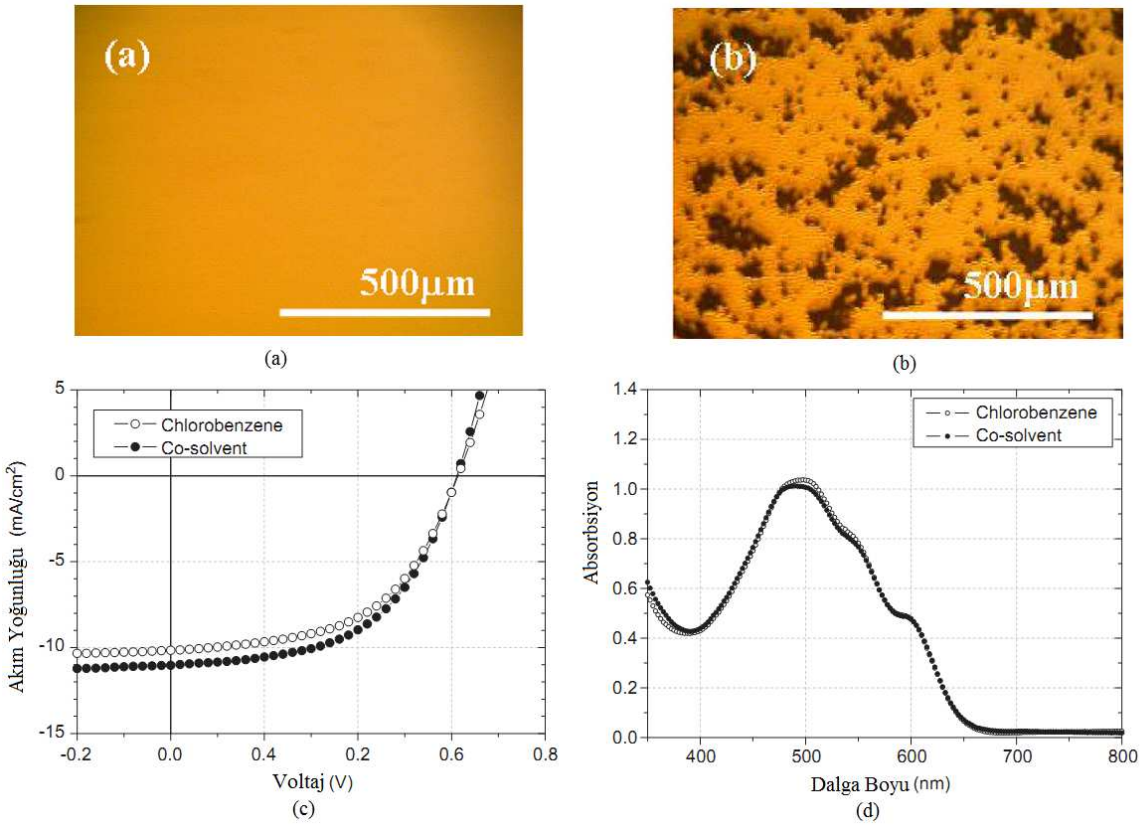


Şekil 3.12. Aktif tabakanın farklı oranlardaki absorbsiyon spektrumu (a) ve J-V grafikleri (b). (Baek,2010).

boyunca tavlama yapılmış ve tavlama sıcaklığının artmasıyla polimerin kristalleşme derecesi artarak PCBM kristalleri oluşmuştur (Şekil 3.11). Tavlama sıcaklığının artmasıyla PCBM kristalitesi ve PCBM-P3HT arasındaki kristalleşme artmıştır. Aynı zamanda tavlama P3HT'nin dağılımını ve birkaç yapısal özelliklerinin ayrılmasını sağlamıştır (Karagiannidis,2011).

P3HT:PCBM'den oluşan aktif tabaka farklı oranlarda karıştırılarak P3HT'nin kristalleşme ve pilin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. P3HT'nin kristalleşmesi, karışımdaki P3HT'nin % 50'ye kadar artmasıyla iyileştirilmiştir. Ancak % 50'den sonra artması P3HT'nin kristalleşmesini bozmuştur. Yani P3HT oranı % 50'yi aştığında, P3HT'nin fibril yapısı PCBM molekülleri tarafından çöktürülmüş ve bundan dolayı P3HT fazının kristalleşmesi gizlenmiştir. Organik güneş pillerindeki P3HT ve PCBM oranları pilin performansını etkilemektedir. Şekil 3.12'de farklı oranlardaki P3HT ve PCBM'in absorbsiyonu ve J-V grafikleri gösterilmiştir. Düzgün bir faz ayrımı % 50 P3HT ve % 50 PCBM oranından elde edilmiş ve verim % 3.4 çıkmıştır (Baek,W.H.,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 karalı bir hale gelmektedir (Inoue,2005). P3HT:PCBM güneş pillerinde klorobenzen, kloroform, o-diklorobenzen ve kloroform karışımından oluşan faklı çözücüler

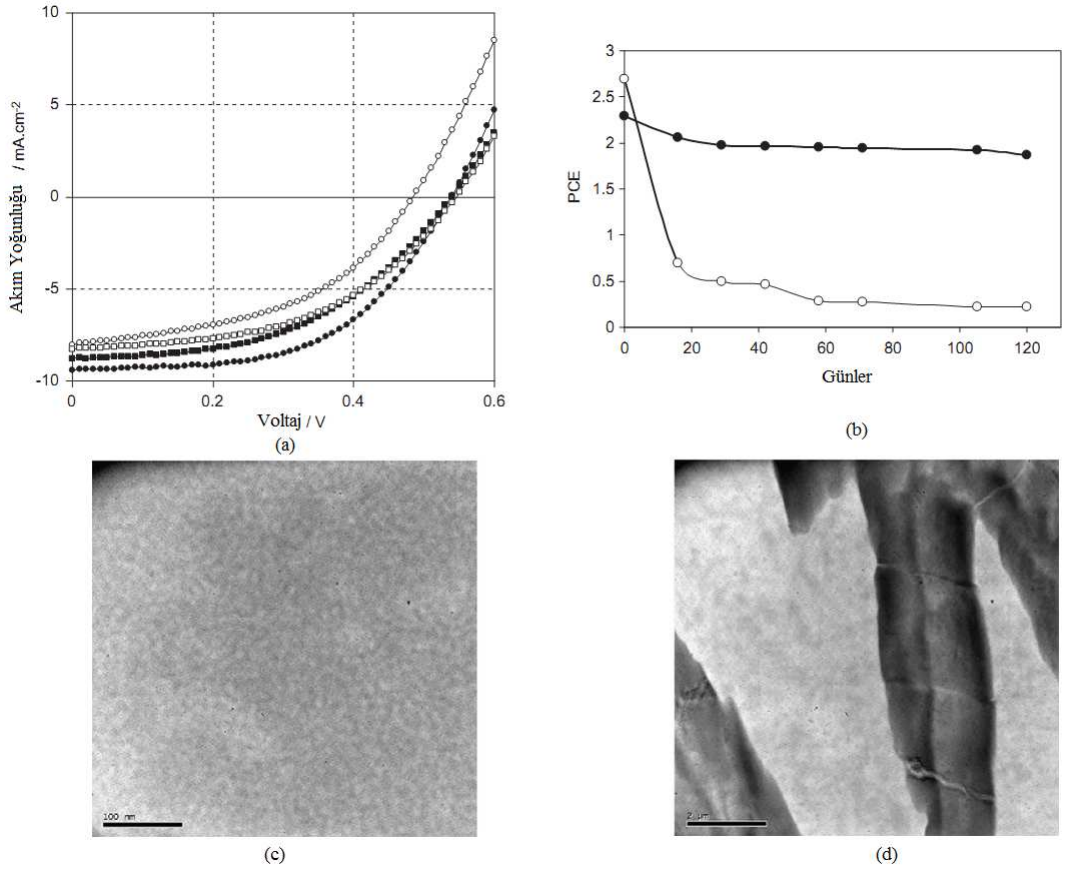
kullanmak pilin performansını etkilemektedir. Çözücü olarak klorobenzen kullanıldığında aktif tabaka filminin içerisinde çözülmeyen kalıntılar oluşmaktadır.



Şekil 3.13. Klorobenzen çözücüsü (a) ve o-diklorobenzen - kloroform karışımından oluşan çözücüyle (b) hazırlanan karışımların optiksel mikroskop görüntüsü. Farklı çözücülerle hazırlanan pillerin J-V (c) ve absorbsiyon (d) grafikleri (Kawano,2009).

PCBM, o-diklorobenzen ve kloroform karışımından oluşan çözücü içerisinde homojen bir şekilde çözünmekte ve P3HT polimer matriks yapının içerisine dengeli bir şekilde dağılmaktadır. Aynı zamanda P3HT bağlarının zorluklarını yok etmektedir. Bu şekilde P3HT ve PCBM homojen bir karışım oluşturmakta ve iki foto aktif malzeme arasındaki ara yüzeysel alanı artırmaktadır. Ara yüzeysel alanın artmasıyla da akım yoğunluğu artar. Şekil 3.13'de farklı çözücüler kullanıldığındaki optiksel görüntüleri, J-V ve absorbsiyon grafikleri görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi farklı çözücü kullanıldığında absorbsiyonda önemli bir farklılık görülmemektedir (Kawano,2009). Lee ve arkadaşları katkı maddesinin süreci için iki kriter belirlemiştir. Fullerene bileşenin seçici çözünürlüğü ve çözücüden yüksek kaynama noktasına sahip olması gerektiğini söylemektedir (Lee,2008). Yang ve arkadaşları ise Lee'nin aksine karışımın oda sıcaklığında ilk çözücüden düşük buhar basıncına sahip olması, PCBM'in

çözünürlüğünün çözücüden düşük olması ve bileşimin çözücüde karışıyor olabilmesi gerektiğini söylemektedir (Yang,2008).



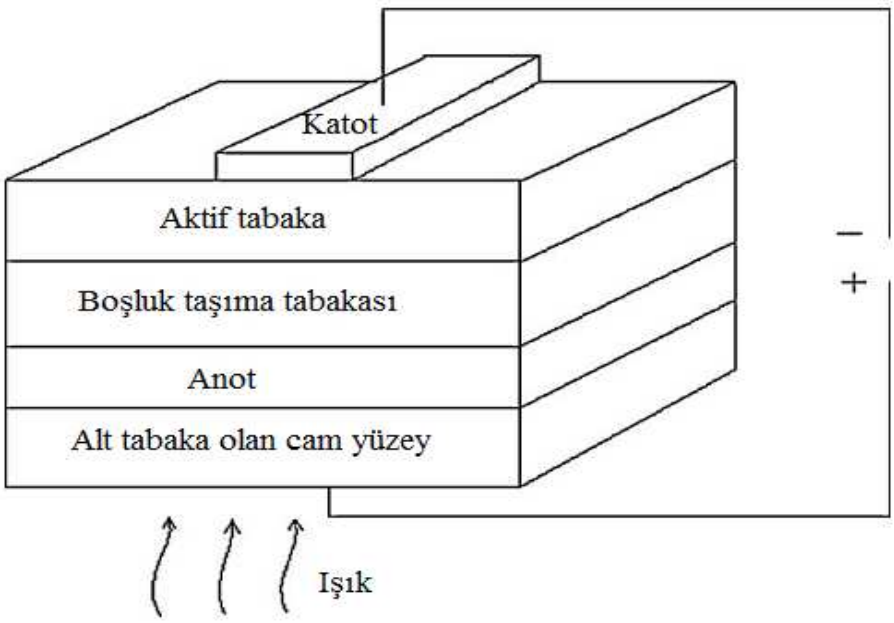
Şekil 3.14. Termal tavlamadan önce yüksek (●) - düşük (■) RR-P3HT güneş pilinin ve tavlamadan sonra yüksek (□)-düşük (○)RR-P3HT güneş pilinin J-V grafikleri (a). Aynı zamanda düşük (●)-yüksek (○) RR güneş pilinin dört ay içerisindeki verimlerin bozulması (b). Termal tavlamadan önce (c) ve sonra (d) P3HT:PCBM filmlerinin TEM görüntüsü (Servati,2010).

Çözücü olarak diklorobenzen kullanılan güneş pilleri tavlama süresince P3HT'ye bağlı olarak farklı karakteristikler göstermiştir. Kısa devre akımı, açık devre voltajı tavlamayla düşmüştür. P3HT'nin yüksek kristallenme özelliği, PCBM moleküllerini ayırmış ve bulk 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 tavlamadan sonra artmıştır. Şekil 3.14'de tavlamadan önce ve sonra pillerin verimleri, filmin yapısı ve kararlılığı gösterilmiştir. RR polimer PCBM moleküllerinin ayrılmasını önlemiş ve geniş kristal yapılar oluşturmuştur. Yüksek optiksel yoğunluğu ve boşluk mobilitesine sahip olan RR-P3HT başta yüksek verim gösterirken PCBM moleküllerinin ayrılmasından dolayı verim düşmeye başlamıştır.

Düşük RR-P3HT, güneş pilinin uzun süre kararlı kalmasını sağlamakta ve PCBM moleküllerinin ayrılmasını sınırladığından dolayı güneş pili iyi bir performans göstermektedir. Kristallenme ve faz arasındaki değişim güneş pilinin optimum verimini ve karalılığını sağlamaktadır (Servati,2010). Aktif tabakanın tavlanması optiksel absorbsiyonu artırarak güneş pillerinin performansını iyileştirmektedir. Kristalleşme tavlamayla artar ve kristalleşmenin artması ise düşük foton enerji bölgesindeki optiksel absorbsiyonun artmasına neden olmaktadır (Erb,2006). P3HT:PCBM güneş pillerinin üretim sonrası tavlamaya tabi tutulması pilin performansını artırmakta ve hatta havaya maruz kalındığında bile pilin aktif tabakasındaki süreç devam etmektedir (Nam,2009).

3.7. Hibrid Güneş Pilleri

Hibrid güneş pillerinde donör-akseptör malzemeler karıştırılarak tek fotovoltaik bir tabaka oluşturulur. Işık absorbe edildiğinde elektron donörden akseptöre transfer edilir. Yük ayrımı donör ve akseptörün temas ettiği yer olan aktif tabaka boyunca oluşur. Yük ayrımı oluştuğunda ise yüklerin farklı elektroda dağılımı gerçekleşir ve aynı zamanda rekombinasyonlarda oluşur. Hibrid güneş pillerinde donör ve akseptör fazları tamamen düzenli olduğu zaman rekombinasyonlar oluşmamakta ve yük taşıyıcıların elektrota taşınımı gerçekleşmektedir (Chandrasekaran,2011).



Şekil 3.15. Hibrid güneş pilinin yapısı (Chandrasekaran,J.,2011).

Hibrid güneş pilleri ışığın girmesini sağlayan saydam bir anoda sahiptir ve en az dört farklı tabakadan oluşmaktadır. Şekil 3.15'te hibrid güneş pilinin yapısı görülmektedir. En alt kısımda alt tabaka vardır ve bu tabakanın üzerine anot malzeme yerleştirilir. Işığı kolayca geçiren saydam bir özelliğe sahip olan ITO, anot malzeme olarak kullanılmaktadır. Anot ve aktif tabaka arasına iletken polimer karışımı olan PEDOT: PSS tabakası uygulanır. PEDOT: PSS tabakasının birkaç işlevi vardır. Yalnızca boşluk taşıyıcı ve eksitonlar ayrıldıktan sonra tekrar onların birleşmesini önleyici olarak değil aynı zamanda ITO yüzeyini düzgünleştiriyor ve anot malzemenin aktif tabakaya nüfuz etmesini engelleyerek istenilmeyen oksijen tuzak durumlarından aktif tabakayı korumaktadır. Işığın absorbe edildiği, tutulduğu, eksitonların oluşup ayrıldığı ve yük taşıyıcıların yayıldığı yer olan aktif tabaka PEDOT: PSS üzerine yerleştirilir. Aktif tabaka donör ve akseptör denilen malzemelerden oluşmaktadır. Donör olarak polimer kullanılırken, akseptör olarak nano partiküller kullanılmaktadır (Chandrasekaran,2011).

