

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERSİNE ÇEVİRİLMİŞ HACİM HETEROEKLEMİNE  
DAYALI GÜNEŞ GÖZELERİ**

Derya ILICALI

**FBE Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serap GÜNEŞ (YTÜ)**

**İSTANBUL, 2010**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERSİNE ÇEVİRİLMİŞ HACİM HETEROEKLİMİNE  
DAYALI GÜNEŞ GÖZELERİ**

Derya ILICALI

**FBE Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serap GÜNEŞ (YTÜ)**

**İSTANBUL, 2010**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTIMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜNEŞ GÖZELERİ .....	4
2.1 Tarihsel Gelişim.....	4
2.2 İnorganik Güneş Gözeleri.....	4
2.3 Organik Güneş Gözeleri .....	6
2.3.1 Organik Kimyada Kullanılan Bazı Temel Kavramlar .....	7
2.3.2 Organik Yarıiletkenlerin Genel Özellikleri .....	9
2.3.3 Organik Güneş Gözelerinde Kullanılan Malzemeler .....	13
2.3.4 Organik Güneş Gözeleri Çalışma Prensipleri .....	16
2.3.5 Aygıt Yapıları .....	18
2.3.5.1 Tek Katmanlı .....	18
2.3.5.2 Çift Katmanlı Heteroeklem.....	19
2.3.5.3 Hacim Heteroeklemi .....	20
2.4 Fotovoltaik Karakterizasyon.....	21
2.4.1 Eş Değer Devre Diyagramı.....	21
2.4.2 Güç Dönüşüm Verimi.....	23
2.4.3 Kısa Devre Akımı ( $I_{SC}$ ).....	24
2.4.4 Açık Devre Gerilimi ( $V_{OC}$ ).....	24
2.4.5 Dolgu Faktörü (FF).....	25
2.5 Organik Güneş Gözelerini Etkileyen Kritik Parametreler:.....	26
2.5.1 Nanomorfoloji ve Analiz Yöntemleri .....	26
2.5.2 Yük Taşınması .....	31
2.6 Organik Güneş Gözelerinin İyileştirilmesi İçin Kullanılan Yöntemler.....	32
2.7 Tersine Çevrilmiş Hacim Heteroeklemine Dayalı Güneş Gözeleri.....	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
3.1 Tersine Çevrilmiş Güneş Gözelerinin Hazırlanması .....	37
3.2 Deneysel Sonuçlar .....	39
3.2.1 Diklorobenzen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar.....	39
3.2.1.1 $TiO_2$ Elektrotların Morfolojisi .....	39
3.2.1.2 Akım-Gerilim Karakterizasyonu .....	40
3.2.1.3 Kuantum Verimi (IPCE).....	43
3.2.2 Toluen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar .....	44
3.2.2.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu .....	44
3.2.2.2 Kuantum Verimi (IPCE).....	47

3.2.3	Klorobenzen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar.....	48
3.2.3.1	Akım-Gerilim Karakterizasyonu .....	48
3.2.3.2	Kuantum Verimi (IPCE).....	51
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....	52
KAYNAKLAR.....		54
ÖZGEÇMİŞ.....		59

## SİMGE LİSTESİ

a	Düzeltilmiş idealite faktörü
a-Si	Amorf Silisyum
AsF <sub>5</sub>	Pentafloroarsenik
Br <sub>2</sub>	Brom moleküler formülü
BF <sub>3</sub>	Bortriflorür
C	Karbon simgesi
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
CdTe	Kadmiyum Tellür
CdSe	Kadmiyum Selen
E <sub>g</sub>	Yarı iletken malzemenin band aralığı
FF	Dolgu faktörü
GaAs	Galyum Arsenid
GaAlAs	Galyum alüminyum arsenid
GaInAsP	Galyum indiyum arsenid fosfor
Ge	Germanyum
HF	Hidrofluorik asit
hν	Foton enerjisi
InAs	İndiyum arsenid
InSb	İndiyum Antimonit
InP	İndiyum Fosfit
I <sub>L</sub>	Işıkla meydana gelen akım (fotovoltaik akım)
I <sub>0</sub>	Karanlık doyma akımı
I <sub>D</sub>	Diyot akımı
I <sub>MPP</sub>	Maksimum güç noktasındaki akım
I <sub>2</sub>	İyot moleküler formülü
I <sub>SC</sub>	Kısa devre akımı
I <sub>SH</sub>	Kaçak akım
İTO	İndiyum katkılı kalay oksit
K	Potasyum
k <sub>B</sub>	Boltzmann Sabiti
Li	Lityum
Na	Sodyum
n <sub>foton</sub> (λ)	Güneş gözesinin aktif yüzeyi üzerine gelen foton sayısı
n <sub>elektron</sub> (λ)	Meydana gelen elektron-boşluk çifti sayısı
n	Yük konsantrasyonu
n	Diyot idealite veya kalite faktörü
N <sub>CS</sub>	Seri bağlı güneş gözesi/modül sayısı
P <sub>MPP</sub>	Maksimum güç çıkışı
P <sub>in</sub>	Optik giriş gücü (atmosfer dışında birim alana düşen güneş enerjisi şiddeti)

$R_L$	Yük direnci
$R_S$	Seri direnç
$R_{SH}$ veya $R_P$	Paralel direnç
Si	Silisyum
$T_C$	Güneş gözesi sıcaklığı
$TiO_2$	Titanyum dioksit
$V_{MPP}$	Maksimum güç noktasındaki gerilim
$V_{OC}$	Açık devre gerilimi
ZnO	Çinko oksit (zinkoksit)
$\eta$	Güneş gözesinin güç dönüşüm verimi
q	Elektron yükü
$\lambda$	Dalgaboyu
°	Selsius derece
$\pi$	Pi
$\sigma$	Sigma

## KISALTMA LİSTESİ

A	Angstrom
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AM	Hava kütlesi (Air Mass)
CB	Klorobenzen
CELIV	Charge extraction by linearly increasing voltage
CIGS	Bakır indiyum galyum diselenür
CN-PPV	poli(2,5,2',5'-tetrahekziloksi-7,8'-disiyanodi-p-fenilenvinilen)
CN-MEH-PPV	poli-[2- metoksi-5-(2'-etilhekziloksi)-1,4-(1-siyanovinilen)-fenilen]
DC	Doğru akım
DCB	Diklorobenzen
eV	Elektron volt
F8BT	poli(9,9'dioktilfluoreno benzo[2,1-b]kiazol)
FET	Alan Etkili Transistör
HOMO	En yüksek enerjili dolu orbital (Highest Occupied Molecular Orbital)
HRTEM	Kristal yapısı yüksek çözünürlüklü geçirmeli elektron mikroskobu
IPCE	Foton-akım dönüşüm verimi
I-V	Akım-gerilim ölçümleri
LUMO	En düşük enerjili boş orbital
MEH-PPV	poli[2-metoksi-5-(2'-etil-hekziloksi)-1,4-fenilenvinilen]
MDMO-PPV	poli[2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilviniylen)
MIM	Metal yalıtkan metal (Metal/insulator/metal)
nm	Nanometre
PV	Fotovoltaik
P3HT	poli(3-hekziltiophen-2,5-dil)
PFB	poli (9,9'-dioktilfluoreno-co-bis-N-N'-(4-butilfenil)-bis-N-N'-fenil-1,4-
PCBM	1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6,6]C61)
PPV	polifenilenvinilen
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SCLC	Space charge-limited current
TEM	Geçirmeli elektron mikroskobu
TL	Toluen
TOF	Time-of-flight
TRMC	Time resolved microwave conductivity
UV	Ultraviyole (morötesi)

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 (a)Mono-kristal Si güneş paneli, (b)Poli-Kristal Si güneş paneli .....	5
Şekil 2.2 Organik güneş gözesi uygulamaları .....	6
Şekil 2.3 İletken polimerlerde konjügasyonun bant aralığına etkisi .....	11
Şekil 2.4 Konjüge polimerlerin iletkenlik aralığı .....	12
Şekil 2.5 Organik yarıiletkenlerin çözelti halindeki görüntüsü.....	14
Şekil 2.6 Organik yarıiletkenlerin mekanik ve işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaları .....	14
Şekil 2.7 Organik yarıiletkenlerden bazılarının kimyasal yapıları .....	15
Şekil 2.8 Genel olarak kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi (Air Mass/AM) 1.5 doğal güneş spektrumunun kıyaslaması.....	16
Şekil 2.9 Organik güneş gözeleri çalışma prensibi şeması.....	18
Şekil 2.10 (a) MIM modeli, (b) Schottky kontak .....	19
Şekil 2.11 Çift katlı heteroeklem güneş gözelerinin (a) devre şeması, (b) enerji diyagramı ...	20
Şekil 2.12 (a) Hacim heteroeklemine dayalı güneş gözelerinin devre şeması, (b) enerji diyagramı .....	21
Şekil 2.13 Bir güneş gözesinin eş değer devre diyagramı .....	22
Şekil 2.14 Bir organik güneş gözesinin akım-gerilim eğrisi .....	24
Şekil 2.15 Hava Kütlesi (AM) ifadesinin şematik gösterimi .....	26
Şekil 2.16 Organik güneş gözelerinin verimli çalışması için gerekli olan, donör ve akseptör malzemelerin birbiri ile uyumunun enerji-bant diyagramındaki görüntüsü .....	27
Şekil 2.17 AFM ile yüzeyi taranmış MDMO:PPV/PCBM (1:4) oranı için (a) klorobenzen içerisindeki yüzey görüntüsü, (b) toluen içerisindeki yüzey görüntüsü .....	28
Şekil 2.18 MDMO-PPV : PCBM 1 : 4 oranında toluen’de hazırlanmış filmin a)130 °C b)150°C c)165°C sıcaklık uygulandıktan sonraki yüzey görüntü resimleri ....	29
Şekil 2.19 Polimer zincirinde elektronik yükün hareketi a) Zincir üzerinde yükün taşınması b) Zincirler arasında yükün taşınması c) Partiküller arasında yükün taşınması....	31
Şekil 2.20 (a) Hacim heteroeklemine dayalı normal devre modeli, (b) Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı devre modeli .....	35
Şekil 2.21 (a) Normal devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagramı resmi, (b) Tersine çevrilmiş devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagramı resmi.....	36
Şekil 3.1 Dönel kaplama (spin coating) cihazı .....	37
Şekil 3.2 (a) (poly(2,5-didodecyloxy-1,4-phenylene-2-cyanovinylene-2,5-dioctyloxy-1,4-phenylene-1-cyanovinylene)) (DE119) molekülünün kimyasal yapısı (b) Poli(3-hekzil)tiyofen (P3HT) polimerinin kimyasal yapısı .....	38
Şekil 3.3 Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı güneş gözelerine ait devre şeması .	38
Şekil 3.4 Gözeneksiz TiO <sub>2</sub> AFM Resmi.....	40
Şekil 3.5 Güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) referans örnek TiO <sub>2</sub> /P3HT/DCB, (b) 1:1 oranında hazırlanmış P3HT:DE119/DCB güneş gözesi .....	41
Şekil 3.6 P3HT:DE119/DCB güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) 1:2 (b) 1:3 (c) 1:4 karışım oranları .....	42
Şekil 3.7 P3HT:DE119/DCB farklı DE119 oranlarını içeren güneş gözelerinin IPCE spektrumu.....	44
Şekil 3.8 Güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) referans örnek TiO <sub>2</sub> /P3HT/TL, (b) 1:1 oranında hazırlanmış P3HT:DE119/TL güneş gözesi .....	45
Şekil 3.9 P3HT:DE119/TL güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) 1:2 (b) 1:3 (c) 1:4 karışım oranları .....	46
Şekil 3.10 P3HT:DE119/TL farklı DE119 oranlarında güneş gözelerinin IPCE spektrumu ...	47



Şekil 3.11 Güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) referans örnek $\text{TiO}_2/\text{P3HT}/\text{CB}$ , (b) 1:1 oranında hazırlanmış $\text{P3HT}:\text{DE119}/\text{CB}$ güneş gözesi .....	49
Şekil 3.12 $\text{P3HT}:\text{DE119}/\text{CB}$ güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) 1:2 (b) 1:3 (c) 1:4 karışım oranları .....	50
Şekil 3.13 $\text{P3HT}:\text{DE119}/\text{CB}$ farklı DE119 oranlarını içeren güneş gözelerinin IPCE spektrumu.....	51

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Yenilenebilir enerji çeşitleri .....	1
Çizelge 2.1 Katkılama yapılmış bazı konjuge polimerlerin yapıları ve iletkenlik değerleri ....	12
Çizelge 3.1 P3HT/DE119 karışım oranları.....	39
Çizelge 3.2 Farklı oranlarda ve farklı organik çözücüler içerisinde hazırlanan P3HT:DE119 karışımı güneş gözelerinin güç dönüşüm verimleri ve ilgili parametreler .....	52

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca her türlü desteği sağlayan, yol gösteren ve bilimsel duruşu ile her zaman örnek aldığım tez danışmanım Doç. Dr. Serap Güneş'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel ve teorik altyapısı sonucu oluşan bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, sağladığı teknolojik imkanlar ve laboratuvar desteği için Ord. Prof. Dr. N. Serdar SARIÇİFTÇİ'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamda ölçüm yaptığım materyalleri sentezleyen Priv. Doz. Dr. Daniel Egbe'ye teşekkür ederim.

AFM resimlerini almama yardımcı olan Alberto MONTAIGNE RAMIL'e ve IPCE ölçüm tekniğini gösteren Getachew Adam WORKNEH'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında deneysel ve moral desteğinden dolayı sevgili hocam Arş. Gör. Gülbeden Çakmak'a ve grup arkadaşım Emel Çevik'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında yardımlarından dolayı Arş. Gör Süreyya Aydın YÜKSEL'e teşekkür ederim.

Paylaştıkları fikirleri ve arkadaşlıkları ile her zaman yanımda olan sevgili grup arkadaşlarım Gülay Günday, İsmail Karataş ve Adem Karslı'ya teşekkür ederim.

Moral ve teknik desteğinden dolayı Beşinci ailesine çok teşekkür ederim.

Sağladığı burs ile bana yüksek lisans çalışmalarım boyunca destek olan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen değerli anneme, babama, ve kardeşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı güneş gözelerini oluşturmak için, Priv. Doz. Dr. Daniel Egbe tarafından sentezlenen (poly(2,5-didodecyloxy-1,4-phenylene-2-cyanovinylene-2,5-dioctyloxy-1,4-phenylene-1-cyanovinylene)) DE119 polimeri ile (Poli(3-hekzil)tiyofen) P3HT polimer karışımı aktif tabaka olarak kullanılmıştır. Bu karışımda, DE119 akseptör özelliğe sahip bileşen, P3HT' de donör bileşen olarak düşünülmüştür. Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı güneş gözeleri oluşumunda kullanılan polimer karışımı farklı organik çözücüler içerisinde, farklı akseptör oranlarında hazırlanmıştır. Sonuç olarak, P3HT ve DE119'un bire bir (1:1) karışım oranı için sırasıyla güç dönüşüm verimleri klorobenzende %0,34, toluende %0,27 ve diklorobenzende %0,25 olarak bulunmuştur. Buna ek olarak, hazırlanan güneş gözeleri, akım-gerilim (I-V) ölçümleri ve monokromatik foton-akım dönüşümünü veren (IPCE) ölçümleri yapılarak karakterize edilmiştir. AFM tekniği kullanılarak da yüzey görüntüleri incelenmiştir.

## **ABSTRACT**

In this study, a polymer mixture of the polymer, poly(2,5-didodecyloxy-1,4-phenylene-2-cyanovinylene-2,5-dioctyloxy-1,4-phenylene-1-cyanovinylene (DE119), synthesized by Priv. Doz. Dr. Daniel Egbe and the polymer, poly(3-hexylthiophene (P3HT), was used as an active layer to generate inverted bulk hetero-junction solar cells. In this mixture, the DE119 has an acceptor characteristics whereas the P3HT was considered as a donor component. The polymer mixture was prepared in various organic solvents with different acceptor ratios for the generation of inverted bulk hetero-junction solar cells. As a result, power conversion efficiencies were found to be 0,34 %, 0,27% and 0,25 % for chlorobenzene, toluene and dichlorobenzene respectively in which one to one (1:1) ratio was used for P3HT and DE119. In addition, the prepared solar cells were characterized by the current-voltage (I-V) and the incident photon to current efficiency (IPCE) measurements. Surface images were also examined by using the AFM technique.

## 1. GİRİŞ

20 ve 21. yüzyılda teknolojik gelişmeler ile birlikte, nüfus artışına paralel olarak artan ihtiyaçlar, (sanayi tesislerinin çalışması, ısınma, aydınlatma, ulaşım, vb.) insanoğlunu daha fazla enerji kaynağı arayışına sevk etmiştir. 1974 yılında yaşanan petrol krizi ile başlayan süreçte petrolün sınırsız bir kaynak olmadığı gerçeği bir kez daha görülmüş ve elektrik enerjisinin yüksek maliyetinin sanayi üretim sektörünü zorlamasıyla birlikte ucuz ve kolay enerji kaynakları bulma çabaları hız kazanmıştır. Kullanılmakta olan enerji kaynaklarının tükenmeye yüz tutması ve bu sebeple her geçen gün daha pahalı hale gelmesinin yanında, çevreye verdiği zararlarda çok büyüktür. Fosil yakıtların yoğun bir şekilde yakılması ile başta karbondioksit (CO<sub>2</sub>) olmak üzere, atmosferde sera gazlarının giderek artması ve buna bağlı olarak dünyamızın ısınması, sera etkisi (küresel ısınma) olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde küresel ısınma, dünyayı tehdit eden en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Küresel ısınmanın nedenlerinden ve tetikleyicilerinden biri de enerji üretiminden kaynaklanan kirliliktir. Meydana gelen çevresel felaketler ve ani iklim değişimleri bunun en önemli kanıtlarındandır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmedikçe bu sorunla başa çıkılamayacaktır. Yenilenebilir enerji, “doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı” olarak tanımlanmaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgar, su ve jeotermal enerjiden oluşan ve kendi kendilerini yenileyebilen temiz enerji kaynaklardır [2]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başlıcaları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Yenilenebilir enerji çeşitleri [2]

	<i>Yenilenebilir Enerji Kaynakları</i>	<i>Kaynak veya Yakıtı</i>
1	Güneş Enerjisi	Güneş
2	Rüzgar Enerjisi	Rüzgar
3	Dalga Enerjisi	Okyanus ve Denizler
4	Biyokütle Enerjisi	Biyolojik artıklar
5	Jeotermal Enerji	Yer altı suları
6	Hidrolik Enerji	Nehirler
7	Hidrojen Enerjisi	Su ve Hidroksitler

Dünyanın enerji çerçevesi açısından bakıldığında yenilenebilir enerji kaynakları büyük öneme sahiptir. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sırada yer almaktadır. Güneş, temiz, çevre dostu ve bedava olduğu göz önüne alındığında, dünya üzerinde her zaman en güçlü enerji kaynağı olmuştur.

Güneş enerjisi çeşitli yollarla kullanılmaktadır. Kullanım şekline göre 3 gruba ayırabiliriz [3].

- **Pasif Isı**, doğal yollarla güneşten aldığımız ısıdır. Daha az ısı ihtiyacı için bina tasarımlarında dikkate alınabilir.
- **Güneş Termal**, güneşten gelen ısı evlerde ya da havuzlarda sıcak su sağlamak için kullanılabilir.
- **Fotovoltaik Enerji**, güneşten gelen enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılmaktadır.

Kullanım şekilleri arasında üçüncü sırada yer alan fotovoltaik teknolojilerle güneş ışığı, güneş gözeleri kullanılarak elektriğe dönüştürülebilir. Güneş gözeleri başlıca hesap makineleri, güneş lambaları, uzay araçları ve uydularda uygulama alanı bulmuştur. Günümüze kadar üretilen güneş gözelerinde Si, CdTe, GaAs gibi inorganik malzemeler kullanılmaktadır. İnorganik malzemeler kullanılarak hazırlanan geleneksel güneş gözelerinin verimi % 24'lere ulaşmıştır (Green, 2001). Bununla birlikte, bu tür geleneksel güneş gözelerinin üretim süreci çok pahalı malzemeler ve oldukça pahalı işlem teknikleri gerektirmektedir. Güneş gözelerinde silikon kristallerinin kullanılması güneş gözelerini oldukça pahalı hale getirmektedir. Diğer yandan, silikon saflaştırılması oldukça güç bir işlem olduğundan, çok fazla miktarda silikon israf edilmektedir. Buna ek olarak, sıcaklık arttıkça silikon gözelerin performansı düştüğünden, silikon gözelerinin uzun süreli konsantre çalışması soğutma sistemi gerektirmektedir. Bu sistemin yerine geçecek yeni fabrikasyon teknikleri bulmak için bilim adamları yoğun çaba harcamaktadırlar. Organik güneş gözeleri geleneksel silikon gözelerine alternatif yöntemler olarak araştırma alanları bulmaktadır. Organik güneş gözelerinde kullanılan malzemeler ucuz, kolay işlenebilir olmalarıyla beraber moleküler dizaynları ve fonksiyonellikleri biçimlendirilebilir. Organik güneş gözeleri teknolojileri Avrupa ve Amerika'da çok büyük ilgi görmüş ve yüksek bütçeli araştırmalara konu olmuştur. Bu yeni teknolojilerin en önemli avantajları geleneksel güneş gözelerine kıyasla daha kolay, daha hafif ve en önemlisi de çok daha ucuza imal edilebilir olmalarıdır. Organik malzemeler kolaylıkla çok ucuza imal edilebilmektedir. Diğer yandan, organik malzemeler plastik ya da esnek altlıklar ile uyumludur. Dolayısıyla, devreler çok ucuza ve az enerji gerektiren yüksek basım

teknikleriyle silikon ve diğer inorganik ince film teknolojilerine kıyasla daha az anapara yatırımı gerektirdiğinden, kolaylıkla üretilebilmektedir. Ayrıca, piyasaya girebilmesi için inorganik ince film teknolojilerindeki kadar yüksek verime sahip olması da gerekmemektedir. Ülkemiz coğrafi konumu itibarıyla Amerika ve Avrupa'ya kıyasla büyük bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Amerika Konarka şirketi Eylül 2004'ten itibaren bu teknolojiler üzerinde araştırma yapmaktadır ve Pentagon, Konarka bu yeni teknolojilerini kullanmayı hedeflemektedir. Ülkemizde de organik güneş gözeleri konusuna ilgi, artan bir hızla devam etmektedir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları içinde ilk sırada yer alan güneş enerjisinin uygulamalarından biri olan güneş gözeleri içerisinde 3. nesil olarak tanımlanan organik güneş gözelerinin özel bir formu olan tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı güneş gözeleri incelenmiştir.



## 2. GÜNEŞ GÖZELERİ

### 2.1 Tarihsel Gelişim

Fotovoltaik (Photovoltaic, PV), yarıiletken malzemelerden meydana gelen gözelerle güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine (DC) dönüştürebilen teknolojiye verilen isimdir [4]. Bu dönüşümü sağlayan aygıtlara “fotovoltaik hücreler” veya “güneş gözeleri” adı verilir. Güneş gözeleri, tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanan bir teknolojik uygulamadır. İlk defa 1839 yılında Becquerél, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrotların üzerine düşen ışığa bağlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayı bulmuştur [5]. Daha sonra 1877'de W.G. Adams ve R.E. Day tarafından selenyum elektrota ışık düşürüldüğünde foto-gerilim oluştuğu gözlenmiştir. Bu ikilinin yaptığı çalışmalarda katı maddelerin de fotovoltaik etki oluşturabildiği kanıtlanmıştır (Adams ve Day, 1877).

1883'te Charles Fritts selenyum kullanarak ilk ciddi güneş gözesini yapmıştır. Bu gözenin verimi ancak % 1 değerindedir. 1950'li yıllara gelinceye kadar çeşitli deneylerle fotovoltaik etkilerin kanıtlanmasına ve rapor edilmesine devam edilmiştir [6]. 1954 yılında Bell laboratuvarlarında D. M. Chapin, L. Pearson ve C. S. Fuller tarafından yapılan güneş gözesinden %6 verim elde edilmiştir. Bu verime ulaşmak, p-n eklemi oluşturulması ile mümkün olmuştur.

