



**P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK
GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE
PENTACENE MALZEMESİNİN GÜÇ
DÖNÜŞÜM VERİMİNE ETKİSİ**

Ümit ERKEM

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet BİBER
2019**

Her Hakkı Saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK GÜNEŞ
PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE PENTACENE
MALZEMESİNİN GÜÇ DÖNÜŞÜM VERİMİNE ETKİSİ**

Ümit ERKEM

FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

ERZURUM
2019

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

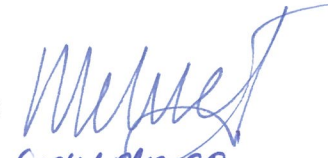




TEZ ONAY FORMU

P3HT:PCBM Tabanlı Heteroeklem Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyonu ve Pentacene Malzemesinin Güç Dönüşüm Verimine Etkisi

Prof. Dr. Mehmet BİBER danışmanlığında, Ümit ERKEM tarafından hazırlanan bu çalışma, 30/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet BİBER
Üye : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Zakir ÇALDIRAN

İmza : 
İmza : 
İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **12/09/2019** tarih ve **36/75** nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 212T012

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

P3HT:PCBM TABANLI HETEROEKLEM ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE PENTACENE MALZEMESİNİN GÜÇ DÖNÜŞÜM VERİMİNE ETKİSİ

Ümit ERKEM

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet BİBER

Bu tez çalışmasında, aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM karışımını içeren geleneksel katı heteroeklem (BHJ) organik güneş pillerinin fabrikasyonu gerçekleştirildi. İlk aşamada, aseton, 2-propanol ve DI su ile ITO'nun kimyasal temizliği yapıldı. Geleneksel katı heteroeklem (BHJ) organik güneş pilinin fabrikasyonu için PEDOT:PSS çözeltisi ITO yüzeyine dönel kaplama (spin coating) ile 4000 rpm'de 45 saniye boyunca döndürülerek kaplandı ve ardından sıcak tabla (hot plate) üzerinde 5 dakika boyunca 130°C'de tavlandı. Daha sonra, P3HT:PCBM aktif tabakası 900 rpm'de 50 saniye eldivenli kabin (glove box) içindeki spin coater ile döndürülerek kaplandı ve glove box içindeki hot plate üzerinde 5 dakika boyunca 110°C'de tavlandı. Son olarak termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak P3HT:PCBM aktif tabakası üzerine 100 nm kalınlığındaki alüminyum (Al) kaplandı ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel BHJ organik güneş pili yapısı birinci referans aygıt olarak elde edildi. Daha sonra elde ettiğimiz referans pilimizde P3HT:PCBM ile Al arasına termal buharlaştırma yöntemi ile 2 nm kalınlığında LiF tabakası kaplandı ve ikinci bir referans pili elde edildi. Son aşamada, P3HT:PCBM aktif tabakasına kütlece %0,5, %1 ve %1,5 oranında pentacene malzemesi katılarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Pentacene/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem (BHJ) organik güneş pili yapısı elde edildi. Elde edilen aygıtlar glove box içinde karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık etkisi altında akım yoğunluğu-voltaj (J-V) ölçümleri yapıldı ve aygıt parametreleri J-V eğrileri ile hesaplandı. Pentacene katıldıktan sonra güneş pilimizin soğurma şiddetinin arttığı, aygıt yapısında LiF kullanılması ve aktif tabakaya pentacene katılması ile güç dönüşüm veriminin %0,64'ten %2,65'e çıktığı gözlemlendi.

2019, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: Organik Güneş Pilleri, P3HT:PCBM, Heteroeklem, Geleneksel OPV, Pentacene

ABSTRACT

MS. Thesis

FABRICATION OF P3HT:PCBM BASED HETEROJUNCTION SOLAR CELLS AND THE EFFECT OF PENTACENE MATERIAL ON THE POWER CONVERSION EFFICIENCY

Ümit ERKEM

Atatürk University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Physics
Solid State Physics

Supervisor: Prof. Mehmet BİBER

In this thesis, fabrication of traditional organic photovoltaics (OPV) were performed which includes mixture of P3HT and PCBM as the active layer. Firstly, the chemical cleaning of ITO was done with acetone, 2-propanol and DI water. After, PEDOT: PSS layer was coated on ITO substrates by spin coating at 4000 rpm for 45 sec. and annealed at 130 °C for 5 min on a hot plate in ambient. Subsequently, P3HT: PCBM active layer was coated by spin coating at 900 rpm for 50 sec on top of PEDOT:PSS and annealed at 110 °C for 5 min. on the hot plate in glove box. Finally, 100 nm thick aluminum (Al) was coated using thermal evaporation in glove box system and ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organic solar cells structure were obtained. In addition, pentacene (1%) material was doped into P3HT:PCBM active layer and by the same method ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:pentacene/Al bulk heterojunction organic solar cell structure was obtained. For devices, dark and light current density-voltage (J-V) measurements were performed under 100 mW/cm² light effect in glove box and device parameters were calculated by J-V curve. After the addition of Penracene, it was observed that the absorption intensity of our solar cell increased and the power conversion efficiency increased from 0.64% to 2.65% with the use of LiF in the device structure and the addition of pentacene to the active layer.

2019, 71 pages

Keywords: Organic solar cells, P3HT:PCBM, Heterojunction, Conventional OPV, Pentacene

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma Sayın Prof. Dr. Mehmet BİBER danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım boyunca desteğini gördüğüm, bilgilerinden yararlandığım değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mehmet BİBER'e, Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zakir ÇALDIRAN'a ve Sayın Dr. Hatice KAÇUŐ'a teşekkürlerimi arz ederim.

Laboratuvar imkanlarından yararlanmamızı sağladığı için Fizik bölüm başkanlığına, Fizik bölümü öğretim elemanlarına ve araŐtırmacı arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım süresince kıymetli vakitlerini harcayan Sayın Uzm. Yasin NUHOĐLU'na teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca beni sabırla destekleyen aileme teşekkür ederim.

Ümit ERKEM

Eylül, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Güneş Enerjisinin Avantajları	2
1.2. Güneş Enerjisinin Dezavantajları.....	2
1.3. Güneş Enerjisi ve Kullanım Alanları	3
1.4. Türkiye’deki Mevcut Güneş Enerjisi Durumu	4
1.5. Güneş Enerjisi Teknolojisi	5
1.6. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Dünya Pazarındaki Önemi	7
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Güneş Pillerinin Tarihi	10
2.2. Fotovoltaik Olay ve Güneş Pilleri	11
2.3. Literatürdeki Güneş Pilleri Üzerine Yapılan Çalışmalar	14
2.4. Yarıiletkenler.....	23
2.5. Yarıiletken Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi	25
2.6. Fotovoltaik Güneş Pili Çeşitleri	28
2.6.1. Tek katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pilleri	28
2.6.2. İki katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pilleri.....	28
2.6.3. Tek kristal silisyum fotovoltaik güneş pilleri.....	28
2.6.4. Polikristal silisyum fotovoltaik güneş pilleri.....	29
2.6.5. İnce film fotovoltaik güneş pilleri	29
2.6.6. Amorf silisyum fotovoltaik güneş pilleri	30
2.6.7. Çok kristalli ince film fotovoltaik güneş pilleri	30
2.6.8. İnce film kalkojenit fotovoltaik güneş pilleri	30
2.6.9. Kadmiyum tellür (CdTe) fotovoltaik güneş pilleri.....	31

2.6.10. Bakır indiyum diselenit (CIS) fotovoltaik güneş pilleri.....	31
2.6.11. Bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) fotovoltaik güneş pilleri	32
2.6.12. Çok eklemli fotovoltaik güneş pilleri	32
2.6.13. Nano fotovoltaik (NanoPV) güneş pilleri	33
2.6.14. Kuantum noktalı fotovoltaik güneş pilleri.....	33
2.6.15. Boya duyarlı fotovoltaik güneş pilleri.....	34
2.6.16. Organik fotovoltaik güneş pilleri	34
2.6.16.a. Organik fotovoltaik güneş pillerinin çalışma ilkesi.....	36
2.7. Heteroeklem Yapılar	38
2.8. Güneş Pillerinin Karakteristiği	39
2.8.1. Güneş pillerinin güç dönüşüm verimi	40
2.8.2. Güneş pillerinin kısa devre akımı (I_{sc})	41
2.8.3. Güneş pillerinin açık devre voltajı (V_{oc})	41
2.8.4. Güneş pillerinin dolun faktörü (FF)	41
2.8.5. Güneş pillerinin maksimum güç noktası (MPP)	42
2.9. Bir Güneş Piliin Elektriksel Eşdeğer Devresi	43
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	44
3.1. Giriş	44
3.2. Geleneksel Katı Heteroeklem Organik Güneş Pillerinin Üretiminde	
Kullanılan Materyaller	44
3.2.1. ITO (İndiyum kalay oksit).....	45
3.2.2. PEDOT:PSS	46
3.2.3. P3HT:PCBM	47
3.2.4. Pentacene.....	48
3.3. Organik Güneş Pillerinin Hazırlanması ve Karakterizasyon Aşamaları	49
3.3.1. ITO'nun kimyasal temizlik aşamaları	49
3.3.2. PEDOT:PSS'in hazırlanması	50
3.3.3. P3HT:PCBM aktif tabaka malzemelerinin hazırlanması	50
3.3.4. Pentacene katkılı aktif tabaka olan P3HT:PCBM:Pentacene	
malzemelerinin hazırlanması	50
3.4. Organik Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyonu	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	54

4.1. Giriş	54
4.2. Aktif Tabaka Filminin AFM Görüntüsü ve Soğurma Spektrumları	54
4.3. P3HT:PCBM Tabanlı Organik Güneş Pillerinin J-V (Akım Yoğunluğu- Voltaj) Ölçümleri	56
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	66
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	72



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
Al	Alimünyum
BHJ	Katı Heteroeklem
c	Işık Hızı
C.B.	Conduction Band (İletim Bandı)
CdTe	Kadmiyum Tellür
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Diselenit
cm	Santimetre
CZTS	Bakır Çinko Kalay Sülfür
DSSC	Boya Duyarlı Güneş Hücreleri
E	Elektrik Alan
EQE	Dış Kuantum Verimi
eV	Elektron Volt
FF	Dolum Faktörü
GaAs	Galyum Arsenik
GO	Grafen Oksit
GW	Cigawat
h	Planck Sabiti
HOMO	İşgal Edilmiş En Yüksek Moleküler Orbital
h ν	Foton Enerjisi
IPCE	Dahili Güç Dönüşüm Verimi
ITO	İndiyum Kalay Oksit
I-V	Akım-Voltaj
J	Akım Yoğunluğu
J _{sc}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
J-V	Akım Yoğunluğu-Voltaj
K	Kelvin
LUMO	İşgal Edilmemiş En Düşük Moleküler Orbital
mm	milimetre

MW	Megawatt
mW	Miliwatt
nm	Nanometre
NPs	Nanoparçacık
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NRs	Nanorod
OPV	Organik Fotovoltaik
P3HT	Poly 3-hexylthiophene
PCBM	6,6-phenyl C ₆₁ butyric acid methyl ester
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)
PV	Fotovoltaik
QDPV	Kuantum Dot Fotovoltaikler
REN	Yenilenebilir Küresel Durum Raporu
R _s	Seri Direnç
R _{SH}	Paralel Direnç
Si	Silisyum
V.B.	Valans Bandı (Değerlik Bandı)
V _{OC}	Açık Devre Voltajı
λ	Dalga Boyu
Φ	İş Fonksiyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünyanın güneş aydınlanma haritası.....	3
Şekil 1.2. Türkiye'deki güneş enerji potansiyel atlası	4
Şekil 1.3. Türkiye'nin aylara göre güneşlenme süreleri	6
Şekil 1.4. Türkiye'deki PV tipi-alan-üretilebilecek enerji.....	7
Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların enerji bant diyagramları.....	25
Şekil 2.2. Bir fotovoltaiik güneş pilinin temel çalışma prensibi.....	26
Şekil 2.3. Fotovoltaiik güneş pilinin yapısı.....	26
Şekil 2.4. Örnek bir fotovoltaiik güneş pili hücresi	27
Şekil 2.5. P3HT:PCBM aktif tabanlı geleneksel heteroeklem organik güneş pilinin şematik gösterimi	36
Şekil 2.6. Güneşten gelen fotonların soğurulması ve yük taşıyıcı transferleri	38
Şekil 2.7. a) p tipi ve n tipi iki farklı yarıiletkenin enerji band diyagramları b) p-n heteroeklem yapıların enerji band diyagramları	39
Şekil 2.8. Bir güneş pilinin karanlıkta ve ışık altında akım-voltaj (I-V) karakteristiği	40
Şekil 2.9. Bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi	43
Şekil 3.1. Geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde kullanılan ITO'ların görüntüsü.....	46
Şekil 3.2. PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı	47
Şekil 3.3. P3HT ve PCBM'nin kimyasal yapısı	48
Şekil 3.4. Pentacene organik malzemesinin kimyasal yapısı.....	49
Şekil 3.5. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin görüntüsü	52
Şekil3.6. Referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT: PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin aygıt yapıları	53
Şekil 4.1. P3HT:PCBM:Pentacene ince filminin AFM görüntüsü	54
Şekil 4.2. P3HT:PCBM:Pentacene, P3HT:PCBM ve pentacene ince filmlerinin soğurma spektrumları	55

Şekil 4.3. Referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri	57
Şekil 4.4. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri	58
Şekil 4.5. İkinci referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri	59
Şekil 4.6. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene (%0,5)/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri	61
Şekil 4.7. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene(%1)/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri	62
Şekil 4.8. Geleneksel katıheteroeklem organik güneş pillerinin ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Türkiye'nin bölgelerinin yıllık bazda ortalama güneşlenme süreleri 1

Çizelge 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al,
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al,
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al,
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al geleneksel katı
heteroeklem organik güneş pillerinin temel aygıt parametreleri..... 64



1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, güneşten gelen ve dünya atmosferi dışında şiddeti sabit olan (1370 W/m^2) ve yer yüzeyinde $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, ısınma ve elektrik üretimi amaçlı kullanılabilir. Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi ortalama olarak 2640 saattir. Çizelge 1.1'de Türkiye'nin bölgelerindeki yıllık güneş alma sürelerinin bulunduğu grafiği verilmiştir (YEGM).

Çizelge 1.1. Türkiye'nin bölgelerinin yıllık bazda ortalama güneşlenme süreleri

BÖLGE	Güneşlenme Süresi (saat /yıl)
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	3016
Akdeniz Bölgesi	2923
Ege Bölgesi	2726
İç Anadolu Bölgesi	2712
Doğu Anadolu Bölgesi	2693
Marmara Bölgesi	2528
Karadeniz Bölgesi	1966

Güneşlenme süresi yönünden Güneydoğu Anadolu bölgesi en zengin bölgedir. Bunu sırası ile Akdeniz Bölgesi, Ege Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi, Doğu Anadolu Bölgesi, Marmara ve Karadeniz Bölgeleri izlemektedir. Güneş enerjisi, dünya üzerinde yer alan tüm potansiyel enerjilerin kaynağı olarak kabul edilmektedir. Fosil yakıtlar, rüzgâr, hidroelektrik, biyogaz gibi tüm enerji türleri güneş enerjisinden oluşmaktadır. Güneş enerjisinin temel kaynağı güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonlarıdır. Güneşten yeryüzüne gelen toplam güneş ışınımı, dolaysız (direkt) ve dolaylı (yaygın) olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Direkt ışınım adından da anlaşılacağı üzere doğrudan güneşten gelen ışınımdır. Yaygın ışınım ise tüm gök küreden gelen belirli yönü ve doğrultusu olmayan ışınımlardır. Yutulan ve saçılan güneş ışınımının dağınık bir şekilde yeryüzüne ulaşabilen kısım ise yaygın ışınımı oluşturur (Küpeli 2005).

1.1. Güneş Enerjisinin Avantajları

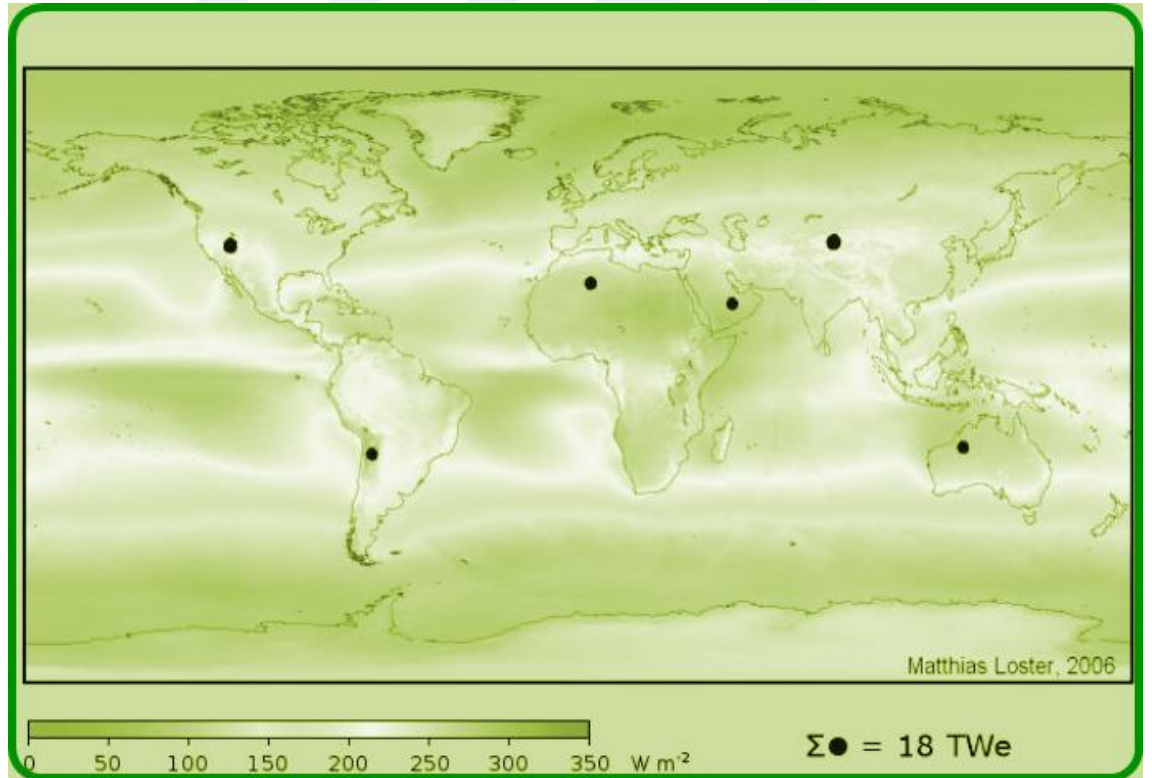
- Doğrudan güneş ışınlarını elektrik enerjisine çevirir.
- Güneş Enerjisi doğal ısıtma ve soğutma sistemleri kullanarak binaların gereksiz ve aşırı ticari enerji tüketimlerini önler.
- Çevre değerlerini korur, çevreye verilen zararları en aza indirir.
- Güneş enerjileri doğal ve sağlığa zararsız malzemeler kullanır.
- Güneş enerjileri ekonomiktirler.
- Güneş enerjisi dışa bağımlı değildir.

1.2. Güneş Enerjisinin Dezavantajları

- Yarıiletkenler malzemelerin temin sıkıntısı.
- Verim / maliyet oranının çok yüksek olması.
- Güneş enerjisinin önemli bir dezavantajı bulunmamaktadır. Verim artırma, maliyet ve depolama zorlukları bazı dezavantajları vardır. Ancak fotovoltaik piller ile ilgili çalışmalar arttıkça bu sorunların aşılması mümkündür (Engin 1995).

1.3. Güneş Enerjisi ve Kullanım Alanları

Güneş yarıçapı, Dünya yarıçapının 109 katı (yaklaşık olarak 1,4 km) ve kütlesi dünya kütlesinin 330 000 katı olan, yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı, çoğunluğu hidrojenlerden oluşan bir gaz karışımı küre biçiminde olup dünyadan 150 milyon kilometre uzaklıktaki bir yıldızdır. Toplam enerji rezervi 1.785×10^{47} J olan bu yıldız daha milyarlarca yıl bu şekilde ışımasını sürdüreceği öngörüldüğünden dolayı dünya için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Dünyanın tüm yüzeyine bir yıl boyunca düşen Güneş enerjisi 1.22×10^{14} TET (ton eşdeğer taşkömürü) veya 0.709×10^{14} TEP* (ton eşdeğer petrol) kadar olup ve bu değer dünyanın bilinen kömür rezervinin 157 katı, bilinen petrol rezervinin 516 katıdır. Şekil 1.1'de Dünya'nın güneş aydınlanma haritası verilmiştir.

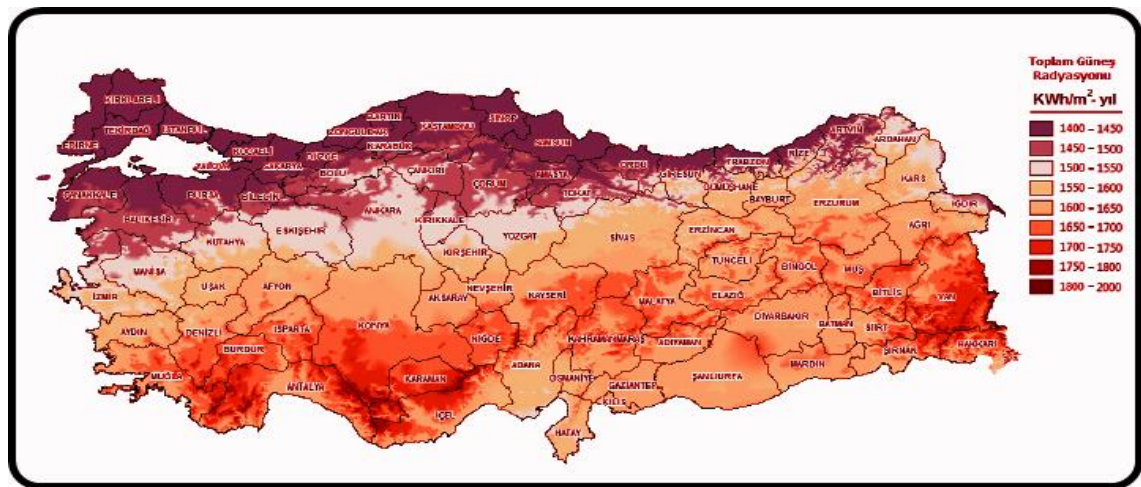


Şekil 1.1. Dünyanın güneş aydınlanma haritası

Güneş enerjisi, elektrik üretimi için güneş kolektörleriyle toplanmakta olup yaklaşık bir evin çatısına eşit 100 m² alanlı kolektör 70 kW'lık güç kaynağı anlamına gelir. Bu kolektörden bir günde sağlanabilecek enerji, %40 verime sahip olduğu varsayılırsa 180 kWh ya da 55 litre petrol eşdeğeri veya bir adam kütesindeki taşkömürü eşdeğerindedir. Fakat en etkili güneş kolektörlerinin verimleri %10 ile %20-25 arasında değişmektedir (İnan 1996).

1.4. Türkiye'deki Mevcut Güneş Enerjisi Durumu

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup ve bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Türkiye ısısal güneş enerjisi kullanımı ve üretimi açısından Çin, ABD ve Japonya'dan sonra dünyada dördüncü sıradadır. Ancak elektrik enerjisi üretim ve kullanımı açısından bakıldığında aşılması gereken teknolojik ve mali engeller bulunmakta olup ve toplam malzeme pazarındaki payları çok azdı. Daha sonraki senelerde metal alaşımlarının gelişme hızı yavaşlamıştır. Bir yandan çeliğe ve dökme demire olan talep azalırken, diğer yandan yüksek performanslı seramiklerin üretimi, polimer ve kompozit endüstrisi hızla gelişim göstermektedir. Şekil 1.2'de Türkiye'nin yıllık güneş alma atlası verilmiştir (İnan 1996).