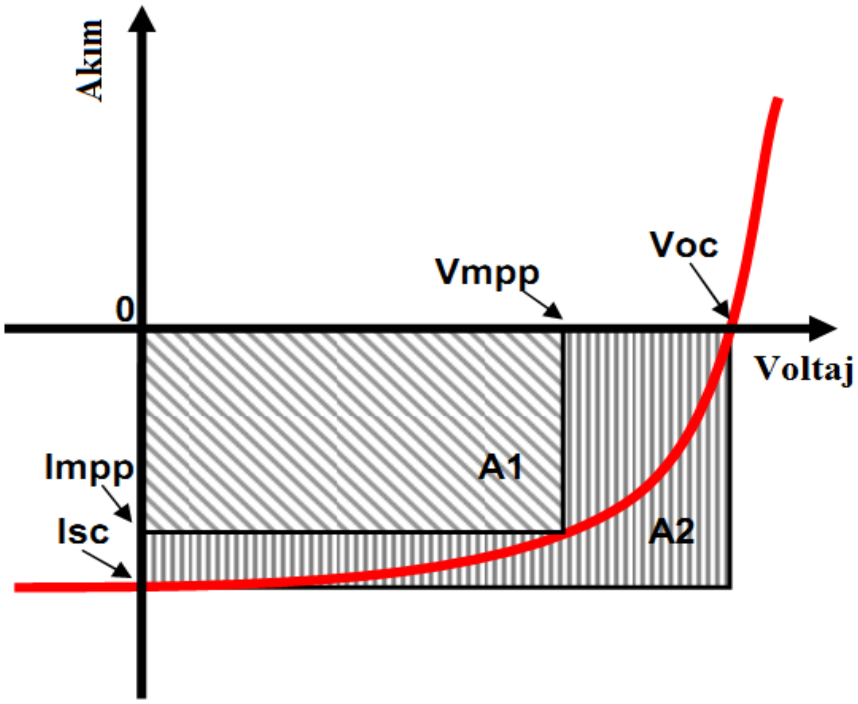
Hibrid güneş pillerinde TiO_x, ZnO, CdSe, CdS, PbS ve $CuInS_2$ gibi farklı nano partiküller kullanılmaktadır. İnorganik yarı iletken malzemeler yüksek absorbsiyon katsayısına ve foto iletkenliğe sahiptir. Nano kristal malzemelerin p-tipi veya n-tipi seviyelerinin sentetik yolla doplanmasının kolay bir şekilde olması yük transferini gerçekleştirmektedir. Ayrıca inorganik nano partiküllerin bulk heteroeklemindeki eksitonlardan küçük olması halinde elektronik yapıları değişmektedir. Bu küçük partiküllerin elektronik ve optiksel özellikleri yalnızca malzemeye bağlı değil aynı zamanda karışımı oluşturan malzemenin büyüklüğüne de bağlıdır (Güneş,2008). Farklı nano partikül malzemelr kullanılarak fotovoltaik verimler incelenmiştir. Arıcı ve arkadaşları (2004) CISe ve P3HT'yi farklı oranlarda karıştırarak hazırlamışlar ve 6:1 oranındaki karışımın P3HT tek tabakasıyla kıyaslandığında iyi bir fotovoltaik tepki elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Politiyofen ve CdSe kullanılarak yapılan hibrid güneş pilinde, CdSe karışım içerisinde dağılarak pilin performansını artırmıştır (Liu,2004). Aynı zamanda CdSe quantum dot sentezlenmiş ve CdSe-P3HT polimerinin piridin-kloroform karışımından oluşan çözücüyle karıştırılmasıyla yaklaşık % 0.05 bir verim elde edilmiştir. Burada iki çözücünün karışımını kullanmak hibrid güneş pilinde önemli bir rol oynamıştır (Choi,2006). CdSe, CdTe inorganik malzemeler MEH-PPV ile karıştırılarak farklı yapılar oluşturulmuş ve CdSe: MEH-PPV 9:1 oranındaki karışımının verimi % 1.13 çıkarak diğer karışımlardan yüksek çıkmıştır (Zhou,2006). Yarı iletken TiO_2 nano çubuklar triklorobenzen ve piridin çözücüleriyle değiştirilerek P3HT ile

kullanılmış ve pilin karakteristiğini değiştirmiştir (Zeng,2009). Bir başka yapılan çalışmada TiO_2 nano çubuklar ile P3HT karışımı yapılmış ve pilin verimi incelenmiştir (Wu,2009). Wu ve Zeng yaptıkları bu çalışmada P3HT'nin hem ışığın absorbe edilmesini hem de yüklerin mobilitesini artırdığından dolayı molekül ağırlığının artması pillerin verimini artırdığını ifade etmişlerdir (Zeng, Wu,2009).

3.8. Güneş Pillerinin Karakteristiği

Fotovoltaik güneş pillerinin temel karakteristiği akım-voltaj (I-V) grafiğiyle belirlenmektedir ve I-V grafiği güneş pilleri için önemli bir parametredir. Şekil 3.16'de I-V grafiği gösterilmiştir.

Açık Devre Voltajı (V_{OC}), akım sıfır olduğunda devrede görülen gerilimdir. Açık devre voltajı güç dönüşüm verimini etkilediği için önemli bir parametredir. Tek tabakalı güneş pillerinde V_{OC} genellikle metal-yalıtkan-metal (MIM) modeliyle açıklanır. Yani anot ve katodun iş fonksiyonları arasındaki iş fonksiyonlarıyla belirlenir. V_{OC} elektron akseptörün elektron ilgisiyle bağlantılıdır. Bulk heteroeklem güneş pillerinde açık devre voltajı donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi arasındaki farkla ilgilidir. Şekil 3.17'da elektrotlar ve malzemeler arasındaki V_{OC} farkları gösterilmiştir.

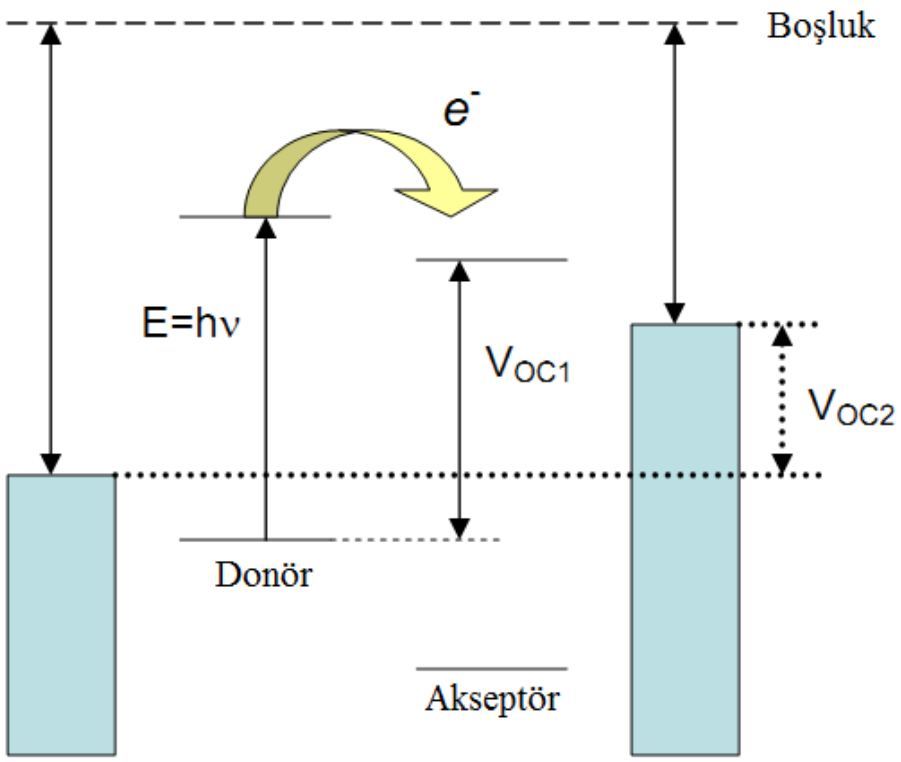


Şekil 3.16. Güneş pillerinin karakteristiğini belirleyen I-V grafiği (Prall,2005).

Kısa Devre Akımı (I_{SC}), fotovoltaik güneş pilinde gerilimin sıfır olduğu zaman görülen akımdır. Kısa devre akımı da güç dönüşüm verimi için önemli bir parametredir. (Miller,2005) Kısa devre akımı absorbe edilen ışığın miktarı ve iç dönüşüm verimi tarafından belirlenmektedir. İş kuantum verimliliği dış akımın absorbe edilmiş fotonlara oranıdır. Absorbe edilen ışığın artmasıyla fotoakım da artmaktadır. Aynı zamanda yüklerin düşük mobilitesi ve rekombinasyon kayıpları filmin kalınlığının artmasını sınırlamaktadır (Winder,2004).

Maksimum Güç Noktası (mpp), akım ve voltajın maksimum olduğu noktalardır.

Dolum Faktörü (FF), maksimum güç noktalarının çarpımının açık devre voltajıyla kısa devre akımının çarpımına oranıdır.



Şekil 3.17. V_{OC1} donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi arasındaki farkı gösterirken V_{OC2} elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farkı göstermektedir (Miller,2005).

Dolum faktörü güneş pilinin diyot karakterini belirlemektedir. Aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$FF = \frac{Vmpp.Impp}{Voc.Isc} \tag{3.1}$$

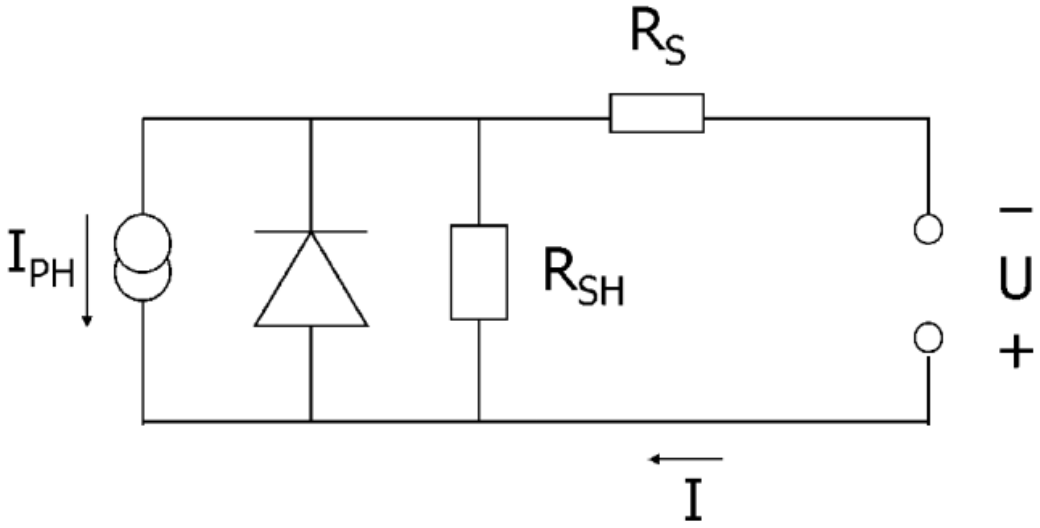
Güç Dönüşüm Formülü ise aşağıdaki eşitlikle tanımlanır:

$$PCE = \frac{Pout}{Pin} = \frac{Voc.Isc.FF}{Pin} \quad (3.2)$$

Şekil 3.18 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 3.18'de farklı çalışma koşullarındaki bant yapılarının durumu verilmiştir.

Şekil 3.19 (a)'daki gibi kısa devre durumunda gerilim sıfırdır. Karanlık boyunca akım geçişi yoktur ve metallerin iş fonksiyonu arasındaki farklılıktan meydana gelen elektrik alanı güneş pili boyunca düzgün bir şekilde dağılmıştır. Aydınlatma altında ayrılmış olan yük taşıyıcılar bu elektrik alanı sayesinde elektrotlara taşınır.

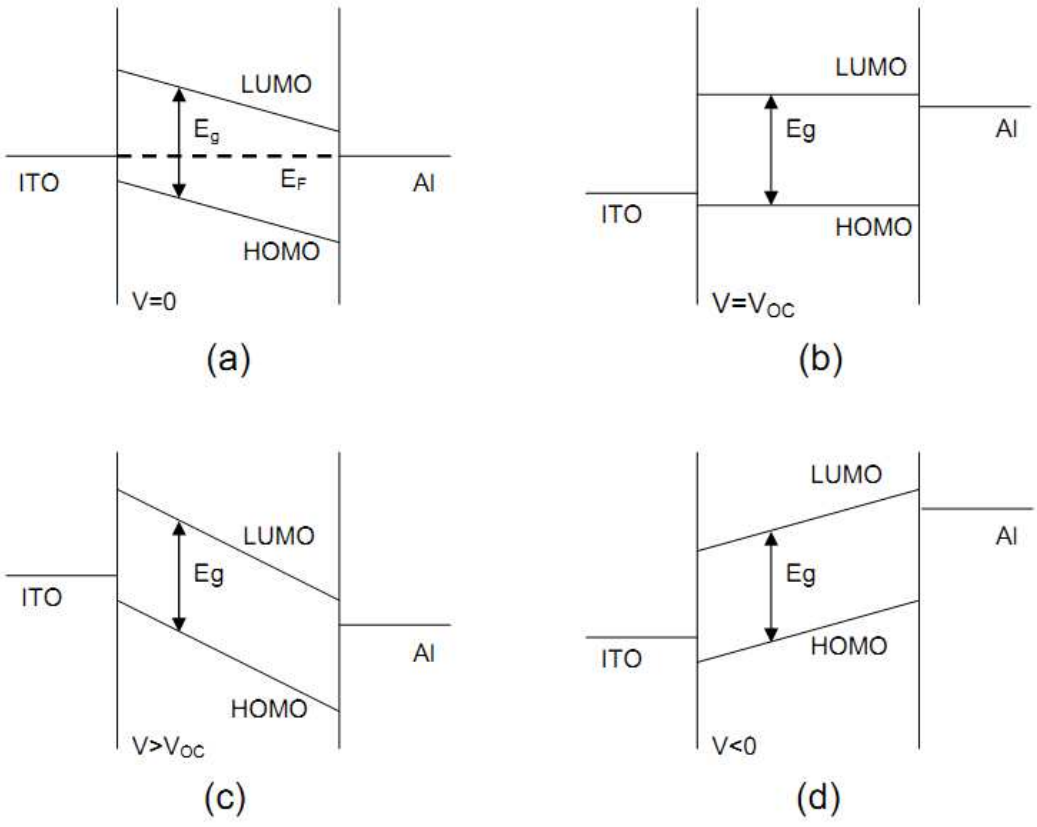


Şekil 3.18. Güneş pilinin eşdeğer devresi (Hoppe,2004).

Elektronlar düşük iş fonksiyonlu metale taşınırken boşluklar da yüksek iş fonksiyonlu elektrota taşınmaktadır.

Şekil 3.19 (b) açık devre durumu veya düz bant durumu olarak bilinir. Burada uygulanan gerilim açık devre voltajı V_{OC} olarak bilinir ve elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. Bu şartlarda akım geçmediğinden dolayı yükleri elektrotlara taşımak için yeterli bir kuvvet oluşmamıştır.

Şekil 3.19 (c) ters gerilim altında polimer diyot karakteristiğini göstermektedir. Küçük bir akım geçişi olmaktadır. Aydınlatma altında oluşan yük taşıyıcılar güçlü bir elektrik alanıyla elektrotlara taşınır. Buradaki diyot foto detektör işlevini yapmaktadır. Şekil 3.19 (d)'deki gibi ön gerilim açık devre voltajından büyük olarak uygulandığında kontaklar yükleri yarı iletkene verimli bir şekilde iletirler. Eğer bunlar rekombine oluştururlarsa güneş pili LED gibi çalışır. Asimetrik diyot davranışları iki metalin HOMO ve LUMO seviyelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Hoppe,2004).



Şekil 3.19. Farklı çalışma durumlarında I-V karakteristiğinin MIM bant yapıları. Kısa devre durumunda boşluklar anoda elektronlarda katoda taşınır (a), açık devre durumunda V_{OC} elektrotların iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir (b), ters gerilim durumunda diyot foto detektör işlevi yaparken (d) ön gerilim durumunda ışık yayan diyot (LED) işlevini yapmaktadır (c) (Miller,2005).