P-tipi ve n-tipi yarı-iletkenlerle oluşturulan ilk p-n eklemde, CdS (Kadmiyum sülfür) ve Si (Silisyum) kullanılmıştır. Daha sonra Silisyum p-n eklemi kullanılarak %15 verim elde edilmiştir. İlk güneş gözelerinin verimi %1-2 iken bugün %24 (Green, 2001)'lere varan güç dönüşüm verimine sahip güneş gözeleri geliştirilmiştir. Güneş gözesi uygulamalarını, kullanılan malzemelere göre kendi içerisinde inorganik ve organik olmak üzere 2'ye ayırabiliriz.

### 2.2 İnorganik Güneş Gözeleri

Bugüne kadar üretilen güneş gözeleri inorganik tabanlı malzemelerden oluşmaktadır. Bunlar 3 grupta açıklanabilir.

**i) Mono-Kristal ve Poli-Kristal Silisyum Güneş Gözeleri ;** Kristal Silisyum güneş gözesi uygulamaları, birinci nesil fotovoltaik teknolojiler olarak adlandırılmaktadır. (Şekil 2.1) 1954 yılında Chaplin ve arkadaşlarının Bell Laboratuvarlarında yaptığı ilk güneş gözesinde Silisyum kullanılmıştır. Zamanla verimlerinin kayda değer oranda artması Silisyumun yarıiletken teknolojisinde önemli bir yere gelmesine neden oldu. Aynı zamanda Si, çok kolay bulunan bir

hammaddedir. Yüksek verimlilik, ekolojik tesirinin az olması ve kristal formunun pratikte azalmasının mümkün olmaması nedeniyle güneş gözesi yapımında kullanılan önemli bir yarıiletken malzemedir. Fakat, oldukça pahalı bir teknolojidir. Si göze üretiminin maliyeti, modül üretiminin %50'sine eşdeğerdir (Goetzberger ve Hebling, 2000). Üretim maliyetlerinin pahalı olması, bu sistemlerin yüksek verimle çalışmasına rağmen yaygın kullanılmasına engel teşkil etmektedir.

**ii) İnce Film Güneş Gözeleri ;** Birinci nesil güneş gözesi teknolojisi olan kristal silisyum güneş gözelerinden sonra ikinci sırayı ince film güneş gözeleri almaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda; amorf silisyum (a-Si), kadmiyum selen (CdSe), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum disellenür (CIGS), ince film Si gibi malzemeler, ince film güneş gözeleri için önemli malzemeler olarak göze çarpmaktadır. İnce film güneş gözelerinin üretimine başlanmasındaki en büyük sebep, daha düşük üretim maliyetlerinin olmasıdır. Direkt bant aralıklı yarı iletken malzemelerde olduğu gibi, ince film yarı iletken malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. Bu yüzden silisyum güneş gözelerinde, ince film güneş gözelerine göre daha kalın bir filme ihtiyaç vardır. Buna göre pahalı yarıiletken malzemenin kullanımı azaltılarak maliyet düşürülmüş olur (Zafer, 2006).

**iii) III-V Grup Yarıiletkenleri ;** İdeale yakın bant aralığına sahip bu malzemeler(GaAs, GaAlAs, GaInAsP, InAs, InSb, InP,...) güneş gözeleri için dikkate değer malzemelerdir. Bu malzemelerin yüksek maliyetli olmasından dolayı performansın maliyetten daha önemli olduğu durumlarda (uzay çalışmalarları vb.) kullanılmaktadır (Halme, 2001).



Şekil 2.1 (a)Mono-kristal Si güneş paneli [7], (b)Poli-Kristal Si güneş paneli [8]

### 2.3 Organik Güneş Gözeleri

İnorganik güneş gözesi uygulamasında kullanılan malzemelerin, göze haline getirme süreci zorlu ve maliyetli olması nedeniyle geniş uygulama alanı bulamaması ve bu sebeple, daha ucuz malzemelerden meydana gelen, kolay üretim tekniklerine sahip uygulamalara gereksinim duyulması sonucu organik güneş gözeleri ortaya çıkmıştır. Organik güneş gözeleri, organik yarıiletken malzemelerin kullanıldığı üçüncü nesil fotovoltaik teknolojiler olarak adlandırılmaktadır. Kolay üretim teknikleri, geniş ve esnek alanlara uygulanabilmesi ve düşük maliyetleri olması nedeniyle organik güneş gözeleri (Shaheen vd., 2001) oldukça ilgi çekmektedir. Organik tabanlı, donör ve akseptör özelliğe sahip iki malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Organik güneş gözelerinde kullanılan organik malzemeler iletken polimerleri, boyaları, pigmentleri ve sıvı kristalleri içermektedir. Bunların içinde foto fiziksel özellikleri en iyi bilinen ve en çok çalışılan malzemeler iletken polimerlerdir (Sariciftci vd., 1992). (Şekil 2.2) Son zamanlarda organik güneş gözelerinde literatürde kaydedilen en yüksek verim By Yongye Liang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (laboratuvar ortamında) %7.4 olarak ölçülmüştür (Liang vd., 2010).



Şekil 2.2 Organik güneş gözesi uygulamaları [9]

Organik güneş gözeleri ile aynı grupta yer alan ve 3. nesil olarak adlandırılan uygulamalardan biri de hibrid güneş gözeleridir. Organik ve inorganik materyallerin nano yapılı birleşimlerinden oluşan hibrid güneş gözeleri, özgün özellikleri olan inorganik yarıiletkenler ile film oluşturma özelliğine sahip konjuge polimerlerin bir araya gelerek oluşturduğu sistemlerdir (Alivisatos, 1996; Arici vd., 2003). Organik güneş göze uygulamalarından biri olan hibrid güneş gözeleri yarıiletken nanoparçacıkların kendine özgü özellikleri ile organik polimerik malzemelerin özelliklerini birleştirmektedir. İnorganik yarı iletken nanoparçacıklar

yüksek soğurma katsayısına sahip olabilirler ve parçacık boyutuna bağlı olarak optik bant aralığı ayarlanabilmektedir. Organik materyallerin kullanıldığı diğer bir uygulama ise foto-elektrokimyasal güneş gözeleridir. Bu tip uygulamalar da 3. nesil olarak adlandırılmaktadır. 1839'da Becquerel'in fotovoltaiik etkiyi keşfettiği deneyde kullandığı sistem aslında en eski fotovoltaiik göze olan foto-elektrokimyasal güneş gözesidir. Foto-elektrokimyasal güneş gözesinde fotoaktif tabaka olarak yarıiletken-elektrolit eklemi kullanılmaktadır. Bu tür eklemlerle ilgili ilk raporlar 1960'ların sonlarında yayınlanmıştır. Maalesef, uygun bant aralığına sahip yarıiletkenlerin kararlı olmadığı ve korozyona uğradığı gözlenmiştir. Bu sebepten dolayı, bu tür güneş gözeleri ile ilgili çalışmalar geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler ile sınırlı kalmıştır. Bu gözeler beklenen kararlılığı göstermiş fakat verimler çok düşük olmuştur (Zafer, 2006). 1991 yılında İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsünden Prof.Dr. Michael Grätzel, nano-kristal yapılu TiO<sub>2</sub> filmini rutenyum bipiridil kompleksi boyalar ile duyarlılaştırarak oluşturduğu fotoelektrokimyasal göze sistemi ile %10 verim elde etmiştir (Grätzel ve O'Regan 1991). Bu çalışmasından sonra kendi ismini almış olan Grätzel tipli boya duyarlı güneş gözeleri, nano gözenekli TiO<sub>2</sub> elektrotlar, organik ve inorganik boyalar, inorganik tuzlar ve metalik katalizörlerden oluşur.

Organik güneş gözelerinde kullanılan organik yarıiletkenlerle ilgili kimyasal ve fiziksel büyüklüklerin daha kolay anlaşılabilmesi için aşağıda organik kimya ile ilgili bazı temel kavramlar tanıtılmıştır.

### 2.3.1 Organik Kimyada Kullanılan Bazı Temel Kavramlar

Organik güneş gözeleri organik yarıiletkenlerden oluşmaktadır. Bölüm 2.3.2'de bu malzemelerin genel özellikleri ve yapısal özellikleri açıklanırken aşağıda tanımlanan bazı temel kavramlar kullanılmıştır. Bu sebeple bu kavramların anlaşılır olması çok önemlidir.

#### **Monomer, Polimer, Yinelenen Birim**

**Monomer;** Birbirine kovalent bağlarla bağlanarak büyük moleküller oluşturabilen küçük mol kütleli kimyasal maddelerdir.

**Polimer;** Çok sayıda monomerin kovalent bağlarla birbirine bağlanarak oluşturduğu büyük moleküldür.

**Yinelenen Birim (veya Mer);** Monomerden polimer oluşurken veya oluştuğunda monomerin kimyasal gösterimidir. Polimerlerin yinelenen birimlerinin yapısından monomerin veya çıkış maddesinin ne olduğu tahmin edilebilir.

## **Polimer Zinciri**

Polimeri, zincire benzetebiliriz. Zincirin halkalarından oluştuğu gibi polimerde monomerlerden oluşur. Bu yüzden polimer molekülü yerine çoğu kez polimer zinciri kavramı kullanılır. Polimer zincirinin uzunluğundan dolayı polimerler makromolekül olarak da adlandırılır.

## **Zincir Konformasyonu**

Konformasyon, bağ kırılması olmadan bir molekülün atomları arasındaki bağlar etrafında dönme hareketleriyle alabileceği her türlü geometrik düzenlenmeyi kapsar. Polimer zincirleri; çözelti, eriyik vb. buldukları ortamlara göre bağlar etrafındaki dönmelerle değişik konformasyonlara girerler. Polimer zincirleri ya çubuk gibi tam uzanmış biçimde ya da yumak halinde tam büzülmüş halde bulunabilseler de genelde bu iki hal arasındaki rastgele bükülmüş geometrilere sahiptirler. Ara konformasyon sayısı sınırsızdır.

## **Ana Zincir, Yan Grup**

**Ana Zincir;** Polimer zinciri boyunca birbirine bağlanarak polimer molekülünün iskeletini oluşturan atomlar dizisine ana zincir adı verilir.

**Yan Grup;** Ana zincirdeki atomlara bağlanan kimyasal birimlere denir. Yan grupları benzer olan polimer sayısı fazla değildir. Polimerlerin çoğunda yan gruplar farklıdır. Polimerlerin ana zincirleri boyunca yüzlerce, binlerce atom bulunurken yan gruplardaki atom sayısı azdır.

## **Doğrusal Polimer**

Polimerin ana zinciri üzerindeki atomlarda sadece yan gruplar varsa böyle polimerlere doğrusal polimer denir. Bu tür polimerlerin ana zincirleri kovalent bağlarla başka zincirlere bağlı değildir. Ayrıca bunlar uygun çözücülerde çözünebilir ve defalarca eritilip tekrar şekillendirilebilir.

## **Dallanmış Polimer**

Bir polimerin ana zincirine kendi kimyasal yapısıyla özdeş başka zincirler kovalent bağlarla bağlı ise bu tür polimerlere dallanmış polimer denir. Yan zincirlerin (dalların) boyları birbirinden farklı olabileceği gibi üzerlerinde ayrıca başka dallarda bulunabilir. Yan gruplar, yan dal değildir. Dallanmış polimerlerin özellikleri bunların doğrusal yapılarına yakındır. Örneğin iki tür de aynı çözücülerde çözünebilir. Ama çözeltilerinin viskozite ve ışık saçma özellikleri farklıdır. Ayrıca dallanmış polimerin kristallenme eğilimi doğrusal polimerden daha düşüktür.

### Çapraz Bağlı Polimer

Farklı polimer zincirlerinin değişik uzunluktaki zincir parçalarıyla birbirine kovalent bağlarla bağlanmasıyla oluşan polimerlere çapraz bağlı polimer denir. Çapraz bağ sayısı fazla ise ağ yapılı polimer oluşur. Ağ-yapılı polimerlerde tüm zincirler birbirine kovalent bağlarla bağlı olduğu için polimer sistem bir tek molekül gibi düşünülebilir. Ağ-yapılı polimerden bir zincirin çekilmesi tüm polimer örneğinin hareketi demektir. Çapraz bağlı polimerler çözünmezler, ancak uygun çözücülerde şişebilirler. Şişme oranı çapraz bağ yoğunluğuyla yakından ilişkilidir. Çapraz bağ yoğunluğu arttıkça polimerin çözücüdeki şişme derecesi azalır (Saçak, 2002).

Yukarıdaki açıklanan tanımlar kullanılarak organik yarıiletkenlerin genel ve yapısal özellikleri aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

#### 2.3.2 Organik Yarıiletkenlerin Genel Özellikleri

Polimerler (plastikler), eskiden beri yalıtkan olarak kullanılan materyaller olarak bilinir. Yıllardır elektrik tellerini polimerik maddelerle yani plastiklerle sararak elektrik akımından korunmak için kullanılan malzemelerin, elektrik akımını iletmediğinin keşfedilmesi yüzyılın en büyük keşiflerin biri olarak görülmektedir.

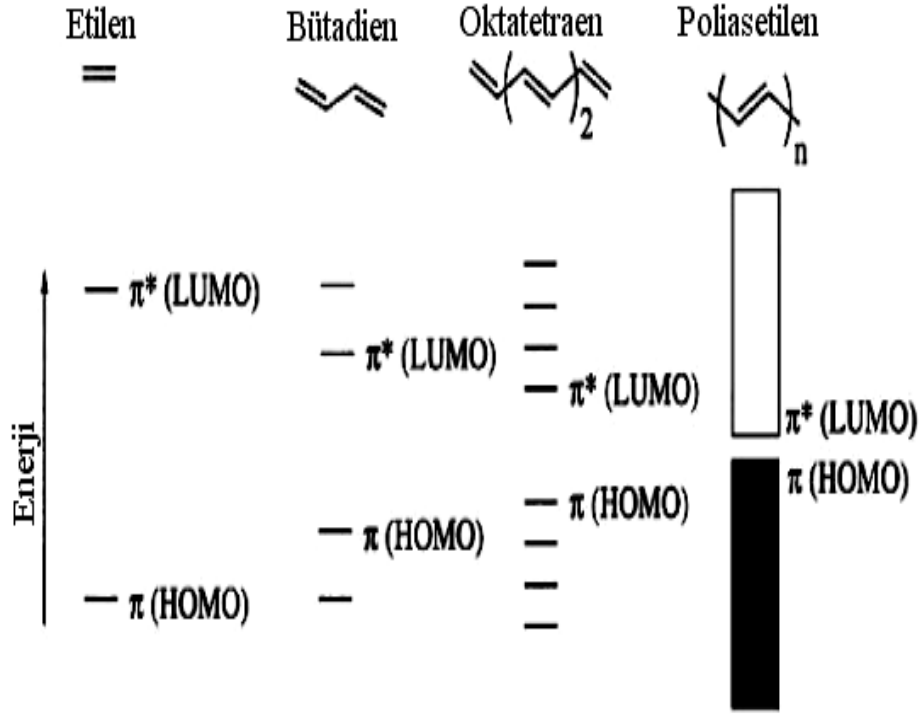
İlk iletken polimer 1977 yılında MacDiarmid, Shirikawa ve Heeger'in yaptığı çalışmalar sonucunda uygun katkılama (doping) ile sentezlenmiştir. İletken polimerleri keşfeden grup, bu çalışma ile 2000 yılında Kimya Nobel ödülünü kazanmıştır (Chiang vd., 1977, 1978). Yapılan bu çalışmada, poliasetilen filmlerini iyot, flor ve klor buharlarına tutarak yükseltgenmiş ve iletkenliğinin  $10^5$  S/cm düzeyine çıktığı gözlemlenmiştir. Bu değer yalıtkan karakterli teflonun iletkenliği olan  $10^{-18}$  S/cm den çok yüksektir ve gümüş, bakır gibi metallerinin iletkenliği olan  $10^6$  S/cm düzeyine yakındır (Büyükmumcu, 2006). Ancak oksijen ve nemle çok çabuk tepkimeye girdiği için açık atmosfer koşullarında geri dönüşümü olmayacak şekilde iletkenliğini kaybetmektedir. Polianilin, polipirol, politiyofen gibi birçok polimer poliasetilenen çok daha karardır. Bu polimerlerin çok fazla uygulamaları bulunsa da, poliasetilen kadar yüksek iletkenliğe sahip değildirler. İletken polimerler sensörler, biyo sensörler, organik ledler, organik alan etkili transistörler, organik güneş gözeleri ve korozyon koruyucu malzemeler gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır (Wallace vd., 2000; Zafer, 2006).

Bilinen organik iletken materyaller periyodik çizelgenin en önemli elementlerinden biri olan karbon atomunun hidrojen, oksijen, kükürt, azot gibi hetero atomları yapısında bulundurması

ile oluşmaktadır. Bu elementler periyodik çizelgenin önemli elementlerini oluşturmaktadırlar. Organik kimyanın temel elementi olan karbon atomu sahip olduğu  $sp$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  hibritleşmeleri sonucunda meydana getirdiği doymamış bağlar, doymuş ve doymamış bağ sıralaması ile moleküle konjugasyon sağlamaktadır. Bu konjugasyon sayesinde moleküldeki elektronlar molekül boyunca hareket ederler. Ayrıca bu konjugasyon sisteminde üzerlerinde serbest elektronlar taşıyan kükürt, azot, oksijen gibi hetero atomların elektronları da konjugasyona etki edebilmektedir. Maddelerin bu özellikleri sayesinde organik materyallerde iletkenlik oluşturmaktadır (Ertaş, 2006).

Yarıiletken ve iletken polimerlerin ortak özellikleri polimer zinciri boyunca konjuge çift bağlar (konjuge  $\pi$ -sistemi) içermesidir. Birbirlerine, ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, tekrarlanan gruptan oluşmuş, uzun zincirli yapılardır. Tekli bağ  $\sigma$ - (sigma) bağıdır, çift bağlardan biri  $\sigma$ - bağı diğeri ise  $\pi$ -(pi) bağıdır. Elektronlar bu konjuge sistem üzerinde delokalize durumdadır. Fakat, polimerik materyalin iletkenlik göstermesi için sadece konjuge bağ yapısına sahip olması yeterli değildir. Konjugasyona ek olarak, elektronca zengin ya da fakir yük taşıyıcılarının polimere ilave edilmesi (katkılanması) gerekir. Bir maddeye uygun bir yöntem ile elektron kazandırılması veya uzaklaştırılmasına katkılama (doping) denir. Katkılama ile yük taşıyıcılarının sayısı artırılır. Yükseltgenme işlemi uygulanarak p-tipi polimer, indirgenme işlemi uygulanarak n-tipi polimer elde edilebilmektedir (Zafer, 2006).

Konjuge polimerlerin bant yapısı,  $\pi$  orbitallerinin zincir boyunca tekrarlanması ile oluşur ve konjugasyon arttıkça, HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) ve LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) seviyeleri arasındaki enerji farkları azalacağı için, iletkenlik de artar. Terminolojik olarak inorganik yarıiletkenlerdeki değerlik bandı organiklerde HOMO seviyesine, iletim bandı ise LUMO seviyesine karşılık gelir. Bu durum, Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

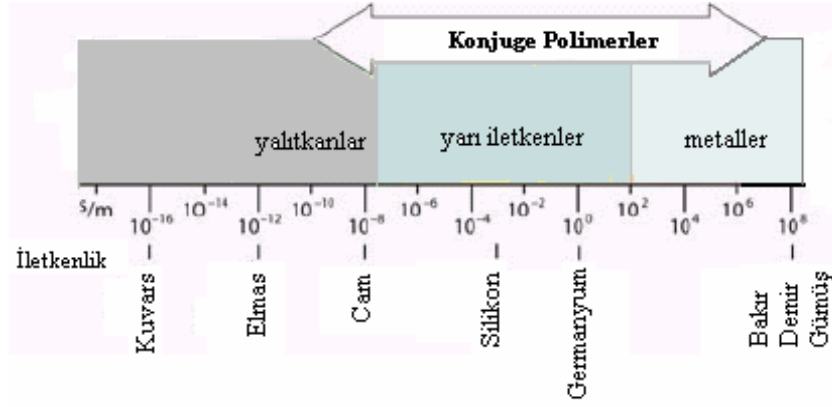


Şekil 2.3 İletken polimerlerde konjügasyonun bant aralığına etkisi (Koyuncu, 2008)

Konjüge polimerlerin iletkenlik mekanizmasının temeli, konjüge polimer zinciri üzerindeki yüklerin hareketine dayanır. Yük taşıyıcıları, ya pozitif (p tipi) ya da negatif (n tipi) olmak üzere sırasıyla polimerin yükseltgenip indirgenmesini sağlarlar.

Katkılama yoluyla iletkenliğin sağlanması şu şekilde açıklanabilir; Polimerde değerlik kabuğundaki elektronlar ya bir yükseltgen reaktif ile koparılabilir ve değerlik kabuğu pozitif yüklü hale gelir ya da indirgen bir reaktif ile boş iletkenlik bandına elektron verebilir. Bu işlemler sırasıyla yükseltgenmeye karşılık olmak üzere p-tipi katkılama, indirgenmeye karşılık olmak üzere n-tipi katkılama olarak isimlendirilir. Polimerik bir maddeye verici (donör) veya alıcı (akseptör) bir maddenin ilave edilmesi de katkılama yapmanın başka bir tanımıdır. Katkılama işlemi sırasında katkı moleküllerinin hiç birisi polimer atomları ile yer değiştirmez. Katkı molekülleri yalnızca elektronların enerji kabuklarından geçişlerinde yardımcı olurlar (Demirtaş, 2007). Şekil 2.4’de konjüge polimerlerin iletkenlik cetveli içindeki yeri gösterilmektedir. Ek olarak katkılama yapılmış bazı konjüge polimerlerin yapıları ve iletkenlik değerleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.





Şekil 2.4 Konjuge polimerlerin iletkenlik aralığı (Koyuncu, 2008)

Çizelge 2.1 Katkılama yapılmış bazı konjuge polimerlerin yapıları ve iletkenlik değerleri (Türkaslan, 2006)

Polimer	Yapısal formülü	Doping	İletkenliği (Scm <sup>-1</sup> )
Poliasetilen		(I <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> Li, AsF <sub>5</sub> , Na)	10 <sup>4</sup>
Poli-p-fenilen		(AsF <sub>5</sub> , Li, K)	10 <sup>3</sup>
Poli-fenilensülfür		(AsF <sub>5</sub> )	1
Polipirol		(BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	500-7,5X10 <sup>3</sup>
Politiyofen		(BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , FeCl <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	10 <sup>3</sup>
Poli(fenil-kinolin)		(Sodyum naftalür)	50

İletken polimerlerde genelde AsF<sub>5</sub>, I<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>, BF<sub>3</sub>, HF gibi yükseltgeyiciler (p-tipi katkılama) veya Li, K, Na gibi indirgeyiciler (n-tipi katkılama) ile yük oluşturularak yapılmaktadır. Polimerin iskelet yapısına katkılama yapmak üzere verilen elektrik yükü, polimerin elektronik durumunda küçük ama önemli bir değişme sağlar. Polimerlerde elektronik uyarma, örgünün relaksasyonuna neden olur. Polimerlerde iki tür yapısal relaksasyon olduğu kabul edilir. Birincisi, polimer zinciri boyunca oluşan tek düze relaksasyon, ikincisi ise lokal olarak

yapısal deformasyona neden olan relaksasyondur. Bunların sonucunda polimer zinciri üzerinde kusurlar oluşur. Bu kusurlar “soliton”veya“polaron” olarak isimlendirilir (Kalaycı, 2008). Enerji bantları arasına yeni bir enerji seviyesinin katılması soliton durumunda gerçekleşir. Polaronlarda çift enerji seviyesi katılır ve bu şekilde enerji aralığı daralmış olur.