Şekil 1.2. Türkiye'deki güneş enerjisi potansiyel atlası

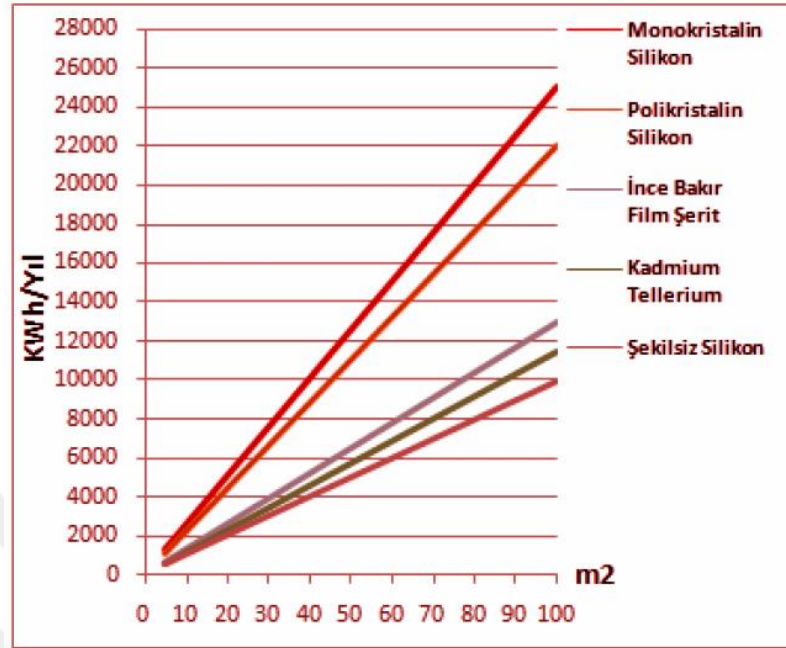
1.5. Güneş Enerjisi Teknolojisi

Güneş enerjisinin yeterince kullanılabilmesi için uygun teknolojilerin geliştirilmesi ile mümkün olması beklenmektedir. Güneş santralleri için gerekli koşul sayılan yılda en az 2000 saat güneşlenme süresi olup Türkiye'de yaklaşık 2600 saat ve özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 3000 saatlik süre ile sağlanmaktadır. Güneş enerjisinden ısınma, soğutma veya elektrik elde etmek için yararlanılabilmektedir. Güneş enerjisinden yeterince yararlanmak kömür, petrol, doğal gaz vb. daha az yakıt kullanmayı beraberinde getirmektedir. Daha az yakıt kullanmak, daha temiz ve sağlıklı çevre anlamına gelmektedir. Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu-Türkiye Bölümü (UGET-TB) ve Temiz Enerji Vakfı (TEMEV) güneş enerjisinin ülkemizdeki kullanımını arttırmak için çalışmaktadırlar. Güneş enerjisi teknolojilerini şu şekilde sınıflandırabiliriz: “Isıl Güneş Teknolojileri, Düşük sıcaklık sistemleri: Düzlemsel güneş kolektörleri, vakumlu güneş kolektörleri, güneş havuzları, güneş bacaları, su arıtma sistemleri, güneş mimarisi, ürün kurutma sistemleri, seralar ve güneş ocaklarıdır. Yoğunlaştırıcı sistemler ise Parabolik kollektörler, parabolik çanak sistemler, merkezi alıcı sistemlerdir “.Güneş enerjisi, kullanılacak alana göre uygun bir teknoloji ile başka bir enerji türüne dönüştürülmesi mümkündür. Günümüzde en çok ihtiyaç duyduğumuz enerji çeşitleri ısı ve elektrik enerjisidir. Bu yüzden de günümüzde yapılan çalışmaların çoğunluğunu güneş enerjisinden ısı ve elektrik enerjisi elde edilmesine yönelik çalışmalardır. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde etme yöntemi ise pasif ısıtma ve aktif ısıtma gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Güneş enerjisi kullanılarak hidrojen eldesi gibi dolaylı enerji elde etme yöntemleri de vardır. Elektrik enerjisi üretimi açısından ise güneşten gelen enerji başlıca iki sınıfa ayrılabilir. Bunlardan biri, kızılötesi dalga boylarını içeren ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkan kısımdır ve diğeri ise görünür ve mor ötesi dalga boylarını içeren kısımdır. Güneşin ısı enerjisini tüketen elektrik santrallerinde ise güneş ışığı bilgisayar kontrollü aynalar tarafından bir kulede odaklanmaktadır ve buradanda güneşten gelen ısı enerjisi bir akışkana aktarılmaktadır. Daha sonra bu ısı enerjisi ise bir jeneratörü tahrik edecek buharı elde etmek için kullanılmaktadır. Bu tip bir santralden %5 ile %6 arasında verim elde edilmektedir. Güneş kaynaklı fotonların enerjileri, fotovoltaik güneş pilleri sayesinde doğrudan

elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir ve buna fotovoltaik güneş enerji dönüşümü adı verilmektedir (İnan 1996). Şekil 1.3’de Türkiye’nin aylara göre ortalama güneş alma süreleri verilmiştir. Şekil 1.4’te Türkiye’nin metrekare başına yıllık üretebileceği enerji miktarı verilmiştir.



Şekil 1.3. Türkiye’nin aylara göre güneşlenme süreleri (Saat)



Şekil 1.4. Türkiye’deki PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl)

1.6. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Dünya Pazarındaki Önemi

Fotovoltaik güneş hücreleri ve bunların birleşimiyle elde edilen piller kullanılan malzemeye göre farklı verim ve maliyete sahiptirler. Dünya pazarında şu an özellikle fosil yakıtların bitmek üzere olması ve tek elde toplanma endişesi sebebiyle fotovoltaik güneş pil pazarında büyük bir rekabet bulunmaktadır. Güneş pillerinin yüksek maliyetle üretiliyor olması ve enerji sıkıntısının bugünkü kadar olmadığı dönemde fotovoltaik piller üzerine çalışma ve araştırmalar da daha yavaş yürütülüyordu. Örneğin Türkiye’de fotovoltaik güneş pilleri üzerine ilk doktora çalışması 1966 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yapılmış olup ve ilk ulusal kongre ise 1975 yılında yapılmıştır. 1978 yılında ise Ege Üniversitesi Güneş Enstitüsü kurulmuştur. Oysa 1946 yılında Amerika’da Russell OHL ilk güneş pili patentini almıştır. Şu anda İspanya, Almanya, Japonya ve Amerika gibi ülkeler güneş pili araştırmalarına teşvik vermektedirler. Halen Watt başına 2.5 – 3 USD civarında olan hücre fiyatları zamanla düşecek ve fotovoltaik güneş pili uygulamaları hızla artacaktır (Çolak 2008).

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmanın amacı klasik konfigürasyonda P3HT:PCBM tabanlı organik güneş pili fabrikasyonunu gerçekleştirmek ve Pentacene organik malzemesinin geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine katkısını incelemektir. Bu çalışmada ilk önce P3HT:PCBM fotoaktif tabanlı referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili ve P3HT:PCBM fotoaktif tabakaya %1 oranında Pentacene malzemesi katılarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al organik güneş pillerinin fabrikasyonları yapıldı. Daha sonra referans organik güneş pili olan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al pilinde P3HT:PCBM ile Al tabakası arasına 2 nm kalınlığında LiF kaplanarak ikinci bir referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş pili elde edildi. Ardından ikinci referans aygıt yapısında P3HT:PCBM'e kütlece %0,5, %1 ve %1,5 oranında Pentacene katılarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al aygıt yapısı elde edildi ve ışık altında *J-V* (Akım yoğunluğu-Voltaj) ölçümleri ile elde edilen güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri incelendi.

Bu çalışmanın birinci bölümü, konunun amacını ve önemini belirten “Giriş” kısmından oluşmaktadır. İkinci bölüm,

konu ile ilgili yapılan literatür çalışmalarını ve teorik bilgi içeren “Kuramsal Temeller”den oluşmaktadır. Üçüncü bölümde referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili ve P3HT:PCBM fotoaktif tabakaya %1 oranında Pentacene malzemesi katılarak oluşturulan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al organik güneş pili, P3HT:PCBM ile Al tabakaları arasına LiF kaplanması ile oluşan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al sonrasında aktif tabakamız olan P3HT:PCBM içerisine farklı oranlarda katılan Pentacene ile hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al organik güneş pillerinin hazırlanma aşamaları ve karakterizasyon süreçlerini anlatan “Materyal ve Yöntem” den oluşmaktadır. Dördüncü bölüm, organik güneş pillerinin *J-V* (Akım yoğunluğu-Voltaj) ölçümlerinden elde edilmiş karakteristik parametrelerini içeren “Araştırma

Bulguları’ndan oluşmaktadır. Son bölümde ise “Tartışma ve Sonuç”ile veriler değerlendirilerek tez çalışması tamamlanmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Güneş Pillerinin Tarihi

Güneş pilleri (fotovoltaik diyotlar) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde herhangi hareketli parça bulunmamaktadır. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik (Photovoltaic effect) etki ile olur. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki voltaj ile elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek Fotovoltaik etki olayını bulmuştur. Benzer bir olay katılarda ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında Adams ve Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar selenyum ve bakır oksite dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmışsa da gerçek anlamda güneş enerjisini elektrik enerjisine %6 verimlilikle dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda yapılan araştırmalar ve ilk tasarımlar ise uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından bu yana uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir. 1970'lerin başına kadar güneş pillerinin uygulamaları ile sınırlı kalmıştır. Güneş pillerinin yeryüzünde ise elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerin başında başlamış olmasına rağmen gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki 1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika, Avrupa ve Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çalışmaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu yüzden daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin en basit yolu ise çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması

görevini uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu yüzden kamuoyunda hep bir laboratuvar çalışması olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskılar çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik güneş pilleri konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi ve maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güneş pilleri artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek “sosyal maliyet” göz önüne alındığında, fotovoltaik güneş pilleri fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir (Nelson 2002; Baek *et al.* 2010; Aygoğan 2015).

2.2. Fotovoltaik Olay ve Güneş Pilleri

Fotovoltaik (photovoltaic) terimi genellikle "PV" ile gösterilir ve güneş ışığından gerilim üretilmesi anlamına gelir. Fotovoltaik elektrik dönüşüm sistemi; yarıiletken malzemelerden oluşmuş hücrelerle güneşten gelen fotonları doğrudan elektrik enerjisine (DC) dönüştürebilen bir teknolojidir. Bununla birlikte fotovoltaik güneş pilleri her türlü ışık altında elektrik üretebilirler. Güneşten gelen fotonları elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik güneş pilleri; fotovoltaik prensibe göre çalışırlar. Fotovoltaik güneş pilleri yarıiletken maddeden yapılmış olup yüzeyleri üzerine ışık düştüğü zaman uçları arasında potansiyel farkı oluşur ve bir dış devreye bağlandıkları zaman devreden akım akar. Fotovoltaik olay 1839 yılından beri bilinmesine rağmen ilk kez 1954 yılında gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar elde edilmiştir. Bu verime ulaşmak p-n eklemi oluşturulması ile mümkün olmuştur. P-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerle oluşturulan ilk p-n ekleminde Silisyum (Si) ve kadmiyum sülfür (CdS) kullanılmıştır. Daha sonra Silisyum ile p-n

eklemlili güneş pili kullanılarak %15 verim elde edilmiştir. Güneşten gelen fotonlar bir yarıiletken tarafından soğurulması bir fotovoltaiik etki ile olur. Güneşten gelen fotonların enerjileri yarıiletkenin değerlik bandındaki elektronlara aktarılır ve değerlik bandındaki elektronların iletim bandına geçmesi neticesinde elektron-hol çiftleri oluşur. Sadece yarıiletkenin yasak bant enerji aralığını aşan enerjiye sahip fotonlar yani $h\nu$ enerjili fotonların enerjilerinin yasak enerji aralığından (E_g) büyük olması ile bu olayı gerçekleştirebilir. Yarıiletken bant aralığı küçük ise dış devre akımı büyük, fotovoltaiik pilin uçları arasında oluşan potansiyel fark ise küçük olur. Yalıtılmış yarıiletkende uyarılan elektron, temel olarak değerlik bandındaki hollerle birleşir ve fazla enerjisini fonon (ısı) ya da foton olarak yayımlar. Bundan dolayı fotovoltaiik pilin verimi düşük olur ve kayda değer düzeyde bir elektrik enerjisi elde edilemez. Fotovoltaiik sistemde yarıiletken yüzeyler üzerinde p-n eklemleri oluşturulur ve foton enerjisi kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur. Güneşten gelen fotonları doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektronik aygıtlara fotovoltaiik pil veya güneş pili (solar cell) denir. Güneş pillerinin yüzey ölçüleri genellikle yaklaşık olarak 100 mm² ve kalınlıkları 0.2-0.4 mm arasında olup; dikdörtgen, kare ve daire şeklinde biçimlendirilebilirler. Fotovoltaiik güneş pili yapımında en çok kullanılan malzemeler, silisyum (Si), kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS) ve galyum arsenik (GaAs)'tir. Türkiye'de bölge bölge farklılaşarak 1 yılda 1 m²'ye düşen güneş enerjisi miktarı 800-2600 kilowatt saat (KWh) arasında değişir. Bu enerji, güneş pilinin yapısına bağlı olarak yaklaşık %5 - %70 arasında bir verimle güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilir. Güneş pillerinin çalışması; fotovoltaiik enerji dönüşüm ilkesine dayanır. Levhaların üzerine ışık düştüğünde uçları arasında bir elektrik gerilimi oluşur. Güneş pilinin yüzeyine gelen güneş enerjisi pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağıdır. Çok sayıda güneş pilini birbirlerine seri ya da paralel bağlayarak güç çıkışını artırmak mümkündür. Güneş pillerini bir yüzey üzerine monte ederek bu sistem gerçekleştirebilir. Bu yapılar güneş pili modülü ya da fotovoltaiik modül adı verilmektedir. Güç talebine bağlı olarak güneş pilleri birbirlerine paralel ya da seri bağlanarak; bir kaç Watt'tan megaWatt'lara ulaşabilen güneş pili sistemleri oluşturulabilir. Özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde ve jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda bu güneş pili sistemleri kullanılabilirler. İlk güneş pili Schottky, Grondahl ve Lange tarafından selenyumdan

(Se) ve bakır oksitten (CuO_2) meydana getirilmiştir. RCA ve Bell Telephone Laboratuvarları'nda 1954 yılında p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerden oluşan p-n eklemleri ile yaklaşık %6 oranında bir güç dönüşüm verimi elde edilmiştir. P-n eklemlili silisyum (Si) güneş pilleri ile daha sonra yaklaşık %15 oranında bir verime ulaşılmıştır. 1958 yılından beri bu güneş pilleri yapay uydulara elektrik enerjisi sağlamaktadır. Yeryüzünde enerji üretimi için yaygın olarak güneş pilleri kullanılmaya 1973 yılındaki petrol krizinden sonra başlanmıştır. Yeryüzündeki fotovoltaiik pil kullanımını 1970'li yılların sonunda uzaydaki kullanımını geçmiştir. 1982 yılında dünyadaki ilk güneş pili A.B.D'nin Kaliforniya Eyaleti'nde Alarko Solar Inc. Santrali tarafından kurulmuş olan 1 MW gücündeki bu santral ulusal elektrik şebekesine bağlanmıştır. Güneş pilleri için 1980'li yılların başında yeni üretim yöntemleri geliştirilerek küçük çapta üretilmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler gelecekte büyük ihtimalle güneş pili fiyatlarını daha da düşürecektir. Son yıllarda en hızlı büyüyen endüstriyel mallardan biri güneş pilleridir. Düşen fiyatlar ve artan üretim hacmi güneş pillerini önceleri elektrik şebekesinin olmadığı bölgelerde müstakil uygulamalar için uygun hale getirmiştir. Güneş pillerinin esas pazarları özellikle 90'lı yılların ortalarına kadar çeşitli uluslararası yardım uygulamalarının hedefi olan 3. dünya ülkelerindeki gelişmemiş altyapı destek programları olmuştur. Enerji sorunu baş gösterdiğinden beri güneş ve diğer alternatif kaynaklara özelliklere Avrupa ve Amerika'da ilgi artmış olup ve bu değişimin temel nedeni 90'lı yılların ortalarından itibaren gelişmiş ülkelerde uygulanmaya başlanan teşvik programlarıdır. Bu alanda örnek gösterilen Alman pazarı Federal Alman Yenilenebilir Enerji Yasası ile en hızlı büyüyen pazarlardan biridir. Güneş pillerine yapılan yatırımlar ve güneş pilleri kullanımını Almanya'da devlet teşvikleri ile hem maliyetler aşağı inmekte hem de üretim hacmi artmaktadır. Güneş pilleri kullanıcı kitleleri ve kullanım alanları büyük bir hızla artan güneş pilleri konusundaki araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu güneş pillerinin avantajları arasında uzun ömürlü olması (yaklaşık 20-30 yıl), hareketli kısımlar içermediğinden aşınmaması ve çevre kirliliği yaratmaması sayılabilirken; deavantajları arasında ise üretilen elektriğin depolanma sorunları, düşük verimli olması, ekonomik olmaması ve yalnız gündüzleri çalışması sayılabilir (Chapin *et al.* 1954; Köse 1986; Perlin 2004).

2.3. Literatürdeki Güneş Pilleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Fotovoltaik etki ilk kez 1839'da Fransız fizikçi Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiş olup güneş pilleri gelişen teknolojiyle yeni bir çığır olarak görülmesine rağmen tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. Elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyen Becquerel fotovoltaik olayını bulmuştur. Vanguard I isimli uzay aracında 1858 yılında ilk defa bir güneş pili kullanılmıştır. 100 cm²'ye 0.1 W güç üreten bu güneş pili %9 verimle çalışıyordu.

Charles Fritts selenyum kullanarak %1 verimli 1883 yılında ilk ciddi güneş pilini yapmış oldu. 19. yüzyılın son yarısında güneş pilleri ilk kez kullanılmaya başlamıştır. Işık düşme miktarının aygıt performansına etkisini araştırmacılar William Grylls Adams ve öğrencisi Richard Evans Day araştırdılar. Işığın katı bir malzemedeki elektrik üretmesine neden olduğunu bu araştırma grubu keşfetti. Heinrich Rudolf Hertz morötesi ışığının fotovoltaik etkisini 1887 yılında araştırmıştır. Wilhelm Hallwachs bakır ve bakır oksit bazlı 1904 yılında bir güneş pili denemesinde bulundu. Albert Einstein yine aynı 1904 yılında güneş ışığının elektrik akımı oluşturduğuna yönelik bir makale yayınlamıştır. Fotovoltaik aygıtların verimliliği %1 değerine 1914 yılında ulaşmış ise de gerçek anlamda ilk kez 1954 yılında güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik aygıtlar Pearson ve Fuller tarafından silisyum (Si) kristali üzerine gerçekleştirilmiştir.

Audobert ve Stora Kadmiyum-Selenyum (CdS) kullanarak uzun bir süre kullanılacak olan fotovoltaik bir yöntemi 1932 yılında bulmuşlardır. Pearson ve Fuller silisyumunun fotovoltaik etkisi gösterdiğini 1954 yılında keşfetmişlerdir ve %5 verimli bir güneş pili üretmeyi başarmışlardır (Chapin *et al.* 1954). Pearson ve grubunun çalışmaları olumlu sonuçlar vermiştir ve 1957 yılına gelindiğinde güneş pilindeki verim %8'lere kadar ulaşmıştır. 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmekte olup fotovoltaik güç sistemleri uzay araçlarının kullanılmasında bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir.

Çevre duyarlılığıyla ilgili çalışmalar 1970'lerde ortaya çıkan enerji krizi nedeniyle hızlanmıştır. Bu anlamda Japonya, ABD ve Almanya Yenilenebilir Enerji Yasası (Renewable Energy Law "Erneuerbare-Energien-Gesetz", kısaltması: EEG) ile ilgili önemli teşvikler sundular. Bir taraftan daha ucuza üretebilecek ince film güneş pilleri diğer yandan silisyum kristaline dayalı güneş pillerinin veriminin artırma çabaları üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Yapılan araştırmalar doğrultusunda üniversitelerin yüklendiği güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretme bir sorumluluk haline gelmiştir. Çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı ile çok uluslu şirketlerin fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda son 20 yılda çalışmalar yapmaya zorlanmışlardır. Maliyetli olarak görülen fotovoltaik sistemler yakın gelecekte fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik hale gelecek gibi gözükmektedir.

Alan McDiarmid, Hideki Shirakawa ve Alan Heeger araştırma grubu iletken polimere dayalı birçok çalışmalar 1980'li yıllarda yapmışlardır. Onların yarıiletken polimerlere dayalı organik güneş pili çalışmalarına yönlendirmesi bu çalışmaların olumlu cevap vermesinden dolayıdır (Facchetti 2011). Organik elektronik teknolojisinin gelişmesinin sağlanması bu yarıiletken polimerlerin icat edilmesi ile orantılıdır. Organik temelli ışık saçan diyot gibi aygıtlarda bu organik elektronik teknolojisi önemli bir gelişme göstermektedir (Farchioni 2001). Bu organik polimer teknolojisini; foto algılayıcılarda (Wei 2009), ışık yayan diyotlarda ve organik güneş pillerinde (Amarasinghe 2008) kullanılmasını sağlamıştır. Delaware Üniversitesinde bu çalışma yıllarında BakırSülfür-KadmiyumSülfür (Cu_2S/CdS) teknolojisine dayalı çalışmalar yapılmıştır. Polikristal silisyum dayalı güneş pilleri ile ilgili birçok çalışmalar 2005'li yıllarda yapılmış ve büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son durum incelendiğinde bu teknolojik gelişmelerin ilerlemesiyle fotovoltaik güç üretimi yılda yaklaşık %25-%30 civarında artması beklenmekte olup bu fotovoltaik enerji üretimi enerji ihtiyacımızın yalnızca yüz binde dördünlük bir oranını karşılamaktadır. Bu oranlar 2010 yılında yaklaşık %0.13, 2020'de %1, 2030 yılında %5 ve 2050 yılında yaklaşık %10 civarlarında olacağı tahmin edilmektedir.

P3OT donör (alıcı, p) olarak C₆₀ ise akseptör (verici, n) olarak kullanılarak 4:1 oranında P3OT:C₆₀ aktif tabakası elde edilmiştir. Farklı oranlarda altın (Au) ve gümüş (Ag) nanoparçacıkla katılanan P3OT:C₆₀ aktif tabakası hazırlanmıştır. Filmlerin yüzey dalgalanmalarında nanoparçacıklar ile katılanmasının çok önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Film iletkenliklerinin artması altın ve gümüş nanoparçacıklarının katkı miktarlarının artması ile orantılıdır. Nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin seri direnç değerlerini 46 Ω cm²'den 15–20 Ω cm²'ye azaltması nanoparçacıklarının türüne bakılmaksızın katkı miktarlarındaki artıştan dolayıdır. Katılanmamış aygıtlar ile gümüş katkılı organik güneş pilleri karşılaştırıldığında düz bant bölgesinden daha yüksek bir akım yoğunluğuyla karşılaşmışlardır. Katılanma miktarı arttıkça akım artışı da artmıştır. Gümüş nanoparçacık katkılı aygıtlarda altın nanoparçacık katkılı aygıtlara göre akım yoğunluğundaki artış daha fazla olmuştur. Organik güneş pillerinde nanoparçacıklarının katkı miktarları arttıkça gümüş katkılı organik güneş pillerinin doğrultma oranında önemli ölçüde azalmalar olması dikkate değer önemli bir noktadır. Organik güneş pillerine gümüş nanoparçacık katıldığında doyma akımını arttırdığı anlamına gelir. Katkı miktarı arttıkça açık devre gerilimi artmış fakat katkı oranı %3 civarında olduğunda azalmalar başlamıştır. P3OT ve C₆₀ arayüzeyi arasında built-in potansiyelinin artmasına P3OT'den nanoparçacıklara olan hol transferi yardımcı olmuş ve bu nedenle nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin açık devre voltajında artmalar olmuştur. Açık devre voltajının yüksek katkı oranında düşmesinin nedeni tam belli olmamasına rağmen iki ihtimal üzerinde durulmuştur. Birinci ihtimal bu durumda indirgenmiş bir açık devre voltajı ile sonuçlanmasının film yüzeyi üzerinde artan nanoparçacıkların metal elektrot ile doğrudan temas halinde olması yani katodun LiF/Al'den gümüş veya altın olarak değişmesidir. Diğer ihtimal ise C₆₀'ın elektron ilgisini metal nanoparçacıklarından C₆₀ elektron transferinin azaltabilir olmasıdır. Organik güneş pillerinin yüksek miktarda nanoparçacıkla katılanması açık devre voltajındaki düşüş akım yoğunluğu, güç dönüşüm verimi ve dolun faktöründe azalmalara neden olmuştur. Organik güneş pillerinde aktif tabakanın kalınlığı önemli problemlerden biridir. Organik güneş pillerinde altın katkılı maksimum veriminde aktif tabakanın kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür. Organik güneş pillerinde katılanmamış aktif tabakanın kalınlığı 100 nm az olduğunda verimde azalmalar olur (Zhou 2010).

Liu *et al.* (2001) tarafından yapılan çalışmada gümüş nanoparçacıklarının mezoporus heteroeklem perovskit güneş hücrelerinin özellikleri üzerinde plazmonik etkileri araştırılmıştır. Perovskit güneş pillerinde gümüş nanoparçacıkları yaygın olarak hole bloke katmanı olan kompakt titanyum oksit (TiO_2) tabakasına gömülmüştür. Güneş pillerinde titanyum oksit (TiO_2) tabakasına nanoparçacık katkılanması %30'dan fazla bir güç dönüşüm veriminde artışa neden olmuştur. Gümüş nanoparçacıkların fotoaktif perovskit tabakasındaki ışığın saçılmasını, aktif tabaka içerisinde foton soğurmalarını ve ışığın optik yol uzunluğunu arttırarak aygıt performansını arttırmıştır.

Spyropoulos *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmada yüksek verimli organik güneş pillerinin plazmonik altın ve gümüş nanoparçacıkları kullanılarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Plazmonik nanoparçacıkların güç dönüşüm verimini %20'ye kadar geliştirdiği bu çalışmada gösterilmiştir. Burada P3HT ve PCBM 1:1 oranında kloroform içerisinde çözünerek aktif tabaka elde edilmiş ve elde edilen karışım yaklaşık bir saat boyunca 60°C 'de karıştırıcıda karıştırılmıştır. Ardından elde edilen PEDOT:PSS kaplı ITO'lar üzerine aktif tabaka döndürmeli film kaplama cihazıyla 1000 rpm de 60 sn kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra elde edilen aktif tabaka kaplı bu filmler 80°C 'de 30 dk azot gazıyla tavlannmıştır. Daha sonra termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak bu aktif tabakanın üzeri güneş pillerinde katot olarak kullanılan alüminyum ile kaplanmıştır. Yapılan çalışmada organik güneş pillerinin güç dönüşüm veriminin aktif tabakaya altın ve gümüş nanoparçacıkları katkılı olduğunda nasıl etkilendiği üzerinde durulmuştur. Aktif tabaka içerisinde soğurmayı arttırarak kısa devre akımının artmasını sağlayan gümüş ve altın nanoparçacıkların içindeki iletken elektronların sınırlandırılmış yüzey plazmon etkileridir. Ayrıca aktif tabakaya katkılanan nanoparçacıklar açık devre voltaj değerlerini çok değiştirmemişken, kısa devre akım yoğunluğunu ve dolum faktörünü önemli ölçüde değiştirmiştir. Sonuç olarak gümüş nanoparçacıkların güneş pillerinin verimini %1.5'a çıkarırken altın nanoparçacıkların güneş pillerinin verimini iki katına çıkarmıştır.

Xie *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada organik güneş pilleri gibi ince film aygıtlarının performansını arttırmak için metal nanoparçacıklar (NP) kullanılmıştır. Bu

çalışmada yük birikme etkileriyle metal nanoparçacıklarının elektronları indüklenerek bir üst seviyeye uyarılmıştır. İvert organik güneş pillerinin (OSC'ler) performanslarını arttırmak için titanyum oksit tabakasına yerleşmiş metal nanoparçacıklar (Au, Ag) oldukça verimli bir taşıma katmanı olarak işlev görmüş ve güç dönüştürme verimliliğini %8,20'ye ulaştırmış bu da fotoakımı önemli bir şekilde arttırmıştır. Organik güneş pillerinin verimini elektron taşıyıcı tabakası içerisindeki metal nanoparçacıklarının optiksel plazmonik etkileri verimi etkilemede çok küçük bir faktördür. Bunun yerine, TiO₂ elektron taşıyıcı tabakadan metal nanoparçacıklara transfer olması güneş ışığı altında yüklerin uyarılması ultraviöle bölgede uyarılan elektronların transfer olmasıyla açıklanmıştır. Elektron yığılmasını elektron taşıyıcı kompozit tabakanın iş fonksiyonunu ultraviöle ışınımından sonra azaltmıştır. Ultraviöle ışınlarına maruz bırakılan metal NP-TiO₂ tabakası organik güneş pillerinde yüklerin uyarılmasına ve yüklerin yeniden dağıtılmasına yardımcı olabilir. Titanyum oksit (TiO₂) elektron taşıyıcı tabakasına altın ve gümüş nanoparçacıklarının eklenmesi dolun faktörünü, kısa devre akım yoğunluğunu ve güç dönüşüm verimini arttırmıştır. Ayrıca birçok araştırma açık devre gerilimini bozmadan kısa devre akımını iyileştirme yani yük birikiminin aygıtlarının performanlarına etkileri üzerine yapılmaktadır. Deneysel ve teorik sonuçlara göre metal nanoparçacıkların organik güneş pillerine katılmasına yariletkendeki katkı etkilerinden farklıdır sonuç olarak ve bu çalışmada metal NP'ların TiO₂ tabakasına aktarılması organik optoelektronik aygıtlarda elektrotlara çok iyi yük topladığı gösterilmiştir.

Yu *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada P3HT:PCBM aktif tabakası 1:1 oranlarında klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanmıştır. Bu karışıma Pt ve TiO₂ nanoparçacıkları eklenerek organik güneş pillerinin aktif tabakası P3HT:PCBM:TiO₂:Pt hibrit filmi olarak kullanılmıştır. Organik güneş pillerinin verimini hibrit film içindeki metal Pt nanoparçacıkları yüksek mobiliteye sahip olduğundan arttırmıştır. Nanoparçacık katkılı aktif tabaka kimyasal temizliği yapılmış ve PEDOT: PSS kaplı ITO'nun üzeri 1000 rpm'de döndürme ile film kaplama cihazı kullanılarak kaplanmıştır. Daha sonra termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak aktif tabaka film üzerine 60 nm Ca kaplanmış ardından bu tabaka üzerine 80 nm Al kaplanarak

Al/Ca/P3HT:PCBM:TiO₂:Pt/PEDOT:PSS/ITO cihaz yapısı elde edilmiştir. Aktif tabaka içerisine metal nanoparçacıkların karıştırılması taşıyıcı mobilitesini önemli bir şekilde yükseltmiştir. Platinin aktif tabakadaki uygun değerdeki miktarı güneş pilinin seri direncini azaltmış ve böylece taşıyıcıların daha kolay taşınması sağlamıştır. %0.03 oranında Pt nanoparçacık P3HT:PCBM:TiO₂ aktif tabakası içerisine eklenmesiyle akım yoğunluğu 7.31 mA/cm² den 10.10 mA/cm² arttırmıştır. Platin nanoparçacıkları organik maddelerin yük mobilitesini ve iletkenliğini arttırarak seri direnci azaltıp ve aygıt verimliliğini arttırmıştır. Yüksek miktarda Pt nanoparçacıklarının aktif tabakaya katılanması aktif tabaka içerisinde platin nanoparçacıklarının kümelenmesine yani topaklanmasına ve seri direncin artmasına neden olmuştur. %0.04 veya daha büyük değerlerde Pt nanoparçacıkların miktarının olması aygıtın performansında düşüşler meydana getirmiş olup ve topaklanmış Pt nanoparçacıkların elektron-hole çiftlerinin hareketini engellemiştir.

Ikram *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada ZnO nanoparçacıklarını P3HT:PCBM'den oluşan aktif tabakaya ekleyerek aygıt performansı incelenmiştir. Çinko-oksit (ZnO) nanoparçacıkları ve P3HT:PCBM dikrobenzen (DKB) ve klorobenzen (KB) çözeltilerinde çözülerek aygıt performansı incelenmiştir. P3HT:PCBM tabanlı güneş pillerinde ZnO nanoparçacıklarının güç dönüşüm verimliliğini (PCE) önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. ZnO nanoparçacıklarının çözücü olarak klorobenzen kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya ilave edilmesi ile görünür bölgedeki soğurmayı arttırmış ve soğurma spektrumunun kırmızıya doğru kaymasını sağlamıştır. ZnO nanoparçacıklarının aktif tabakaya dâhil edilmesi aktif katmanın yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Ayrıca ZnO nanoparçacıklarının organik bulk heteroeklem aygıtların P3HT:PCBM aktif tabakasına dâhil edilmesi yük mobilitesini arttırarak güneş pillerinin maliyetini azaltmıştır. ZnO nanoparçacıklarının P3HT:PCBM aktif tabakasında artmasıyla birlikte açık devre voltajı ve kısa devre akımı artmıştır. ZnO nanoparçacıkların artmasıyla birlikte ve çözücü olarak klorobenzen kullanılmasıyla seri direnç değerleri 40.4 Ω cm² den 13 Ω cm²'ye azalmıştır. ZnO nanoparçacıkların aktif tabakaya eklenmesiyle seri direnç değerindeki azalmalar bulk öz direncinin azalmasına atfedilmiştir. ZnO nanoparçacık ağlarının sızıntı akımlarını

durdurmasında şönt direncindeki önemli artışlar neden olmuştur. P3HT:PCBM tabanlı güneş pillerinin kloroform ve klorobenzen gibi her iki çözeltilerde güç dönüşüm verimi artmıştır. ZnO nanoparçacıklarının diklorobenzen ve klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış aktif tabaya aşırı katkılanması geniş topaklanmalara neden olmuştur. Kısa devre akımını azaltan bu duruma yük ayrışması engel olmuştur. Yüzey dalgalanmalarına neden olan ZnO nanoparçacık miktarının artması ışığın aktif tabakada kalmasını sağlamıştır. ZnO ve P3HT'nin HOMO seviyelerindeki enerji seviyeleri arasındaki uyuma P3HT:PCBM:ZnO üçlü karışımından oluşan aygıtın açık devre voltajındaki artışa atfedilmiştir.

Lee *et al.* (2015) tarafından yapılan çalışmada grafen-oksit (rGO) ve altın (Au) nanoparçacıkları hol taşıyıcı tabakası olarak indirgenmiş PEDOT:PSS'ye katkı olarak Au:NP:PEDOT:PSS:rGO ince filmleri elde edilmiştir. Elde edilen filmler ITO üzerine yaklaşık 40 nm kalınlığında 4000 rpm'de kaplanmış ve 20 dk 130°C'de tavlannmıştır. Bu çalışmada klorobenzen içerisinde çözünen PTB7:PC₇₀BM aktif tabakası 1:1.5 oranında kullanılmıştır. 25 saniyede 500 rpm'de elde edilen aktif tabaka kaplanmışdır. Daha sonra termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak bu tabakalar üzerine yaklaşık olarak 100 nm kalınlığında Al kaplanmış olup ve ITO/Au:NP:PEDOT:PSS:rGO/PTB7:PC₇₀BM/PFN:Al cihaz yapısı elde edilmiştir. Organik güneş pillerinde kullanılan PEDOT: PSS: rGO'nun yüksek iletkenliğe sahip bir kompozit malzeme olması organik güneş pillerinde olumlu bir etki göstermiştir. Altın nanoparçacıklarının PEDOT:PSS:rGO karışımına katkılanması kısa devre akımına ve daha iyi bir güç dönüşüm verimine neden olmuştur. rGO miktarının artması PEDOT:PSS:rGO karışımının iletkenliğini arttırırken altın nanoparçacıklarının %4 oranından fazla katkılanmalarından sonra aygıt veriminde azalmalar görülmüştür.

Yagci *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada PEDOT:PSS:H₃BO₃ hol taşıyıcı tabakası elde etmek için PEDOT:PSS'ye 0-5mg/ml konsantrasyonlarında borik asit katkılanmıştır. Borik asit katkılanmış ve katkılanmamış PEDOT:PSS filmleri spin kaplama tekniği ile kaplanmış ve elde edilen filmlerin karakterizasyonları ve elektriksel iletkenlik ölçümleri FTIR, XRD, AFM, UV yapılmıştır. Hol taşıyıcı tabakasına H₃BO₃

ilave edilmesiyle cihazın dolum faktörünün yaklaşık %23 ve güç dönüşüm veriminin %20 arttığı tespit edilmiş olup PEDOT:PSS:H₃BO₃ filmlerinin kalınlığını katkı konsantrasyonundaki artış değiştirmemiştir. Borik asitin (H₃BO₃) PEDOT:PSS tabakasına eklenmesinin yüzey dalgalanmalarını iyileştirdiği ve PEDOT:PSS tabakasının dolum faktörünü, iş fonksiyonunu arttırdığı için de açık devre voltajında arttırmıştır. PEDOT:PSS'de 1.25 mg/ml borik asit (H₃BO₃) konsantrasyonuna sahip ITO/PEDOT:PSS: H₃BO₃/P3HT:PCBM/Al güneş pilleri AM 1.5G aydınlatması altında %2,14'lük güç dönüştürme verimliliğine sahip olup daha yüksek bir performans gösterirken borik asit (H₃BO₃) içermeyen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş pilleri %1,79'lük bir güç dönüştürme verimliliğine sahiptir. Borik asit (H₃BO₃) katkısız PEDOT:PSS filmlerinde güç dönüşüm verimi çok düşük iken borik asit (H₃BO₃) katkılı PEDOT:PSS filmlerinde ITO ve PEDOT:PSS arasındaki arayüzey etkilerini geliştirdiği ve dolayısıyla aygıtın açık devre voltajını arttırdığı gözlemlenmiştir. R_{sh} değerleri 3 kV'dan 11.47 kV'a artması borik asit ihtiva eden PEDOT:PSS aygıtında olmuştur. R_s değerlerinin azalması ve R_{sh} değerlerinin artışı güneş pili aygıtının dolum faktörünün artmasına sebep olmuştur.

Ikram *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada inorganik metal oksit nanoparçacıkları farklı oranlarda kullanılarak organik güneş pilinin aktif tabakası P3HT:PCBM:ZnO:TiO₂'den oluşmuştur. Aktif tabakanın hazırlanması için farklı oranlarda hazırlanan karışımlar 1 mL diklorobenzen ve klorobenzen içerisinde çözüldürülmüştür. Hol taşıyıcı tabaka olan PEDOT:PSS üzerine hazırlanan bu karışımlar kaplanmıştır. Daha sonra azot ortamında ısıtıcı tabla üzerinde 150°C de 15 dk bu filmler tavlannmıştır. Ardından termal buharlaştırma ünitesi yardımıyla bu film üzerine 0.3 nm kalınlığındaki LiF ve 100 nm kalınlığındaki Al kaplanmış olup ve bu aygıt yapısı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:ZnO:TiO₂/LiF/Al elde edilmiştir. Durum elektronların sırasıyla elektrotlara ulaşmasını sağlayan çinko oksitin (ZnO) iletkenlik bandı lityum florür'ün (LiF) iletkenlik bandına yakındır. Metal nanoparçacıklarının film morfolojisini iyileştirdiğinden dolayı ve yüksek iletkenlikleri aygıtların seri direnç değerleri azalmış olup şönt direncini ve dolum faktörünü arttırmıştır. ZnO ve TiO₂ metal oksit parçacıklarının aktif tabaka P3HT:PCBM karışımına eklenmesi soğurmayı

arttırmıştır. Elektriksel ve optiksel karakterizasyonlar aktif tabakasına eklenen metal oksit nanoparçacıklarının hibrit güneş pillerinin soğurma aralığını genişlettiğini göstermiştir. Sonuç olarak organik güneş pilleri için metal oksitler nanoparçacıklarının nispeten yüksek elektron mobilitesine, iyi fiziki ve kimyasal stabiliteye sahip olması onları kullanılabilir hale getirmiştir.

Gollu *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada ZnO tabakasına %0,2 , %0,4 , %0,6 ve %0,8 oranında indirgenmiş grafen oksit ile katkılanmış olup elektron taşıyıcı tabakaya olarak ZnO kullanılmıştır. İndirgenmiş grafen oksit katkılı 60 nm kalınlığındaki çinko oksit (ZnO) çözeltisi ITO yüzeyine püskürtme yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Bu çalışmada P3HT:PCBM aktif tabakası 1:1 oranında klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilmiştir. %20 oranında altın ve gümüş nanoparçacık ve nanorodlarıyla bu aktif tabaka katkılanmıştır. Bu elektron taşıyıcı tabakanın üzeri 100 nm kalınlığında altın ve gümüş katkılı P3HT:PCBM ile 2000 rpm'de kaplanmıştır. Daha sonra termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak bu aktif tabakanın üzeri 20 nm kalınlığındaki molibden oksit(MoO₃) hol taşıyıcı tabakası olarak kaplanmış olup ve ardından 100 nm kalınlığındaki gümüş metali kaplanarak inverted organik güneş pili aygıtı elde edilmiştir. Hem aktif tabakaya katkılanan gümüş ve altın nanoparçacıkları hemde elektron taşıyıcı tabakaya katkılanan rGO soğurma şiddetini arttırmıştır. Aygıtın güç dönüşüm veriminin %3,13'ten %3,81'e artmasının sebebi çinko oksite (ZnO) %0,4 oranında rGO katkılanmasıdır. Aktif tabakaya altın nanorod katkılı olduğunda %3,77'den %4,85'e ve altın nanoparçacık katkılanması güneş pilinin güç dönüşüm verimini %3,77'den %4,44'e çıkartmıştır. Elde edilen sonuçlara göre elektron taşıyıcı tabakaya ve aktif tabakaya katkılanan nanoparçacıkların soğurma şiddetini ve aygıt verimini arttırmıştır.

Zhang *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada yaklaşık olarak 11 nm ebatlarında Fe₃O₄ nanoparçacıklarının P3HT:PCBM tabanlı organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi üzerine çalışılmıştır. 1:1 oranında hazırlanarak elde edilen P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanan nanoparçacıkların referans aygıtı göre güç dönüşüm verimini %2,24'ten %2,70'e çıkardığı sonucu elde edildiği görülmüştür. Ayrıca bu

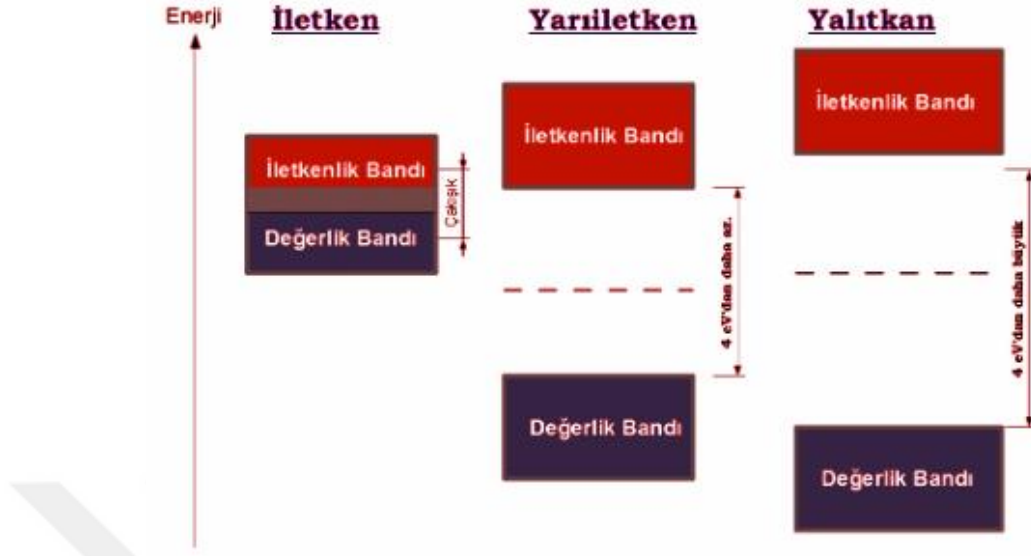
çalışmada aygıt tarasımında farklı kalınlıklarda P3HT:PCBM tabakası elde edilmiş ve 90 nm’de daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. Kalınlığı azaltılarak elde edilen P3HT:PCBM filminde eksitonların küçük olan difüzyon uzunluklarını göz önüne alırsak güç dönüşüm veriminde artışın elde edilmesi beklenir. Fakat ince filmlerin ışığı soğurma şiddetinde azalma olacağından dolayı dış kuantum verimi sebebiyle güç dönüşüm verimi de azalır. Bu çalışmada kalınlığın azalmasından dolayı verimin arttığı, aktif tabakaya katılanmış Fe_3O_4 nanoparçacıklarının soğurmayı ve taşıyıcı transferini arttırması ile açıklanmıştır.

Yang *et al.* (2018) tarafından yapılan çalışmada poly(3-hexylthiophene) (P3HT) ve (6,6)-phenyl C_{61} -butyric acid methyl ester (PCBM) içeren aktif tabaka pentacene ile desteklenerek (ya da katılanarak) düzlemsel tandem organik güneş pilleri fabrikasyonu hava ortamında yapıldı. Diğer tabakaların düz olması için (ya da pürüzsüz olması için) alt hücrenin üzerindeki aktif tabaka pentacene ile katılandı. Pentacene katkılı aktif tabakanın yüzey morfolojisi 80°C ile 160°C sıcaklık arasında sabit bir şekilde tutuldu ve ısıl işlemlere karşı tandem aygıtlarının tabakaları arasında ve düzlemsel aktif tabakaların üretilmesine izin verildi. Son teknoloji ürünü olan homo-tandem organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi (PCE) %3.5 iken P3HT:PCBM’e dayalı tek eklemlili güneş pillerinin ortalama güç dönüşüm verimi (PCE) %3.2’lere ulaştı. Bu çalışmada tandem organik güneş pillerinin yüksek performans uygulamaları 160°C’de yüksek tavlama sıcaklığında üç kez denendi. Çalışmalarımız farklı güçte yüksek verimli tandem organik güneş pillerini tasarlamak için pratik bir yol gösteriyor ve ısıl işlemler esnasında band aralığı iyi olan aktif tabakalar seçilir.

2.4. Yarıiletkenler

Dünyadaki maddelerin çoğu katı halde bulunmaktadır. Katılar amorf (yığın) veya düzenli kristal yapıda bulunabilirler. Kristaller içerisinde “alan” olarak adlandırılan kristal yapıları barındırırlar. Eğer kristal içerisinde daha küçük bölgelerin hepsi aynı yapıya sahip ise buna tek kristal adı verilir. Bölgeler farklı ise yani kristal yapılanmaları değişiyor ise buna da polikristal denir. Özellikle şu noktaya dikkat edilmelidir ki tek

kristaller tümüyle aynı yapıya sahip değildir ve bölgeler birbirinden farklılıklar gösterebilir. Katı maddeleri optik ve elektriksel özelliklerine göre üç gruba ayırabiliriz. Bunlar; yarıiletken, iletken ve yalıtkan malzemelerdir. Elektronlar, atomda belli enerji düzeylerinde bulunurlar. Atomlar bir katı kristal oluştururken, komşu atomların elektronları birbirini etkiler, enerji düzeyleri bozulur ve enerji düzeyleri üst üste gelerek yeni enerji bantları oluşur. Katılarda atomların en dış orbitalindeki valans elektronlarının bulunduğu banda “valans bandı” denir. Valans bantları elektronlarla kısmen veya tamamen doludurlar. Bu bantta yüksek enerji düzeyleri boş olduğu için; metale bir potansiyel uygulanırsa elektronlar üst boş enerji düzeylerine çıkarlar ve iletkenliği sağlarlar. Valans bandının üstünde bulunan en üst enerji bandı elektronlar bakımından boştur. Valans bandının üstündeki banda da “iletkenlik bandı” denir. Valans ve iletkenlik bantları arasında yasaklanmış bölge olarak nitelendirilen boş bir bölge vardır. Katılarda veya yalıtkanlarda yasak enerji bandı geniştir. Valans bandı tümüyle dolu, iletkenlik bandı da tümüyle boştur. Yarı iletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki yasak bölge, elektronların kendiliğinden atlayabileceği kadar incedir. Yasak enerji bandı iyi yarı iletken olarak bilinen silisyumda 1,1 eV, germanyumda 0,75 eV'dur. İletkenlerde iletkenlik bandı ile valans bandı kısmen üstüste binmiştir. Böylece bu durum elektronlara hareket serbestliği verir. Elektronlar, kendi termik enerjileriyle valans bandından iletkenlik bandına geçebilirler. En genel tanımıyla elektriği iyi ileten maddelere iletken, iletmeyen veya çok çok az ileten maddelere yalıtkan olarak isimlendirilmektedir. Belli bir değere kadar elektriği iletmeyen, ancak belli bir eşik değerinden sonra ileten maddelere ise yarıiletken denilmektedir. Yarıiletkenler elektrik iletkenliği bakımından, iletken ile yalıtkan arasında kalan maddeler olarak da isimlendirilebiliriz. Yarıiletkenler periyodik tabloda 3A ve 5A gruplarında bulunurlar. İlk olarak Edmond Becquerel 1839 yılında aynı elektrolit içine daldırılmış iki elektrottan birinin üzerine düşen ışığın elektrotlar arasında bir potansiyel farkın oluşturulduğunu görmüştür. Daha sonra 1883 yılında Faraday sıcaklık artışıyla gümüş sülfatın direncinin azaldığını keşfetmiştir. Günümüzde bu buluş elektronik sanayi açısından dönüm noktası anlamına gelmektedir (Oral 1979). Şekil 2.1’de iletken, yarıiletken ve yalıtkanların enerji bant diyagramı verilmiştir.

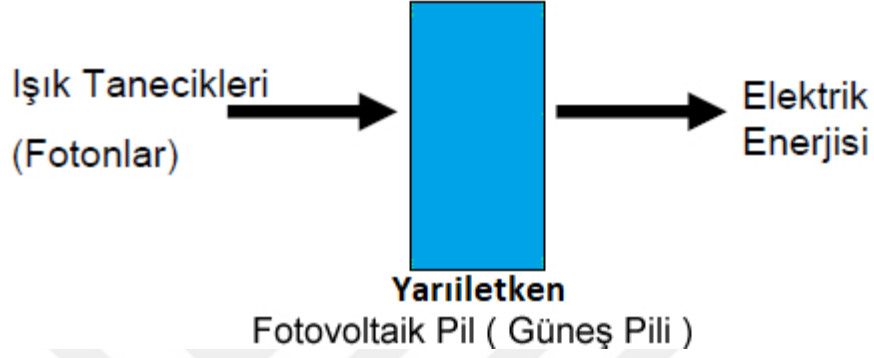


Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların enerji bant diyagramları

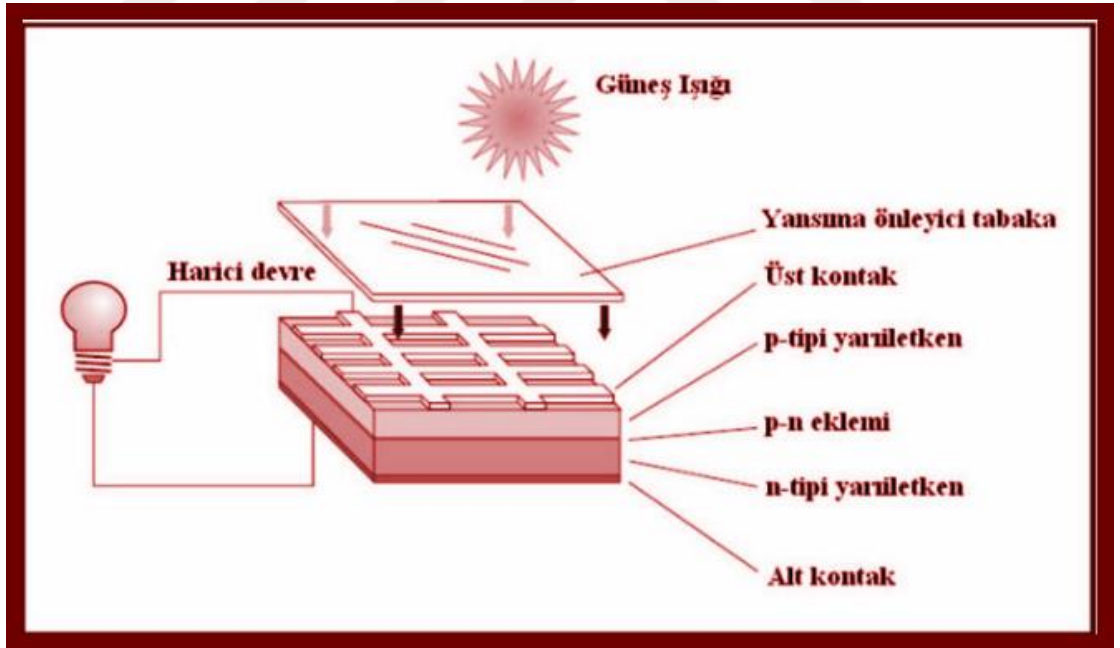
2.5. Yarıiletken Fotovoltaik Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

Güneş ışığı, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgelerinde bulunan düşük enerjili fotonlar ile mor ötesi bölgede yer alan yüksek enerjili fotonlar arasında kalan ışık fotonlarının bir araya gelmesiyle oluşur. Güneş pili teknolojisinde güneşten gelen fotonların elektrığe dönüşümü fotovoltaik etki ile gerçekleşmektedir. Bu fotovoltaik etki olayı güneş ışığının elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Güneş pili üzerine düşen fotonların bir kısmı güneş pili üzerinden geri yansırken bir kısmı güneş pili tarafından soğurulur ve bir kısımda güneş pilinin içerisinde geçer. Diğer bir deyişle yasak enerji bant aralığına sahip enerjili fotonlar, serbest elektronlar meydana getirmek için soğurulurlar. Yasak enerji bant aralığındaki enerjiden daha az enerjiye sahip fotonlar malzeme boyunca ilerlemektedirler. Fotonların soğurulması ile hareketli elektron-hol çiftleri oluşur. Soğurulan fotonun enerjisi kristal örgü içindeki herhangi bir elektrona verilir. Genellikle bu elektronlar değerlik bandı içinde bulunur ve kovalent bağa sıkıca bağlı bir şekilde bulunur. Foton tarafından verilen enerji elektronları iletkenlik bandına doğru uyarır. Bu durumda kovalent bağın bir elektronu azalmış olur ve böylece holler oluşur. Meydana gelen hollerin komşu atomların bağlı elektronları hareket eder ve gerideki holler örgü boyunca yayılır. Serbest elektronlar malzeme

boyunca elektrik akımı üretmek için akar. Gelen fotonlar soğurulduklarında elektronlar eklemin pozitif tarafına holler ise negatif tarafa doğru hareket eder. Bundan dolayı bu hareket neticesinde elektrik akımı meydana gelir. Şekil 2.2 ve 2.3'da bir güneş pilinin çalışma prensibi ve yapısı gösterilmiştir.



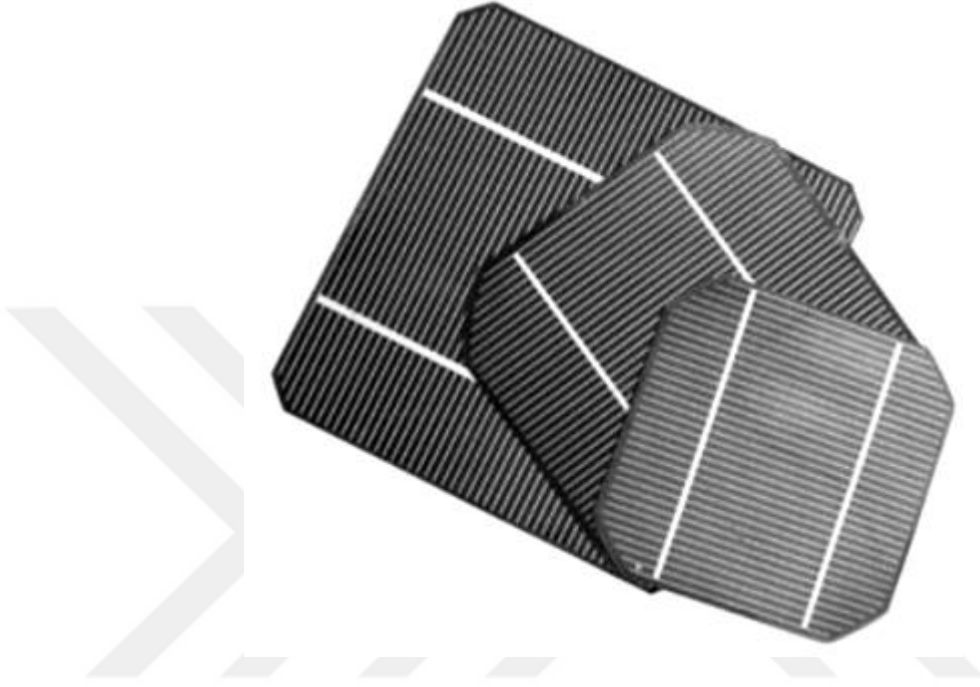
Şekil 2.2. Bir fotovoltaik güneş pilinin temel çalışma prensibi



Şekil 2.3. Fotovoltaik güneş pilinin yapısı

Fotovoltaik güneş pilleri genel olarak yarıiletken malzemedendir. Güneşten gelen fotonlar bu maddeler tarafından soğurulduğu zaman, elektronlar bağlı

buldukları atomlardan ayrılarak madde içinde serbest dolaşmaya başlarlar ve böylece bir elektrik akımı oluşur. Şekil 2.4'te fotovoltaik güneş pili hücresi örneği verilmiştir.



Şekil 2.4. Örnek bir fotovoltaik güneş pili hücresi

Bir güneş pili hücresinin performansı ancak o güneş pilinin verimi ile ölçülmektedir. Güneşten gelen fotonların yüzde kaçını elektrik enerjisine dönüştürmesi verimi belirleyen en önemli parametredir. Güneş pilinin verimi panel üzerine düşen fotonların enerjisinin, oluşan gerilime oranı olarak tanımlanabilir. Fotovoltaik güneş pilleri belli dalga boylarındaki ışığı elektriğe dönüştürülebilir. Çünkü belli bir enerjinin üzerindeki dalga boyuna karşılık gelen ışık demeti özellikle ultraviyole (morötesi) ışık gerekli enerjiyi sağlayabilir. Güneşten gelen fotonların geriye kalanın büyük miktarı fotovoltaik güneş pili hücresini oluşturan madde tarafından ya emilmekte ya da yansıtılmaktadır. Dolayısıyla sıradan bir güneş hücresinin verimi günümüzde yaklaşık olarak %15-%20 civarındadır. Böylelikle güneş pili üzerine düşen fotonların yaklaşık olarak beşte biri ya da altıda biri elektriğe çevirebilmektedir. Laboratuvar koşullarında ise yaklaşık olarak %40 civarında verim elde edilmektedir (Bedeloğlu 2010).

2.6. Fotovoltaik Güneş Pili Çeşitleri

Fotovoltaik güneş pilleri; kristal yapı, ince film, birleşik nanoteknoloji olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır. Bütün bu fotovoltaik güneş pili çeşitleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

2.6.1. Tek katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pilleri

Tek katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pillerinde silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi yarıiletkenler kullanılmaktadır. Bu tek katmanlı güneş pillerinde farklı iş fonksiyonuna sahip iki metal elektrot arasına silisyum gibi inorganik yarıiletkenlerin yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu fotovoltaik güneş pilleri tek katmalı bir yapıya sahip olduğundan verimleri düşüktür (Öztürk 2013).

2.6.2. İki katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pilleri

İki katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pilleri p-tipi ve n-tipi olmak üzere iki çeşit yarıiletken malzeme kullanılmaktadır. Bu yapılarda yük ayrımı ise bu iki yarıiletkenin sınırı arasındaki bölgede gerçekleşmektedir. Bu iki katmanlı inorganik fotovoltaik güneş pilleri kimyasal ve ısıya karşı oldukça kararlıdır. Bu güneş pillerinin verimleri yaklaşık olarak %25 - %30 civarındadır (Öztürk 2013).

2.6.3. Tek kristal silisyum fotovoltaik güneş pilleri

Güneş paneli yapımında tek kristal silisyum fotovoltaik güneş pilleri teknolojisi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojide kullanılan tek kristal silisyum çok yüksek maliyete sahiptir. Bu yüzden tek kristal silisyum fotovoltaik güneş pili teknolojisi yerine daha ucuz olan çok kristal fotovoltaik güneş pilleri kullanılmaktadır. Tek kristal silisyum yarıiletkeni optiksel, yapısal ve elektriksel özellikleri kararlı olduğundan dolayı güneş pili yapımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat saf tek kristal

silisyum teknolojisi oldukça zor ve maliyetlidir. Oksijenden sonra yeryüzünde en çok bulunan element silisyumdur. Silisyum elementi deniz kumu ve kuvarsta yaygın olarak bulunmaktadır. Bunların içinde en çok tercih edilen malzeme kuvarstır. Bu malzemenin yaklaşık olarak %90'ı silisyumdan oluşur. Bu malzeme pek çok süreçten geçirildikten sonra %99 gibi bir saflıkta silika malzemesi elde edilir. Elde edilen silikadan silisyum malzemesi elde edilmektedir. Daha sonra silisyumlar saflaştırılarak yarıiletken özellik gösteren çok kristal silisyumlar elde edilmekte olup fakat maliyetleri oldukça yüksektir. Bu güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %15- %25 civarındadır (Öztürk 2013).

2.6.4. Polikristal silisyum fotovoltaik güneş pilleri

Çok kristal silisyum güneş pilleri tek kristal güneş pillerine göre üretimi daha kolay olup ve maliyeti düşüktür. Bu çok kristal silisyumun elde edilmesinde dökme metodu adı verilen bu yöntem kullanılmaktadır. Bu metodu kısaca şöyle açıklayabiliriz; ilk önce tek kristal silisyumun elde edilmesi için uygulanan aşamalar aynen tekrarlanır ve eritilen yarıiletken silisyum kalıplara dökülerek soğumaya bırakılır. Kalıplardan çıkarılan silisyumlar kare biçiminde kesilir ve çok kristal silisyum fotovoltaik güneş pilleri elde edilir. Bu yöntemle elde edilen güneş pillerinin maliyeti ve verimleri düşüktür. Çok kristal silisyum fotovoltaik güneş pillerinin verimleri %10-%15 civarındadır (Öztürk 2013).

2.6.5. İnce film fotovoltaik güneş pilleri

İnce film fotovoltaik güneş pilleri çok ince yarıiletken tabakaların üst üste büyütülmesiyle oluşmaktadır. Bu güneş pilleri amorf silisyum gibi çok çeşitli malzemelerden elde edilir. Amorf silisyum dışında çok kristal bakır indiyum diselenit (CIS) ve kadmiyum tellür (CdTe) gibi yarıiletken malzemelerden de yapılmaktadır. İnce film fotovoltaik güneş pillerinde çok çeşitli çökeltme yöntemleri var olup bu çökeltme yöntemlerinin maliyeti oldukça düşüktür. Bu yöntemler kullanılarak 2×2 inç boyutlarında ince film fotovoltaik güneş pili elde edilebilir. Cam ve plastik gibi maliyeti düşük malzemeler üzerine tabakalar çökeltilir. Tek kristal silisyum birbirlerine bireysel

olarak bağlanırken ince film fotovoltaik güneş pillerinde tek bir ünite şeklinde bağlanmaktadır. Bu güneş pillerinin arka bölümüne yansıtmayan özelliğine sahip kaplama ve iletken oksit katmanlar eklenir. Bu güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %8-%15 civarındadır (Öztürk 2013).

2.6.6. Amorf silisyum fotovoltaik güneş pilleri

Amorf silisyum yalıtkan ile benzer bir elektriksel özellik göstermektedir. Son yıllarda bilim insanları tarafından yapılan araştırmalarda amorf silisyumun güneş pillerinde kullanılması fikri ortaya atılmıştır. Günümüzde amorf silisyum düşük güce sahip cihazlarda kullanılmaktadır. Çok amaçlı cihazlar geliştirmek için germanyum, azot, karbon ve kalay ile amorf silisyum kullanılmaktadır. Amorf silisyumla elde edilen fotovoltaik güneş pilleri yaklaşık olarak %15'den daha düşük verime sahiptir. Galyum arsenit ile elde edilen ince film fotovoltaik güneş pilleri %25'den daha fazla güç dönüşüm verimine sahiptir (Öztürk 2013).

2.6.7. Çok kristalli ince film fotovoltaik güneş pilleri

Çok kristalli ince film fotovoltaik güneş pillerini oluşturulan yarıiletkenlerin yapısında çok küçük olan kristal tanecikleri kullanılmaktadır. Çok kristalli ince film fotovoltaik güneş pillerinde kullanılan yarıiletkenler silisyumdan farklı bir yapıya sahiptir. Bu yapılarda farklı iki yarıiletken malzeme arasındaki oluşan arayüzde daha kolay elektrik alan oluşur. Bu güneş pilleri, pencere olarak adlandırılan 0,1 mikron'dan daha ince kalınlığındaki üst tabaka yapısına sahiptir. Yüksek enerji taşıyan ışınım enerjisini bu tabaka soğurmaktadır. Bu tabaka band boşluğu özelliğine sahip olması için yeterince ince olmalıdır (Öztürk 2013).

2.6.8. İnce film kalkojenit fotovoltaik güneş pilleri

1960 yıllarında bilim insanları tarafından yapılan çalışmalarda Cu_xS -CdS, Cu_xSe -CdSe ve Cu_xTe -CdTe ince film fotovoltaik güneş pilleri teknolojisi geliştirilmiştir. Bu ince film

güneş pillerinin üretimi oldukça kolaydır. CdTe, CdS ve CdSe ince filmleri kimyasal çökeltme tekniği ile üretilmektedir. Cu_xTe , Cu_xS ve Cu_xSe tabakaları ise CdTe, CdS ve CdSe filmleri ile aynı anda CuCl çözeltisinde 1-2 dakika daldırılarak üretilmektedir. Bu ince film güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %10 civarındadır. Bu güneş pillerindeki bakır kalkojenit tabakalar bakır difüzyonu sonucu ile bozulduğundan dolayı artık günümüzde çalışılmamaktadır (Öztürk 2013).

2.6.9. Kadmiyum tellür (CdTe) fotovoltaik güneş pilleri

Kadmiyum tellür (CdTe) fotovoltaik güneş pilinde bu yarıiletken malzeme yüksek soğurma katsayısına ve ideal bant aralığına sahiptir. Bu malzeme fotovoltaik güneş pili teknolojisine gelecek vadetmektedir. Kadmiyum tellür (CdTe) güneş pillerinin verimi %15'ten fazladır. Kadmiyum tellür (CdTe) yarıiletken malzemelerden yapılan güneş paneli modüllerinin verimi %9'dan fazladır. Kadmiyum tellür (CdTe) yarıiletken malzemesinden elde edilen güneş pilleri diğer ince film güneş pilleri ile kıyaslandığında daha kolay güneşi depolamakta olup ve daha geniş ölçekte kullanılmaktadır. Kadmiyum tellür (CdTe) periyodik tablonun 2. ve 6. grup elementlerinin meydana gelmesiyle oluşan bir yarıiletken malzemedir. Kadmiyum tellür (CdTe) yaklaşık olarak 1,45eV'luk yasak enerji band aralığına sahiptir. Kadmiyum tellür (CdTe) band aralığı değeri güneş pillerinden elektrik enerjisi elde etmek için ideal bir değerdir (Öztürk 2013).

2.6.10. Bakır indiyum diselenit (CIS) fotovoltaik güneş pilleri

Bakır indiyum diselenit (CIS) fotovoltaik güneş pilleri periyodik tablonun 1., 3. ve 6. grup elementlerinin üçünün veya daha fazlasının belirli şartlar altında meydana gelmesiyle oluşmaktadır. Bu elementlerin meydana gelmesiyle oluşan yarıiletkenin soğurma katsayısı oldukça yüksektir. Bakır indiyum diselenit (CIS) fotovoltaik güneş pili, selenyum, bakır ve indiyum ile meydana gelen birleşik bir yarıiletkendir. Bu yarıiletkenlerin özdirençleri ve iletkenliği isteğe göre değiştirilebilir. Bu yarıiletken malzemenin ışığın %99'unu ilk 1 mikron kalınlığındaki tabakası soğurabilir. Dış ortam şartlarına karşı kararlı ve çok dayanıklıdırlar. Bu yarıiletken malzemesi bu özelliğinden

dolayı ticari amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca yukarıda söz edilen bakır indiyum diselenit (CIS) yapısına galyum (Ga) elementi katılırsa çok daha yüksek verime sahip güneş pilleri elde edilebilir (Öztürk 2013).

2.6.11. Bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) fotovoltaik güneş pilleri

İnce film fotovoltaik güneş pili çeşitlerinden biri de bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) fotovoltaik güneş pildir. Bu yapı kısaca CIGS olarak da bilinmektedir. Bu güneş pili, esnek yapıya sahip bir yarıiletken tabaka üzerinde yapılır. Bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) güneş pili diğer ince film güneş pilleriyle karşılaştırıldığında daha iyi bir verime sahiptir. Diğer ince film güneş pilleri yaklaşık olarak %7 verime sahip olmasına rağmen bu güneş pili yaklaşık olarak %10 civarında bir verime sahiptir. Bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) ve kadmiyum tellür (CdTe) güneş pilleri teorik çalışmalarda %30 verime sahip olması tahmin edilirken laboratuvar şartlarında en fazla %25 verime sahiptir (Öztürk 2013).

2.6.12. Çok eklemli fotovoltaik güneş pilleri

Tek eklemli fotovoltaik güneş pilleri tek tip malzeme kullanılarak elde edilen güneş pilleri teoride yaklaşık olarak %30 verime sahip iken laboratuvar şartlarında yaklaşık olarak %25 verim elde edilmektedir. Bu yüzden çok eklemli fotovoltaik güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Çok eklemli fotovoltaik güneş pili çeşidinde iki veya ikiden daha fazla yarıiletken tabakalardan meydana gelmektedir. Bu tabakalardan birisi kırmızı ışığı soğururken diğer tabaka ise mavi ışığı soğurmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı çok eklemli fotovoltaik güneş pilleri tek eklemli fotovoltaik güneş pillerine göre daha yüksek güç dönüşüm verimine sahiptir. Teorik olarak ideal fotovoltaik güneş pilleri; kızıl ve mor ötesi arasındaki farklı dalga boyuna sahip tabakalardan oluşabilir. Çok eklemli fotovoltaik güneş pili yapısına sahip uygun tabakalar sağlandığında %70 gibi bir verim elde edilebilir. Ancak bu fotovoltaik güneş pili ideal güneş pili uygulamaları açısından pek mümkün değildir. Bundan dolayı bilim

insanları birkaç tabakaya sahip güneş pilleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çok eklemlili fotovoltaiik güneş pilleri yaklaşık olarak %35-40 civarında bir verime sahiptir.

2.6.13. Nano fotovoltaiik (NanoPV) güneş pilleri

Nano fotovoltaiik güneş pilleri (NanoPV) geleceğın güneş pili teknolojisi olarak bilim insanları tarafından kabul edilmektedir. Nano fotovoltaiik güneş pilleri yüksek verime sahip nano-mikro kristale sahip güneş pillerini kapsamaktadır. Nano fotovoltaiik güneş pilleri yapısında hidrojen amorf silikon (a-Si:H) bulundurduğundan dolayı yaklaşık %7-11 civarında bir verime sahiptir. Bu nano -yapılı güneş pilleri kimyasal, elektriksel ve optiksel açıdan oldukça iyi özelliklere sahiptir. Nano fotovoltaiik güneş pilleri bu özelliklerinden dolayı bu güneş pillerinin verimleri geliştirilebilir (Öztürk 2013).

2.6.14. Kuantum noktalı fotovoltaiik güneş pilleri

Kuantum noktalı fotovoltaiik güneş pillerinde yer alan kristal yarıiletkenler nanometre büyüklüğünde olup farklı yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu güneş pillerindeki kuantum noktaları ışığın soğurulmasına olanak sağlayan basit bir çapa sahiptir. Kuantum noktalı fotovoltaiik güneş pillerinde yapay atom olarak görev yapan kuantum noktalar dır. Bu kuantum noktalar taşıyıcıların kontrol edilmesine olanak sağlayan üç boyutlu kısıtlama oluştururlar. Bu kuantum noktaları elektronlar için üç boyutlu engel görevi görmektedir. Kuantum noktalı yapı yasak enerji band aralıkları değıştirilebilen nanometre seviyesindedir. Teorik çalışmalarda güç dönüşüm verimi yaklaşık %63 olarak düşünölmüştür. Kuantum noktalı fotovoltaiik güneş pillerinde noktalar kaynaştırılarak soğurma arttırılarak güneş pilinin verimi arttırılmıştır. Bu metot ile akım süröldüğünden dolayı çok eklemlili fotovoltaiik güneş pillerinden daha yüksek güç dönüşüm verimi elde edilir (Öztürk 2013).

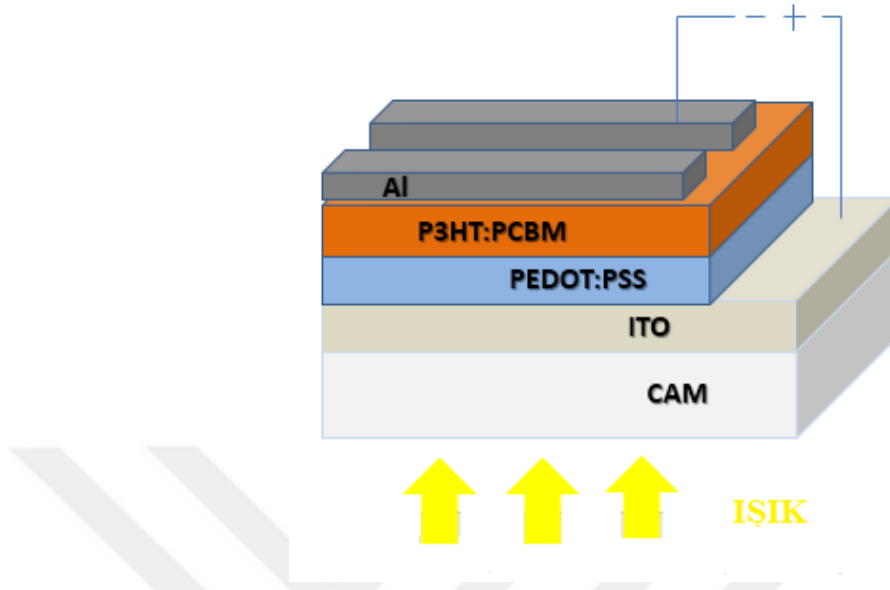
2.6.15. Boya duyarlı fotovoltaik güneş pilleri

Boya duyarlı fotovoltaik güneş pilleri silisyum yarıiletkeni ve su gibi çözücülerde kolay çözünebilen tuzlardan oluşan bir elektrolit sıvı içermektedir. Elektrolit ve yarıiletken üzerine fotonlar (güneş ışınları) gönderildiğinde üretilen yakın elektron-hol çiftleri birbirinden ayrılır. Güneş ışığı (fotonlar) tarafından uyarılan taşıyıcıların kaynağı ise ışığa duyarlı boyalardır. Boya duyarlı fotovoltaik güneş pillerinde iyodür en çok kullanılan boya türüdür. Diğer yandan boya moleküllerine destek sağlamak için titanyum dioksit (TiO_2) gibi nanomalzemeler kullanılmaktadır. Boya duyarlı güneş pillerinde elektron-hole çiftlerinin oluşması bitkilerdeki klorofil hareketine benzemektedir. Boya duyarlı fotovoltaik güneş pillerinde taşıyıcıların oluşması bitkilerdeki fotosentez olayına benzemektedir (Öztürk 2013).

2.6.16. Organik fotovoltaik güneş pilleri

Organik fotovoltaik güneş pilleri üçüncü yeni nesil güneş pilleri olarak bilinmektedir. Organik fotovoltaik güneş pilleri organik tabanlı malzemelerin iki elektrot arasına yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Organik güneş pillerinde organik tabanlı malzeme olarak yarıiletken organik polimerler kullanılmıştır. İletken olan bu organik moleküller istenilen özelliğe göre kolaylıkla değiştirilebilir olması, kolay üretilibilmeleri, ucuz ve hafif olmaları gibi avantajlara sahip olması sebebiyle onları popüler hale getirmiştir. İnorganiklerin çeşitliliği sınırlı iken organik moleküllerin sayılarının milyonlar seviyesinde olması bu organik malzemelerden elde edilecek aygıtların kararlılığını ve verimini arttırma imkânı sağlar. Organik malzemelerin kaynak sıkıntısı olmaması nedeniyle bu tarz çalışmalar için çok ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. En çok kullanılan güneş pili aygıt şekli biri verici (donor, n) diğeri alıcı (akseptör, p) malzemelerin bir arada kullanıldığı p-n eklem şeklindedir. Organik güneş pillerinde kullanılan malzemelerin kimyasal yapılarının kolay değiştirilebiliyor olması onların avantajlarından biridir. Organik malzemelerin bu özelliğiyle daha fazla foton enerjisi soğurması sağlanarak kullanılacak malzemelerin soğurma aralığı güneş spektrumuna uygun hale getirilmiştir. Fakat organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimleri

inorganik malzemelerin kullanıldığı güneş pillerine göre daha düşüktür. Organik güneş pillerinin verimlerinin inorganik güneş pillerine göre düşük olmasının yanı sıra kararlılık gibi sorunları da vardır. Yani su buharı, oksijen ve ışık altında organik fotovoltaiik güneş pillerinin verimi hızlı bir şekilde düşmektedir (Kroon *et al.* 2007). İki katmanlı güneş pillerinde oluşan elektron - hole çiftlerinin ayırımının sadece katmanların arayüzeyinde gerçekleştiriliyor olması güneş pili veriminin düşük olmasına sebep olur. Yani elektron-hole çiftlerinin arayüzeylerde yeteri miktarda ayrılabilmesidir (Tang 1986). Güneşten gelen fotonların soğurulmasıyla oluşan eksitonlar, yük taşıyıcıların oluşmasını sağlamaktadır. Organik fotovoltaiik güneş pillerinde fotoakımın oluşması için eksitonların düzgün bir şekilde devreden akması gerekmektedir. Organik güneş pillerinde foto-akıma katkıda bulunan yaşam süreleri uzun olan eksitonlar vardır. Organik güneş pillerinde fotonların aktif tabakada soğurmasını arttırmak için hacimli heteroeklem ve katmanlı heteroeklem olarak bilinen iki yöntem geliştirilmiştir. Bu organik güneş pillerinde alıcı (akseptör, p) ve verici (donor, n) gibi iki farklı malzeme uygun çözücü sayesinde karışım halinde bulunmaktadır ve bu yüzden yük ayrımı en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Uygun çözücülerin kullanılmasının yanısıra organik fotovoltaiik güneş pillerine sıcaklık uygulanması da önemli bir etkidir. Ancak bu işlemler malzemenin türüne göre değişiklik göstermektedir. Organik güneş pillerinde aktif tabaka olarak kullanılan filmlerin düzgün olarak oluşması için uygun malzemelerle katkılanması gerekmektedir. Organik güneş pili aygıtı tasarımında bütün durumlar dikkate alınarak organik malzemelerin güneş pilleri için uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bundan dolayı organik güneş pillerinde çok farklı polimerlerin üretilmesi güç dönüşüm verimini arttırması için hız kazanmıştır. Tüm bu çalışmalar polimer üretim teknolojisinin gelişmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır. İletken polimerlerin ince film oluşturabilmesinden ve maliyetleri düşük olduğundan dolayı kullanım sürekli olarak genişlemektedir. Bu kullanım alanlarına organik fotovoltaiikler (OPV), fotodiyot teknolojisi, lazer teknolojisi, yarıiletkenler, alan etkili transistörler (FET), çipler, sensörler, entegre devreler, bilgisayar ve çeşitli teknolojik aygıtlar örnek verilebilir (Moons 2002). Şekil 2.5'de P3HT:PCBM aktif tabanlı geleneksel heteroeklem organik güneş pilinin şematiği gösterilmektedir.



Şekil 2.5. P3HT:PCBM aktif tabanlı geleneksel heteroeklem organik güneş pilinin şematik gösterimi

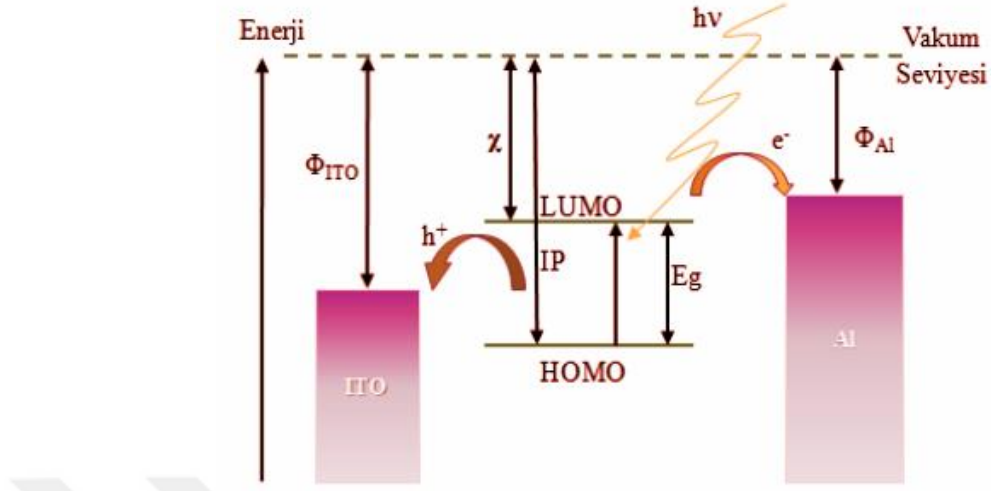
2.6.16.a. Organik fotovoltaik güneş pillerinin çalışma ilkesi

Organik malzemelerde farklı molekül içi ve moleküller arası etkileşimler mevcut olup üç boyutlu kristal yapı yoktur. Organik güneş pillerinin çalışma ilkesi ile p-n eklemnin çalışma ilkesi aynıdır. Organik güneş pillerinde güneşten gelen fotonların elektrik akımına dönüşmesi aşağıdaki adımlarla açıklanabilir;

1. Güneşten gelen fotonların soğurulmasıyla elektron -hole çiftlerinin oluşması,
2. Alıcı (akseptör, p) ve verici (donor, n) bölgeleri arası arayüzeyinde elektron-hol çiftlerinin difüzyonu,
3. Yük ayrımının arayüzey bölgesinde olması,
4. Son olarak da elektrik akımının elde edilmesi için hollerin anotta ve elektronların katoda toplanması (Gregg and Hanna 2003).

Organik fotovoltaik güneş pillerinin çalışma ilkesine göre elektron-hol çiftlerinin kısa mesafelerde ayrışması gerekmektedir. Elektron transferi ile gerçekleşen elektron-hole

çiftlerinin ayrışması organik yarıiletken arayüzeyinde ile metal kontakta gerçekleşmektedir. Holler ve elektronlar coulomb çekim kuvvetinden daha güçlü bir elektrik alan tarafından ayrılırlar. Ayrılan holler ve elektronlar birbirinden farklı bölgelere taşınmaktadır. Bu işlem uygulanan potansiyelden meydana gelen elektrik alanda gerçekleşmektedir. Geri yük geçişini önlemek için hole ve elektronlar farklı malzemelerde taşınmaktadır. Yani bu sistemlerde elektron iletkenliği iyi olan verici (donorr, n) ve hole iletkenliği iyi olan alıcı (akseptör, p) malzemelerin kullanımı daha uygundur. Organik güneş pillerinde yüksek verim elde etmek için yarıiletken malzeme ile metal elektrot arasında herhangi bir enerji engelinin oluşmaması gerekmektedir. Bu enerji engelini engellemek için bir ek malzeme kullanılır ve organik fotovoltaiik güneş pillerinin güç dönüşüm verimleri arttırılır (Zafer 2006). $h\nu$ enerjisine sahip bir foton yasak enerji aralığının enerjisinden büyük enerjiye sahip olması yani $h\nu \geq E_g$ durumunda elektron arkasında bir boşluk bırakarak HOMO yani en yüksek işgal edilmiş molekül orbital seviyesinden LUMO olarak adlandırılan en düşük işgal edilmemiş molekül orbital seviyesine çıkar. Ve güneşten gelen fotonlar yarıiletken malzemeler tarafından soğurulur. Enerji seviyeleri ve güneşten gelen fotonların soğurulması Şekil 2.6'de gösterilmiştir. Bu süreç elektron ve boşlukların ayrılmasıyla devam etmektedir. Bu sistemlerde yük ayrımının olması için elektrik alana ihtiyaç vardır. Elektrik alan ise iş fonksiyonlarından sağlanmıştır (Spanggaard and Krebs 2004). Organik güneş pillerinde yükler ayrıştıktan sonra elektronlar katoda, boşluklar anoda doğru hareket ederek potansiyel farkından akım üretirler. Şekil 2.6'de görüldüğü üzere χ elektron ilgisi olup elektronu LUMO bandından vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan enerjidir. I_P ise iyonizasyon enerjisi olup bir atom veya molekülden bir elektron çıkarmak için gereken minimum enerjidir. Φ_{Al} ve Φ_{ITO} iş fonksiyonları olup elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir. E_g yasak enerji aralığı olup HOMO seviyesinin maksimumu ile LUMO seviyesinin minimumu arasındaki enerji farkıdır.

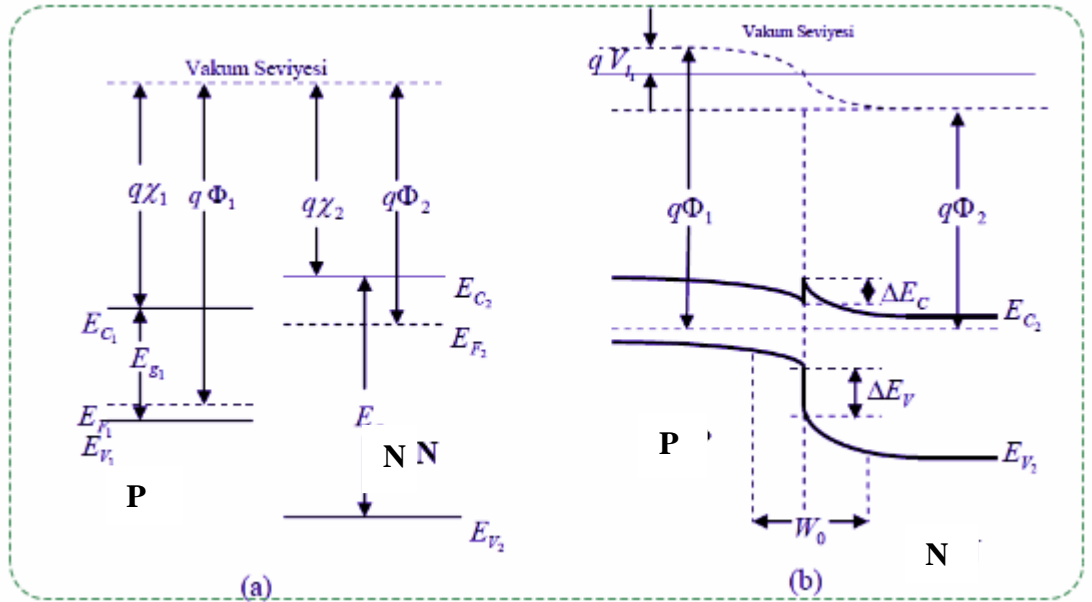


Şekil 2.6. Güneşten gelen fotonların soğurulması ve yük taşıyıcı transferleri (Schilinsky *et al.* 2002).

2.7. Heteroeklem Yapılar

Heteroeklem yapılar birbirinden farklı kristal yapısına ve yasak enerji band aralığına sahip iki yarıiletkenin oluşturduğu yapıdır. Heteroeklemler bir araya getirilen yarıiletkenin iletim tiplerine bağlı olarak anizotip ve izotip eklem olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Farklı iletim tipine sahip (biri n -tipi diğeri p -tipi) yani farklı katkılı olanlara da anizotip heteroeklem, aynı iletim tipine yani aynı katkıya sahip (her ikisi n -tipi ya da p -tipi) yarıiletkenlerin oluşturduğu eklem izotip heteroeklem denir (Sharma and Purohit 1974). Şekil 2.6'da açıklanan geniş yasak aralığına (E_{g2}) sahip n -tipi yarıiletken dar band yasak enerji aralığına (E_{g1}) sahip p -tipi yarıiletken ile sırasıyla Φ_2 ve Φ_1 iş fonksiyonlarına χ_2 ve χ_1 elektron ilgisine sahiptirler. Elektron ilgisi ise elektronu iletkenlik bandından vakum seviyesine, iş fonksiyonu elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan enerjidir. Bu iki yarıiletken arasında kontak sağlandığında eklemlerden karşılıklı olarak elektron-hole akışı olduğunda heteroeklemler termal dengeye gelmiş olur. P-n eklem bölgesinde olduğu gibi p bölgesinde iyonlaşmış akseptörler ve n bölgesinde ise iyonlaşmış donörler ile heteroeklemde bir deplasyon bölgesi oluşmuştur. Her iki taraftaki fermi seviyeleri çakışık olduğunda sistem dengededir. Heteroeklemleri oluşturan iletim bandı sınırında bir süreksizlik oluşması yarıiletkenlerin yasak enerjilerinin farklı olmasından dolayıdır.

Bantlarda süreksizlikler oluşması fotovoltaik güneş pillerinde istenmeyen bir durumdur. Ancak uygun elektron ilgisi olması ve uygun katkılama işlemleri ile yarıiletkenlerin seçilmesiyle bu süreksizlik durumları ortadan kaldırılabılır (Küpeli 2005). Şekil 2.7b’de görüldüğü üzere dar band aralığına sahip boşluklara göre geniş band aralığına sahip yarıiletkendeki (n-tipi) elektronlar daha düşük bir engel ile karşılaşırlar. Heteroeklemlerin enerji band aralıklarının ve yük taşıyıcıların kontrol edilebilir olması en önemli avantajıdır. Ayrıca heteroeklem yapılar optoelektronik aygıtlarda kullanılabilir hale gelmesinin en önemli sebebi optik ışımayı tuzakladığından dolayıdır.

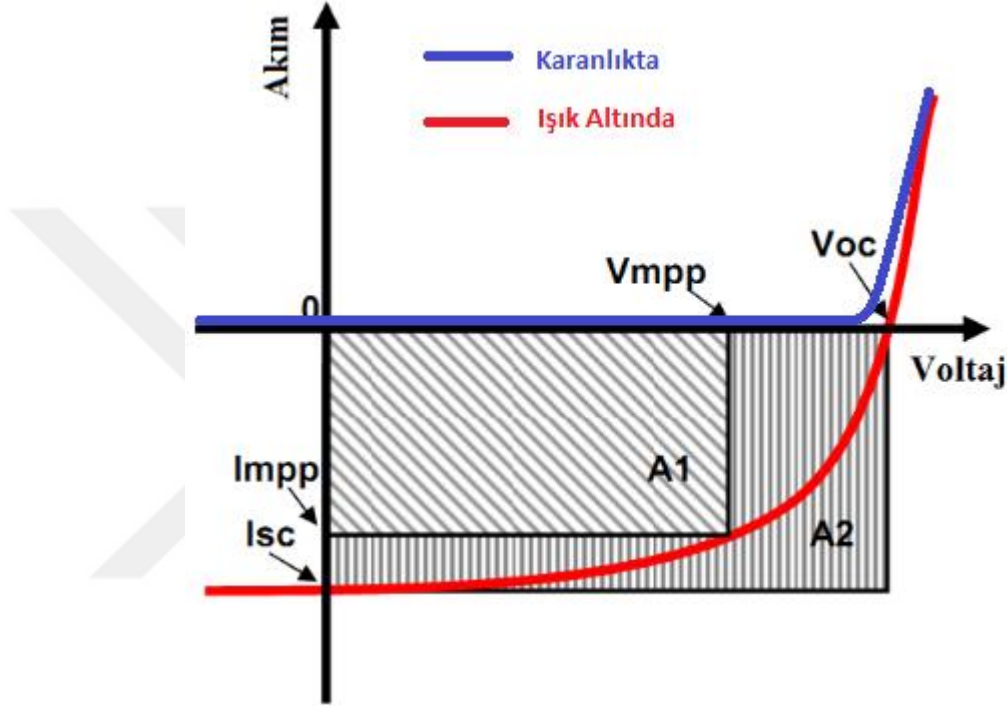


Şekil 2.7. a) p tipi ve n tipi iki farklı yarıiletkenin enerji band diyagramları b) p-n heteroeklem yapıların enerji band diyagramları

2.8. Güneş Pillerinin Karakteristiği

Güneş pillerinin güç dönüşüm verimi, güneşten gelen ışığa (fotonlara) benzer bir ışık altında I-V (akım-voltaj) eğrisiyle karakterize edilir (Kietzke 2007; Kolachure 2007). Akım - voltaj eğrisiyle dolum faktörü (FF), açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası (MPP) ve güneş pillerinin verimi (η) gibi güneş pilinin karakteristiği hakkında önemli bilgiler elde etmemizi sağlayan parametreleri

göstermektedir. Şekil 2.8'de ışık altında ve karanlıkta güneş pillerinin I-V (akım-voltaj) eğrisini göstermektedir. Bu I-V (akım-voltaj) eğrisiyle belirlenen parametreler birbiriyle ilişkilidir. Şekil 2.8'de görüldüğü üzere küçük dikdörtgenin yani A1 alanının büyük dikdörtgene yani A2 alanına oranı dolun faktörünü (FF) ifade etmektedir.



Şekil 2.8. Bir güneş pilinin karanlıkta ve ışık altında akım-voltaj (I-V) karakteristiği

2.8.1. Güneş pillerinin güç dönüşüm verimi

Güneş pilinin güç dönüşüm verimi η sembolüyle gösterilir ve pilin çıkış gücünün ($P_{\text{çıkın}}$) güneş piline uygulanan güneş ışığının gücüne (P_{giren}) oranı bize güç dönüşüm verimini verir. Yani dolun faktörü (FF), kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre geriliminin (V_{oc}) çarpımının yani pilden çıkan toplam gücün ($P_{\text{çıkın}}$) güneş piline uygulanan güneş ışığının gücüne (P_{giren}) oranı ile hesaplanır. Dolayısıyla verim aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkın}}}{P_{\text{giren}}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{\text{giren}}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.8.2. Güneş pillerinin kısa devre akımı (I_{sc})

Güneş pillerinin kısa devre akımı bir güneş pilinde voltajın olmadığı ($V=0$) durumundaki akım değeridir ve I_{sc} ile ifade edilir. Kısa devre akımı (I_{sc}) güneş pillerinde güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Kısa devre akımını güneş pilleri tarafından soğurulan ışık miktarı ve bu ışığın taşıyıcılara dönüşme oranı (dâhili kuantum verimi-IPCE) belirler. Yük direnci sıfırken üretilen akıma kısa devre akımı (I_{sc}) denir. Bu yüzden elde edilen fotovoltaik güneş pillerinin seri direnci (R_s) mümkün olduğunca küçük olmalıdır.

2.8.3. Güneş pillerinin açık devre voltajı (V_{oc})

Güneş pilinin açık devre olduğu zamandaki kısa devre akımı ($I_{sc}=0$) sıfır olup kısa devre akımının sıfır olduğu anda ölçülen voltaj değerine açık devre voltajı denir ve V_{oc} ile ifade edilir. Açık devre voltajı genellikle 0.5 - 1.5 V aralığındaki değerler alır. Elektronların ve hollerin ayrılması için güneş pili devresi kapalı değil iken yani açıkken aydınlatılmalıdır. Bu hol ve elektronlar sırasıyla yüksek ve düşük iş fonksiyonlarına doğru akarlar. İki elektrodun iş fonksiyonu arasındaki fark açık devre voltajının ulaşacağı en yüksek değerdir. Polimer malzemelerde alıcının LUMO seviyesinin azaltılması ve HOMO seviyesinin artırılması açık devre voltajının (V_{oc}) artmasına sebep olur. Polimere dayalı güneş pillerinde açık devre voltajı (V_{oc}) aktif tabakanın nano-morfolojisinden etkilenebilir. Devreden akım geçmiyor iken ölçüm alındığından açık devre voltajı dolaylı yoldan ısınım şiddetine bağlı olur.

2.8.4. Güneş pillerinin dolun faktörü (FF)

Dolum faktörü (FF) organik katmanlardaki yük taşıyıcıların hareketliliğiyle ve güneş pillerinin seri direnci ile belirlenir. Güneş pillerinin kalitesinin bir ölçüsü dolum faktörüdür. Dolum faktörü (FF) değeri organik güneş pillerinde yaklaşık olarak 0.55-0.75 civarındadır. Dolum faktörü (FF), kısa devre akımına (I_{sc}) açık devre voltajına

(V_{oc}) ve maksimum gerilim- akımın oranına doğrudan bağlıdır. Buna göre dolum faktörü aşağıdaki formül yardımı ile elde edilir.

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

Bu dolum faktörü oranının 1'e eşit olması sadece teoride mümkündür. Bundan dolayı dolum faktörü oranının 0.8 ve üstü değerlerdeki **FF** değeri iyi bir değer olarak kabul edilebilir. Yapılan güneş pili aygıtları ideal diyot karakteristiğine ne kadar yakın ise dolum faktöründe (FF) o kadar yüksek olur. Bu durumda dolum faktörü (FF) ne kadar büyük ise elde edilen güneş pili aygıtlarının güç dönüşüm verimi de o kadar yüksek olur. Dolum faktörü üzerine güneş pilleri yapımında kullanılan malzemelerin kontak durumunda oluşturduğu paralel direnç ve iç direncin çok önemli etkisi vardır. Eğer paralel direnç çok büyük olursa elde edilen güneş pillerinde akım aygıt üzerinden akar. Güneş pillerinin güç dönüşüm verimi dolum faktörü arttıkça artar. Mobilitenin yüksek dolum faktörü değerlerinin elde edilmesinde önemi büyüktür (Kietzke 2007).

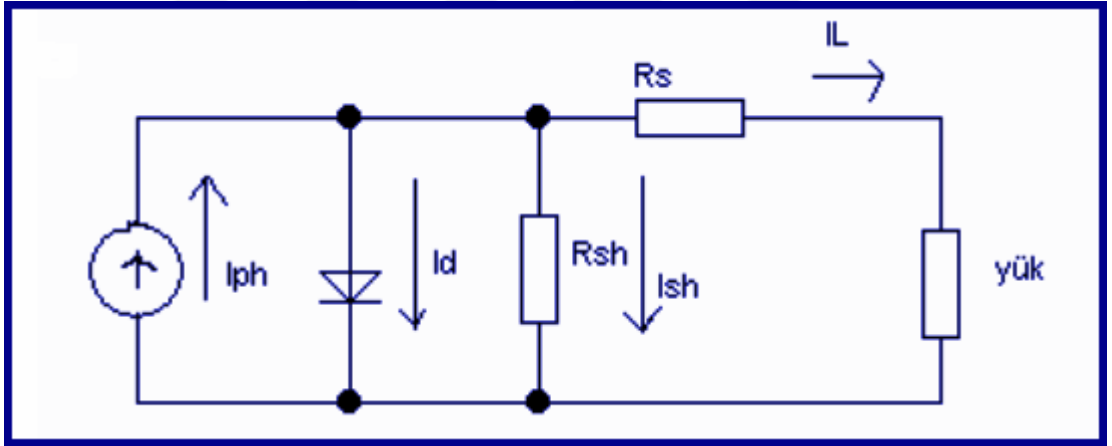
2.8.5. Güneş pillerinin maksimum güç noktası (MPP)

Güneş pillerinin I-V grafiğinde akımın ve gerilimin maksimum olduğu nokta maksimum güç noktasını ifade eder. Bu noktada elde edilen gerilim pilde elde edilen maksimum gerilim (V_{mpp}) elde edilen akım ise pilin maksimum akımıdır (I_{mpp}). Maksimum güç ise verim hesaplamasındaki oranlamada kullanılmak için elde edilir ve Buna göre maksimum güç,

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

2.9. Bir Güneş Piliinin Elektriksel Eşdeğer Devresi

Örnek bir güneş pili elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Örnek bir güneş pili elektriksel eşdeğer devresinde güneş pilini doğrultucu bir diyoda paralel bağlanmış bir akım kaynağı olarak düşünülebilir. Burada R_p ve R_s güneş pili verimini etkileyen paralel ve seri direnç değerlerini göstermektedir. Seri direnci yarıiletken yapılarındaki kontaktlar ve yarıiletken malzeme içindeki tabakaların iç dirençlerini oluştururken paralel direnci ise kristal içerisindeki kusurlar meydana getirmektedir. Paralel direnç etkisi güneş pillerinin doluluk faktörünü ve açık devre gerilimini azaltan bir etkidir. Seri direnç etkisi ise güneş pillerinin doluluk faktörünü ve kısa devre akımını azaltan bir etkidir. Bu devredeki bütün parametreler ışık şiddetine ve sıcaklığa bağlıdır.



Şekil 2.9. Bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu bölümde, referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili ve P3HT:PCBM fotoaktif farklı oranlarda Pentacene malzemesi katkılanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al organik güneş pillerinin hazırlanma prosedürü ve güneş pillerinin üretimi ve karakterizasyonu ile ilgili bilgileri içermektedir. Bu çalışma, geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin hazırlanması, fabrikasyonu ve karakterizasyonu olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada ITO'nun kimyasal temizliği, PEDOT:PSS'in filtre ile süzülmesi, P3HT:PCBM, Pentacene ve P3HT:PCBM:Pentacene çözeltilerinin uygun oranlarda hazırlanması gibi işlemleri içermektedir. İkinci aşamada referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş pili ve P3HT:PCBM aktif tabakaya Pentacene malzemesi katkılanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al organik güneş pillerinin fabrikasyonu yapılmıştır. Daha sonra fotoaktif tabaka ile metal arasına LiF kaplanması ile oluşturulan bir diğer referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al ve aktif tabakaya %0,5 , %1 ve %1,5 oranında pentacene katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiFAl organik güneş pillerinin fabrikasyonu yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise elde edilen güneş pillerinin karanlık ve ışık altındaki $J-V$ (akım yoğunluğu - voltaj) ölçümleri yapıldı. Ayrıca geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilleri yapımında kullanılan materyaller de bu bölümde anlatılmıştır.

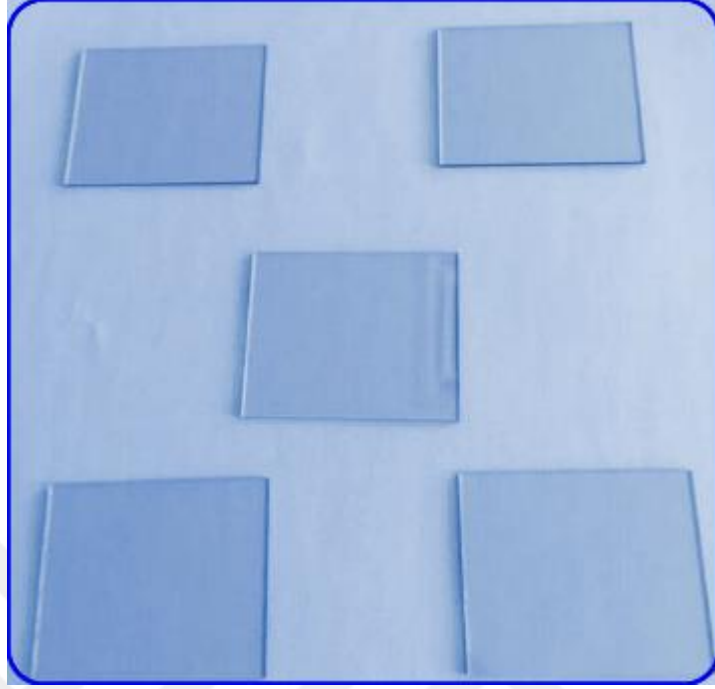
3.2. Geleneksel Katı Heteroeklem Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Materyaller

Bu deney çalışmaları boyunca elde edeceğimiz organik güneş pillerinin yapılması ve karakterizasyonu Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanoaygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında yapılacaktır. Geleneksel katı heteroeklem organik

güneş pillerinin üretiminde hem ışık geçirgenliği hem de iletkenliğinden dolayı alttaş olarak indiyum kalay oksit (ITO) kullanılmıştır. Hol taşıyıcı tabaka veya elektron engelleyici katmanı olarak PEDOT:PSS, aktif tabaka olarak da kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM karışımı ve metalizasyon işlemi için de Al metali kullanıldı. Organik güneş pillerinin yapımı ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanoaygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan temiz oda (class 1000 clean room) şartlarında ve glove box (eldivenli kabin) içerisinde gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. ITO (İndiyum kalay oksit)

İndiyum oksit (In_2O_3) ve kalay oksit (SnO_2) karışımı olan indiyum kalay oksit (ITO) saydam iyi bir iletken oksittir. Bu yapı indiyum oksit yapısına kalay atomlarının katkılanmasıyla elde edilen yapısı bozulmuş n-tipi geniş bir bant aralıklı yarıiletkenidir. ITO filmleri görünür bölgede yüksek ışık geçirgenliğine ve yüksek iletkenliğe sahip olduğundan dolayı güneş pilleri, fotodiyot gibi çeşitli elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. İndiyum kalay oksit en yaygın kullanılan şeffaf iletken oksittir. Deneysel çalışmalarım boyunca 8-12 Ω dirence, 550 nm dalga boyuna ve %83 geçirgenlik özelliklerine sahip ITO kullanıldı. ITO'nun iş fonksiyonu 4,8 eV olup geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde alttaş ve elektron toplayıcı tabaka olarak kullanılmaktadır (Nickel *et al.* 2009). Optik bant aralıkları 3 eV'dan büyük malzemeler olduğu bilinir. ITO'nun dezavantajları ise; indiyumun az olması ve maliyetinin çok yüksek olması, ITO'lerin esnek olmayışları ve kırılğan olmasıdır. Şekil 3.1'de geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde kullanılan ITO'ların görüntüsü gösterilmektedir.

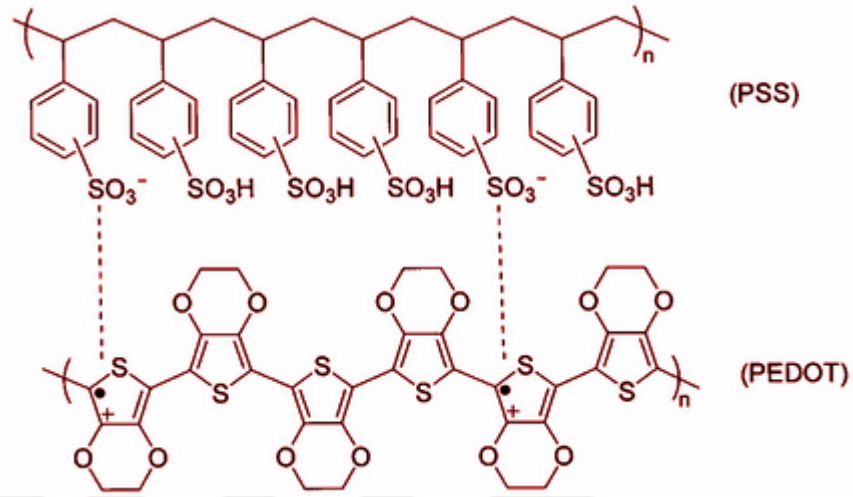


Şekil 3.1. Geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde kullanılan ITO'ların görüntüsü

3.2.2. PEDOT:PSS

PEDOT:PSS, sodyum polistiren sülfonat ve konjuge polimer olan poli (3,4 etilendioksitiyofen)'in karışımıyla elde edilen organik bir su bazlı çözeltilidir. Yüksek bir şekilde şekil değişimine sahip olmasından dolayı değişik uygulamalarda saydam ve iletken polimer olarak kullanılmaktadır. Su bazlı organik çözeltiliden elde edilen bu filmler güneş pillerinde, transistörlerde, elektrokromatik cihazlarda ve genel elektrik devreleri başta olmak üzere birçok sistemlerde kullanılmaktadır (Nardes *et al.* 2008). Geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde ITO ve P3HT:PCBM aktif tabaka arasında yer alan PEDOT:PSS açık devre geriliminde artış sağlamaktadır. PEDOT:PSS geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde sadece boşluk taşıyıcı ve eksiton engelleyici olarak çalışmaz aynı zamanda ITO kaplı cam yüzeyi pürüzleştirir. Ayrıca P3HT:PCBM aktif tabakayı oksijene karşı korur ve elektron tuzaklarına sebep olan katodun aktif katmana difüze olmasını engeller (Benanti ve Venkataraman 2006). Şeffaf ve iletken olması ITO yüzeyine homojen dağılmasından dolayı geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde çok tercih edilen bir malzemedir. Deneysel

çalışmalarda boyunca Heraeus-Clevios pH 500 PEDOT:PSS kullanıldı. Şekil 3.2’de PEDOT:PSS’in kimyasal yapısı gösterilmektedir.

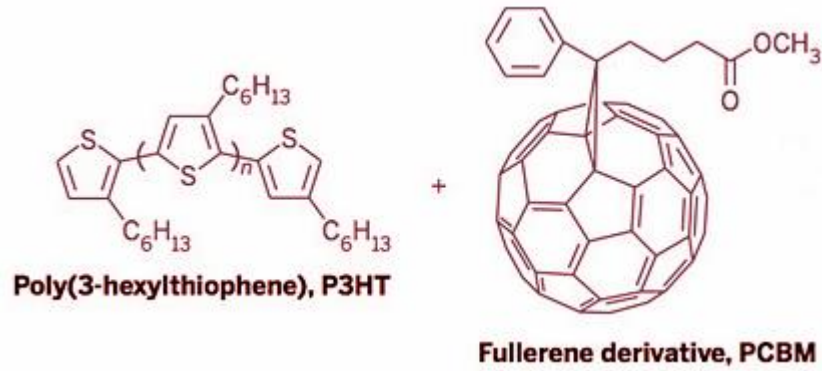


Şekil 3.2. PEDOT:PSS’in kimyasal yapısı

3.2.3. P3HT:PCBM

P3HT poly(3-hexylthiophene) iyi çözünürlüğü, kimyasal kararlılığı ve yüksek elektriksel iletkenlik özelliklerinden dolayı yaygın kullanım alanlarına sahiptir. 650 nm’lere kadar uzanan soğurma özelliğinden dolayı güneş spektrumuyla uyumludur ve bundan dolayı geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde en çok tercih edilen polimerlerden biridir. P3HT, Poli (3-hekziltiyofen), tiyofenin polimerizasyonu ile oluşmuştur. Yüksek mobilite özelliğine sahip P3HT geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde akseptör (p-tipi) malzeme olarak kullanılır. Üzerinde en çok çalışılan polimerlerden biri olup ve band aralığı yaklaşık olarak 2.1 eV’tur. P3HT, diğer polimerler gibi uygun çözücü içerisinde çözünme özelliğine sahip olup ve çeşitli kaplama yöntemleriyle geniş yüzeylere kaplanabilir. PC₆₁BM, [6,6]-fenil-C₆₁ bütirik asit metil ester ve bir fulleren türevi olup geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde donör (n-tipi) malzeme olarak kullanılmaktadır. P3HT ve PCBM’nin klorobenzen, diklorobenzen ve kloroform gibi organik çözücülerde çözünabilir olması cam ve plastik yüzeylere ince film olarak kaplanabilmesine sebep olur. P3HT ve PCBM

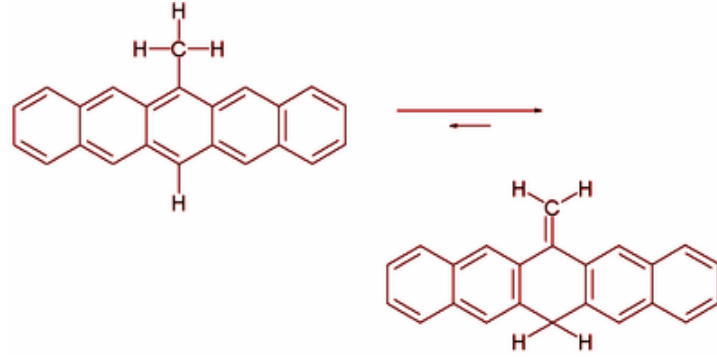
organik güneş pillerinde ayrı olarak kaplanabilmesinin yanı sıra birbirleriyle belli oranlarda karıştırılmasıyla da kaplanabilir. P3HT ve PCBM organik malzemelerin difüzyon uzunlukları kısa olduğundan üst üste kaplanma yerine belli oranlarda karıştırılarak çözelti olarak ve tek film halinde geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde kullanılabilir. Bu durumda yüklerin oluşumunu ve yük taşınımını kolaylaştırmıştır. P3HT:PCBM aktif tabakası farklı kırılma indisine sahip olan malzemeler arasında yer aldığından fotonlar herhangi bir tabakadan aktif tabakaya ulaşmadan yansiyabilir (Brabec *et al.* 2002). Bu tez çalışmasında kullanılan P3HT ve PCBM Sigma-Aldrich firmasından satın alındı. P3HT ve PCBM'in kimyasal yapısı Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. P3HT ve PCBM'nin kimyasal yapısı

3.2.4. Pentacene

Doğrusal olarak kaynaşmış beş benzen halkasından oluşan bir polisiklik aromatik hidrokarbona pentacene adı verilmektedir. Pentacene yüksek oranda konjuge bileşik olan organik bir yarıiletkenidir. Bu bileşik ultraviyole (UV) veya görünür ışığın emilmesi üzerine eksitonlar üretir; bu da onu oksidasyona karşı çok hassas hale getirir. Bu nedenle, mor bir toz olan bu bileşik, havaya ve ışığa maruz kaldığında yavaşça bozunur. Pentacene yapısal olarak bir önceki tetrasen (dört kaynaşık benzen halkası) ve bir sonraki heksasen (altı kaynaşık benzen halkası) olan lineer asenlerden biridir. Pentacene'nin kimyasal yapısı Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Pentacene organik malzemesinin kimyasal yapısı

3.3. Organik Güneş Pillerinin Hazırlanması ve Karakterizasyon Aşamaları

Organik güneş pillerinin hazırlanma ve karakterizasyon aşamaları ITO'ların temizlenmesi, PEDOT:PSS'in hazırlanması ve Pentacene, P3HT:PCBM ve P3HT:PCBM:Pentacene aktif tabaka malzemelerinin hazırlanmasını kapsamaktadır.

3.3.1. ITO'nun kimyasal temizlik aşamaları

Daha önceden belirtmiş olduğumuz özelliklere sahip ITO'lar satın alındı ve 1,25 x 1,25 mm² boyutlarında kesildi. Kesilen ITO'lar aşağıdaki kimyasal temizlik prosesine tabi tutuldu.

- 1.Aşama 50°C'de 15 dakika decon çözeltisinde ultrasonik yıkama,
- 2.Aşama 15 dakika deiyonize su (DI) ile ultrasonik yıkama,
- 3.Aşama N₂ (Azot) gazı ile kurutma,
- 4.Aşama 50°C'de 15 dakika aseton ile ultrasonik yıkama,
- 5.Aşama N₂ (Azot) gazı ile kurutma,
- 6.Aşama 50°C'de 15 dakika izopropanol ile ultrasonik yıkama,
- 7.Aşama Deiyonize su (DI) ile durulama,
- 8.Aşama 50°C'de 15 dakika deiyonize su (DI) ile ultrasonik yıkama,
- 9.Aşama N₂ (Azot) gazı ile kurutma.

3.3.2. PEDOT:PSS'in hazırlanması

Piyasadan satın alınan Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate) %1.1 H₂O, kısaca PEDOT:PSS 0,45 µm gözenekli PVDF (Polyvinylidene fluoride veya polyvinylidene difluoride) filtreden süzülerek kullanıma hazır hale getirildi.

3.3.3. P3HT:PCBM aktif tabaka malzemelerinin hazırlanması

P-tipi P3HT ve *n*-tipi PC₆₁BM organik malzemelerinin kloroform çözücüsü ile kütlece 1:0,8 oranında P3HT: PCBM aktif tabaka çözeltisi hazırlandı ve bu çözelti 12 saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra kullanıma hazır hale getirildi. Aktif tabaka yani P3HT:PCBM'in hazırlanması ile ilgili tüm aşamalar eldivenli kabin ünitesinde gerçekleştirildi.

3.3.4. Pentacene katkılı aktif tabaka olan P3HT:PCBM:Pentacene malzemelerinin hazırlanması

Daha önceden hazırlanmış P3HT:PCBM çözeltisi içerisine kloroform ile hazırlanmış Pentacene çözeltisi %0,5, %1 ve %1,5 oranında katkılanarak P3HT:PCBM:Pentacene çözeltisi elde edilmiştir. Bu çözelti 12 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra kullanıma hazır hale getirildi ve tüm aşamalar eldivenli kabin ünitesinde gerçekleştirildi.

1. Aşama: PEDOT:PSS Kaplanması

Temizlenen ITO yüzeyine öncelikle spin coater cihazı ile 4000 rpm de 45 s'de azot ortamında ITO yüzeyi hol taşıyıcı tabaka olan PEDOT:PSS ile kaplandı. Daha sonra numuneler 130°C'de 5 dakika boyunca sıcak tabla üzerinde tavlandı. PEDOT:PSS kaplama işlemi Laurell marka WS-650MZ-23NPPB model spin coater cihazı ile gerçekleştirildi.

2. Aşama: P3HT:PCBM ve P3HT:PCBM:Pentacene Kaplanması

PEDOT:PSS kaplanmış ITO'lar eldivenli kabin ünitesine aktarıldı. Daha sonra kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan kütlece 1:0,8 oranında hazırlanmış P3HT:PCBM ve %0,5, %1 ve %1,5 oranında pentacene katkılı P3HT:PCBM:Pentacene aktif tabakaları PEDOT:PSS kaplanmış ITO yüzeyine kaplandı. Elde edilen karışımlar P3HT:PCBM ve P3HT:PCBM:Pentacene çözeltisi ITO/PEDOT:PSS üzerine spin coater cihazı ile 900 rpm de 50 s'de kaplandı ve kaplama işlemi bittikten numuneler 110°C'de 5 dakika ısıtıcı tabla üzerinde tavlandı. Elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene numuneleri LiF ve metal kaplama işlemleri için termal buharlaştırma ünitesine aktarıldı.

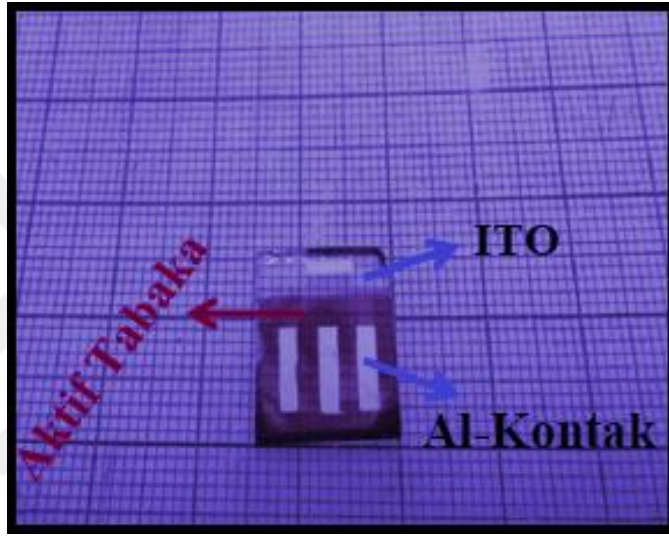
3. Aşama: LiF Kaplama

Eldivenli kabin içerisinde bulunan termal buharlaştırma ünitesine aktarılan numunelerin kaplama işlemi 1×10^{-7} Torr basınç ve 1 Å/s oranındaki değerlerde gerçekleşmiştir. Elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene yapılarına bu şartlar altında 2 nm kalınlığında LiF kaplanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF yapıları elde edildi.

4. Aşama: Al Metal Kaplama

Son aşama olarak; eldivenli kabin içerisinde bulunan referans ve LiF kaplanmış olan yapılara termal buharlaştırma ünitesinde aynı şartlara altında 1×10^{-7} Torr basınç ve 1 Å/s oranındaki değerlerde 100 nm kalınlığındaki Al metali kaplandı. Bu kaplama işlemleri bittikten sonra referans olarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al yapısı ve P3HT:PCBM aktif tabakasına %1 oranında Pentacene katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al yapıları elde edildi. Daha sonra aynı şartlar altında ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF ve %0,5, %1 ve %1,5 oranında Pentacene ihtiva eden ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF yapılarına 100nm

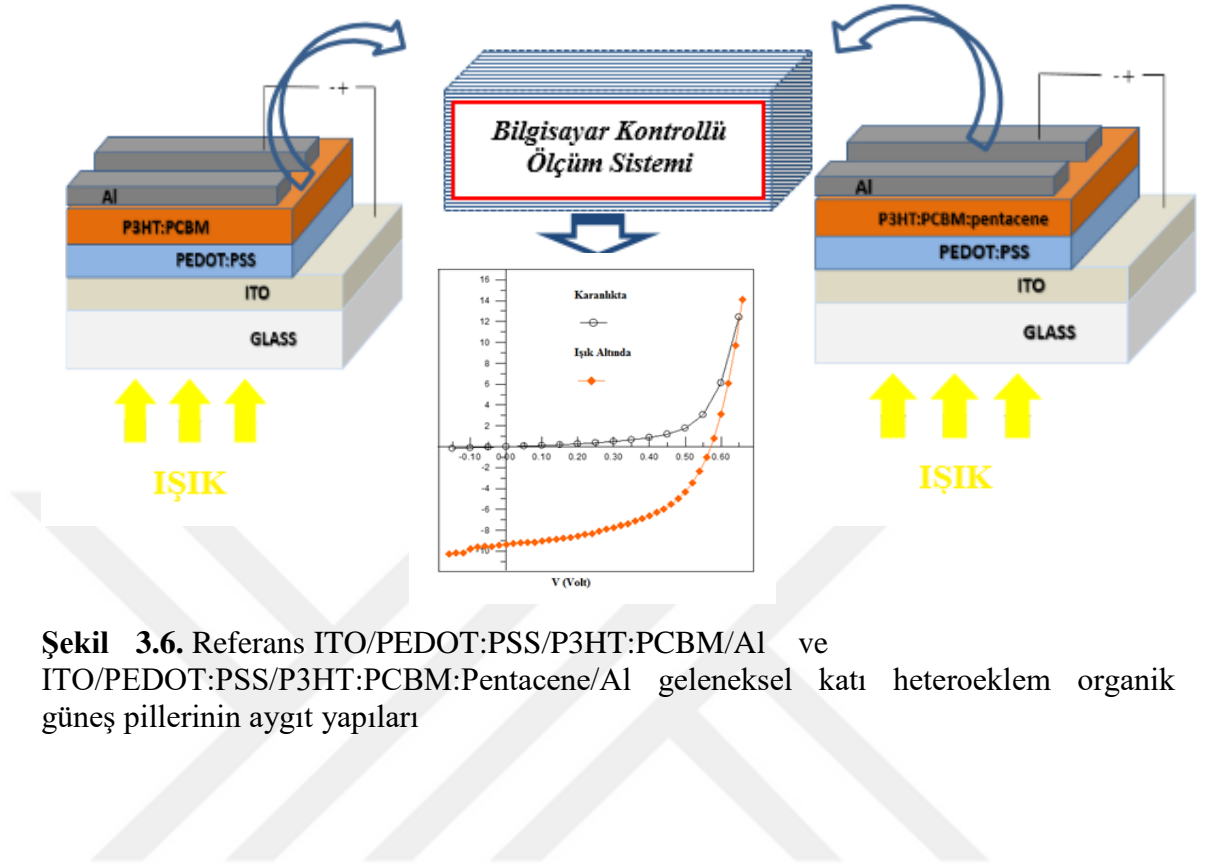
kalınlığında Al metali kaplanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al yapıları elde edildi. Termal buharlaştırma uygulamaları için NANOVAK marka eldivenli kabin (Glove Box) Adapted Coating System model termal buharlaştırma ünitesi kullanıldı. Şekil 3.5’de ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin görüntüsü

3.4. Organik Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyonu

Üretilen organik güneş pillerinin akım J-V (akım yoğunluğu-voltaj) ölçümleri eldivenli kabin ünitesinde karanlık ortamda ve 100 mWcm^{-2} ışık altında alındı. Elde edilen organik güneş pillerinin J-V (akım yoğunluğu-voltaj) ölçümleri kabine bağlanmış bilgisayar programı ile kontrol edilen KEITHLEY 4200 ölçüm cihazı ve Sciencetec marka yapay güneş ışığı cihazı yardımıyla yapıldı. Yapılan organik güneş pillerinin açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), dolun faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi J-V ölçüm parametreleri sayesinde hesaplandı.



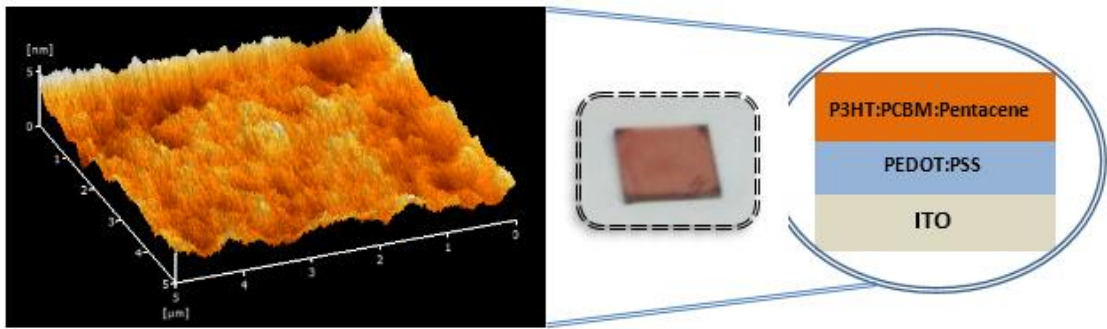
Şekil 3.6. Referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin aygıt yapıları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde birinci referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili, P3HT:PCBM aktif tabakasına %1 oranında pentacene malzemesi katkılanarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al, birinci referansta aktif tabaka ile metal arasında LiF kaplanarak hazırlanan ikinci referans olarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al ve aktif tabakaya %0,5, %1 ve %1,5 oranında Pentacene katkılanarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al organik güneş pillerinin J-V (Akım yoğunluğu-Voltaj) ölçümlerinden elde edilen kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), dolun faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (PCE) parametreleri yer almaktadır. Ayrıca P3HT:PCBM:Pentacene ince filminin AFM ve soğurma ölçümlerine de bu bölümde yer verilmiştir.

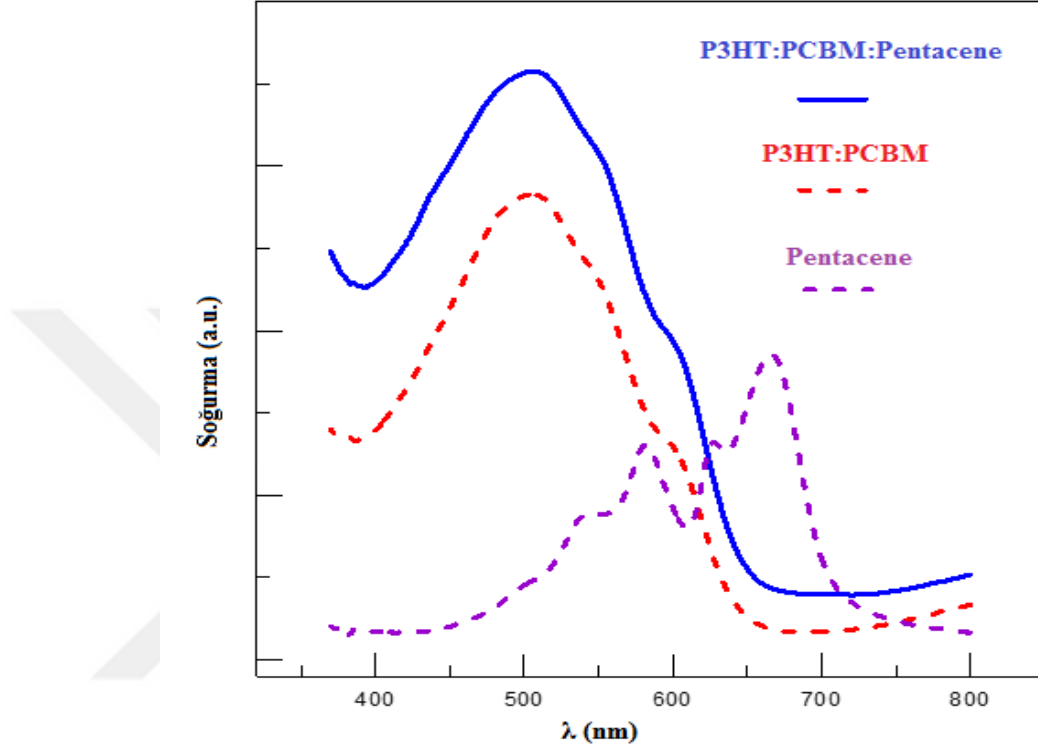
4.2. Aktif Tabaka Filminin AFM Görüntüsü ve Soğurma Spektrumları



Şekil 4.1. P3HT:PCBM:Pentacene ince filminin AFM görüntüsü

Şekil 4.1’de film morfolojisi için P3HT:PCBM:Pentacene aktif tabakanın AFM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.1 PEDOT:PSS yüzeyi üzerine kaplanmış P3HT:PCBM:Pentacene için AFM kılavuz çekme modu yükseklik görüntülerini

göstermektedir. P3HT:PCBM:Pentacene aktif tabakasının filmin yüzeyi üzerine homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.2. P3HT:PCBM:Pentacene, P3HT:PCBM ve pentacene ince filmlerinin soğurma spektrumları

Şekil 4.2’de P3HT:PCBM, pentacene ve P3HT:PCBM:Pentacene ince filmlerinin soğurma spektrumları verilmiştir. Organik güneş pili yapısında kullanılan P3HT:PCBM:Pentacene, P3HT:PCBM ve Pentacene malzemesi ayrı ayrı cam yüzeyine kaplanarak soğurma ölçümleri alındı. Tüm ölçümler laboratuvar şartlarında, 350 nm ile 800 nm dalga boyu arasında gerçekleştirildi. Pentacene’nin katkılanmasının 450 nm ile 650 nm dalga boyu aralığında aktif tabakanın soğurma şiddetini yanı sıra soğurma aralığını artırmada etkili olduğu görülmektedir (Zhu *et al.* 2010). Katkılamadan önce P3HT:PCBM malzemesinin maksimum soğurma pikini 514,8 nm de olduğu ve aktif tabakaya pentacene katkılancığında bu pik 518 nm’ye kaydığı görülmektedir. Bunun yanı sıra katkılamadan sonra P3HT:PCBM:Pentacene filminin soğurma dalga boyu aralığının arttığı Şekil 4.2’de açıkça görülmektedir.

4.3. P3HT:PCBM Tabanlı Organik Güneş Pillerinin J-V (Akım Yoğunluğu-Voltaj) Ölçümleri

Bu tez çalışmasında P3HT:PCBM aktif tabakası kullanılarak farklı mimaride ve özellikte katı heteroeklem organik güneş pilleri yapıldı. Daha sonra elde edilen güneş pillerinin karanlık ve 100 mW/cm² ışık altında *J-V* (akım yoğunluğu– voltaj) ölçümleri eldivenli kabin içerisinde alındı. Işık altında alınan *J-V* ölçümlerinden elde edilen grafikler kullanılarak temel güneş pili parametreleri olan kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}), açık devre gerilimi (V_{OC}), dolun faktörü (FF - Fill Factor) ve maksimum güç dönüşüm verimi (η - PCE) hesaplandı. Bir güneş pilinin ışık altında ve açık devre koşullarında ölçülen maksimum kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} ve ölçülen maksimum açık devre voltajı V_{oc} olarak adlandırılmaktadır. Bu yüzden güneş pili hücrelerinin maksimum güç noktası maksimum kısa devre akım yoğunluğunun (J_{MP}) ve maksimum açık devre voltajının (V_{MP}) çarpımı ile belirlenir. Dolun faktörü (FF), maksimum gerilim ile maksimum akım yoğunluğunun çarpımı ve açık devre voltajı ile kısa devre akım yoğunluğunun çarpımına oranı ile hesaplanmaktadır.

Dolun faktörü ve güç dönüşüm veriminin hesaplanmasında akım (I) yerine akım yoğunluğu (J) kullanılır. Dolayısıyla *I-V* (akım-voltaj) ölçümlerinden elde edilen veriler *J-V* (akım yoğunluğu-voltaj) formuna dönüştürüldü ve hesaplamalar *J-V* verileri dikkate alınarak yapıldı. Akım yoğunluğu birim alan başına düşen akım değeridir. Bu değer aygıtın çektiği akım değerinin aygıtın yüzey alanına bölünmesi ile elde edilir. Deneysel çalışmalarda akım yoğunluğu (J), cm² başına mA olarak ifade edildi (mA/cm²).

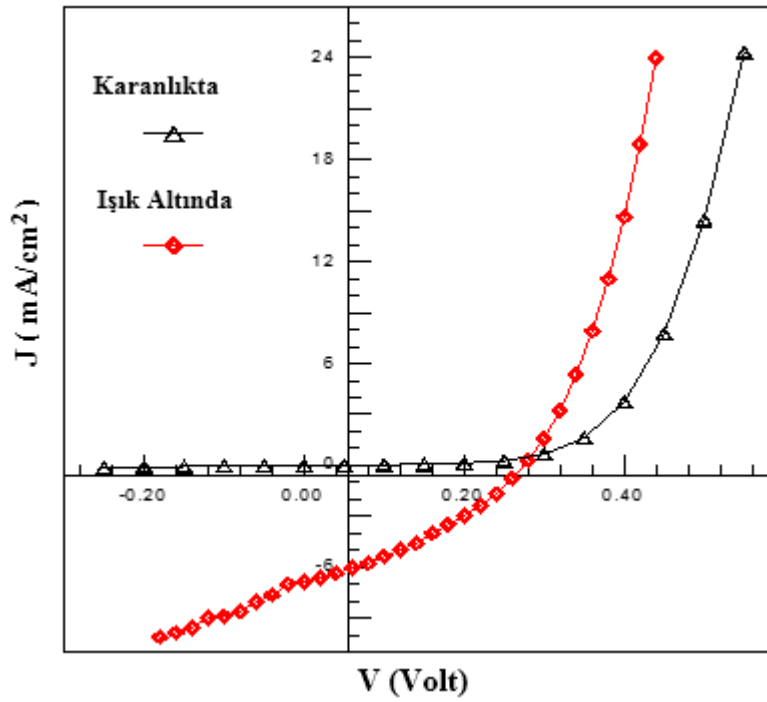
$$FF = \frac{J_{MP} \cdot V_{MP}}{J_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (4.1)$$

olarak düzenlenebilir. Bu ifadeye göre aygıtın güç dönüşüm verimi (η)

$$\eta = \% \frac{P_{\text{Çıkan}}}{P_{\text{Giren}}} \quad (4.2)$$

$$\eta = \% \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{\text{Giren}}} \times 100 \quad (4.3)$$

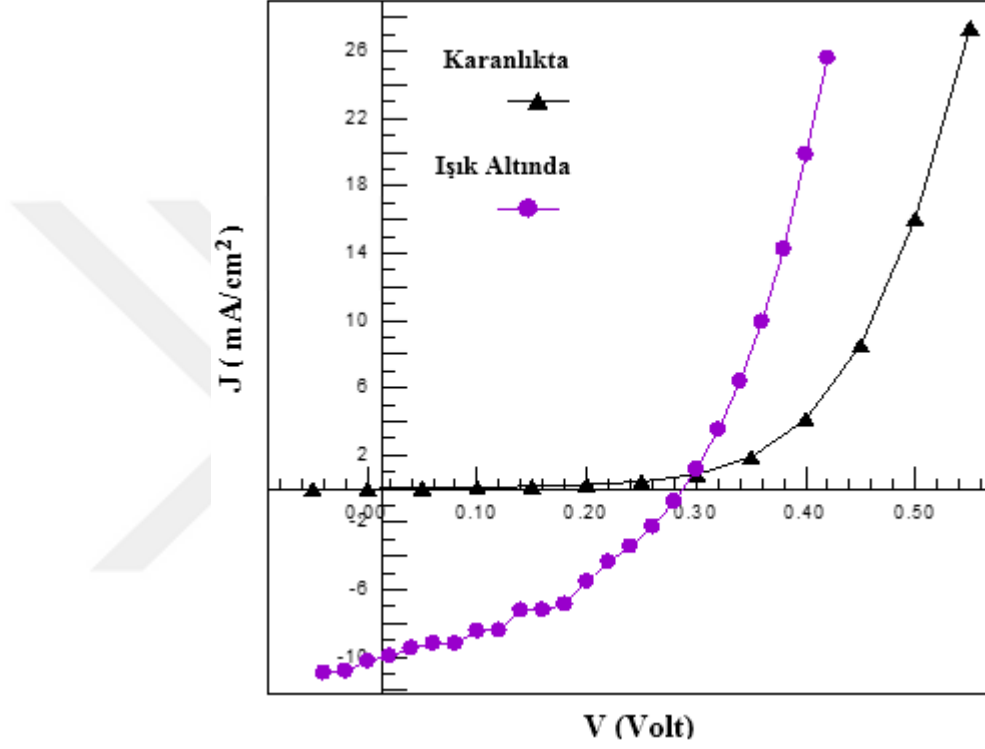
şeklinde hesaplanır (Kymakis *et al.* 2008). Deneysel çalışmalarda üretilen aygıtların yüzey alanı 0,08 cm² dir. Giriş gücü ise AM 1.5 şartlarında 100 mW/cm² dir. Fill faktörü % olarak verilebilir.



Şekil 4.3. Referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri

Şekil 4.3’de referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlık ve ışık altında akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafiği verilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki J-V ölçümleri - 0,5 V ile +1 V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alınmıştır. kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}) 6,18 mA/cm², açık

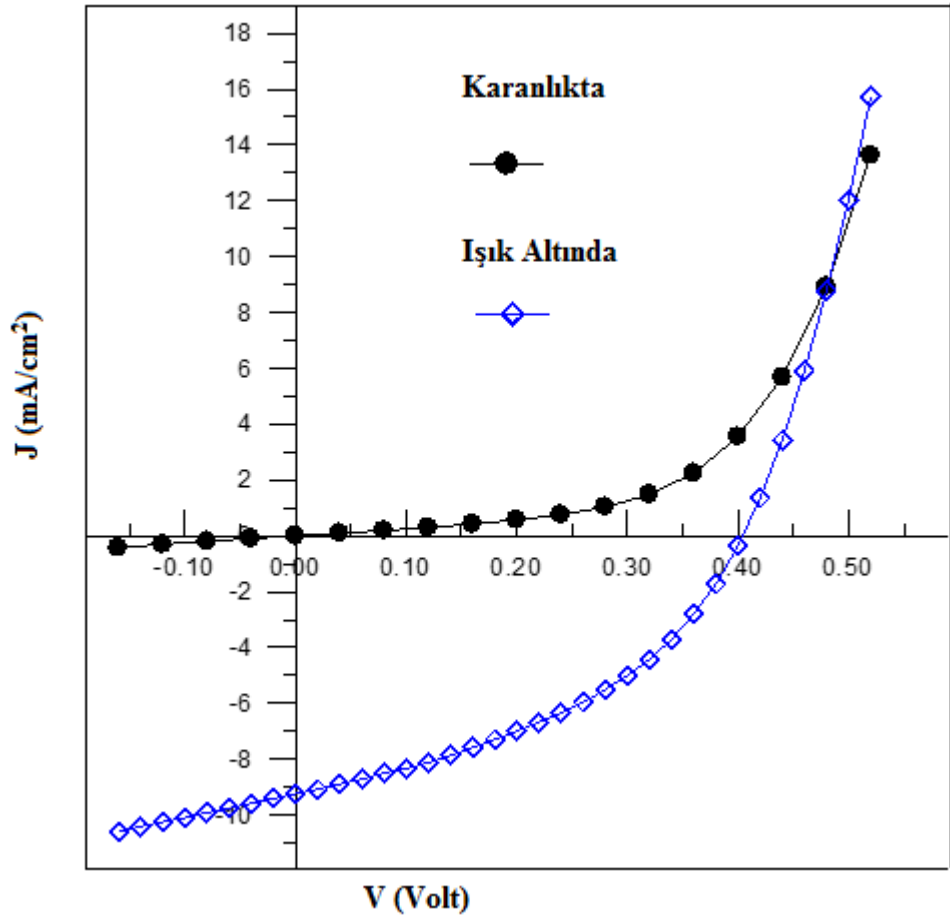
devre voltajı (V_{oc}) 0,26 V ve dolun faktörü (FF) %36 olarak tespit edilmiştir. (4.3) eşitliği kullanılarak organik güneş pilinin güç dönüşüm verimi (η) %0,64 olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre elde edilen aygıtın ışık altında fotovoltaiik özelliklere sahip olduğu açıktır.



Şekil 4.4. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J - V) grafikleri

Şekil 4.4'de kloroform çözücü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %1 oranında pentacene malzemesi katılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin akım yoğunluğu - voltaj (J - V) grafiği verilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki J - V ölçümü -0,5 V ile +1V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alınmıştır. P3HT:PCBM'e pentacene katılması soğurma ölçümlerini değiştirdiği gibi aygıtın J - V karakteristiğini de değiştirmiştir. Şöyle ki P3HT:PCBM fotoaktif tabakasına pentacene katılması ile aygıtın güç dönüşüm verimi artmıştır. Katılama sonrasında referans aygıtı göre akım yoğunluğu 6,18 mA/cm²'den 9,10 mA/cm²'a, dolun faktörü %36'dan

%44'e çıkmıştır. Sonuç olarak P3HT:PCBM'e %1 oranında pentacene katkılanması ile elde edilen güneş pilinin güç dönüşüm verimi %0,64'ten %1,24'e çıkmıştır. Bu verilere göre elde edilen aygıtın ışık altında fotovoltaik özelliklere sahip olduğu, katkı metaryelinin aygıt karakteristiğinde etkili olduğu ve göç dönüşüm verimini değiştirebileceği anlaşılmaktadır.

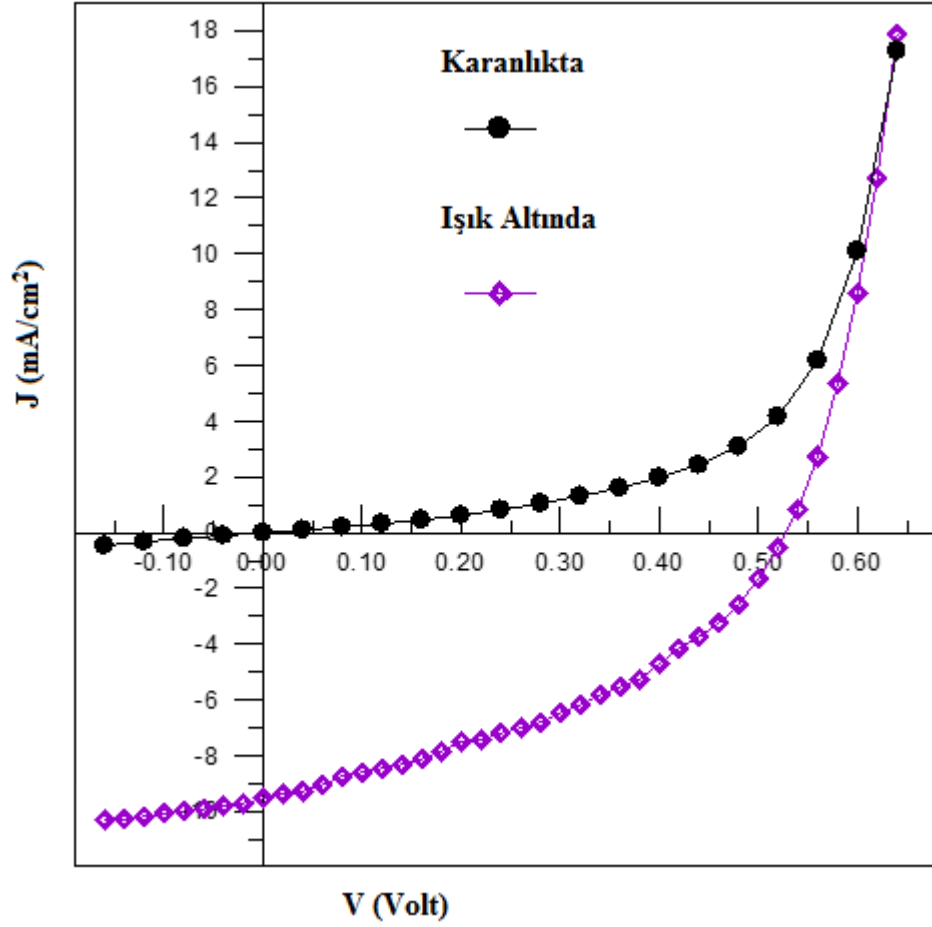


Şekil 4.5. İkinci referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri

Organik güneş pili yapısında rekombine olan elektronların taşıyıcılara yüksek verimde aktarılması aygıtın güç dönüşüm veriminin artmasında etkilidir. Bu bakımdan yapılan çalışmalarda aktif tabaka ile metal arasına kaplanan ince LiF veya Ca tabakası elektron ve hol enjeksiyonunun yüksek verimlilikte gerçekleşmesi sağlayarak güneş pilinin güç dönüşüm veriminin artmasında etkili olduğu görülmüştür (Kim *et al.* 2013; Hsu *et al.*

2014). Şekil 4.5’de P3HT:PCBM aktif tabakasından elde edilen ikinci referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin karanlık ve ışık altında akım yoğunluğu-voltaj (J - V) grafikleri verilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki J - V ölçümleri -0,5 V ile +1 V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alınmıştır. Elde edilen aygıtın kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 9,5 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,40 V, doluluk faktörü (FF) %41 ve güç dönüşüm verimi (η) %1,55 olarak tespit edilmiştir. Aktif tabaka ile metal arasına 2 nm LiF tabakasının varlığı yeni aygıtın karakteristik parametreleri olumlu bir şekilde değiştirmiştir. Sonuçlar incelendiğinde LiF tabakasının kaplanması ile elde edilen güneş pilinin referans aygıtı göre akım yoğunluğu 6,18 mA/cm²’den 9,5 mA/cm²’a buna karşılık güç dönüşüm verimi %0,64’ten %1,24’e çıkmıştır.

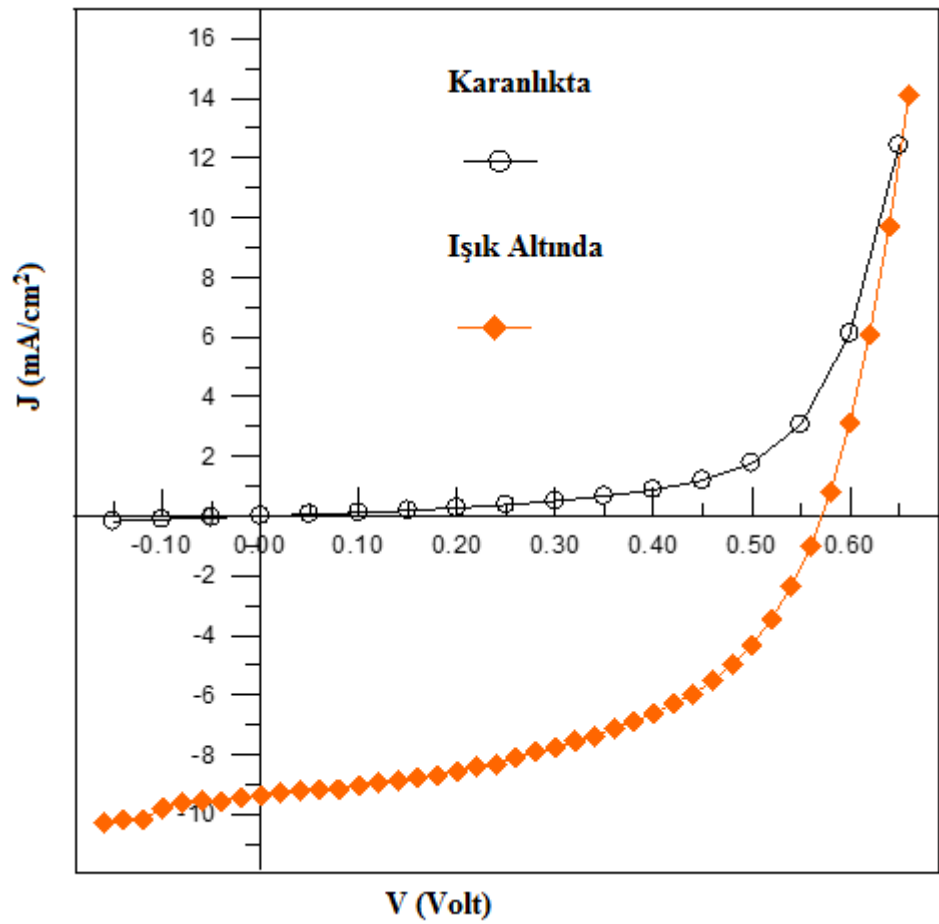
Yukarıdaki sonuçlardan P3HT:PCBM tabanlı organik güneş pili yapısında LiF tabakasının varlığı ve aktif tabakaya dışarıdan malzeme katkılamanın aygıtın güç dönüşüm verimini arttırdığı açıktır. Aktif tabakaya çeşitli özellikte malzemelerin farklı oranlarda katkılanması güç dönüşüm verimine etkisi bilinmektedir (Gonzalez *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2017). Bu bakımdan P3HT:PCBM’e %0,5, %1, ve %1,5 oranında pentacene katkılanarak katkılama oranının aygıt parametreleri üzerindeki etkisi incelendi. Şekil 4.6’da P3HT:PCBM’e %0,5 ve Şekil 4.7’de %1 pentacene katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J - V) grafiği gösterilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki J - V ölçümü - 0,5 V ile +1V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alınmıştır.



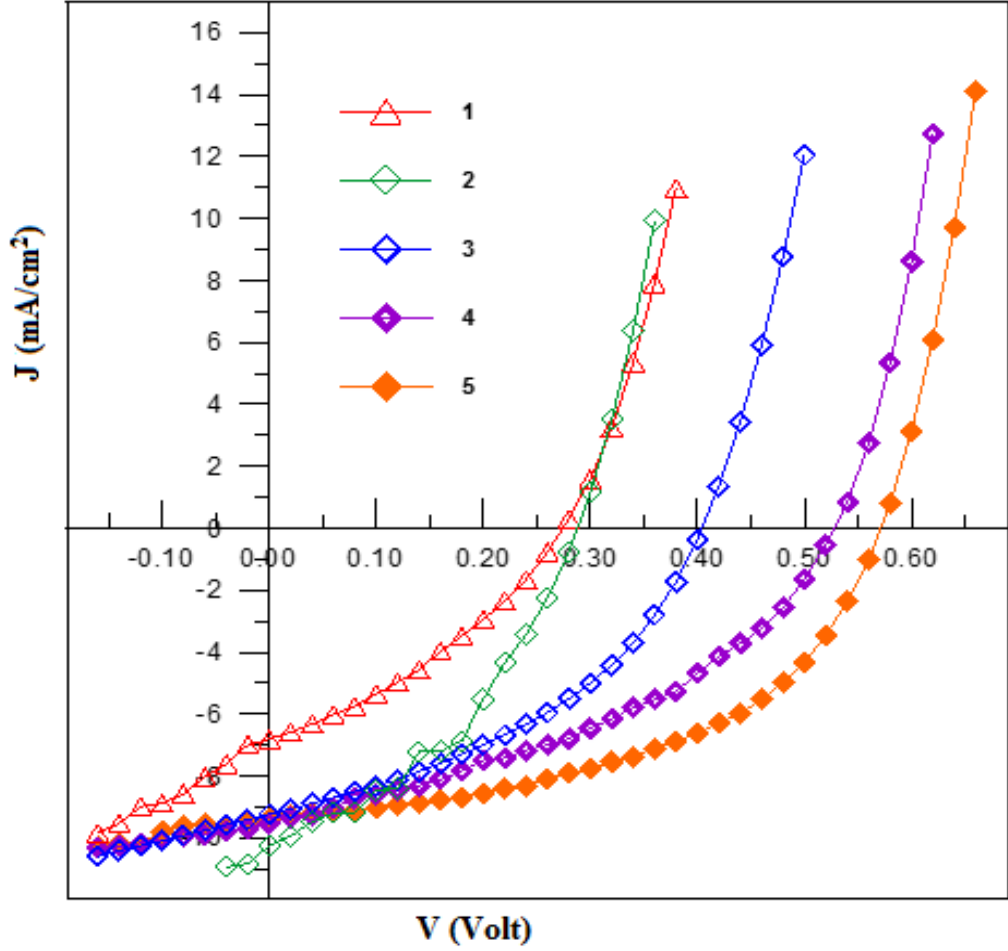
Şekil 4.6. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene (%0,5)/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin karanlıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri

Pentacene katkılanmasının organik güneş pillerinin karakteristik parametrelerinde gösterdiği değişim Çizelge 4.1’de verilmiştir. P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda katkılanan pentacene malzemesi her bir oran için ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:pentacene/LiF/Al organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimini değiştirmiştir. P3HT:PCBM’e %0,5 oranında pentacene katkılıandığında güneş pilinin güç dönüşüm verimi katkısız’a göre %1,55’ten %2,00’a çıkmıştır. Katkılama oranı %1’e çıkarıldığında katkı malzemesinin etkisiyle daha geniş spektrumda soğurmaların gerçekleştiği, aygıtın açık devre voltajı (V_{OC}), kısa devre akım yoğunluğunu (J_{SC}) ve dolayısıyla güç dönüşüm verimi (η) artarak %1,55’ten %2,65’e çıkmıştır. Aktif tabakaya %1,5 oranında pentacene katkılıandığında kısa devre akım

yoğunluğu (J_{SC}) $6,1(\text{mA}/\text{cm}^2)$ 'e ve güç dönüşüm verimi (η) %0,84'e düşmüştür. %1,5 oranındaki katkılamadan sonra aygıtın güç dönüşüm verimi azalmıştır. Bu durum güneş pillerinde organik aktif tabakaya malzemesine yüksek oranda dışarıdan malzeme katkılıandığında, katkı malzemesinin organik yapıya olumsuz etki sağladığı ve yapıda yüksek direncin oluşmasına sebep olduğunu dolayısıyla güç dönüşüm veriminin azalmasına etkili olduğunu göstermektedir (Zhang *et al.* 2011).



Şekil 4.7. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene(%1)/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pilinin kararılıkta ve ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri



Şekil 4.8. Geleneksel katiheteroeklem organik güneş pillerinin ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri

- (1) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al,
- (2) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene (%1)/Al,
- (3) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al,
- (4) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene (%0,5)/LiF/Al ve
- (5) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene (%1)/LiF/Al

Şekil 4.8'de farklı özellikteki geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin ışık altındaki akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri verilmiştir. Elde edilen bu verilere göre aygıt mimarisinde yapılan değişiklikler ile P3HT:PCBM tabanlı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene(%1)/LiF/Al organik güneş pili yapısının ayrıntıları yukarıda belirtilen diğer aygıtlarına ışık altında çok iyi bir fotovoltaik özellik gösterdiği ve yüksek verimler elde edilebileceği sonucuna varılabilir.

Çizelge 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin temel aygıt parametreleri

Aygıt Yapısı	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	6.8	0.26	36	0.64
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al (% 1)	9.1	0.31	44	1.24
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al	9.5	0.40	41	1.55
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al (%0,5)	9.6	0.52	40	2.00
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al (% 1)	9.6	0.56	50	2.65
ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al (%1,5)	6.1	0.46	30	0,84

Özetle Çizelge 4.1’de farklı özellikteki geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin temel parametreleri verilmiştir. Klasik mimaride ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al heteroeklem güneş pili’nin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 6,8 (mA/cm²), açık devre voltajı (V_{oc}) 0,26 V, dolum faktörü (FF) %36 ve güç dönüşüm verimi (η) %0,64 olarak hesaplanmıştır. Aynı mimaride aktif tabakaya kütlece %1 oranında pentacene katkılanması ile ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al heteroeklem güneş pili’nin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 9,1 (mA/cm²), açık devre voltajı (V_{oc}) 0,31 V, dolum faktörü (FF) %44 ve güç dönüşüm verimi (η) %1,24 olarak hesaplanmıştır. Klasik yapıda metalden önce ince LiF tabakasının kaplanması ile elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al heteroeklem aygıtının kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 9,5 (mA/cm²), açık devre voltajı (V_{oc}) 0,40 V, dolum faktörü (FF) %41 ve güç dönüşüm verimi (η) %1,55 olarak hesaplanmıştır. Aygıt yapısında LiF ile beraber aktif tabakaya %0,5 oranında pentacene katkılanması ile elde edilmiş ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al organik güneş pili’nin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 9,6 (mA/cm²), açık devre voltajı (V_{oc}) 0,52V, dolum faktörü (FF) %40 ve güç dönüşüm verimi artarak (η) %2,00 olarak hesaplanmıştır. Pentacene katkılama

oranı %1 olarak değiştirilmediğinde elde edilen güneş pili'nin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 9,6 (mA/cm²), açık devre voltajı (V_{oc}) 0,56 V, dolun faktörü (FF) %50 ve güç dönüşüm verimi (η) %32 oranında artarak %2,65 olarak hesaplanmıştır. Buna karşın P3HT:PCBM'e katılan pentacene oranı %1,5'a çıkarıldığında ve daha büyük oranlarda aktif tabakaya katılama yapılması aygıt yapısını olumsuz etkilemiş ve aygıtın güç dönüşüm verimi azalmıştır.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinde kullanılan P3HT:PCBM aktif tabakası ve pentacene malzemesi kloroform çözücüsünde hazırlandı. Kloroform çözücüsüyle ile kütlece 1:0,8 oranında P3HT:PCBM aktif tabaka çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan bu aktif tabaka çözeltisi ile ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al referans geleneksel organik güneş pili yapısı elde edildi ve J-V (Akım Yoğunluğu–Voltaj) ölçümleri ile güç dönüşüm verimi hesaplandı. Daha sonra kloroform çözücüsüyle 1:0,8 oranında hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakaya %1 oranında Pentacene malzemesi katkılı ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili yapısı elde edildi. Elde edilen bu geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili yapısının J-V (Akım Yoğunluğu–Voltaj) ölçümleri ile güç dönüşüm verimi hesaplandı ve pentacene'nin aygıt verimine etkisi gözlemlendi. Sonraki aşamada referans pilimizde aktif tabaka ve metal yüzeyi arasında 2nm kalınlığında LiF kaplanarak ikinci bir referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili yapısı elde edildi. Elde edilen aygıt yapısında P3HT:PCBM aktif tabaka içerisine %0,5, %1 ve %1,5 oranında pentacene katkılanarak P3HT:PCBM:Pentacene aktif tabaka elde edildi ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Pentacene/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili yapısının fabrikasyonu gerçekleştirildi. Elde edilen bu geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili yapısının J-V (Akım Yoğunluğu–Voltaj) ölçümleri ile güç dönüşüm verimleri hesaplandı ve katkılama oranının aygıt verimine katkısı gözlemlendi.

Geleneksel katı heteroeklem organik güneş pillerinin fabrikasyonunda öncelikle ITO'nun kimyasal temizliği yapıldı. Organik güneş pillerinde hol taşıyıcı tabaka olarak kullanılan PEDOT:PSS malzemesi endüstriyel olarak satın alındı ve 0,45 µm gözenekli PVDF filtresi filtrelendi. Kimyasal temizliği yapılan ITO yüzeyine spin coater (döner kaplama) yöntemi ile 4000 rpm'de ve 45 saniyede PEDOT:PSS kaplandı ve PEDOT:PSS kaplı ITO'lar sıcak tabla üzerinde 130°C'de 5 dakika boyunca tavlandı. Daha sonra PEDOT:PSS kaplı numune eldivenli kabin ünitesine aktarıldı. Hazırlanan

1:0,8 oranında P3HT:PCBM aktif tabaka çözeltisi ve %0,5, %1 ve %1,5 oranında pentacene katkılı P3HT:PCBM:pentacene aktif tabaka PEDOT:PSS kaplı ITO'ların üzerine 900 rpm'de 50 saniyede spin coater (döner kaplama) cihazı ile eldivenli kabin içerisinde kaplandı ve hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM ve pentacene katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Pentacene heteroeklem yapıları sıcak tabla üzerinde 110°C'de 5 dakika boyunca tavlandı. Daha sonra bu heteroeklemler 1×10^{-6} Torr basınç altında 1 Å/s oranında öncelikle 2nm kalınlığında LiF sonrasında 100 nm kalınlığındaki Al metali kaplanarak birinci referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Pentacene/Al, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al ikinci referans ve %0,5, %1 ve %1,5 oranında pentacene katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Pentacene/LiF/Al geleneksel katı heteroeklem organik güneş pili yapıları elde edildi. Elde edilen katı heteroeklem organik güneş pillerinin 100 mW/cm⁻² ışık altında J-V (Akım yoğunluğu-Voltaj) ölçümleri alındı ve güneş pili parametreleri belirlendi.

Karanlık ve ışık altındaki J-V ölçümleri -0,5 V ile +1 V aralığında 0,02 voltluk adımlar ile alındı. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al referans organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) 6,8 J(mA/cm²), açık devre voltajı (V_{OC}) 0,26 V, dolun faktörü (FF) %36 ve güç dönüşüm verimi (η) %0,64 olarak hesaplandı. Bunun yanısıra P3HT:PCBM aktif tabakasına %1 oranında pentacene katkılanmış organik güneş pilinin temel parametreleri önceki aygıt yapısına göre değişmiştir. Pentacene katkılandıktan sonra aygıtın kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) 9,1 mA/cm², açık devre voltajı (V_{OC}) 0,31 V, dolun faktörü (FF) %44 ve bu değerlere bağlı olarak güç dönüşüm verimi (η) %1,24 olarak hesaplandı. Daha sonra aktif tabak ile metal yüzeyi arasına kaplanan LiF ile ikinci referans organik güneş pilinin temel parametrelerinde iyileşmeler gözlemlendi. LiF katmanının elektronları Al metaline taşıma özelliği sebebiyle LiF/Al eklemine sahip aygıtın kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) 6,8 J(mA/cm²)'den 9,5 J(mA/cm²)'ye yükselmiştir. Buna karşın aynı aygıtın açık devre voltajı (V_{OC}) 0,40 V, dolun faktörü (FF) %41 ve güç dönüşüm verimi (η) %1,55 olarak hesaplandı. Katkılama oranına bağlı olarak aygıtların davranışını belirlemek için P3HT:PCBM: Pentacene aktif tabakalı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Pentacene/LiF/Al aygıt yapısına farklı oranlarda

pentacene katkılıdır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde %0,5 oranında pentacene katkılı organik güneş pilinin güç dönüşüm verimi (η) %2,00 iken %1 oranında pentacene katkılı olduğunda aygıt parametrelerinde iyileşmeler gözlenerek organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) 9,6 J(mA/cm²), açık devre voltajı (V_{OC}) 0,56V, doluluk faktörü (FF) %50 ve buna karşılık güç dönüşüm verimi artarak (η) %2,65 olarak hesaplandı. Katkılama oranı %1,5'e çıkarıldığında aygıt karakteristiğinde bozulmalar görüldü ve güç dönüşüm verimi %0,84'e düşmüştür.

Sonuç olarak Pentacene organik malzemesinin aygıt yapısında bulunması aygıtın karakteristik parametrelerini pozitif olarak değiştirmiştir ve P3HT:PCBM aktif tabakasındaki pentacene organik malzemesi güç dönüşüm verimini 0,64'ten 1,24'e yükseltmiştir. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.8'de de görüldüğü gibi Pentacene malzemesinin P3HT:PCBM aktif tabakasına katılması geleneksel katı heteroeklem güneş pillerinin soğurma şiddetini ve dahi güç dönüşüm verimini arttırdığı görülmüştür. Güç dönüşüm verimliliğindeki bu artış pentacene malzemesinin aktif tabakanın soğurma aralığını ve şiddetini arttırdığı, taşıyıcı konsantrasyonunu ve iletkenliği arttırdığı sonucuna ile açıklanabilir. Katkı malzemeleri, taşıyıcının aktif katman ve metal elektrot arasında taşınmasını kolaylaştırırken, uyarma süresini, difüzyon uzunluğunu ve eksiton popülasyonunu ve soğurma bant aralığını artırarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimini arttırmak için bir çözüm olabilir. Nitekim son yıllarda hem yeni aktif tabaka malzemelerinin kullanımı hem de nanoparçacık malzemelerinin aktif tabaka malzemesi ile birlikte kullanımı organik güneş hücrelerinin sorunlarına çözüm getirmiş ve organik güneş pillerinin verimini arttırmıştır. Bu çalışmada da aktif tabakaya dışarıdan malzeme katılarak organik güneş pili verimini %0,64'ten %1,55'e arttırdığı gözlenmiştir. Son aşamada aygıt mimarisinde yapılan iyileştirme ile de %0,5 ve %1 oranında pentacene katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Pentacene/LiF/Al organik güneş pili yapısının güç dönüşüm veriminin %2'den %2,65'e çıktığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Amarasinghe, D., 2008. I. D. W.R. W. Appl. Phys. Lett. 083305/1.
- Aydoğan, Ş., 2015. Katıhal Elektronığı. Nobel Yayınları, 978-605-320-345-2.
- Batman, A., “Elektrik Üretimi İçin Güneş Pillerinin Kullanımında Verimi Arttırıcı Yeni Bir Yöntem”, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001), 104 .
- Beak, W.H., Yoon, T.S., Lee, H.H., Kim, Y.S., 2010. Composition-dependent phase separation of P3HT:PCBM composites for high performance organic solar cells. *Organic Electronics*, 11 (2010) 933–937.
- Bedeloğlu A., Demir A., Bozkurt Y., “Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller”, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 2, (2010), 43.
- Benanti , T.L. and Venkataraman , D., 2006, *Organic solar cells: An overview focusing on active layer morphology. Photosynthesis Research*, 87 (2006), 73-81.
- Brabec, C.J., Cravino, A., Meissner, D., Sariciftci, N.S., Rispens, M.T., Sanchez, L., Hummelen, J.C., ve Fromherz, T., 2002. The influence of materials work function on the open circuit voltage of plastic solar cell . *Thin Solid Films*, 368(2002), 403-404.
- Chapin D. M., Fuller , C. S., and Pearson,G. L., 1954. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *American Institute of Physics*, 25(1954); doi: 10.1063/1.1721711.
- Çolak İ., Bayındır R., Demirtaş M., “Türkiye’nin Enerji Geleceği”, *Tübav Bilim Dergisi*, 1, 2, 2008, 36
- Engin R., Güneş Pilleri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları No:3, 1995, 151
- Facchetti , A., 2011. π - Conjugated Polymers for Organic Electronics and Photovoltaic Cell Applications. *Chemistry of Materials* , 4(2011), 733–758.
- Farchioni, R., 2001. *Conjugated Polymers and Low Molecular Weight Organic Solids. Organic Electronic Materials*, Berlin.
- Gollu, S. R., Sharma, R., Srinivas, G., Kundu, S., Gupta , D., 2016. Incorporation of silver and gold nanostructures for performance improvement in P3HT:PCBM inverted solar cell with rGO/ZnO nanocomposite as an electron transport layer. *Organic Electronics* 29 (2016) 79-87.
- Gregg, B.A., Hanna , M.C., 2003. Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics*, 93(2003), 3605-3614.
- Hsu, F.H., Wang, N.F., Tsai, Y.Z., Wu , C.Y. , Cheng , Y.S., Chien, M.H., Houg, M.P., 2014. Enhanced carrier collection in p-Ni_{1-x}O:Li/n-Si heterojunction solar cells using LiF/Al electrodes. *Thin Solid Films* 573 (2014) 159–163.
- Ikram, M., Murray, R., Hussain, A., Ali, S., Shah, I.S., 2014. Hybrid organic solar cells using both ZnO and PCBM as electron acceptor materials. *Materials Science and Engineering B* 189 (2014) 64–69.
- İnan, D. ve Ültanır, Ö. (1996). Güneş Enerjisi. Diyarbakır; Dicle Üniversitesi Basımevi.
- Kietzke, T., 2007. Recent Advances in Organic Solar Cells. *Advan. In Opto Electron.*, 12(2007) , 1-15.

- Kymakis, E., Kornilios, K., and Koudoumas, E., 2008. Carbon nanotube doping of P3HT:PCBM photovoltaic devices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 (2008) 165110 (5pp).
- Kim, S., Lee, J., Dao, V. A., Lee, S., Balaji, N., Ahn, S., Hussain, S. Q., Han, S., Jung, J., Jang, J., Lee, Y., Yi, J., 2013. Effects of LiF/Al back electrode on the amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells. *Materials Science and Engineering B*, 178 (2013) 660–664.
- Köse, S., “Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1986), 78
- Kroon, J.M., Veenstra, S.C., Sloof, L.H., Verhees, W.J.H., Koetse, M.M., Sweelssen, J., Schoo, H.F.M., Beek, W.J. E., Wienk, M.M., Janssen, R.A.J., Yang, X., Loos, J., Mihailetcu, V.D., Blom, P.W.M., Knol, J., Hummelen, J.C., 2007 . Nanocrystalline dye-sensitized solar cells having maximum performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15, 1-8.
- Küpeli, A.Ö., 2005. Güneş Pilleri ve Verimleri. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, Eskişehir.
- Lee, E.J., Choi, M.H., and Moon, D.K., 2016. Enhanced Photovoltaic Properties of Bulk Heterojunction Organic Photovoltaic Devices by an Addition of a Low Band Gap Conjugated Polymer. *Materials*, 9(2016), 12- 996.
- Liu, L., Shi, Y. ve Yang, Y., 2001. Solvation Induced Morphology Effects on The Performance of Polymer Based Photovoltaic Devices. *Adv. Funct. Mater*, 11(2001), 420-420.
- Moons, E., 2002. Conjugated polymer blends : linking film morphology to performance of light emitting diodes and photodiodes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(2002), 12235-12260.
- 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., 2008, Microscopic Understanding of the Anisotropic Conductivity of PEDOT:PSS Thin Films *Advanced Materials*, 19 (2008), 1196-1200.
- Nelson, J., 2002. Organic photovoltaic films. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 6 (2002) 87–95.
- Nickel, F., Puetz, A., Reinhard, M., Do, H., Kayser, C., Colmann, A., Lemmer, U., 2009. Cathodes comprising highly conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) for semi-transparent polymer solar cells, *Organic Electronics* , 11(2009) , 535-538.
- Perlin, J., 2004. National Renewable Energy Laboratory produced this brochure as NREL. Report No. BR-520-33947, August 2004.
- Gonzalez, D. M., Körstgens, V., Yao, Y., Song, L., Santoro, G., Roth, S. V., and Müller-Buschbaum, P., 2015. Improved Power Conversion Efficiency of P3HT:PCBM Organic Solar Cells by Strong Spin–Orbit Coupling-Induced Delayed Fluorescence. *Advanced Energy Materials*. *Adv. Energy Mater.* 2015, 5, 1401770.
- Oral, M., Güneş Pilleri, İzmir İlker Matbaası, 1979, 59
- Öztürk, H., 2013. Yenilenebilir Enerji Kaynakları, 1. baskı. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2013. *Polymer Solar Cells*. Degree of Master of Science in Material Science and Engineering, University of Texas at Arlington, USA.

- Schilmsky, P. Waldauf, C. Brabec, C.J. 2002. Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors. *Applied Physics Letters*, 81(2002), 3885-3887.
- Sharma, B.L. and Purohit, R.K. 1974. *Semiconductor Heterojunctions*. Pergamon, 216 p. Oxford, New York.
- Spanggaard, H., Krebs, F.C., 2004. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83(2004), 125-146.
- Spyropoulos, G.D., Stylianakis, M., Stratakis, M., Kymakis, E., 2011. Plasmonic organic photovoltaics doped with metal nanoparticles. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 9 (2011) 184–189.
- Tang, C.W., 1986. Layer organic photovoltaic cell. *Appl. Phys. Lett*, 48(1986), 183-185.
- Wei, S. K., 2009. R. W. *Applied Physics Letters*, 041111/1.
- Xie, F., Choy, W., Sha, W.E.I., Zhang, D., Zhang, S., Li, X., Leung, C., and Hou, J., 2013. Enhanced charge extraction in organic solar cells through electron accumulation effects induced by metal nanoparticles. *Energy Environ. Sci*, 6(2013), 3372–3379.
- Yagci, Ö., Yesilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongüla, F., Varal, N. M., Kus, M., Günes, S., Icellia, O., 2016. Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT: PCBM based organic solar cells. *Synthetic Metals*, 212 (2016) 12–18.
- Yang, F., Kangb, D.W., Kima, Y.S., 2018. Pentacene-assisted planarization of photo-active layers for high performance tandem organic photovoltaics. *Solar Energy*, 163(2018), 434-442
- YEGM- Yenilenebilir Güneş Enerjisi Genel Müdürlüğü
- Yu, Y. Y., Chan, S. H., 2013. Metallic nanoparticles in active layer for hybrid photovoltaic device applications. *Thin Solid Films*, 544 (2013), 175–181.
- Zafer, C., 2006. *Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi*. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Zhou, Y., Eck, M., and Krüger, M., 2010. Bulk-heterojunction hybrid solar cells based on colloidal nanocrystals and conjugated polymers. *Energy Environ. Sci.*, 3(2010), 1851-1865.
- Zhang, W., Nguyen, N. A., Murray, R., Mackay, M. E., 2017. Device performance enhancement of polymer solar cells by nanoparticle self-assembly. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 160 (2017) 126–133.
- Zhu, H., Zhu, E., Ou, G., Gao, L., and Chen, J., 2010. Fe₃O₄-Au and Fe₂O₃-Au Hybrid Nanorods: Layer-by-Layer Assembly Synthesis and Their Magnetic and Optical Properties. *Nanoscale Research Letters*, 2010 5:1755.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında İstanbul'un Bakırköy ilçesinde doğdu. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümüne yerleşti. 2013 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümünden mezun oldu. 2015 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Tezli Yüksek Lisans Programı'na yerleşti.

BİLDİRİ

Çaldıran Zakir, Nuhoglu Yasin, **Erkem Ümit**, Biber Mehmet, Aydoğan Şakir
Fabrication of Organic Bulk Heterojunction Solar Cells and The Effect of Pentacene
Material On The Power Conversion Efficiency, International Congress on
Semiconductor Materials and Devices (ICSMD-2018), Ardahan/TURKEY