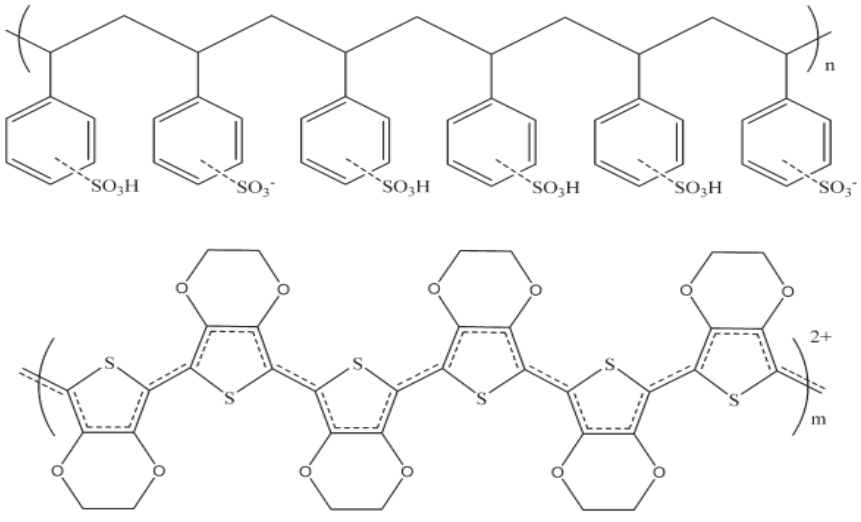
4. MATERYAL VE METOT

4.1. ITO (Indium-Tin-Oksit)

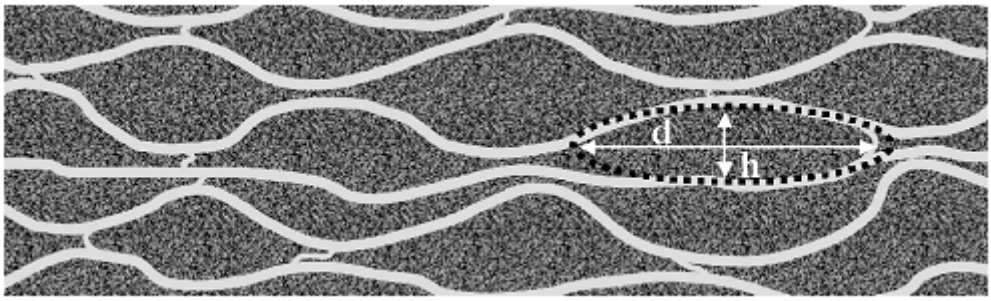
ITO In_2O_3 ve SnO_2'nin belirli miktarlarda karıştırılmasıyla (1:9) elde edilen, sarımsı, katı bir çözeltidir. ITO'nun elektrik iletkenliği ve saydamlık özelliklerine sahip olması ve ince film şeklinde kaplanabilmesi sebebiyle saydam iletken oksit olarak çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. LCD ekranlar, plazma ekranlar, dokunmatik paneller, OLED'ler, güneş pilleri, gaz sensörleri, gibi elektronik uygulama alanları mevcuttur. Dezavantajları; indiyum tedariğinin sınırlı ve pahalı olması, ITO katmanlarının esneklikten yoksun ve kırılgan 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 (Şekil 4.1). Yüksek sünekliğe sahiptir ve değişik uygulamalarda saydam, iletken polimer olarak kullanılır. PEDOT:PSS çözeltisinden elde edilen ince filmler güneş pillerinde, elektrot olarak LED'lerde, antistatik kaplama 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. PEDOT(altta) ve PSS'nin(üstte) kimyasal yapısı (Vacca ve ark., 2008)



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

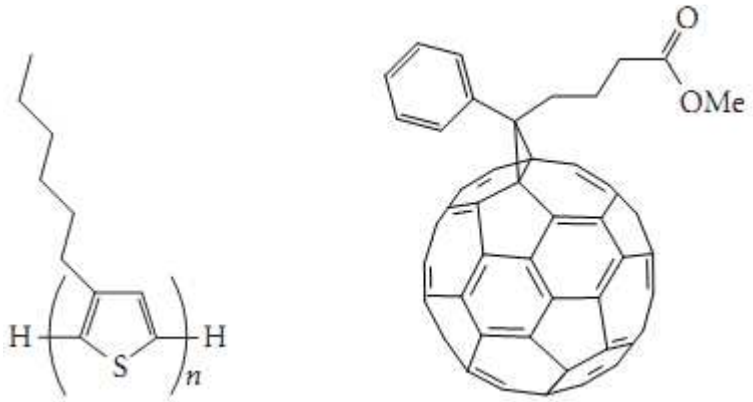
Nardes ve ark. (2007) PEDOT:PSS'nin STM ve X-AFM görüntülerini birleştirerek PEDOT:PSS için bir morfoloji modeli elde etmişlerdir. Şekil 4.2.'de gösterilen modelde koyu renkli kısımlar PEDOT açısından zengin bölgeleri açık renkli lamel şeklindeki kısımlar ise PSS'yi göstermektedir. d ile gösterilen uzunluk 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 ark., 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, TiO_2 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 polimerizasyonuyla oluşur. Organik güneş pillerinde donör malzeme olarak kullanılır. PCBM, [6,6]-fenil-C_{61} bütirik asit metil ester, bir fulleren türevidir (Şekil 4.3). 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.



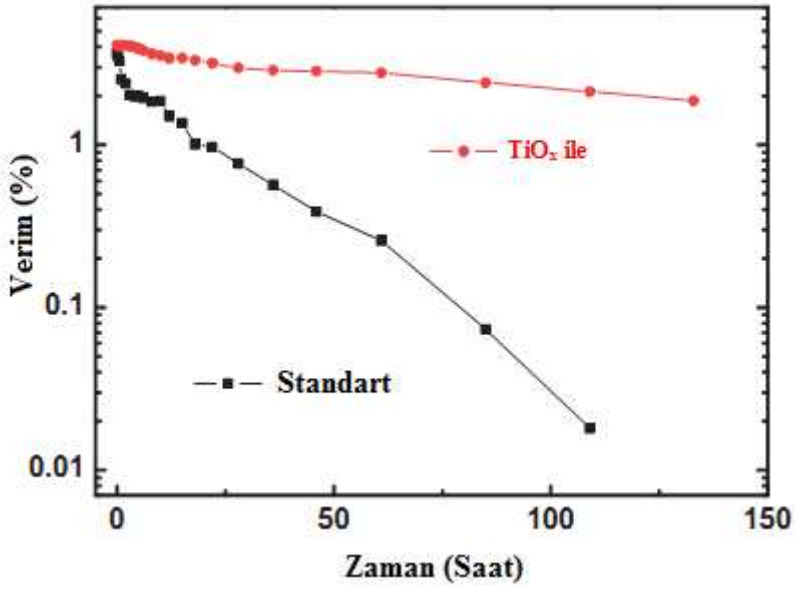
Şekil 4.3. P3HT(solda) ve PCBM'nin(sağda) kimyasal yapısı (Kietzke, 2007)

P3HT:PCBM tabakası, AM 1.5 koşullarında yani 280-4000 nm dalga boyu aralığındaki 1000 Wm^{-2} ışıma ve 4,31 x 10^{21} $s^{-1}m^{-2}$ foton akımı altında, fotonların en fazla %27'sini ve ışıma 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 yansıyabilir (Dennler ve ark., 2009).

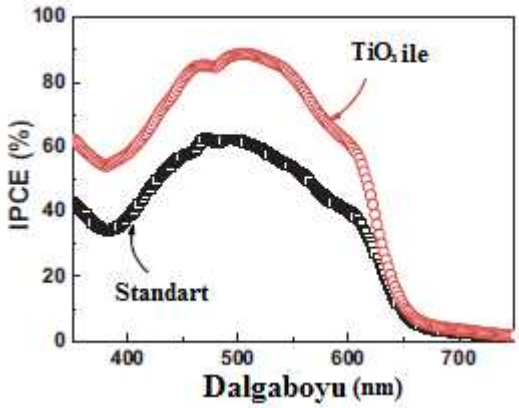
4.5. Titanyum Dioksit

Çözelti halindeki TiO_2 güneş pillerinde aluminyum 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). ITO kısmından gelen ışık ile geri yansıyan ışığın girişim yapmasından dolayı aluminyum 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



Şekil 4.4. TiO_x'li ve TiO_x'siz polimer güneş pillerinde güç dönüşüm veriminin zamana göre değişimi (Lee ve ark., 2007)



Şekil 4.5. TiO_x'li ve TiO_x'siz polimer güneş pillerinde IPCE'nin ışığın dalga boyuna göre değişimi (Kim ve ark., 2006)

durumda da kalınlaşan tabakanın artan direnci fill faktörünün düşmesine yol açacaktır. Diğer bir çözüm ise aluminyum 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. Şekil 4.4'te TiO_2 tabakası verimin

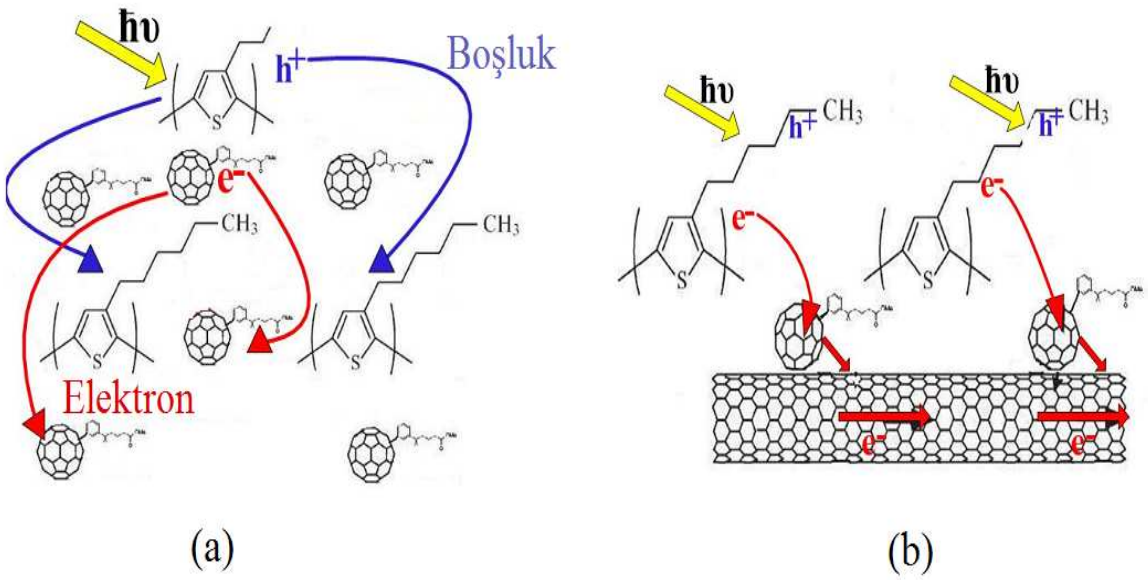
stabil kalmasını sağlamakta ve Şekil 4.5'teki TiO_2 tabakası ise güneş pilinin kuantum verimini artırmaktadır (Kim ve ark., 2006).

4.6. Tek Cidarlı Karbon Nanotüp

Tek cidarlı karbon nanotüpler güneş pillerinde aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır:

- Tek cidarlı karbon nanotüpler stabiliteyi artırmaktadır,
- Geniş arayüzeysel alanı oluşturarak eksiton difüzyon mesafesini artırmaktadır,
- Eksiton bağlanma enerjisine uygun enerjiye sahip (>1,5 eV),
- Düşük bant boşluğuna sahiptir (Subash,2009).

Ayrıca karbon nanotüpler iç içe girmiş ağlar sayesinde hem eksitonların ayrılmasını hem de elektronların taşınmasını sağlamaktadır. P3HT:PCBM ara yüzeyinde yük ayrımından sonra perkolasyon yoluyla elektronların elektroda taşınmasını yapmaktadır. Bu taşımayı yapabilmesi içinde nanotüplerin polimer içerisinde homojen dağılması gerekmektedir (Radbeh,2010). Karbon nanotüplü güneş piline ışık geldiği zaman ITO'dan geçer ve organik malzemelerin düşük dielektrik sabitinden dolayı elektron-boşluk çifti oluşur. Daha sonra P3HT ve PCBM ara yüzeyinde elektron-boşluk çifti birbirinden ayrılır. Boşluklar P3HT fazı boyunca taşınırken elektronlar Şekil 4.6 (a)'daki mekanizmada gösterildiği gibi atlayarak PCBM fazına taşınmaktadır. Ancak tek cidarlı karbon nanotüplerin ilave edilmesi yük taşıyıcılar için doğrudan balistik geçitler sağlayarak Şekil 4.6 (b)'de görüldüğü gibi aktif tabakadaki yük taşıyıcıların hareketini artırmaktadır. Bu yolla eksitonlar P3HT-PCBM ara yüzeyinde tamamen ayrılmakta ve elektronlar bir fazdan diğer faza atlamak yerine tek cidarlı karbon nanotüpler tarafından oluşturulan direkt geçitlerle elektrotlara taşınmaktadır (Liu,2008).



Şekil 4.6. P3HT:PCBM (a) ve P3HT:PCBM: SWCNT (b) aktif tabakasında eksiton oluşumundan sonra yük taşınımını gösteren şematik diyagram (Liu,2008).

4.7. Güneş Pillerinin Hazırlanması

4.7.1. ITO camlarının hazırlanması

. Güneş pillerinde şeffaf olması ışığın hemen aktif tabakaya geçebilmesini sağlar. İnce film morfolojisi iletkenliği ve cihazın verimliğini çok etkilemektedir. Bu nedenden dolayı üzerine kaplanacak filmlerin kalitesi açısından ITO yüzeyi mümkün olduğu kadar temiz olmalıdır. Kintec(Hong Kong) firmasından alınan 10 ohm dirence ve 1,1 mm kalınlığa sahip ITO kaplı camlar öncelikle güneş pili için uygun boyutlarda (15mm X 15mm) kesildi. Daha sonra camların bir kenarının yaklaşık 3 mm'lik kısmı 3:1 oranındaki hidroklorik asit ve nitrik asit çözeltisi(kral suyu) ile ITO tabakası kaldırıldı. Camların deterjanlı suyla temizliği yapıldı. Bu işlemden sonra camlar sırasıyla organik çözücüler olan hekzan, aseton, izopropanol ve saf suda sonikatör karıştırıcı içerisinde 10 dk. arayla temizlendi. Camlar temizlendikten sonra, 100 ^{o}C'de 20 dk. bekletilerek kurutuldu. Kurutulan camlar 20 dk. süreyle UV ozon plazmasına tabi tutularak kalıntı organik atıklar giderildi. Bu işlemlerin tümünde ITO yüzeyinde mümkün olduğunca el değdirilmez çünkü yüzeyde organik bir kalıntı ITO'yu kirletir.

4.7.2. PEDOT: PSS'in hazırlanması ve spin-coat tekniğiyle kaplanması

H. Starck firmasından alınan PEDOT: PSS çözeltisine 1:1 oranında saf su eklenerek seyreltildi ve 45µm por gözenekli PTFE filtreden geçirilerek süzüldü. Daha sonra ve manyetik karıştırıcıda bir süre karıştırıldı. 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 pamuk ile silindi daha sonra camlar etüve alınarak 110 ^{o}C'de yarım saat tavlandı. PEDOT: PSS kalınlığı AFM'de ölçülerek yaklaşık 60 nm kalınlığında çıkmıştır.

4.7.3. P3HT:PCBM'nin hazırlanması ve spin-coat tekniğiyle kaplanması

Alfa Aesar firmasından alınan P3HT ve PCBM'nin klorobenzen içerisinde 20 mg/ml'lik çözeltileri 1:1 oranında hazırlanarak manyetik karıştırıcıda bir gece boyunca bekletildi Mikro pipetle bir miktar P3HT:PCBM çözeltisinden alınarak tavlanmış

PEDOT: PSS kaplı cam üzerine damlatıldı ve 800 d/dk. hızda, 40 s. süreyle spin coaterda kaplama işlemi yapıldı. İşlem bittikten sonra camların katot elektrot yerleştirilecek kısmı klorobenzen emdirilmiş pamuk ile silindi ve camlar etüve konularak 80 ^{o}C'de 15 dk. vakumlu fırında tavlandı. Ayrıca P3HT:PCBM kalınlığı AFM'de ölçülerek yaklaşık 80 nm kalınlığında çıkmıştır.

4.7.4. P3HT:PCBM: SWCNT'nin spin-coat tekniğiyle kaplanması

P3HT:PCBM çözeltilerinin içine sonikatör ve proplu homojenizatörle 10'ar dk. klorobenzen içinde karıştırılarak dağıtılmış SWCNT, kütlece %0,025 oranında olacak şekilde katıldı ve karışım 15 dk. manyetik karıştırıcıda bekletildi. Kaplama, silme ve tavlama işlemleri yukarıdaki anlatıldığı gibi yapıldı.

4.7.5. Titanyum dioksitin hazırlanıp kaplanması

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. Camlarda TiO_2 kaplanması istenmeyen katot kısımlarının üzerine kimyasala dayanıklı bant yapıştırıldı. Tavlanmış P3HT:PCBM veya P3HT:PCBM: SWCNT üzerine TiO_2 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 ^{o}C'de 10 dk etüvde tavlandı. TiO_2 kalınlığı AFM'de ölçülerek yaklaşık 80 nm kalınlığında çıkmıştır.

4.7.6 Aluminyum elektrotların kaplanması

Tüm kaplama işlemleri biten camlar Nanovak firmasının ürettiği PVD ünitesine alınarak 2.10-5 Torr vakumda gene Nanovak firmasından temin edilen %99,5 saflıktaki alüminyum buharlaştırma parçaları ile 140 nm kalınlığında kaplandı.