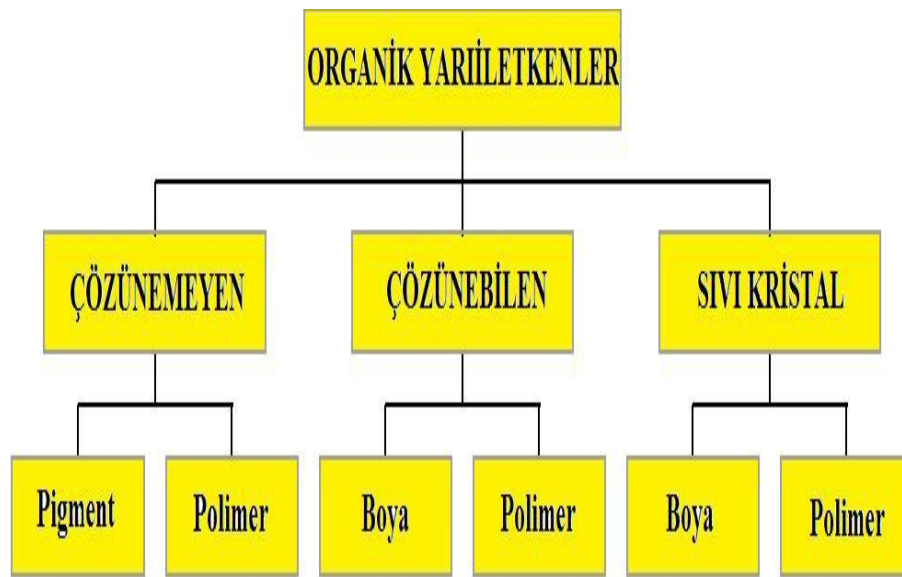
Geleneksel güneş gözelerinde kullanılan yarıiletken malzemelerin (Si, Ge gibi) bant aralığının değiştirilmesi zordur. Organik güneş gözelerinde kullanılan organik yarıiletkenlerde ise konjugasyonun artmasıyla ara enerji seviyelerinin oluşması sonucu bant aralığı istenilen doğrultuda değiştirilebilir. Bu durum organik güneş gözelerini geleneksel uygulamalara göre avantajlı hale getirme sebeplerinden biridir.

### **2.3.3 Organik Güneş Gözelerinde Kullanılan Malzemeler**

Çeşitli uygulama alanlarında kullanılan organik yarıiletken malzemelerin optik ve elektronik özellikleri, polimerin ana omurgasına eklenen fonksiyonel gruplar yardımıyla istenilen doğrultuda değiştirilebilir. Yan zincir fonksiyonelliği, yarıiletken polimerleri organik çözücülerde veya suda çözerek işlem yapmak üzere kullanılabilir. Bunun yanında organik yarıiletkenlerin işlenebilme özellikleri de çok önemlidir. Organik güneş gözelerinde kullanılan malzemeler, çözelti bazlı ve vakum işlemine tabi tutulan malzemeler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Buna göre malzemenin yapısına bağlı olarak farklı üretim teknikleri kullanılır. Örneğin, küçük moleküller için genellikle süblimasyon veya buharlaştırma tekniği kullanılarak ince film oluşturulur. Konjuge polimerler ise çözelti (Şekil 2.5) haline getirilerek dönele kaplama (spin coating) veya baskı teknikleri kullanılarak film haline getirilebilirler. Şekil 2.6, organik yarıiletkenlerin işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmasını göstermektedir. Organik yarıiletkenler, birkaç tane tekrarlanan birim içeren (oligomer) veya hiç içermeyen moleküller (monomer) ve tekrarlanan birim sayısı 10'dan fazla olana moleküller (polimer) olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, oligomerler ve monomerler ışığı soğuruyorlar (renkli) ise kromofor olarak adlandırılırlar ve bunlara çözünür ise “boya”, çözünmezler ise “pigment” denir. Sıvı kristal malzemeler ise, belirli bir sıcaklık aralığında molekülleri sıvı fazda imiş gibi hareket etmekte ancak hala bir kristal malzeme gibi bir düzen içerisinde bulunmaktadır (Zafer, 2006).



Şekil 2.5 Organik yarıiletkenlerin çözelti halindeki görüntüsü (Sarıçiftçi, 2010)

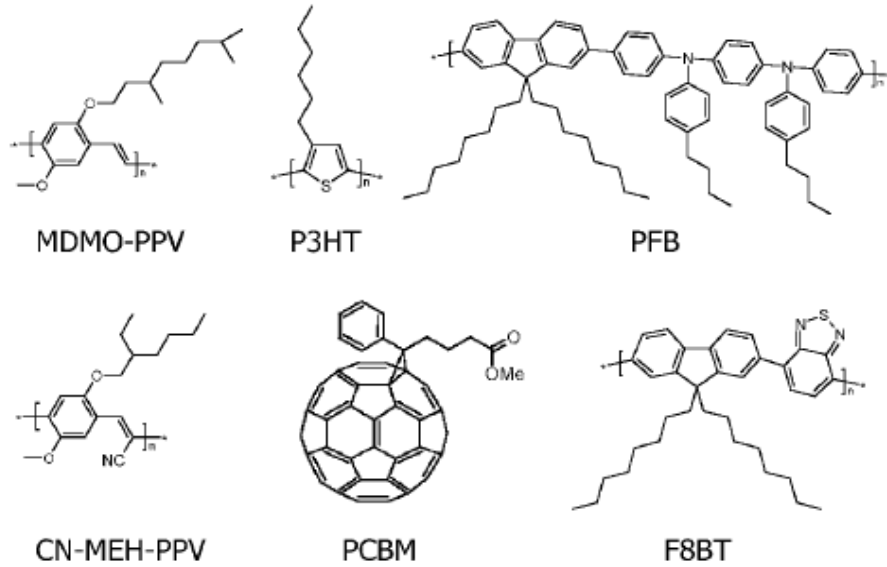


Şekil 2.6 Organik yarıiletkenlerin mekanik ve işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaları (Klaus, 2000)

Organik güneş gözelerinde kullanılan malzemelere organik denmesinin sebebi polimerin ana omurgasının C bağlarından oluşmasıdır. Organik güneş gözelerinde amaç, p-n eklemi oluşturarak fotovoltajik etki ile meydana gelen serbest yük taşıyıcılarının ilgili kontaklara gitmesini sağlayarak akım elde etmektir. Buna göre aktif tabakayı oluşturan donör (p-tipli) ve akseptör (n-tipli) malzemelerin birbiriyle uyumu oldukça önemlidir. Organik güneş gözelerinde iki tip malzeme kullanılmaktadır. Düşük molekül ağırlıklı malzemeler küçük organik moleküller ve polimerlerdir. Her ikisinde  $sp^2$  hibridizasyonuna sahip "C" atomlarının  $p_z$  orbitalleri tarafından oluşturulan konjuge pi elektron sistemine sahiptir. İki malzeme arasındaki fark işleme teknikleridir. Örneğin polimerler asla buharlaştırılmazlar. Küçük moleküller buharlaştırılabilirler.

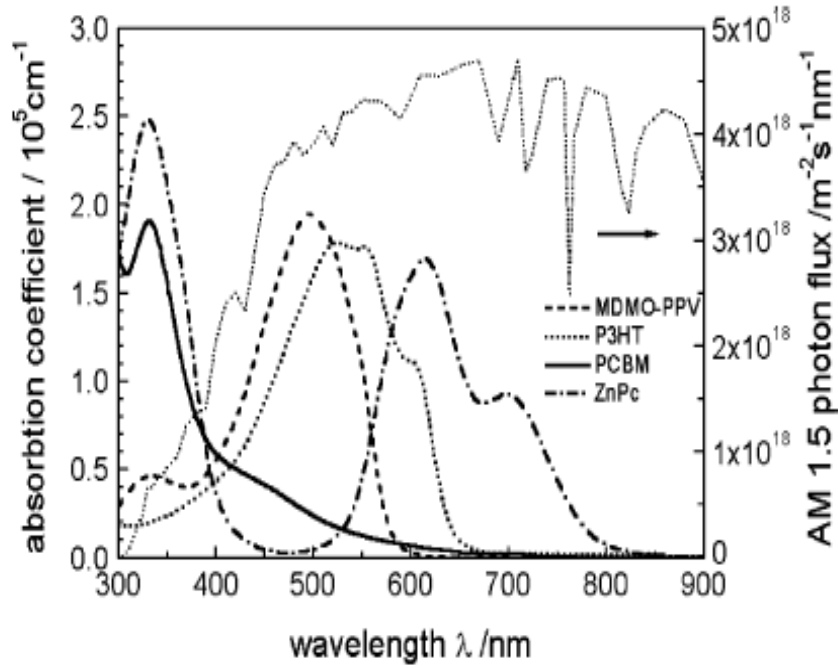
Organik güneş gözelerinde kullanılan delik ileten donör tipli polimerlerin en önemli üç temsilcisi (poli[2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilviniylen) MDMO-PPV, (poli(3-hekziltiophen-2,5-dil) P3HT ve (poli (9-9'-dioktilfluoren-co-bis-N-N'-(4-butilfenil)-bis-N-N'-fenil-1,4-fenilendiamin) PFB' dir.

Akseptör özellik gösteren, elektron ileten malzemelere de örnek olarak (poli-[2- metoksi-5-(2'-etilhekziloksi)-1,4-(1-siyanovinilen)-fenilen) CN-MEH-PPV, (poli(9,9'dioktilfluoreneko benzotiadiazol) F8BT ve (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6,6]C<sub>60</sub>) PCBM gösterilebilir. Fulleren türevi olan C<sub>60</sub> literatürde akseptör malzeme olarak en sık kullanılan düşük molekül ağırlığına sahip bir malzemedir. Çözünemediği için vakum tekniği kullanılarak süblimasyon yapılabilir. Çözünemesi için yapısına metoksi (MeOH) yan zinciri eklenir ve bu haliyle PCBM adını alır. Yan zincir çözünübilirliklerinden dolayı bu malzemeler çözelti bazlıdır ve polimerler de foto ve elektroluminesans özelliği göstermektedirler (Burroughes vd., 1990; Shinar, 2004). Yukarıda adı geçen organik yarıiletkenlerin kimyasal yapıları Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Organik yarıiletkenlerden bazılarının kimyasal yapıları (Hoppe, 2004)

Bu malzemelerde enerji dönüşümüne katılan güneş ışığı kesrini gösterebilmek için, bazı malzemelerin filmlerinin soğurma katsayıları hava kütlesi (AM) 1.5 standart güneş spektrumuna kıyasla gösterilmiştir. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8 Genel olarak kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi (Air Mass/AM) 1.5 doğal güneş spektrumunun kıyaslaması (Hoppe ve Sariciftci, 2004)

### 2.3.4 Organik Güneş Gözeleri Çalışma Prensipli

Organik güneş gözesi güneşten gelen ışığı aktif polimer tabakası ile soğurabilen ve doğrudan elektrik enerjisine çeviren bir elektronik aygıttır [5]. Organik güneş gözesinin çalışma prensibini anlamak için inorganik p-n eklemi temel alınmaktadır (Meissner ve Rostalski, 2000). İnorganik güneş gözelerinin aksine organik malzemelerde, üç boyutlu kristal yapı bulunmazken; farklı molekül içi ve moleküller arası etkileşimler mevcuttur (Wöhrle ve Meissner, 1991). Bu sebeple organik güneş gözelerinin foto fiziği tam anlaşılmış değildir (Klaus, 2000; Zafer, 2006). Organik güneş gözelerinde gelen ışığın elektrik akımına dönüşmesinde 4 önemli adım vardır. Bunlar sırasıyla, yük taşıyıcıların yaratılması (soğurma), birbirine bağlı elektron-delik çiftinin (eksiton) difüzyonu, yük taşıyıcıların serbest hale gelmesi ve son olarak serbest yük taşıyıcılarının uygun kontaklara ulaşmasıdır.

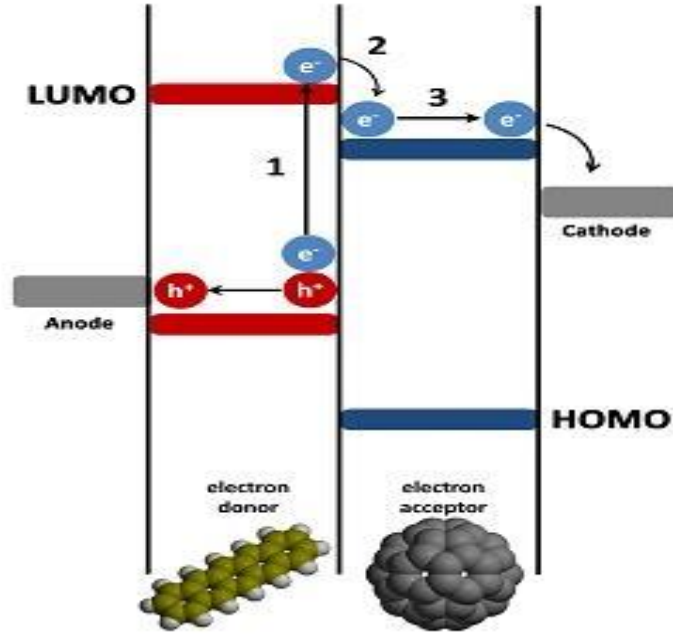
**Işığın Soğurulması;** Konjuge polimerlerde  $\pi$ -bağlarını oluşturan delokalize  $P_z$  orbitalleri, gerçekte iki farklı orbital meydana getirmektedirler. Bunlar düşük enerjili bağlayıcı orbitaller ( $\pi$ -HOMO seviyesi) ve yüksek enerjili karşıt bağlayıcı orbitaller ( $\pi^*$ -LUMO seviyesi) dir. Bu iki orbital arasındaki enerji farkı organik yarıiletken malzemenin enerji bant aralığına karşılık gelir. Enerji bant aralığına eşit veya daha büyük enerjide bir fotonun ( $h\nu$ ) soğurulması ile HOMO'dan LUMO'ya bir elektron uyarılabilir. O halde, ilk adımda gelen ışık, polimer

tabaka tarafından soğurularak, HOMO seviyesinden bir elektronu uyararak, LUMO seviyesine geçmesini sağlar. Bu uyarılma sonucu oluşan elektron-delik çiftine eksiton adı verilir ve eksitonlar birbirine Coulomb etkileşimi ile bağlıdır. Eksitonlar elektriksel olarak nötr özelliktedir.

**Eksiton Difüzyonu;** Oluşan eksitonları serbest yük taşıyıcıları haline getirebilmek önemlidir. Serbest yük taşıyıcısı haline geçebilmeleri için eksitonların bağlanma enerjilerinin kırılması gereklidir. İnorganik yarıiletkenlerin aksine organik yarıiletkenlerde eksiton bağlanma enerjisi yüksektir (0.4 eV). Eksitonları ayırmak için p-n eklemde kendiliğinden var olan elektrik alanları değerlendirilebilir. Eksitonlar belirli bir mesafeye kadar birlikte hareket ederler. Bu hareketleri süresince birbirlerinden ayrılmadıkları takdirde yeniden birleşirler. Bu olaya rekombinasyon veya yeniden birleşme adı verilir. Yeniden birleşme sonucu açığa çıkan enerji ısı veya ışık şeklinde olabilir. Eksitonların yeniden birleşmeden yayılabildikleri mesafe eksiton difüzyon uzunluğu olarak adlandırılır. Eksiton difüzyon mesafesi organik malzemenin yapısına göre farklılık gösterirken genelde 5-15 nm civarındadır (Hoppe ve Sariciftci, 2004).

**Yük Taşıyıcıların Serbest Hale Gelmesi;** Eksitonlar p-n eklemde ara yüzeyinde ayrılabilir. Serbest hale gelen delik ve elektron uygun kontaklara doğru hareket ederler. Elektron, yüksek elektron ilgisi olan malzeme (akseptör) tarafından, boşluk ise düşük iyonlaşma potansiyeline sahip malzeme (donör) tarafından kabul edilmektedir (Zafer, 2006).

**Serbest Yük Taşıyıcılarının Uygun Kontaklara İletilmesi;** Serbest hale gelen yük taşıyıcılarının taşınma işlemi için iki farklı model öngörülmektedir. Bunlardan biri MIM (metal-yalıtkan-metal) modelidir. Bu modelde iki farklı iş fonksiyonlarına sahip metaller kullanılır. Bu metallerin fermi enerjileri birbirleri ile bağlandığında simetriyi kırarak enerji bantlarını eğer. Bu şekilde yükler harekete geçer. Diğer model ise Schottky (metal-katkılı yarıiletken) modelidir. Schottky eklemi, bir yarıiletken ile bir metal arasında iş fonksiyonlarına ve kullanılan yarıiletkenin tipine bağlı olarak oluşabilir. Yüksek yük toplama verimliliği için organik yarıiletken malzeme ile metal elektrot arasında enerji bariyeri olmaması gerekmektedir (Shaheen vd., 2001; Brabec vd., 2001). Şekil 2.9'da organik güneş gözelerinin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Organik güneş gözeleri çalışma prensibi şeması [10]

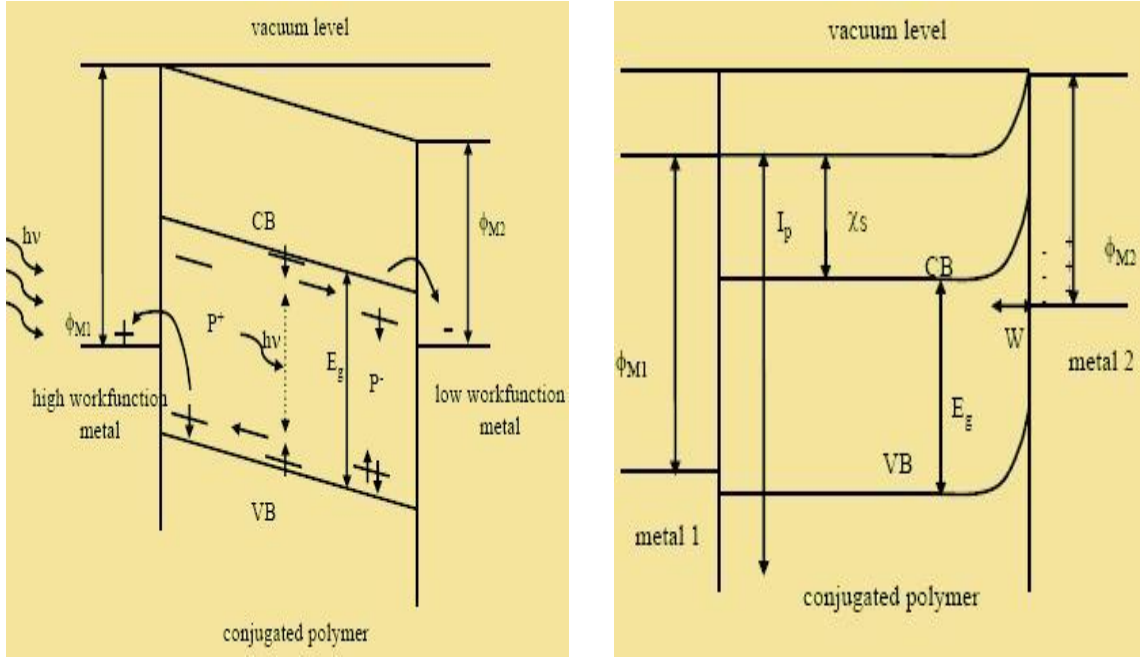
### 2.3.5 Aygıt Yapıları

Organik güneş gözelerinde devre yapısı önemli rol oynamaktadır. Foto uyarılmalar sonucu oluşan eksitonlar verimli yük transferi için birbirinden ayrılmalıdırlar. Bu ayrılmaların donör-akseptör arayüzeyinde ve metal yarıiletken arayüzeyinde gerçekleştiği bilinmektedir. Verimli yük ayrılması için aşağıdaki devre tipleri geliştirilmiştir.

#### 2.3.5.1 Tek Katmanlı

İlk tip güneş gözeleri farklı iş fonksiyonlarına sahip iki metal elektrot arasına sıkıştırılmış tek tabakadan oluşmaktadır. Basit MIM modeline (Şekil 2.10 (a)) göre karanlıkta devrede var olan yük taşıyıcılarının sayısı fazla değildir. Diğer taraftan eğer yarıiletken katıkılanırsa (fotoetkiyle olabilir) yük taşıyıcı konsntrasyonunun artması sonucu bant bükülmesi oluşarak, metal elektrot ve yarıiletken arayüzeyinde schottky kontağı (Şekil 2.10 (b)) oluşturulabilir (Sze, 1981; Hoppe ve Sariciftci, 2004). Bu durumda tüm devrenin kalınlığı boyunca elektrik alan sabittir. Büyük elektrik alanlar eksitonları ayırmaya yeterli olduğundan tek konjuge polimerli devrelerde schottky devresi yük yaratılmasını artıracaktır. Bu konuda yapılan çalışmalar tek tabaka güneş gözelerinin veriminin kısıtlı olduğunu göstermiştir. Tek tabaka bir devrede sadece yükten arınmış bölge veya schottky kontağa yakın yerlerde yaratılan foto uyarılmalar, serbest yük taşıyıcıları oluşumuna neden olacaktır. Bu yüzden de bu devrelerin

verimi oldukça düşüktür. Bu şekilde polifenilenvinilen (PPV) ile yapılan tek tabaka güneş gözeleri beyaz ışık altında %0,1 den düşük verimler vermiştir (Karg vd., 1993; Koyuncu, 2008).



(a)

(b)

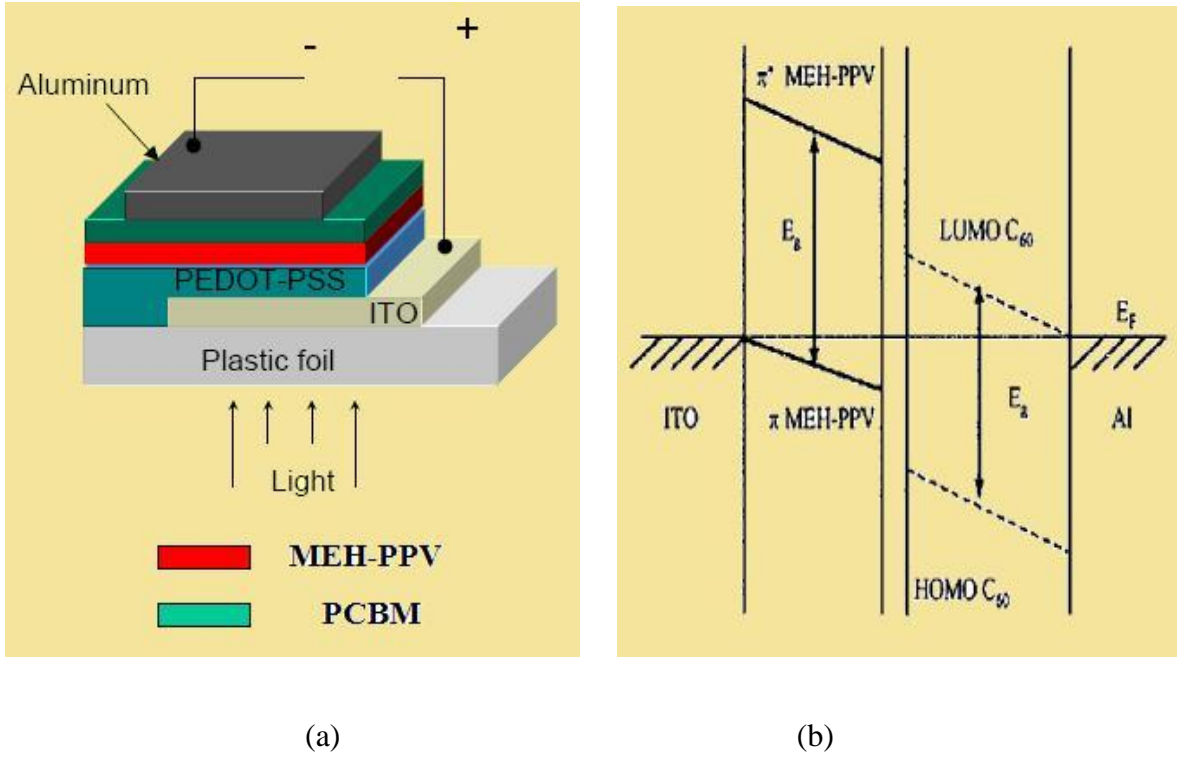
Şekil 2.10 (a) MIM modeli (Brabec 2001), (b) Schottky kontak (Brabec, 2001)

### 2.3.5.2 Çift Katmanlı Heteroeklem

İki katlı heteroeklem devre tipi, tek tabakalarda ortaya çıkan yük yaratılması kısıtlılığını ortadan kaldırmak için tasarlanmıştır. İki katlı bir devre donör ve akseptör malzemeyi üst üste sıkıştırarak oluşturulabilir. Donör ve akseptör arasındaki etkin etkileşim geometrik ara yüzeyde gerçekleşir (Rostalski ve Meissner, 2000; Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004). Çift tabakalı heteroeklem güneş gözelerine geçiş bu teknoloji için en büyük adımlardan biri olmuştur (Tang, 1986). Dönel kaplama tekniği ile kaplanmış poli[2-metoksi-5-(-2'-etil-hekziloksi)-1,4-fenilen vinilen] (MEH-PPV) üzerine C<sub>60</sub>-fulleren'in kaplanmasıyla hazırlanan göze, konjuge polimer güneş gözelerinin ilk uygulamasıdır (Sarıçiftçi vd., 1993). Bu gözede MEH-PPV görünür ışığı soğurmak ve oluşan eksitonların ara yüzeyde ayrışmasından sonra boşlukları İTO elektroda taşınması için kullanılmıştır. Elektron ilgisi konjuge polimerden daha fazla olan C<sub>60</sub>, elektronları kabul eder ve Al elektroda iletir. Bu malzemelerle üretilen ilk göze için verim % 0,1 olarak bulunmuş fakat daha sonra yapılan iyileştirmelerle, % 1,9 gibi, o zamana



göre yüksek bir verim değerine ulaşılmıştır (Koyuncu, 2008). Şekil 2.11’de iki katlı heteroeklem devre tipi şeması ve enerji diyagramı gösterilmektedir.