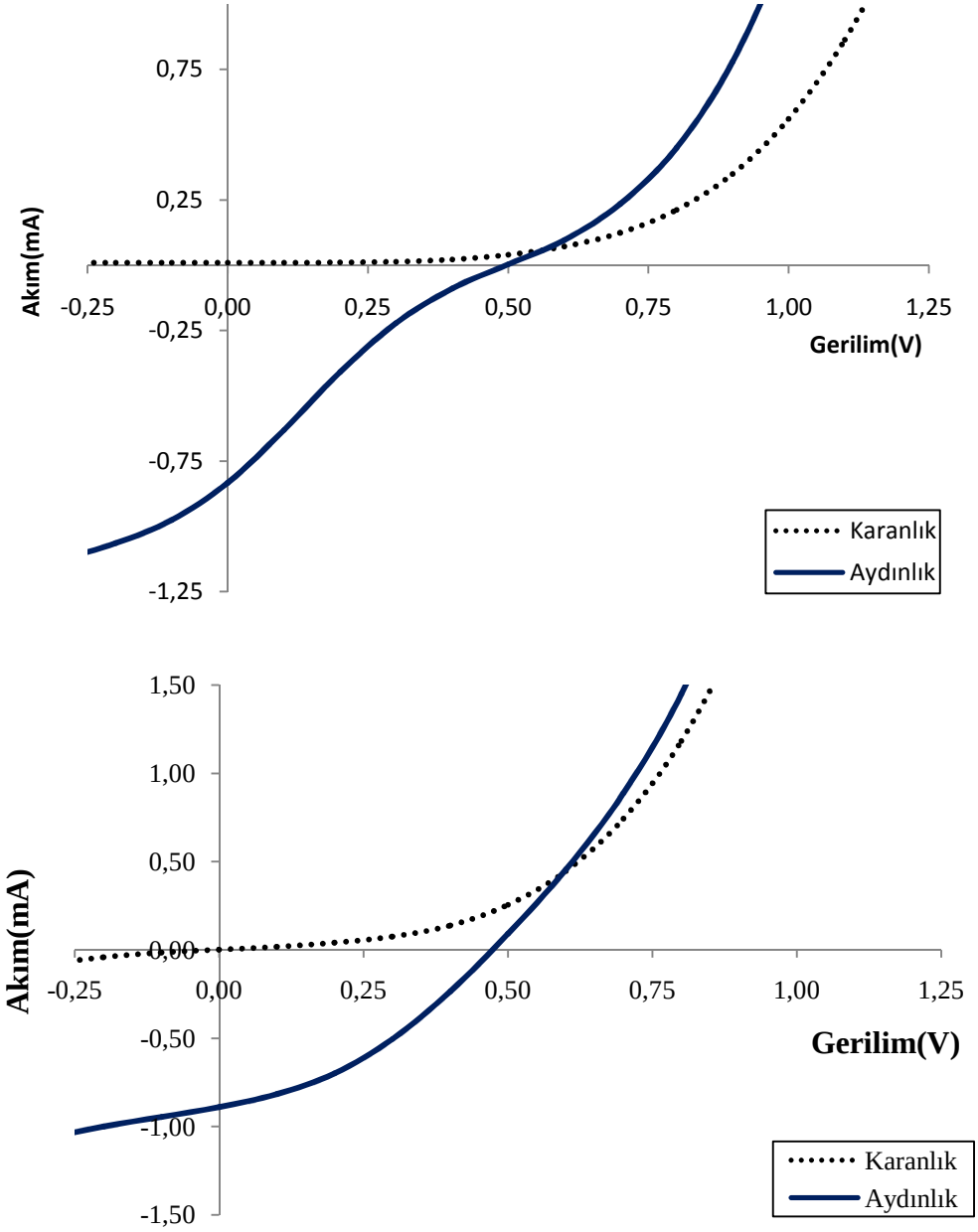
Güneş pili yapımındaki ana basamaklar şöyledir:

- Camların katot kısmını oluşturacak bölgenin asitle kaldırılması,
- Camların istenilen ölçülerde kesilmesi,
- Camların deterjanlı suyla yıkanması,
- Camların sonikatörde sırasıyla hekzan, aseton ve izopropanoldan geçirilmesi,
- Camların UV ozonda bekletilmesi,
- Spin coater'da gerekli katmanların kaplanması,
- Katotu oluşturacak bölgeden kaplamanın silinmesi,
- Etüvde tavlama işleminin yapılması,
- PVD'de alüminyum kontakların kaplanması,

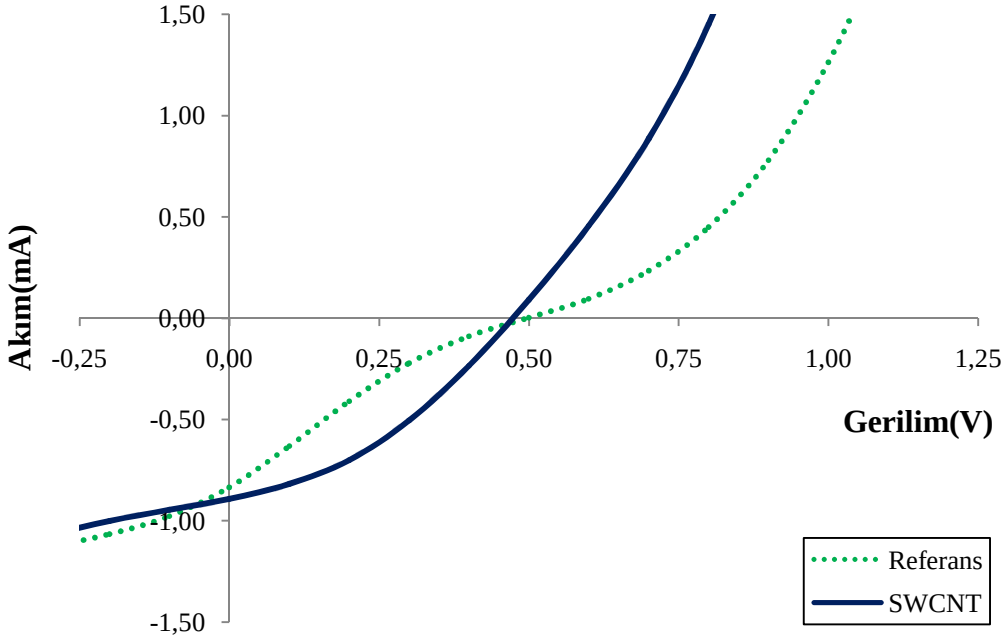
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. I-V Ölçümleri

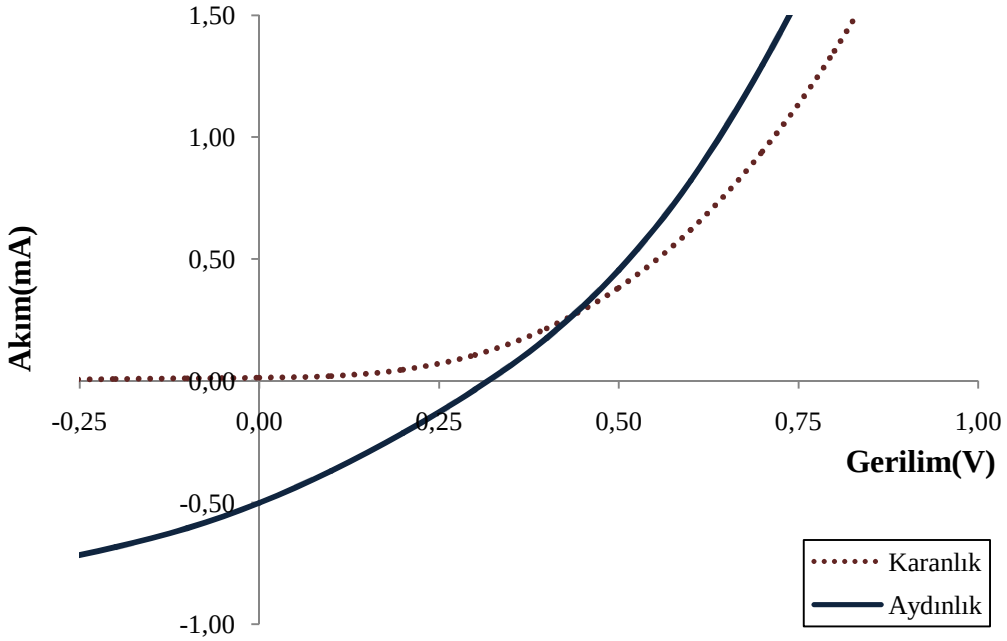
Ölçümler Keithley 2400 akımölçer cihazı kullanılarak 500 Watt'lık halojen ışık altında I-V grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların işlenmesinde LabVIEW programıyla hazırlanan I-V ölçüm modeli kullanılmıştır. Standart verime sahip bir silikon güneş piliyle, halojen lambanın pil yüzeyine ne kadar güçte ışık düşürdüğü hesaplanmıştır. Üretilen güneş pilleri bu kalibrasyona göre ölçülmüştür.



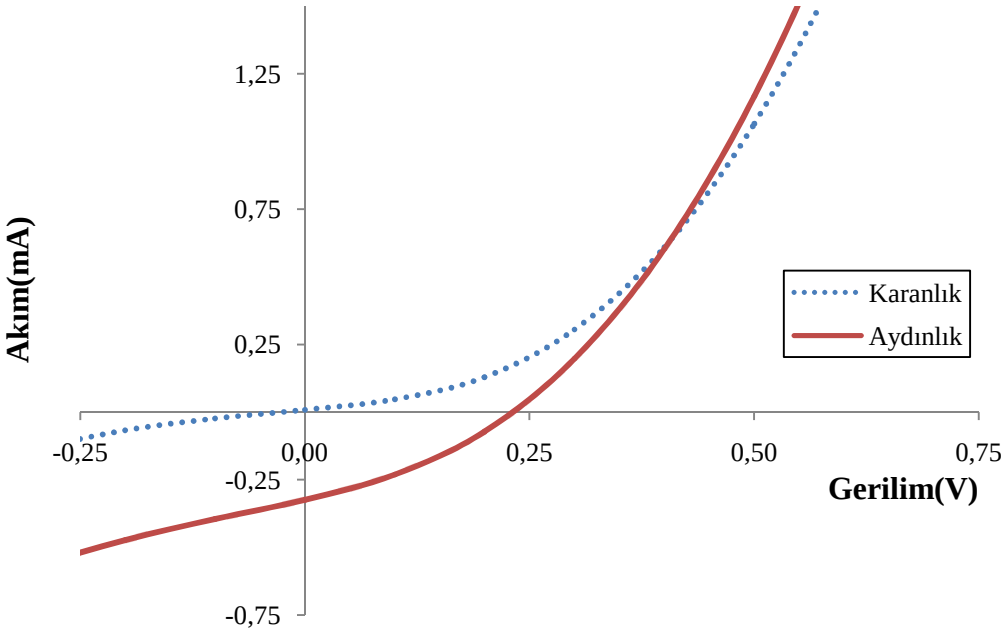
Şekil 5.1. Standart pil(üstte) ve SWCNT tabanlı(altta) güneş pillerinin I-V grafikleri



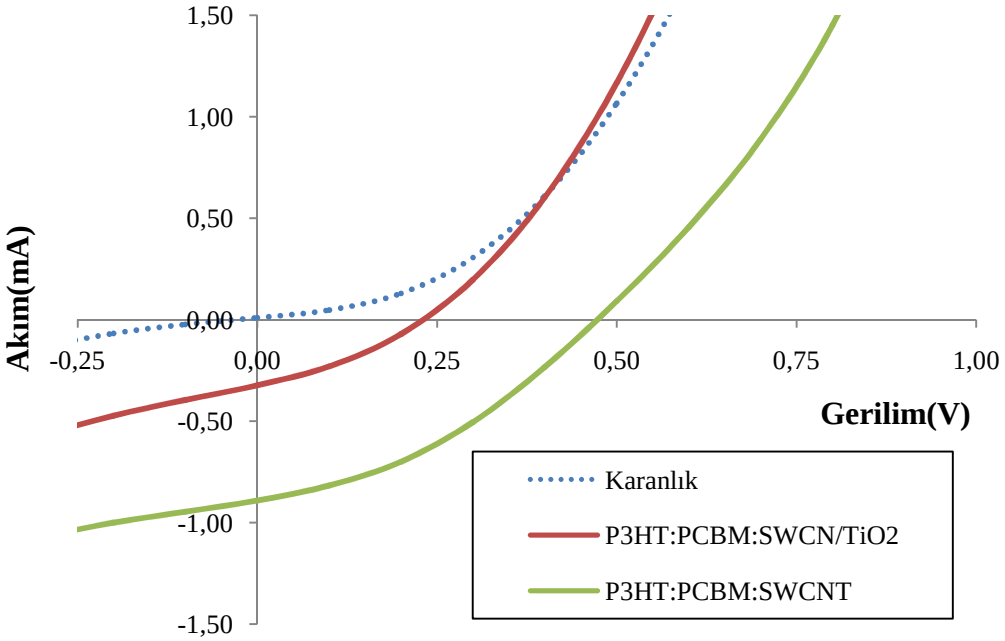
Şekil 5.2.Standart pil ve SWCNT tabanlı güneş pillerinin ışık altında elde edilen I-V grafikleri



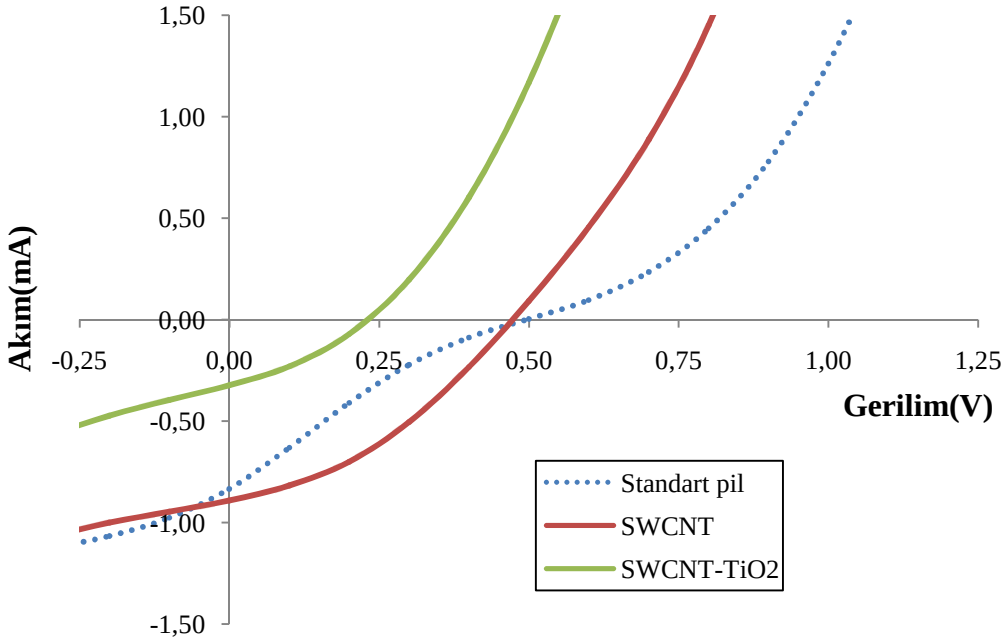
Şekil 5.3.TiO_2 katmanlı güneş pilinin grafiği



Şekil 5.4.P3HT:PCBM:SWCNT/TiO_2 katmanlı güneş pilinin grafiği



Şekil 5.5.P3HT:PCBM:SWCNT/TiO_2 ve P3HT:PCBM:SWCNT katmanlı güneş pillerinin grafiği



Şekil 5.6.Farklı katmanlarda yapılan güneş pillerinin grafiği

Tablo 5.1. Organik güneş pillerinin fotovoltaik karakteristiği

Güneş Pili	Voc (V)	Isc mA/cm2	FF	Verim (%)
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,5	0,834	0,196	0,328
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:SWCNT/Al	0,5	0,89	0,34	0,61
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/TiO2/Al	0,3	0,5	0,28	0,17
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:SWCNT/TiO2/Al	0,2	0,32	0,35	0,09

Yaptığımız bu çalışmada ITO üzerine PEDOT: PSS kaplanmış ve bu katmandan sonra Tımes Nano'dan satın alınan saflığı % 99,5 oranındaki tek cidarlı karbon nanotüp (SWCNT) % 0,025 oranında P3HT:PCBM içerisinde homojen şekilde dağıtılarak kaplanmıştır. En son olarak PVD cihazında Al kaplanarak ölçümler alınmıştır. Yapılan organik güneş pillerinin fotovoltaik karakteristik özelliği Tablo 5.1'de verilmiştir.

Standart pilin Voc değeri tek cidarlı karbon nanotüp kullanıldığında değişmezken TiO_2 katmanıyla birlikte kullanıldığında Voc değeri düşmektedir. Bu durum Şekil 5.6'da açıkça görülmektedir.

Çok cidarlı karbon nanotüp boşluk transferini artırdığı için verim % 0,69'a çıkmaktadır (Demir,2011). Tek cidarli karbon nanotüpler çok cidarlı karbon nanotüplerden daha iyi olmasına rağmen metalik özelliğinden dolayı rekombinasyonları oluşturarak verimi düşürmektedir. Bu yüzden tek cidarlı karbon nanotüplerin yarı iletken olması rekombinasyonları önlemektedir.

TiO2 hibrid güneş pillerinde çok sık kullanılan malzemdir. ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM: SWCNT/Al güneş pilinde verim % 0,61 olmasına rağmen TiO2 kullanılması verimi 0,09' düşürmüştür. Titanyum tabakası çalışmaktadır fakat istenilen verim elde edilememiştir. Verimin düşmesinin nedeni titanyum katmanının oldukça kalın kaplanması ve ayrıca titanyumun kristal özelliği göstermemiş olmasıdır Bu durumda, elektron sürekli bir geçite sahip olmamasından dolayı elektron-boşluk çifti tekrardan birleşmektedir. . Diğer bir nedenide uygun elektrodun kaplanmamış olması olabilir. Ayrıca güneş pillerinde temel sorunlardan biride kalın kaplanan filmlerde güneş ışığının büyük bir bölümü absorbe edilmeden yansımaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak için yansımayı önleyici ince filmler kaplanabilir veya nanoteller kullanılabilir.

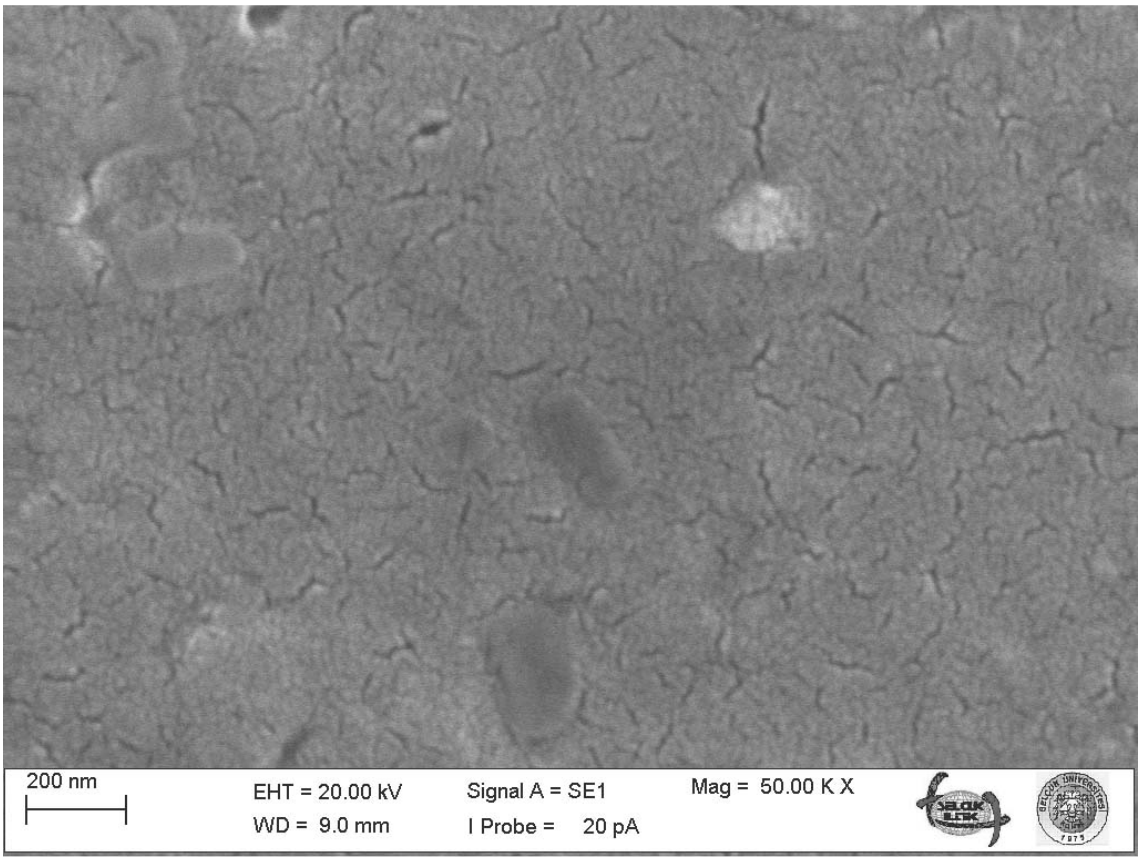
ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM/Al güneş pilinde verim 0,328 iken tek cidarlı karbon nanotüp ilave edilmesiyle verim yaklaşık iki katına çıkmıştır. Şekil 5.2'de bu pillerin I-V grafiği görülmektedir. Tek cidarlı karbon nanotüpün ilave edilmesi aynı zamanda kısa devre akım yoğunluğunu ve dolum faktörünü de artırmıştır. Buna bağlı olarak da verim artmıştır. Yaptığımız güneş pilinde tek cidarlı karbon nanotüp aktif tabakada akseptör malzeme olarak kullanılmıştır. Polimer ve nanotüp arasındaki etkileşim eksiton denilen elektron-boşluk çiftinin ayrılmasına neden olmakta ve elektronların elektroda taşınmasını sağlamaktadır. Tek cidarlı karbon nanotüp ilave edildikten sonra tavlanmıştır. Güneş pillerine uygulanan tavlama işlemi, fotovoltaik karakteristiklerin artmasını sağlamaktadır (Yamanari,2006). Yüksek sıcaklıklarda yapılan tavlama ise güneş pilinin performansını bozmaktadır. (Kim,2005). Tek cidarlı karbon nanotüpün ilave edildikten sonra tavlanması, verimi artıran etkenlerden biridir. P3HT:PCBM oranı ve tavlanması oldukça önemlidir. Tavlamayla, polimer güneş pilinin V_{OC}'si artmakta ve bundan dolayı verim artmaktadır. Kalita ve ark. (2009) 1:0,5, 1:1 ve 1:2 oranlarında P3HT ile PCBM karışımını yapmışlar ve 1:1 oranındaki karışımın pil veriminin oldukça iyi olduğunu belirtmişlerdir. Chen ve ark. (2010) farklı oranlarda P3HT:PCBM karıştırarak 1:1 oranında en iyi verimi elde etmişlerdir. Vanlaeke ve ark. (2006) yaptıkları P3HT:PCBM güneş pilinde 1:1 ve 1:2 oranından en iyi verimi bulmuşlardır. 100 °C ve 200 °C arasındaki tavlama sıcaklığı polimerin oksidasyon yapısını değiştirmekte ve 200 °C'nin üstündeki sıcaklıklarada ise polimerin yapısı bozulmaktadır (Kim,2009). 150 °C sıcaklığında 30 dk sürede tavlama işleminin yapılması verimi artırmaktadır (Ma,2005.,Chen,2010). Yaptığımız bu çalışmada, P3HT:PCBM tabakasını 80°C sıcaklığında 15 dk süreyle tavlama işlemine tabi tuttuk.

Bu yüzden literatüre göre verimi oldukça düşük bulduk. Eğer uygun tavlama sıcaklığı ve sürede tavlama işlemi yapılırsa güneş pilinin fotovoltaik özellikleri oldukça yüksek çıkabilir.

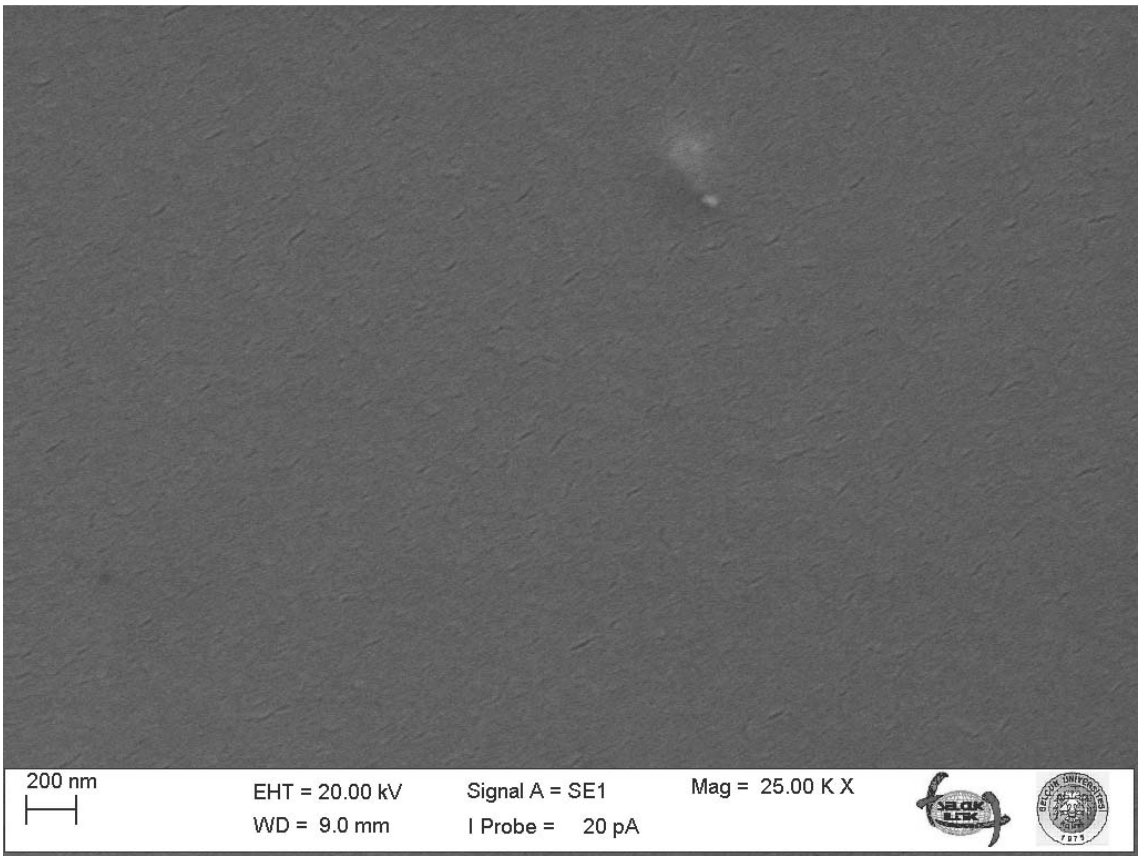
Kısa devre akımı, dolum faktörü ve açık devre gerilimi güneş pilinin verimini belirlemektedir. Organik güneş pillerinin veriminin artırılmasında bu faktörler dikkate alınarak malzeme seçimi yapılır.

5.2.SEM Görüntüleri

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de P3HT:PCBM'in tavlanmadan önce ve sonraki yapısını gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. Tavlama işleminden sonra P3HT:PCBM yapısının düzgünleştiği ancak çatlakların giderilmediği görülmektedir. Ayrıca tavlanmadan önceki yüzeyde toz partikülleri yer almaktadır. Çatlaklar, partiküller ve oksijenin varlığı filmlerin yapısını bozarak verimi etkilemektedir.