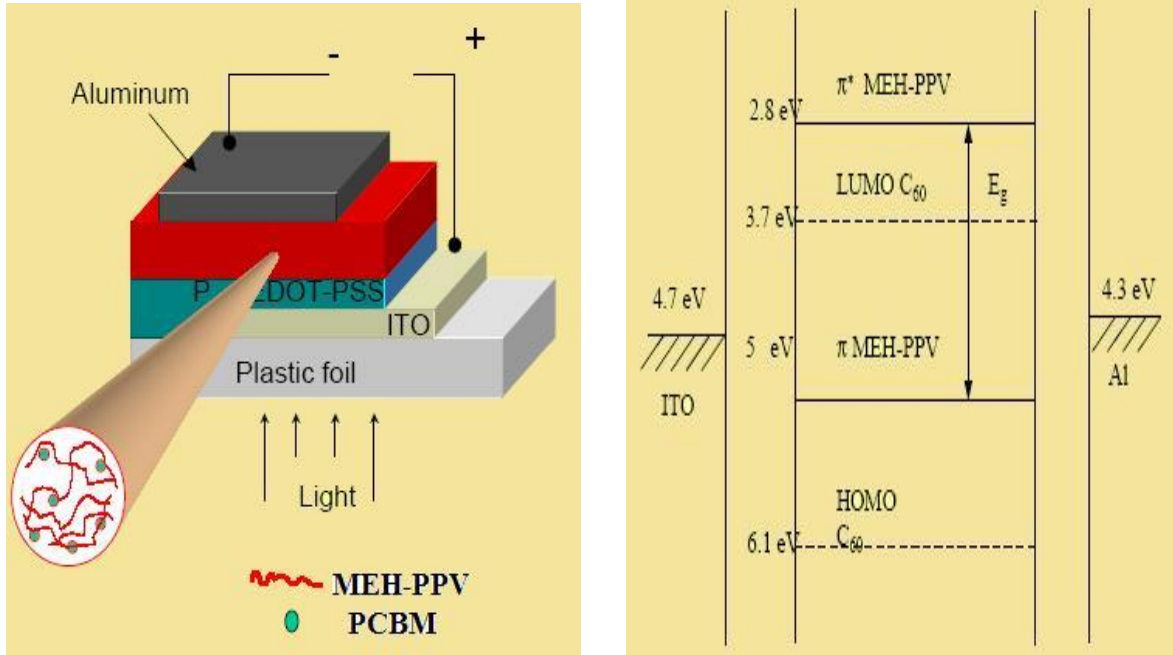


Şekil 2.11 Çift katlı heteroeklem güneş gözelerinin (a) devre şeması, (b) enerji diyagramı (Hoppe, 2004)

### 2.3.5.3 Hacim Heteroeklemi

Bu yöntemde donör ve akseptör malzemeler nanometre ölçeğinde iç içe nüfus eden bir network yada ağ oluşturmak üzere konumlanmıştır (Şekil 2.12). Literatürde bu ifade “interpenetrating network” olarak geçmektedir. Hacim heteroeklemi ile p-n eklemine tüm hacime yayarak temas alanının sayısı artırılmış olur. Polimer/polimer hacim heteroeklemi yöntemi kullanılarak hazırlanan güneş gözelerine ait ilk raporlar, poli(2,5,2',5'-tetrahekziloksi-7,8'-disiyanodi-p-fenilenvinilen) (CN-PPV) (donör) ve MEH-PPV (akseptör) ile yayınlanmıştır (Yu vd., 1995; Halls vd., 1995). Daha sonra bir çok polimer/ polimer kombinasyonları denenmiş fakat performanslar, genelde donör-akseptör bileşimi uygun olmadığından, daha düşük olmuştur (Zhang vd., 2003). Buna göre güneş gözesi yapılacak malzemelerin enerji seviyelerinin birbirleri ile uyumlu olması gereklidir. Donör ve akseptör arasındaki faz ayrımı dolayısıyla morfolojiyi kontrol ederek iç içe nüfuz eden ağ oluşturması sağlanırsa hacimsel malzemenin içinde yüksek ara yüzeysel bölge elde edilir. Hacim heteroeklemlili aygıtlarda morfoloji kontrolünün kritik bir nokta olduğu açıktır (Hoppe ve Sariciftci, 2006). Faz ayrımının derecesi çözücü seçimine, buharlaşma hızına, çözünürlüğe,

donör ve akseptör malzemelerin karışabilirliğine, vs bağlıdır. Şu ana kadar morfolojinin optimizasyonunda en ümit verici sonuçlar yine poli-3-hekzil-tiyofen (P3HT) ( $E_g = 1.8$  eV) ve fulleren türevleri ile elde edilmiştir.



(a)

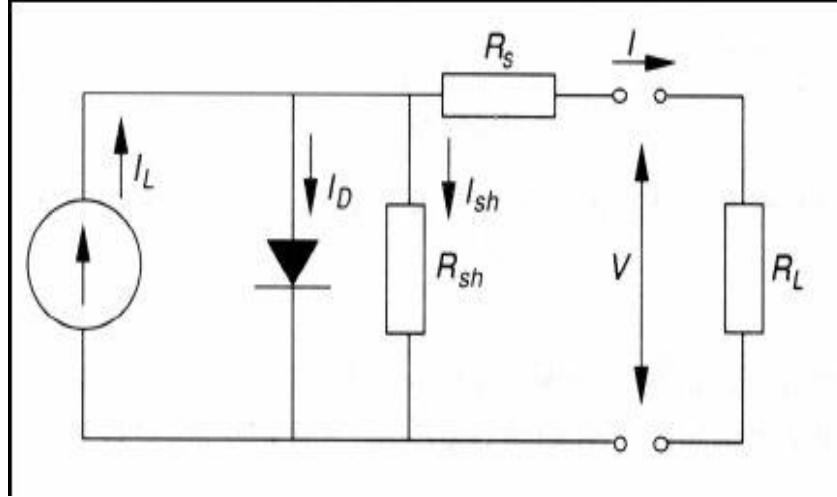
(b)

Şekil 2.12 (a) Hacim heteroeklemine dayalı güneş gözelerinin devre şeması, (b) enerji diyagramı (Brabec, 2001)

## 2.4 Fotovoltaik Karakterizasyon

### 2.4.1 Eş Değer Devre Diyagramı

Bir güneş gözesi; fotonlar tarafından meydana getirilen akımı geçirecek durumda olan bir diyot üzerine paralel bağlı, sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Şekil 2.13'de bir güneş gözesinin eş değer devre diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Bir güneş gözesinin eş değer devre diyagramı (Eke, 2007)

Böyle bir devreden geçen akımın tespit edilebilmesi için beş önemli parametrenin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler:  $I_L$ , ışıkla meydana gelen akım (foto akım),  $I_0$ , karanlık doyma akımı,  $R_S$  seri direnç,  $R_{SH}$  veya  $R_P$  paralel direnç ve  $a$ , düzeltilmiş idealite faktörü olarak adlandırılan bir katsayıdan oluşmaktadır. Düzeltilmiş idealite faktörü:  $N_{CS}$  seri bağlı güneş gözesi veya modül sayısı,  $n$  diyot idealite veya kalite faktörü,  $k_B$  Boltzmann sabiti,  $q$  elektron yükü,  $T_C$  Kelvin olarak etkin güneş gözesi sıcaklığı olmak üzere  $a = N_{CS} n k_B T_C / q$  olarak hesaplanmaktadır. Kirchhoff'un akım kuralına göre seçilen herhangi bir noktada devreden geçen akım için;  $I_L$  güneş gözesinde ışıkla üreyen akımı;  $V$  sürülen  $R_L$  yükü üzerine düşen gerilimi,  $I_D$  diyot akımını,  $I_{SH}$  kaçak akım olmak üzere devreden geçen akım için;

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

yazılabilir.  $I_D$  diyot akımı ve paralel direnç üzerinden geçen  $I_{SH}$  kaçak akım Denklem 2.1'de yerine koyularak devreden geçen akım için;

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{(V + IR_S)}{a}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.2)$$

ifadesi elde edilir.  $I_0$  karanlık doyma akımı, PV diyot yapımında kullanılan malzemelerin band aralığına ve sıcaklığa bağlıdır (Schröder, 1990). Işık altında herhangi bir besleme olmaksızın ve ideal durumda (seri ve paralel direnç etkilerinin olmadığı durum) devreden geçen toplam akım kısa devre akımı olarak ifade edilir ve  $I_{SC}$  ile gösterilir. Kısa devre akımı, ışıkla üreyen akım,  $I_L$  değerine yaklaşık olarak eşittir ve yüzeye gelen ışığın karakteristiği ile orantılıdır. İdeal bir güneş gözesinde seri direncin sıfır, paralel direncin de sonsuz olması beklenir. Fakat gerçek bir güneş gözesinde durum böyle olmayıp, seri direnç sıfırdan büyük, paralel direnç de sonsuzdan küçük olmakta, bu da güç kaybına neden olmaktadır. Kaçak

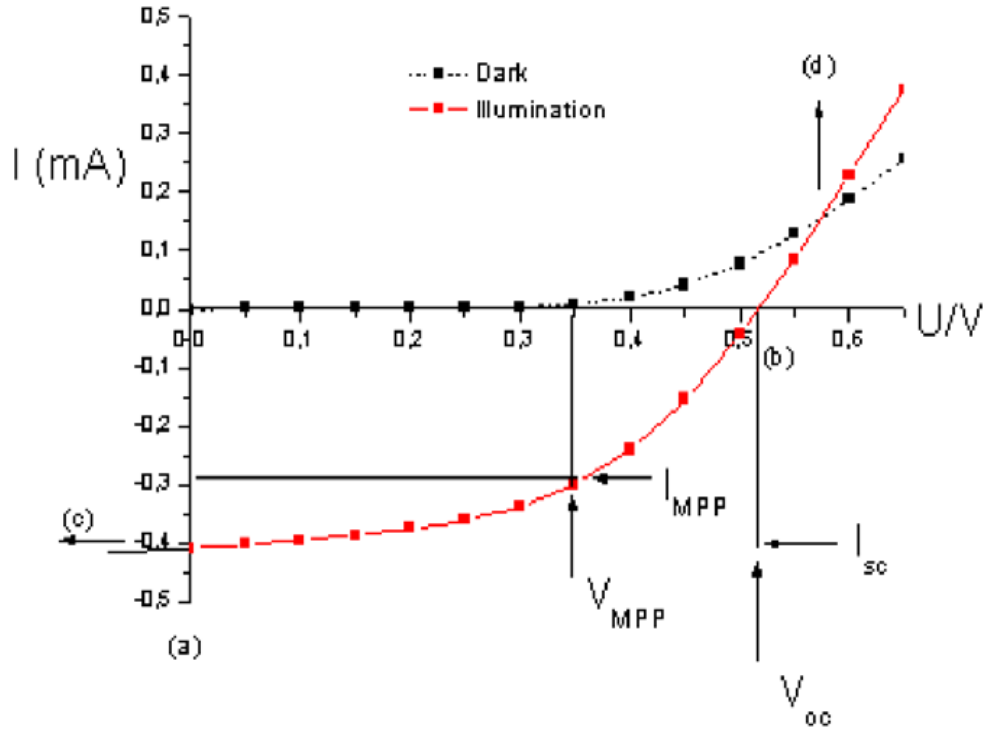
akımlar, uygulanan gerilim ile doğru orantılı olup eşdeğer devrede paralel bir direnç  $R_{SH}$  ile gösterilirler (Eke, 2007).

#### 2.4.2 Güç Dönüşüm Verimi

Organik güneş gözelerini karakterize etmenin yöntemlerinden biri akım- gerilim (I-V) eğrilerini incelemektir. Şekil 2.14’de bir organik güneş gözesinin akım-gerilim eğrisinin lineer ölçekte çizilmiş hali görülmektedir.  $I_{MPP}$  ve  $V_{MPP}$  sırasıyla akım ve gerilim için maksimum güç noktalarını göstermektedir. Bu noktalar da dolgu faktörünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bir güneş gözesinden sağlanan maksimum gücün, göze üzerine gelen maksimum güce oranına güneş gözesinin güç dönüşüm verimi denir ve  $\eta$  simgesi ile gösterilir. Güneş gözesinin maksimum güç çıkışı  $P_{MPP}$  ve optik giriş gücü (atmosfer dışında birim alana düşen güneş enerjisi şiddeti)  $P_{in}$  olmak üzere güneş gözesinin güç dönüşüm verimi,

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} * I_{SC} * FF}{P_{in}} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir (Gunes vd., 2006). Denklem 2.3’e göre verimi etkileyen parametreler olan kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ) ve dolgu faktörü (FF) ne kadar büyükse gözenin o kadar verimli olacağı söylenilebilir.



Şekil 2.14 Bir organik güneş gözesinin akım-gerilim eğrisi (Gunes vd., 2006)

Denklem 2.3'den ve yukarıdaki şekilden de görüldüğü üzere verimi etkileyen 3 temel parametre kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve dolgu faktörü (FF)dür. Bu parametreler kısaca şöyle açıklanabilir.

### 2.4.3 Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )

Işık altında, açık devre geriliminin sıfır olduğu durumda devreden geçen toplam akım kısa devre akımı olarak ifade edilir ve  $I_{sc}$  ile gösterilir. (Denklem 2.4)

$$I_{sc} = I_L(I_{AYDINLIK}) \quad (2.4)$$

### 2.4.4 Açık Devre Gerilimi ( $V_{oc}$ )

Akımın olmadığı durumda devrenin uçları arasında ölçülen gerilim açık devre gerilimidir. Teorik olarak tanımlanırsa, açık devre gerilimi donör malzemenin Homo seviyesi ile akseptör malzemenin Lumo seviyesi arasında meydana gelen fotovoltaj ile orantılıdır.  $V_{oc}$  olarak ifade edilir ve ideal bir güneş gözesinde ( $I_{sc} \gg I_0$ ) olduğundan:

$$V_{oc} = a \ln\left(\frac{I_{sc} + I_0}{I_0}\right) \approx a \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (2.5)$$

olarak gösterilebilir. Denklemden yer alan  $a$ , düzeltilmiş idealite faktörüdür ve  $a = N_C n k_B T_C / q$  olarak hesaplanmaktadır (Eke, 2007).

#### 2.4.5 Dolgu Faktörü (FF)

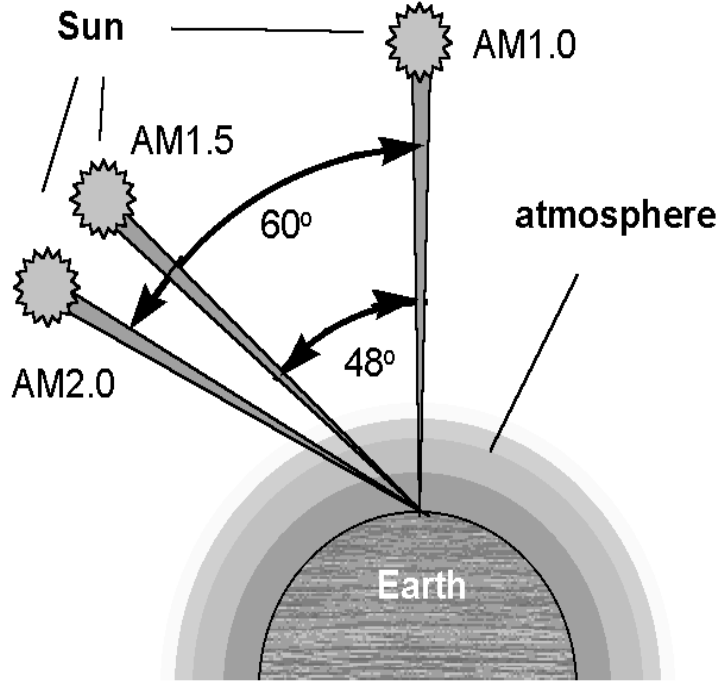
Dolgu faktörü, gözenin bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür ve maksimum gücün, açık devre gerilimi ile kısa devre akımı çarpımına oranıdır.

$$FF = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{I_{SC} * V_{OC}} \quad (2.6)$$

FF değeri, seri ve paralel dirençler tarafından etkilenmektedir. Kullanılan malzemelerden ve elektrotlarla kontakların direncinden kaynaklanan iç direncin mümkün olduğu kadar küçük, paralel direncin ise mümkün olduğu kadar yüksek olması beklenmektedir (Zafer, 2006).

#### *Standart Şartlar*

Organik güneş gözeleri ile ilgili çalışan her grubun birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edebilmesi için güç dönüşüm verimini hesaplamada kullanılan parametrelerin ölçümü yapılırken standart şartlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu şartlara göre hazırlanan güneş gözesinin karakterize ederken ortam sıcaklığı oda şartlarında 25°C olmalıdır. Akım-gerilim eğrilerini görmek için gözeye gönderilen ışığın şiddeti 100 mW/cm<sup>2</sup> ya da 1000 W/m<sup>2</sup> olmalıdır ve ışığın spektral dağılımı 1.5 hava kütlesi (AM) değerinde olmalıdır. Atmosferde ışığın kırılması, ışığın geometrik yola göre biraz daha uzun olan çembersel bir yol izlemesine neden olur. Bu yol arttıkça, Hava Kütlesi hesaplanırken bu yol gözönüne alınmalıdır. [11] Hava Kütlesi (AM), güneş ışınlarının atmosferden geçerken aldığı yola eşittir. (Şekil 2.15) 1,5 AM hava kütlesi spektral dağılımı, standart test şartı olarak belirlenmiştir ve güneş ışınları  $\theta=48.2^\circ$  açıyla gelirken sahip oldukları spektral güç dağılımıdır (Zafer, 2006).



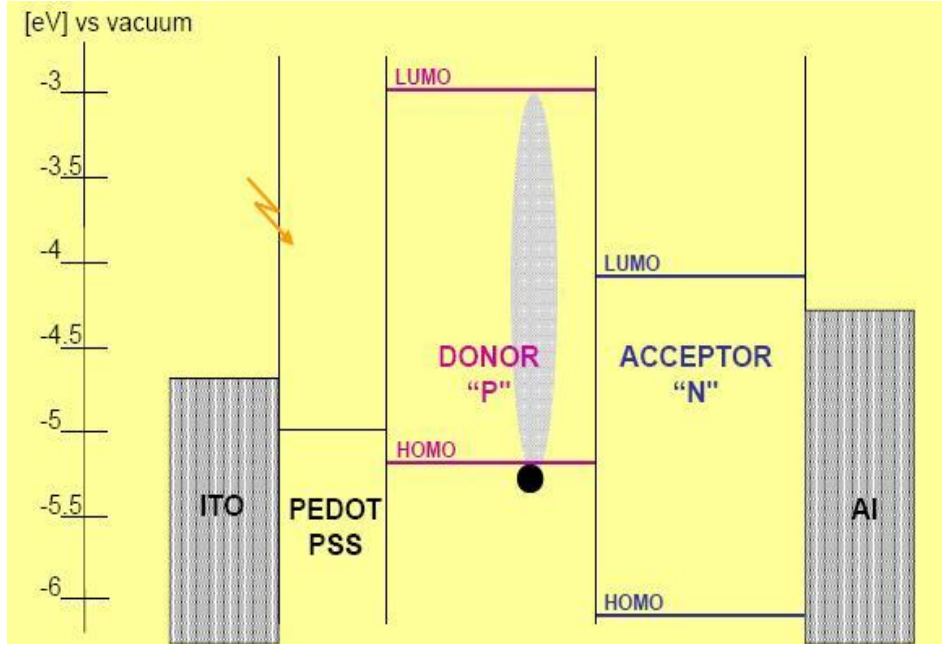
Şekil 2.15 Hava Kütlesi (AM) ifadesinin şematik gösterimi (Klaus, 2000)

## 2.5 Organik Güneş Gözelerini Etkileyen Kritik Parametreler:

### 2.5.1 Nanomorfoloji ve Analiz Yöntemleri

Hacim heteroeklemi yöntemi biri donör (genellikle konjuge polimer) diğeri akseptör olan iki organik malzemeden oluşur. Donör ve akseptör malzemelerin organik güneş gözelerinde verimli olarak kullanılabilmeleri için birbirlerine uygun enerji seviyelerine sahip olmalıdırlar.

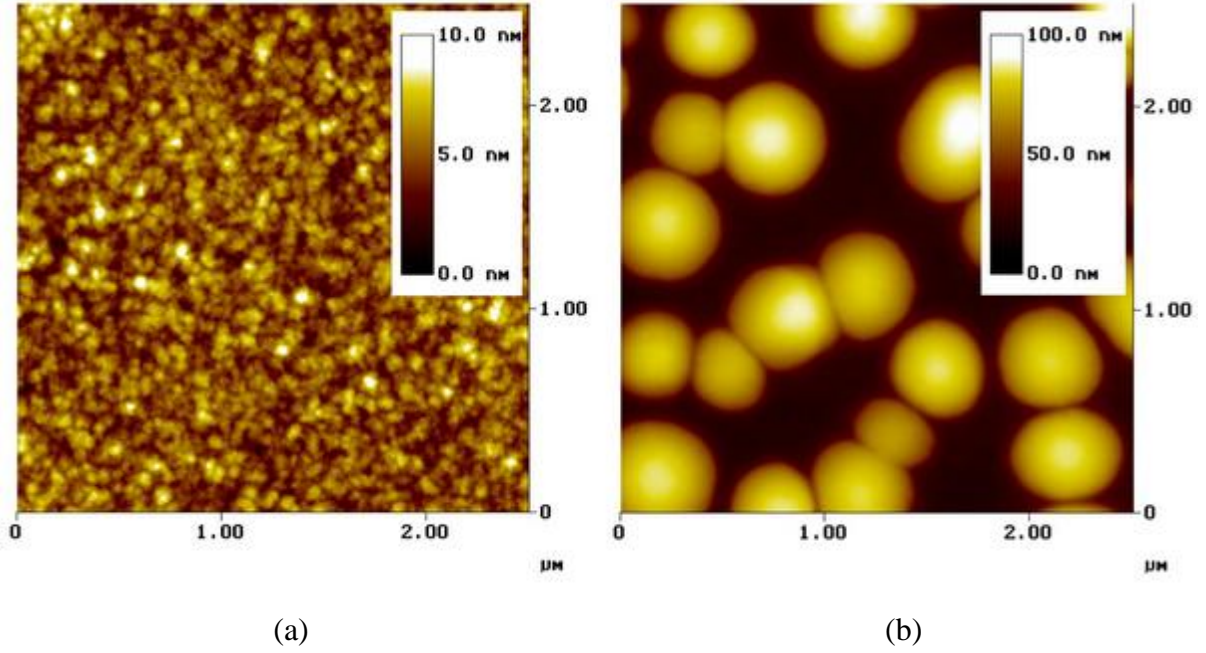
(Şekil 2.16)



Şekil 2.16 Organik güneş gözelerinin verimli çalışması için gerekli olan, donör ve akseptör malzemelerin birbiri ile uyumunun enerji-bant diyagramındaki görüntüsü (Sariciftci, 2010)

Devre performansı açısından donör ve akseptör bileşenlerin fiziksel etkileşimi de çok önemlidir. Bunu da morfoloji belirler. Aktif tabakanın morfolojisi fulleren (akseptör) ve polimerin özelliklerine bağlıdır. İki bileşenin birbirine karışabilirliğine, çözücü türüne, donör-akseptör konsantrasyonuna ve oluşan çözeltinin kaplama tekniğine bağlıdır (Barrau vd., 2009). Şekil 2.17’de MDMO-PPV:PCBM (1:4) oranında, klorobenzende ve toluende dönel kaplama yöntemi kullanılarak hazırlanmış iki örnek için yüzey resimleri görülmektedir. Tarama boyutu her iki film içinde  $2.5 \mu\text{m}$ ’dir. Toluenli film klorobenzene kıyasla 10 kat fazla yükseklik skalasına sahiptir. Resimlerden de anlaşılacağı üzere toluende hazırlanmış örneğin yüzeyinde faz ayrımları meydana gelmiştir. Klorobenzen de hazırlanan örnekte ise daha homojen bir yapı görülmektedir.

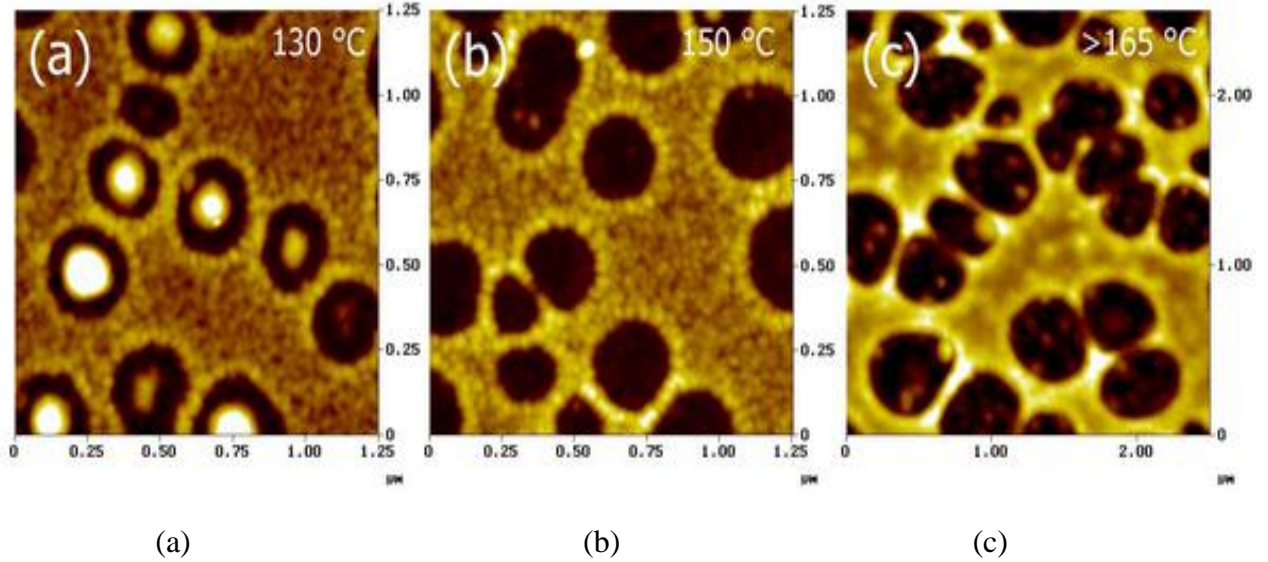




Şekil 2.17 AFM ile yüzeyi taranmış MDMO:PPV/PCBM (1:4) oranı için (a) klorobenzen içerisindeki yüzey görüntüsü, (b) toluen içerisindeki yüzey görüntüsü (Hoppe, 2004)

Konjuge polimerler ve fulleren türevleri içeren organik güneş gözelerinin verimi moleküler morfolojiden etkilenir. Uygun çözücü seçimi verimi önemli ölçüde artırdığı literatürde gösterilmiştir (Hoppe vd., 2004). Polimer zincirlerinin konformasyonu, organik çözücünün seçimi, polimer konsantrasyonu ve dönel kaplama işleminin dönme hızına bağlıdır. Sonuçta oluşan morfoloji hem malzeme hem de devre karakteristiklerini önemli ölçüde etkiler (Liu vd., 2001). Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi polimer işlem koşullarına oldukça bağlıdır. Aromatik olmayan çözücüler, aromatik çözücülerin kullanıldığı duruma göre daha düşük akıma neden olabilir. Sonuçların farklı olmasının sebebi farklı çözücülerin farklı polimer morfolojisine sebep olmasıdır. Yapılan çalışmalarda farklı PCBM konsantrasyonlarının faz ayrımına yol açtığı gözlenmiştir. Örneğin; PCBM konsantrasyonu %50'den %67 ve daha üzerine çıkarıldığı zaman nanoölçekte faz ayrımı gözlenmiştir (Van Duren vd., 2004). Sıcaklık işlemi uygulanması da morfolojiyi değiştirebilir (Van Bavel vd., 2009). Organik güneş gözelerinde kullanılan polimerler içerisinde polifenilenvinilen (PPV)'den başka kullanılan en önemli polimerlerden bir tanesi (Poli(3-hekzil)tiyofen) P3HT'dir. Bu malzeme kullanılarak oluşturulan güneş gözelerinde yüksek verim elde etmenin bir yolu güneş gözeleri hazırlandıktan sonra sıcaklık işlemi uygulanmasıdır. Sıcaklık uygulandığı zaman morfoloji değişecektir. Burada serbest hacim azalarak ve çözücü buharlaşması sırasında ara yüzeydeki kusur yoğunluğunun azalması ve zincirler arası etkileşimin güçlendirilmesiyle sağlanabilir. Sıcaklık işlemi uygulanmasının kristalliği

artırdığı gözlenmiştir (Van Bavel vd., 2009). Ayrıca sıcaklık işlemi uygulanmasıyla polimer filmdeki oksijen içeriği azaltılabilir. Literatürde farklı sıcaklık değerleri bulunmasına karşın en sık kullanılanı 110°C'de 10 dakikadır. Ayrıca sıcaklık işlemi fotoiletkenliği artırır. Bu işlemler sırasında oluşabilecek faz ayrımının derecesi ve uzunluğunun polimer güneş gözelerinin performansına etkisi mevcuttur. Faz ayrımı için kritik uzunluk eksiton difüzyon uzunluğudur. Çok fazla faz ayrımlarının olması göznenin verimini düşürebilir, fakat aynı zamanda çok homojen sistemlerinde çok iyi çalışmadığı gözlenmiştir. Şekil 2.18'de MDMO:PPV (1:4) oranında toluen içerisinde hazırlanmış güneş göznesinin farklı sıcaklık değerlerindeki yüzey görüntüsü gösterilmektedir. Yüzey görüntü resimleri AFM (Atomik Kuvet Mikroskobu) kullanılarak, tapping modda alınmıştır. Resimlerden de görüldüğü üzere 150°C 'ye kadar nano boyuttaki topaklanmalar gözlenebilirken 165°C'den sonra gözlenmemiştir (Hoppe, 2004).



Şekil 2.18 MDMO-PPV : PCBM 1 : 4 oranında toluen'de hazırlanmış filmin a)130 °C b)150°C c)165°C sıcaklık uygulandıktan sonraki yüzey görüntü resimleri

AFM, TEM ve SEM yüzey morfolojisini karakterize etmek için en sık kullanılan yöntemlerdir. Kısaca çalışma prensiplerinden aşağıda bahsedilmektedir.

**Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM);** AFM ile malzeme yüzeyi analizleri yapılmaktadır. AFM'in en önemli özelliği alışılmış elektron mikroskop tekniklerinde kaçınılmaz olan özel örnek hazırlanması vakum şartlarına ihtiyaç duyulmadan incelenen örnek yüzeyinin moleküler veya atomik seviyede 3 boyutlu görüntü verebilmesidir. AFM iğne örnek üzerinde hareket eder ve iğne-örnek arasındaki itme ve çekme kuvvetlerini ölçer. İğne cantilever denilen yaya tutturulmuştur. Lazer kaynağından gelip cantileverden yansıyan ışın pozisyona

duyarlı fotodedektöre gelip iki fotodiyotun sinyali arasındaki fark, lazer spotunun pozisyonunu belirler. Bu cantilleverin yükseklik bilgisi bilgisayara gönderilip x ve y pozisyonuna karşı kaydedilir. 3 boyutlu veri kullanılarak topografik görünüm elde edilir. 3 farklı çalıştırma yöntemi vardır. Bunlar contact mode, non-contact mode ve tapping mode olarak sıralanmaktadır. Contact mode; bu yöntem geliştirilen ilk yöntemdir. Bu madde cantileverin ucundaki iğne (tip) ile yüzey arasında hafif bir fiziksel dokunma vardır. İyonik itme başrol oynamaktadır. Non-contact mode; bu yöntem de atomik kuvvetlerin yardımı ile cantileverin eğilmesinden örneğe dokunmadan topografik görüntü oluşturulur. Bunun için iğne örnekten 50-150 Å uzakta tutulur. Bu uzaklıkta prob ve örnek arasında wander walls kuvvetleri etkin olmaya başlayacaktır. Bu kuvvetler göreceli olarak zayıf olduğu için iğne saniyede 100.000 defa titreşerek bu etkileşmenin saptamasını kolaylaştırır. Bu yöntemin en büyük avantajı iğnenin hasar görmemesi ve yumuşak materyalin daha doğru ölçülmesidir. Tapping mode; bu yöntemde de cantiveller kendi rezonans frekansında salınım yapar. Bu salınım fotodedektör tarafından ölçülür. Örneğe yaklaştığı zaman yüzey ile etkileşim yüzünden enerji kaybederek probun salınım şiddeti azalır. Geri döngü mekanizması bu şiddeti sabit tutmak için yüzey üzerindeki probun yüksekliğini değiştirir. Buradan bulunabilecek değişim bize etkileşim miktarında bilgi verecektir. Son iki yöntem düşük kuvvet uygulanması nedeni ile dna protein kompleksleri için daha uygundur.

**Geçirmeli (Transmission) Elektron Mikroskobu (TEM);** Geçirmeli elektron mikroskobu, elektron demetini çok ince numuneden geçirilidiği ve numuneden geçerken numune ile etkileştiği bir mikroskobik tekniktir. Numuneden geçen elektronlardan bir görüntü oluşturulur, büyütülür, objektif merceğine ekrana düşürülür. TEM’de bu ekran genelde floresandır. TEM’de ki resmin kontrast ışık mikroskobu resminde ki gibi değildir. Kristal malzeme elektron demeti ile geçen demetin şiddetinin geçtiği malzemenin hacim ve yoğunluğundan etkilenmesine rağmen absorpsiyon yolundan çok kırınım (difraksiyon) yolu ile etkileşir. Kırınım miktarı, kristaldeki atom dizilimlerinin elektron demetine göre yönlenmesine bağlıdır. Belli bir açıda elektron demetli gelen demetin ekseninden oldukça şiddetli bir şekilde kırınıma uğrar, diğer açılarda ise oldukça fazla oranda geçebilir. Modern TEM’ler numuneyi eğebilecek özel numune taşıyıcıları ile donatılmıştır (özel kırınım koşulları için). Numunenin altında yerleştirilmiş delikler kullanıcıya belli yönde kırınıma uğramış elektronları seçme kolaylığı sağlar. Yüksek kontrast resimler mikroskobun optik ekseninden sapan elektronları bloke ederek oluşturulabilir. Bu da delikleri sadece saçılmamış elektronların geçmesine izin verecek şekilde yerleştirmek ile olur. Böylece kristal yapısı hakkında bilgi edinmeyi sağlayan elektron şiddetinde değişim yaratır. En güçlü kırınım

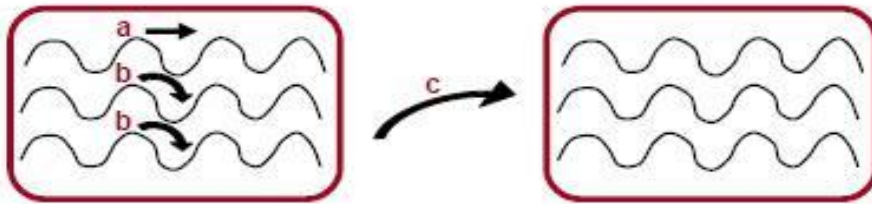
kontrastlı TEM’lerde kristal yapısı yüksek çözünürlüklü geçirmeli elektron mikroskobu (HRTEM) ile sağlanabilir.

**Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM);** SEM, numunenin yüzeyi üzerine yüksek enerjili elektron demeti odaklayarak ve gelen elektron numune yüzeyi arasındaki etkileşimin sinyallerini saptayarak resimlerini çeken bir elektron mikroskobudur. SEM’de toplanan sinyal tipleri değişebilir ve ikincil elektron, x-ışınları ve geri saçılmış elektron içerir. SEM’de bu sinyaller numunenin yüzeyine çarpan sadece öncül ışıktan değil numunenin yüzeyinin yakınındaki başka etkileşimlerden dolayı da meydana gelmektedir.

### 2.5.2 Yük Taşınması

Organik yarıiletkenlerin mobilitesi ve yük taşınması devre performansı açısından oldukça önemlidir. Organik malzemelerin yük taşınma mekanizmasını açıklayan çeşitli modeller mevcuttur. Bu modeller arasında bant taşıma ve sıçrama (hopping) mekanizması bulunmaktadır (Brütting, 2005; Ortmann vd., 2010). Organik yarıiletkenler gibi pek çok sistem için hangi tip taşınmanın geçerli olduğunu belirlemek kolay değildir. Çok yüksek olmayan sıcaklıklarda oldukça saf moleküller kristallerde bant tipi taşıma mevcuttur (Brütting, 2005). Organik kristallerde düşük sıcaklıklarda bant taşınmasının baskın olduğu oda sıcaklığında ise sıçrama mekanizmasının geçerli olduğu gösterilmiştir (Ortmann vd., 2010). Bant tipi taşınmanın karakteristik bir özelliği olarak sıcaklık bağımlılığı düşük sıcaklıklara kadar indikçe etkisini gösterir. Tuzakların varlığında, tuzak olduğu durumda bu davranıştan sapmalar görülebilir. Amorf organik katılarda sıçrama tipli taşıma ağır basmaktadır (Brütting, 2005). Sıçrama mekanizması ile elektronik yükün hareketi üç şekilde olmaktadır. (Şekil 2.19)

1. Kristal bir yapıda zincir üzerinde,
2. Kristal bir yapıda zincirden zincire,
3. Amorf bir bölgede zincirden zincire.



Şekil 2.19 Polimer zincirinde elektronik yükün hareketi a) Zincir üzerinde yükün taşınması b) Zincirler arasında yükün taşınması c) Partiküller arasında yükün taşınması (Türkaslan, 2006)

Organik güneş gözesi malzemeleri üzerine yapılan taşıma ve mobilite araştırmaları organik malzemelerin düzensizliği konusunda hemfikirlerdir. Kristal örgüye düzensizlik sokmak ve kristal simetrisini bozmak dalga fonksiyonlarının lokalize olmasına ve yasak enerji aralığına enerji durumlarının oluşmasına yol açmaktadır. Literatürde organik güneş gözesi malzemelerinin düzensiz olduklarından ve düzensiz ortamdaki yük taşıyıcılarının fiziksel teorilerini içeren mekanizmaların göz önüne alınması gerektiğinden sıkça bahsedilmektedir (Tessler vd., 2009). Yük taşınımını karakterize eden anahtar nicelik mobilitedir. Mobilite, dış potansiyel yokluğunda difüzyon bazlıdır ve basit bir difüzyon denklemi ile ifade edilir. Dış elektrik alan uygulanması yük taşıyıcılarının sürüklenmesine sebep olur. En iyi durumda bile organik yarıiletkenlerin mobiliteleri inorganik fotovoltaiik malzemeleri yük taşıyıcı mobilitelerinden 10, 20 kat daha düşüktür. Düşük mobilite elektronik durumların bağımsız bir molekülün veya molekülün bir bölümü üzerinde lokalize olmasından kaynaklanmaktadır. Dengeli elektron ve delik mobilitesi devre performansı açısından önemlidir. Yük taşıyıcı mobiliteleri TOF, CELIV, FET, SCLC, I-V, TRMC gibi farklı yöntemler ile karakterize edilir (Coropceanu vd., 2007; Karl, 2003). Makroskobik uzunluklar boyunca ( $\approx 1$  mm.) mobilite ölçen metodlar malzemenin saflığına ve düzenine bağlıdır. Mikroskobik boyutlar için bunlara daha az bağlılık gösterir. Konjuge polimerlerde ki yük taşıma mobilitelerini artırmanın bir yolu onları akseptör malzeme ile karıştırmaktır. Polimer-polimer veya polimer-molekül karışımlarında yük taşınımını etkileyecek faktörler arasında malzemenin morfolojisi görülebilir (Frost vd., 2006). Polimerin zinciri sıkı olduğunda “homofilik” olur ve mobilite daha yüksektir. Diğer durumda ise “heterofilik” olur. Özet olarak düşük mobiliteler yük rekombinasyonu olasılığını artırdığından organik güneş gözelerinin verimini kısıtlar, farklı mobilite ölçüm metodları farklı mobilite sonuçlarına yol açabilir. Farklı molekül ağırlığı, PCBM’in varlığı, sıcaklık uygulaması gibi işlemler elektron ve delik mobilitelerini etkiler. Dolayısıyla taşıyıcı mobiliteleri için uygun sonuçlar aynı konfigürasyonda ve organik güneş gözelerinin çalışma şartlarına uygun koşullar altında karakterize edilmelidir.

## **2.6 Organik Güneş Gözelerinin İyileştirilmesi İçin Kullanılan Yöntemler**

Günümüzde geniş alanda verimli güneş gözesi elde etmek için, araştırılan farklı stratejiler olarak düşük bant aralıklı polimerler, yeni elektron akseptörleri, yeni donör malzemeleri, yeni devre konseptleri ve farklı bant aralığına sahip çoklu tabakalı tandem güneş pilleri karşımıza çıkmaktadır. Bu stratejiler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Polimer/fulleren organik güneş gözelerinde verimi kısıtlayan parametrelerden bir tanesi düşük akım yoğunluğu olup, foto aktif tabakanın soğurmasıyla güneş emisyonunun az oranda

çakışmasından kaynaklanmaktadır. Bir çok konjuge polimer, 1.9 eV'dan daha büyük bant aralığına sahiptir ve sonuç olarak 650 nm'nin altında ki dalgalı boylarında ışığı soğurur. C<sub>60</sub>/fulleren türevleri UV bölgesinin dışında çok düşük soğurma katsayısına sahiptir (Wienk vd., 2006). Güneş ışığını değerlendirebilmek için düşük bant aralıklı malzemelere ihtiyaç vardır. Düşük bant aralıklı polimer sentezlemenin bir yoluda yüksek iyonizasyon potansiyeline sahip donör birimleri ile yüksek elektron afinitesine sahip akseptör birimlerinin seçimine dayanır (Bundgaard ve Krebs, 2007; Chen ve Cao, 2009). Scharber vd., verimin %10'un üzerine çıkabileceğini tahmin etmişlerdir. Bu durum 1.74 eV'den daha küçük bant aralığına sahip polimerlerle sağlanabilir (Scharber vd., 2006). Polimer/fulleren güneş gözelerinde elektron akseptörü olarak kullanılan malzeme foto aktif tabakanın %80'ni oluşturan PCBM'dir. PCBM organik güneş gözelerinde yüksek elektron mobilitesi ve çözünürlüğü sebebiyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte görünür bölgede oldukça düşük soğurma katsayısına sahiptir. PCBM'in içerisindeki C<sub>60</sub> kısmı daha az simetrik bir fulleren ile değiştirildiğinde ışık soğurmada artış gözlenmiştir. Bu nedenle PC<sub>70</sub>BM sıklıkla kullanılmaktadır (Park vd., 2009). Wong vd., organo-metalik poliyinler kullanılarak organik güneş gözeleri üretilebileceğini göstermiştir (Cravino ve Sariciftci, 2002). Bu yeni yaklaşım konjuge polimerlerin içerisinde metallerin konulmasını içermektedir. Bu ilginin sebebi, organik omurga içerisinde ağır metallerin konulmasının elektronik ve optik özelliklere büyük etkisi vardır. Bu tip malzemelerin fotovoltaiik özellikleri Cravino ve Sariciftci'nin 2002'deki yayınında anlatılmıştır. Hacim heteroeklemlı güneş gözelerinde temel problemlerden biri donör ve akseptör arasındaki faz ayrımıdır. Özellikle de yüksek oranda fulleren içeren güneş gözelerinde bu faz ayrımını engellemek için D- $\pi$ -A yaklaşımı kullanılarak üretilen konjuge ko-polimerler üretilmiştir (Peng vd., 2008). Bu çalışmada polimer yapısındaki donör içeriğini azaltarak V<sub>OC</sub>'nin artırılabilceği gözlenmiştir. Fakat verim hala yeterince yüksek değildir. Organik güneş gözelerinde diskotik (sıvı kristal) malzemeler oldukça ilgi çekmiştir. Hess vd., fenil içeren hekza-peri, hekza-benzo koronenleri (HBC<sub>S</sub>) donör malzeme olarak organik güneş gözelerinde kullanılmışlardır (Hesse vd., 2010). Yeni malzeme üretilmesinin yanı sıra, yeni devre konseptleri açısından yapılan ilk çalışmalardan bir tanesi polimer/polimer güneş gözeleridir. Bu tip güneş gözeleri polimer/fulleren hacim heteroeklemi güneş gözelerine benzerdir. Fakat bu tip güneş gözelerinde iki konjuge polimer karıştırılmıştır. Polimer/fulleren hacim heteroeklemi güneş gözelerine göre polimer/polimer güneş gözeleri daha az ilgi çekmiştir.

Diğer bir yöntem ise tandem güneş pilleri oluşturmaktır. Organik molekül ve polimerlerin sınırlı soğurma aralığından dolayı ışığın sadece küçük bir kısmı tekli hacim heteroeklemi

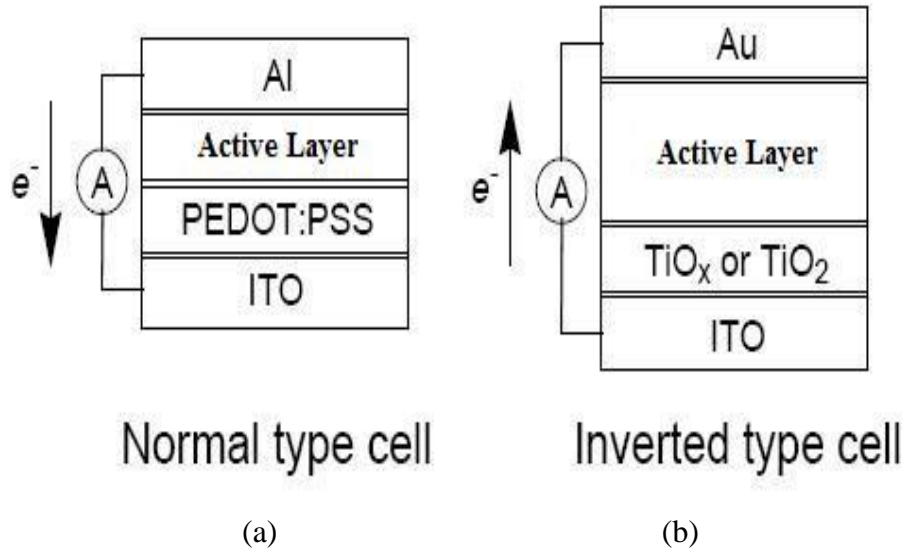
güneş gözelerinde soğurulmaktadır. Bir çok organik malzemenin düşük yük taşıyıcı mobilitesine sahip olması aktif tabakanın kalınlığını kısıtlamaktadır. Her biri özel soğurma aralığına sahip çoklu tabakadan oluşan tandem veya çok eklemli güneş gözeleri bu sorunu ortadan kaldırabilir. Hadipour vd., (2008) bu konuda yapılan çalışmaları yeni yayınlanan bir derleme makalesinde anlatılmıştır. Diğer bir ilginç yöntem ise hibrid güneş göze konseptidir. Bir hibrid güneş gözesi biri donör diğeri akseptör organik ve inorganik malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşurlar. İlk tip hibrid güneş gözeleri inorganik nanoparçacıklarla yarıiletken polimerleri karıştırarak hazırlanmıştır. Nanoparçacıkların boyutlarını değiştirerek bant aralıkları ayarlanabilir. Dolayısıyla soğurma aralıkları düzenlenebilir Bu konuda pek çok çalışma yapılmasına rağmen morfoloji kontrolü ve ligand (yüzey aktif madde) değişimi hala hibrid güneş gözelerinde kısıtlayıcı faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Nanoyapısal iyileştirme için kullanılan yöntemlerden bir tanesi de tersine çevrilmiş hacim heteroeklemi devre konseptidir.

## **2.7 Tersine Çevrilmiş Hacim Heteroeklemine Dayalı Güneş Gözeleri**

Organik güneş gözelerinde verimi artırmanın yöntemlerinden biri de alternatif devre modelleri uygulamalarıdır. Bunlardan biri “Tersine Çevrilmiş Hacim Heteroeklemine Dayalı Güneş Gözeleri” (Inverted Bulk-Heterojunction Solar Cells) dir. Normal devre tipli organik güneş gözelerinde sıklıkla Al metal anot elektrot olarak kullanılmaktadır. (Şekil 2.20(a)) Fakat burada zamana karşı dayanıklılık ile ilgili bir problem vardır. Çünkü Alüminyum (Al) yüzeyi hava ortamında kolaylıkla oksidize olup yalıtkan olan  $Al_2O_3$ 'e dönüşmektedir. Son zamanlarda, bu problemi çözebilmek için bir çok grup güneş gözelerinde Al elektrot yerine korozif olmayan (non-corrosive) elektrot uygulamasını geliştirmiştir. Işıkla meydana gelen elektronlar dış devrede ITO kontakdan Au (Altın) kontaga doğru akmaktadır. Burada normal devre tipine göre tersine çevrilmiş tipte bir devre modeli yer almaktadır. (Şekil 2.20(b)) Bu yüzden literatürde “inverted type solar cells” olarak adlandırılmaktadır. (Kuwabara vd., 2009) Çünkü aktif tabaka içinde meydana gelen elektron-delik çiftleri elektrik alan içinde serbest hale geldikten sonra normal devre tipinin tam tersi olacak şekilde uygun kontaklara doğru hareket etmektedirler (Shaheen, 2007).

Bir çok optoelektronik devrede, organik ışık veren diyodlar da dahil olmak üzere ön kontak transparan iletken, indium tin oksit (ITO) gibi yüksek iş fonksiyonuna sahip pozitif elektrot olarak görev alan metalden oluşmaktadır. Arka elektrot ise yapısal güçlü elektrik alanlar elde etmek için düşük iş fonksiyonuna sahip negatif elektrot olarak yer alan metallere meydana gelmelidir. Tipik polimer-fulleren karışımı hacim heteroeklemine

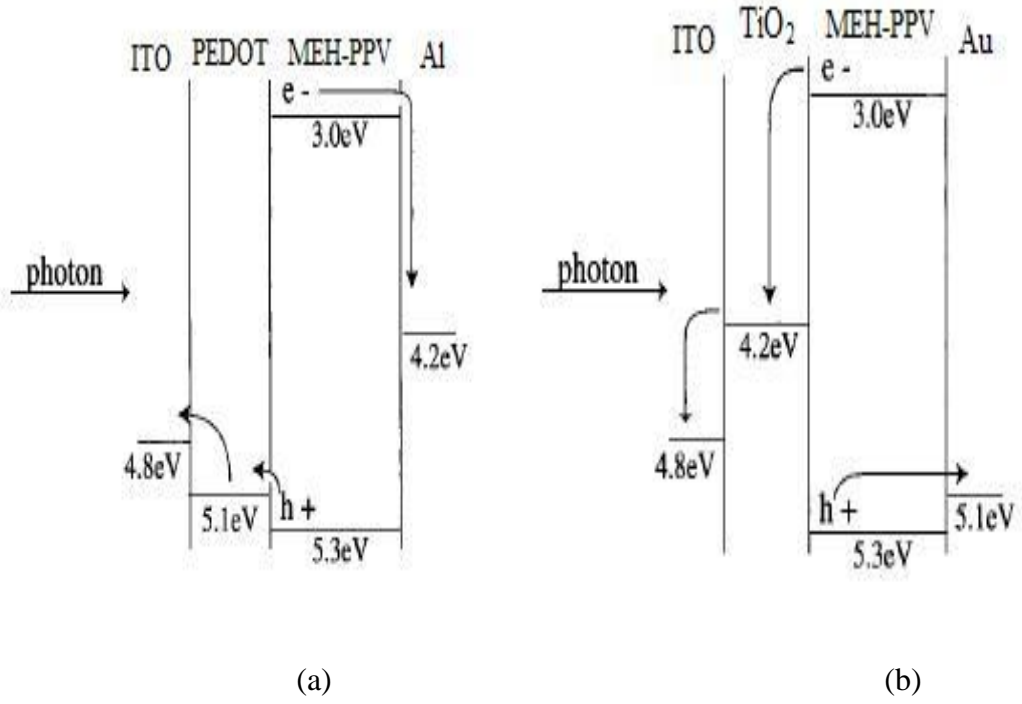
dayalı güneş gözelerinde meydana gelen elektronlar, arka elektrot tarafından ve deliklerde ön kontak tarafından toplanmaktadır. Fakat, aktif tabaka ile ITO arasına eklenen bir boşluk engelleyici tabaka ile devre tersine çevirilebilir. Burada bahsedilen ara tabaka  $TiO_2$  (Takahashi vd., 2005; Waldauf vd., 2006) ve ZnO (Takahashi vd., 2005; Olson vd., 2005; Takanezawa vd., 2007) gibi malzemelerden meydana gelmektedir. Böylece foto uyarılma ile meydana gelen elektronlar kullanılan malzemenin iletkenlik bandını basamak olarak kullanarak ITO'ya ulaşabilmektedir ve arka elektrot delikleri toplayan pozitif elektrot olarak yer almaktadır (Shaheen, 2007). (Şekil 2.21(b)) Bu çalışmada kullanılan kompakt  $TiO_2$  tabakası, sistemde gözenin kısa devre olmasını önleyen “boşluk engelleyici tabaka (hole blocking layer)” olarak görev yapmaktadır. Bu tabakanın tamamen gözeneksiz ve mümkün olduğunca ince olması gerekmektedir.



Şekil 2.20 (a) Hacim heteroeklemine dayalı normal devre modeli, (b) Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı devre modeli ( Kuwabara vd., 2009)

Bu devre modelinde elektron-delik çiftlerinin serbest yük taşıyıcıları haline geldiğinde enerji seviyelerine uygun olacak şekilde ilgili kontaklara doğru hareketini gösterebilmek için, literatürde daha önce çalışılmış olan MEH-PPV polimeri kullanılarak hazırlanan tek katmanlı güneş gözesinin enerji diyagramından yararlanılmıştır (Breeze vd., 2001). (Şekil 2.21)





Şekil 2.21 (a) Normal devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagramı resmi, (b) Tersine çevrilmiş devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagramı resmi (Breeze vd., 2001)

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Tersine Çevrilmiş Güneş Gözelerinin Hazırlanması

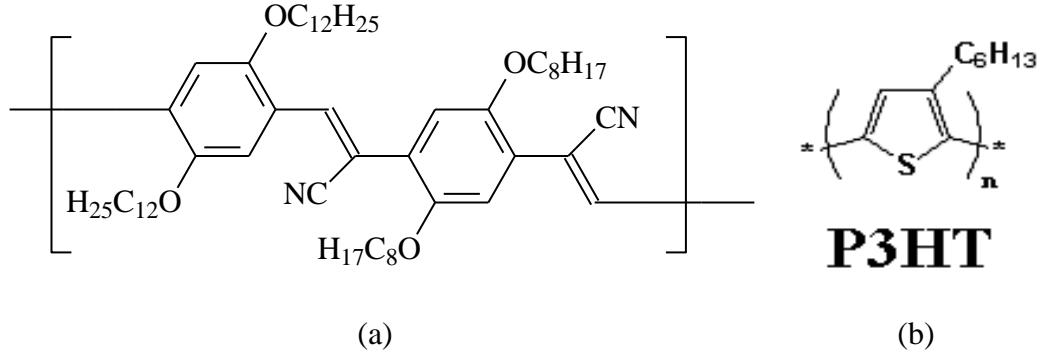
Bu çalışmada ticari olarak satın alınan indium tin oksit (ITO) kaplı camlar kullanılmıştır. Altlık olarak kullanılan ITO kaplı camların boyutu  $1.5 \text{ cm}^2$  ve direnç değeri  $< 15 \Omega\text{cm}^{-2}$  civarındadır. Bu camların bir kısmı, sistemin kısa devre olmaması için asit çözeltisi hazırlanarak aşındırma (etching) işlemine tabi tutulmuştur. Aşındırma işlemi için  $\text{HCl}_{\text{konz}}:\text{HNO}_{3\text{konz}}:\text{H}_2\text{O}$  (4.6:0.4:5) şeklinde ifade edilen oranlarda çözelti haline getirilerek numune üzerinde  $\sim 30$  dk. bekletilerek uygulanmıştır. ITO kontağı oluşturan kısma asit çözeltisinin gelmesini engellemek için scotch bant kullanılmıştır. Aşındırma işleminden sonra ITO kaplı camlar sırasıyla aseton, isopropanol ve destile su ile ultrasonik banyoda yıkayıp temizlenerek azot tabancası yardımıyla kurutulmuştur.

Daha sonra gözeneksiz (compact)  $\text{TiO}_2$  tabakası literatürde belirtilen şekilde titanium tetra isopropoxide başlatıcı kullanılarak hazırlanmıştır (Kavan ve M. Graetzel, 1995). Gözeneksiz (compact)  $\text{TiO}_2$  tabakası temizlenmiş ITO kaplı numunelerin üzerine, kaplanmak istenen yüzeyler açık bırakılıp, kaplanması istenmeyen kısımlar ise scotch bant ile kapatıldıktan sonra Şekil 3.1’de gösterilen dönel kaplama (spin coating) yöntemi ile 8000 rpm hızında,  $\sim 100$  nm kalınlığında filmler elde edecek şekilde kaplanmıştır. Dönel kaplama işleminden sonra numunelere kül fırında  $450^\circ\text{C}$  de 30 dk. boyunca ısıl işlem uygulanmıştır.



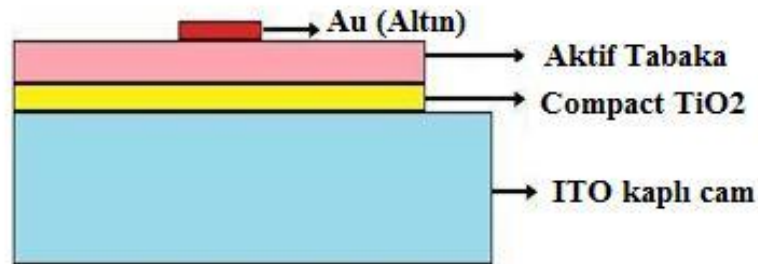
Şekil 3.1 Dönel kaplama (spin coating) cihazı

Bu çalışmada kullanılan akseptör özelliğe sahip poly(2,5-didodecyloxy-1,4-phenylene-2-cyanovinylene-2,5-dioctyloxy-1,4-phenylene-1-cyanovinylene) (DE119) molekülü, Avusturya Johannes Kepler Üniversitesi'nde Organik Güneş Gözeleri Enstitüsü'nde çalışan Priv. Doz. Dr. Daniel Egbe'den alınmıştır. Şekil 3.2(a)'da bu molekülün kimyasal yapısı gösterilmektedir. Donor malzeme olarak kullanılan, kimyasal yapısı Şekil 3.2(b)'de gösterilen Poli(3-hekzil)tiyofen (P3HT) polimeri ticari olarak satın alınmıştır.



Şekil 3.2 (a) (poly(2,5-didodecyloxy-1,4-phenylene-2-cyanovinylene-2,5-dioctyloxy-1,4-phenylene-1-cyanovinylene)) (DE119) molekülünün kimyasal yapısı (b) Poli(3-hekzil)tiyofen (P3HT) polimerinin kimyasal yapısı

Tersine çevrilmiş devre tipli hacim heteroeklemine dayalı güneş gözelerine ait devre şeması Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Bu çalışmada, aşağıdaki devre şemasına göre hazırlanan güneş gözelerindeki aktif tabakanın farklı organik çözücüler içerisinde, farklı donör-akseptör oranlarının bileşiminin güneş gözesi performansı üzerindeki değişimi incelenmiştir.



Şekil 3.3 Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı güneş gözelerine ait devre şeması

Aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:DE119 karışımları akseptör katkısının oranı artırılarak diklorobenzen, toluen ve klorobenzen olmak üzere 3 ayrı çözücü içerisinde hazırlanmıştır. Aktif tabakayı oluşturan, DE119 akseptörü ve P3HT polimer karışımı ile hazırlanan çözeltilerin karışım oranları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. Çizelge 3.1'de gösterilen

oranlarda birbiriyle karıştırılan malzemelere her bir organik çözücünden 1 ml eklenerek çözeltiler hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1 P3HT/DE119 karışım oranları

<b>P3HT</b>	<b>DE119</b>	<b>ORAN</b>
<i>6 mg</i>	<i>6 mg</i>	<i>1:1</i>
<i>6 mg</i>	<i>12 mg</i>	<i>1:2</i>
<i>6 mg</i>	<i>18 mg</i>	<i>1:3</i>
<i>6 mg</i>	<i>24 mg</i>	<i>1:4</i>

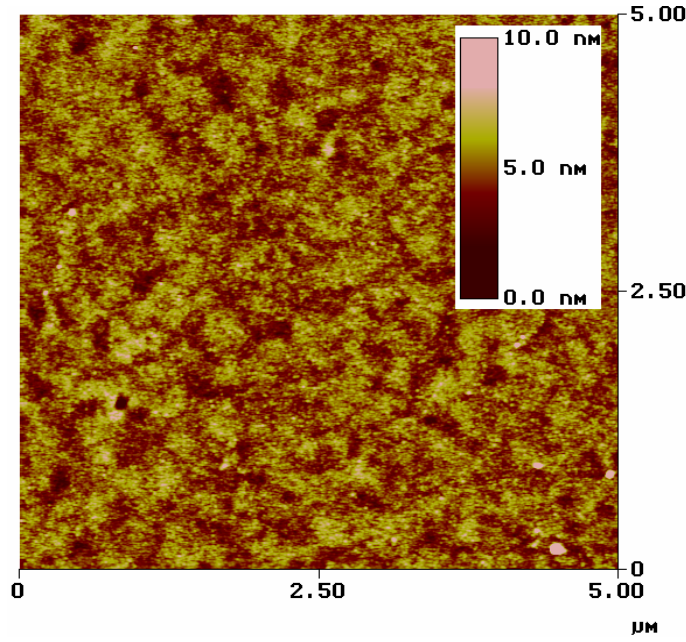
Referans örnekler için çözelti oranı 10mg P3HT/1ml organik çözücü içerisinde olacak şekilde sırasıyla, diklorobenzen, toluen ve klorobenzen çözücüleri kullanılarak ayrı ayrı hazırlanmıştır. Bu karışımların her biri TiO<sub>2</sub> kaplı örneklerin üzerine 50'şer µl damlatılarak kurumaya bırakılmıştır. Bu yöntem literatürde "drop casting" olarak geçmektedir. Kaplanan aktif tabakadan sonra örneklerin üzerine maske yardımıyla vakum buharlaştırma sisteminde 100nm altın (Au) kontak kaplanmıştır. Fotovoltaik özellikleri araştırılan güneş gözeleri konfigürasyonu ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT:DE119/Au ve sadece P3HT içeren referans örnekler ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT/Au olmak üzere iki şekilde hazırlanmıştır.

## **3.2 Deneysel Sonuçlar**

### **3.2.1 Diklorobenzen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar**

#### **3.2.1.1 TiO<sub>2</sub> Elektrotların Morfolojisi**

Bu çalışmada kullanılan gözeneksiz (compact) TiO<sub>2</sub>'nin morfolojik yapısı atomik kuvvet mikroskopu (AFM) ile karakterize edilmiştir. TiO<sub>2</sub> elektrotlar 450°C 'de 30dk. sinterlenmiştir. Bu uygulama ile parçacıklar arasında elektriksel kontak sağlanmış olur ve parçacıklar arasında kalan kalıntılar buharlaşmaktadır. AFM resmi sinterleme prosedürü uygulandıktan sonra alınmıştır. Şekil 3.4'de gözeneksiz TiO<sub>2</sub>'nin AFM resmi görülmektedir.

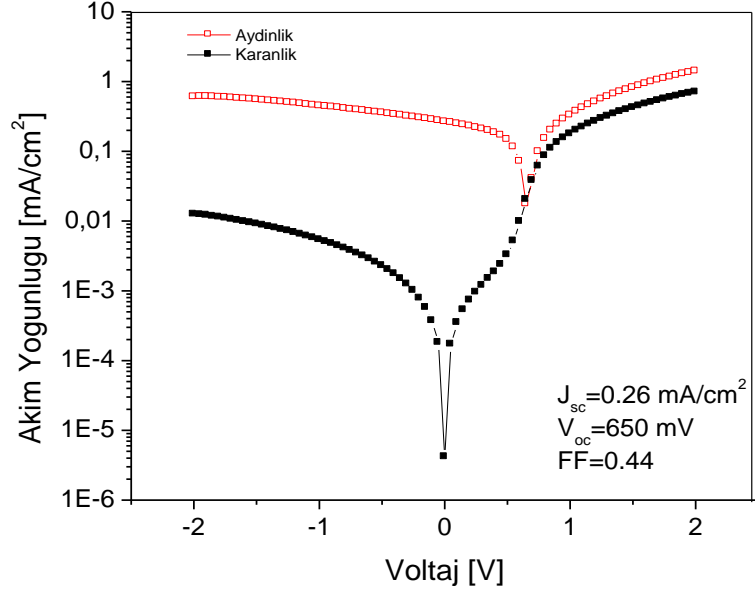


Şekil 3.4 Gözeneksiz TiO<sub>2</sub> AFM Resmi

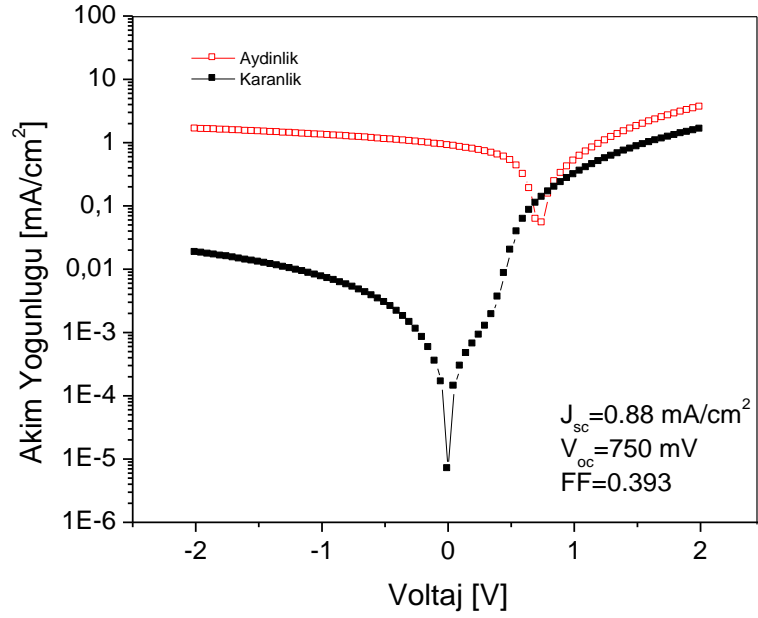
### 3.2.1.2 Akım-Gerilim Karakterizasyonu

Güneş gözelerinin fotovoltaik özellikleri güneş ışığını simüle eden solar simülatör altında hava kütlesi 1.5, 100 mW/cm<sup>2</sup> şiddet değerinde, güneş ışığı ITO yüzey tarafından gelecek şekilde karakterize edilmiştir. Daha önce bahsedilen prosedüre göre hazırlanan güneş gözelerinde TiO<sub>2</sub> tabakası boşluk engelleyici tabaka (hole blocking layer) olarak geçmektedir (Bach vd., 1998). ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT:DE119/Au konfigürasyonuna göre hazırlanan güneş gözelerinde aktif tabakayı oluşturan P3HT:DE119 çözeltisi 1:1, 1:2, 1:3 ve 1:4 oranlarında diklorobenzen (dcb) içerisinde hazırlanmıştır. ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT/Au konfigürasyonuna göre hazırlanan referans örnekler ise sadece gözeneksiz TiO<sub>2</sub> ve P3HT içermektedir. Referans örneklerde aynı çözücü içerisinde hazırlanmıştır. Referans örnek ve 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında hazırlanan örneklerin aydınlık ve karanlık, akım-gerilim eğrileri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Buna göre, referans güneş gözesi, J<sub>sc</sub>=0.26 mA/cm<sup>2</sup>'lik kısa devre akım yoğunluğuna, V<sub>oc</sub>=650 mV açık devre gerilimine ve FF=0.440'lık bir dolgu faktörüne sahiptir. (Şekil 3.5 (a)) P3HT:DE119 karışımı kullanılarak hazırlanan örneklerde 1:1 oranı için, akım yoğunluğu J<sub>sc</sub>=0.88 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi V<sub>oc</sub>=750 mV ve dolgu faktörü FF=0.393 olarak bulunmuştur (Şekil 3.5 (b)). Şekil 3.6 (a)'da gösterilen 1:2 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu J<sub>sc</sub>=0.46 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi V<sub>oc</sub>=750 mV ve dolgu faktörü FF=0.380 olarak bulunmuştur. Şekil 3.6 (b)'de gösterilen 1:3 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu J<sub>sc</sub>=0.54 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi V<sub>oc</sub>=850 mV ve dolgu faktörü FF=0.307 olarak bulunmuştur. Şekil 3.6 (c)'de gösterilen 1:4 oranında

hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.57 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=850 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.296$  olarak bulunmuştur.

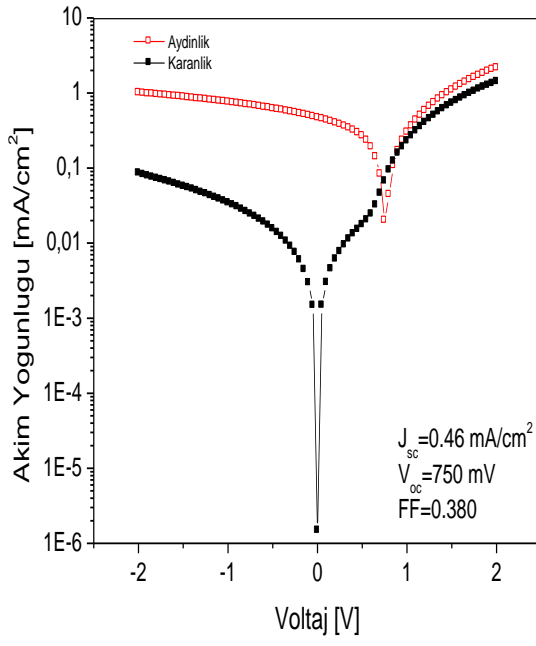


(a)

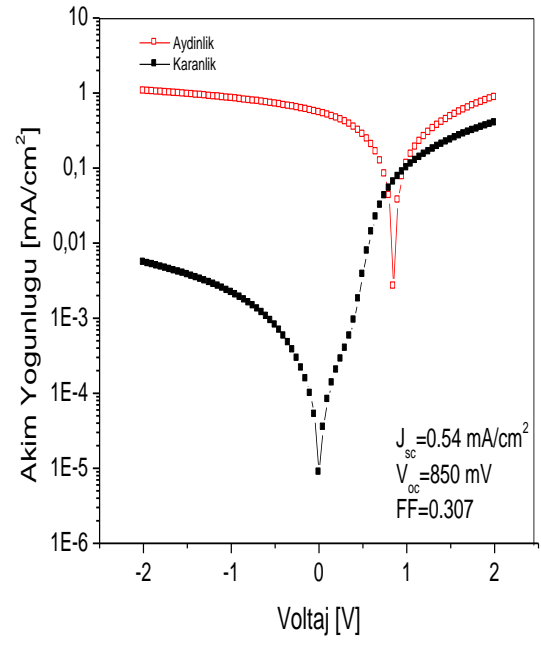


(b)

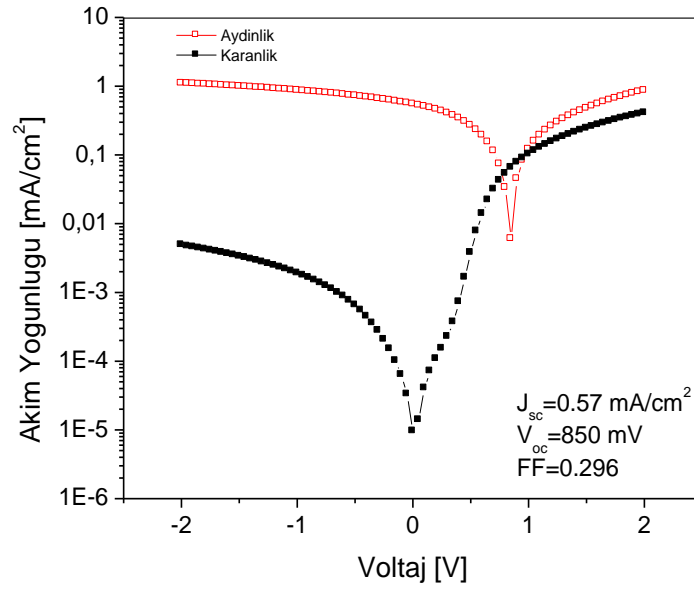
Şekil 3.5 Güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) referans örnek  $\text{TiO}_2/\text{P3HT}/\text{DCB}$ , (b) 1:1 oranında hazırlanmış  $\text{P3HT}:\text{DE119}/\text{DCB}$  güneş gözesi



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.6 P3HT:DE119/DCB güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) 1:2 (b) 1:3 (c) 1:4 karışım oranları

### 3.2.1.3 Kuantum Verimi (IPCE)

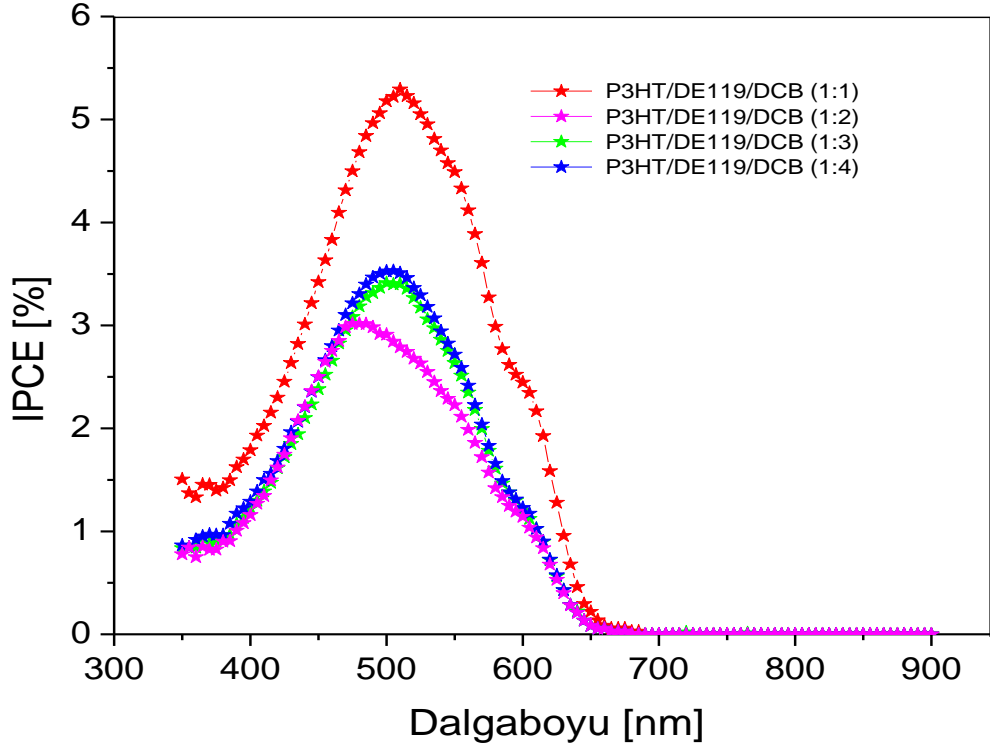
Düşük ışınım şiddetindeki monokromatik ışık altında gelen fotonun ne kadarının elektrona dönüştüğünün ölçütü olan IPCE (Incident Photon to Current Conversion Efficiency) özellikle organik fotovoltaiik sistemlerde çok sık ölçülen ve sistemin çalışması hakkında çok önemli bilgiler veren bir tekniktir ve kısa devre şartları altında ölçüm yapılır. IPCE, belirli bir dalga boyunda ( $\lambda$ ), güneş gözesinin aktif yüzeyi üzerine gelen foton sayısına ( $n_{\text{foton}}(\lambda)$ ) karşılık, meydana gelen elektron-boşluk çifti sayısı ( $n_{\text{elektron}}(\lambda)$ ) oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$IPCE = \frac{n_{\text{elektron}}(\lambda)}{n_{\text{foton}}(\lambda)} = \frac{\frac{I(\lambda)}{e}}{\frac{P_{\text{ışık}}(\lambda)}{h \cdot \nu}} = \frac{I(\lambda)}{\lambda \cdot P_{\text{ışık}}(\lambda)} \cdot \frac{hc}{\lambda} = \frac{I_{SC} * 1240}{P_{in} * \lambda_{gelen}} \quad (3.1)$$

$I(\lambda)$ , güneş gözesinin,  $\lambda$  dalga boyundaki ışık altında vermiş olduğu akım,  $P_{\text{ışık}}(\lambda)$  ise,  $\lambda$  dalga boyunda elde edilen güçtür. IPCE ölçümleriyle devrede var olan organik yapıların toplam foto-akım yaratılmasına katkısı incelenebilir. IPCE spektrumunun şekli fotovoltaiik devrenin hangi kısmının aktif olduğu hakkında bilgi verir.

Şekil 3.7’de P3HT:DE119 karışımı güneş gözelerinin diklorobenzen çözücüsü içerisinde farklı DE119 oranlarını içeren IPCE spektrumu gösterilmektedir. Buna göre 400-650 nm dalgaboylarında, 1:1 oranı için %5.5 civarında bir foto-akım katkısı gözlenmiştir. IPCE sonuçlarının akımlarla doğru orantılı olduğu görülmektedir.





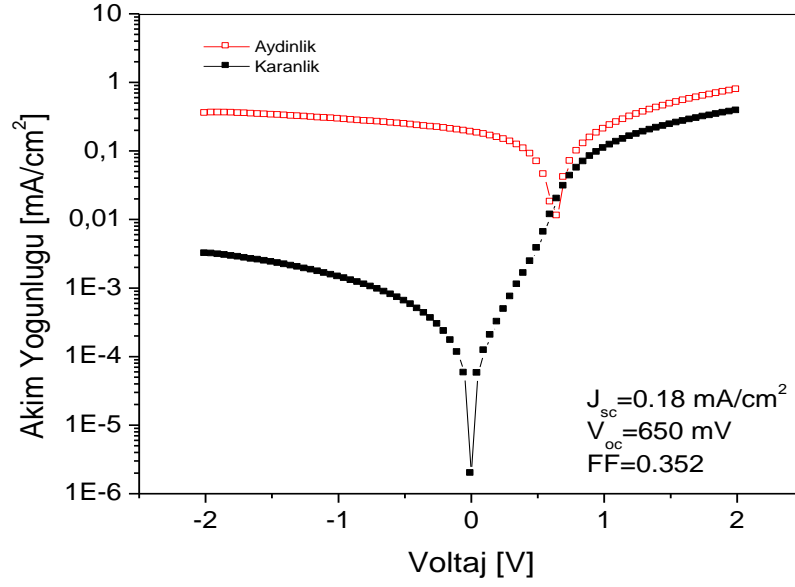
Şekil 3.7 P3HT:DE119/DCB farklı DE119 oranlarını içeren güneş gözelerinin IPCE spektrumu

### 3.2.2 Toluen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

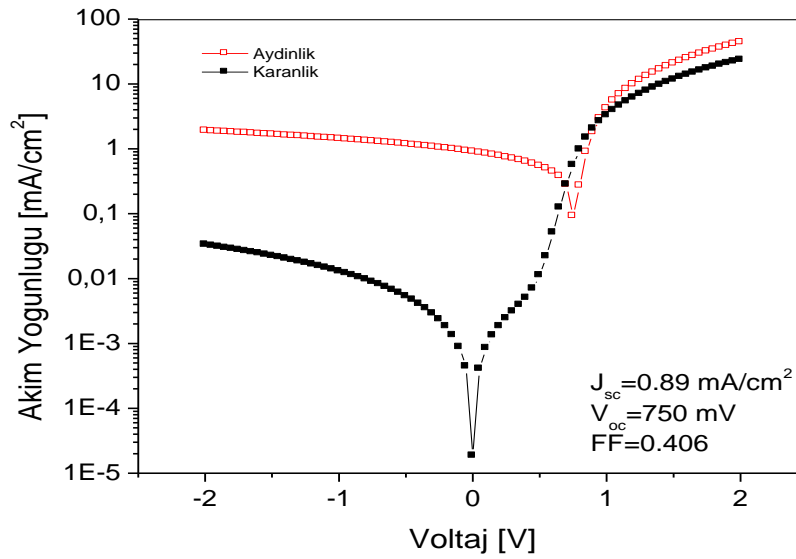
#### 3.2.2.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu

ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT:DE119/Au konfigürasyonuna göre hazırlanan güneş gözelerinin aktif tabakayı oluşturan P3HT:DE119 çözeltisi 1:1, 1:2, 1:3 ve 1:4 oranlarında toluen (tl) çözücü içerisinde hazırlanmıştır. ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT/Au konfigürasyonuna göre hazırlanan referans örnekler ise sadece gözeneksiz TiO<sub>2</sub> ve P3HT içermektedir. Referans örnek ve 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında hazırlanan karışımların akım-gerilim eğrileri karanlık ve aydınlık için, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Buna göre, referans güneş gözesi,  $J_{sc}=0.18 \text{ mA/cm}^2$ 'lik kısa devre akım yoğunluğuna,  $V_{oc}=650 \text{ mV}$  açık devre gerilimine ve  $FF=0.352$ 'lık bir dolgu faktörüne sahiptir (Şekil 3.8 (a)). P3HT:DE119 karışımı kullanılarak hazırlanan örneklerde sırasıyla 1:1 oranı için, akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.89 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=750 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.406$  olarak bulunmuştur (Şekil 3.8 (b)). Şekil 3.9 (a)'da gösterilen 1:2 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.85 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=750 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.429$  olarak bulunmuştur. Şekil 3.9 (b)'de gösterilen 1:3 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.47 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi

$V_{oc}=650$  mV ve dolgu faktörü  $FF=0.163$  olarak bulunmuştur. Şekil 3.9 (c)'de gösterilen 1:4 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.56$  mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi  $V_{oc}=700$  mV ve dolgu faktörü  $FF=0.346$  olarak bulunmuştur.

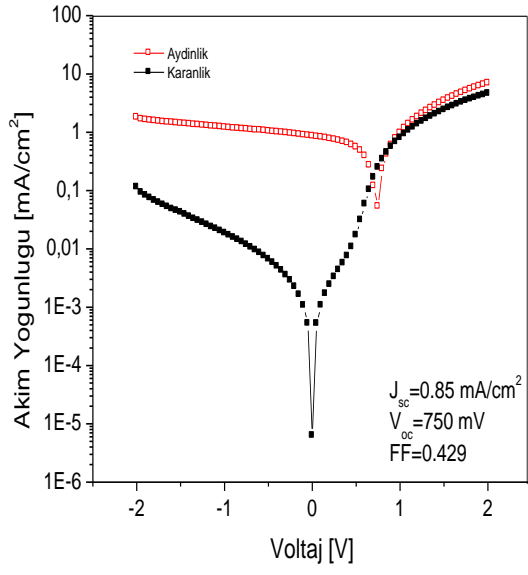


(a)

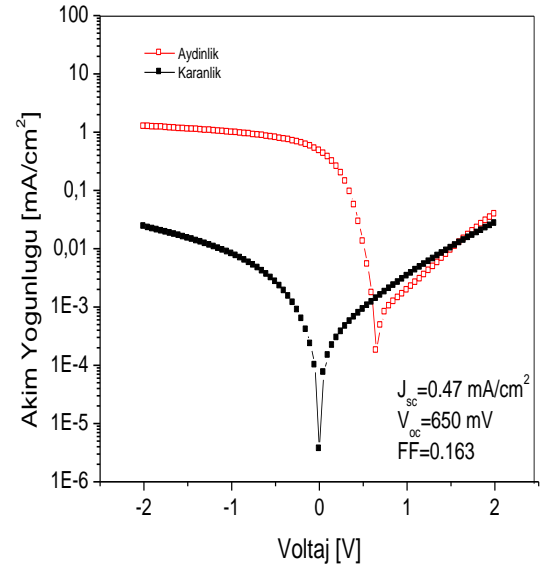


(b)

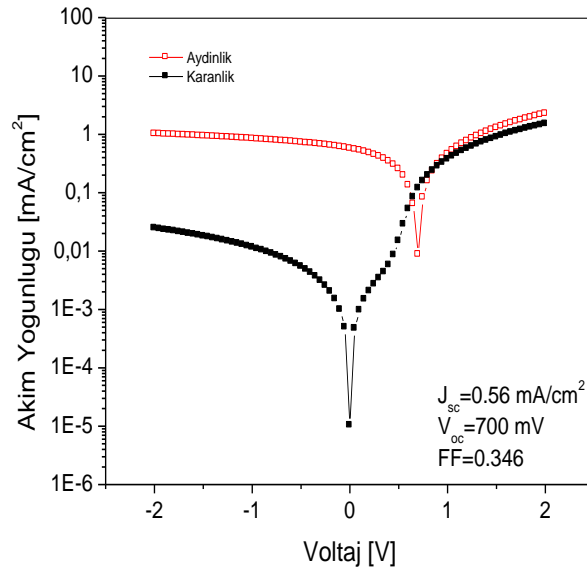
Şekil 3.8 Güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) referans örnek  $TiO_2/P3HT/TL$ , (b) 1:1 oranında hazırlanmış  $P3HT:DE119/TL$  güneş gözesi



(a)



(b)

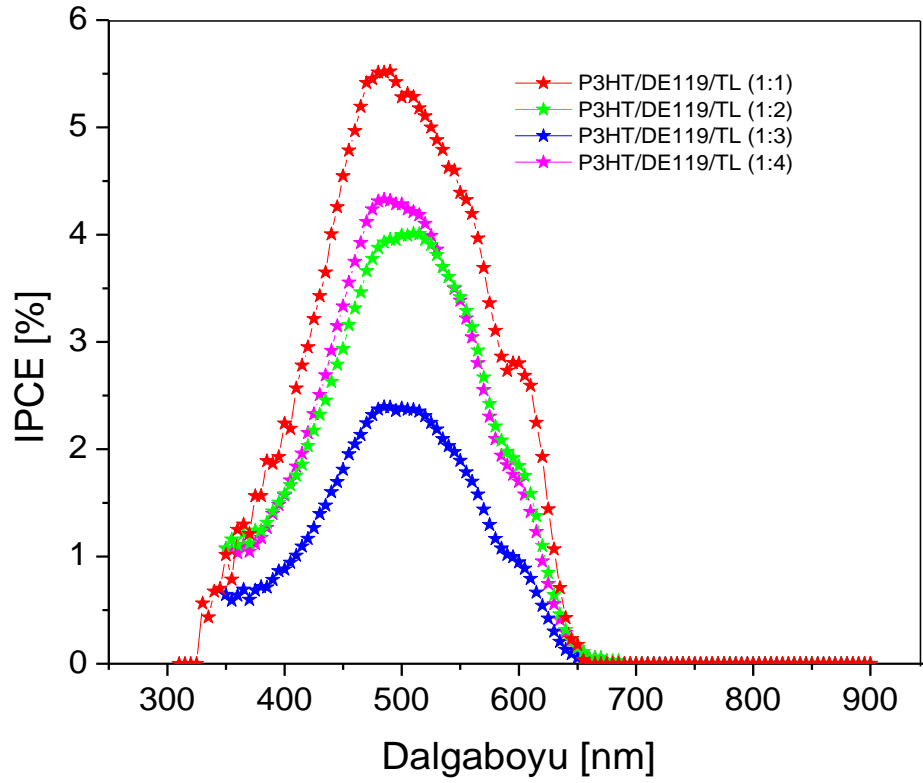


(c)

Şekil 3.9 P3HT:DE119/TL güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) 1:2 (b) 1:3 (c) 1:4 karışım oranları

### 3.2.2.2 Kuantum Verimi (IPCE)

Şekil 3.10, P3HT:DE119 güneş gözelerinin toluen çözücüsü içerisinde farklı DE119 oranlarını içeren IPCE spektrumunu göstermektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi IPCE spektrumunun şekli fotovoltaik devrenin hangi kısmının aktif olduğu hakkında bilgi verir. Buna göre 350-650 nm dalgaboylarında, 1:1 oranı için yine %5.5 civarında bir foto-akım katkısı gözlenmiştir.

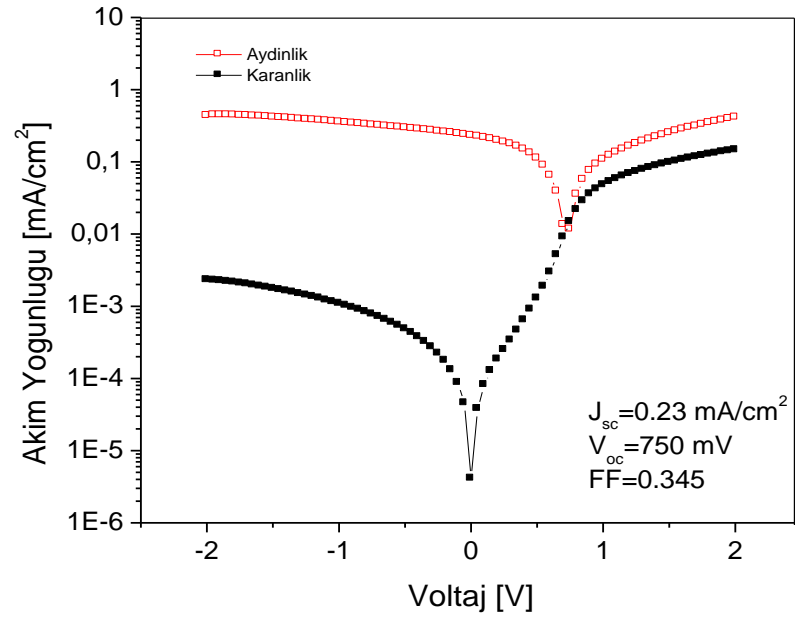


Şekil 3.10 P3HT:DE119/TL farklı DE119 oranlarında güneş gözelerinin IPCE spektrumu

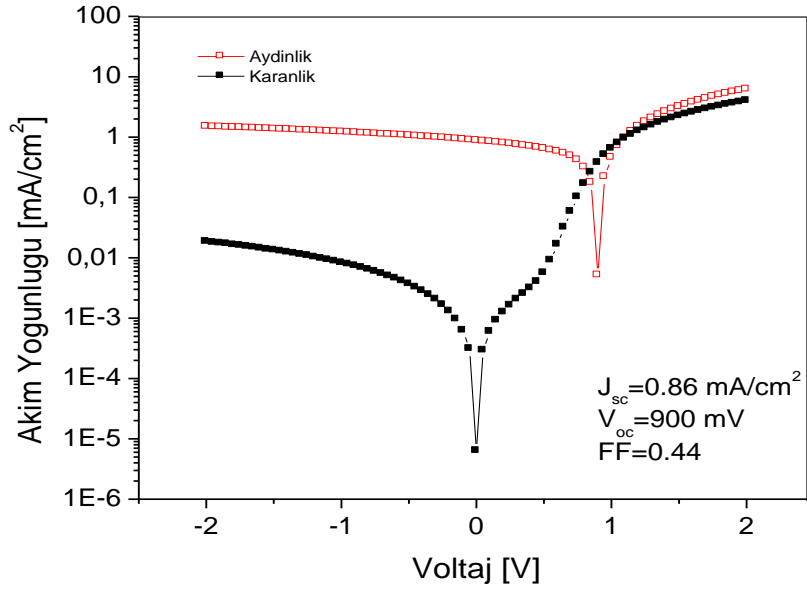
### 3.2.3 Klorobenzen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

#### 3.2.3.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu

ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT:DE119/Au konfigürasyonuna göre hazırlanan güneş gözelerinde aktif tabakayı oluşturan P3HT:DE119 çözeltisi 1:1, 1:2, 1:3 ve 1:4 oranlarında farklı bir organik çözücü olan klorobenzen (cb) içerisinde hazırlanmıştır. ITO/TiO<sub>2</sub>/P3HT/Au konfigürasyonuna göre hazırlanan referans örnekler de yine aynı çözücü içerisinde, sadece gözeneksiz TiO<sub>2</sub> ve P3HT içermektedir. Referans örnek ve 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında hazırlanan örnekler için aydınlık ve karanlık akım-gerilim eğrileri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Buna göre, referans güneş gözesi,  $J_{sc}=0.23 \text{ mA/cm}^2$ ’lik kısa devre akım yoğunluğuna,  $V_{oc}=750 \text{ mV}$  açık devre gerilimine ve  $FF=0.345$ ’lık bir dolgu faktörüne sahiptir (Şekil 3.11 (a)). P3HT:DE119 karışımı kullanılarak hazırlanan örneklerde 1:1 oranı için, akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.86 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=900 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.440$  olarak bulunmuştur ( Şekil 3.11 (b)). Şekil 3.12 (a)’da gösterilen 1:2 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.74 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=900 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.360$  olarak bulunmuştur. Şekil 3.12 (b)’de gösterilen 1:3 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.58 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=900 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.308$  olarak bulunmuştur. Şekil 3.12 (c)’de gösterilen 1:4 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu  $J_{sc}=0.18 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=900 \text{ mV}$  ve dolgu faktörü  $FF=0.255$  olarak bulunmuştur.

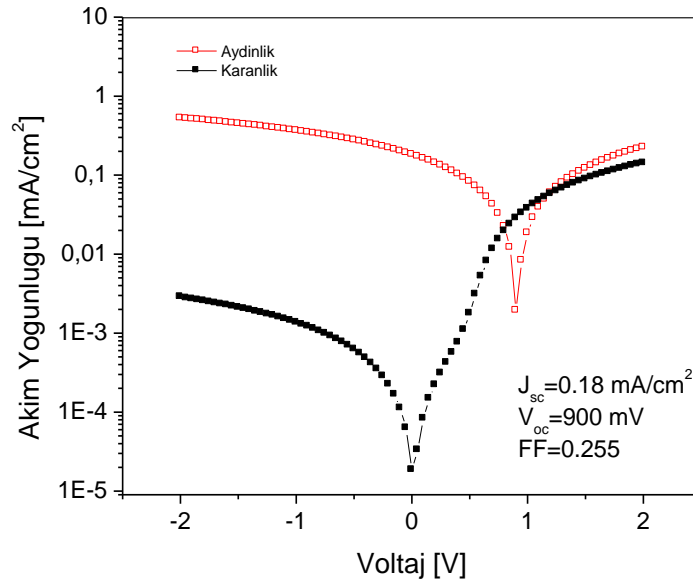
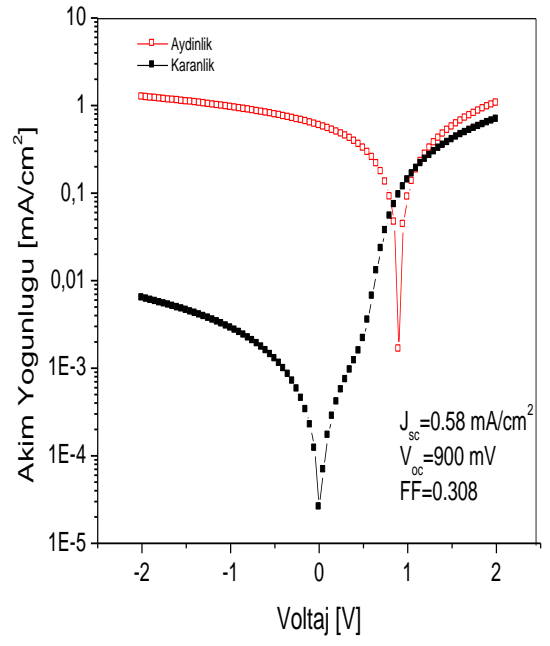
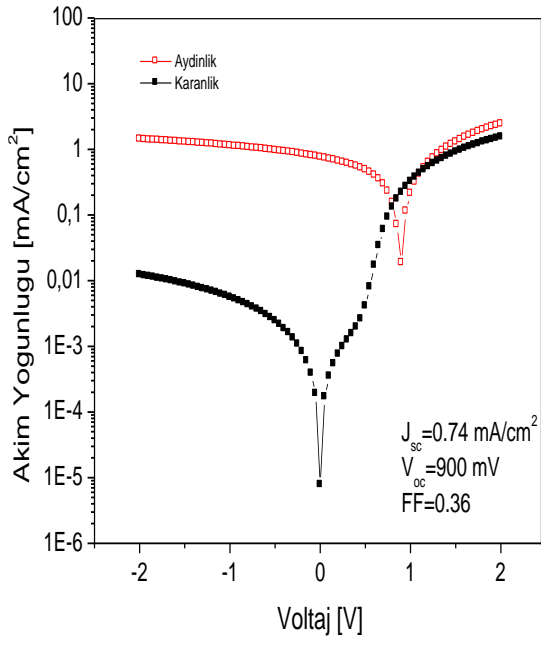


(a)



(b)

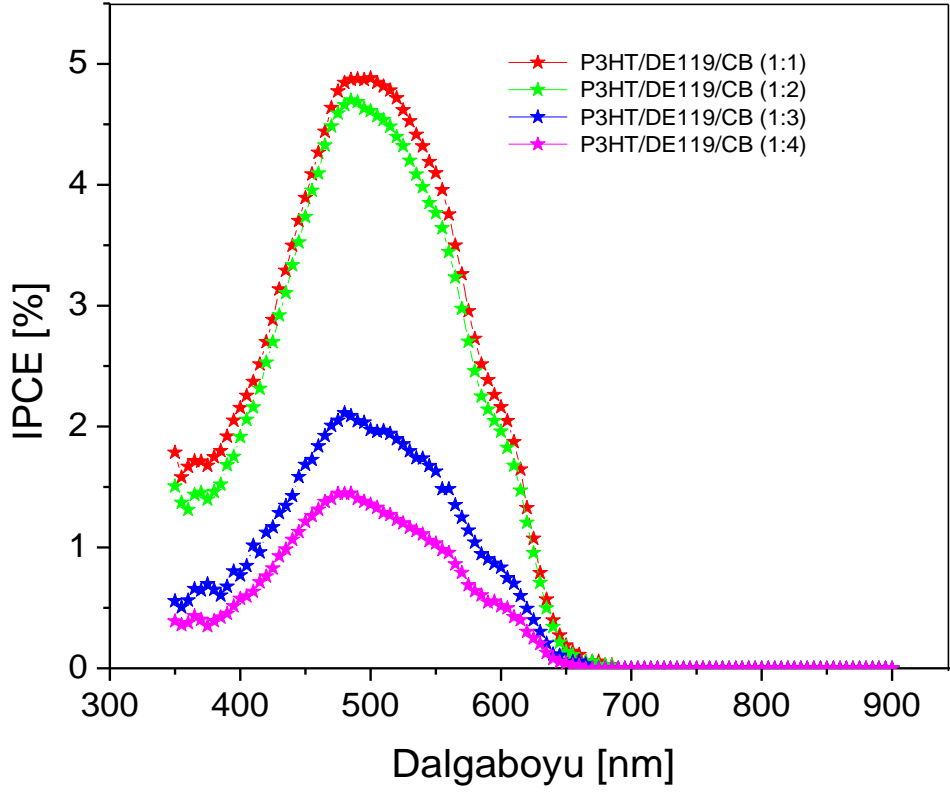
Şekil 3.11 Güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) referans örnek  $\text{TiO}_2/\text{P3HT}/\text{CB}$ , (b) 1:1 oranında hazırlanmış  $\text{P3HT}:\text{DE119}/\text{CB}$  güneş gözesi



Şekil 3.12 P3HT:DE119/CB güneş gözelerinin akım-gerilim eğrileri (a) 1:2 (b) 1:3 (c) 1:4 karışım oranları

### 3.2.3.2 Kuantum Verimi (IPCE)

Şekil 3.13, P3HT:DE119 güneş gözelerinin klorobenzen çözücüsü içerisinde farklı DE119 oranlarıyla birlikte verilen IPCE spektrumunu göstermektedir. Buna göre 350-650 nm dalgaboylarında, 1:1 oranı için %5.0 civarında bir foto-akım katkısı gözlenmiştir. IPCE sonuçları akımlarla doğru orantılı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13 P3HT:DE119/CB farklı DE119 oranlarını içeren güneş gözelerinin IPCE spektrumu



#### 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemi devre tipi yukarıda da bahsedildiği üzere normal devre tipine alternatif bir uygulamadır. Literatürde genellikle en yaygın kullanılan P3HT:PCBM karışımının aktif tabaka olarak kullanıldığı çalışmalardır. Örneğin Shaheen vd., (2007) yaptığı çalışmada boşluk engelleyici tabaka olarak ZnO, aktif tabaka olarak da P3HT:PCBM karışımı kullanılmıştır ve çalışma sonucunda güç dönüşüm verimi %2.58 olarak bulunmuştur. Son zamanlarda Kuwabara vd., (2010) tarafından yapılan benzer bir çalışmada boşluk engelleyici tabaka olarak  $TiO_x$  ( $TiO_2$ ), aktif tabaka olarak da yine P3HT:PCBM karışımı kullanılmıştır ve güç dönüşüm verimi %3.8 olarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada ise boşluk engelleyici tabaka olarak  $TiO_2$ , aktif tabaka olarak da P3HT:DE119 karışımı kullanılmıştır. Akım-gerilim eğrilerinden de görüldüğü üzere alınan ölçümler sonucunda P3HT donör malzeme ile DE119 akseptör malzemenin 1:1 oranında klorobenzen içerisinde karışımı sonucu en yüksek verim %0,34 olarak elde edilmiştir. Toluene çözücüsü içerisinde hazırlanan örnekler arasında 1:1 oranı ve 1:2 oranı benzer sonuçlar vermiştir. 1:1 için güç dönüşüm verimi %0,27 olarak hesaplanmıştır. Diklorobenzen çözücüsü içerisinde hazırlanan karışımın örnekleri içinde de yine en iyi sonucu 1:1 oranı vermiştir ve güç dönüşüm verimi %0,25 olarak ölçülmüştür. (Çizelge 3.2)

Çizelge 3.2 Farklı oranlarda ve farklı organik çözücüler içerisinde hazırlanan P3HT:DE119 karışımı güneş gözelerinin güç dönüşüm verimleri ve ilgili parametreler

Oran/Çözücü	$I_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{OC}$ (mv)	FF	$\eta$ (%)
1:1/DCB	0,88	750	0,393	0,25
1:1/TL	0,89	750	0,406	0,27
1:1/CB	0,86	900	0,440	0,34

Bulunan sonuçların literatür sonuçlarına göre daha düşük olmasının sebebi kullanılan akseptör farkından olduğunu düşünmekteyiz. Bu çalışmada kullanılan DE119 polimeri yeni bir malzemedir ve tersine çevrilmiş devre modelinde ilk kez kullanılmıştır. Ancak bu molekül (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6,6]C<sub>61</sub>) PCBM kadar iyi bir akseptör değildir. Bu nedenle sonuçlar P3HT:PCBM güneş gözelerine kıyasla daha düşüktür. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre her bir örnek için en iyi sonuçlar 1:1 oranında elde edilmiş olup, akseptör yoğunluğunun artmasıyla performansın kötüleştiği gözlenmiştir. Bunun sebebinin, akseptörün çözünürlük probleminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**KAYNAKLAR**

- Adams, W.G., ve Day, R.E., (1877), "The Action of Light on Selenium", Proceedings of the Royal Society, 25: 113.
- Alivisatos, A.P., (1996), "Semiconductor Clusters, Nanocrystals, and Quantum Dots", Science, 271: 933-937.
- Arici, E., Saricifci, N.S., Meissner, D., (2003), "Hybrid Solar Cells Based on Nanoparticles of CuInS<sub>2</sub> in Organic Matrices", Adv. Funct. Mater., 13: 165-171.
- Bach, U., Lupo, D., Comte, P., Moser, J.E., Weissortel, F., Salbeck, J., Spreitzer, H., ve Grätzel, M., (1998), "Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO<sub>2</sub> solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies", Nature, 395: 583-585.
- Barrau, S., Andersson, V., Zhang, F., vd., (2009), "Nanomorphology of Bulk Heterojunction Organic Solar Cells in 2D and 3D Correlated to Photovoltaic Performance", Macromolecules, 42: 4646-4650.
- Becquerel, A.E., (1839), "Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques", Comt. Rend. Acad.Sci., 9: 145-149
- Brabec, C. J., Sariciftci, N. S. ve Hummelen, J.C., (2001), "Plastic Solar Cells", Adv. Funct. Mater., 11:15-26.
- Breeze, J., Schlesinger, Z., ve Carter, S.A., (2001), "Charge transport in TiO<sub>2</sub>/MEH-PPV polymer photovoltaics", Phys. Rev. B, 64: 125205.
- Brütting W Introduction to the Physics of Organic Semiconductors (2005).
- Bundgaard, E., Krebs, F., (2007), "Low band gap polymers for organic photovoltaics", Solar Energy Materials and Solar Cells, 91: 954-985.
- Burroughes, J.H., Bradley, D.D.C., Brown, A.R., Marks, R.N., Mackay, K., Friend, R.H., Burns, P.L.ve Holmes A.B., (1990), "Light emitting diodes based on conjugated polymers", Nature, 347:539-560.
- Büyükmumcu, Z. (2006), Bazı Polimerlerin İletkenlik ve Titreşim Spektroskopik Özelliklerinin Kuramsal İncelenmesi, Kayseri.
- Chapin, D. M, Fuller, C. S. ve Pearson, G. L., (1954), "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", Journal of Applied Physics, 25: 676-677.
- Chen, J.W., Cao, Y., (2009), "Development of Novel Conjugated Donor Polymers for High Efficiency Bulk Heterojunction Photovoltaic Devices", Acc. Chem. Res., 42: 1709-1718.
- Chiang, C. K., Fincher, C. R., Park, Y. W., Heeger, A. J., Shirikawa, H., Louis, E. J., Gau, S. C. and Mac-Diarmid, A. G., (1977), "Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene", Phys. Rev. Lett., 39: 1098-1101.
- Chiang, C. K., Gau, S. C., Fincher, C. R., Park, Y. W., Mac-Diarmid and A. Heeger, A. J., (1978), "Polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>: n-Type and p-Type Doping and Compensation", Appl. Phys. Lett., 33: 18-21.
- Coropceanu, V., Cornil, J., Filho D.A., (2007), "Charge Tranport in Organic Semiconductors" Chem. Rev., 107: 926-952.
- Cravino, A., Sariciftci, N.S., (2002), "Double-cable polymers for fullerene based organic optoelectronic applications", J of Mat Chem, 12: 1931-1943.
- Demirtaş, E., (2007), Sodyum Bentonit ile Bazı İletken Polimerlerin Kompozitlerinin Sentezi

ve Özelliklerinin İyileştirilmesi, Ankara.

Eke, R., (2007), Güneş Pili Parametrelerinin İşletme Koşullarıyla İlişkilendirilmesi, İzmir.

Ertaş, E., (2006), Yeni Potansiyel Organik Süper İletken Bileşikler ve İletken Polimerler için Yeni Yöntemle Ditiyeno Tiyofen Temelli Monomerlerin Sentezi, İstanbul.

Frost, J.M., Cheynis, F., Tuladhar, S.M., vd., (2006), "Influence of Polymer-Blend Morphology on Charge Transport and Photocurrent Generation in Donor-Acceptor Polymer Blends", Nano Letters, 6: 1674-1681.

Li, G., Shrotriya, V., Huang, J., Yao, Y., Moriarty, T., Emery, K., Yang, Y., (2005), "High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends", Nature Materials, 4: 864-868.

Goetzberger, A., Hebling, C., (2000), "Photovoltaic materials, past, present, future", Solar Energy Materials & Solar Cells, 62: 1-19.

Hadipour, A., Boer de B., Blom P.W.M., (2008), "Organic Tandem and Multi-Junction Solar Cells", Adv Func Mat 18: 169-181.

Halls, J.J.M., Walsh, C.A., Greenham, N.C., Marseglia, E.A., Friend, R.H., Moratti, S.C. ve Holmes, A.B., (1995), "Efficient Photodiodes From Interpenetrating Polymer Networks", Nature, 376: 498-500.

Halme, J. (2002), Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests.

Hesse, H.C., Weickert, J., Al-Hussein, M., vd., (2010), "Discotic Materials for Organic Solar Cells: Effects of Chemical Structure on Assembly and Performance", Solar Energy Mat and Solar Cells, 94: 560-567.

Hoppe, H. (2004), Nanomorphology–Efficiency Relationship in Organic Bulk Heterojunction Plastic Solar Cells, Linz.

Hoppe, H., Sarıçiftçi N., S., (2004), "Organic Solar Cells", J. Mater. Res., 19: 1924–1945.

Hoppe H. ve Sarıçiftçi N.S., (2006), "Morphology of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells", J. Matter. Chem., 16: 45-61.

Karg S., Riess W. ve Meier M., (1993), "Characterization of Light-Emitting-Diodes and Solar-Cells Based on Poly-Phenylene-Vinylene", Sythetic Metals, 57: 4186-4191.

Karl N (2003), "Charge Carrier Transport in Organic Semiconductors", Synt Metals, 133-134: 649-657.

Kalaycı, G. (2008), Polianilin/Aktif Karbon Kompozit Maddesinin Sentezi, Karakterizasyonu ve İletken Film Yapımı, Kahramanmaraş.

Kavan, L. ve Graetzel, M., (1995), "Highly efficient semiconducting TiO<sub>2</sub> photoelectrodes prepared by aerosol pyrolysis", Electrochim.Acta, 40: 643-652.

Kim, J., Kim, S., Lee, H., Lee, K., Ma, W., Huong, X., Heeger, A.J., (2006), "New Architecture for High-Efficiency Polymer Photovoltaic Cells Using Solution-Based Titanium Oxide as an Optical Spacer", Adv.Mat., 18: 572-576.

Kim, Y., Cook, S., Tuladhar, S.M., Choulis, S.A., Nelson, J., Durrant, J.R., Bradley, D.D.C., Giles, M., McCulloch, I., Ha, C.S., Ree, M., (2006), "A strong regioregularity effect in self-organizing conjugated polymer films and high-efficiency polythiophene:fullerene solar cells", Nature Materials, 5: 197-203.

- Koyuncu, S. (2008), Güneş Pillerinde Elektrolit Olarak Görev Yapacak İletken Polimerlerin Sentezi, Çanakkale.
- Kuwabara, T., Sugiyama, H., Yamaguchi T., Takahashi, K., (2009), "Inverted type bulk-heterojunction organic solar cell using electrodeposited titanium oxide thin films as electron collector electrode", *Thin Solid Films*, 517: 3766-3769.
- Kuwabara, T., Sugiyama, H., Kuzuba, M., Yamaguchi, T., ve Takahashi, K., (2010), "Inverted bulk-heterojunction organic solar cell using chemical bath deposited titanium oxide as electron collection layer", *Organic Electronics*, 11: 1136-1140.
- Liang, Y. Y., Xu, Z., Xia, J. B., Tsai, S.T., Wu, Y., Li, G., Ray, C., Yu, L.P., (2010), "For the Bright Future-Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells with Power Conversion Efficiency of 7.4%", *Advanced Energy Materials*, 22: 135-138.
- Liu J, Shi Y, Yang Y (2001), "Solvation Induced Morphology Effects on the Performance of Polymer-Based Photovoltaic Devices", *Adv Func Mat* 11:420-424.
- M. Green, (2001), "Progress in Photovoltaics", 9: 123-135.
- M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons), New York, 1981.
- O' Regan vd., (1991), "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye sensitised colloidal TiO<sub>2</sub> films", *Nature*, 353: 737-740.
- Olson, D. C., Pirus, J., Collins, R. T., Shaheen, S. E., Ginley, D. S., (2005), "Hybrid photovoltaic devices of polymer and ZnO nanofiber composites", *Thin Solid Films*, 496: 26-29.
- Ortmann, F., Bechstedt, F., Hannewald, K., (2010), "Charge Transport in Organic Crystals: "Interplay of band transport, Hopping and Electron-Phonon Scattering"", *New Journal of Physics*, 12:023011.
- Park S H, Roy A, Beaupre S et al (2009), "Bulk heterojunction solar cells with internal quantum efficiency approaching 100%", *Nature Photonics*, 3: 297-302.
- Peng Q, Park K, Lin T et al (2008), "Donor- $\pi$ -Acceptor Conjugated Copolymers for Photovoltaic Applications: Tuning the Open-Circuit Voltage by Adjusting the Donor/Acceptor Ratio", *J Phys Chem B*, 112: 2801-2808.
- Petritsch, K. (2000), *Organic Solar Cell Architectures*, Cambridge and Graz.
- Rostalski, J., ve Meissner, D., (2000), "Monochromatic versus Solar Efficiencies of Organic Solar Cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 61: 87-95.
- Saçak, M. (2002), "Polimer Kimyası", Gazi Yayıncılık, Ankara.
- S.E. Shaheen, C. Brabec, N.S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz, and J.C. Hummelen, (2001), "2.5% efficient organic plastic solar cells", *App. Phys. Lett.*, 78: 841.
- S. E. Shaheen, M.S. White, D.C. Olson, N. Kopidakis, D.S. Ginley, (2007), "Inverted bulk-heterojunction plastic solar cells", *SPIE*, doi 10.1117/2.1200705.0756.
- Sariciftci, N. S. (2010), *Günam First Solar Energy Presentation*, Ankara.
- Sariciftci, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J. ve Wudl, F., (1992), "Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene", *Science*, 258:1474-1476.
- Sarıçiftçi N.S., Braun D. ve Zhang C., (1993), "Semiconducting Polymer-Buckminsterfullerene Heterojunctions - Diodes, Photodiodes, and Photovoltaic Cells", *Appl. Phys. Lett.*, 62: 585-587.

Scharber, M.C., Mühlbacher, D., Koppe, M., vd., (2006), "Design Rules for Donors in Bulk Heterojunction Solar Cells-Towards 10 % Energy Conversion Efficiency", *Adv. Func. Mat.*, 18: 789-794.

Schröder D. K., (1990), "Semiconductor Material and Device Characterisation", John Wiley&Sons, New York, USA, 599.

Shinar J., (2004), "Organic Light-Emitting Devices: A Survey" (Springer, NewYork).

Takahashi, K., Nishi, T., Suzaka, S., Sigeyama, Y., Yamaguchi, T., Nakamura, J., Murata, K., (2005), "Performance Improvement by Inserting an Electrodeposited ZnO into ITO/Organic Solid Interface in Organic Solid-state Solar Cells", *Chem. Lett.*, 34: 768-769.

Takanezawa, K., Hirota, K., Wei, Q.S., Tajima, K., Hashimoto, K., (2007), "Efficient charge collection with ZnO nanorod array in hybrid photovoltaic devices", *J. Phys. Chem. C*, 111: 7218-7223.

Tang C.W., (1986), "Two Layer Organic Photovoltaic Cell", *Appl. Phys. Lett.*, 48: 183-185.

Tessler N, Preezant Y, Rappaport N et al (2009), "Charge Transport In Disordered Organic Materials and Its Relevance to Thin Film Devices", *Adv Materials*, 21: 2741-2761.

Türkaslan, B. E. (2006), İletken Polimer-kil Kompozitlerinin Sentezi ve Bu Kompozitlerin Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi, Isparta.

Van Bavel, S.S., Sourty, E., De With, G., vd., (2009), "Three Dimensional Nanoscale Organization of Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells", *Nano Letters*, 9:507-513.

Van Duren, J.K.J., Yang, X.N., Loos, J., vd., (2004), "Relating the Morphology of Poly(p-phenylene vinylene)/Methanofullerene Blends to Solar-Cell Performance", *Adv. Func. Mat.*, 14: 425-434.

Waldauf, C., Morana, M., Denk, P., Schilinsky, P., Coakley, K., Choulis, S.A., Brabec, C.J., (2006), "Highly efficient inverted organic photovoltaics using solution based titanium oxide as electron selective contact", *Appl. Phys. Lett.*, 89: 233517-1-3.

Wallace G.G., vd., (2000), "Conjugated polymers: New materials for photovoltaics", *Chemical Innovation*, 30: 14-22.

Wienk, M., Struijk, M., Janssen, R., (2006), "Low band gap polymer bulk heterojunction solar cells", *Chemical Physics Letters*, 422: 488-491.

Woehrle, D. ve Meissner, D., (1991), "Organic solar cells", *Adv.Mat.*, 3: 129-138.

Yu G. ve Heeger A.J., (1995) "Charge Separation and Photovoltaic Conversion in Polymer Composites with Internal Donor-Acceptor Heterojunctions", *J. Appl. Phys.*, 78: 4510-4515.

Zafer, C. (2006), Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi.

Zhang F.L., Jonforsen M., Johanson D., Andersson M.R. ve Inganas O., (2003), "Photodiodes and solar cells based on the n-type polymer poly(pyridopyrazine vinylene) as electron acceptor", *Synthetic Metals*, 138: 555-560.

İnternet Kaynakları:

- 1) [www.yenienerji.net](http://www.yenienerji.net)
- 2) [www.bilgiustam.com](http://www.bilgiustam.com)
- 3) [www.epia.org](http://www.epia.org)
- 4) DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 5 Sayı: 1, 147-158 Ocak 2003
- 5) [tr.wikipedia.org](http://tr.wikipedia.org)

- 6) [www.alternaturk.org](http://www.alternaturk.org)
- 7) [www.tradevv.com](http://www.tradevv.com)
- 8) [www.trunsunsolar.com](http://www.trunsunsolar.com)
- 9) [www.konarka.com](http://www.konarka.com)
- 10) [www.suntexas.com](http://www.suntexas.com)
- 11) <http://astronomy.ege.edu.tr>

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	22.01.1985	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1998-2002	Mehmed Bayazıd Süper Lisesi
Lisans	2003-2007	Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fak. Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2008-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı

**Çalıştığı kurum**

2008-Devam ediyor Tübitak Projesi (Bursiyer)