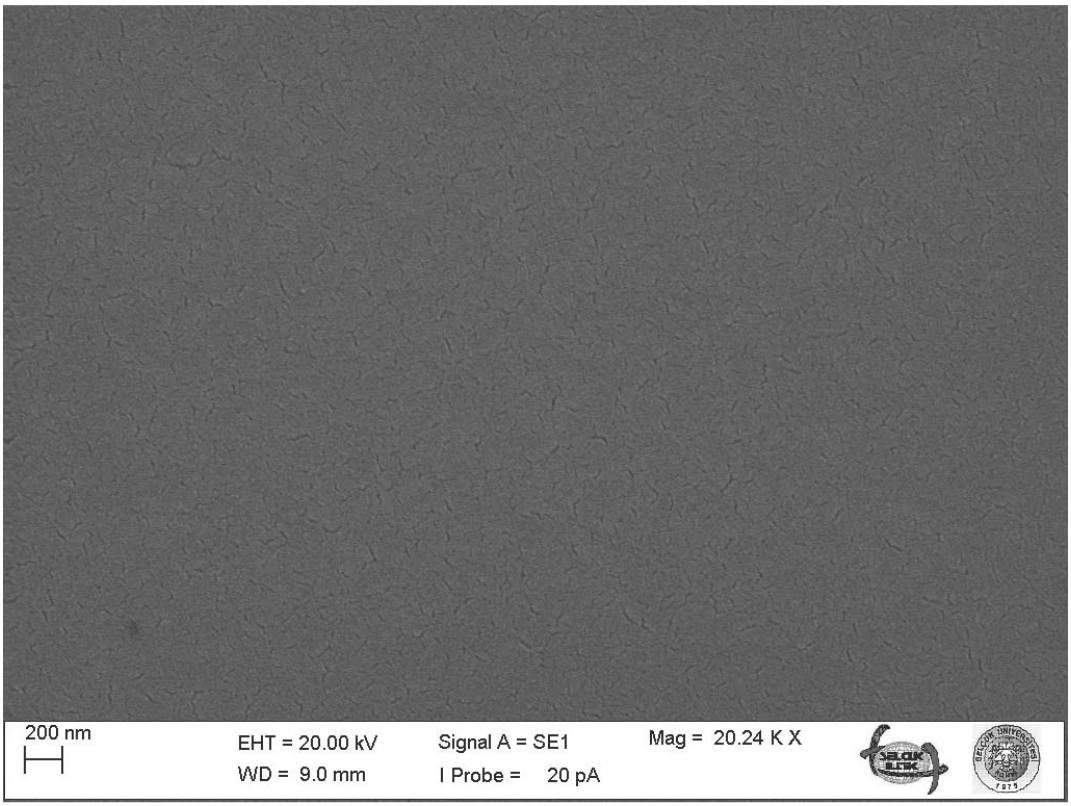


Şekil 5.7. P3HT:PCBM'in tavlanmadan önceki yüzeyi

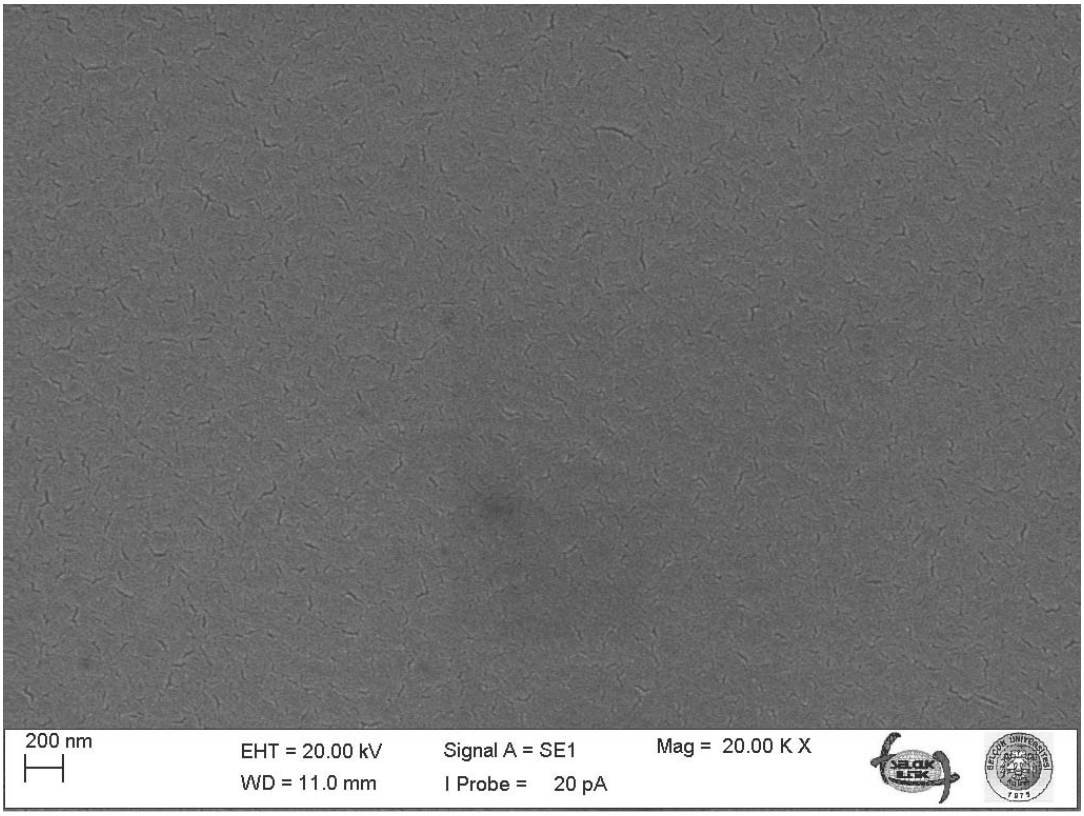


Şekil 5.8. P3HT:PCBM'in tavlandıktan sonraki yüzeyi

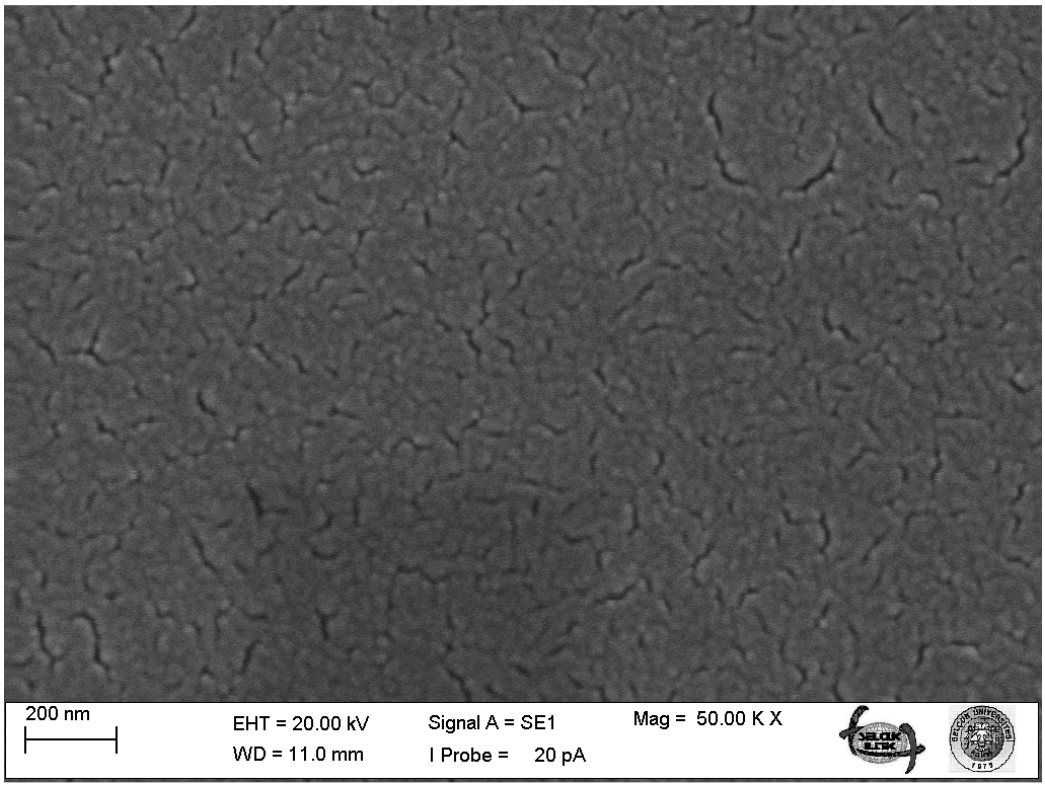
Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM: SWCNT güneş pilinin tavlanmadan önce ve sonraki SEM görüntüleri alınmıştır. Görüntüler birbirine oldukça benzemektedir. Üretilen güneş pilinin kaplanmasında oluşan filmlerde çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar tavlamadan dolayı olmadığı görülmeltedir. Huang ve ark.(2009) tavlamanın pilin morfolojisini değiştirdiğini ve kompozit film içerisindeki P3HT'nin düzgün bir şekilde sıralandığını belirtmiştir. Bu düzgün sıralanma sayesinde yük taşınımının kolaylaştığını ve böylelikle verimin arttığını söylemiştir.



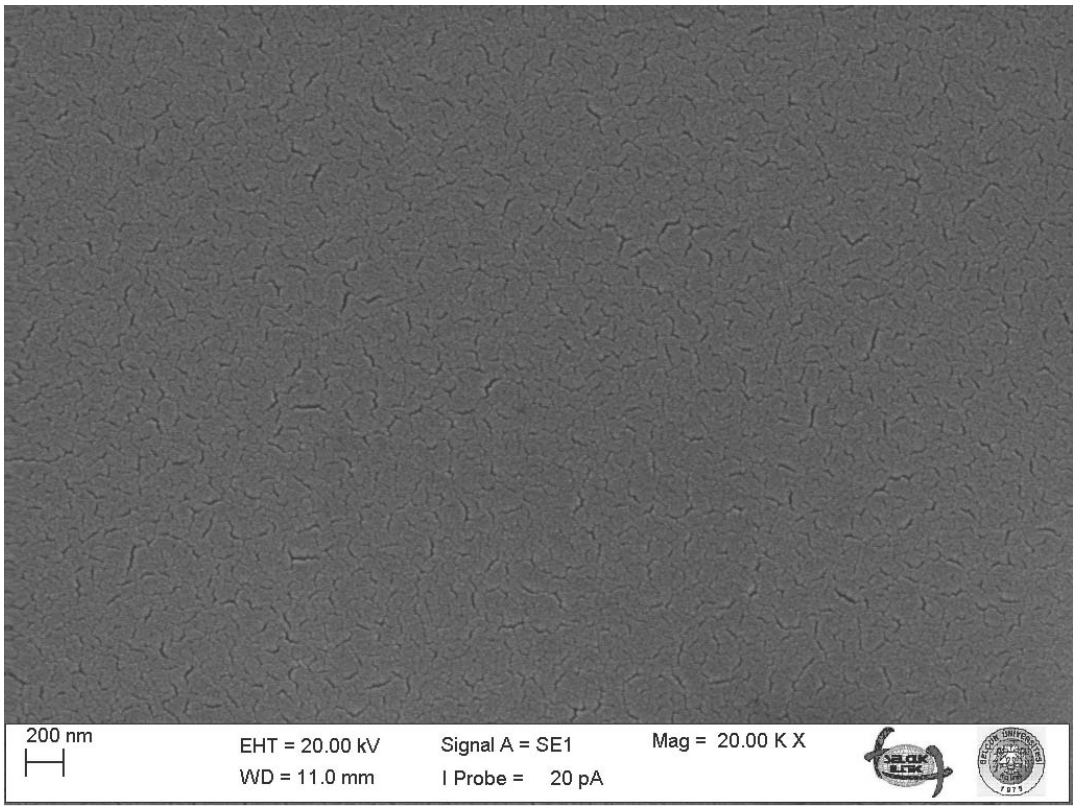
Şekil 5.9. P3HT:PCBM:SWNT'nin tavlanmadan önceki yüzeyi



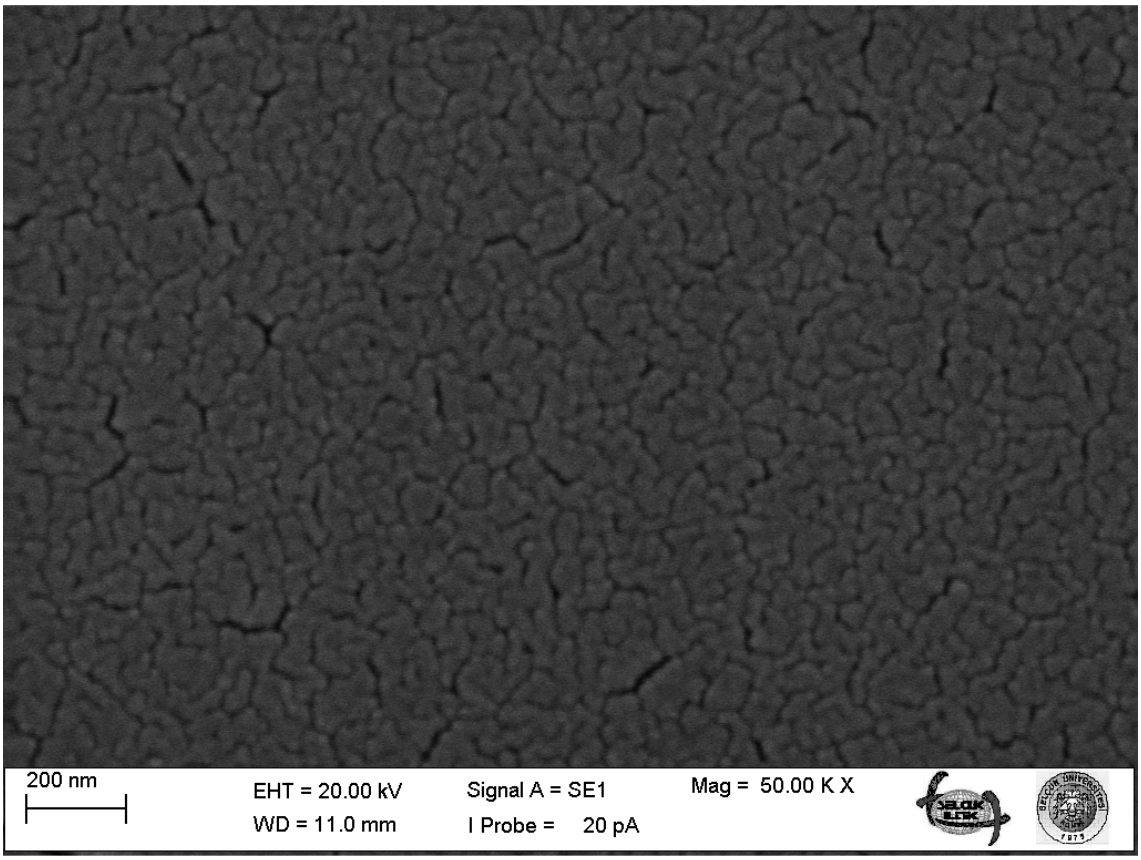
Şekil 5.10. P3HT:PCBM:SWNT'nin tavlandıktan sonraki yüzeyi



Şekil 5.11. P3HT:PCBM:SWNT/TiO_2'in tavlandıktan sonraki yüzeyi



Şekil 5.12. P3HT:PCBM/TiO_2'in tavlanmadan önceki yüzeyi



Şekil 5.13. P3HT:PCBM/TiO_2'in tavlanma işleminden sonraki yüzeyi

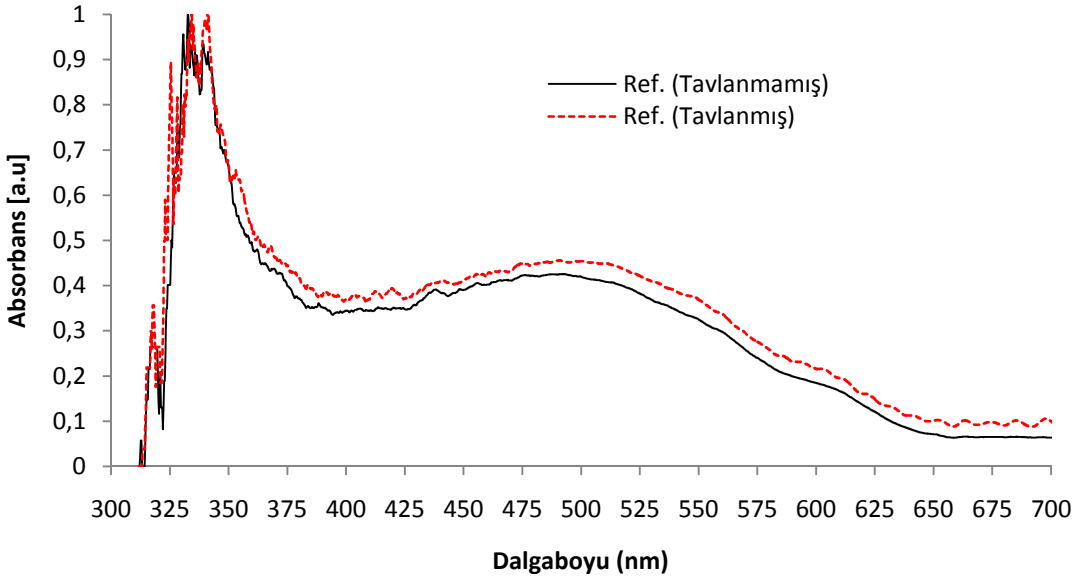
Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de TiO_2 güneş pillerinin SEM görüntüleri görülmektedir. Görüntülerden yapıların hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Tavlamdan sonra güneş pillerindeki çözücünün buharlaştığı anlaşılmaktadır. Bu yapılarda çatlakların birbirine benzemesi polimer malzemeden, ITO kaplı camlardan veya toz partiküllerinden dolayı olabilir.

5.3. Absorbans Ölçümleri

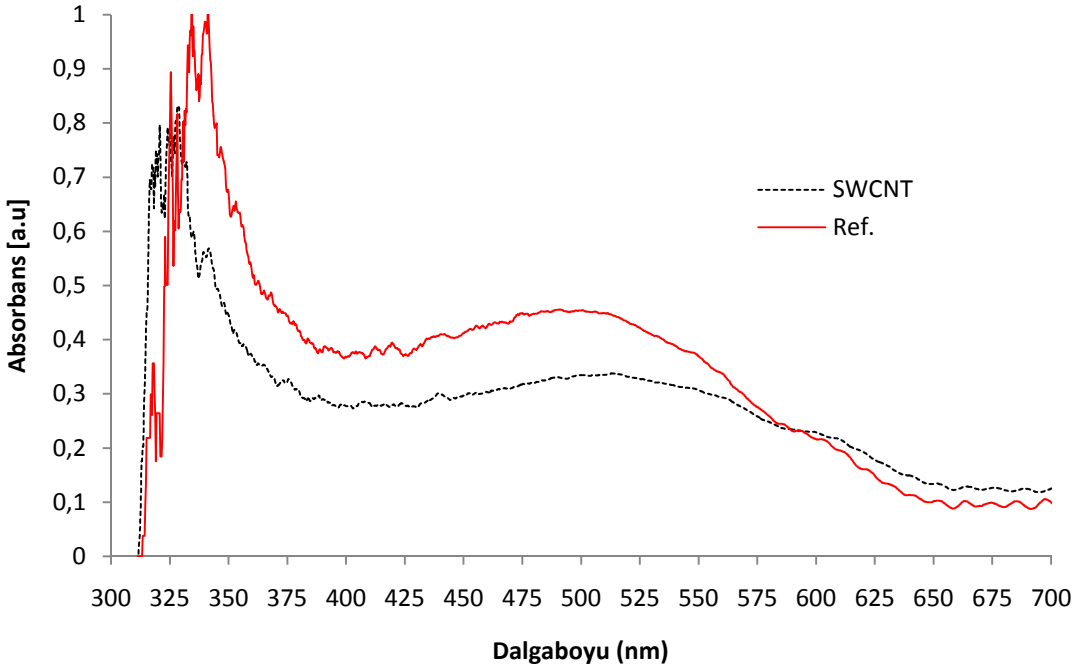
Şekil 5.14'de PEDOT: PSS/P3HT:PCBM güneş pili tavlandıktan sonra absorpsiyon oranı çok az miktar değişmiştir. Absorpsiyon bandı P3HT zincirindeki π-π^*geçişinin karakteristik noktasıdır. P3HT moleküllerinin bu karakteristik noktada düzgün bir şekilde sıralanması absorpsiyon yoğunluğunu artırmaktadır (Huang,2009). Ayrıca güneş pillerinin tavlanması karışımdaki PCBM moleküllerinde perkolasyonu sağlayarak, elektronların elektroda ulaşmasını sağlamaktadır (Kalita,2009).

Şekil 5.15'de tek cidarlı karbon nanotüpün eklenmesi absorpsiyon oranını düşürmüştür. Düşmesinin nedeni film kalınlığından dolayı olmadığı afm ölçümlerinde

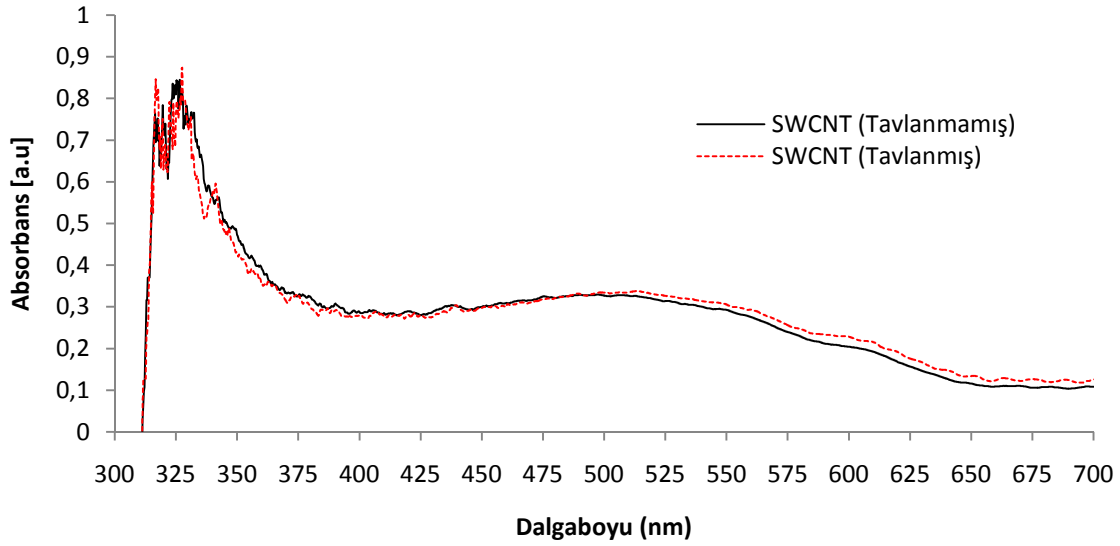
film kalınlıklarının aynı çıkması P3HT:PCBM: SWCNT karışımının homjen bir şekilde dağılmayıp P3HT'nin optik hacmini azaltmasından dolayıdır.



Şekil 5.14. P3HT:PCBM güneş pillerinin tavlanmadan önceki ve sonraki absorpsiyon grafiği.



Şekil 5.15. Tavlanmış P3HT:PCBM ve SWCNT eklenmiş güneş pillerinin absorpsiyon grafiği.

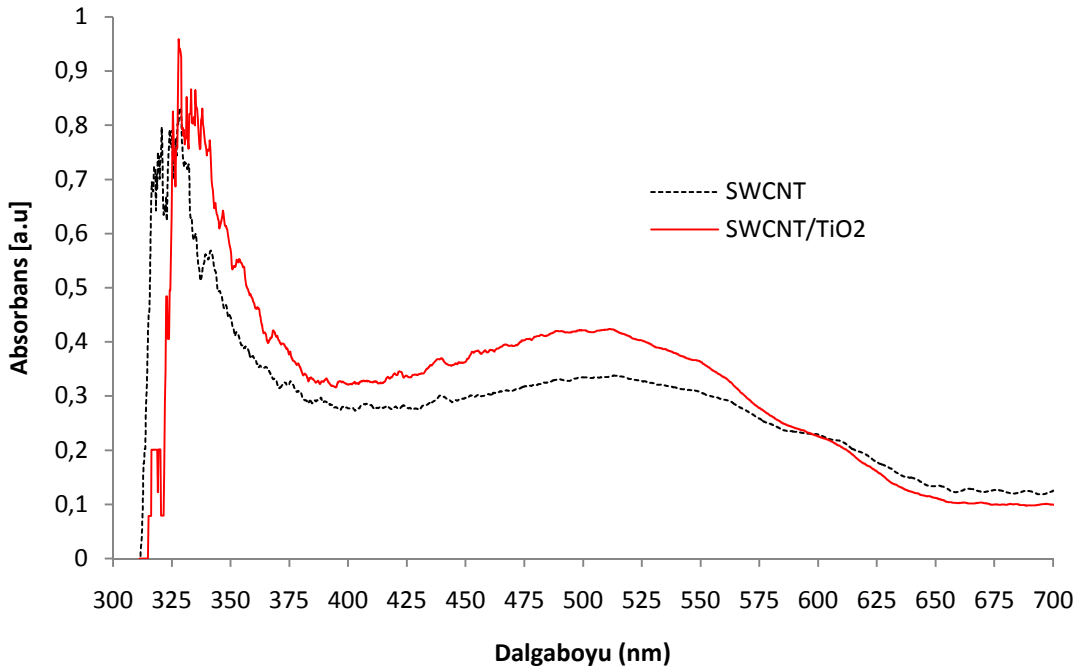


Şekil 5.16. P3HT:PCBM:SWCNT güneş pillerinin tavlanmadan önceki ve sonraki absorpsiyon grafiği.

Tek cidarlı karbon nanotüp P3HT:PCBM içerisine eklenip tavlama işlemine tabi tutulmuş ve diğer tek cidarlı karbon nanotüp eklenen güneş pillerine tavlama işlemi yapılmamıştır. Şekil 5.16'da tek cidarlı karbon nanotüpün tavlanmadan önceki ve sonraki grafikte absorbsiyonu birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Tek cidarlı karbon nanotüpün P3HT:PCBM içerisine eklenmesi referans pile göre absorbsiyonu düşürmekteyken burada tavlama işleminin absorbsiyon oranına etkisi görülmemektedir.

P3HT:PCBM:SWCNT güneş piline TiO_2 tabakasının ilave edilmesiyle absorbsiyon oranı artmıştır. Şekil 5.17'de bu pillerin absorbsiyon grafiği görülmektedir. TiO_2 tabakasının ilave edilmesiyle absorbsiyon oranı artmasına rağmen güneş pilinin verimini düşürmüştür.

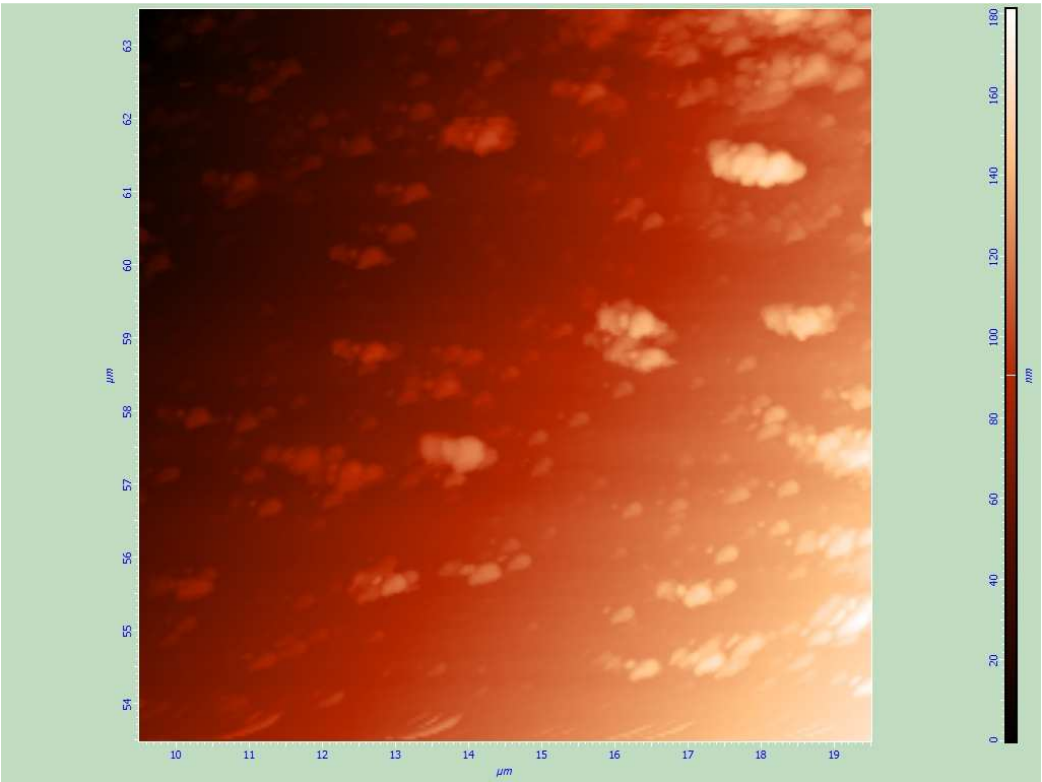
Karbon nanotüpler aktif tabakaya % 1 oranında katıldığında absorbsiyon oranı artarken % 5'den sonraki karışımlarda absorbsiyon oranı düşmektedir. Düşük oranlardaki karbon nanotüpler bağların düzenli bir şekle girmesini sağlayarak absorbsiyon miktarını artırırken yüksek oranlarda kullanılan karbon nanotüpler bağların düzensiz hale gelmesine sebep olmaktadır (Radbeh,2010).



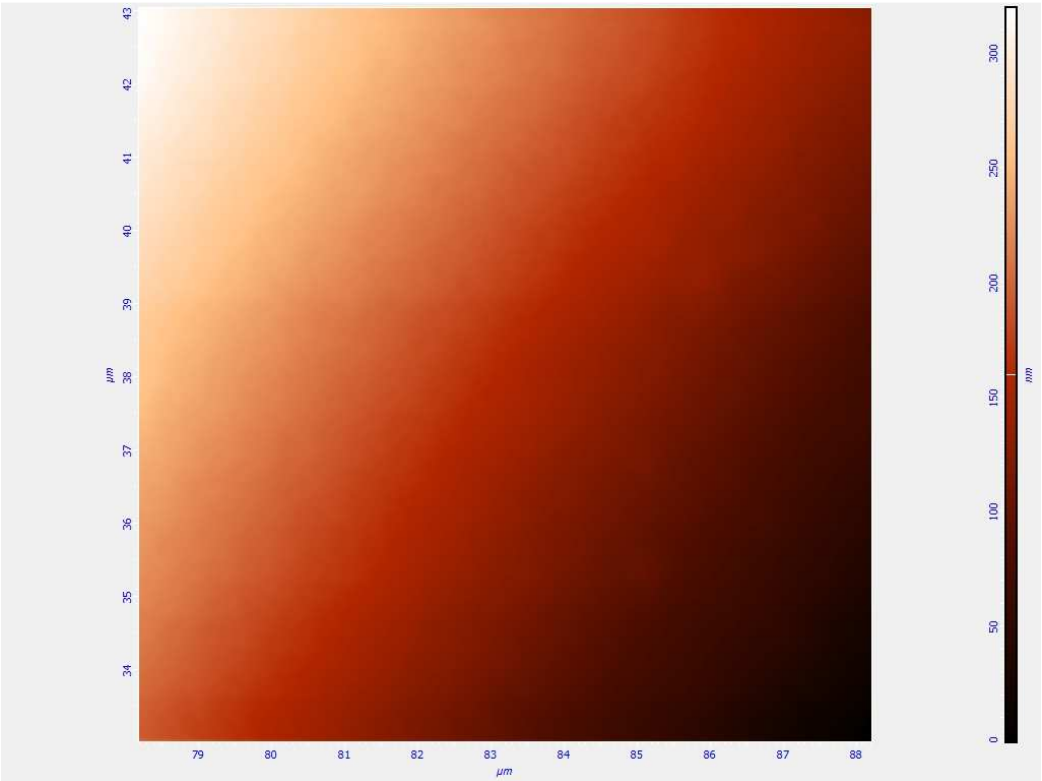
Şekil 5.17. P3HT:PCBM:SWCNT ve TiO_2 tabakası ilave edilmiş güneş pillerinin absorpsiyon grafiği.

5.4. AFM Görüntüleri

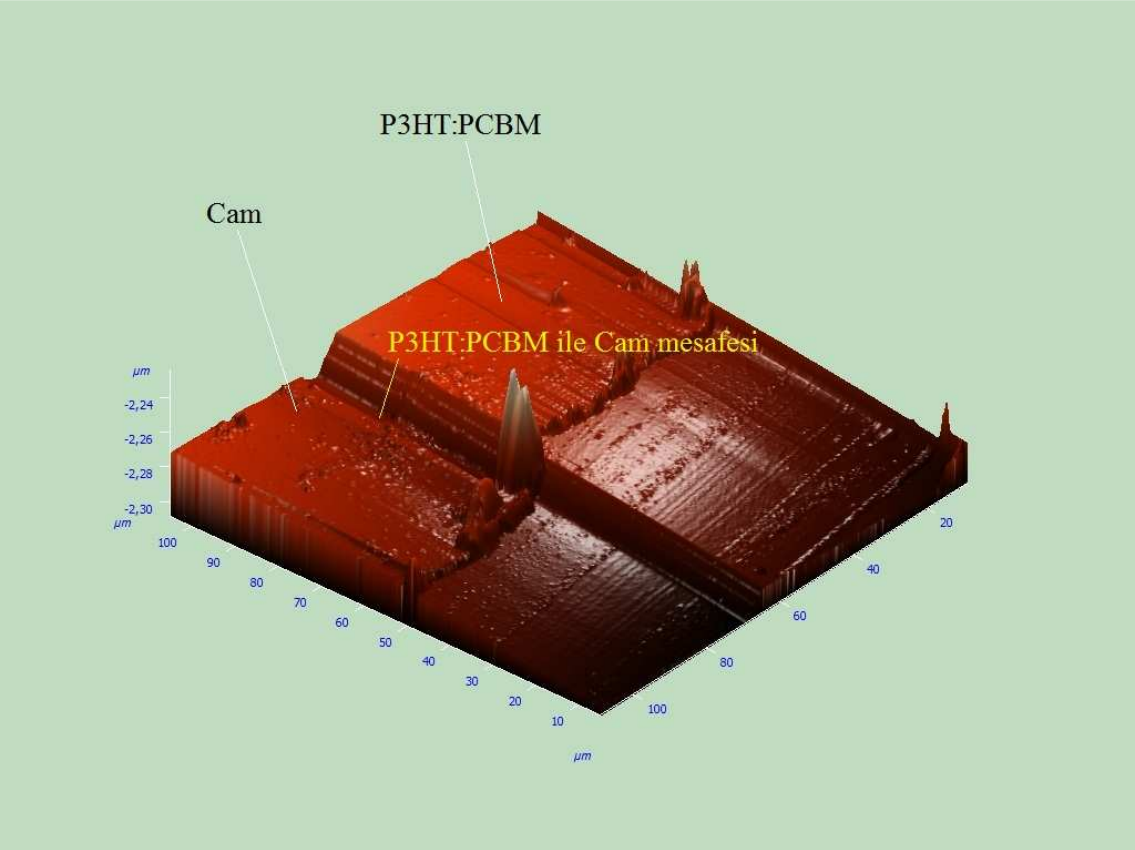
Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da aktif tabakada kullanılan P3HT:PCBM karışımının temel yüzey morfoljisini incelemek için AFM ölçümleri alınmıştır ve yüzey pürüzlülüğü faz ayrımından dolayı olmadığı görülmektedir. Tavlamadan önce film düzgün bir yapıya sahipken tavlandıktan sonra pürüzlü bir yüzeye sahip olmuştur. Pürüzlü yüzey P3HT ve PCBM malzemeleri arasında güçlü bir etkileşim sağlarken pürüzsüz yüzeyde bu durum oluşmamaktadır. Al kaplanması ve ara yüzeysel kimyasal bağlar tavlama boyunca P3HT:PCBM kristalinin aşırı büyümesini engelleyerek iç içe girmiş donör-akseptör bağlarının morfolojisinin bozulmasını önlemektedir (Ma,2005). Ayrıca tavlamanın etkisiyle P3HT:PCBM karışımında boşluk mobilitesi artmaktadır (Vanlaeke,2006). Yüzey pürüzlülüğünün düşük miktarı yük taşınım mesafesini azaltmakta ve akım yoğunluğunu artırmaktadır. Tavlamadan önce homojen bir şekilde dağılmış haldeyken tavlamayla birlikte P3HT ve PCBM fazları birbirinden ayrılarak PCBM birikmeye başlar. Yüzey pürüzlülüğünün tavlamayla artmasının nedeni PCBM'in birikmesinden dolayıdır. Tavlama süresince P3HT yumuşak bir şekil alırken PCBM yüzeyde akışkan hale gelerek yavaş yavaş birikerek şekillenmeye başlar (Huang,2009).



Şekil 5.18. P3HT:PCBM tavlandıktan sonraki AFM görüntüsü.



Şekil 5.19. P3HT:PCBM tavlanmadan önceki AFM görüntüsü.



Şekil 5.20. P3HT:PCBM ile cam mesafesi arasındaki fark.

Şekil 5.20'de P3HT:PCBM filminin kesiti alınarak kalınlığı AFM'de ölçülmüştür. Yaklaşık film kalınlığı 80 nm çıkmıştır. Literatürdeki P3HT:PCBM film kalınlıklarına göre düşük çıkmıştır.

6.SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1.Sonuçlar

Tek cidarlı karbon nanotüp organik güneş pilinde yer alan aktif tabaka içerisinde akseptör malzeme olarak kullanılmıştır. Tek cidarlı karbon nanotüpün ilave edilmesiyle pilin verimi standart pille kıyaslandığında iki kat artırmıştır. Tek cidarlı karbon nanotüpün ilave edilmesi aynı zamanda kısa devre akım yoğunluğunu ve dolum faktörünü de artırmıştır. TiO_2 katmanı ilave edildiğinde ise verim hem standart pile göre hem de tek cidarlı karbon nanotüpe göre düşmüştür. Bunun nedeni TiO_2 katmanının film kalınlığındaki sorundan dolayı olduğu düşünülmektedir.

6.2.Öneriler

Organik güneş pilleri hava ortamında yapıldığından dolayı oksijene maruz kalmış ve bundan dolayı pillerin verimleri, akım yoğunlukları, açık devre gerilimi ve dolum faktörleri düşük çıkmıştır. Organik güneş pilleri glove box sisteminde yapılırsa bu parametrelerde artış sağlanacaktır. ITO kaplı camların yüzey dirençlerinin yüksek olması elektronların hareketini zorlamakta ve bunların yerine yüzey direnci düşük ve parlatılmış yüzeyi düzgün ITO kaplı camların kullanılmasıyla daha iyi bir sonuç elde edilebileceği düşünülmektedir. Organik güneş pillerinde genelde metal elektrot olarak Al kaplanılmaktadır ancak Al havayla temas ettiğinde çabuk oksitlenmektedir. Bu yüzden Al'nin oksijensiz ortamda tutulması gerekir veya Al'nin yerine başka elektrotlarda kullanılabilir. P3HT:PCBM tavlama sıcaklığı, oranı ve süresi organik güneş pillerinin performansını etkilediğinden dolayı optimum oranların belirlenerek yapılması, pillerin karakteristik değerlerinde artış sağlayacağı düşünülmektedir. Karbon nanotüpler elektriksel özelliğe sahip olmasından dolayı boşluk transferni hızlandırmaktadır ve bu yüzden tek cidarlı karbon nanotüpler P3HT:PCBM içerisine katmak yerine ITO ile PEDOT: PSS arasına ince film halinde kaplanabilir. Ayrıca aktif tabakada metalik karbon nanotüpler yerine yarı iletken karbon nanotüpler kullanılması gerekmektedir. Çünkü aktif tabakada ayrılan elektronlar tekrar birleşebilir. Yarı iletken karbon nanotüp kullanıldığında ise elektronlar aktif tabakada zıplamak yerine doğrudan elektrotlara taşınmaktadır. Aynı zamanda karbon nanotüplerin polimer içerisinde

homojen dağılması gerekmektedir aksi takdirde ya piller kısa devre olur ya da elektronların elektrota ulaşması için oluşan doğrudan geçitler oluşmaz (Liu,2008). TiO_2 tabakası boşluk bloke edici ve elektron seçici olarak güneş pillerinde kullanılmasına rağmen hazırladığımız TiO_2 solüsyonu verimi düşürmüştür. Bunun yerine literatüre göre daha iyi sonuçlar veren TiO_2 solüsyonu kullanılabilir.

KAYNAKLAR

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,2010, Işığın Tanacik Modeli, http://www.belgeler.com/blg/ey0/isigin-tanecik-modeli [Ziyaret tarihi: 29 Mayıs 2011].

Anonymous, 2008, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/ [Ziyaret tarihi: 29 Mayıs 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, 2011, Dye-sensitized solar cell [Online], Wikipedia.,http://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell#Degradation [Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2011].

Anonymous, 2011, P-N junction diode reverse bias [Online], Wikipedia.,http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:PnJunction-Diode-everseBias.PNG [Ziyarettarihi: 28 Mayıs 2011].

Anonymous, 2011, Indium tin oxide [Online], Wikipedia., http://en.wikipedia.org/wiki/Indium_tin_oxide [Ziyaret tarihi: 12 Haziran 2011].

Arici,E., Hoppe,H., Schaffler,F., Meissner,D., Ma-lik,M.A.,Sariciftci,N.S.,2004,Morphology effects in nanocrystalline CuInSe2-conjugated polymer hybrid systems Applied Physics A,79:59–64.

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.

Baek,W.H., Yang,H., Yoon,T.S., Kang,C.J., Lee,H.H., Kim,Y.S., 2009, Effect of P3HT:PCBM concentration in solvent on performances of organic solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93: 1263–1267.

Bagienski,W., Gupta,M.C., 2011, Temperature dependence of polymer/fullerene organic solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95: 933–941.

Balderrama,V.S., Estrada,M., Cerdeira,A., Soto-Cruz,B.S., Marsal,L.F., Pallares,J.,Nolasco,J.C., Iñiguez,B., Palomares,E., Albero,J., 2011, Influence of P3HT:PCBM blend preparation on the active layer morphology and cell degradation, *Microelectronics Reliability*,51: 597–601.

Benanti, T.L. and Venkataraman, D., 2006, Organic solar cells: An overview focusing on active layer morphology, *Photosynthesis Research*, 87: 73-81.

Berson,S., Bettignies,R., Bailly,S., Guillerez,S., Jousselme,B., 2007, Elaboration of P3HT/CNT/PCBM Composites for Organic Photovoltaic Cells, *Advanced Functional Materials*, 17:3363–3370.

Brabec, C.J., Cravino, A., Meissner, D., Sariciftci N.S., Fromherz, T., Rispens, 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., Sarıçiftçi, N.S.,Hummelen,J.C.,2001, Plastic Solar Cells, *Advanced Functional Materials*,11 No:1.

Brabec,C.J.,Cravino,A.,Meissner,D., Sarıçiftçi, N.S.,Rispens,M.T.,Sanchez,L., Hummelen,J.C.,Fromherz,T.,2002, The İnfluence of Materials Work Function On The Open Circuit Voltage of Plastic Solar Cells, *Thin Solid Films*,403: 368–372.

Burroughes, J.H., Bradley, D.D.C., Brown, A.R., Marks, R.N., MacKay K.,Friend,R.H.,Burn,P.L, Holmes,A.B., 1990, Light-Emitting-Diodes Based on Conjugated Polymers, *Nature*, 347: 539-541.

Bundgaard,E., Krebs,F.C.,2007, Low Band Gap Polymers For Organic Photovoltaics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*,91: 954-985.

Chandrasekaran,J., Nithyaprakash,D., Ajjan,K.B., Maruthamuthu,S., Manoharan,D., Kumar,S., 2011, Hybrid solar cell based on blending of organic and inorganic materials-An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 1228–1238.

Chen,F.C., Ko,C.J., Wu,J.L., Chen,W.C., 2010, Morphological study of P3HT:PCBM blend films prepared through solvent annealing for solar cell applications, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94: 2426–2430.

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.

Choi,S.H., Song,H., Park,I.K., Yum,J.H., Kim,S.S., Lee,S., 2006, Synthesis of size controlled CdSe quantum dots and characterization of CdSe-conjugated polymer blends for hybrid solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 179:135–41.

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.

Demir,O.,2011, Çok Cidarlı Karbon Nanotüp Ve TiO_2 Tabaka İlavesinin P3HT: PCBM Organik Güneş Pillerinin Performansına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstiütüsü*,Konya,1-80.

Dennler,G.,Scharber,M.C., Brabec,C.J.,2009, Polymer-Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells, *Advanced Materials*, 21: 1323–1338.

Derbal-Habak,H., Bergeret,C., Cousseau,J., Nunzi,J.M., 2011, mproving the current density Jsc of organic solar cells P3HT:PCBM by structuring the photoactive layer with functionalized SWCNTs, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95: S53–S56.

Drees, M., Premaratne, K., Graupner, W., Heflin, J.R., Davis, R.M., Marciu, D.,Miller, M.,2002, Creation Of A Gradient Polymer–Fullerene İnterface İn Photovoltaic Devices By Thermally Controlled İnterdiffusion, *Applied Physics Letters* 81:1.

Ebadian,S., Gholamkhass,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)-polystrenesulfonic acid films electrical properties, *Superlattices and Microstructures*, 46, 44-51

Gourdin,G.,2007, Solar Cell Technology Current State Of The Art, *Prepositional*, 3:

Guo,T.F., Wen,T.C., Pakhomov,G.L., Chin,X.G., Liou,S.H., Yeh,P.H., Yang, C.H., 2008, Effects of film treatment on the performance of poly(3-hexylthiophene)/soluble fullerene-based organic solar cells, *Thin Solid Films*, 516: 3138–3142.

Günes, S., 2006, Nanostructered Electrodes From Inorganic Materials for Hybrid Solar Cells, Doktora Tezi, *Linz Institute for Solar Cells (LIOS)*, Linz, 41-42.

Güneş,S., Neugebauer,H., Sarıçiftçi, N.S.,2007, Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells, *Chemical Reviews*, 107: 1324−1338.

Güneş,S., Sarıçiftçi, N.S., 2008, Hybrid solar cells, *Inorganica Chimica Acta*, 361:581–588.

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.

Hänsel, H., Zettl, H., Krausch, G., Kisselev, R., Thelakkat, M. and Schmidt, H.W., 2003, Optical and Electronical Contributions in Double-Heterojunction Organic Thin-Film Solar Cells, *Advanced Materials*, 15, No. 24.

Hioms,R.C., Bettignies,R., Leroy,J., Bailly,S., Firon,M., Sentein,C., Khoukh,A., Preud'homme,H., Dagron-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.

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*, 2141-86.

Huang,Y.C., Liao,Y.C., Li,S.S., Wu,M.C., Chen,C.W., Su,W.F., 2009, Study of the effect of annealing process on the performance of P3HT/PCBM photovoltaic devices using scanning-probe microscopy, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93: 888–892.

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.

Jørgensen, M., Norrman, K. and Krebs, F.C., 2008, Stability/degradation of polymer solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 686-714.

Kalita,G., Masahiro,M., Koichi,W., Umeno,M., 2009, Nanostructured morphology of P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells, *Solid-State Electronics*, 54: 447–451.

Karagiannidis,P.G., Kassavetis,S., Pitsalidis,C., Logothetidis,S., 2011, Thermal annealing effect on the nanomechanical properties and structure of P3HT: PCBM thin films, *Thin Solid Films*, 519 : 4105–4109.

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.

Kietzske, T., 2007, Recent Advances in Organic Solar Cells, *Advances in Optoelectronics*, 40285.

Kim,J.Y., Kim,S.H., Lee,H.H., Lee,K., Ma,W., Gong,X., 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.

Kim,S.J., Kim,W.J., Cartwright,A.N., Prasad,P.N., 2011, Self-Passivating hybrid (organic/inorganic) tandem solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93: 657–66.

Kim,Y., Ballantyne,M.A., Nelson,J., Bradley,D.D.C., 2009, Effects of thickness and thermal annealing of the PEDOT:PSS layer on the performance of polymer solar cells, *Organic Electronics*, 10: 205–209.

Kim,Y., Choulis,S.A, Nelson,J., Bradley,D.D.C., 2005, Device annealing effect in organic solar cells with blends of regioregular poly□3-hexylthiophene□ and soluble fullerene, *Applıed Physıcs Letters*, 86: 063502.

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

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., Amaratunga,G.A.J., 2005, Carbon Nanotubes as electron acceptors in polymer photovoltaics, *Revıews On Advanced Materıals Science*, 10:300-305.

Kymakis,E., Alexandou,I., Amaratunga,G.A.J., 2002, Single-Walled carbon nanotube-polymer composite: electrical, optical and structural investigation, *Synthetic Metals*, 127:59-62.

Kymakis,E., Stratakis,E., Koudoumas,E., 2007, Integration of carbon nanotubes as hole transport electrode in polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells, *Thin Solid Films*,*5*15: 8598–8600.

Lee, K., Kim, J.Y., Park, S.H., Kim, S.H., Cho, Shinuk and Heeger, A.J., 2007, Air-Stable Polymer Electronic Devices, *Advanced Materials*, 19, 2445-2449.

Lee,J.K., Ma,W.L., Brabec,C.J., Yuen,J., Moon,J.S., Kim,J.Y, Lee,K., Bazan,G.C., Heeger,A.J., 2008, Processing additives for improved efficiency from bulk heterojunction solar cells, *Journal American Chemical Society*, 130: 3619–3623.

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,C., Chen,Y., Wang,Y., Iqbal,Z., Chhowalla,M., Mitra,S., 2007, A fullerene–single wall carbon nanotube complex for polymer bulkheterojunction photovoltaic cells, *Journal of Materials Chemistry*, 17: 2406–2411.

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*, 95: 2511–2515.

Liu,J., Tanaka,T., Sivula,K., Alivisatos,P.A, Frechet,J.M.J.,2004, Employing end functional polythiophene to control the morphology of nanocrystal-polymer composites in hybrid solar cells, *Journal American Chemical Society*, 126:6550–1.

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.

Liu, L., Stanchina, W.E. and Li, G., 2008, Enhanced Performance of Bulk Heterojunction Solar Cells Fabricated by Polymer:Fullerene:Carbon-Nanotube Composites, *Nanotechnology,8th IEEE Conference* , Arlington, 233-236.

Ma,W., Yang,C., Gong,X., Lee,K., 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, Ph.D. Thesis Proposal, *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.

Nagata,T., Oh,S., Chikyow,T., Wakayama,Y., 2011, Effect of UV–ozone treatment on electrical properties of PEDOT:PSS film, *Organic Electronics*, 12: 279–284.

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.

O'Regan B. Ve Gratzel M., 1991, A Low-Cost, High-Efficiency Solar-Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO2 Films. *Nature*, 353: 737-740.

Özgöçmen,A.,2007, Güneş Pilleri Kullanarak Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,13.

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.,Unalan,H.E.,Kanwal, A.,Miller, S. and Chhowalla, M., 2005, Conducting and transparent single-wall carbon nanotube electrodes for polymer-fullerene solar cells, *Applied Physics Letters*, 87, 203511.

Peng,F., Wu,J., Li,Q., Wang,Y., Yue,G., Xiao,Y., Li,Q., Lan,Z., Fan,L., Lin,J., Huang,M.,2011, Semiconducting polymer-incorporated Nanocrystalline TiO2 particles for photovoltaic applications, *Electrochimica Acta*,56: 5184–5188.

Prall,H.J., 2005, Tandem Solar Cells, Thesis, *Linz Institute for Organic Solar Cells*, Austria.

Radbeh,R., Parbaile,E., Chakaroun,M., Ratier,B., Aldissi,M., Moliton,A.,2010, Enhanced efficiency of polymeric solar cells via alignment of carbon nanotubes, Polymer International, 59:1514-1519.

Saga, T., 2010, Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production, *NPG Asia Materials*, 2(3), 96-102.

Sarıçiftçi, N.S., Smilowitz L., Heeger A.J. ve Wudl F.,1992, Photoinduced Electron-Transfer From a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene. *Science*, 258: 1474-1476.

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.

Schweitzer,B., Bassler,H.,2000, Excitons in Conjugated Polymers, *Synthetic Metals*, 109: 1–6.

Sharma,S.S.,Sharma,G.D., Mikroyannidis,J.A.,2011, Improved power conversion efficiency of bulk heterojunctionpoly(3-hexylthiophene):PCBM photovoltaic devices using smallmolecule additive, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95:1219–1223.

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.

Subash,S., Chowdhury,M.H.,2009, High Efficiency Carbon Nanotube Based Solar Cells For Electronics Devices, *Integrated Circuits, ISIC '09. Proceedings of the 12th International Symposium on*,USA,240-243.

Tang,C.W.,1986, Two Layer Organic Photovoltaic Cell, *Applied Physics Letters* 48,183.

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 methl ester processed with oleic acid surfactant, *Applied Physics Letters*, 90: 183512-1-3.

Winder,C., Sarıçiftçi, N.S., 2004, Low bandgap polymers for photon harvesting in bulk heterojunction solar cells, *Journal of Materials Chemistry*, 14:1077–1086

Wu,M.C., Lo,H.H., Liao,H.C., Chen,S., Lin,Y.Y., Yen, W.C., 2009, Using scanning probe microscopy to study the effect of molecular weight of poly(3-hexylthiophene) on the performance of poly(3-hexylthiophene):TiO2 nanorod photovoltaic devices, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93:869–873.

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.

Vanlaeke,P., Swinnen,A., Haeldermans,I., Vanhoyland,G., Aernouts,T., Cheyns,D. Deibel,B., D'Haen,J., Heremans,P., Poortmans,J., Manca, J.V., 2006,

P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cells:Relation between morphology and electro-optical characteristics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90: 2150–2158.

Yamanari,T., Taima,T., Hara,K., Saito,K., 2006, Investigation of optimum conditions for high-efficiency organic thin-film solar cells based on polymer blends, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 182: 269–272.

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.

Yang,Y., Yao,Y., Hou,J., Xu,Z., Li,G., 2008, Effects of solvent mixtures on the nanoscale phase separation in polymer solar cells, *Advanced Functional Materials*, 18: 1783–1789.

Yu,G., Gao, J.,Hummelen, J.C.,Wudl, F.,Heeger, A.J.,1995, Polymer Photovoltaic Cells:Enhanced Efficiencies Via A Network Of İnternal 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.

Zeng,T.W., Lo,H.H., Chang,C.H., Lin,Y.Y., Chen,C.W., Su,W.F., 2009, Hybrid poly(3-hexylthiophene)/titanium dioxide nanorods material for solar cell applications, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93:952–957.

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.

Zhokhavets,U., Erb,T., Hoppe,H., Gobsch,G., Sarıçiftçi, N.S., 2006, Effect of annealing of poly(3-hexylthiophene)/fullerene bulk heterojunction composites on structural and optical properties, *Thin Solid Films*, 496: 679 – 682.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Adem YAR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Aksaray,10.02.1984
Telefon :
Faks :
e-mail : admyr42@gmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	**Aksaray Lisesi, Merkez,AKSARAY**	**2000**
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA**	**2007**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA**	**2007- ….**
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009-2010	**Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü**	**Atölye Teknik El.**
2010-2011	**B.Ü Müh. Mim. Fak. Makine Müh.**	**Araştırma Gör.**

UZMANLIK ALANI
Makina Mühendisliği

YABANCI DİLLER
İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR