

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK ETKİ OLUŞTURAN LİF**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**Ayşe (ÇELİK) BEDELOĞLU**

**Haziran, 2009**

**İZMİR**

# **FOTOVOLTAİK ETKİ OLUŞTURAN LİF GELİŞTİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Tekstil Mühendisliği Bölümü Tekstil Teknolojisi Anabilim Dalı**

**Ayşe (ÇELİK) BEDELOĞLU**

**Haziran, 2009**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AYŞE (ÇELİK) BEDELOĞLU, tarafından **PROF. DR. YALÇIN BOZKURT** ve **PROF. DR. ALİ DEMİR** yönetiminde hazırlanan “**FOTOVOLTAİK ETKİ OLUŞTURAN LİF GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yalçın BOZKURT

Danışman



Prof. Dr. Ali DEMİR

II. Danışman



Prof. Dr. Nilüfer ERDEM

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Prof. Dr. Devrim BALKÖSE

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Nuray UÇAR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Gülseren Kurumer



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Fatma Çeken



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Doktora tezi çalışmamın yürütülmesinde büyük yardımlarını ve desteklerini gördüğüm danışmanlarım Prof. Dr. Yalçın BOZKURT ve Prof. Dr. Ali DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Nilüfer ERDEM ve Prof. Dr. Devrim BALKÖSE'ye tezimle ilgili her türlü eleştiri ve önerileri için teşekkür ederim.

Avusturya'da Johannes Kepler Üniversitesi'nde güneş pilleri ile ilgili gerçekleştirdiğim deneysel çalışmalarına çok değerli fikir ve önerileriyle yardımcı olan hocam Prof. Dr. Niyazi Serdar SARIÇİFTÇİ'ye ve Dr. Robert KÖPPE, Martin EGGINGER, Philipp STADLER, Gerda KALAB başta olmak üzere, LIOS (Linz Institute for Organic Solar Cells) ekibine, Yıldız Teknik Üniversitesi'nden Doç. Dr. Serap Güneş ve Araş. Gör. Nimet CANLI YILMAZ'a çok teşekkür ediyorum.

Doktora çalışmam süresince, beni burslarıyla (2211 kodlu Yurt İçi Doktora Burs Programı ve 2214 kodlu Yurt Dışı Araştırma Burs Programı) destekleyen TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve teknolojik Araştırma Kurumu)'a ve tez çalışması projemizi destekleyen Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Kuruluna teşekkürü bir borç bilirim (Proje No: 2007.KB.FEN.38).

Son olarak, hayatım boyunca hem maddi hem manevi desteklerini, sevgi ve yardımlarını bir an olsun esirgemeyen sevgili anneme ve babama, desteğiyle hep yanımda olan sevgili kardeşim Ahmet'e ve beni doktora tezimin her aşamasında destekleyen ve cesaretlendiren, şehirler ülkeler arasındaki mesafeleri yok ederek her an yanımda olan eşim Barış'a tüm kalbimle teşekkür ediyorum.

Ayşe (Çelik) BEDELOĞLU



# FOTOVOLTAİK ETKİ OLUŞTURAN LİF GELİŞTİRİLMESİ

## ÖZ

Bu tez çalışmasında, organik güneş pili malzemelerinin tekstillere uygulanmasıyla fotovoltaik etki gösteren tekstil yapıları meydana getirilmiştir. Elde edilen esnek yapıların fotovoltaik özellikleri, standart cam ve plastik güneş pilleri ile karşılaştırılmıştır. Tekstil malzemeleri olarak polipropilen polimer malzemesi esaslı monofilament ve şeritlerin kullanıldığı polimer esaslı güneş pili yapılarında, alt elektrot için farklı polimer esaslı malzemeler (PEDOT:PSS ve CNT:PANI) ve gümüş tabakası, fotoaktif tabaka için P3HT:PCBM ve MDMO-PPV:PCBM malzemeleri ve üst elektrot için ise farklı şeffaf metal tabakalar (LiF/Al, Al/Ag) kullanılmıştır. Standart güneş pillerinin tersine, ışığın üst elektrottan gelecek şekilde planlanması nedeniyle şeffaf üst elektrotların kullanılması ve ITO yerine polimerik anot ve bazı çalışmalarda gümüş metal tabakasının denenmesi çalışmanın özgün niteliklerini oluşturmaktadır. Tüm deneyler içerisinde polipropilen şeritler için en iyi verim yüzde 0,33 olarak bulunurken, enine kesiti yuvarlak monofilament için yüzde 0,02 olarak elde edilmiştir. Fotovoltaik yapılar değerlendirilirken UV-Vis soğurma spektrumları, AFM ve SEM mikroskopi teknikleri kullanılarak elde edilen görüntüler, akım-gerilim (I-V) ölçümleri ve monokromatik foton-akım dönüşüm verimi (IPCE) ölçümleri gerçekleştirilerek grafikler ve değerlerle gösterilmiştir.

Güneş enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten bu fotovoltaik tekstil yapıları ile yakın gelecekte taşınabilir küçük elektronik cihazların elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak amaçlanmaktadır. Bu yapıların geliştirilmesi ile her koşulda, aydınlatma, soğutma, ısıtma ve benzeri amaçlar için gerekli enerji ihtiyacının karşılanması düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı tekstil, fotovoltaik lif, polimer esaslı organik güneş pili.

## DEVELOPMENT OF FIBRES WITH PHOTOVOLTAIC EFFECTS

### ABSTRACT

In this thesis, textile structures which show photovoltaic effects were developed applying organic based solar cell materials onto textiles. Photovoltaic characteristics of developed flexible devices were compared with conventional solar cells consist of glass and plastic substrates. In organic solar cells which employed polypropylene monofilament and tapes as textile based materials, polymeric materials (PEDOT:PSS and CNT:PANI) and silver layer was used as bottom electrode, P3HT:PCBM and MDMO-PPV:PCBM mixtures were used as photoactive layer and different transparent metal layers (LiF/Al, Al/Ag) were used as top electrode. Contrary to standard solar cells, semi-transparent cathodes were used so that light has come through upper electrode which forms one of the original aspects of this work. An efficiency of 0.33 percent for polypropylene tapes and an efficiency of 0,02 percent for polypropylene fibres were obtained, using polymeric anode and in some experiments, silver metal layer to substitute ITO. By using UV-Vis absorption spectra, images from AFM and SEM microscopy techniques, measurements of current-voltage (I-V) and monochromatic photon-current conversion efficiency (IPCE) photovoltaic structures were evaluated.

Photovoltaic textile structures generating electricity using solar energy is to satisfy power requirements of portable small electronic devices in the near future. With further development of these devices, power requirements may be generated for various end uses such as lighting, cooling, heating.

**Keywords:** Smart textile, photovoltaic fibre, polymer based organic solar cell.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Fotovoltaik Güneş Pilleri .....	1
1.1.1 Yenilenebilir Enerji ve Durumu.....	1
1.1.2 Güneş Işığı .....	1
1.1.3 Güneş Enerjisi .....	4
1.1.4 Güneş Pilleri (Fotovoltaik Piller).....	4
1.1.5 Fotovoltaik Etki.....	5
1.1.6 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi.....	5
1.1.7 Fotovoltaik Teknolojileri .....	7
1.1.7.1 Tek Kristalli ve Çok Kristalli Silikon Esaslı Güneş Pilleri.....	7
1.1.7.2 İnce Film Teknolojisi ile Üretilen Güneş Pilleri .....	7
1.1.7.3 Çoklu Eklemliler.....	8
1.1.7.4 Foto-elektrokimyasal Güneş Pilleri.....	8
1.1.7.5 Organik Güneş Pilleri.....	9
1.1.8 Fotovoltaik Teknolojisinin Dünyadaki Durumu .....	9
1.1.9 Türkiye’de Güneş Enerjisi ve Fotovoltaik Teknoloji .....	11
1.1.9.1 Güneş Toplayıcıları.....	12
1.1.9.2 Güneş Pilleri.....	13
1.2 Teknik Tekstiller- Akıllı Tekstiller .....	14
1.2.1 Sentetik Lifi Nitelikli Life Dönüştüren Katkı Maddeleri.....	16
1.2.2 Fotovoltaik Tekstiller .....	18

<b>BÖLÜM İKİ - ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ</b> .....	24
2.1 Organik Güneş Pilleri.....	24
2.2 Organik Yarı iletkenler ve Yapısal Özellikleri .....	24
2.2.1 Sıvı Kristaller .....	27
2.2.2 Karbon Nanotüpler.....	27
2.2.3 İletken Polimerler.....	28
2.2.3.1 Konjüge Polimerler .....	28
2.3 İnorganik ve Organik Güneş Pillerinin Karşılaştırılması.....	29
2.4 Fotovoltaik Etki Oluşumu .....	30
2.4.1 Işığın Emilmesi ve Elektron-Boşluk Çiftinin Oluşması .....	31
2.4.2 Elektron-Boşluk Çiftinin Ayrılması ve Difüzyonu.....	34
2.4.3 Yüklerin İlgili Elektrotlara Toplanması .....	34
2.4.4 Elektrotlarda Durum .....	36
2.5 Organik Güneş Pillerinin Özellikleri .....	37
2.6 Işık Yayan Diyotlar ve Fotovoltaik Piller .....	40
2.7 Organik Güneş Pili Tipleri .....	42
2.7.1 Tek Tabakalı Cihazlar.....	42
2.7.2 İki Tabakalı Heteroeklem Tipi.....	42
2.7.3 Karışım Heteroeklem Tipi.....	43
2.7.4 Lamine Edilen Tabakalar .....	44
2.7.5 Dağılmış İki Tabakalı Heteroeklem Tipi .....	45
2.8 Organik Güneş Pillerinin Oluşturulmasında Kullanılan Yöntemler .....	45
2.9 Organik Güneş Pillerinin Tekstil Uygulamaları .....	46
<b>BÖLÜM ÜÇ - MATERYAL VE METOD</b> .....	51
3.1 Polimer Esaslı Organik Güneş Pilleri için Kullanılan Taşıyıcı Tabakalar.....	51
3.2. Esnek Polimer Anot Olarak Kullanılan PEDOT:PSS Karışımları.....	52
3.2.1. Düşük İletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH PEKA).....	54
3.2.2 Yüksek İletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH 500).....	54

3.2.3 PEDOT:PSS'ye Karbon Nanotüp (CNT)-Polianilin (PANI) Karışımı İlavesi .....	54
3.2.3.1 Baytron PH 500: CNT-PANI ve Baytron PH PEKA: CNT-PANI.....	54
3.3. Polimer Esaslı Organik Güneş Pillerinde Fotoaktif Tabakayı Oluşturan Kimyasal Maddeler .....	55
3.3.1. Elektron Verici: MDMO-PPV .....	55
3.3.2 Elektron Verici: P3HT .....	55
3.3.3 Elektron Alıcı: PCBM.....	56
3.4 Polimer Esaslı Organik Güneş Pillerinde Kullanılan Üst Metal Elektrotlar: Katotlar.....	57
3.5 Geliştirilen Güneş Pillerinin Karakterizasyonu .....	59
<b>BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>62</b>
4.1 Bilinen Organik Güneş Pilinin Hazırlanması (İndiyum Katkılı Kalay Oksit (ITO) Kaplı Cam Üzerinde Polimer Esaslı Organik Güneş Pili).....	63
4.1.1. Katman 1: Taşıyıcı Tabakaların Hazırlanması.....	63
4.1.2 Katman 2 ve 3: PEDOT:PSS ve Fotoaktif Tabakanın Kaplanması .....	64
4.1.3 Katman 4: Metal Üst Elektrotun Kaplanması .....	64
4.2 Uyarlanan Organik Güneş Pilinin Hazırlanması (İndiyum Katkılı Kalay Oksit Kaplı Cam Üzerinde Polimer Esaslı Organik Güneş Pili) .....	66
4.3 Yeni Geliştirilen Esnek Güneş Pilinin Hazırlanması (Polipropilen (PP) şerit, PP monofilament ve Polietilentereftalat (PET) Folyo Üzerinde Polimer Esaslı Organik Güneş Pili) .....	66
4.3.1 Taşıyıcı Tabakaların (Katman 1) Kaplama İşlemine Hazırlanması.....	66
4.3.2 PEDOT:PSS'nin ve Fotoaktif Tabakanın Hazırlanması.....	67
4.3.2.1 Katman 2: PEDOT:PSS'nin Hazırlanması .....	67
4.3.2.2 Katman 3: P3HT:PCBM Karışımlarının Hazırlanması.....	67
4.3.2.3 Katman 3: MDMO-PPV:PCBM Karışımlarının Hazırlanması.....	69
4.3.3 Polimer Anot PEDOT:PSS'nin ve Fotoaktif Tabakanın Örneklere Kaplanması.....	69
4.3.4 Katman 4: Metal Üst Elektrot Kaplanması.....	70

<b>BÖLÜM BEŞ - DENEYSEL SONUÇLAR</b> .....	75
5.1 Fotoaktif Tabakası P3HT:PCBM Olan Güneş Pilleri İle Elde Edilen Sonuçlar .....	75
5.1.1 Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al Pil Sistemine Ait Sonuçlar .....	76
5.1.1.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri .....	77
5.1.1.2 Morfolojik Gözlemler .....	83
5.1.1.3 Farklı PEDOT:PSS Tiplerinin Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi .....	85
5.1.2 Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/AL Pil Sistemine Ait Sonuçlar .....	86
5.1.2.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri .....	86
5.1.2.2 Morfolojik Gözlemler .....	99
5.1.2.3 Enine Kesit Görüntüleri .....	100
5.1.2.4 Foton-Akım Dönüşüm Verimi Özellikleri .....	101
5.1.2.5 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi .....	102
5.1.3 Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al/Ag Pil Sistemine Ait Sonuçlar .....	104
5.1.3.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri .....	105
5.1.3.2 Foton-Akım Dönüşüm Verimi Özellikleri .....	112
5.1.3.3 Kullanılan Farklı Üst Elektrotların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi .....	112
5.1.4. Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al Pil Sistemine Ait Sonuçlar .....	113
5.1.4.1 Akım- Voltaj Karakteristikleri .....	113
5.1.4.2 Morfolojik Gözlemler .....	120
5.1.4.3 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların ve PEDOT:PSS Tiplerinin Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi .....	122
5.2 MDMO-PPV:PCBM Esaslı Pillere Ait Sonuçlar .....	123

5.2.1 Taşıyıcı tabaka/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al Pil	
Sistemine Ait Sonuçlar.....	123
5.2.1.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri .....	123
5.2.1.2 Morfolojik Gözlemler .....	135
5.2.1.3 Enine Kesit Görüntüleri .....	136
5.2.1.4 Foton-Akım Dönüşüm Verimi .....	137
5.2.1.5 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi.....	138
5.2.2 Taşıyıcı Tabaka/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM /Al/Ag Pil	
Sistemine Ait Sonuçlar.....	138
5.2.2.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri .....	139
5.2.2.2 Foton Akım Dönüşüm Verimi .....	144
5.2.2.3 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin İncelenmesi .....	145
5.3. Fotovoltaik Tekstillerin Kullanım Biçimlerine Öneriler.....	146
5.4 Maliyet Analizi.....	146
5.5 Fotovoltaik Liflerin Seri Üretimi İçin Öneriler.....	148

## **BÖLÜM ALTI - GENEL SONUÇLAR, ÇALIŞMANIN ÖZGÜN YÖNLERİ VE ÖNERİLER .....**

150

6.1 Genel Sonuçlar .....	150
6.1.1 P3HT:PCBM Kullanılan Fotovoltaik Tekstillerden Elde Edilen Sonuçlar .....	150
6.1.2 MDMO-PPV:PCBM Kullanılan Fotovoltaik Tekstillerden Elde Edilen Sonuçlar.....	152
6.2 Çalışmanın Özgün Yönleri.....	153
6.3 Öneriler .....	154

## **KAYNAKLAR .....**

157

## **EKLER.....**

170

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Fotovoltaik Güneş Pilleri

#### 1.1.1 Yenilenebilir Enerji ve Durumu

Günlük hayatımızda ve çeşitli iş sektörlerinde vazgeçemeyeceğimiz çeşitli faaliyetleri gerçekleştirmek için ihtiyaç duyduğumuz enerji, günümüzde, çok daha önemli hale gelerek ülkelerin ekonomik ve siyasi geleceklerini de belirleyecek bir kavram şeklini almıştır. Günümüzde, nüfus artışı ve teknolojiye paralel olarak enerji ihtiyacı sürekli artarken özellikle fosil esaslı mevcut olan enerji kaynaklarının dünya üzerinde, kısıtlı ve tükenmekte olması, araştırmacıları yeni enerji kaynakları bulma ve geliştirmeye yöneltmektedir. Bunun yanında, son yıllarda, küresel ısınmanın fosil madde esaslı yakıtların da etkisiyle, dünyadaki yaşamsal faaliyetleri tehdit edecek bir boyuta ulaşması, enerjinin, çevresel açıdan en az zarar verecek biçimde üretimi, iletimi ve tüketiminin gerçekleştirilmesi konusuna ilginin çok daha fazla yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

#### 1.1.2 Güneş Işığı

Güneş, dünyadaki tüm canlılar için en önemli enerji kaynağıdır. Güneş, kendi yapısında bulunan hidrojeni, helyuma büyük bir termonükleer füzyon reaksiyonu içinde dönüştürürken, kütle, enerjiye Einstein'ın ünlü  $E=mc^2$  formülü ile çevrilir. Bu reaksiyon sonucunda güneşin yüzeyi 5800 Kelvin (K) olur ve bu enerji uzaya her yönde ışımaya yaparak yayılır. Zamanla bu enerji, dünyaya kadar 150 milyon km yol kateder (Messenger ve Ventre, 2004).

Güneş ışınım tayfı (=spektrum), yaklaşık 5800 K'lık bir sıcaklıkla, kara cisme (elektromanyetik ışınımın tüm dalga boylarını emen nesne) yakınlık gösterir. Bu tayfın yaklaşık yarısı, elektromanyetik tayfın görünür kısa dalga parçası içinde ve diğer yarıya yakını genelde kızılötesine (infrared) yakın bir bölümde yer alır. Kalan



kısım da tayfin morötesi (ultraviyole) kısmında yer alır. Morötesi ışınım, atmosfer veya diğer koruyucu bir tabaka tarafından emilmezse, insan cildinin renk değiştirmesine (pigmentleşmesine) neden olur. Dünya yüzeyine çarpan elektromanyetik ışınım tayfi 100 ile 10<sup>6</sup> nanometre (nm) arasındadır. Bu, artan dalga boyu büyüklüğüne göre aşağıda belirtilen beş bölgeye ayrılmaktadır (Şekil 1.1) (Anonim, 2009a).

Morötesi C (Ultraviolet C: UVC) bölgesi, 100 ile 280 nm dalga boyu aralığı arasındaki bölgeyi kapsar. Morötesi terimi, ışınımın kırmızı ışıktan daha yüksek frekansta olduğu anlamında kullanılır ve ayrıca insan gözüne görünmez. Atmosfer tarafından emilim nedeniyle Dünya yüzeyine (Litosfer) çok az miktarı ulaşır. UVC ışınım tayfi, mikrop öldürücü özelliklere sahiptir ve antiseptik lambalarda kullanılır.

Morötesi B (Ultraviolet B: UVB) bölgesi, 280 ile 315 nm dalga boyu aralığını kapsar. Ayrıca büyük miktarı atmosfer tarafından emilir. UVC ile birlikte ozon tabakasının oluşmasından sorumlu olan fotokimyasal reaksiyonun olmasını sağlar.

Morötesi A (Ultraviolet A: UVA) bölgesi, 315 ile 400 nm dalga boyu aralığını kapsar. DNA'ya daha az zarar vermekte olduğu için güneş banyosu yapılması ve sedef hastalığı için PUVA (psoralenle uzun dalga boylu ultraviyole ışığı olan UVA'nın kombinasyonu) terapisinde kullanılır.

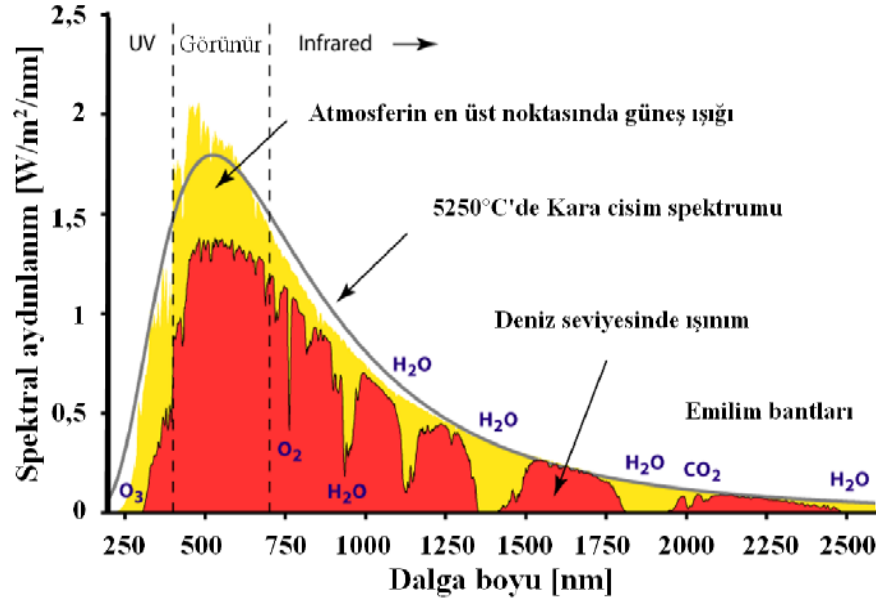
Görünür bölge veya ışık 400 ile 700 nm dalga boyu aralığını kapsar. Bu aralık adından da anlaşılacağı üzere çıplak gözle görülebilen bölgedir.

Kızılötesi bölge 700 nm ile 10<sup>6</sup> nm (=1mm) dalga boyu aralığını kapsar. Güneş ışığı tarafından sağlanan ısıtmadan büyük ölçüde sorumludur. Dalga boylarına göre 3 tipe ayrılabilir:

Kızılötesi-A: 700-1400 nm

Kızılötesi-B: 1400-3000 nm

Kızılötesi-C: 3000 nm-10<sup>6</sup> nm (1 mm)



Şekil 1.1 Güneş ışığı spektrumu (Anonim, 2009b)

Aydınlanım veya güneş radyasyonu (=irradiance) güneş ışığı güç şiddetinin ölçüsüdür ve  $W/m^2$  olarak ölçülür. Aydınlık veya parlaklık (=irradiation) ise  $kWh/m^2$  olarak ölçülen gün ışığı enerji şiddetidir. Aydınlanım, anlık bir miktardır. Dünya için aydınlanım sabiti, Dünya tarafından atmosferin en tepesinde güneşten alınan aydınlanım şiddetidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin bu şiddeti,  $1367 W/m^2$  değerindedir ve AM0 olarak gösterilir, yeryüzünde ise  $0-1100 W/m^2$  değerleri arasında değişim göstermektedir. Güneş ışığı, Dünya'nın atmosferine geldiği zaman, bir kısmı emilir, bir kısmı saçılır ve bir kısmı da etkilenmeden atmosferdeki moleküllerin içinden geçer ve tabandaki nesnelere tarafından ya emilir ya da yansıtılır. Güneşin içinden geçtiği farklı moleküller güneş ışığına farklı etkiler yaparlar. Su buharı, karbondioksit, ozon gibi her bir molekülün güneş ışığını emdiği ya da saçtığı belirli farklı dalga boyları vardır. Emilen veya saçılan gün ışığı miktarı, gelen ışığın atmosferde izlediği yola bağlıdır. Bu yol uzunluğu, doğrudan deniz seviyesine inen dikey bir yolla karşılaştırılır ve hava kütlesi (=air mass) AM1 olarak adlandırılır. Bu aydınlanım, AM1'lik bir yol uzunluğuyla atmosferin içinden geçtikten sonra yaklaşık  $1000 W/m^2$ 'ye düşer ve atmosferik emilim nedeniyle modifiye edilmiş spektral içeriğe sahiptir (Messenger ve Ventre, 2004).

### **1.1.3 Güneş Enerjisi**

Güneş, bol, sınırsız, yenilenebilir ve en önemlisi de herhangi bir bedel ödenmeden kolayca erişilebilen bir enerji kaynağıdır. Ayrıca diğer fosil kaynaklı yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan çevresel sorunların güneş ışığından enerji üretiminde bulunmaması nedeniyle temiz ve çevre dostu bir enerjidir. Güneş enerjisi teknolojileri, malzeme, yöntem ve teknolojik düzey açısından çeşitlilik göstermekle birlikte ısıtma amaçlı (ısı) güneş teknolojileri ve elektrik üreteçleri (güneş pilleri) olarak iki ana gruba ayrılabilir. Güneş pillerinde doğrudan elektrik enerjisi elde edilirken ısı güneş teknolojilerinde öncelikle ısı elde edilmektedir, daha sonra bu ısı başka enerji türlerine çevrilebilir (Elektrik İdaresi Etüt Müdürlüğü [EİE], 2009).

### **1.1.4 Güneş Pilleri (Fotovoltaik Piller)**

Fotovoltaik, görünür veya diğer ışık ışınlarına maruz kaldığında, elektriksel gerilim farkı (voltaj) üretimi yapabilme özelliğidir. “Fotovoltaik pil” ise fotovoltaik özellik sonucu elektrik enerjisi üreten yapılardır. Yaygın olarak “Fotovoltaik pil” tanımlaması kullanılmasına rağmen, “bariyer tabakalı fotopil”, “kendi kendine üreten pil”, “güneş pili”, “fototronik fotopil” gibi isimlerle de adlandırılmaktadır (Graf, 1999). Dolayısıyla güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını kullanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletkenleri içeren ve mevcut yenilenebilir enerji kaynakları arasında en temizlerden birisi olan yapılardır. Yarı iletken malzeme, metallere ile yalıtkan bir tabaka (genellikle cam) arasında yer alır ve üzerine düşen ışık miktarına paralel olarak elektrik enerjisi üretiminde görev alır. Geleneksel olarak, güneş pilleri, gün ışığını kullanan çok ince ve rijit yapılardır. Ancak son yıllardaki gelişmeler, sadece gün ışığını kullanan ve karanlıkta işlevsiz kalan klasik güneş pillerinin tersine yeni polimer maddeler ile güneş spektrumunun farklı bölümlerinden enerji kullanabilecek (kızılötesi (Janssen, 2006) ve morötesi (Yamaura, Muraoka, Yamauchi, Muramatsu, ve Hiroi, 2003) ışınlar gibi) pillerin yapılabileceğini de göstermiştir.

### **1.1.5 Fotovoltaik Etki**

Fotovoltaik etki aşağıda verildiği gibi pek çok biçimde tanımlanmaktadır:

- i. Uygun bir dalga boyundaki ışıkla aydınlatılan malzemede bir elektrik alan yani voltaj (gerilim farkı) oluşmasıdır.
- ii. Fotovoltaik etki, homojen olmayan silikon gibi bir yarı iletken içinde veya iki tip materyalin arasındaki ekleme voltaj üretimini anlatmaktadır.
- iii. Emilen foton enerjisi nedeniyle yarı iletken PN eklemi (= PN junction) boyunca voltaj üretimidir (Bakınız Bölüm 2.2).
- iv. Fotovoltaik etki, iki elektrottan birine ışın etkidiğinde, ikisinin arasında elektrik potansiyeli farkının yaratılmasıdır (Graf, 1999).

### **1.1.6 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi**

Araştırmacılar 1800'lerden bu yana fotovoltaik konusu üzerinde çalışmaktadırlar. Fotovoltaik etkinin keşfedilmesini, ilk defa, bromür veya gümüş klorid kaplı platin elektrotların sulu bir çözelti içindeyken aydınlatıldığında bir akım oluştuğunu gözlemleyen Alexandre-Edmond Becquerel'in 1839 yılında gerçekleştirdiği belirtilmektedir, ancak bu fotokimyasal bir etkidir (Goetzberger, Luther, ve Willeke, 2002; Spangaard ve Krebs, 2004). Fotoiletkenlik konusundaki ilk çalışmalar Smith (1873 yılında) ve Adams (1876 yılında) tarafından selenyum kullanılarak %1-%2 verimle rapor edilmiştir. Pochettino (1906 yılında) ve Volmer (1913 yılında) ise, fotoiletkenlik gözlemlenen ilk organik bileşik antrasen üzerine çalışmışlardır. Silisyum kullanılan ilk güneş pili 1918'de, Germanyumdan ilk pil ise 1951 yılında geliştirilmiştir. İlk silikon esaslı inorganik güneş pili, Bell Laboratuvarlarında Chapin ve ark. tarafından (1954 yılında) %6 verim ile geliştirilmiştir ve bu verim kısa sürede %10'a yükseltilerek uzun zaman bu şekilde, ana uygulama alanı, uzaydaki uygulamalarda güç kaynakları olmak üzere kullanılmıştır (Goetzberger ve ark., 2002). Tek kristal silikon esaslı güneş pilleri günümüzde laboratuvar ortamında ~%24 verime ulaşmıştır (Green, Emery, King, Igari ve Warta, 2003). Silikon esaslı güneş pilleri, diğer fotovoltaik piller içerisinde %99'luk bir paya sahiptir. 1960'ların başlarında yarı iletken özelliğe sahip pek çok boya keşfedilmiş (Bube, 1960) ve daha

sonraları bunlar, fotovoltaik etki gösteren ilk organik malzemeler arasına yer almıştır. Carlson ve Wronski tarafından (1976 yılında) ilk amorf silikon güneş pili (%1,1 verimle) geliştirilmiştir (Goetzberger, Hebling ve Schock, 2003).

Bir güneş pili ilk defa Vanguard-1 isimli uyduya (1958 yılında) enerji (0,1 watt) sağlamak için kullanılmıştır. 1973 yılında petrol krizinin olması fotovoltaiklerin dünya üzerindeki uygulamalarda da kullanılabileceği düşüncesinin oluşmasında etkili olmuştur. 1970'lerin ortasından bu yana önce binaların çatılarında veya sabit olarak boş alanlarda daha sonraları uçaklar ve güneş arabalarında, trafik lambalarında, hesap makinalarında, çadırlarda ve artık tekstil yüzeyleri de dahil olmak üzere taşınabilir her türlü yapı üzerinde, savunma, spor ve elektronik sanayilerinde ve gündelik yaşamda, sıklıkla, fotovoltaik modüller kullanılmaktadır. 1980 yılında güneş enerjisiyle çalışan ilk uçak yolculuğu, 2002'de kanatları fotovoltaik modüllerle kaplanmış insansız ilk uçağın (Pathfinder) uçuşu ilginç örnekler arasındadır (Altın, 2006). Tablo 1.1'de organik güneş pillerinin geliştirilmesinde büyük önem taşıyan dönüm noktaları belirtilmektedir.

Tablo 1.1 Organik güneş pilleri için bazı önemli dönüm noktaları (Spangaard ve Krebs, 2004)

<b>1839</b>	Becquerel tarafından fotoelektrokimyasal olayın gözlenmesi
<b>1906</b>	Pochettino'nun antrasenin fotoiletkenliği üzerinde çalışması
<b>1958</b>	Kearns ve Calvin'nin magnezyum pitalosiyanimlerle (MgPh) çalışarak 200 mV fotovoltaj elde etmesi
<b>1986</b>	Tang'ın ilk heteroeklem fotovoltaik cihazı geliştirmesi
<b>1991</b>	Hiramoto'nun ilk ilk boya/boya karışım heteroeklem fotovoltaik yapıyı birlikte süblimleştirme ile gerçekleştirmesi
<b>1993</b>	Sarıçiftçi'nin ilk polimer/C60 heteroeklem cihazı yapması
<b>1994</b>	Yu'nun ilk karışım polimer/C60 heteroeklem cihazı yapması
<b>1995</b>	Yu ve Hall'ın ilk karışım polimer/ polimer heteroeklem cihazı yapması
<b>2000</b>	Peters ve van Hal'ın oligomer C60 çiftli ve üçlülerini fotovoltaik pillerde aktif malzeme olarak kullanması
<b>2001</b>	Schmidt-Mende'nin hegzabenzocoronon ve perilenden kendi kendine organize olabilen sıvı kristal güneş pili yapması
<b>2003</b>	Sarıçiftçi ve ark. MDMO-PPV:PCBM ilk karışım heteroeklem cihaz

### **1.1.7 Fotovoltaik Teknolojileri**

#### *1.1.7.1 Tek Kristalli ve Çok Kristalli Silikon Esaslı Güneş Pilleri*

Tek kristalli yada çok kristalli silikon esaslı güneş pilleri, birinci nesil güneş pili teknolojisidir. Silikon teknolojisi, fotovoltaiklerin geliştirilmesinden çok daha önce geliştirilip büyük miktarlarda mikroelektronik endüstrisinde kullanılmakta olduğu için, bu alandaki çalışmalar bu malzemelerle başlatılmış ve devam ettirilmiştir. Tek kristalli silikon için laboratuvar ortamında en iyi verim %24,7 olarak gerçekleşmiştir. Güneş pilleri için yüksek saflıkta silikon gerekmesi, ışığın soğurulması için kalın kristal yapıda silikona ihtiyaç duyulması (%90 soğurma için 100 mikrometre) ve ayrıca modül maliyetinin %50'sini silikon levhalarının işlenmesinin oluşturması araştırmacıları yeni malzemeler aramaya yönlendirmiştir (Goetzberger ve ark., 2002).

#### *1.1.7.2 İnce Film Teknolojisi ile Üretilen Güneş Pilleri*

Silikon ince filmler (amorf silisyum (a-Si), protokristal, nanokristal (nc-Si), mikrokristal ve kristal silisyum (c-Si)), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum selenid (CIGS) gibi ince filmler ikinci nesil güneş pili teknolojisi ürünleridir. Araştırmacılar, ince film güneş pillerinin üretimine daha düşük üretim maliyetleri nedeniyle yönelmiştir. Silisyum esaslı piller 100 cm<sup>2</sup>'lik alanlarda üretilebilmekteyken, ince filmler istenilen büyüklükte üretilebilmektedir. CIGS ince filmler, eş zamanlı buharlaştırma (=coevaporation) veya öncü tabakaların biriktirilmesinden sonra H<sub>2</sub>Se buharı ile selenleme yapılarak üretilebilmektedir. Laboratuvar şartlarında %17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip modülde ise %10,2 verim elde edilmiştir. Kristal ve amorf teknolojilerin heteroyapılarda bir araya getirilmesiyle (c-Si ve a-Si kombinasyonu) yüksek verim, nispeten düşük işlem sıcaklıkları (<200°C) ve düşük teknoloji maliyeti gibi avantajlar sağlanabilmektedir. Yüksek kristalli yapıda bir malzeme olan CdTe'nin verimi laboratuvar tipi küçük pillerde yaklaşık %16, ticari modüllerde ise yaklaşık %7 olarak elde edilmektedir. CdTe esaslı güneş pillerinin maliyetleri silikon esaslılara göre daha düşüktür (EİE, 2009). İnce filmlerde kullanılan yarı iletken

malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahiptirler, bu da pahalı olan yarı iletkenlerin daha az kullanılmasını sağlamıştır (Goetzberger ve ark., 2002).

#### *1.1.7.3 Çoklu Eklemlı Piller*

Ardı ardına sıralanmış veya çoklu eklemlı güneş pillerinde kullanılan GaAs, GaAlAs, GaInAsPO, InAs, InSb ve InP gibi yarı iletkenler, farklı bant aralıklarıyla bir araya gelerek, güneş spektrumu enerjisinin daha fazla bir bölümünü kullanacak bir bant aralığına sahip olurlar ve daha iyi bir performans gösterirler. Ancak bu malzemeler çok pahalıdır ve dolayısıyla en önemli kullanım alanı uzay uygulamalarıdır. Dünyadaki uygulamalar için ise, çok düşük elektrik üretim maliyetine sahip optik yoğunlaştırıcı teknoloji geliştirilmiştir (Swanson, 2000). Bu şekilde yoğunlaştırıcı pil ile %30 verim elde edilebilmektedir. Örneğin, Galyum Arsenit (GaAs) laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcı) verim elde edilmektedir. Diğer yarı iletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemlı GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır (EİE, 2009; Goetzberger ve ark., 2002).

#### *1.1.7.4 Foto-elektrokimyasal Güneş Pilleri*

Foto-elektrokimyasal güneş pilinde fotoaktif tabaka olarak yarı iletken-elektrolit eklemi kullanılmaktadır. Uygun bant aralığına sahip yarı iletkenlerin kararlı olmaması, geniş bant aralıklı malzemelerin ise kararlı olmasına rağmen düşük verim göstermesi, çalışmaların sınırlı kalmasına sebep olmuştur. Hızlı yenileyici foto-elektrokimyasal işlem mekanizmasına dayanan boya ile duyarlı hale getirmiş piller ile (nano-kristal yapılı TiO<sub>2</sub> filmi, rutenyum bipiridil kompleksi boyalar ile duyarlı hale getirilmiştir.) %10 verim elde edilebilmiştir (O'Regan ve Gratzel, 1991). Bu pilin, klasik güneş pilleri ile karşılaştırıldığında temel farkı, ışık soğurulmasından sorumlu olan fonksiyonel elemanın boya olması ve kendi kendine elektrondan ayrılarak mekanizmayı yeniden başlatmasıdır. Çok saf olmayan başlangıç

malzemeleri ve basit pil yapım aşaması (silikon esaslı pil yapımındaki temiz odaların gerekmemesi) avantajlarıyla bu tip pillerin geleceği parlak görünmektedir. Ancak zaman içerisindeki kararlılığı, sıcaklık değişim aralıkları ve elektrolit tabakanın korunması konuları üzerinde daha fazla çalışılması gerekmektedir (Goetzberger ve ark., 2002).

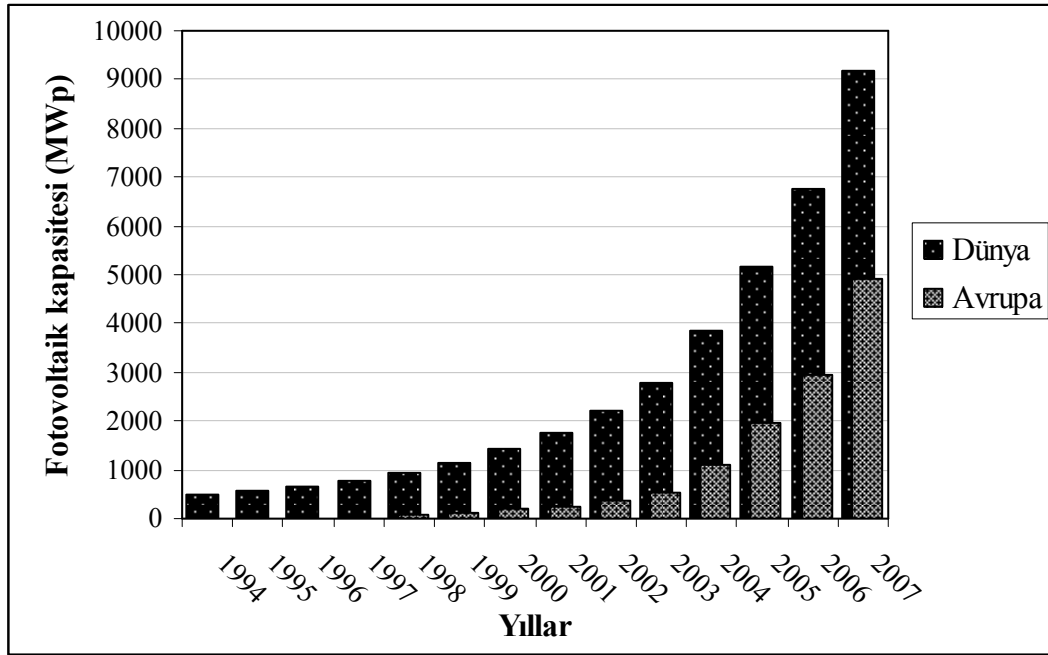
#### *1.1.7.5 Organik Güneş Pilleri*

Organik yarı iletkenlerin düşük maliyetle ve kolay yöntemlerle sentezlenmesi ve bunların kullanılması ile üretilen ince film pillerin vakumda buharlaştırma veya süblimleştirme ya da çözültiden veya baskı yaparak kaplama gibi kolay yöntemlerle imal edilebilmesi, organik malzemelerden güneş pili elde edilmesi konusunda çalışmaların ortaya çıkmasına ve günümüzde de devam etmesine olanak sağlamıştır (Güneş, Neugebauer ve Sarıçiftçi, 2007). Organik güneş pillerinde, organik yarı iletkenler, iletken polimerler, boyalar, pigmentler ve sıvı kristaller kullanılabilir. Bu konuda Bölüm 2’de daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

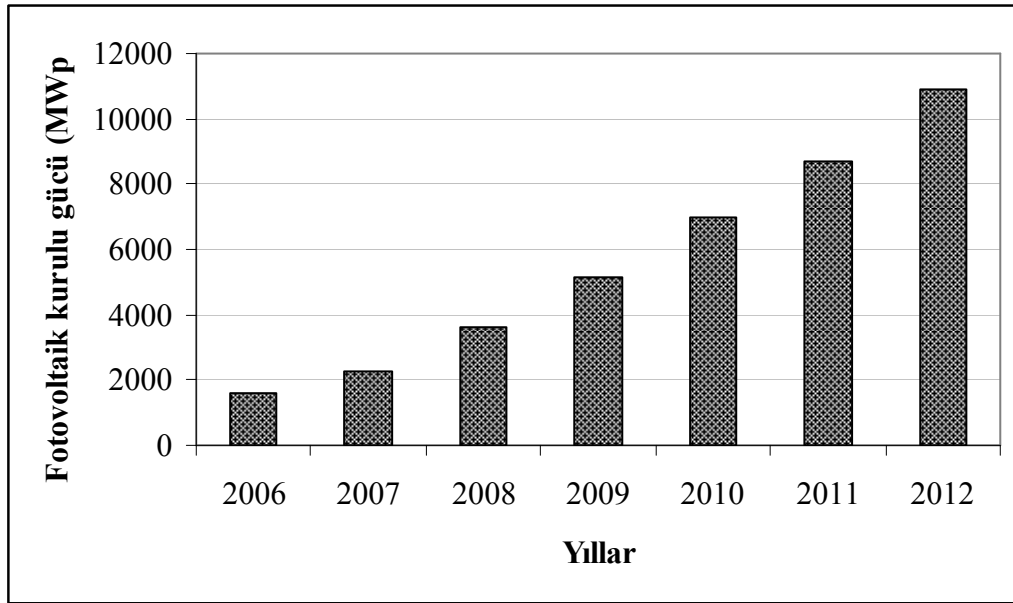
#### *1.1.8 Fotovoltaik Teknolojisinin Dünyadaki Durumu*

Dünya genelinde, fotovoltaik teknoloji pazarı hızla büyümektedir ve yapılan çalışmalar önümüzdeki yıllarda bu büyümenin devam edeceğini göstermektedir. Tüm dünya genelinde, toplam kapasite, 2007 sonunda, 9 GWp (gigawatt-peak) miktarını aşmıştır. Avrupa’da yaklaşık 1,5 milyon konutun elektriği fotovoltaik sistemler ile üretilen elektrik enerjisi ile karşılanabilmektedir (Avrupa Fotovoltaik Endüstrisi Kurumu [EPIA], 2008). Şekil 1.2 ve Şekil 1.3’de mevcut durum ve ileriye dönük fotovoltaik gelişimi görülmektedir.





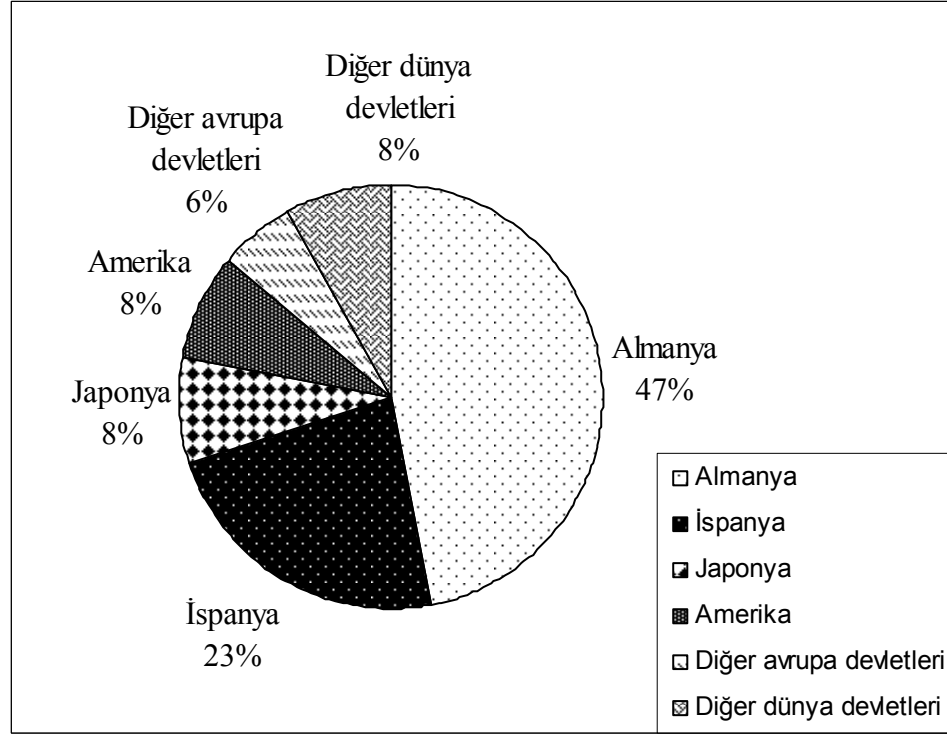
Şekil 1.2 Yıllara göre fotovoltaik enerji kapasitesi (EPIA, 2009)



Şekil 1.3 2012 yılına kadar dünya genelinde fotovoltaik kurulu gücü değişim öngörüsü (EPIA, 2009)

Geçtiğimiz son beş yılda, dünya genelinde fotovoltaik pil üretimi, yıllık bazda yaklaşık %30 oranında bir büyüme göstermiştir. 2007 yılı dünya fotovoltaik pil üretim pazarı 2826 MW'a ulaşmıştır. 2007 fotovoltaik pil pazarını dünya bazında

inceleyecek olursak en büyük paya %47 ile Almanya'nın, onun arkasından ise %23 ile İspanya'nın sahip olduğu görülmektedir (EİE, 2009).



Şekil 1.4 2007 yılı dünya fotovoltaik güneş pili pazarı (EPIA, 2009).

### 1.1.9 Türkiye'de Güneş Enerjisi ve Fotovoltaik Teknoloji

Türkiye, elektrik enerjisini, kömür, doğal gaz, akaryakıt, jeotermal ve son zamanlarda rüzgar enerjisi ve hidroelektrik santraller gibi sistemlerle üretmektedir. TEIAS tarafından 2006 yılı için verilen elektrik enerjisi miktarı 174.000 GWsaat'tır. Bu elektrik enerjisi, %74,82 oranında termik santraller, %25,11 oranında hidroelektrik enerjisi ve %0.07 oranında rüzgar enerjisi ile üretilmektedir. Isıl yöntemle elektrik enerjisi üretiminde linyit %18,37, doğal gaz %44'lük bir paya sahiptir. Diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında bu büyük enerji talebi için fotovoltaik sistemlerin henüz önemli bir katkısının olmadığı görülmektedir. Ayrıca, Türkiye'de henüz devletin fotovoltaik sistemleri destekleme konusuna önemli bir katkısı da bulunmamaktadır. Türkiye'nin yıllık güneş enerjisi potansiyelinin 1015 kWsaat olduğu tahmin edilmektedir ve bu miktar, şu andaki elektrik tüketiminden

5700 kat daha fazladır. Ancak günümüzde, Türkiye’de fotovoltaik pil üretimi yapan bir firma da bulunmamaktadır (İçli ve Çubukçu, 2007).

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından, 1966-1982 yıllarında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden de yararlanılarak yapılan çalışmaya göre, Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti yılda 1311 kWh/m<sup>2</sup> (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir. Güneş Enerjisi potansiyeli 380 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu potansiyel, toplam 56.000 MW kurulu güce sahip doğal gaz çevrim santrali elektrik enerjisi üretimine eşdeğerdır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2009). Tablo 1.2’de verilen değerler de incelendiğinde, Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresine sahip bölgesinin Güney Doğu Anadolu Bölgesi olduğu, bunu Akdeniz Bölgesinin izlediği anlaşılmaktadır (EİE, 2009).

Tablo 1.2 Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı (EİE, 2009)

<b>Bölge</b>	<b>Toplam güneş enerjisi (kWh/m<sup>2</sup>-yıl)</b>	<b>Güneşlenme süresi (Saat/yıl)</b>
G.Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

#### *1.1.9.1 Güneş Toplayıcıları*

Güneş toplayıcıları (=solar collectors) ülkemizde, çoğu Akdeniz ve Ege Bölgelerinde kullanılmakta olan, güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştüren sıcak su

üretim sistemleridir. Bugüne kadar, ülkemizde kurulu olan güneş toplayıcıları miktarı yaklaşık 12 milyon m<sup>2</sup> olup, yıllık toplayıcı üretim miktarı, dünya üretimi içerisinde önemli bir paya sahip olarak 750 bin m<sup>2</sup>'dir. Bu üretimin bir kısmı yurtiçinde kullanılmakta bir kısmı ise ihraç edilmektedir. Güneş enerjisinden ısı enerjisi yıllık üretimi 420 bin TEP (petrole eşdeğer ton =Ton Equivalent Petroleum) civarındadır. Güneş toplayıcılarının ürettiği ısı enerjinin Türkiye'nin birincil enerji tüketimine katkısı yıllara göre Tablo 1.3'te yer almaktadır.

Tablo 1.3 Güneş toplayıcılarının yıllara göre üretim miktarları (EİE, 2009)

Yıl	Güneş Enerjisi Üretimi (bin TEP )
1998	210
1999	236
2000	262
2001	290
2004	375
2007	420

TEP: Petrole eşdeğer ton (Ton Equivalent Petroleum)

#### 1.1.9.2 Güneş Pilleri

Türkiye'de güneş pilleri (Şekil 1.5), elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim yerlerinden uzak yerlerde (sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması gibi uygulamalarda) ekonomik yönden uygun olarak kullanılabilir.



Şekil 1.5 Elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulmuş tek kristalli güneş pili sistemi (1.6 kWp gücünde) (EİE, 2009)

Ülkemizde çoğunluğu orman gözetleme kuleleri, haberleşme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasında ve ayrıca Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla Üniversitesi, Ege Üniversitesi gibi kamu kuruluşlarında olmak üzere, küçük güçlerin karşılanması ve araştırma amaçlı kullanılan güneş pili kurulu gücü 1 MW'a ulaşmıştır.

Fotovoltaik teknolojisi araştırma ve geliştirme konularında, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM), çeşitli üniversiteler (Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma Enstitüsü, Muğla Üniversitesi, ODTÜ, Kocaeli Üniversitesi, Fırat Üniversitesi) ve EİE çalışmalar yapmaktadır. Güneş enerjisi verilerinin ölçülmesi konusunda EİE ile birlikte Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü de faaliyet göstermektedir. Bu konuda Türk Standartları Enstitüsü (TSE) de uygulama ve test yöntemleri ile ilgili standartlar çıkartmaktadır.

Çeşitli açık alan uygulamalarında, güneş pili aydınlatma birimlerinde gün boyunca güneş enerjisinden üretilen elektrik ile akü şarj edilebilmektedir. Geceleri aydınlatma amaçlı olarak ve gündüz de şebekeden uzak yerlerde dizel motor pompalarıyla ekonomik olarak rekabet edebilen su pompalama sisteminde kullanılmaktadır. Örneğin, 616 Wp gücünde bir güneş pili, invertör ve dalgıç pompa kullanılarak yılda yaklaşık 11000 m<sup>3</sup> su pompalayabilmektedir. Karayollarında, uygulanan güneş pilli trafik ikaz sistemi çalışmalarında, kullanılan uyarı lambalarının güneş pilleri aracılığıyla çalıştırılmasını amaçlayan proje başarılı biçimde gerçekleştirilmiştir (EİE, 2009).

## **1.2 Teknik Tekstiller- Akıllı Tekstiller**

Dünya nüfusunun artmasına paralel olarak insanların ihtiyaç duydukları ürünlerin de çeşitliliği, modadaki değişimler ve yeni kullanım alanları nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Diğer ürünlerde olduğu gibi, günümüzde tekstil ürünleri de geleneksel kullanım şekli olan örtünme ve giyinme kullanımının dışına çıkarak, günlük hayatta ve endüstride pek çok gereksinimi karşılayacak işlevsel özellikli ürünler haline gelmiştir. Özellikle, görünüş ve estetik özellikler gibi bilinen tekstil özellikleri

dışında, çeşitli teknik performansları ve işlevsel özellikleri için geliştirilerek üretilen tekstil ürünleri ya da malzemeleri, yani teknik tekstiller, 1980'li yıllardan itibaren hızlı bir şekilde gelişmiş, yoğun bilgi ve teknoloji gerektiren günümüzün katma değeri yüksek alanlarından biri haline gelmiştir (İTKİB, 2008).

Akıllı tekstiller, teknik tekstiller içerisinde, her türlü, çevresel şartlar ve uyaranları (elektriksel, kimyasal, termal, manyetik, ışık ve benzeri) algılama ve hissetme yeteneğine sahip olup, uyaranları değerlendirerek onlara tepki veren ve kendi yapısal fonksiyonlarının birlikte çalışmasıyla adapte olabilen akıllı malzeme ve yapıların kullanıldığı ürünlerdir (Tao, 2001).

Akıllı tekstiller, akıllı materyallerin verdikleri reaksiyonlara göre aşağıdaki gibi dört kısma ayrılabilir (Gonzalez, 2003; Tao, 2001):

- Pasif akıllı (=smart) materyaller: Sadece çevresel dış veya kendi iç uyaranlarını algılayıp hissedebilir ve sensörler gibi davranırlar.
- Aktif akıllı materyaller: Pasif akıllı materyallerin sahip olduğu özellikleri göstermekle birlikte, uyarana karşı tepki verir ve devindirici (=actuator)'ye sahiptirler.
- Çok akıllı malzemeler: Uyaranlara karşı duyarlı, reaksiyon veren ve uygun şekilde kendilerini adapte eden malzemelerdir.
- Zeki (=intelligent) malzemeler: Önceden programlanmış bir tarzla reaksiyon verme veya bir fonksiyonu gerçekleştirmek için aktive olma kabiliyeti olan akıllı materyallerdir.

Akıllı materyaller, metalik, camsı, polimerik, sıvı kristal ve kompozit yapılardaki materyal tipleri arasında yer almaktadır. Polimerik maddeler, esneklik, çok yönlülük ve özellikle tekstil yapılarına uygulanabilirlikleri açısından daha fazla tercih edilmektedir. Akıllı malzemelerin tekstillere ve endüstriye iyi bir şekilde uyum sağlaması ise ancak farklı bilim dallarından araştırmacıların ortak çalışması ile mümkün olabilmektedir. Bu konudaki bazı çalışma alanları Tao (2001) tarafından aşağıdaki şekilde belirtilmiştir:

Sensörler ve devindiriciler (eyleyici) için:

- Işığa duyarlı malzemeler,
- Fiberoptikler,
- İletken polimerler,
- Isıya duyarlı polimerler,
- Şekil hafızalı polimerler,
- Akıllı kaplama malzemeleri,
- Kimyasal duyarlı malzemeler,
- Mikro kapsüller,
- Mikro ve nano malzemeler.

Sinyal iletme, işleme ve kontrolü:

- Sinir ağları ve kontrol sistemleri,
- Kavrama teorisi ve sistemleri.

Entegre edilmiş işlemler ve ürünler:

- Giyilebilir elektronikler ve fotonikler,
- Uyarlamalı ve duyarlı yapılar,
- Biyo-taklitler ,
- Doku mühendisliği,
- Kimyasal veya ilaç salımı,

### ***1.2.1 Sentetik Lifi Nitelikli Life Dönüştüren Katkı Maddeleri***

Sentetik liflerin ana maddesi olan polimerlerin tekstil, otomotiv, elektronik, tüketici ihtiyaçlarının üretilmesi ve paketlenmesi gibi pek çok uygulamada başarılı bir şekilde kullanılabilmesi gerçek anlamda, bazı katkıların var olması ile açıklanabilmektedir. Polimer katkıları, imalat problemleri, performans sınırlamaları ve çevresel dayanım kısıtlanmasının üstesinden gelinmesi gerektiği durumlarda kullanılmaktadır. Katkı, polimer malzemeler için içerik madde anlamına gelmektedir ancak kaplamalar, vernik ve boyalar, baskı mürekkepleri, fotoğrafik filmler, ve kağıtlar gibi diğer malzemeler içerisinde de çok önemli rol oynamaktadır. Bu açıdan,

polimerler ile tekstil, lastik, yapışkan ve yiyecek teknolojisi endüstrileri arasında önemli örtüşme vardır. Örneğin, pigmentler, plastik endüstrisi dışında, sentetik liflerde, mürekkeplerde, kaplamalarda ve lastiklerde de kullanılmaktadır (Bart, 2005).

Katkı maddesi, bitmiş üründe teknik bir etki gerçekleştirmek için polimer içerisine eklenebilmektedir. Katkı maddelerine örnek olarak; antioksidanlar, antistatik ajanlar, antisislenme, emülsiyonlaştırıcı, dolgu maddeleri, etki değiştiriciler, yağlayıcılar, çözücüler, stabilizatörler, kalınlaştırıcılar, UV absorblayıcılar, serbest ajanlar verilebilir. Polimer katkılarının ana fonksiyonları Tablo 1.4’de verilmiştir.

**Tablo 1.4** Polimer katkılarının ana fonksiyonları (Bart, 2005)

<b>Görev</b>	<b>Katkılar</b>
Polimerizasyon/kimyasal modifikasyon yardımcıları	Hızlandırıcılar, zincir büyüme düzgünleştiricileri, çapraz bağlanma ajanları
Üretim ve işlem iyileştiriciler (dönüşüm yardımcıları)	Köpük engelleyici ajanlar, akışkanlaştırıcılar, yüzey aktif maddeleri, ıslatma ve kalınlaştırma ajanları, kayganlık ve yağlama ajanları, plastikleştiriciler
İmalat ve uygulama süresince arttırılmış dayanım	Asit yiyiciler, biyostabilizatörler, Işık/UV stabilizatörleri, metal deaktivatörleri, üretim/ısısal stabilizatörler
Mekanik özelliklerin geliştirilmesi/modifikasyonu	Çapraz bağlanma ajanları, lifli takviyeler (cam, karbon), dolgular, parçacık takviyeleri, plastikleştirici ve esneticiler, etki değiştiriciler (elastomerler)
Ürün performansının geliştirilmesi	Antistatik ajanlar, alev geciktiriciler, sürtünme ajanları, koku değiştiriciler, plastikleştiriciler, duman bastırıcılar
Yüzey özelliklerinin geliştirilmesi	Bağlayıcılar, sislenme engelleyiciler, antistatik ajanlar, aşınma engelleyici



	ajanlar, yağlayıcılar, kaymayı artırıcı veya azaltıcı ajanlar, yüzey aktif maddeler, ıslatma ajanları
Optik özelliklerinin geliştirilmesi	Çekirdek oluşturan ajanlar, optik parlaticılar, pigmentler ve renklendiriciler
Formulasyon maliyetinin azaltılması	Seyreltici ve miktar artıcılar, özellik dolguları

Fonksiyonel katkıların kullanılması ve tekstillere uygulanması ile elde edilen, faz değiştiren malzemeler (PCM), şekil hafızalı polimerler (SMM), kromik malzemeler (çeşitli etkilerle renk değiştiren), iletken malzemeler günümüzde ticari olarak mevcut olan akıllı tekstillere örnektir. Ayrıca güç kaynağı konusu, akıllı tekstiller için üstesinden gelinmesi gereken en önemli konulardan birisidir. Esnek güneş pilleri, mikro yakıt pilleri ve vücut hareketini elektrik enerjisine dönüştürebilme olasılığı ise çok ilginç konulardır.

Akıllı tekstil ürünleri konusunda yapılan bilimsel çalışmalarda ve kendini kanıtlamış denemeler sonucunda yapılan üretimlerde, faz değiştiren malzemeler, termokromik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar ve polimerler, iletken lifler ve iplikler, metaller, kablolar ve iletken polimerler, işaretleme cihazları için kuantum tünelli kompozitler, piezoelektrik (uygulanan basınç kuvvetini elektrik enerjisine çeviren) davranış için malzemeler, organik veya plastik elektronikler, biyomateryaller, ışık yayan polimerler, ışık yayan diyotlar, fiberoptikler, fotovoltaikler ve güneş pilleri, fotolüminesans, fotokatalitik maddeler, fotokromik materyaller, holografi, plazma teknolojileri, lif ve kumaş kaplama için nanoteknolojiler, mikro kapsülleme, mikroelektronik mekanik sistemler (MEMS) malzeme ve yöntemleri kullanılmaktadır.

### **1.2.2 Fotovoltaik Tekstiller**

Fotovoltaik tekstil denilince, güneş ışığını kullanarak elektrik enerjisi üreten fotovoltaik bir yapının, dokuma ve örme kumaş veya giysi gibi bir tekstil yapısı

üzerine yerleştirilerek tekstile entegre edilmesi veya lif şeklinde tekstil malzemesi olarak üretilebilmesi sonucunda, fotovoltaik lif, iplik ve kumaşları oluşturabilmesi akla gelmektedir. Entegre edilen düz film yapılarının dışında, tekstil yapılarına daha uygun, esnek, fotovoltaik, ince bir yapı üretmek, öncelikle gerekli özellikleri sağlayan esnek ve etkin bir lifin üretilmesi ile sağlanabilecektir. Böyle bir lifin üretilmesi ise, kendine özgü üretim işlemleri ve özel materyaller ile sağlanabilecektir (Çelik, Demir ve Bozkurt, 2008).

Fotovoltaik tekstiller sağladıkları eşsiz özellik ile hem bilimsel hem de ticari ilgiyi üzerlerine çekmeyi başarmışlardır. Son yıllarda, tekstillerdeki esnek güneş pili uygulamaları için amorf silikonun yanı sıra, silikon içermeyen daha az karbondioksit yayılması nedeniyle daha çevreci olduğu belirtilen bakır, indiyum, galyum ve selenyum (CIGS) bileşimi esaslı fotovoltaik materyallerin kullanımı artmaya başlamıştır (Schubert ve Werner, 2006).

Hynek ve ark. (2005), fotovoltaik enerji üretimi için, pamuk saten kumaştan yapılmış bir kravatın ön yüzeyine esnek silikon esaslı güneş panellerini yerleştirmişlerdir. Kravatın, üzerindeki panel deseni ile uygunluk göstermesi açısından da dijital tekstil baskı yöntemini kullanmışlardır. Panel yüzeyleri, güneş pillerinin korunması açısından bir laminasyonla kaplanmıştır. Şekil 1.6'deki gibi elde edilen fotovoltaik tekstilin bazı dezavantajlarına rağmen (parlaklık, kravatın düğümlenmesi ve genişliği) dijital tekstil baskı tekniği ile pek çok sorunun üstesinden gelinebileceği belirtilmiştir (Hynek, Campbell ve Bryden, 2005).



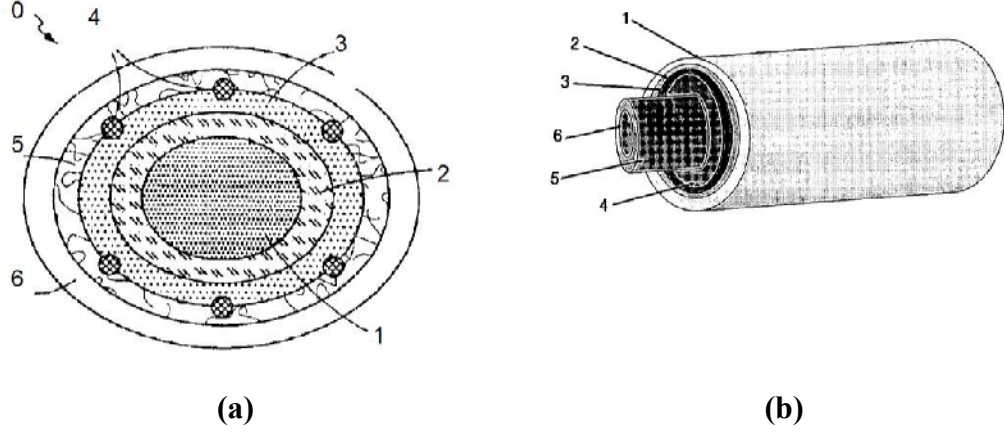
Şekil 1. 6 Fotovoltaik ceket ve kravat (Hynek ve diğer., 2005)

İnorganik yarı iletken esaslı güneş pillerinin tekstillere entegrasyonu çalışmalarının yanında, Shur ve ark. 2001 yılında yaptıkları çalışmalarda yarı iletken iplikler elde etmek için polikristalin yarı iletken CdS esaslı güneş pilleri ve metal filmler (CuS) kullanmışlardır. Bu şekilde, CdS/Cu<sub>2-x</sub>S esaslı filmler sentetik iplik üzerine biriktirilmiş ve kumaş haline getirilerek fotovoltaik etkisi için ölçüm yapılmıştır (Shur, Sinius, Gaksa ve Romyantsev, 2001; Shur ve ark., 2001).

Araştırmacılar, 2002 yılında, çeşitli uygulamalara doğrudan kullanılacak bir güneş enerjisi teknolojisinin esnek ve düşük çaplı materyallere ve life uygulanması üzerine çalışmışlardır. Fotokimyasal güneş pili çalışılan bu konuda, iletken çelik etrafı, yarı iletken nanoboyutlu TiO<sub>2</sub> tozu ile kaplanıp iç elektrot olarak kullanılmıştır. Farklı boyların TiO<sub>2</sub> tozunu duyarlılaştırmadaki etkisi incelenmiştir. Üretilen pilin tekstil ürünleri için olası kullanım biçimleri önerilmiştir (Baps, Eber-Koyuncu ve Koyuncu, 2002).

2005 yılında patentlenmiş başka bir çalışmada (Şekil 1.7a) fotovoltaik lif (0) üretimi yine fotokimyasal pil yapısı ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Fotovoltaik etkinin sağlandığı materyal, en içte lif tabakası (1), onu saran ışığa hassaslaştırılmış nanomatriks materyal (2), bu tabaka ile ışık geçiren elektriksel iletken arasında yer

alan yük taşıyıcı materyal bölümü (3), önemli ölçüde ışığı ileten elektriksel iletken bölüm (5) ve bunun içine yerleştirilmiş bir veya daha fazla tel (4) ve en dışta koruyucu tabakadan (6) oluşmaktadır (Chittibabu ve ark., 2005).



Şekil 1.7 Fotovoltaik lif enine kesitleri solda (Chittibabu ve ark., 2005) ve sağda (Nam ve diğer., 2006)

2006 yılında da araştırmacılar, esnek, silindirik ve fotokimyasal bir güneş pili (Şekil 1.7b) üzerine çalışmışlardır. Silindir biçiminde olması, geniş yüzeyiyle her açıdan güneş ışını alabilmesini sağlamaktadır. Silindir biçimli güneş pili çeşitli tabakalardan oluşmaktadır; en önemlisi ise iletken şeffaf taşıyıcı tabaka, ışık emici (metal oksit) tabaka ve hassaslaştırıcı (boyarmadde) maddeleri kapsayan yarı iletken elektrottur. Yapı, silindirik kılavuz (6), elektrot (5), elektrolit tabaka (4), elektrolit tabakayı saran yarı iletken elektrot; hassaslaştırıcı boya (3), ışığı emen tabaka (2), iletken şeffaf taşıyıcı tabakadan (1) oluşmaktadır (Nam, Park, Jung ve Park, 2006)

Toivola ve ark. (2008) boya duyarlı güneş pili (DSSC) esaslı malzemeleri optik lif üzerine biriktirerek lif formunda ışığın elektrik enerjisine dönüştürülmesi üzerine çalışmışlardır. Fotokimyasal pil yapısında, ZnO:Al şeffaf akım toplayıcı tabaka, TiO<sub>2</sub> fotoelektrot (rutenyum boya ile duyarlaştırılmış), jelatin iyot elektrolit ve karbon esaslı sayaç elektrot, farklı çaplardaki optik lifler üzerine katman katman biriktirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan bir fotovoltaik yapıda, en yüksek akım yoğunluğu 0,26 nA/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

Ticari olarak inorganik esaslı pek çok fotovoltaik tekstil uygulaması mevcuttur ve aktif olarak kullanılmaktadır. Elektrik şebekesinden uzak ortamlarda gerekli cihazlara enerji sağlayabilecek, taşınabilir, kalanabilir fotovoltaik bir panel Şekil 1.8'de gösterilmektedir. Özellikle, askeri uygulamalar için, fotovoltaik enerji üretimi çok büyük önem taşımaktadır. Şebekeden uzak noktalarda, askerler, fotovoltaik çadır, çanta, ceket ve benzeri ürünleri kullanarak gerekli enerjinin bir kısmını karşılayabilmektedirler. Fotovoltaik ürün sayısının artırılmasıyla elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarı da artmaktadır. Üretilen enerji pillerde depolanabilir ve aydınlatmadan havalandırmaya, iletişim radyoları, GPS sistemleri, şarj edilebilir telefonlar ve dizüstü bilgisayarların enerji ihtiyaçlarına kadar pek çok amaç için kullanılabilir (Powerfilm, 2008).



Şekil 1.8 Rulo yapılabılır silikon esaslı esnek güneş panelleri (solda) ve fotovoltaik çadır (sağda) (Powerfilm, 2008)

Araştırmacılar tarafından, kayak ceketinde amorf silikon kullanılarak yapılan yeni güneş pilleri 0,5 mm kalınlığında ve optimum gün ışığı altında %5 verimle çalışmaktadır. Omuz ve sırt bölgelerine yerleştirilen piller, nispeten ince olduğundan kullanıcı için rahatlık sağlayacak esnekliktedir. Bir dönüştürücü ile güneş pillerinin ürettiği voltaj, sabit akıma dönüştürülür. Çok ince, yıkanabilir mikro kablolar materyal içerisine dikilmiştir ve elektrik akımı bunlarla, çeşitli cihazların ya

da pillerin şarj edilebileceği bir yere yönlendirilmiştir (Maiersports, 2008). Ayrıca ticari olarak da mevcut çeşitli tekstil ürünleri de bulunmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 Ticari olarak satışı yapılmakta olan taşınabilir küçük cihazların çalışması için elektrik üretimini gerçekleştirebilen bir güneş ceketini (solda) ve çantasını (sağda) (Scottevest, 2008).

## **BÖLÜM İKİ**

### **ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ**

#### **2.1 Organik Güneş Pilleri**

Son yıllarda, atmosferdeki karbondioksit (CO<sub>2</sub>) miktarındaki artış ve küresel ısınma problemleri ile ilişkili ekolojik düşünceler, araştırmacıları ve devlet yöneticilerini bilinen enerji üretim teknolojilerine alternatif olarak, yenilebilir bir enerji kaynağı olan fotovoltaik enerji teknolojisini kullanmaya yöneltmiştir. Bununla birlikte, günümüzde en yüksek verimli ve en yaygın fotovoltaik enerji üretme sistemi olan silikon esaslı fotovoltaiklerden elektrik elde etme maliyeti, hidrolik, nükleer veya fosil yakıtlarla üretilen ticari elektrik üretim maliyetlerinden çok daha yüksektir. Bu yüzden yüksek güç dönüşüm verimli ( $\eta$ ) ve düşük maliyetli güneş pilleri geliştirilmesi zorunludur. Yüksek verim ve düşük maliyet unsurlarını başarılı biçimde yerine getirme potansiyeline sahip organik güneş pilleri, tüm insanlık için, gelecek vadeden bir enerji kaynağı olarak görülmektedir (Imahori, 2007; Tang, 1986).

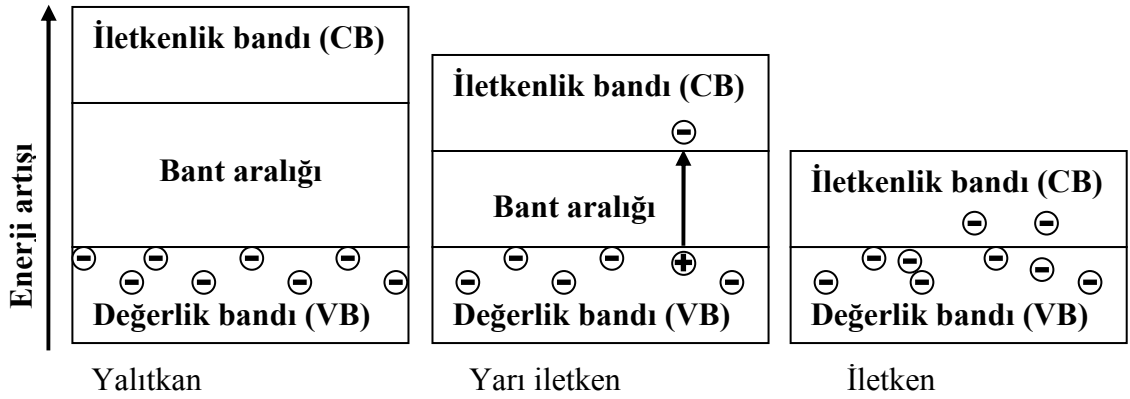
İnorganik güneş pillerine kıyasla organik güneş pilleri çeşitli avantajlara sahiptir. Bunlar; şeffaflık, esneklik, ucuzluk, hafiflik ve renk çeşitliliği ile ortam şartlarında üretim ve işlem kolaylıklarıdır. İnce esnek filmler üzerinde üretilebilme, rulolardan kesilebilme ve kalıcı yapılar ve yüzeyler üzerine eklenebilme gibi pratik uygulamalar nedeniyle, organik güneş pilleri, büyük ölçekli üretimlerde çeşitli biçimlerde kullanılabileceklerinden çok ilgi çekici görünmektedirler.

#### **2.2 Organik Yarı iletkenler ve Yapısal Özellikleri**

Organik bir yarı iletken, yarı iletken özelliklere sahip organik materyaldir. Yarı iletken element, atom yapısı olarak son yörüngesinde dört elektron bulunduran bir maddedir. Yarı iletken normal şartlar altında yalıtkan (elektriği iletmeyen) özellik gösterip dışarıdan bir etki uygulanmasıyla iletken hale gelen maddelerdir. Uygulanan etki sona erdiğinde, tekrar yalıtkan duruma dönerler.

İnorganik yarı iletkenlerde, ısı, ışık, elektrik gibi bir enerji sisteme verildiğinde, maddenin değerlik (valans) bandından elektronlar iletkenlik bandına geçebiliyorsa, yani maddenin atomlarından elektronlar küçük bir enerji ile koparılabilirse, bunlara yarı iletken denir. Bir maddenin değerlik ve iletkenlik bandı arasındaki mesafe büyük ise ve elektronlar, ısı veya ışık etkisiyle kolayca değerlik bandından iletkenlik bandına geçiş yapamıyorsa, o madde yalıtkandır. İletken maddelerde ise, değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki mesafe yok sayılır ve serbest elektron doğal olarak bulunur. Yarı iletkenler gerekli yerlerde, saf olarak kullanılmadıkları için P ve N tipi malzemeler haline getirilirler. P ve N tipi malzemelerin temelinde, monokristal yapıdaki yarı iletkenler vardır. Bu yarı iletkenlere belirli tekniklerle başka maddeler katılır ve katılan maddeye göre P ve N tipi madde elde edilir. N tipi malzeme için monokristal yapıdaki malzemeye 5A grubu elementler katılır. 5A grubu elementlerin 5 tane değerlik elektronu vardır. Fakat 5 elektron sanki boştaymış gibi 5A grubu elementinin yörüngesinde kalır. Bu sayede N tipi malzemenin içinde çok kolay şekilde serbest hale geçebilecek elektronlar bulunur. Elektron fazlalığından dolayı negatif yüke sahip olduğundan N tipi adı verilmiştir. P tipi malzeme ise katılan elementler 3A grubu elementleridir. Bu elementler de 4A grubu elementleriyle bağ yaptıklarında 7 elektrona sahip olurlar. Yani sanki bir elektron boşlukları varmış gibi davranırlar. P tipi malzemelerde elektrik akımı yani elektronlar bu boşluklardan geçerler. Bir atomun boşluğuna elektron bağlanır sonra komşu atoma geçer ve böylece elektron akışı sağlanmış olur. Akım sanki boşluklardan geçiyormuş gibi görülür. Bu yüzden P tipi malzemelerde akımı boşluklar taşır denir. Bu tür malzemelerin elektronu eksik olduğundan pozitif özellik gösterilir. P adı buradan gelmektedir (Messenger and Ventre, 2005) (Şekil 2.1).





Şekil 2.1 Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerde değerlik ve iletkenlik bantları

Konjüge polimerlere (birbirlerine ardışık tek ve çift karbon bağları ile bağlanan ve tekrarlanan gruplardan oluşan uzun zincirli yapılar konjüge polimer olarak adlandırılmaktadır) olan ilginin en önemli nedeni, yüksek elektriksel iletkenlik sağlayabilme özelliğidir. Bu malzemelere, elektron eklenmesi veya çekilmesi, P ve N-tipi katkılamaya neden olur. Katkı mekanizması, inorganik kristallerden farklı olarak gerçekleşmektedir. Konjüge polimerlerde, katkılama yük transfer reaksiyonu yardımıyla meydana gelir. Net bir elektrik yükü, polimer zinciri üzerinde yer alır (Brabec ve ark., 2003).

Organik yarı iletken bir malzeme, tek moleküller (monomer), kısa zincir (oligomer: birkaç tane tekrarlanan birim) ve organik polimerlerden (tekrarlanan birim sayısı 10'dan fazla) oluşabilir. Yarı iletken küçük moleküller (aromatik hidrokarbonlar), polisilik aromatik bileşikler pentasen, antrasen ve rubreni kapsar. Polimerik yarı iletkenlere örnek olarak poli(3-heksiltiofen), poli(fenilen vinilen), poliasetilen ve türevleri verilebilir (Petritsch, 2000).

Ayrıca organik yarı iletkenler, işlenebilme ve mekanik özelliklerine göre; çözünmeyen, çözünen ve sıvı kristal olarak üçe ayrılır. Çözünmeyenler kendi içlerinde; pigment ve polimer, çözünenler; boya ve polimer, sıvı kristaller; boya ve polimer tipi olarak ayrılır. Boya, çözünen, pigment ise çözünmeyen oligomer veya

monomerlerdir (Petritsch, 2000). Bunlar içerisinde en çok ilgi çekenler iletken polimerler ve sıvı kristallerdir (Wallace, Spinks, Kane-Maguire ve Teasdale, 2003).

### **2.2.1 Sıvı Kristaller**

Sıvı kristal (Liquid crystals: LC), maddenin sıvı ile katı kristal hali arasında özelliklere sahip olan bir fazda bulunan maddedir. Buna göre sıvı kristal, bir sıvı gibi akabilir ancak sıvı içerisinde, kristal benzeri bir yapı ile oryante edilmiş veya ayarlanmış moleküllere sahiptir. Optik özellikleri açısından da değişiklik gösteren pek çok sıvı kristal tipi vardır. Başlıca termotropik ve liyotropik olarak ikiye ayrılabilir. Termotropik sıvı kristalde faz geçişi sıcaklık değişimi ile gerçekleşirken, liyotropik sıvı kristalde, faz geçişi çözücü içerisindeki mezojen (mezofaz (=sıvı kristal) yapıcı) konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ve sıcaklıkla değişmektedir (de Gennes ve Prost, 1993; Chandrasekhar, 1992; Sluckin, Dunmur ve Stegemeyer, 2004; Collings ve Hird, 1997; Movahed, Hidalgo ve Sullivan, 2006). Sıvı kristaller genel olarak, sıvı kristal ekranlarda (LC displays) yalıtıcı, saçılmayı sağlayan ortam olarak kullanılmaktadır (Carrasco-Orozco ve ark., 2006). Sıvı kristallerle fotovoltaik etki gözlenmesi ile ilgili çalışmalar 1970'li yıllarda başlamıştır (Kamei, Ozawa ve Katawama, 1972; Sato, 1981) ve iyi bir elektronik fotoiletkenlik elde edilmiştir. Son yıllarda, organik güneş pillerinin verimini arttırmak, daha düşük maliyetli ve daha geniş ölçekte uygulamalar yapabilmek için uygun sıvı kristaller kullanılmaya başlanmıştır (Nelson, 2002; Schmidt-Mende ve ark., 2001).

### **2.2.2 Karbon Nanotüpler**

Karbon nanotüp (CNT), grafitin bal peteğini andıran atom düzleminin bir silindiri üzerine hiçbir kusur oluşturmadan kesiksiz olarak sarılmış bir şekli olarak düşünülebilir. CNT'ler bilinen en güçlü liflerdir. Bir nano tüpün çapı birkaç nm'dir. Yapılarına göre iletken ve yarıiletken olarak görev yapabilir. Isı iletkenlikleri çok yüksektir. Uygulama alanları; nanoaygıt ve transistörlerden bütünleşik devre, kalıcı bilgisayar belleği, karbon nanotüp düz ekran televizyonlar, kurşun geçirmeyen kumaşlar, leke ve bakteri tutmayan kumaşlar, ortamda bulunan zehirli gazları

algılayabilen gaz detektörü, hidrojen depolama ve yakıt hücresi, nanomıknatıs, yüksek yoğunluklu bilgi depolayan küçük ölçekli sabit disk ve deformasyon ölçmeye yönelik ölçü aletleri ve güneş pilleri olarak sayılabilir. Tek duvarlı karbon nanotüp (SWNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWNT) olmak üzere ana olarak ikiye ayrılabilir. Karbon nanotüpler, şeffaf anot olarak ITO elektrodun yerini almak amacıyla güneş pilleri ile ilgili çeşitli çalışmalarda, araştırmacılar tarafından başarılı biçimde kullanılmaktadır (Ouyang, Chu, Chen, Xu, ve Yang, 2005; Kushto, Kim ve Kafafi, 2005; Huang ve ark., 2006; Ahlswede, Mühleisen, bin Moh Wahi, Hanisch ve Powalla, 2008; Zhou ve ark., 2008).

### ***2.2.3 İletken Polimerler***

İletken polimerlerin 1970'lerin ortalarında keşfedilmesinden bu yana, pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, kimya, fizik ve malzeme bilimlerinin yardımıyla, iletken polimer ürünlerinin endüstriyel olarak geliştirilmesini desteklemiştir. Bu alandaki en büyük etki, ise 2000 yılında, kimya bilim dalı için Nobel ödülünün iletken polimerlerin üç kaşifine (Alan MacDiarmid, Alan Heeger ve Hideki Shirakawa) verilmesi ile görülmüştür. İletken polimerler, fotovoltailerde, ışık yayan diyotlarda, korozyona karşı koruyucu malzemelerde, pillerde, membranlarda, sensörlerde ve eyleyicilerde (aktuator) kullanım alanı bulmaktadır (Wallace ve ark., 2003).

#### ***2.2.3.1 Konjüğe Polimerler***

Konjüğe polimerler, uygun katkıların eklenmesi ile iletken özellik göstermektedir. Konjüğe polimerler yükseltgenerek P-tipi ve indirgenerek N-tipi polimer elde edilmektedir. Konjüğe polimerlerde, tekli bağ sigma ( $\sigma$ ) bağıdır, çift bağ ise bir tanesi sigma diğeri pi ( $\pi$ ) bağıdır (Güneş ve ark., 2007).

Konjüğe polimerler, ışık yayan diyotlarda (LED) başarılı teknolojik uygulamalar bulmuş iken, güneş pillerini sadece bu materyallerle hazırlamak için ilk deneme oldukça cesaret kırıcı olmuştur. Fotovoltaiik etki, aydınlatma altında yarı iletken

içerisinde, elektronların ve boşlukların üretilmesini ve bunu takiben yüklerin zıt elektrotlarda toplanması ile elde edilir. Fakat organik yarı iletkenlerde, hem yük ayrılması hem de yük hareketliliği belirli bir mesafeye kısıtlanmıştır (Brabec, Dyakonov, Parisi, ve Sariciftci, 2003). Alıcı ve verici malzemelerin birbiri ile karıştırılmasıyla (arttırılmış bir arayüzey alanlı karışım heteroeklem yapı elde edilerek), yarı kararlı, tersinir ve verici tipi konjüge polimerlerden, alıcı tipi fulleren moleküllerine, doğal fotosentezin ilk adımlarına benzer bir yolla, ultra-hızlı ışık etkisiyle elektron transferi gerçekleştirilmiş ve bu cesaret verici büyük olay güç dönüşüm verimlerinin günümüzde %5'in üzerine (Green, Emery, Hishikawa ve Warta, 2008) yükselmesini sağlamıştır.

Verim düşüklüğünün yanı sıra, yarı iletken polimerlerin genel olarak, tüm mevcut uygulamaları için uzun dönemli kararlılıkları da diğer bir ciddi sorundur. Bugüne kadar, konjüge polimer malzeme esaslı ışık yayan diyotlar, genel olarak, birkaç 10.000 saatlik işletimsel ömrünün yanında birkaç yıl raf ömrüne izin veren endüstriyel kapsülleme teknikleri ile hazırlanmaktadır. Fotovoltaik cihaz veya tek bir cihaz bileşimi bile söz konusu olduğunda, işletimsel ömür ve verim arasındaki maliyete karşı ödünleşim, bu tip güneş pillerinin gelecekte de markete girme yeteneğini belirleyecektir (Brabec ve diğer., 2003).

Organik güneş pillerinin tasarımında göz önünde tutulan kriterler; görünür bölgede geniş aralıktan ışık toplayabilme, heteroeklem arayüzeyine verimli enerji transferi (gerekliyse) ve sonraki yük dağılımı ile istenmeyen yük rekombinasyonunu minimuma düşürerek ayrılmış elektronların ve boşlukların ilgili elektrotlarına verimli enjeksiyonudur (Imahori, 2007).

### **2.3 İnorganik ve Organik Güneş Pillerinin Karşılaştırılması**

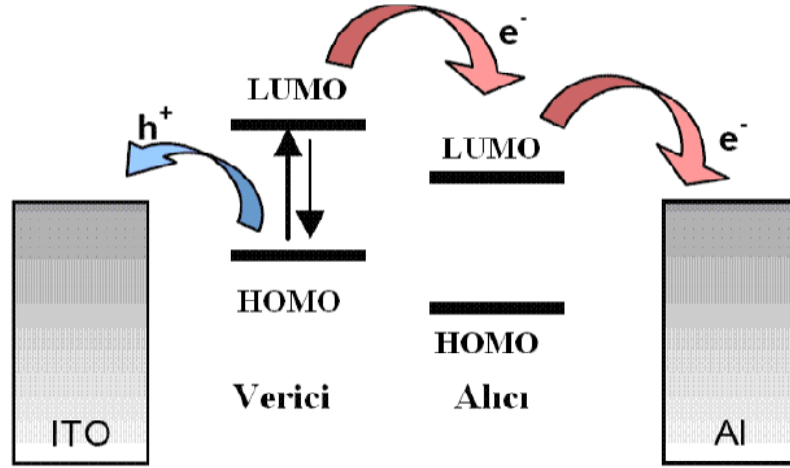
Üç boyutlu kristal kafesli inorganik bir yarı iletkenin içinde tek LUMO (=Low U M O) ve HUMOlar (=high U M O) malzeme boyunca bir iletkenlik bandı (CB=Conducting Band) ve bir değerlik bandı (VB=Valance Band) oluşturur. Bu, esas olarak, üç boyutlu kristal kafesler oluşturmak için moleküller arası kuvvetlerin

çok zayıf olduğu pek çok organik boya yarı iletkenlerden farklıdır. Sonuçta, moleküler LUMOLar ve HUMOLar, bir CB veya VB oluşturmak için birbirlerini yeterince kuvvetli etkilemezler. Böylece, bir bant içinde taşınmaktansa yerleşmiş bölgeler arasında atlayarak yük taşınımı devam eder. Bu demektir ki, inorganik yarı iletkenlerle karşılaştırıldığında, organik ve polimerik yarı iletkenlerde yük taşıyan hareketlilik genellikle düşüktür. Ayrıca düşük dielektrik sabiti nedeniyle organik yarı iletkenlerde, yük dağılımı daha zordur. Pek çok inorganik yarı iletkende foton emilimi serbest bir elektron ve bir boşluk (yük taşıyanları) üretir, oysa organik yarı iletkenlerde uyarılmış elektron, oda sıcaklığında boşluğa bağlanır. Konjüge polimerler, inorganik yarı iletkenlerle organik boyalar arasında bir yerde yer alır. Genelde, uyarımlar belirli zincir kesimleri üzerinde yerleştiği varsayılır. Bununla birlikte, uyarımların (eksiton: elektron-boşluk çifti) yerleşmemiş göründükleri durumlar vardır (Spangaard ve diğer., 2004).

Organik yarı iletken esaslı basit fotovoltaiik cihazlarda ve diyotlarda, birinci uyarım ayırma yeri, elektrot arayüzündedir (diğer yerler kristal kafeste hatalar emilmiş oksijen ve kirlilikler içerir). Organik tabakanın ortasında oluşan uyarımlar, tabaka çok kalınsa, asla, elektrot arayüzüne ulaşmadığı için, bu, cihazın etkin ışık emen kalınlığını sınırlar. Tabi, yukarıda açıklandığı biçimde tekrar birleşirler. Tipik elektron-boşluk difüzyon mesafesi yaklaşık olarak 10 nm'dir ancak malzemenin yapısına göre de değişmektedir (Spangaard ve diğer., 2004).

#### **2.4 Fotovoltaiik Etki Oluşumu**

Işığın, organik bir güneş pili ile elektrige dönüşümünün adımları Şekil 2.2'de açıklanmıştır (Nunzi, 2002). Uyarılmış bölge oluşumu sağlayan bir fotonun emilmesi, yani, bağlı elektron-boşluk çifti (eksiton) oluşumu, eksitonun ayrılması yani yük ayrılmasının meydana geldiği bir bölgeye elektron-boşluk çifti difüzyonu ve organik yarı iletken içerisinde kendi elektrotlarına yük taşınımı (Şekil 2.2).

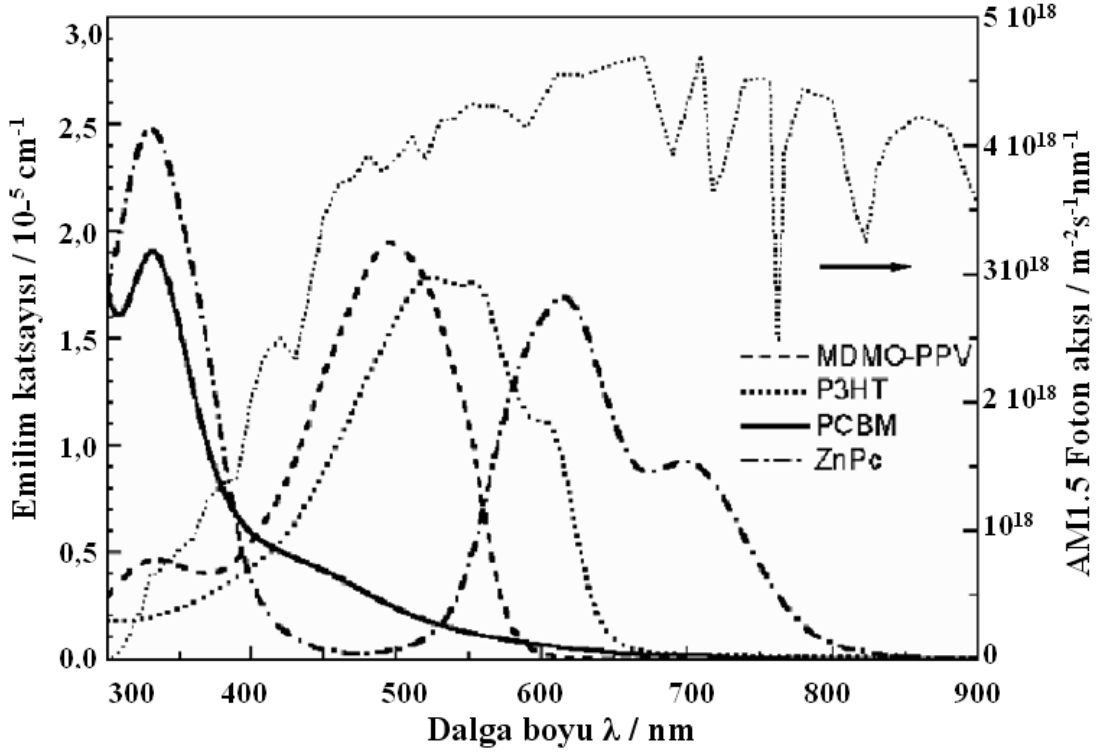


Şekil 2.2 Verici-alıcı arayüzeyinde elektron-boşluk ayrılması (e: elektron, h: boşluk)

#### 2.4.1 Işığın Emilmesi ve Elektron-Boşluk Çiftinin Oluşması

İletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki elektron boşluklarının serbest olduğu inorganik yarı iletkenlerdekine tersine, organik yarı iletken malzemelerde uyarılmış haldeki elektronlar ile temel haldeki elektron boşlukları arasında zayıf bir Coulombik bağ mevcuttur. Elektron-boşluk çiftleri (eksiton), organik yarı iletken malzeme içerisinde tek bir tür gibi hareket etmektedir (Wallace ve ark., 2000).

Organik malzemelerdeki geniş bant aralığı (=large band gap) nedeniyle, gelen ışığın sadece çok küçük bir miktarı emilmektedir. Aktif tabakanın kalınlığı ise yük taşıyıcı hareketliliği ile (mobilite) ters orantılıdır. Şekil 2.3'de farklı absorpsiyon aralıklarına sahip malzemelere ait grafik verilmektedir.



**Şekil 2.3** Organik güneş pillerinde yaygın olarak kullanılan fotoaktif malzemelerin film halindeki emilim katsayılarının AM1.5 güneş spektrumuyla karşılaştırılması (Brabec ve ark., 2003]

Konjuge polimerlerde, moleküldeki bitişik karbonlardan artan  $P_z$  orbitali elektronları,  $\pi$  sistemi oluşturmak için üst üste gelir. Bu yerleşmemiş bir elektron bulutu oluşturur. Elektron-elektron etkisi yok sayılarak, elektron-titercik çifti göz önüne alınır. İki ayrı molekül band oluşur: Bunlar;  $\pi$  bandı, en yüksek enerjili dolu moleküler orbitali (HOMO) (boşlukların quasi fermi seviyesi) ve  $\pi^*$  bandı, en düşük enerjili boş moleküler orbitali (LUMO) (elektronların quasi fermi seviyesi). Bu iki orbital arasındaki enerji farkı, organik yarı iletken malzemenin enerji bant aralığını ( $E_g$ ) verir. Enerji bant aralığına eşit veya daha büyük enerjide ışığın soğurulması ile  $\pi^*$ -orbitallerinde ve  $\pi$ -orbitallerinde elektron boşluğu meydana getirilmektedir.

Organik malzemelerdeki birincil fotouyarımlar doğrudan ve miktar olarak serbest yük taşıyanlara yol açmaz, fakat elektron-boşluk çiftlerinin bağlanmasını sağlar. Konjuge polimerlerde, fotouyarımların sadece %10'unun serbest yük taşıyanların oluşmasına yol açtığı tahmin edilmektedir (Miranda ve Moses, 2001). Verimli bir elektron ve boşluk ayrılması için, güçlü elektrik alanlar gereklidir. Bu yerel alanlar, hem dışarıdan elektrik alan uygulanmasıyla hem de arayüzeylerle sağlanabilir.

Meydana gelen potansiyel enerjide, ani değişikliklerin olduğu arayüzeyde, güçlü yerel elektriksel alanlar mümkündür. Elektron-boşluk çifti ömür süresi içinde bir arayüzeye ulaştığında, ışığın neden olduğu (=photoinduced) yük transferi meydana gelebilir. Bu yüzden, elektron-boşluk çifti difüzyonu uzunluğu çift tabakalı yapıların kalınlığını sınırlamaktadır (Mozer ve Sariciftci, 2006). Elektron-boşluk çifti difüzyon uzunluğu, verici-alıcı faz ayrılma uzunluğu gibi aynı büyüklükte olmalıdır. Yoksa, elektron-boşluk çiftleri, ışınımsal veya ışınımsal olmayan yollarla, arayüzeye ulaşmadan bozunurlar ve enerji dönüşümü için enerjileri kaybolur. Polimerlerde ve organik yarı iletkenlerde elektron-boşluk çifti ayrılma uzunlukları genelde 10-20 nm'dir (Nunzi, 2002).

1.1 eV'lik (1100 nm) bir bant genişliği, dünya üzerine düşen ışınların %77'sini emme yeteneğine sahiptir (Nunzi, 2002; Güneş ve ark., 2007). Bununla birlikte, yarı iletken polimerlerin çoğunluğunun bant genişliği 2 eV'nin (620 nm) üzerindedir ve bu durum emilebilecek ışınların miktarını %30'a sınırlamaktadır. Bunlar görünür bölgedeki yeşil ışığı emerler. Organik yarı iletkenler,  $E_g > 1,4$  eV olan geniş bant aralıklı yarı iletkenlerden  $E_g > 3$  eV olan yalıtkanlara kadar olan aralığı kapsamaktadır. Konjüge olmayan polimerlerin optik bant aralıkları (polietilen için yaklaşık 7-8 eV) konjüge polimerlere (1,5-3 eV) göre çok daha düşüktür. Öte yandan, organik malzemelerin emme katsayıları  $10^5/cm$  kadardır, yansıtıcı bir arka elektrot kullanıldığında, 100 nm'lik bir kalınlık, ışınların büyük bölümünü emmek için yeterlidir (Nunzi, 2002). Güneş ışınlarının spektral (ışın dağılımı, tayf) olarak daha iyi alınmasına ihtiyaç vardır. Bu da daha düşük bant aralıklı polimerler ( $E_g < 1,8$  eV) veya enerji transfer basamakları kullanılmasıyla mümkün olabilir.

620'nm den daha uzun dalga boylarını absorbe edebilen yani bant aralığı 2 eV'den daha düşük olan polimerler, düşük bant aralığına sahiptir ve ayrıca daha verimli güneş pilleri üretilmesi için verici ve alıcı birimlerin bant aralığı, katkı maddeleri eklenerek değiştirilebilmektedir. Örneğin verici birime tiyofen vb. bir madde eklenerek HOMO seviyesi yükseltilir, elektron alıcı gruba ise tiyadiazol vb. bir madde eklenerek LUMO seviyesi düşürülerek daha verimli fotovoltaiik etki gerçekleştirilebilmektedir.



### **2.4.2 Elektron-Boşluk Çiftinin Ayrılması ve Difüzyonu**

Organik güneş pillerinin çalışma prensibine göre elektron-boşluk çiftinin ayrılması gerekmektedir. Bu ayrılma ışığın soğurulduğu noktadan 10-20 nm'lik bir mesafe içerisinde gerçekleşmelidir. Elektron-boşluk çiftinin ayrılması elektron transferi ile gerçekleşmektedir. Bu elektron transferi metal kontak ile organik yarı iletken ara yüzeyinde veya farklı elektron alıcı veya verici özellikteki molekül arayüzeyinde gerçekleşir. Elektron, yüksek elektron ilgisi olan malzeme (alıcı) tarafından, elektron boşluğu ise düşük iyonlaşma potansiyeline sahip malzeme (verici) tarafından kabul edilmektedir. Ayrıca elektron-boşluk çifti, elektron ve elektron boşluğu arasındaki Coulomb çekim kuvvetinden daha güçlü elektrik alan tarafından da ayrıştırılabilir (Yoshino ve ark., 1997).

Fulleren gibi elektron alıcılarla, konjüge polimerleri karıştırmak, ışıkla uyarılmış elektron-boşluk çiftinin bağlantılarını kopararak serbest yük taşıyıcılarına dönüştürmede etkili bir yoldur. Bu tür karışımların, ışıkla uyarılmış yük transferi 45 fs (femtosaniye)'lik çok kısa bir sürede meydana gelir. Fotoluminesansın yaklaşık 1ns (nanosaniye)'de meydana geldiği göz önüne alınırsa, ışıkla uyarılmış yük transferinin çok daha hızlı olduğu anlaşılacaktır (Brabec ve ark., 2001). Öte yandan, bu karışımlardaki ayrılmış yükler, düşük sıcaklıklarda yarı kararlıdır.

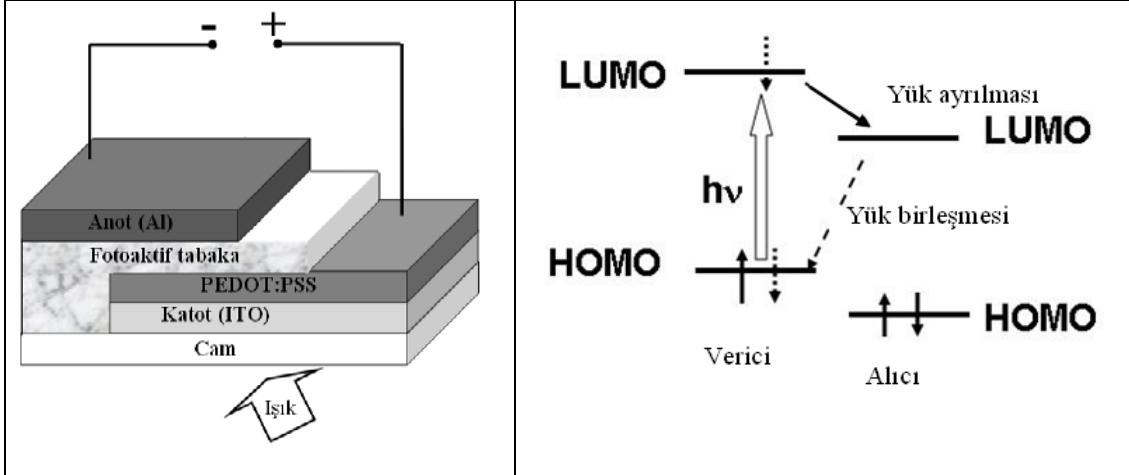
### **2.4.3 Yüklerin İlgili Elektrotlara Toplanması**

Organik güneş pillerinin büyük çoğunluğunda oluşan elektron ve elektron boşlukları zıt kutuplara taşınmaktadır. Bu taşınma işlemi, elektrotların asimetrisi (farklı iş fonksiyonları) veya uygulanan potansiyel sebebi ile oluşan içsel elektrik alanda gerçekleşmektedir (Yoshino et al. 1997). Geri yük transferlerini önlemek amacı ile elektron ve elektron boşlukları tercihen farklı malzemelerde veya fazlarda taşınmaktadır. Örneğin verici-alıcı pillerde elektron iletkenliği iyi olan alıcı ve boşluk iletkenliği iyi olan verici malzeme kullanımı idealdir. Yüksek yük toplama verimliliği için organik yarı iletken malzeme ile metal elektrot arasında enerji bariyeri olmaması gerekmektedir. Bazı durumlarda iki malzeme arasındaki enerji

bariyerini gidermek için ilave bir malzeme daha kullanılması, yük toplama verimliliğini arttırmaktadır (Shaheen, Radspinner, Peyghamberian ve Jabbour, 2001; Brabec ve ark., 2001b).

Verimli fotovolttaik cihazlar için, meydana getirilen yüklerin, ömür süreleri içinde uygun elektrotlara taşınmaları gerekmektedir. Yük taşıyıcıları, elektrotlara ulaşmak için sürücü bir kuvvete ihtiyaç duyarlar. Elektron ve boşlukların kimyasal potansiyellerindeki derece derece bir değişim, verici-alıcı eklemine kurulmasını sağlar. Bu basamak, vericinin HOMO'su ve alıcının LUMO'su arasındaki farklılıkla belirlenir. İç elektriksel alan maksimum açık devre voltajını ( $V_{oc}$ ) belirler ve yük taşıyıcılarının alan etkisiyle sürüklenmesine katkıda bulunur. Yüklerin taşınması, elektrotlara yolculuk sırasında tekrar bir araya gelme ve özellikle aynı materyalin taşıma aracı olarak hem elektrotlara hem de boşluklara görev yapmasından etkilenir (Mozer ve Sariciftci, 2006). Konjüge polimerlerde taşımaya karmaşa hakimdir (Mozer ve Sariciftci, 2006; Borsenberger, Weiss ve Borsenberger, 1998; Im, Tian, Bassler, Fechtenkötter Watson ve Müllen, 2003; Heeger ve Moses, 1997).

Son aşama olarak, yükler cihazdan iki seçici kontakla alınır. Şeffaf bir indiyum katkılı kalay oksit (ITO) tabaka, konjüge polimerlerin (boşluk kontağı) çoğunun HOMO seviyelerine uyar. Diğer yandan, yaklaşık 4.3 eV'lik bir iş fonksiyonu ile alüminyum metal kontak, elektron alıcı PCBM'in (elektron kontak) LUMO'suna uyar. Şekil 2.4'de bu olay açıklanmaktadır (Brabec, Sariciftci ve Hummelen, 2001).



Şekil 2.4 Karışım heteroeklem esaslı güneş pilinin oluşturulması ve iç içe geçmiş alıcı / verici ağıdan oluşturulan kompozit tabaka (fotoaktif tabaka) içerisinde ışık etkisiyle elektron transferinin şematik gösterimi

#### 2.4.4 Elektrotlarda Durum

Saf bir konjüge polimer, genelde elektrotlar (Al, Ca, Mg, Mg/In gibi) olarak kullanılan elektropozitif metallerle temas ettirildiğinde, arayüzey asla keskin olmaz. Örneğin, alüminyum üzerinde Poly(p-phenylene vinylene) (PPV) durumunda, 30 Å kalınlıkta yalıtıcı tabakanın oluştuğunu gözlemlenmiştir. Bu tabakanın, Al atomlarının, vinil grupları ile reaksiyona girdiği ve konjügasyonu bozduğu polimer matrisin içine difüze olurken oluştuğu düşünülmektedir. Bu tabakanın etkisi arayüzeyde elektron enjeksiyonu bariyerini arttırmaktır. Doğal olarak, tabaka giderek kalınlaştığında, elektron çıkarması (ekstraksiyon) imkansız olacağından cihaz kullanılmaz hale gelmektedir. Bu sorunu aşmak için farklı stratejiler araştırılmıştır. Metal ve organik tabaka arasına, Hung ve ark. (1997), 5-10 Å'luk ince bir LiF veya MgO (Magnezyum oksit) tabakası konulmasının, elektron enjeksiyon bariyerini düşürerek Al elektrodun verimini geliştirdiğini göstermişlerdir. Greczynski ve ark. (2001) yaptıkları bir çalışmada LiF'in koruyucu özellikleri üzerine çalışmışlardır. Her iki çalışma da LiF'in ayrılmadığını ve kimyasal olarak reaksiyon göstermediğini ancak daha çok elektrot ile organik malzeme arasında koruyucu tabaka olarak görev yaptığını göstermiştir. Ayrıca, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alüminyum oksit)'in, koruyucu tabaka olarak, yönlendirici voltajı azaltması ve LED'lerde cihaz performansını artırması nedeniyle tercih edilen özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir (Tang ve Shinar, 1997). Brabec

ve ark. (2002) fotovoltaik bir pilde negatif metal elektrot üzerinde koruyucu bir tabaka kullanmanın avantajlarını göstermişlerdir. LiF'in, güneş pillerinde dolun faktörünü (FF) arttırdığı ve açık devre voltajını ( $V_{oc}$ ) kararlılaştırdığı rapor edilmiştir (Brabec ve ark., 2003)

Şeffaf ITO malzeme, fotovoltaik cihazlarda ve LED'lerde en çok kullanılan yüksek iş fonksiyonlu malzemedir. ITO-polimer arayüzeyi tam olarak anlayamamakta veya kontrol edilememektedir. ITO morfolojisi ve iş fonksiyonunda, üreticiden üreticiye ve partiden partiye büyük değişimler vardır. Cam üzerindeki ITO'nun düzgün olmayan yüzeyi hızlı polimer indirgenmesine sebep olabilecek yerel bölgelere yol açar. Yapılan çalışmalar (Kim, Grangstörn ve Friend, 1998), asitle sökme veya ozonla temizleme işlemlerinin, yüzeyi kontrol etmek için kullanılabilirliğini göstermektedir. Bazı çalışmalar, katot arayüzeyine benzer olarak, anot yüzeyinden de bazı atomların organik malzemeyle reaksiyona girebildiğini göstermiştir. Örneğin, oksijenin aromatik aldehitler oluşturarak MEH-PPV içine difüze olabildiği bulunmuştur. Ayrıca, indiyumun, yükler için tuzak (=trapping) bölge olan organik tabaka içine difüze olabildiği bulunmuştur (Schlatman ve ark., 1996). İndiyum ve oksijen difüzyonunu minimuma indirmek için bir strateji, ITO ile aktif malzeme arasına PEDOT:PSS gibi arayüzeyel bir boşluk taşıyıcı tabaka yerleştirmektir (Carter ve ark., 1997). Bu tabaka ayrıca düzgün olmayan ITO'nun yüzeyini düzleştirme görevini de yapmaktadır. PEDOT:PSS'nin fotovoltaik cihazlarda anot olarak görev yaparak, kırılkan, doğada sınırlı miktarda bulunan ve tekstil ürünlerine çok da uygun olmayan ITO'nun yerini alabileceği konusunda çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır [Ouyang, Chu, Chen, Xu, ve Yang, 2005; Kushto, Kim ve Kafafi, 2005; Huang ve ark., 2006; Ahlswede, Mühleisen, bin Moh Wahi, Hanisch ve Powalla, 2008; Zhou ve ark., 2008].

## 2.5 Organik Güneş Pillerinin Özellikleri

Şekil 2.5'da karanlıkta organik bir güneş piline ait akım yoğunluğu-voltaj (I-V) eğrisi gösterilmektedir. Güneş pili aydınlatıldığında, Şekil 2.5'de gösterildiği gibi I-V eğrisi kısa-devre akımıyla ( $I_{sc}$ ) negatif tarafa ötelenir. Açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), iki

elektrot arasında erişilebilen maksimum voltaj farklılığıdır ve inorganik güneş pillerinden daha yüksektir (yaklaşık 0,5-1,5 V). Pil bir açık devrede yer alır ve aydınlatılır. Elektronlar ve boşluklar ayrılır ve sırasıyla düşük ve yüksek iş fonksiyonlarına doğru akarlar. Belirli bir noktada, yük oluşumu, iki elektrodun iş fonksiyonlarının farkıyla sınırlandırılmış  $V_{oc}$ 'ye, maksimum bir eşitliğe ulaşacaktır. Brabec ve ark. (2002) bazı heteroeklem pillerde  $V_{oc}$ 'nin elektrot malzemesinden çok alıcının dayanımına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Pil içinden geçebilen maksimum akım, kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) olarak tanımlanır. Bu miktar, iki elektrodun temas etmesi ile pilin boydan boya potansiyelinin sıfıra (0)'a ayarlanması sayesinde belirlenir ve daha sonra pil aydınlatarak akım akışı ölçülür.  $I_{sc}$ , pildeki yük ayrılması ve taşınımı verimi hakkında bilgi verir.  $I_{sc}$ 'nin büyüklüğü aydınlatma şiddetine bağlıdır. Ancak  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM1.5) civarındaki aydınlatma şiddeti için  $I_{sc}$ ,  $0,20\text{-}80 \text{ mA/cm}^2$  aralığındadır.  $(I_{maks} * V_{maks})^2$  formülü ise pilin verebileceği maksimum iştir (Brabec ve ark., 2003).

Dolum faktörünün (FF) hesaplanması Formül 2.1'de verilmektedir:

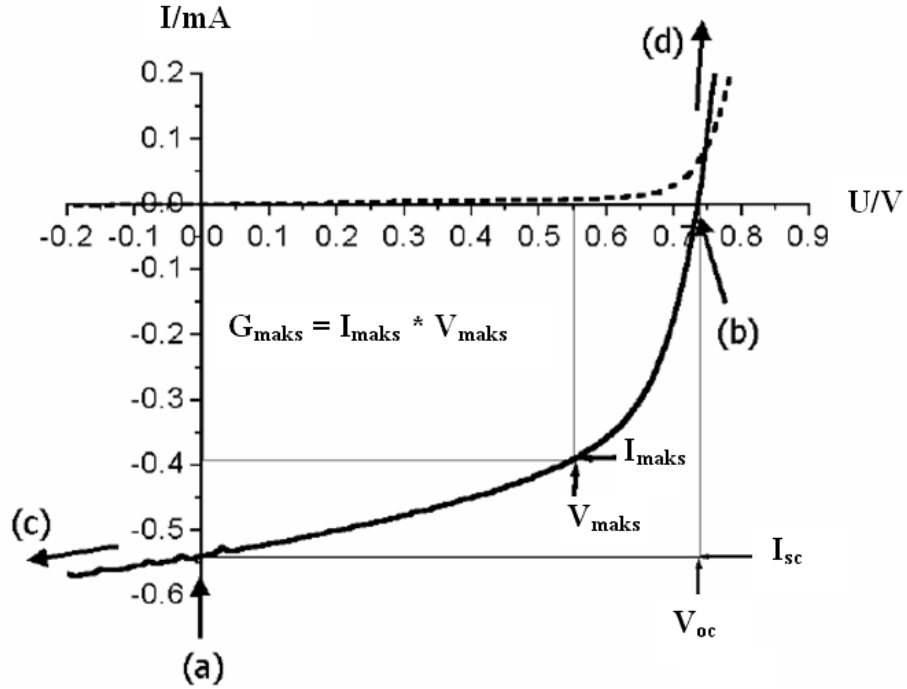
$$FF = \frac{I_{maks} * V_{maks}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2.1)$$

FF genelde 0,4-0,6 civarındadır. Kuantum verimi ( $QE$ ), her emilen foton için üretilen elektronların sayısıdır. Tek tabakalı inorganik fotovoltaiik piller çoğunlukla %80-90'lık bir QE'ye ulaşırken, organik fotovoltaiik piller için QE yaklaşık olarak %1'dir. Güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ), Formül 2.2'de verildiği gibi güç çıktısının anlık ışık şiddetine bölümüdür. Kristal yapılı silikon piller için %24'e ulaşırken, tek tabakalı organik fotovoltaiik piller için bu genellikle %0,1'in altındadır (Spangaard ve Krebs, 2004).

$$\eta = \frac{P_{çikti}}{P_{girdi}} = \frac{I_{Maks} * V_{Maks}}{P_{girdi}} = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (2.2)$$

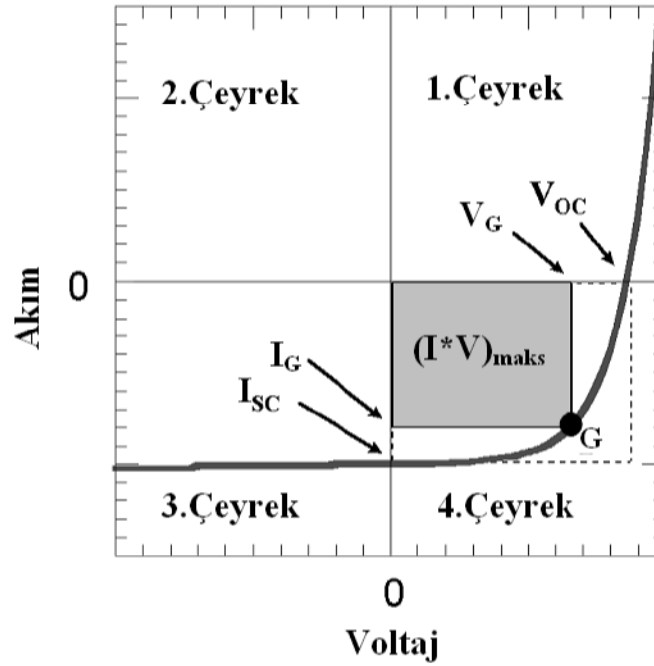
Güç dönüşüm verimi, dalga boyu ve ışık şiddetine bağlı olduğundan sadece verilen spektral dağılım ve ışık şiddeti için anlam taşımaktadır. Bu, güneş spektrumu veya yapay aydınlatmanın spektrumu olabilir. Güneş pillerinin verimlerini karşılaştırmak için geçmişte güneş aydınlatma standartları belirlenmiştir. AM1.5 spektrumu ticari güneş simulatörlerinin kullandığı en genel standarttır (Brabec ve ark., 2003).

Şekil 2.5’de karanlıkta ve aydınlatma altında, güneş pilinin akım-voltaj (I-V) özellikleri gösterilmektedir. Karanlıkta, kontaklar, açık devre voltajından daha büyük voltajlar için, ileri voltajda (=forward bias) yoğun şekilde enjeksiyon yapmaya başlayınca kadar, hemen hemen hiç akım oluşturmaz. Aydınlatma altında üretilen akım, enjekte edilen akımlardan, ters yönde akar. Şekil 2.5’de (a) noktasında maksimum üretilen fotoakım, kısa devre akımı altındadır, (b) noktasında üretilen akım ise sıfırdır (düz bant şartı). (a) ile (b) arasında dördüncü çeyrek dairede (Şekil 2.6), cihaz güç üretir. Belirli bir G (güç) noktasında (Şekil 2.6) (en büyük güç noktası (maks.) olarak belirtilen) akım ve voltaj arasındaki iş ve güç çıktısı maksimum olur (Hoppe ve Sariciftci, 2004).



Şekil 2.5 Bir güneş piline ait akım-voltaj (I-V) eğrileri (kesikli olan karanlıkta ve koyu çizgi olan aydınlıkta) (Hoppe ve diğer., 2004)

Elde edilen akım negatiftir. Şekil 2.6'yı inceleyerek, dördüncü çeyrek, pil tarafından üretilen voltaj ve akımı verir. Dışarıdan uygulanan voltaj ise birinci ve üçüncü çeyreği elde etmek için gereklidir.



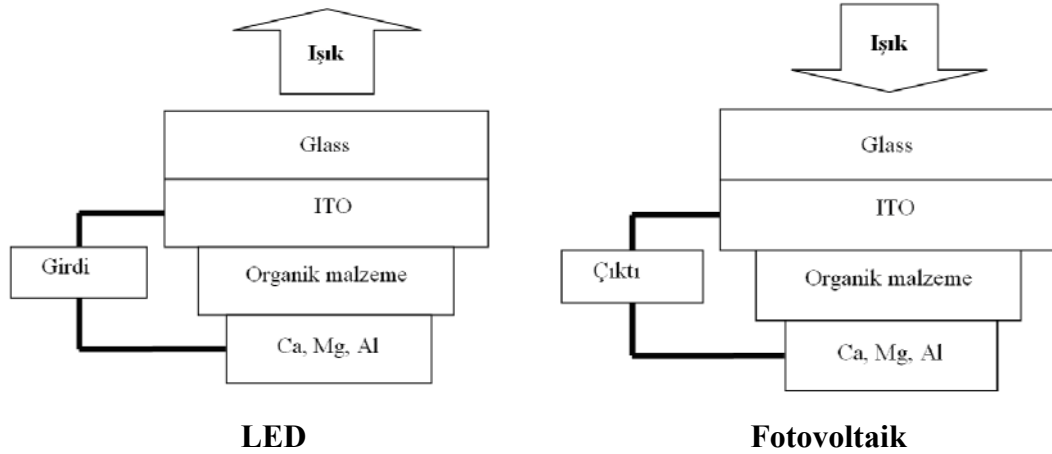
Şekil 2.6 Aydınlatma altında akım- voltaj eğrisi (Petritsch, 2000)

Kısacası, aydınlıkta çizilen eğrinin x eksenini kestiği nokta açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) ve y eksenini kestiği nokta kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )'dır. En büyük güç çıktısı ( $G_{maks}$ ) voltaj ve akımın en büyük olduğu nokta ile belirlenir.  $G_{maks}$ 'ın,  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  çarpımına bölünmesi ise doluluk faktörünü (FF) verir (Güneş ve ark., 2007; Spangaard ve ark., 2004).

## 2.6 Işık Yayan Diyotlar ve Fotovoltaik Piller

Genelde tüm organik güneş pilleri, organik ışık soğuran tabakanın iki farklı elektrot arasında sandviç yapıldığı düzlemsel tabakalı bir yapıya sahiptir. Elektrotlardan birisi şeffaf veya yarı şeffaf (genellikle indiyum katkılı kalay oksit (ITO) ya da çok ince metal tabaka) olmalıdır. Diğer elektrotta ise genellikle alüminyum (bazen de gümüş, kalsiyum, magnezyum, altın ve diğerleri) kullanılır. Organik fotovoltaik bir pilin (OPV) ışıktan elektrik enerjisi üretmesi prensibi, ışık

yayan diyotların (LED) tam tersi biçimde olmasına rağmen gelişmeleri birbirleri ile bağlantılı gitmektedir. LED ve fotovoltaik bir pilin çalışma prensipleri Şekil 2.7’de verilmektedir (Spangaard ve diğer., 2004).



Şekil 2.7 Fotovoltaik bir cihaz sağda, solda ise bunun tersi bir LED gösterilmektedir. Fotovoltaikte elektronlar metal elektrotta, boşluklar ITO elektrotta toplanırken, LED’de tam tersi durum söz konusudur

LED’de, yüksek-işfonksiyonlu elektrotta (anot) boşluk meydana gelir, bir elektron ise düşük-işfonksiyonlu (=work-function) elektrotta (katot) ortaya çıkar. Belirsiz bir noktada bu elektron ve boşluk karşılaşır ve bunun üzerine rekombinasyon gerçekleşerek ışık yayılır. Fotovoltaik pilde ise tersi olur. Işık emildiğinde bir elektron, bir uyarım yani elektron-boşluk çifti (=exciton) oluşturarak HOMO’dan LUMO’ya doğru ilerler. Fotovoltaik cihazda bu işlemi uyarımın (elektron ve boşluk çifti) ayrılması takip etmektedir. Daha sonra, boşluk bir elektrota ulaşırken elektron da diğer elektrota ulaşmaktadır. Yük ayrılmasının başarılabilmesi için, elektronların asimetrik iyonlaşma enerji/iş fonksiyonlarıyla sağlanan elektriksel bir alan gereklidir. Bu asimetri, elektron-akışının daha çok düşük işfonksiyonlu elektrottan yüksek işfonksiyonlu elektrota (ileri gerilim) doğru tercih edildiğini açıklar. Bu olgu doğrultma (=rectification) olarak gösterilir (Spangaard ve Krebs, 2004).



## 2.7 Organik Güneş Pili Tipleri

### 2.7.1 Tek Tabakalı Cihazlar

Organik güneş pilleri, ilk yapıldıkları zamanlarda, farklı çalışma fonksiyonlarındaki iki metal elektrot arasına sıkıştırılmış tek organik tabakalara dayanmaktaydı, yani tek bir yarı iletken malzeme içermekteydi. Bu tip cihazlara, genelde, yük ayrılması düzeltme (Schotty) eklemine bir elektrotla meydana geldiği için, Schotty tipi cihaz ve Schotty diyotlar denilmektedir. Bu cihazların düzeltme davranışları MIM (metal-yalıtkan-metal) modeli (yalıtkanlar için) veya daha düşük çalışma fonksiyonlu metal ve P tipi organik tabaka arasındaki Schotty bariyerinin (katkılı malzemeler) oluşmasıyla açıklanmaktadır (Hiramoto, Fujiwara ve Yokoyama, 1991; Geens ve ark., 2002; Tsuzuki, Shirota, Rostalski ve Meissner, 2002; Rowell ve ark., 2006; Frohne ve ark., 2002).

Tek tip molekül kullanıldığından yapı basittir fakat absorpsiyonun tüm görünür bölge aralığını kapsadığı çok nadirdir. Fotoaktif bölge çok incedir ve hem pozitif hem negatif foto uyarılmış yükler aynı malzeme içinde hareket eder ve rekombinasyon nedeniyle kayıplar fazladır. Pek çok organik güneş pili malzemesi için elektron-boşluk çifti difüzyon uzunluğu 20 nm'nin altındadır. Sadece kontaklardan 20 nm ve daha az uzaktaki bölgede yaratılan elektron-boşluk çiftleri fotoakıma katkıda bulunurlar. Yüksek seri dirençlerden dolayı, bu malzemeler düşük dolum faktörü ve alana bağımlı yük taşıyıcı toplanması gösterir. Bu ince film cihazlarda, yüksek ters bir gerilim altında, elektrik alan, üretilen yükleri elektrotlara doğru süreceği için fotodedektör olarak iyi çalışabilmektedir (Günes ve ark, 2007).

### 2.7.2 İki Tabakalı Heteroeklem Tipi

Işık etkisiyle üretilen yük taşıyıcı oluşumunun sınırlanmasını engellemek için, bir verici (donor) ve bir alıcı (acceptor) malzeme geometrik bir arayüzeyle ayrı ayrı birleştirilerek iki tabakalı bir cihaz geliştirilmiştir (Şekil 2.8a). Bu arayüzeyde verici ve alıcı arasında geniş potansiyel farkı nedeniyle yük ayrılması meydana gelir

(Hiramoto ve ark., 1991; Shaheen, 1998, Nunzi, 2002; Miranda ve ark., 2001). İki tabakalı yapı, söz konusu yük taşıyıcıların etkili biçimde sistemden alınması için farklı çalışma fonksiyonlarının verici HOMO ve alıcı LUMO'ya eşleştiği iki elektrot arasında sandviç yapılmaktadır. Etkili bir yük transferi için vericinin HOMO ve LUMO'su, alıcınıninkilerin üzerinde yer almalıdır. Şekil 2.8'da iki tabakalı yapı gösterilmektedir. Klasik P-N eklemi, boşaltma bölgesindeki elektrik alanını oluşturmak için serbest yük taşıyıcılarıyla katkılandırılmış yarı iletkenleri gerektirirken, iki tabakalı heteroeklemede katkılandırılmamış verici ve alıcı malzemeler arasında yük transferi, iyonlaşma potansiyeli ve bitişik malzemenin elektron afinitesindeki farklılıklar nedeniyle oluşur (Brabec ve ark., 2003). Bu düzenlenmenin en önemli dezavantajı ise, çok ince bir arayüzeyde uyarım oluşturma ve ayrılmasının gerçekleşmesidir (Petritsch, 2000). Malzeme arayüzeyinde elektron-boşluk çiftleri ayrıldıktan sonra elektronlar N tipi alıcı içinde boşluklar da P tipi verici malzeme içinde hareket eder. Bu yüzden boşluklar ve elektronlar etkili biçimde birbirlerinden ayrılırlar ve yüklerin tekrar oluşumu büyük ölçüde azaltılır.

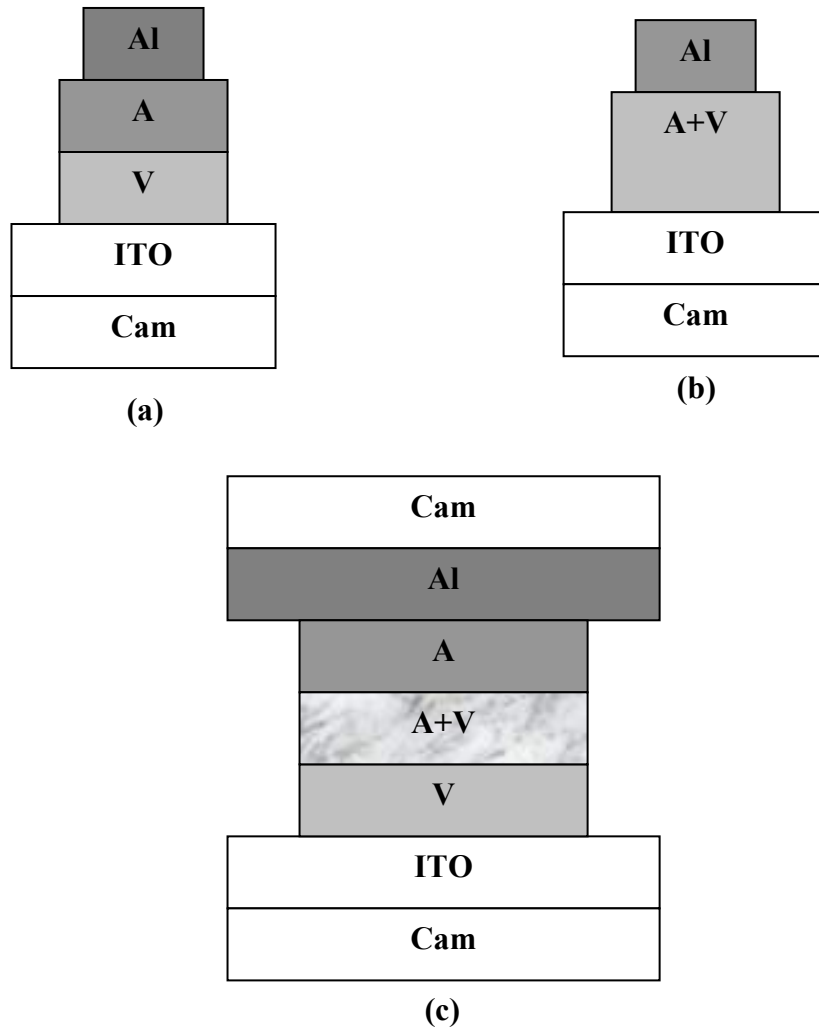
### ***2.7.3 Karışım Heteroeklem Tipi***

Karışım heteroeklemin esası, verici ve alıcı bileşenlerinin bir karışım hacminde oluşması ve her bir verici-alıcının arayüzey oluşturmaları ile her bir emiş yapan bölgenin elektron-boşluk çifti difüzyon uzunluğundan (yaklaşık 20 nm) daha az bir mesafe içinde yerleşmesidir.

İki tabakalı heteroeklemede, verici ve alıcı faz anot ve katotla seçici bir şekilde temas ederken, kontaklara boşluk ve elektron nakil aşamaları için, karışım heteroeklem filtrelenmiş yollara gerek duyar. Diğer bir deyişle, alıcı ve verici faz, sürekli ve içiçe geçmiş bir ağ oluşturmalıdır (Şekil 2.8). Bu yüzden karışım heteroeklem cihazlar, karışım içindeki morfolojiye çok daha fazla duyarlıdır. En önemli avantajı ise, moleküllerin birbirine iyi biçimde karışması halinde geniş bir arayüzey oluşturmaları ve bu şekilde pek çok uyarımın arayüzeye ulaşabilmesidir (Brabec ve ark., 2003).

### 2.7.4 Lamine Edilen Tabakalar

Pek sık kullanılmamakla birlikte, ilginç bir metottur ve hem iki tabakalı hem de karışım heteroeklem tipi pillerin avantajlarını taşıyabilir. Yük ayrılması ortadaki karışım bölümünde meydana gelir. Bu bölüm 2 tabakanın ayrı ayrı oluşturulması (alt ve üst) ve daha sonra yüzyüze lamine edilmesi ile elde edilmektedir (Şekil 2.8). Dezavantajı, karışım bölgesinin oluşabilmesi için kullanılan organik yarı iletkenlerin belirli mekanik özelliklerde olmasının beklenmesidir (düşük camsı geçiş sıcaklığı gibi).



Şekil 2.8 Üç farklı organik pil yapısı a) iki ayrı tabakalı, b) karışım heteroeklemlili ve c) lamine edilmiş tabakalı pil (A: alıcı, V: verici)

### **2.7.5 Dağılmış İki Tabakalı Heteroeklem Tipi**

Bu yapı, ayrı ve karışım iki tabakalı cihazlar arasında yer alır. Bu nedenle, her iki yapının da avantajlarını (genişlemiş alıcı verici arayüzeyi ve ilgili elektrotlarına zıt yük taşıyıcıları için uzaysal sürekli bir yol) birleştirmiştir. Dağılmış arayüzey farklı yollarla gerçekleştirilebilir. Eğer çözültiden elde edilecekse, laminasyon işleminde orta basınç uygulanarak ve sıcaklık yükseltilerek iki film birlikte preslenir. Dağılmış arayüzey elde etmede diğer bir yöntem ise, alttaki tabakayı kısmen çözen ikinci bir çözücü ile kaplamaktır. Ayrıca, iki tabakalı cihazın ısıtılmasıyla, bir alıcı fulleren ile verici polimer arasındaki kontrollü dağıtma, birbirine karışmış bir arayüzey bölgeye yol açar (Günes ve ark., 2007; Brabec ve ark., 2003).

### **2.8 Organik Güneş Pillerinin Oluşturulmasında Kullanılan Yöntemler**

Güneş pillerinin üretilmesi için nanometre ölçeğinde elektrot yüzeyinde, alıcı ve verici moleküllerin organize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Elektrokimyasal cihazlar ve güneş pilleri için uygun elektrotlar üzerinde yapılanmasını sağlamak için Langmur-Blodgett (LB) filmleri, kendi kendine organize olan tabakalar (SAMs), tabaka tabaka biriktirme, vakum biriktirme, kimyasal soğurma, elektroforetik biriktirme tekniği, laminasyon (Imahori, 2007), nanolifle kaplama (Berson, de Bettignies, Bailly ve Guillerez, 2007), elektrospinning (Gonzalez ve Pinto, 2005), daldırma ve döndürerek kaplama gibi çeşitli yöntemler adapte edilmiştir. Pek çok polimer esaslı fotovoltaik malzeme veya alıcı-verici karışımları ile çözelti halinde düşük sıcaklıklarda, işlem yapılabilir. Katkılandırılmış konjüge polimerler ile yüksek iletkenlik sağlanmakla beraber, koruyucu tabakalar olmadan çevre şartlarına dayanımları iyi değildir (Brabec ve ark., 2003). Konjüge yarı iletken polimerler için baskı ve kaplama teknikleri (döndürerek kaplama (spincoating), bıçakla çekerek kaplama (doctor-blade), daldırma, baskı, mürekkepli baskı) kullanılmaktadır. Geniş ölçekli, baskı ve kaplama teknikleri düşük enerji tüketimiyle büyük ölçekli üretimlerin yapılmasına olanak sağlayabilir. Vakumda buharlaştırma yöntemi, çözücü gerektirmeden küçük molekülü ince filmlerin biriktirilmesini sağlayan çok temiz bir yöntemdir.  $10^{-5}$  mbar'dan daha düşük bir basınç uygulanarak ve/veya

eldivenli kabinde işlem yapılarak oksijen ve su gibi kirleticiler azaltılabilir. Bu yöntemle, iç içe geçmiş alıcı-verici ağ yapıları elde etmek ya da moleküler katkılandırma yapılmak istenirse, eş zamanlı buharlaştırma teknikleri (=coevaporation) kullanılır (Brabec ve ark., 2003; Günes ve ark., 2007; Nunzi, 2002).

ITO tabakası (anot) genellikle, cam veya plastik üzerine kaplanmış olarak temin edilir. PEDOT:PSS sulu bir çözeltiden kaplanmaktadır. Üzerine kaplandığı ITO tabakasının yüzey kalitesini iyileştirir, boşluk taşıyıcı ve toplayıcı olarak görev yapar. Üst elektrot, (ITO'ya göre daha düşük iş fonksiyonlu Al gibi) buharlaştırma yöntemi ile kaplanır ve çok ince lityum florid (LiF) alt tabakası ile kullanılır. (Brabec ve ark., 2002; Hung, Tang ve Mason, 1997). Metal iş fonksiyonu büyük ölçüde LiF tabakası buharlaştırılarak düşürülebilmektedir (Jong, Friedlein, Osikowicz, Salaneck ve Fahlman, 2006).

## **2.9 Organik Güneş Pillerinin Tekstil Uygulamaları**

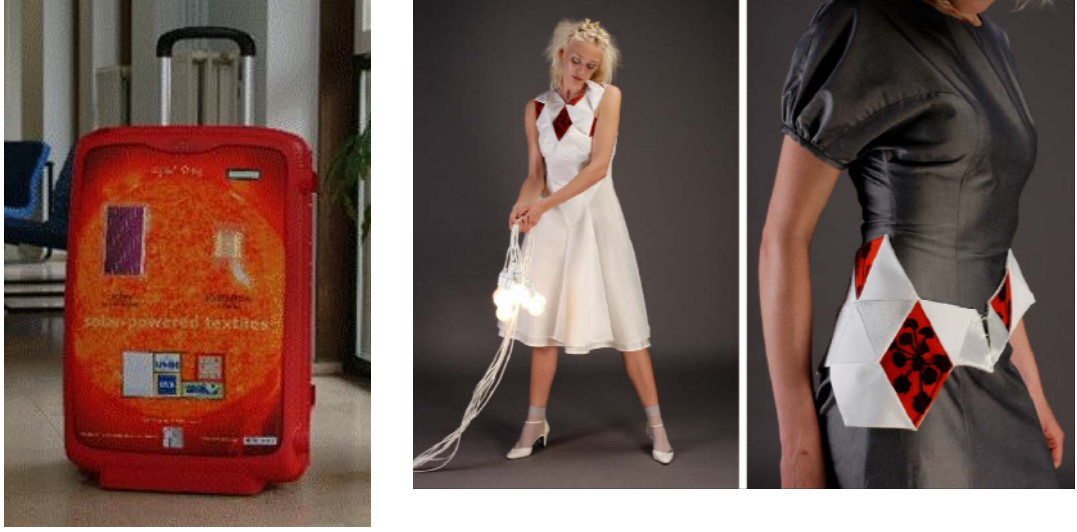
Güneş ışığını enerjiye dönüştüren tüm sistemler arasında, esneklik, performans ve ucuzluk gibi önemli özellikleri nedeniyle tekstil materyallerine en uygunu organik güneş pilleridir. Organik güneş pilleri esaslı tekstil ürünleri ile ilgili bilimsel çalışmalarda, bu materyallerin tekstillere farklı yöntemlerle entegre edilebilmesi veya lif biçiminde üretilerek doğrudan tekstil yapısının oluşturulması üzerinde durulmaktadır. Diğer akıllı tekstil uygulamalarında olduğu gibi, organik güneş pillerinin de tekstil ürünlerinde kullanılması, tüketici isteklerine uygun olmak zorundadır, aksi halde ticari açıdan olumsuz sonuca yol açabilir. Ayrıca maksimum enerjiyi sağlayabilmesi için fotovoltaiik yapının/filmin, kumaş ya da giysi üzerine güneş ışığını alabilecek şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir.

Nano özellikte ve sıradan güneş pillerine göre daha hafif, esnek ve çok yönlü polimer fotovoltaiik materyallerin geliştirilmesi ile polimer tabanlı, daha ucuz, kaplanabilir çeşitli uygulamalarda kullanılacak organik fotovoltaiik malzeme teknolojisi ortaya çıkmıştır. Bilinen güneş pillerine göre daha geniş ışık spektrumu

kullanarak görünür bölge ve gözle görünmeyen bölgede, güneş ışığı yada yapay ışık altında, pek çok farklı elektronik cihaz için elektrik enerjisi üretimi sağlayan fotovoltaiik materyallerin üretilmesi, tekstil alanındaki çalışmaları da teşvik etmektedir. Bu fotoaktif materyaller esnek taşıyıcı tabakalar üzerine, ucuz olarak basılabilir ve kaplanabilir. Seri üretim için de aynı makine ve teknolojiler kullanılabilir. Ayrıca çeşitli renk, desen ve şeffaflıkta üretilebilmektedir (Konarka, 2007). Kamp çadırları ve sığınaklar yanında, her türlü günlük giysi, çanta gibi hareket halinde bile elektrik üretebilecek ürünler üzerinde kullanılabilir. Üretilen liflerin, daha iyi elektrik üretimine olanak sağlayabilecek dokuma kumaş formuna dönüştürülme çalışmaları olumlu sonuç verirse, güneş teknolojisine uygun uygulama alanı ve sayısı artacağı ve bu şekilde her türlü kumaşın kendisi fotovoltaiik etki ve enerjiyi üreteceği belirtilmektedir (Imec, 2005; Konarka, 2007).

Araştırmacılar, dünya genelinde, organik esaslı malzemeleri kullanan çeşitli fotovoltaiik tekstil projelerini uygulamaya koymuşlardır. Laminasyon tekniği ile tekstillere entegre edilebilecek esnek organik güneş pillerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Çalışmada öncelikle organik güneş pillerinin tekstile laminasyonu için uygun biçime getirilmesi araştırılmış, daha sonra ise, güneş pilinin performansının geliştirilmesi üzerine çalışma yapılmıştır (SOLTEX, 2007).

Fotovoltaiik tekstillerin, organik güneş pillerinin tekstil yüzeylerine entegre edilmesi ile ilgili olarak 2005 yılında araştırmacılar, tekstil yüzeyleri üzerine film baskı tekniğinin geliştirilmesi üzerinde çalışmışlardır (Şekil 2.9). Heteroeklem yapıdaki güneş pilinin aktif tabakasının biriktirilmesi için bu yöntemde, poly(phenylenevinylene) türevi verici olarak, PCBM (C<sub>60</sub> türevi) alıcı materyal olarak kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen materyal istenilen biçimde desenlendirilebilmiştir ancak enerji dönüşüm verimi %1,3 olarak meydana gelmiştir (Imec, 2005).



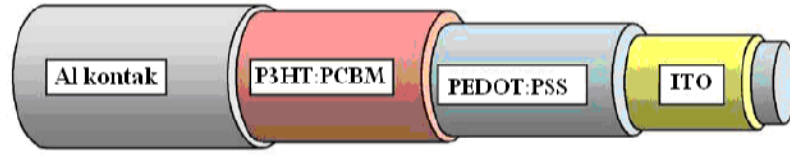
a

b

Şekil 2.9 Tekstil yüzeyi üzerine güneş pili entegre edilmiş fotovoltaiik bir bavul (a) (Imec,2005) ve giysi üzerine entgre edilmiş organik güneş pilleri (b) (Krebs, Biancardo, Winther-Jensen, Spanggard ve Alstrup, 2006)

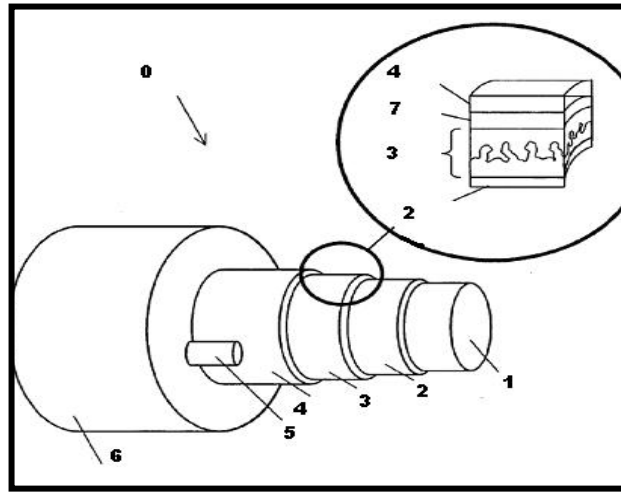
Krebs ve ark. (2006) polimer güneş pillerinin tekstillerde kullanılması üzerine çalışmışlardır. İki farklı yöntem uygulamışlardır, polimer esaslı fotovoltaiik materyali taşıyan polietilentereftalatın (PET) yapısal bir eleman olarak basit kullanımı ve ince tabaka polietilenin tekstil üzerine laminasyonu ile PEDOT:PSS esaslı elektrodun tekstil materyaline uygulanmasıdır. Araştırmacılar, çalışma sonunda giysi üzerine uygulamalar gerçekleştirebilmişler (Şekil 2.9b) ve yapılan deneyler sonucunda da fotovoltaiik materyal içerisine oksijen ve suyun taşınmasından dolayı oluşan bozulmanın mekanik kararlılıktan daha geçerli olduğunu görmüşlerdir.

Liu ve ark. (2007) çok modlu optik lifler (0,6-1,4 mm) üzerine organik fotovoltaiik materyalleri kaplamışlardır (Şekil 2.10). Araştırmada ince filmler kullanılmıştır. Çalışmada ince cam liflerinin (0,6 mm), enerjinin çoğunu arkaya geçirdiğini, dolayısıyla optik kaybın lif çapının azalmasıyla arttığını görmüşlerdir. 1,5 mm çaplı optik lif %0,1 verimle çalışırken, 0,6 mm çaplı olan lif %0,6 verimle çalışmıştır. Çalışmada optik lifler sırasıyla ITO, PEDOT:PSS, P3HT:PCBM, LiF ve Alüminyum tabaka ile kaplanmıştır.



Şekil 2.10 Fotovoltaik optik lif (Liu ve ark., 2007)

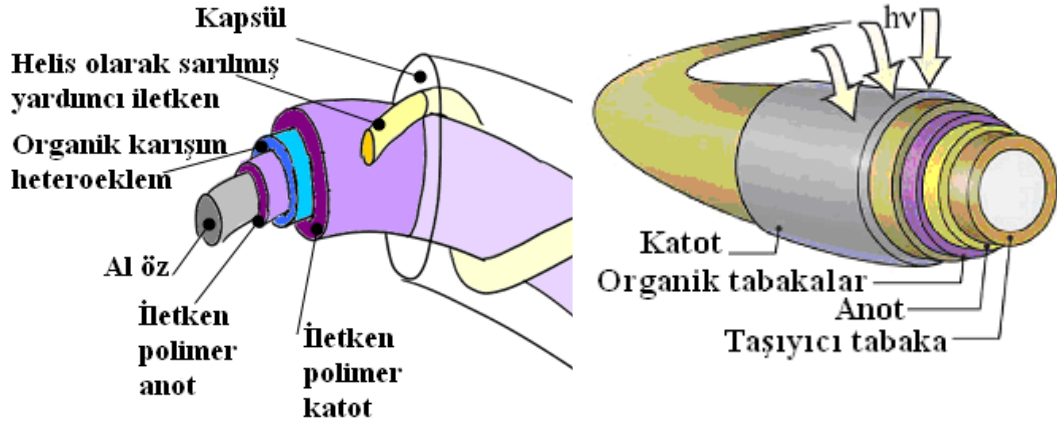
Fotovoltaik bir lif (0) üretimi için hazırlanan patentli bir çalışmada (Şekil 2.11), lif birinci elektrodu kapsayan iletken bir öze sahiptir (1: Destek elemanı, 2: Birinci elektrod). Fotoaktif tabakayı içeren organik bir tabaka (3) bu özü çevreler ve elektriksel olarak ilk elektrotla (2) temas halindedir. Şeffaf ikinci elektrod (4) organik tabakayı çevreler ve bu tabakayla temas halindedir. Yardımcı bir iletken (5) şeffaf elektrodun yüzeyi ile elektriksel olarak temas halinde olabilir. Koruyucu tabaka (6) en dışta yer almaktadır. Böyle bir fotovoltaik yapının pek çok tekstil lifi ile birlikte kullanılabileceği öngörülmektedir (Forrest ve ark., 2003).



Şekil 2.11 Fotovoltaik lif (Forrest ve ark., 2003).

Gaynor ve Peumans (2008), yürütmekte oldukları projede fotovoltaik bir lif üretmeye çalışmaktadırlar (Şekil 2.12).





Şekil 2.12 Fotovoltaik lifler solda (Gaynor ve Peumans, 2008) ve sağda (O'Connor ve ark., 2008)

O'Connor ve ark. (2008) vakumda ısı ile buharlaştırma yöntemini kullanarak farklı taşıyıcı tabakaları fotovoltaik malzemelerle kaplamışlardır (Şekil 2.12). Düz (ITO kaplı cam, cam, polyimid taşıyıcı tabaka) ve yuvarlak enine kesitli (polyimid kaplı cam lifleri) taşıyıcı tabakaların kullanıldığı yapılar pillerin elektriksel performansları açısından birbiri ile karşılaştırılmış en iyi sonuçlar yine ITO kaplı cam esaslı standart pillerde elde edilmiştir. Yarı-şeffaf dış metal elektrot (Mg-Ag) ve CuPc:C<sub>60</sub> karışımından oluşan aktif tabaka lif biçimli fotovoltaik yapıların elde edilmesinde önemli bir rol oynamıştır (O'Connor, Pipe ve Shtein, 2008).

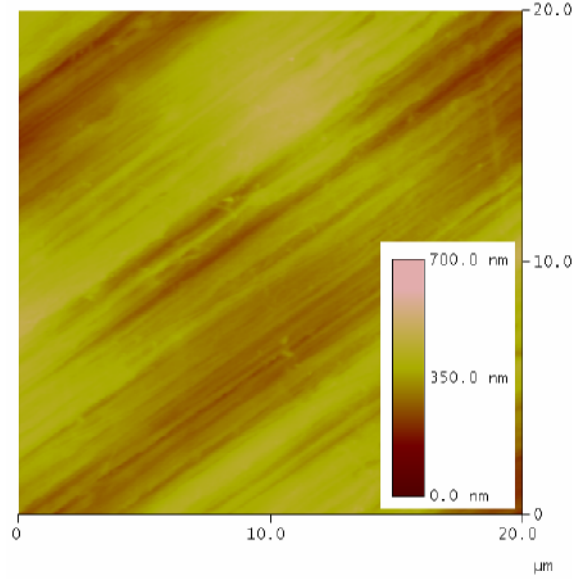
## BÖLÜM ÜÇ

### MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Polimer Esaslı Organik Güneş Pilleri için Kullanılan Taşıyıcı Tabakalar

Çalışmada, geliştirilecek polimer esaslı esnek organik güneş pillerinin performanslarını kıyaslamak amacıyla kontrol numunesi oluşturmak için öncelikle standart bir güneş pili elde etmek hedeflenmiştir. Bu amaçla, taşıyıcı tabaka (=substrat) olarak, 1 mm kalınlığında, 15x15 mm<sup>2</sup> boyutlarında indiyum katkılı kalay oksit (ITO) kaplı (Merck KG Darmstadt) cam tabakalar kullanılmıştır. Cam tabaka üzerindeki ITO kalınlığının yaklaşık 120 nm ve tabaka direncinin de 15 Ωcm<sup>2</sup> den az olduğu belirtilmektedir (www.merck.de, 2009).

Polimer esaslı esnek organik güneş pili oluşturmak amacıyla, temin edilen 0,08 mm kalınlığında polipropilen (PP) şerit (4 x 50 mm<sup>2</sup>) ve mono filamentler (D=0,59 mm, l=50 mm) (Sunjüt, Türkiye) kullanılmıştır. Polipropilen şeritlerin, herhangi bir materyal ile kaplanmadan önceki yüzey topoğrafyası hakkında bilgi edinmek amacıyla, bu yüzeylerin AFM görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 3.1). Ticari olarak üretilmiş bir şerit olan bu numunenin yüzeyinin mükemmel düzgünlükte olmadığı (pürüzlülük yaklaşık 500 nm) görülmektedir. Esnek taşıyıcı tabaka olarak ayrıca 15 x 15 mm<sup>2</sup> boyutlarında kesilen 0,27 mm kalınlığında polietilen tereftalat (PET) şeffaf film de kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Kaplamasız haldeki polipropilen taşıyıcı tabakanın yüzeyinden elde edilen AFM görüntüsü

### 3.2. Esnek Polimer Anot Olarak Kullanılan PEDOT:PSS Karışımları

Esnek organik güneş pilleri üretiminde, esnek polimer anot olarak poly(3,4-ethylenedioxythiophene:poly(styrene sulfonic acid)) (poli(3,4-etilendioksitiofen: poli(stiren sülfonik asit)) (PEDOT:PSS) kullanılmıştır. Çalışılan tekstil lifi yapısına (polipropilen şerit) en uygun polimer elektrodun tespiti için farklı özelliklerde PEDOT:PSS malzemeleri denenmiştir. Temel olarak, PEDOT politiofen esaslı konjuge bir polimerdir ve pozitif yük taşır. PSS ise negatif yükleri taşır. Birlikte makromoleküler bir tuz olan ve genel kimyasal yapısı Şekil 3.2’de verilen PEDOT:PSS’yi oluştururlar. PEDOT:PSS, cam ve esnek taşıyıcı tabakalar üzerinde, indiyum katkılı kalay oksit (ITO) ve flor katkılı kalay oksit (FTO) gibi anot tabaka oluşturmak üzere kullanılan diğer kimyasal maddelere göre daha kolay yöntemlerle, üniform ve şeffaf ince filmler oluşturabilmesi, ayrıca ITO veya diğer metal elektrotlarla kullanıldığında performansı iyileştirmesi (Arias, Granström, Petritsch ve Friend, 1999) nedeniyle tercih edilmektedir.

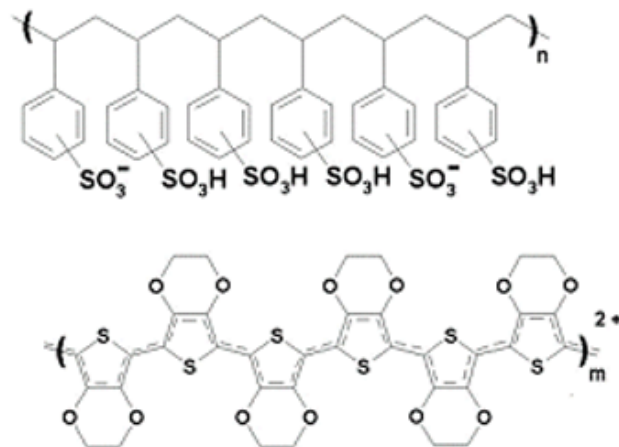
PEDOT:PSS ayrıca tek başına da anot olarak kullanılmak için uygundur. İndiyum katkılı kalay oksit ile karşılaştırmasının yapıldığı Tablo 3.1 incelendiğinde, hem imal hem de kullanım özellikleri açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1 PEDOT:PSS ve ITO'nun özelliklerinin karşılaştırılması (www.hcstarck.com, 2009)

Özellikler	ITO	PEDOT:PSS (Baytron PH 500)
Bileşimi	Indium-tin-oksit	poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonik asit)
Kaplama teknikleri	Püskürtme, buharlaştırma, sol-jel işlemi	Döndürerek kaplama, daldırma ile kaplama, pek çok baskı yöntemi
Esneklik	Düşük	Yüksek
%90 geçirgenlikte yüzey direnci	5-20 $\Omega$	*170 $\Omega$
Özgül iletkenliği	6000 S/cm	*500 S/cm ( S= 1/ $\Omega$ )
100 $\Omega$ da tabaka kalınlığı	18 nm	250 nm
Maliyet tahmini	20-100 Euro/m <sup>2</sup>	*3-8 Euro/m <sup>2</sup>

\*%5 DMSO eklenerek

Daha üstün anodik özellikler elde etmek amacıyla PEDOT:PSS'nin aşağıda açıklanan farklı tipleri deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Ayrıca, PEDOT:PSS'nin anot elektrot olarak özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla yapılan modifikasyonlar da aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2 PEDOT:PSS'nin kimyasal yapısı(www.clevios.com, 2009)

### **3.2.1. Düşük İletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH PEKA)**

Bayer AG'den temin edilen PEDOT:PSS [(ağırlık oranı; 1:2,5), poli(3,4-etilendioksitiofen: poli(stiren sülfonik asit) (Baytron PH PEKA)] p tipi bir polimerdir. İletkenliği en fazla 10 S/cm'dir (S: Siemens,  $S = \frac{1}{\Omega}$ ). Sulu bir çözelti olan bu karışımda katı madde içeriği %1,2 ile 1,4 arasındadır.

### **3.2.2 Yüksek İletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH 500)**

H.C.Starck firmasından sağlanan Baytron PH 500 (PEDOT:PSS), iletken polimer PEDT/PSS [poli(3,4-etilendioksitiofen) poli(stiren sülfonat)]'nin sulu bir dispersiyonudur. Materyal koyu mavi renkli, kaplandığında ise mavimsi renkte şeffaf ve kokusuzdur. İletkenliği %5 DMSO (Dimetilsülfoksit) eklendikten sonra en az 300 S/cm'dir. Sulu çözeltideki katı madde içeriği %1,0 ile 1,3 arasındadır.

### **3.2.3 PEDOT:PSS'ye Karbon Nanotüp (CNT)-Polianilin (PANI) Karışımı İlavesi**

#### **3.2.3.1 Baytron PH 500: CNT-PANI ve Baytron PH PEKA: CNT-PANI**

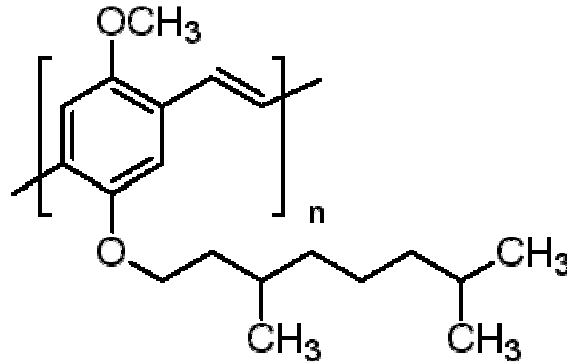
Ağırlık olarak %50 suda çözülebilir karbon nanotüp (CNT) ve %50 polianilin (PANI) karışımı (Jimenez, 2008.), H.C.Starck firmasından temin edilen Baytron PH 500 (PEDOT:PSS) ve Bayer AG'den temin edilen PEDOT PEKA iletken polimerlerine ağırlıkça 1:50 oranında katılarak ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. Elde edilen nanokompozitlerin dirençleri ölçülmüş ve CNT/PANI kompozit malzemesi kullanılmamış olan PEDOT:PSS'ye göre hemen hemen ITO kaplı cam üzerinde aynı (yaklaşık 16-17  $\Omega\Box$ ), PP şerit üzerinde ise daha fazla (CNT kullanılan: 300  $\Omega\Box$  ve kullanılmayan 600  $\Omega\Box$ ) (tabaka direnci= $\Omega\Box$ ) çıkmıştır. Bunun sebebinin daldırma yönteminde karbon nanotüplerin karşım içindeki ve taşıyıcı tabaka üzerindeki yerleşimleri ile karışımın direncine katkıda bulunması olduğu düşünülmektedir.

### 3.3. Polimer Esaslı Organik Güneş Pillerinde Fotoaktif Tabakayı Oluşturan Kimyasal Maddeler

#### 3.3.1. Elektron Verici: MDMO-PPV

MDMO-PPV (Poly [2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy) -1,4-phenylenevinylene]) (poli[2-metoksi-5-(3,7- dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilenvinilen)), fotovoltaik pillerde elektron verici olarak görev yapan konjüge bir polimerdir (Şekil 3.3). Toluen, ksilen, tetrahidrofuran, kloroform, klorobenzen, sikloheksan gibi çözücülerde çözülebilmektedir. Camsı geçiş sıcaklığı 65°C'dir.

Bu çalışmada Covion Merck firmasından sağlanan MDMO-PPV kullanılmıştır. MDMO-PPV gibi konjüge polimerler absorpsiyon grafiğinde 500 nm civarındaki dalga boylarında tepe noktasına (en yüksek absorpsiyon) ulaşırlar ve 700 nm'den daha yüksek dalga boylarında ise etkinlik göstermezler (Brabec, 2001)

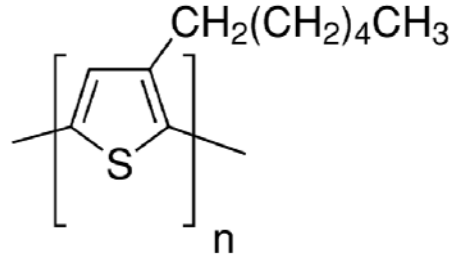


Şekil 3.3 MDMO-PPV'nin kimyasal yapısı

#### 3.3.2 Elektron Verici: P3HT

P3HT (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)) (Poli(3-hekziltiofen-2,5-dil)) (Şekil 3.4), şarj edilebilir pillerin elektrotlarında, elektrokromik cihazlarda, kimyasal ve optik sensörlerde, ışık yayan diyotlarda, alan etkili transistörlerde ve özellikle de fotovoltaik uygulamalarda kullanılmaktadır. P3HT genel olarak bilinen çözücülerde (toluen, kloroform, klorobenzene vb.) çözülür ve en yüksek absorpsiyon değerini 550 nm dalga boyunda veren geniş bir absorpsiyon spektrumu gösterir. Fotovoltaik

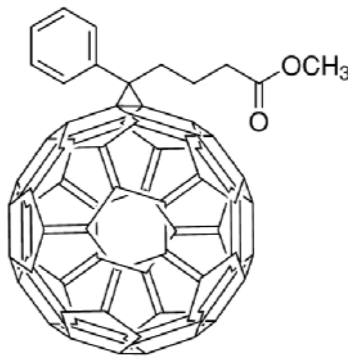
pillerde P tipi malzeme yani elektron verici olarak görev yapar. Oda sıcaklığında yarı kristal olan konjüge bir polimerdir (Yang, Orfino, ve Holdcroft, 1996). Bu çalışmada Rieke Specialty Polymers'den ([www.riekemetals.com](http://www.riekemetals.com), 2009) temin edilen P3HT kullanılmıştır.



Şekil 3.4 P3HT'nin kimyasal yapısı

### 3.3.3 Elektron Alıcı: PCBM

PCBM ([6,6]-Phenyl C<sub>61</sub> butyric acid methyl ester) ([6,6]-fenil-C<sub>61</sub>-bütrik asit metil ester) organik çözücülerle çözülebilir N tipi organik yarı iletkenlerdir. Organik esaslı elektroniklerde, özellikle fotovoltaiik pillerde ve karışım heteroeklemlerli OFET'lerde N-tipi tabaka, elektron alıcı olarak kullanılmaktadır. Molekül formülü C<sub>72</sub>H<sub>14</sub>O<sub>2</sub>'dir (Şekil 3.5). Bu çalışmada Nano-C'den ([www.nano-c.com](http://www.nano-c.com), 2009) temin edilen %99,5'lük PCBM kullanılmıştır.



Şekil 3.5 PCBM'in kimyasal yapısı

### 3.4 Polimer Esaslı Organik Güneş Pillerinde Kullanılan Üst Metal Elektrotlar: Katotlar

Taşıyıcı tabaka üzerine fotoaktif katmanın kaplanması ardından, içinde argon gazı bulunan eldivenli kutu içerisinde, üst metal elektrot vakumda buharlaştırma yöntemi ile kaplanır.

Metal elektrot olarak, aşağıdaki kombinasyonlar;

1. 10 nm Alüminyum (Al)
2. 0,7 nm Lityum Florid (LiF) ve 10 nm Alüminyum (Al),
3. 3 nm Al ve 7 nm Gümüş (Ag),
4. 10 nm Altın (Au),
5. 10 nm Ag,
6. 3 nm Krom (Cr) ve 7 nm Ag ve
7. 3 nm Magnezyum (Mg) ve 7 nm Ag

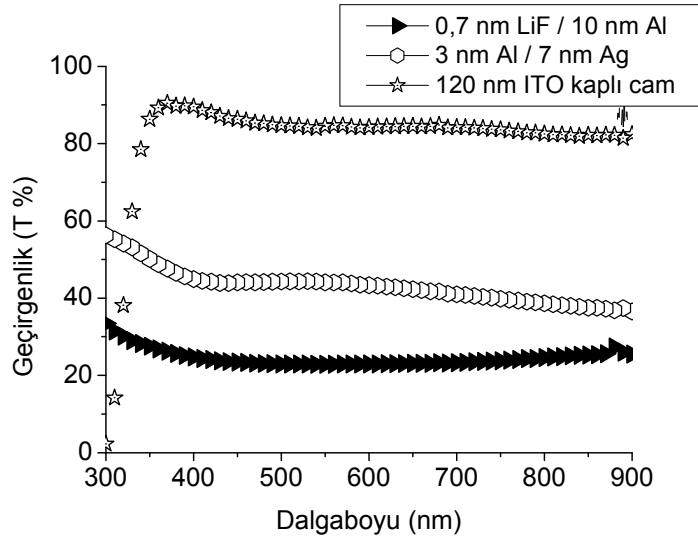
yaklaşık  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar basınç altında 0,02-0,1 nm/saniye hızla kaplanmıştır.

Ancak, yukarıdaki 1, 2 ve 3 sıra numaralı, Al, LiF ve Al ile Al ve Ag kombinasyonlarından oluşan metal elektrotların işlevlerini yerine getirmesine karşın, 4-7 sıra numaralı, Au, Ag, Cr/Ag, Mg/Ag metal elektrotlarla yapılan denemelerde, metal, pil içine dağıldığı için cihazın kısa devre olmasına neden olmuştur.

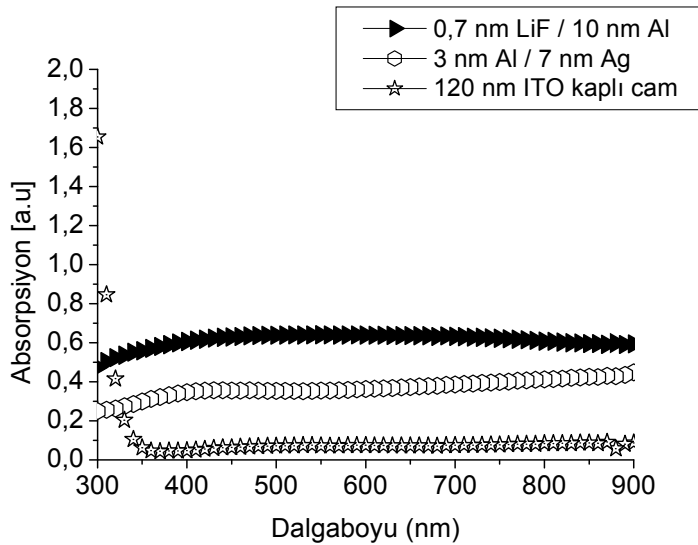
Metal elektrot olarak Al ile denemeler yapıldıktan sonra, kullanımına karar verilen 2 ve 3 numaralı kombinasyonların (LiF ve Al ile Al ve Ag kombinasyonları) ışık geçirme ve ışık absorplama özelliklerini belirlemek amacıyla UV Spektrometresi kullanılarak farklı dalga boylarında ölçümler yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.6 ve 3.7'de verilmiştir. Bu sonuçlar da göstermiştir ki, ITO kaplı cam taşıyıcı tabaka, hem geçirgenlik hem de absorpsiyon bakımından alternatif olarak geliştirilen metal elektrotlara kıyasla çok daha üstün özelliktedir. Ancak, hedeflenen esnek PP şeritleri, sadece yüksek sıcaklıkta kaplanabilen ITO ile kaplamak mümkün değildir.



Gerek geçirgenlik, gerekse de absorpsiyon bakımından, yaklaşık aynı kalınlıkta kaplanmış olmalarına rağmen, Al ve Ag kombinasyonu, LiF ve Al kombinasyonuna kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu ilk sonuç, metal elektrot olarak Al ve Ag kombinasyonunun tercih edilmesini gerektirse de yapılan deneysel çalışmalarda bu kombinasyonla oluşturulan metal elektrotlarda karşılaşılan kısa devre sorunları nedeniyle her iki metal elektrot da çalışmalarda kullanılmıştır.



Şekil 3.6 LiF/Al, Al/Ag ve 120 nm ITO kaplı cama ait geçirgenlik spektrumu



Şekil 3.7 LiF/Al, Al/Ag ve 120 nm ITO kaplı cama ait absorpsiyon spektrumu

### 3.5 Geliştirilen Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

Geliştirilen güneş pillerinin elektriksel karakterizasyonu, soy bir gaz olan argon ortamında MB 200, Mbraun eldivenli kabin (glove box) sistemi içerisinde (www.mbraun.com, 2009), Keithley 236 ölçü aleti ile gerçekleştirilmiştir.

Öte yandan, geliştirilen güneş pillerinin ışık altında karakterizasyonu, güneş ışığı simülatörü (solar simulator) (K. H. Steuernagel Lichttechnik GmbH) ile AM1.5 (Hava kütlesi (air mass) 1.5), 100 mW/cm<sup>2</sup> standart şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Tüm çalışmada, geliştirilen güneş pilleri metal elektrot kaplanan yüzeyden aydınlatılmıştır.

Güneş pillerinin verimleri Formül 3.1'e göre hesaplanmıştır:

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (3.1)$$

Burada;

$I_{sc}$  kısa devre akım yoğunluğu (short circuit current density),

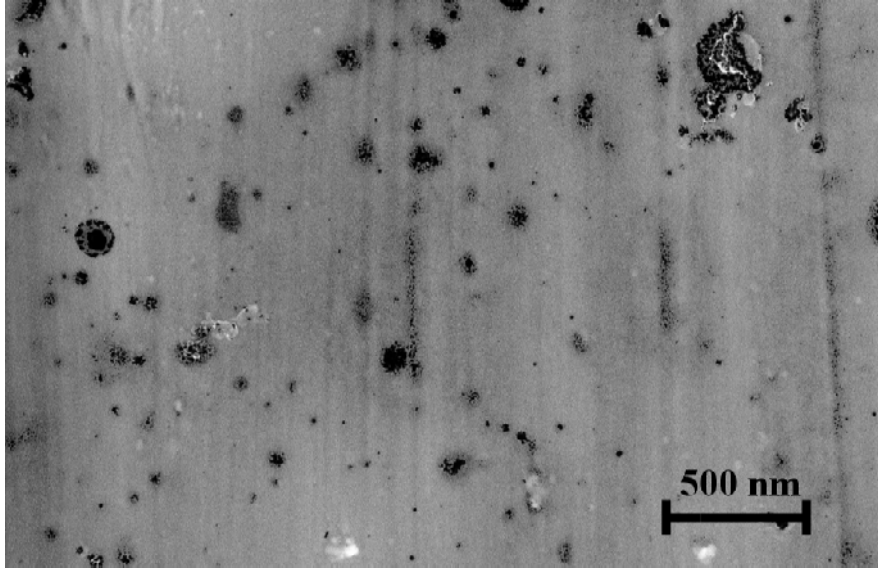
$V_{oc}$  açık devre gerilimi (open circuit voltage),

FF dolgu faktörü (fill factor) ve

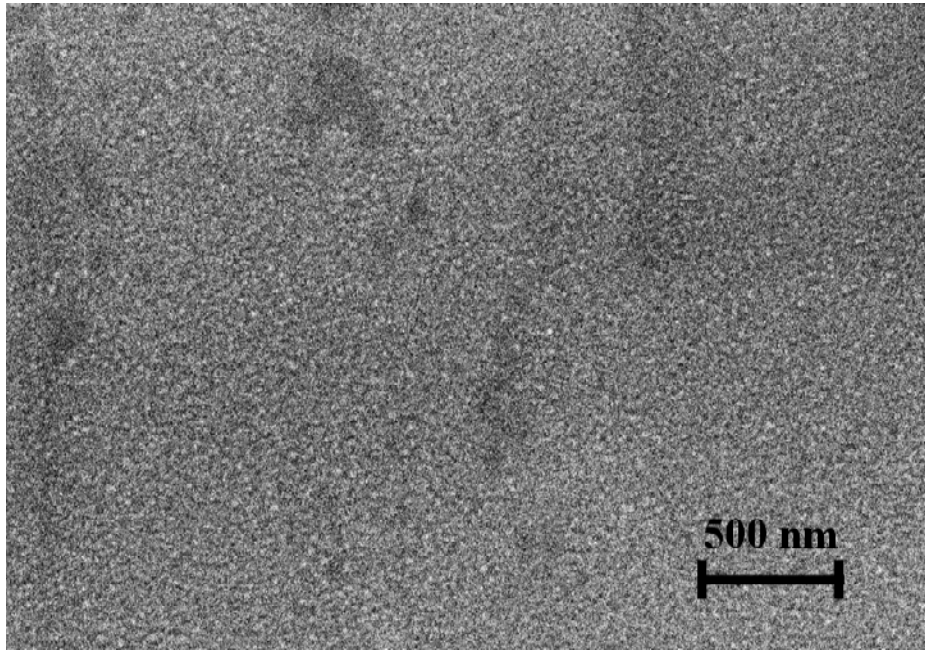
$P_{in}$  gelen ışık yoğunluğu (incident light intensity).

Yüzey morfolojisi ölçümleri, ortam koşullarında AFM (Atomic Force Microscope) (Digital Instruments Dimension 3100) (www.veeco.com, 2009) cihazında kendi rezonans frekansında salınım yaptığı modda (tapping mode) gerçekleştirilmiştir.

Örneklerin enine kesit görüntüleri ve yüzey görüntüleri (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9), taramalı elektron mikroskobu (SEM) (LEO Supra 35) (www.htskorea.com, 2009) ile alınmıştır.



Şekil 3.8 LiF/Al elektroda ait X2000 büyütmeli SEM görüntüsü



Şekil 3.9 Al/Ag elektroda ait X20 büyütmeli SEM görüntüsü

Düşük ışınım şiddetindeki monokromatik ışık altında gelen fotonun, elektrik akımına dönüşüm verimi IPCE (incident photon to current conversion efficiency) organik güneş pillerinde çok sık ölçülen ve sistemin çalışması hakkında bilgi veren bir tekniktir.

Geliştirilen örnek güneş pillerinin 300 ile 1000 nm aralığında, IPCE gelen fotonun elektrik akımına dönüşüm veriminin ölçülmesi için örnekler argon atmosferinde eldivenli kabin (glove box) sistemi içerisinde bir monokromatörden geçerek gelen Xenon lamba ışığı ile aydınlatılmıştır. Ölçümlerin kalibrasyonu için silikon (Si) dedektör kullanılmıştır. IPCE, Formül 3.2'ye göre hesaplanmıştır:

$$IPCE (\%) = \frac{1240 * I_{sc}}{\lambda * P_{in}} \quad (3.2)$$

Burada;

$I_{sc}$  kısa devre akımı (short circuit current density) ( $\mu A/cm^2$ ),

$\lambda$  gelen foton dalga boyu (incident photon wavelength) (nm),

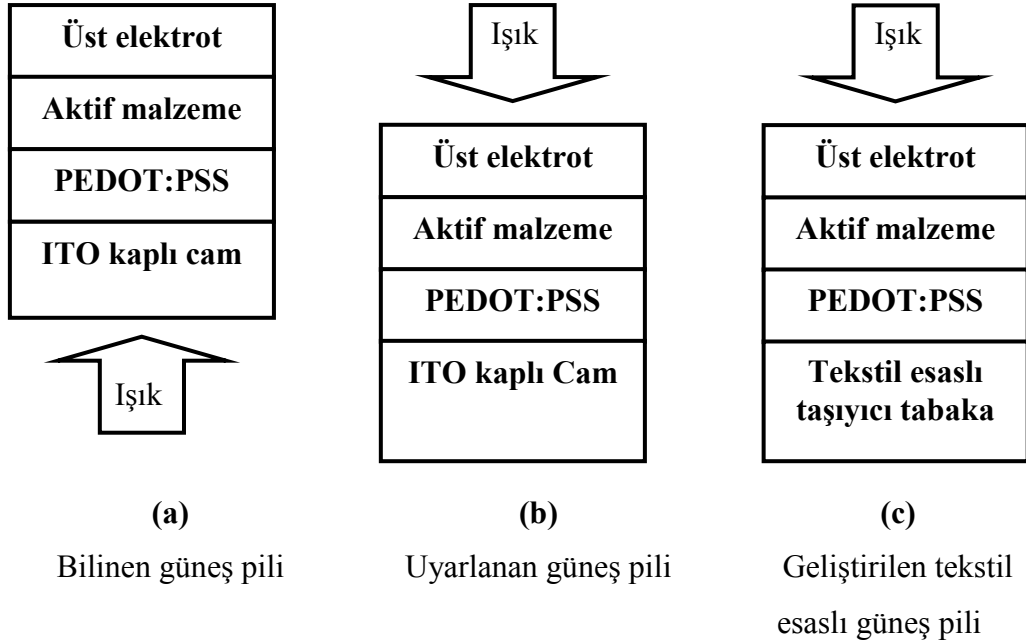
$P_{in}$  monokromatik ışık geliş yoğunluğu (monochromatic light incidence) ( $W/m^2$ ).

## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL ÇALIŞMA

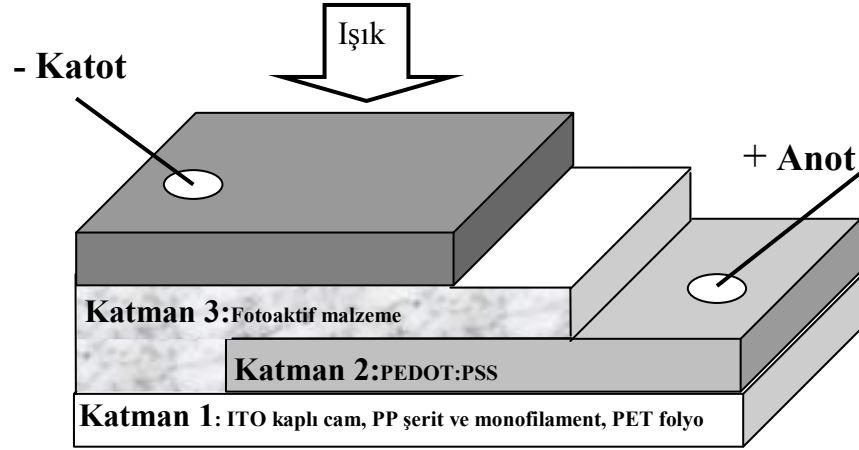
Bu kısımda aşağıdaki üç farklı güneş pili, enerji dönüşüm verimi bakımından karşılaştırılmışlardır;

- bilinen ve deneysel çalışmaların yapıldığı laboratuvarında (LIOS) incelenen taşıyıcı cam yönünden ışık alan ITO kaplı cam üzerinde polimer esaslı organik güneş pilleri (Şekil 4.1a),
- bu çalışmada geliştirilen güneş pilleri ile karşılaştırmak amacıyla laboratuvarında oluşturulan metal elektrot tarafından ışık alan ITO kaplı cam üzerinde polimer esaslı organik güneş pilleri (Şekil 4.1b) ve
- bu çalışma kapsamında tekstil amaçlı kullanılabilir nitelikte geliştirilen (Şekil 4.1c) esnek güneş pilleri.



Şekil 4.1 Bilinen, uyarlanan ve bu çalışma ile geliştirilen güneş pillerinin şematik yapısı

Literatürden edinilen bilgiler ve bu araştırmanın yapıldığı laboratuvarındaki (LIOS) deneyim birikimlerinden yararlanılarak, uyarlanan ve tekstil amaçlı kullanılabilir fotovoltaiik pil için Şekil 4.2'deki yapının oluşturulması hedeflenmiştir.



Şekil 4.2 Geliştirilen polimer esaslı organik güneş pili yapısı

#### 4.1 Bilinen Organik Güneş Pilinin Hazırlanması (İndiyum Katkılı Kalay Oksit (ITO) Kaplı Cam Üzerinde Polimer Esaslı Organik Güneş Pili)

##### 4.1.1. Katman 1: Taşıyıcı Tabakaların Hazırlanması

Cam taşıyıcılı bilinen bir organik güneş pili (Şekil 4.3) hazırlanırken 120 nm kalınlığında ITO kaplı cam levhalar (Merck) kullanılmaktadır. Cam üzerindeki ITO'nun bir kısmı yaklaşık 30 dakika asit karışımına ( $\text{HCl}_{\text{kons.}(\%36)}:\text{HNO}_{3\text{kons.}(\%0,4)}:\text{H}_2\text{O}$  (4,6:0,4:5) maruz bırakılarak sökölür. Taşıyıcı tabakanın temas oluşturacak kısmını asitle söküm işleminden korumak amacıyla ITO kaplı cam levhanın bir kısmına yapışkan bir bant yapıştırılmıştır. ITO söküm işleminden sonra, yapışkan bant çıkarılır ve yarısı ITO kaplı olan camın tamamı, sırasıyla 15'er dakika Helmanex, Aseton, Isopropanol, Etanol ve Metanol içeren ultrasonik banyoda temizlenir. Her kimyasal temizlemeden sonra, numune cam plaka distile su ile durulanır. Temizleme işlemlerin en sonunda numune azot gazı atmosferinde kurutulur.

#### **4.1.2 Katman 2 ve 3: PEDOT:PSS ve Fotoaktif Tabakanın Kaplanması**

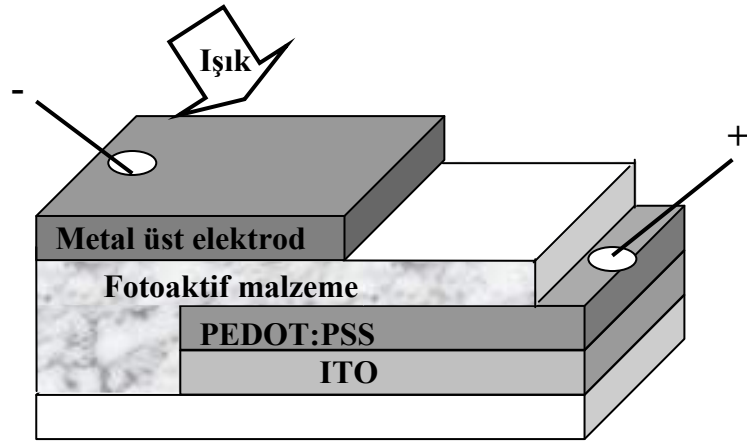
Temizleme aşamasından sonra, bir bölgesi ITO kaplı cam levhanın tüm üst yüzeyine döndürerek kaplama (=spin-coating) yöntemi (1500 devir/dakika'da 80 saniye) ile PEDOT:PSS kaplanır. Örneklerin üzerinden, PEDOT:PSS'nin bir kısmı distile su ile ıslatılmış pamuk ile silinir ve kurduktan sonra 150°C'de 2 dakika tavllanır.

Daha sonra, aktif polimer madde çözeltisi de örneklere spin-coating (1500 devir/dakika'da 80 saniye) yöntemi ile kaplanır. Son olarak örnekler kurumaya bırakılır.

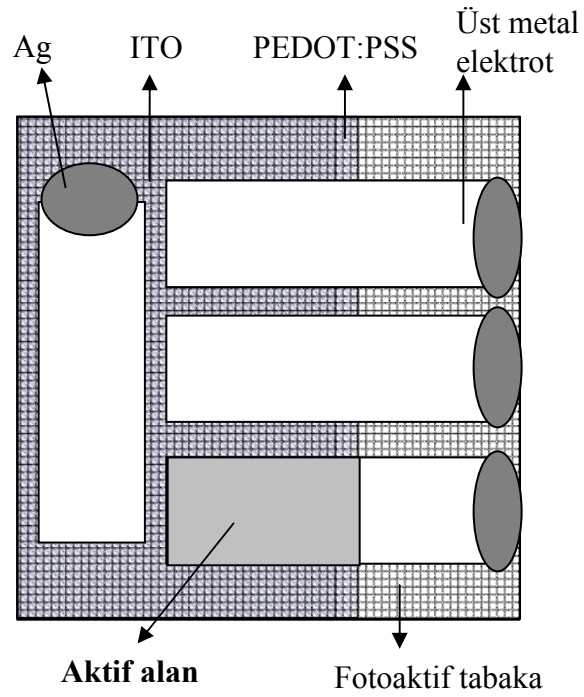
#### **4.1.3 Katman 4: Metal Üst Elektrotun Kaplanması**

Kuruyan örnekler eldivenli kutu (glove box) içerisine alınır. Kaplanacak örneğin üst yüzeyi buharlaşacak metale bakacak biçimde yerleştirilir. Ancak, sadece istenilen bölgenin kaplanmasını sağlayacak biçimde yüzeye maske (Kaplanmak istenen temas yüzeyini açıkta bırakan diğer kısımları örten metal levha "maske" olarak adlandırılır.) yerleştirilir. Vakumda buharlaştırma yöntemi ile (yaklaşık  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar basınçta ve 0,02-0,1 nm/saniye kalınlığında kaplama hızı) toplam yaklaşık 10 nm kalınlığında metal elektrot elde edilecek biçimde örnekler kaplanır. Böylece güneş pili yapısı tamamlanmış olur (Şekil 4.3 ve 4.4).

Bu şekilde oluşturulan elektrotlardan elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için yüzey üzerine kısmi olarak gümüş pat damlatılır. Bu sayede, dışarıdan yüzeye temas ettirilen ölçüm ucunun hem yüzeye zarar vermesi önlemiş, hem de ucun elektrot ile daha sağlıklı bir temas oluşturması sağlanır.



Şekil 4.3 Cam taşıyıcılı polimer esaslı organik güneş pili

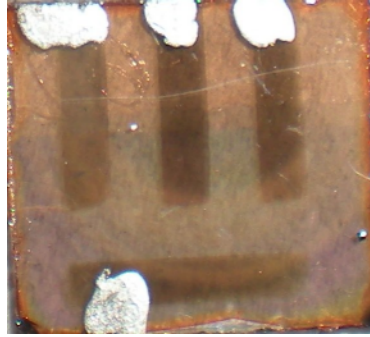


Şekil 4.4 Hazırlanmış olan cam taşıyıcılı güneş pilinin üstten görünümü



## 4.2 Uyarlanan Organik Güneş Piliin Hazırlanması (İndiyum Katkılı Kalay Oksit Kaplı Cam Üzerinde Polimer Esaslı Organik Güneş Pili)

Bölüm 4.3’de açıklanacak ve bu çalışma kapsamında geliştirilmiş olan tekstil lifi olarak da kullanılabilen esnek güneş pilleri ile ışığın aynı yönden alındığı bir yapıda güneş pili yapısı (uyarlanmış güneş pili) oluşturmak daha sağlıklı mukayese yapabilmeyi sağlayacaktır. Bu yeni uyarlanmış güneş pilinde (Şekil 4.5) sadece metal elektrot 10 nm kalınlığında yapılarak güneş ışığının bu metal elektrottan geçişi sağlanmış ve geliştirilen yeni güneş pili ile mukayese edilmiştir.



Şekil 4.5 Uyarlanmış organik güneş piline ait fotoğraf

## 4.3 Yeni Geliştirilen Esnek Güneş Piliin Hazırlanması (Polipropilen (PP) şerit, PP monofilament ve Polietilentereftalat (PET) Folyo Üzerinde Polimer Esaslı Organik Güneş Pili)

### 4.3.1 Taşıyıcı Tabakaların (Katman 1) Kaplama İşlemine Hazırlanması

Polipropilen (PP) şerit, PP monofilament ve polietilentereftalat (PET) folyolar önce metanol, sonra iso-propanol banyolar içine yerleştirildi ve her birinde 15 dakika süre ile bekletildi. Bu şekilde yapılan her kimyasal işlemde sonra, numuneler distile su ile durularak temizlendi ve hemen okside olmamaları için azot (N<sub>2</sub>) gazı atmosferinde kurutuldu.

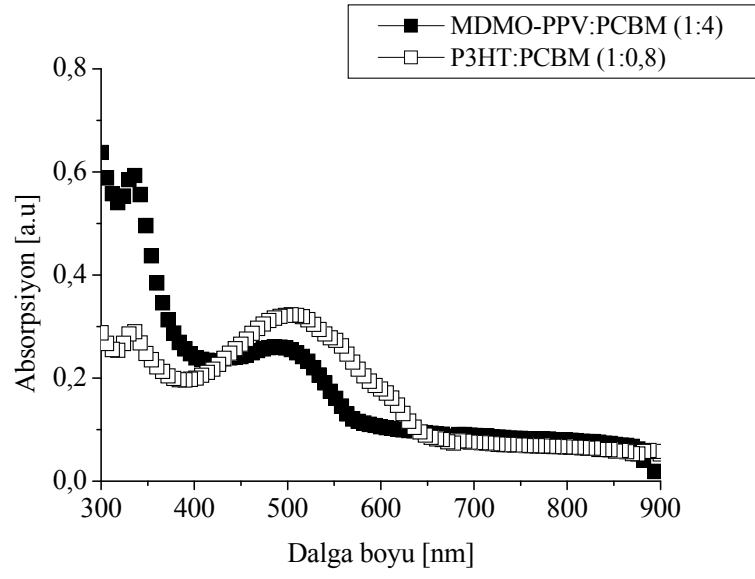
### 4.3.2 PEDOT:PSS'nin ve Fotoaktif Tabakanın Hazırlanması

#### 4.3.2.1 Katman 2: PEDOT:PSS'nin Hazırlanması

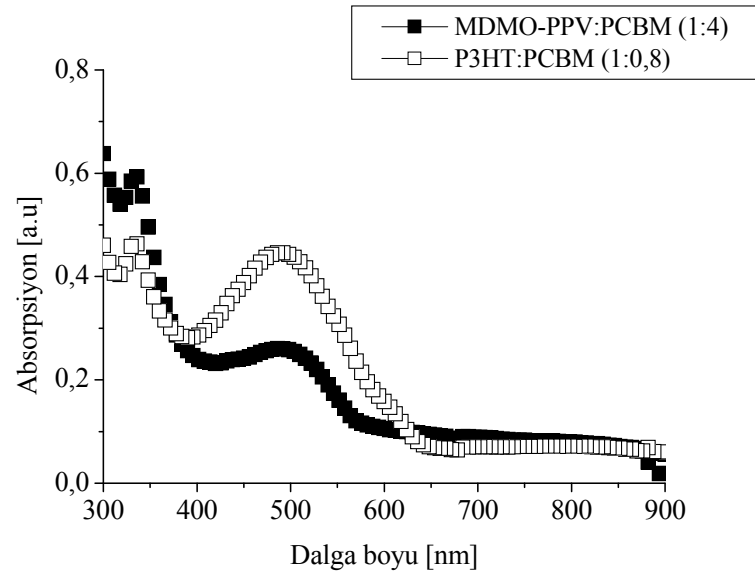
Örnek olarak seçilen taşıyıcı tabakaların PEDOT:PSS çözeltisiyle kaplanabilmesi için, malzemeye, çözeltinin yapışkanlığını arttırmak amacıyla Triton X-100 (Sigma-Aldrich) ve çözeltinin iletkenliğinin artırılması için DMSO (dimetilsülfoksit) (Sigma-Aldrich) eklenmiştir. Hacimsel olarak %95 PEDOT:PSS, %5 DMSO ve yaklaşık %0,1 Triton X-100'den oluşan karışım, 24 saat manyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırıldıktan sonra örneklere uygulanmaya hazır hale getirilir.

#### 4.3.2.2 Katman 3: P3HT:PCBM Karışımlarının Hazırlanması

Fotoaktif tabaka oluşturmada kullanılacak ilk seçenek P3HT:PCBM karışımıdır. Fotovoltaik etki oluşturma verimi bakımından, P3HT:PCBM karışımında en iyi sonuç veren ağırlık oranının 1:0,8 olduğu araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir (Bisquert ve ark., 2008; Zhang ve ark., 2008). Bu nedenle, 10 mg P3HT ile 8 mg PCBM'e 1 ml klorobenzen eklenerek ve 15 mg P3HT ile 12 mg PCBM'e 1 ml klorobenzen eklenerek elde edilen karışımlar oda sıcaklığında 24 saat boyunca içine manyetik karıştırıcı konularak maddeler tamamen çözülene kadar karıştırılmışlardır. Bu çözeltilerle yapılan ön denemelerde (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7), 15 mg P3HT ile 12 mg PCBM'e 1 ml klorobenzen eklenerek elde edilen karışımın daha iyi sonuç verdiği tespit edildiğinden, bundan sonraki çalışmalarda bu karışım kullanılmıştır.



Şekil 4.6 P3HT:PCBM karışımına ait absorpsiyon spektrumu  
(10 mg:8 mg: 1ml Klorobenzen)



Şekil 4.7 P3HT:PCBM karışımına ait absorpsiyon spektrumu  
(15 mg:12 mg: 1ml Klorobenzen)

#### 4.3.2.3 Katman 3: MDMO-PPV:PCBM Karışımlarının Hazırlanması

Fotoaktif tabaka oluşturmada kullanılacak ikinci seçenek MDMO-PPV:PCBM karışımıdır. Fotovoltaik etki oluşturma verimi bakımından, MDMO-PPV:PCBM karışımında en iyi sonuç veren ağırlık oranının 1:4 olduğu araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir (Martens ve ark., 2003; Offermans, Meskers ve Janssen, 2007). Bu nedenle, 1:4 ağırlık oranında MDMO-PPV:PCBM karışımı elde edebilmek için 4,5 mg MDMO-PPV ve 18 mg PCBM 1 ml klorobenzen eklenerek oluşturulmuştur. Elde edilen karışım 40°C'de, 24 saat boyunca içine manyetik karıştırıcı konularak maddeler tamamen çözülene kadar karıştırılmıştır.

#### 4.3.3 Polimer Anot PEDOT:PSS'nin ve Fotoaktif Tabakanın Örneklere Kaplanması

Çalışmada, taşıyıcı tabaka olarak kullanılan polipropilen şerit ve monofilamentlere daldırma (dipping) yöntemi daha önceden hazırlanmış olan PEDOT:PSS karışımı ile uzunlukça yarısı yaklaşık 150 nm kalınlıkta kaplanacak şekilde 5 saniye uygulanır. Bu işlemin süresi ve oluşan kalınlık deneysel olarak oluşturulmuştur. Daldırma işleminden sonra örnekler asılı biçimde kurumaya bırakılır (Şekil 4.8). Kuruduktan sonra, içerisindeki nemin de tamamen uzaklaşması için örnekler sıcak levha üzerinde 50°C'de 3 saat bekletilir.

PEDOT:PSS kaplama işleminin ardından tamamen kurumuş olan örnekler, daha önceden hazırlanmış olan polimer esaslı fotoaktif madde ile yine daldırma (dipping) yöntemi ile 5 saniye muamele edilerek kaplanır. 150 nm kaplanmış örnekler asılı biçimde kurumaya bırakılır.

İlk olarak, PET folyonun tüm yüzeyine PEDOT:PSS spin-coating yöntemi (1500 devir/dakika'da 80 saniye) ile kaplanır. PEDOT:PSS'yi kaplama işleminin ardından PET folyolar kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra folyodan PEDOT:PSS'nin bir kısmı temizlenir ve içerisindeki nemin tamamen uzaklaşması için yaklaşık 150 nm kaplanmış örnekler sıcak levha üzerinde 50°C'de 3 saat bekletilir. Ardından fotoaktif

madde çözültisi örnekler, spin-coating (1500 devir/dakika'da 80 saniye) yöntemi ile kaplanır ve örnekler kurumaya bırakılır.



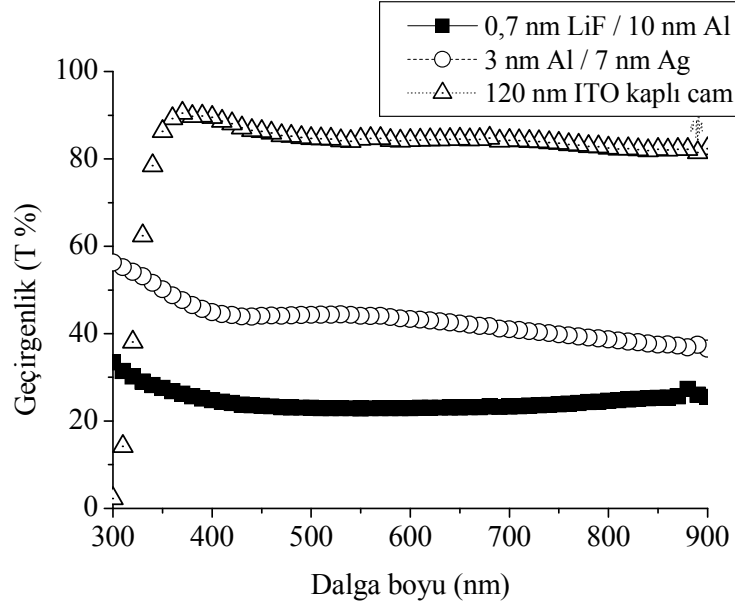
Şekil 4.8 Asılı biçimde kuruyan kimyasal madde kaplı şeritler

#### **4.3.4 Katman 4: Metal Üst Elektrot Kaplanması**

Kuruyan örnekler eldivenli kutu (glove box) içerisine alınır, kaplanacak yüzeyi, buharlaşacak metale bakacak biçimde konulan örnekler uygun bir maskeye yapıştırılarak sabitlenir ve metal buharlaştırma makinesi içerisine yerleştirilir. Toplam yaklaşık 10 nm kalınlığında metal elektrot vakumda buharlaştırma yöntemi ile örneklerin üzerine  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar basınçta saniyede 0,02-0,1 nm kalınlığına kaplama yapacak biçimde kaplanarak fotovoltaiik yapı tamamlanır. Oluşturulan elektrotlardan elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için yüzey üzerine kısmi olarak gümüş pat damlatılır.

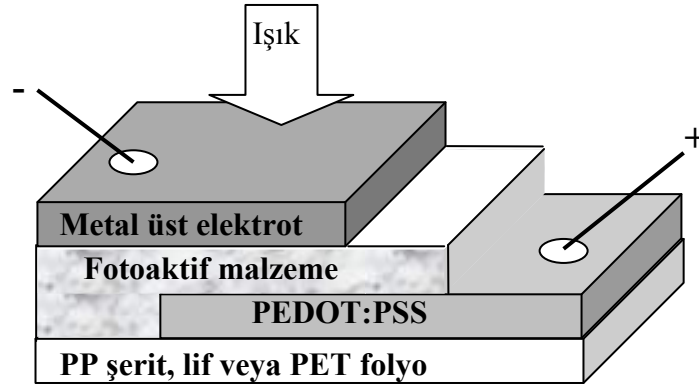
Yüze kaplanan metal tabaka olarak kullanılan LiF/Al, Al/Ag ve ITO malzemelerin ışık dalga boyuna göre geçirgenliğini ölçmek amacıyla yapılan çalışmada 120 nm kalınlığın kaplanan bir ITO'nun en yüksek geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.9). Ancak, ITO'nun kırılkan olması ve işlem şartlarının

tekstil amaçlı kullanıma uygun olmaması nedeniyle, daha az geçirgenliğe sahip ancak daha esnek yapılı olan LiF/Al ve Al/Ag katmanlı yapılar tercih edilmek zorunda kalmıştır. Ancak, Al/Ag'nin çalışmalarda sıklıkla kısa devre oluşturması nedeniyle daha az geçirgenliğe sahip olan LiF/Al katmanlı yapı ağırlıklı olarak kullanılmıştır.

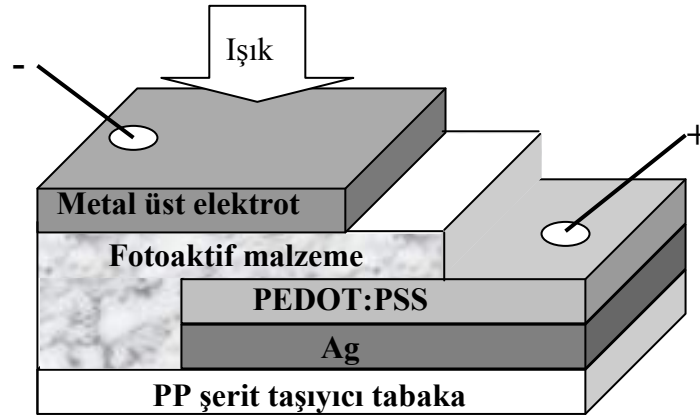


Şekil 4.9 LiF/Al, Al/Ag ve 120 nm ITO kaplı cama ait geçirgenlik spektrumu

Yukarıda açıklanan biçimde katmanların değişik yerleşimi ile iki farklı (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11) fotovoltaiik organik güneş pili oluşturmak mümkündür.

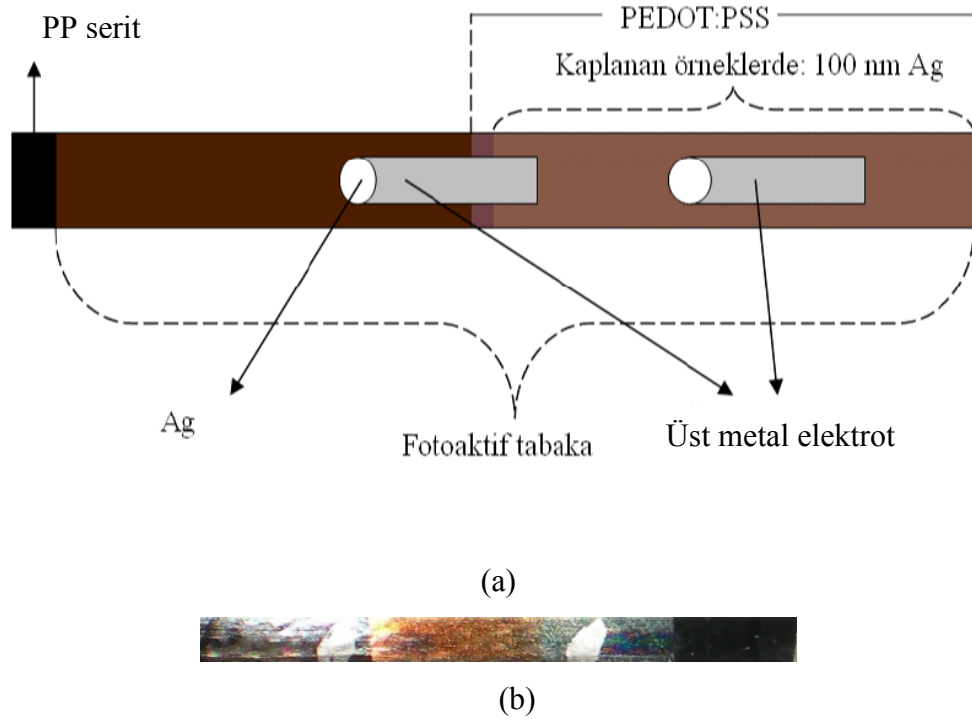


Şekil 4.10 Polipropilen taşıyıcı tabakalı polimer esaslı organik güneş pili

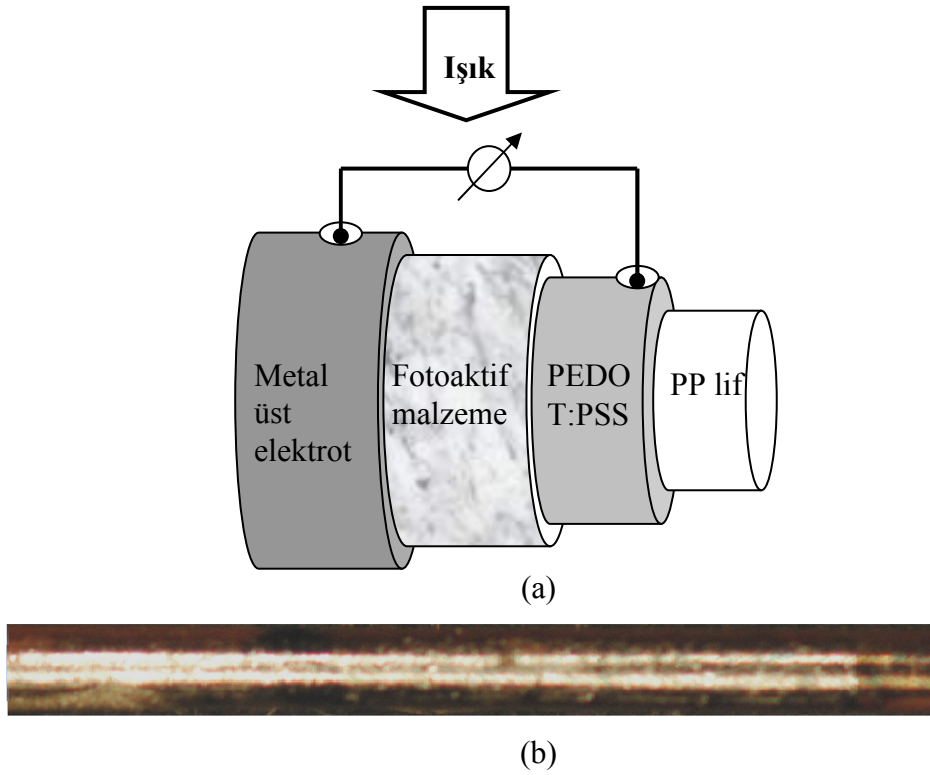


Şekil 4.11 100 nm Ag kaplı polipropilen şerit taşıyıcı tabakalı polimer esaslı organik güneş pili

Bu yapıların her ikisi de deneysel olarak çalışılmış ve enerji dönüşüm verimi ölçümleri yapılmıştır. Her iki yapıdaki güneş pillerinin üstten görünüşleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Yukarıda açıklanan işlemlerle oluşturulan güneş pili, PP monofilamente de Şekil 4.13’deki gibi uygulanmıştır.



Şekil 4.12 PP şerit taşıyıcı tabakalı organik güneş pilinin üstten şematik görünümü (a) ve fotoğrafı (b)



Şekil 4.13 PP monofilament taşıyıcı tabakalı organik güneş pilinin şematik gösterimi (a) ve fotoğrafı (b)



Bu biçimde oluşturulan ve birbirleri ile karşılaştırması mümkün olan üç farklı güneş pili laboratuvar ortamında fotovoltaiik etki oluşturma denemelerine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Bölüm 5’de sunulmuştur.

## **BÖLÜM BEŞ**

### **DENEYSEL SONUÇLAR**

#### **5.1 Fotoaktif Tabakası P3HT:PCBM Olan Güneş Pilleri İle Elde Edilen Sonuçlar**

Güneşin maksimum foton akışı, ideal olarak, 650-700 nm dalgaboyu aralığındadır. Bu amaçla son zamanlarda, yarı kristal yapıdaki P3HT, 650 nm'ye kadar emilim göstermesi ve yüksek boşluk mobilitesi ( $>0,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) nedeniyle verici malzeme olarak PCBM ile birlikte güneş pillerinde kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda (Brabec ve ark., 2003; Vanlaeke ve ark., 2006), pek çok faktörün (alıcı ve verici arasındaki arayüzeyin büyüklüğü, optimum karışım oranının belirlenmesi, çözücünün tipi, P3HT'nin kristalizasyonu gibi) polimer esaslı organik güneş pillerinin verimini etkilediği gösterilmiştir. P3HT:PCBM esaslı güneş pilleri ile laboratuvar koşullarından elde edilen verim %5'in üzerine (ısıtma işlem sonrası) çıkmasına rağmen normal üretim şartlarında elde edilen verim yaklaşık %2,5 kadardır.

ITO kaplı cam üzerinde oluşturulan güneş pillerinde, fotoaktif polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa maruz bırakıldığında, politiofen esaslı polimer malzemenin kristalize olması nedeniyle boşluk iletkenliği çarpıcı biçimde artmaktadır (Zhao, Yuan, Roche ve Leclerc, 1995; Dittmer, Marsaglia ve Friend, 2000; Nakazono, Kawai ve Yoshino, 1994). Bu nedenle, akım-voltaj özelliklerinde de iyileşme gözlenmektedir. Güneş pili imalatı sırasında fotoaktif polimer, P3HT (erime sıcaklığı  $230^\circ\text{C}$  (Hugger, Thomann, Heinzl ve Thurn-Albrecht, 2004))  $80^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır (Ma, Yang, Gong, Lee ve Heeger, 2005). Ancak, bu çalışmada taşıyıcı tabaka olarak kullanılan PET folyo, PP şerit ve monofilamentler yüksek sıcaklıklara ( $80^\circ\text{C}$  ve üzeri) dayanıklı değildir. Bu nedenle, tüm örneklerin aynı koşullarda işlem görmesini sağlamak bakımından, tüm örneklere fotovolatik etki oluşturan yapı kazandırıldıktan sonra ayrıca bir ısıtma işlemi uygulanmamıştır.

Öte yandan, cam taşıyıcılı güneş pillerinde boşluk toplayıcı alt elektrot olarak ITO kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilmesi hedeflenen güneş pillerinde, PET ve PP gibi esnek taşıyıcı tabakalar üzerine ITO'nun uygulanmasındaki zorluklar ve kırılmalık gibi dezavantajlarından dolayı ITO kullanılmamıştır.

Ayrıca, cam taşıyıcılı güneş pillerinden farklı olarak, genelde tekstil lifleri ve malzemeleri, özelde de bu çalışmada kullanılan PP şerit, monofilament ve PET folyolar tam şeffaf değildirler. Bu nedenle, gerçek bir tekstil uygulaması olması açısından, çalışmada kullanılan ve şeffaf olmayan tekstil şeritleri için de ışığın geliş yönü taşıyıcı tabaka yönünden değil, üst elektrot yönünden planlanmıştır. Ayrıca ITO'nun yerini alması için, esnek güneş pili yapılarında, ince gümüş metal tabakanın (100 nm) alt elektrot olarak kullanılması denenmiştir. Üst elektrot için ise gelen ışığın fotoaktif tabakaya ulaşmasını sağlaması açısından yarı-şeffaf metal (Al, LiF/Al ve Al/Ag) elektrotlar kullanılmıştır.

### ***5.1.1 Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al Pili Sistemine Ait Sonuçlar***

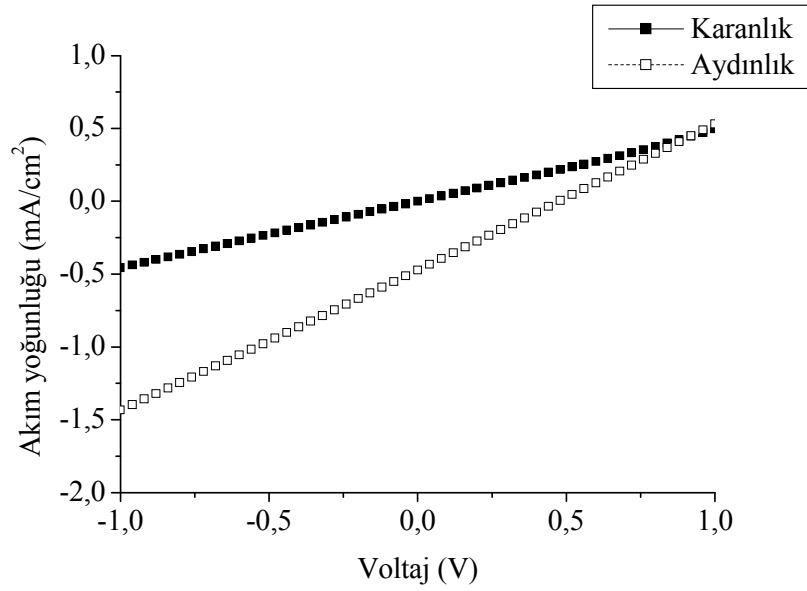
Polimer esaslı organik güneş pillerinde kullanılan PEDOT:PSS tabakası, boşluk toplayıcı anot olarak görev yapmaktadır. Bu bölümde, PEDOT:PSS tipinin, P3HT:PCBM esaslı organik güneş pilleri üzerine etkisi incelenmiştir. PP şerit taşıyıcı tabaka üzerinde yapılan bu çalışmada iletken PEDOT:PSS polimer tabakasının esnek ve pürüzlü polimerik bir taşıyıcı tabaka üzerine uygulanabilirliğini araştırmak ve söz konusu organik güneş piline en uygun malzemeyi belirlemek amacıyla üç farklı nitelikli PEDOT:PSS alt elektrot olarak kullanılmıştır:

- Düşük iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PEKA)
- Düşük iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PEKA:CNT-PANI) ve
- Yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH 500).

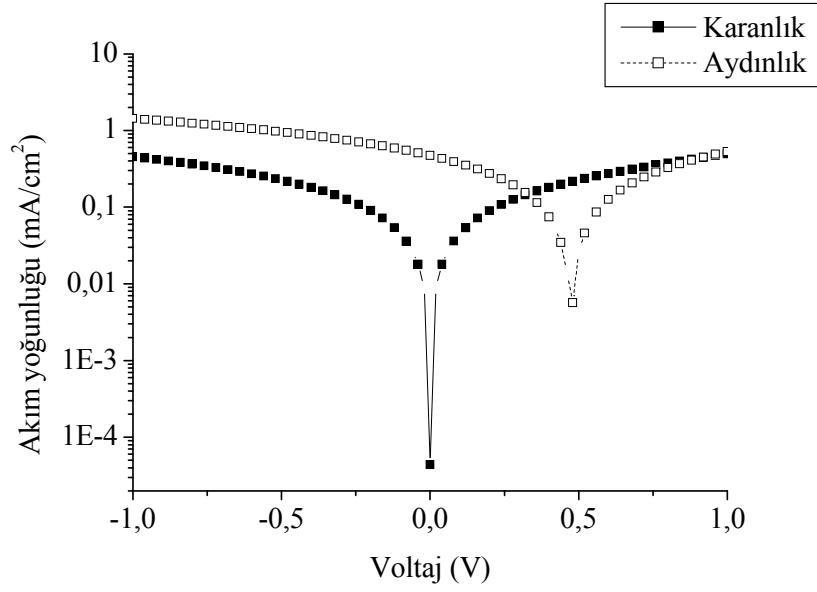
### 5.1.1.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri

Şekil 5.1, PP şerit/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/Al güneş pili yapısına ait doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) ölçekte akım-voltaj (I-V) özelliklerini göstermektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,47 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 480 mV, FF: 0,248 ,  $\eta$  :%0,056 şeklinde bulunmuştur.



(a)

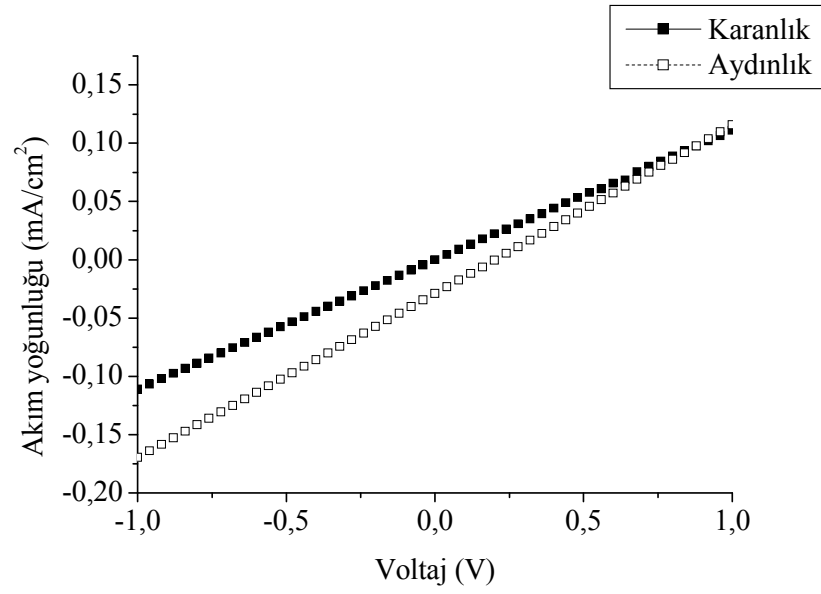


(b)

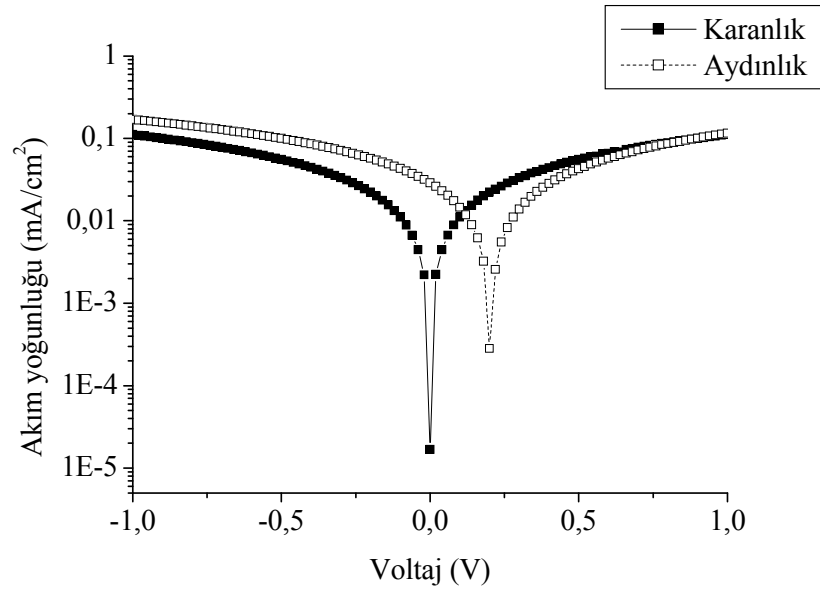
Şekil 5.1 PP şerit /Baytron PEKA/P3HT:PCBM/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

Şekil 5.2’de PP şerit/Baytron PEKA:CNT-PANI/P3HT:PCBM/Al tekstil esaslı organik güneş piline ait verilen doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) I-V grafikleri görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,028 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 200 mV, FF: 0,253 ,  $\eta$ : %0,00146 şeklinde bulunmuştur.



(a)



(b)

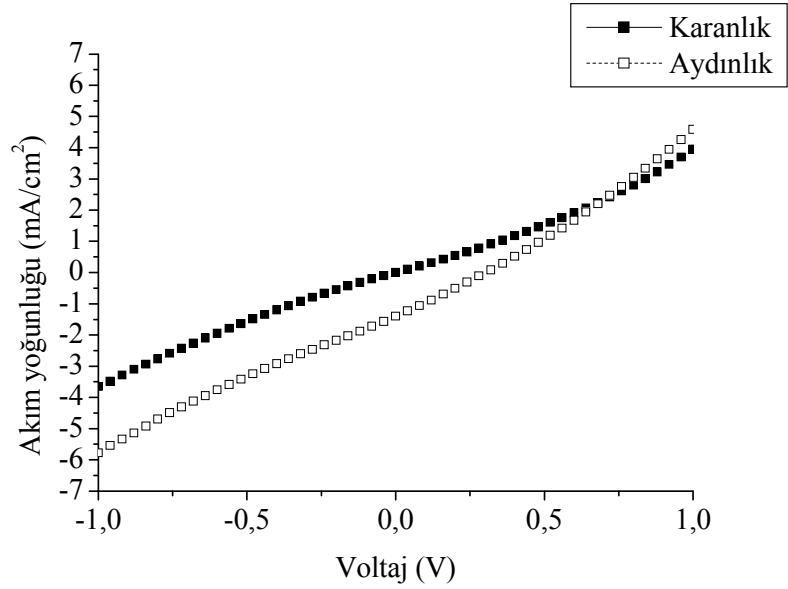
Şekil 5.2 PP şerit/Baytron PEKA:CNT-PANI/P3HT:PCBM/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

Şekil 5.2 ve elde edilen değerler göz önünde tutulursa, sadece Baytron PEKA uygulanmış güneş pilleri ile kıyaslandığında karbon nanotüp-polianilin (CNT:PANI)

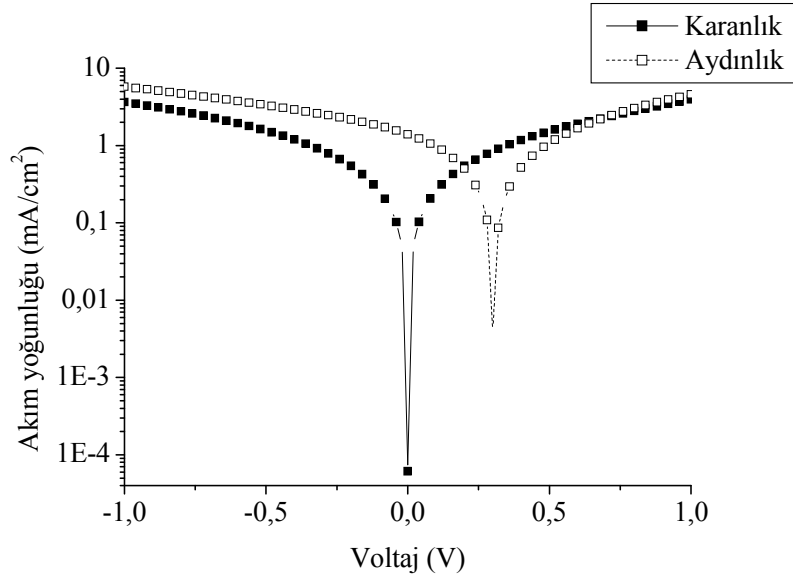
karışımı 1:50 oranında eklenen PEDOT:PSS malzemesinin PP şerite uygulanması ile oluşturulan güneş pillerinde tüm akım ve voltaj değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir.

PP şerit/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al yapısındaki tekstil esaslı organik güneş piline ait doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak gösterilmiş I-V grafikleri Şekil 5.3'de verilmiştir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,40 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 300 mV, FF: 0,263 ,  $\eta$  :%0,110 şeklinde bulunmuştur.



(a)

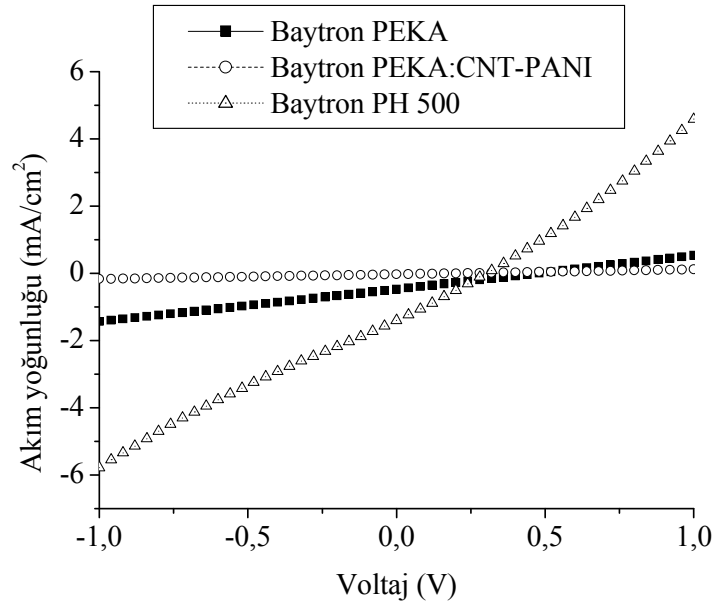


(b)

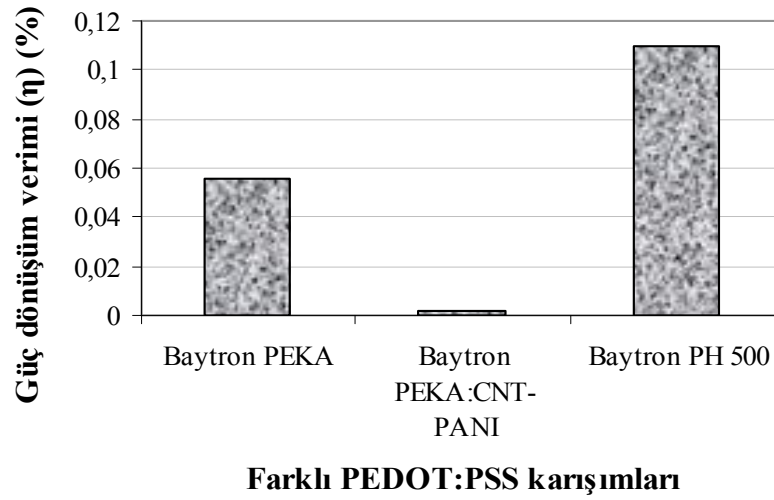
Şekil 5.3 PP şerit/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

İletkenliği yüksek PEDOT:PSS (Baytron PH 500) kullanılan örnekler, Baytron PEKA kullanılan örneklere göre elektriksel özellikleri iyileştirerek daha yüksek akım yoğunluğu ve dolun faktörü değerleri vermiştir, ancak yüksek iletkenliğe sahip alt elektrot çok ince (nm olarak) olan fotoaktif tabakada bulacağı herhangi bir boşluktan geçip üst elektrota temas edebileceğinden organik güneş pillerinde kısa devre olma olasılığını arttırmaktadır.





Şekil 5.4 Üretilen güneş pillerinin akım-voltaj özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.5 Üretilen güneş pillerinin güç dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.1 Üretilen üç farklı PEDOT:PSS tipindeki pillerin fotovoltaik performanslarının karşılaştırılması

<b>PEDOT:PSS karışımı tipi</b>	<b>I<sub>sc</sub> (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>V<sub>oc</sub> (mV)</b>	<b>FF (%)</b>	<b>η (%)</b>
Baytron PEKA	0,47	480	24,8	0,056
Baytron PEKA:CNT-PANI	0,028	200	25,3	0,002
Baytron PH 500	1,40	300	26,3	0,110

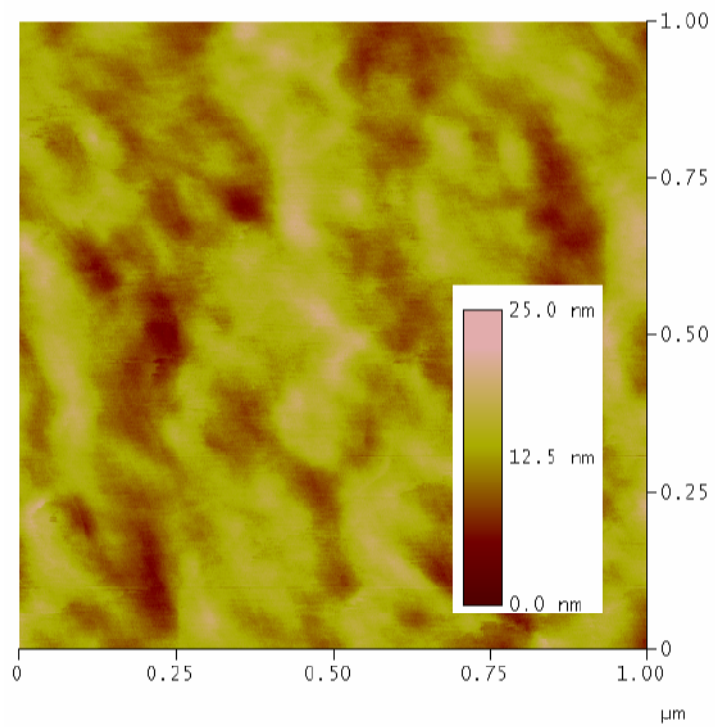
Tablo 5.1, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de, üretilen polimer esaslı üç farklı esnek organik güneş pilinin fotovoltaik performansları karşılaştırılmaktadır. Tablo 5.1, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de görüldüğü üzere, Baytron PH 500 kullanılan pil en yüksek kısa devre akımına ve güç dönüşüm verimine sahiptir. Bu nedenle ileriki çalışmalarda, yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS kullanımı tercih edilecektir.

#### 5.1.1.2 Morfolojik Gözlemler

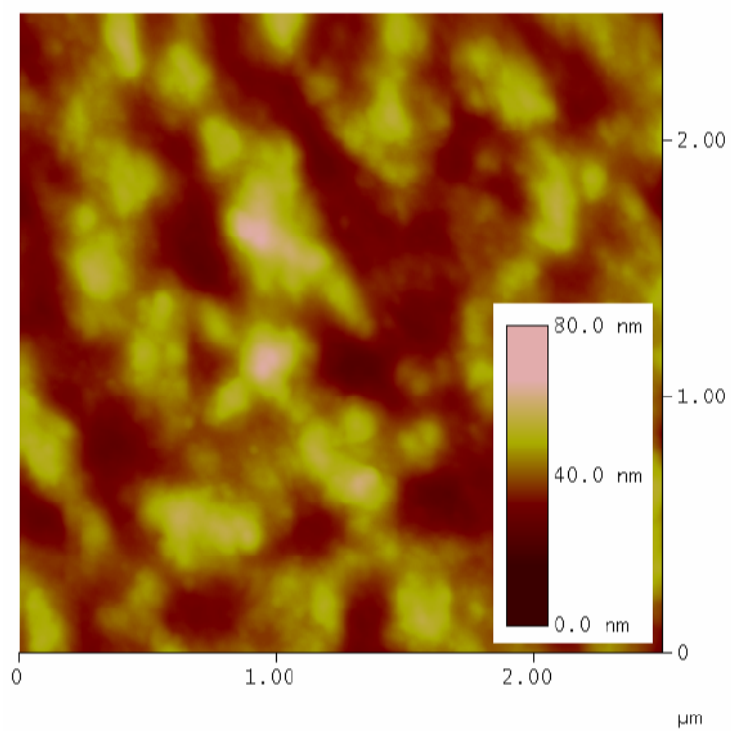
Üretilen üç farklı organik güneş pilinin atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile tapping modda alınan yüzey görüntüleri Şekil 5.6’da sırasıyla (a) Baytron PEKA, (b) Baytron PEKA:CNT-PANI ve (c) Baytron PH 500 için verilmektedir. Görüntüler, üst elektrot buharlaştırıldıktan sonra, fotoaktif tabaka üzerinden alınmıştır.

Şekil 5.6 (a) ve Şekil 5.6 (b)’nin görüntüleri karşılaştırıldığında CNT:PANI karışımı eklenen güneş pilinin, sadece düşük iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PEKA) kullanılan güneş piline göre, içindeki PANI kaplı karbon nanotüplerin homojen dağılmaması nedeniyle, daha pürüzlü bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir.

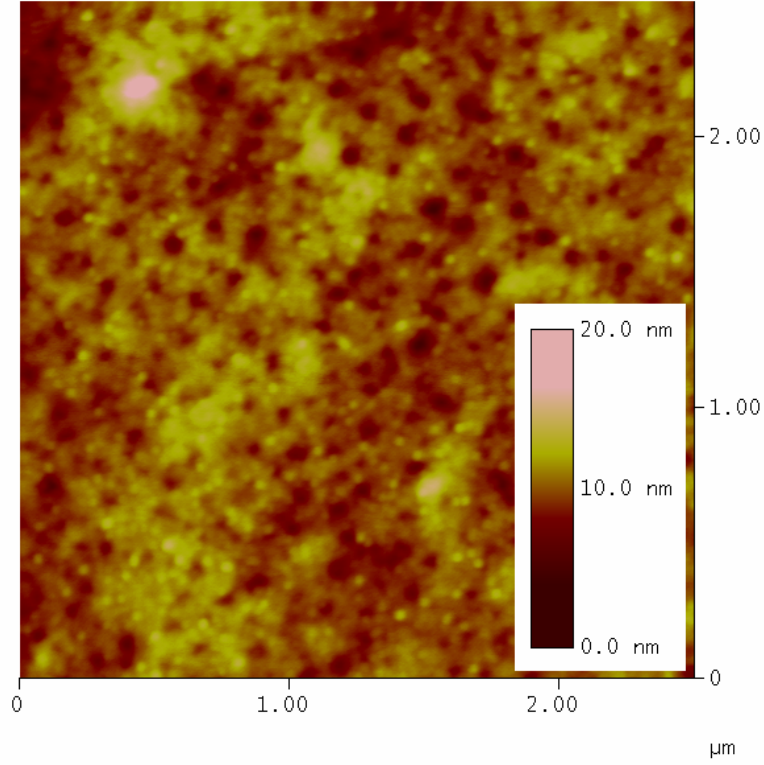
Şekil 5.6 (a), Şekil 5.6 (b) ve Şekil 5.6 (c)’de verilen güneş pillerinin yüzey pürüzlülüğü sırasıyla yaklaşık olarak 50 nm, 100 nm ve 30 nm’dir. CNT-PANI karışımı eklenen güneş pilinin yüzey pürüzlülüğünün arttığı açık olarak buradan da anlaşılmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.6 PP şerit üzerinde Baytron PEKA (a), Baytron PEKA:CNT-PANI (b) ve Baytron PH 500 (c) tabakası kullanılan polimer esaslı organik güneş pillerine ait AFM görüntüleri

### 5.1.1.3 Farklı PEDOT:PSS Tiplerinin Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı PEDOT:PSS malzemesinin kullanıldığı piller içerisinde en yüksek verim değerini verecek yapının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapısı nedeniyle kısa devre meydana getirme olasılığı yüksek olan CNT:PANI karışımı öncelikle düşük iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PEKA) ile karıştırılmıştır. İçine CNT:PANI karışımı, eklenen PEDOT:PSS (Baytron PEKA)'nin elektriksel özellikleri kötüleşmiştir ve bu malzemenin kullanıldığı denemelerdeki kısa devre olan örnek sayısı da daha yüksek çıkmıştır. Daldırma yönteminin iyileştirilmesi ile kısa devre olasılığı azaltılarak akım-voltaj değerleri açısından en iyi sonuç, yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH 500) kullanılan örneklerden alınmıştır. Metaller çok ince tabakalar halinde kaplandıklarında iletkenlikleri bir miktar düşse

de gelen ışınları geçirecek biçimde yarı-şeffaf olabilmektedirler. Bölüm 5.1.1’de verilen denemelerde, LiF/Al tabakasının kısa devre meydana getirmesinden kaçınmak amacıyla tek başına alüminyum metali ince bir tabaka halinde kaplanmış ve yarı-şeffaf bir üst elektrot elde edilebilmiştir. Ancak LiF kullanılmadığı için güneş pilleri yeterince yüksek elektriksel özellikler göstermemiştir.

### ***5.1.2 Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/AL Pil Sistemine Ait Sonuçlar***

Bu bölümde, farklı taşıyıcı tabakalar ve yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH 500) malzemesi kullanılarak üretilen pillere ait elektriksel özellikler verilmiştir. Fotoaktif tabaka ile Al elektrot arasına çok ince (0,7 nm) LiF gibi bir arayüz tabakası buharlaştırıldığında, katotta elektron enjeksiyonu sağlayan arayüz bariyeri azaldığından (Shaheen ve ark., 2001; Brabec ve ark., 2001b) fotoaktif tabaka olarak P3HT:PCBM malzemesi ve üst metal elektrot olarak da LiF/Al metal tabakası kullanılmıştır. Taşıyıcı tabaka olarak aşağıdaki dört farklı malzeme kullanılmıştır:

- PP şerit,
- PP monofilament,
- PET folyo,
- ITO kaplı cam.

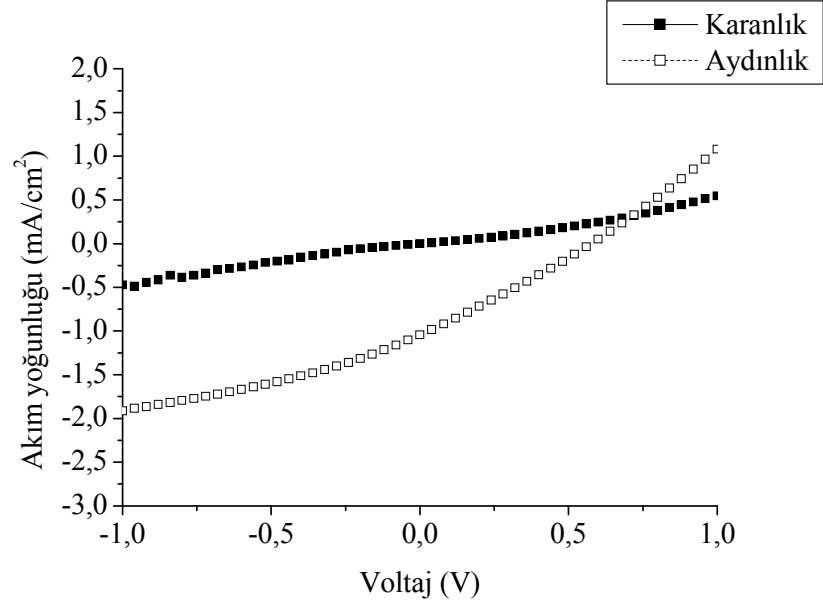
Ayrıca PP şerit ile PEDOT:PSS tabakası arasına 100 nm Ag tabakası buharlaştırılarak elde edilen taşıyıcı tabaka ile de çalışma yapılmıştır.

#### ***5.1.2.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri***

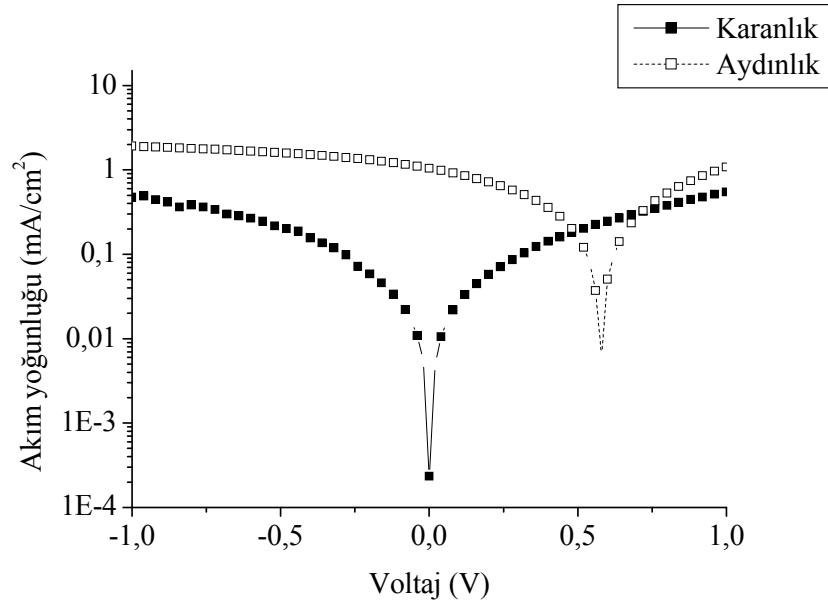
Üretilen örnek güneş pillerinin fotovoltajik özellikleri karanlıkta ve beyaz ışık aydınlatması (AM1.5, 100 mW/cm<sup>2</sup>) altında akım-voltaj (I-V) özellikleri ölçülerek belirlenmiştir.

PP taşıyıcı şerit/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pili yapısına ait I-V grafikleri Şekil 5.7’de verilmektedir.

Örneklerin aydınlatma altında göstermiş oldukları fotovoltaiik performans değerleri  $I_{sc}$ : 1,04 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 580 mV, FF: 0,272 ,  $\eta$  :%0,16 şeklindedir.



(a)

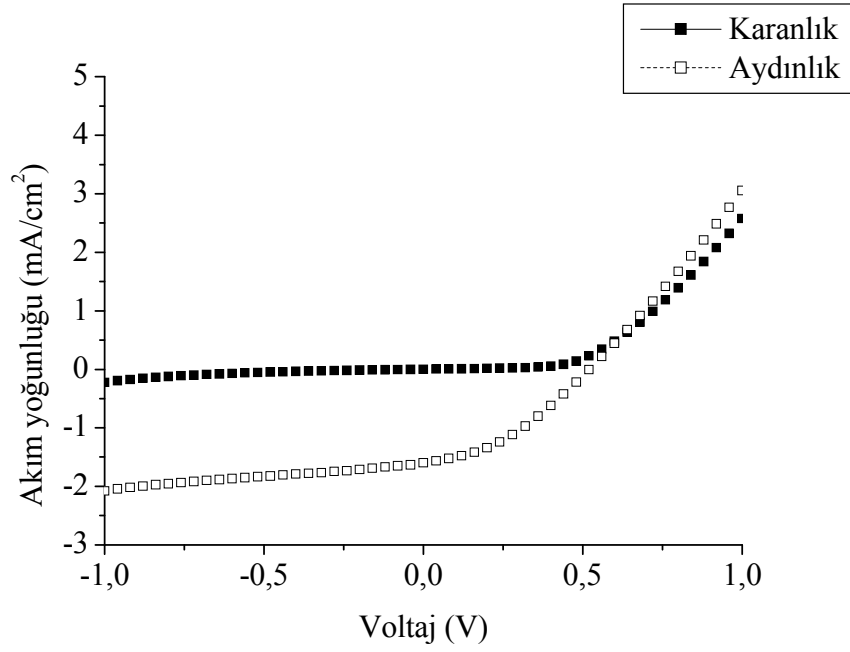


(b)

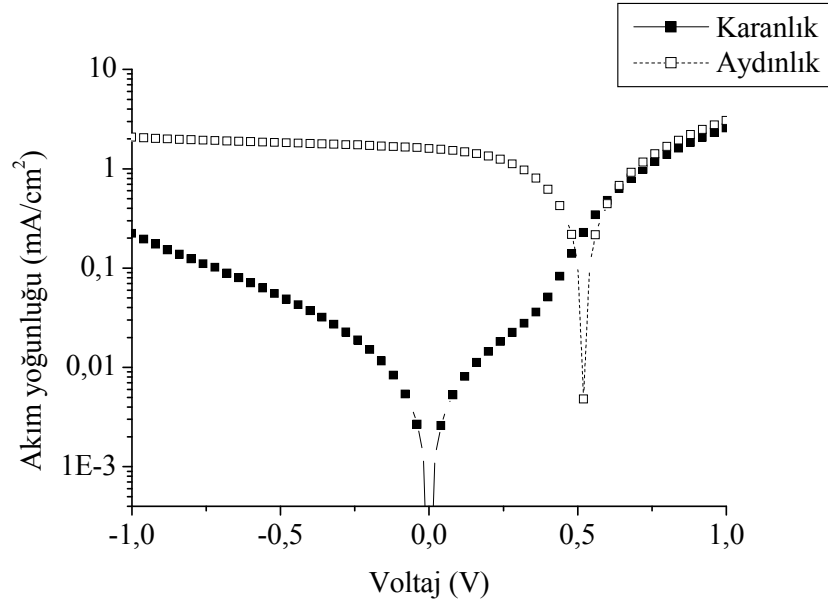
Şekil 5.7 PP şerit/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

PP şerit/Ag/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al sistemine sahip güneş pilinde üst elektrot LiF/Al tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.8’de gösterilmektedir.

Örneklerin aydınlatma altında göstermiş oldukların fotovoltaiik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,60 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 520 mV, FF: 0,396 ,  $\eta$  :%0,33 şeklindedir.



(a)



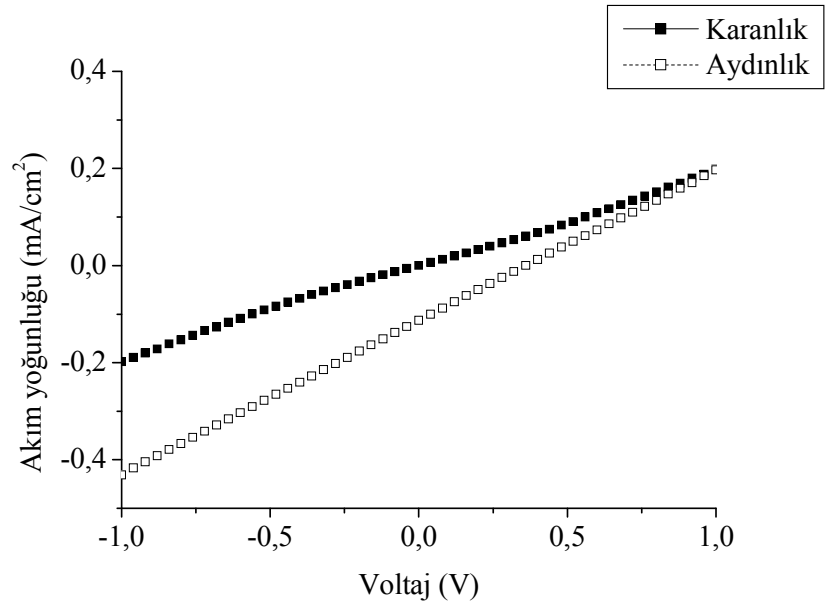
(b)

Şekil 5.8 PP şerit/Ag/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

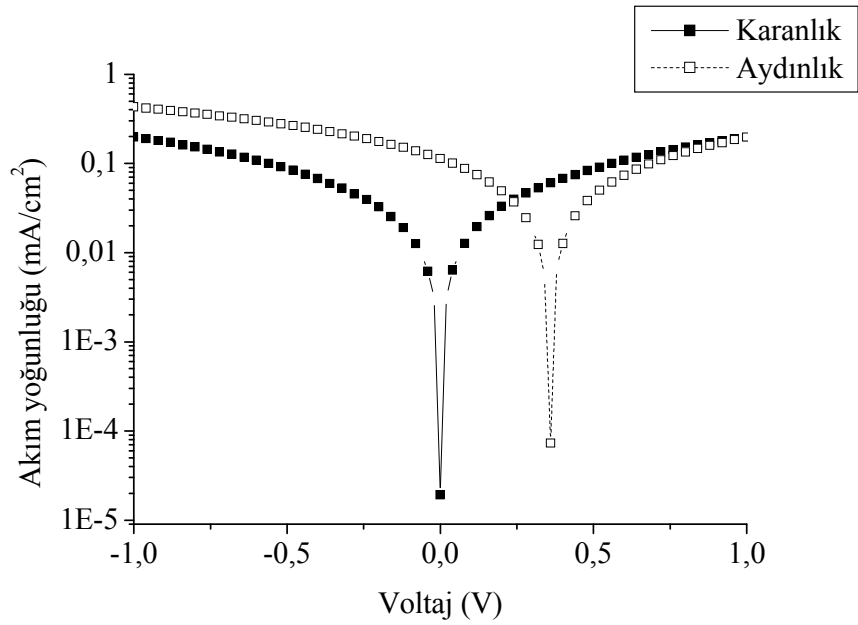
Organik fotovoltaik lif yapısını tekstil liflerine uyarlamak için kesiti yuvarlak olan PP monofilamentler de daldırma yöntemi ile fotovoltaik etki gösterecek biçimde hazırlanmıştır. Taşıyıcı tabaka PP lif/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al pil sistemine ait doğrusal ve yarı-logaritmik I-V grafikleri Şekil 5.9'da verilmiştir.

Lif biçimindeki güneş pillerinin aydınlatma altında göstermiş oldukların fotovoltaik performans değerleri  $I_{sc}$ : 0,11 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 360 mV, FF: 0,245,  $\eta$ : %0,01 şeklindedir.





(a)

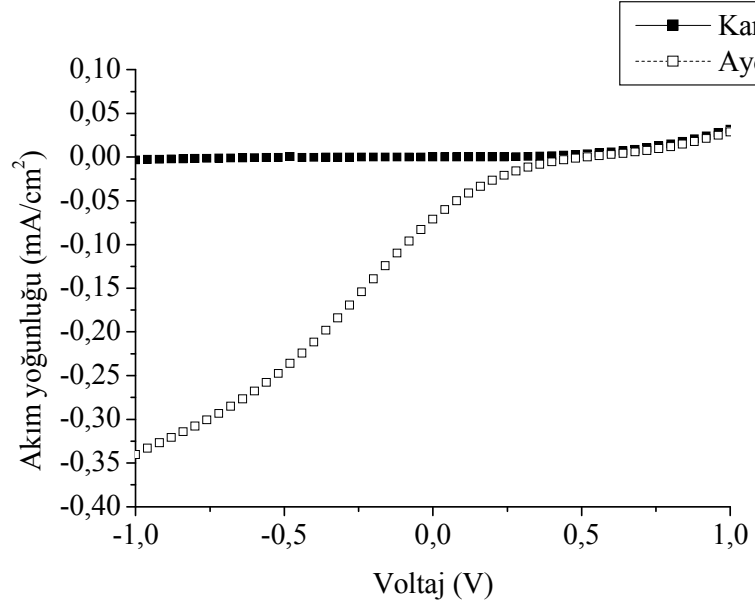


(b)

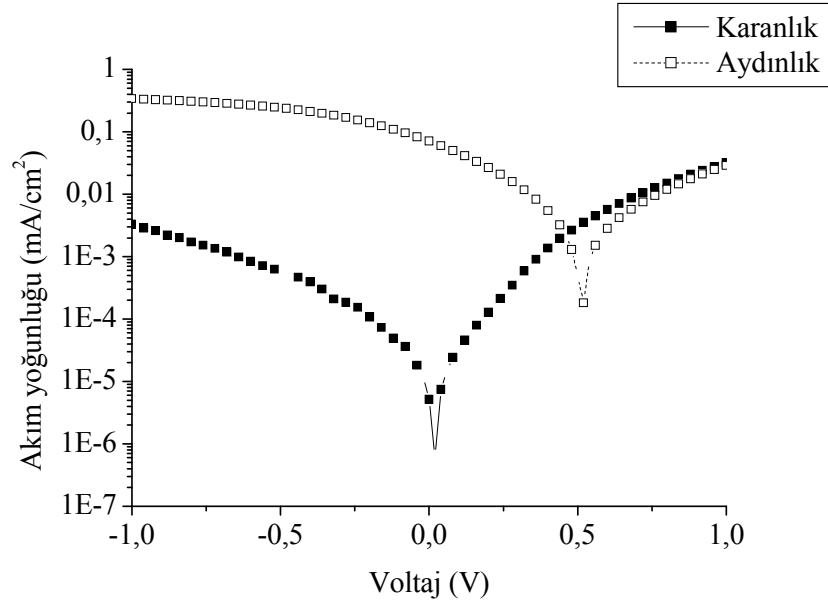
Şekil 5.9 Yuvarlak kesitli PP monofilament/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

PET folyo/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al sisteminde üst elektrot LiF/Al tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.10'da gösterilmektedir.

Güneş pillerinin aydınlatma altında göstermiş oldukları fotovoltajik performans değerleri  $I_{sc}$ : 1,07 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 520 mV, FF:0,146 ,  $\eta$ : %0,01 şeklindedir.



(a)

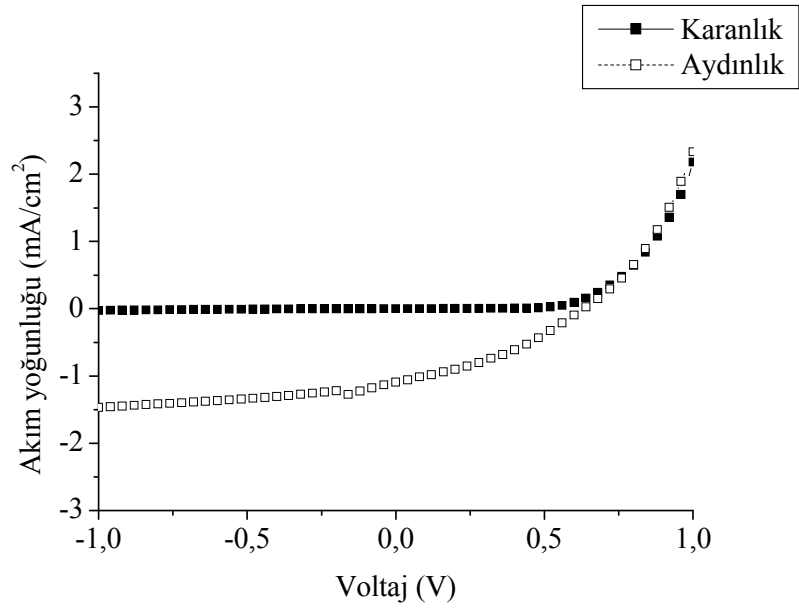


(b)

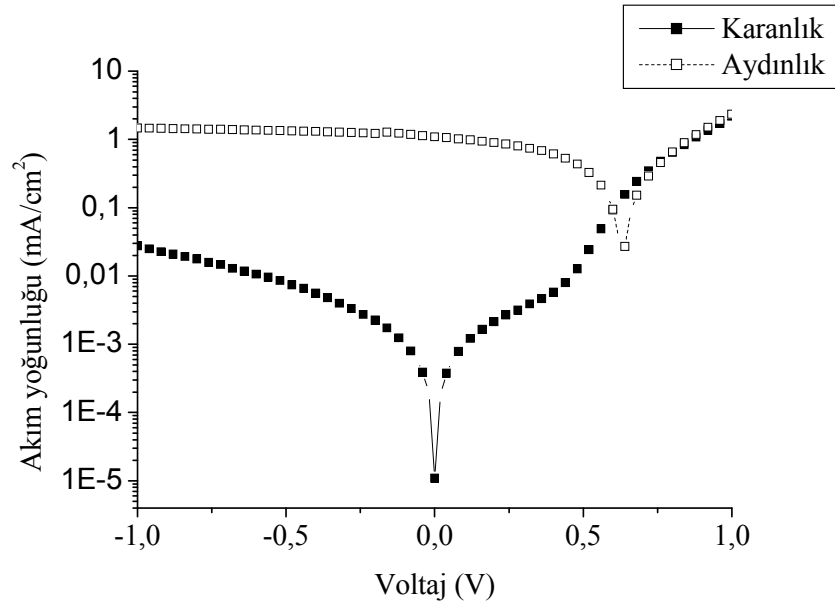
Şekil 5.10 PET folyo/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

ITO kaplı cam/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al sisteminde üst elektrot LiF/Al tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.11'de gösterilmektedir.

Güneş pillerinin aydınlatma altında göstermiş oldukların fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,12 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 620 mV, FF:0,361 ,  $\eta$  (%): 0,25 şeklindedir.



(a)

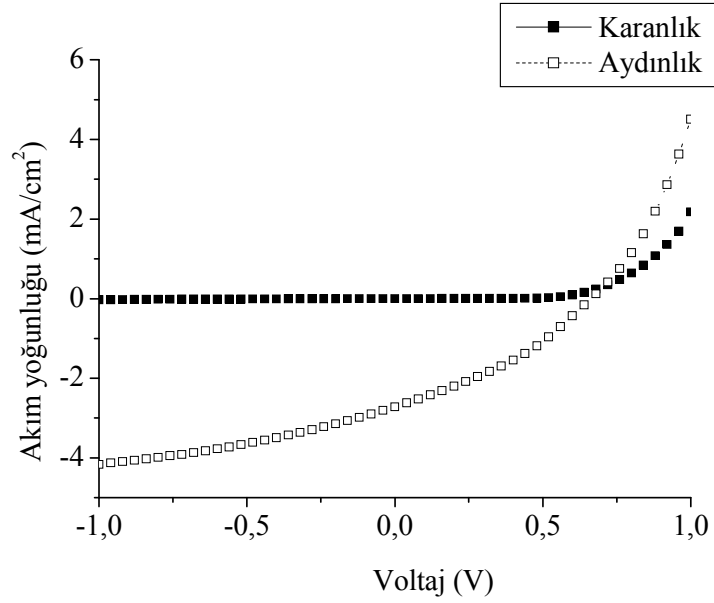


(b)

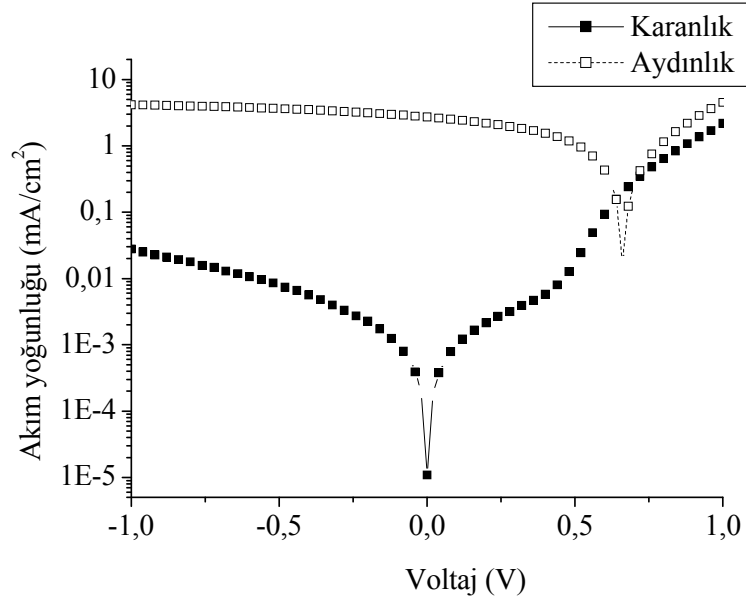
Şekil 5.11 ITO kaplı cam/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

ITO kaplı cam/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al sisteminde ITO kaplı cam yönünden aydınlatılarak elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.12’de gösterilmektedir.

Güneş pillerinin aydınlatma altında göstermiş oldukları fotovoltaj performans değerleri,  $I_{sc}$ : 2,71 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 660 mV, FF: 0,344,  $\eta$  (%): 0,62 şeklindedir.



(a)

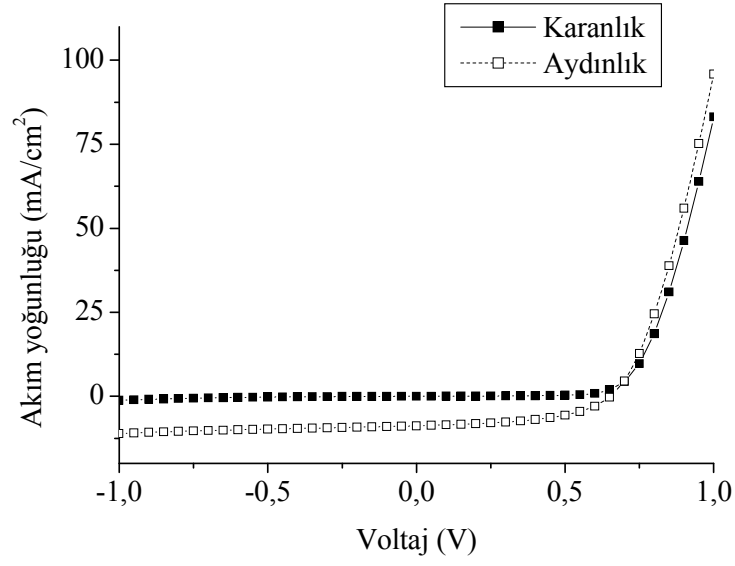


(b)

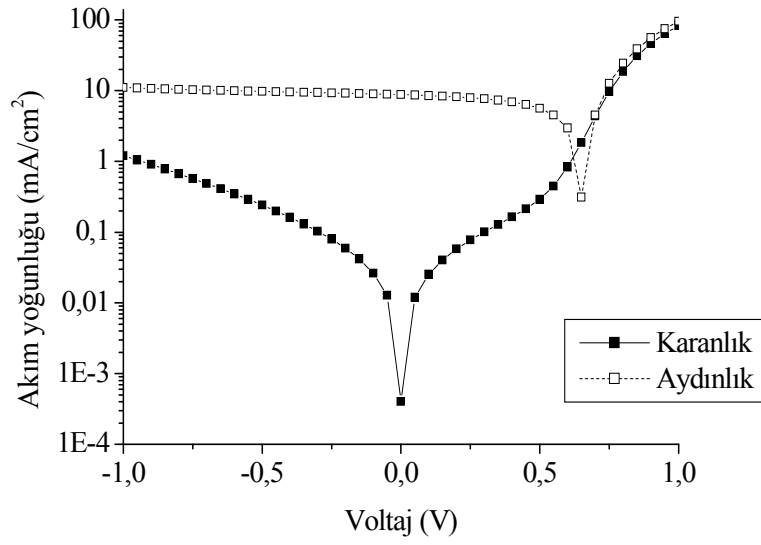
Şekil 5.12 ITO kaplı cam/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

ITO kaplı cam/Baytron PH 500/ P3HT:PCBM/LiF/Al sisteminde (100 nm Al kaplı) ITO kaplı cam yönünden ölçülerek elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.13'de gösterilmektedir.

Güneş pillerinin aydınlatma altında göstermiş oldukların fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 8,75 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 650 mV, FF: 0,502,  $\eta$  (%): 2.86 şeklindedir.



(a)



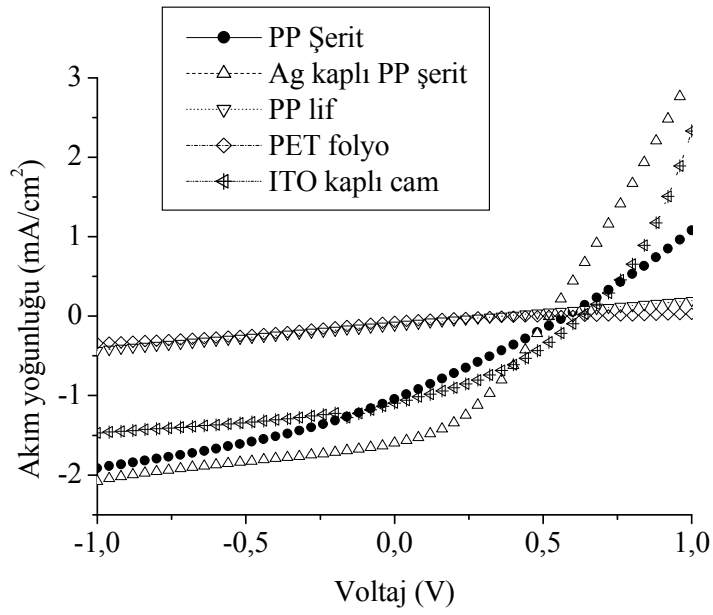
(b)

Şekil 5.13 ITO kaplı cam/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al (100nm Al) piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafikleri

Şekil 5.12’de uyarlanan güneş pilinin cam yönünden aydınlatılması sonucu elde edilen I-V grafikleri görülmektedir. Şekil 5.11 ile fotovoltajik değerler açısından karşılaştırıldığında 10 nm LiF/Al tabakası ile 120 nm ITO kaplı cam arasındaki ışık

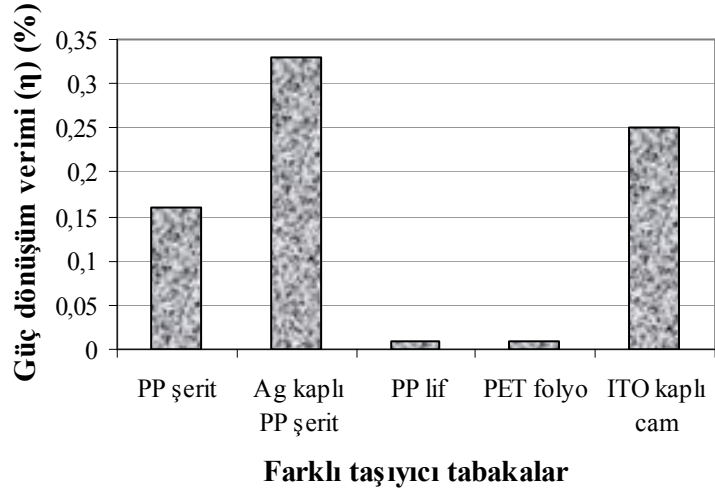
geçirgenliği farklılığı nedeniyle, pil ITO kaplı cam yönünden aydınlatıldığında daha yüksek sonuçlar vermektedir.

Şekil 5.13 incelendiğinde, ITO kaplı cam üzerinde geliştirilen ve 100 nm üst elektrot kaplı bilinen güneş pilinin verimi, uyarlanan ve tekstil esaslı güneş pillerine göre, ITO'nun geçirgenlik özelliği ve üst elektrotun kalınlığının etkisiyle çok daha yüksek çıkmıştır. Ancak, kalın üst elektrot, üstten gelen ışığı geçirmemektedir.



Şekil 5.14 Elde edilen güneş pillerinin akım-voltaj grafiklerinin karşılaştırılması





Şekil 5.15 Elde edilen güneş pillerinin güç dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

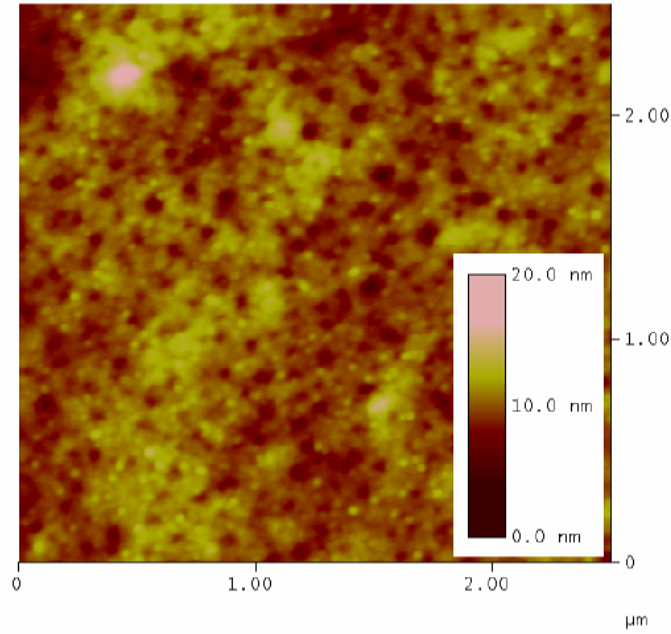
Tablo 5.2 Üretilen pillerin aynı taraftan aydınlatılarak elde edilen fotovoltaiik performanslarının karşılaştırılması

Taşıyıcı tabaka tipi	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)
PP şerit	1,04	580	27,2	0,16
Ag kaplı PP şerit	1,60	520	39,6	0,33
PP lif	0,11	360	24,5	0,01
PET folyo	1,07	520	14,6	0,01
ITO kaplı cam	1,12	620	36,1	0,25

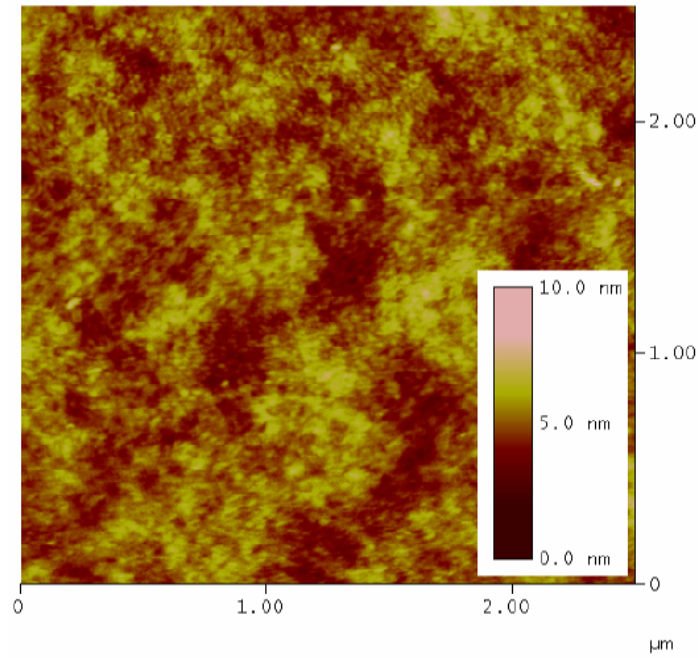
Tablo 5.2 ve Şekil 5.14 ve Şekil 5.15, üretilen polimer esaslı farklı organik güneş pillerinin fotovoltaiik performanslarının karşılaştırmasını vermektedir. Şekil 5.14 ve Şekil 5.15, ve Tablo 5.2'den de görüleceği gibi en yüksek güç dönüşüm verimi ve akım yoğunluğu 100 nm Ag kaplı PP şerit kullanılan fotovoltaiik pillerden elde edilmiştir. Ag kaplanmamış olan PP şerit ile PET folyonun birbirine yakın sonuç vermesi Ag metal kaplamanın sağladığı yararı açıklamaktadır. Öte yandan, PP lifin yuvarlak kesitinin ve fotoaktif tabaka katman kalınlığının güç dönüşüm verimini oldukça düşürdüğü görülmektedir.

### 5.1.2.2 Morfolojik Gözlemler

Atomik güç mikroskopunda (AFM) tapping moda alınan resimler Şekil 5.16 (a) ve Şekil 5.16 (b)'de sırasıyla şerit üzerinde ve cam üzerinde olmak üzere verilmektedir. Şeritin yüzey pürüzlülüğünün (ortalama 500 nm) etkisiyle şerit üzerindeki güneş pili yüzeylerinin (60 nm) cam üzerindeki pillere göre daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Bu gözlem, Tablo 5.2'deki sonuçlar (ITO kaplı cam %0,25 verim verirken PP şerit %0,16 verim vermektedir) ele alındığında güneş pillerinin artan yüzey pürüzlülüğünün fotovoltaik performansı olumsuz yönde etkilediği görülecektir.



(a)

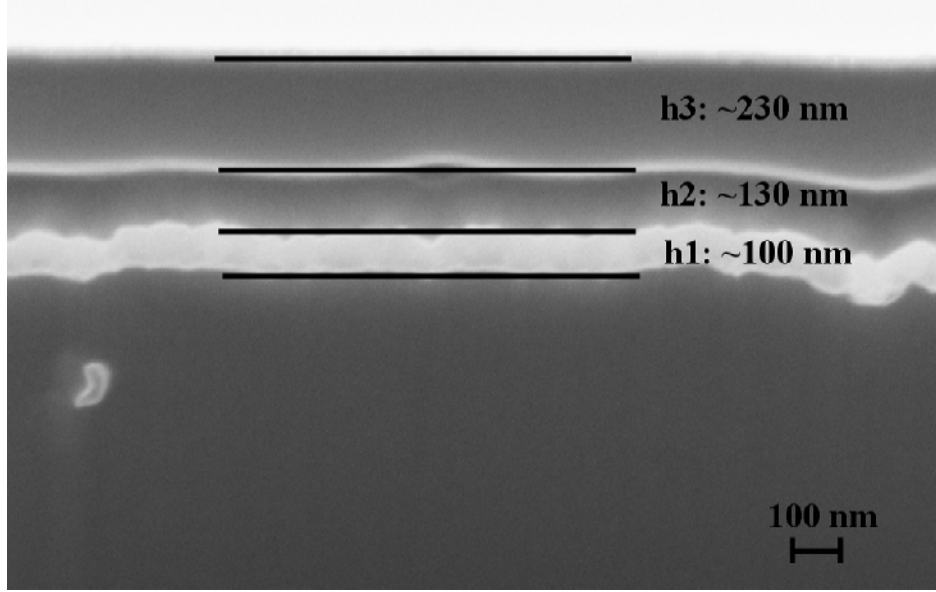


(b)

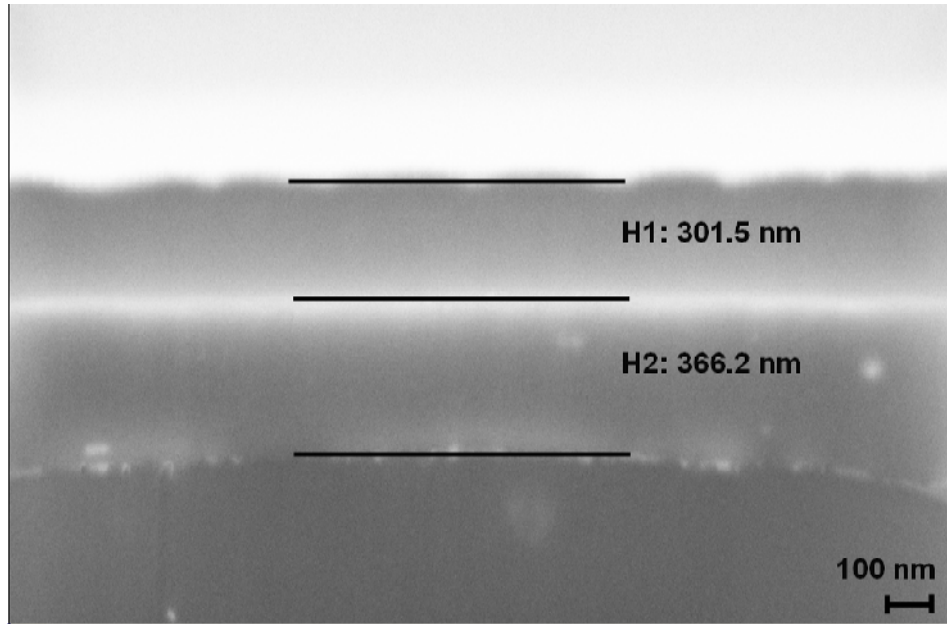
Şekil 5.16 PP taşıyıcı şerit (a) ve ITO kaplı cam (b) üzerinde Baytron PH 500, P3HT:PCBM, LiF ve Al malzemeleri ile oluşturulan polimer esaslı organik güneş piline ait AFM resimleri

### 5.1.2.3 Enine Kesit Görüntüleri

Şekil 5.17’de taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen fotovoltaik şerit (a) ve monofilamentin (b) enine kesit görüntüleri sırasıyla gösterilmiştir. Şerit taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS arasına kaplanan 100 nm kalınlıktaki Ag tabakası Şekil 5.17 (a)’da açıkça görülmektedir. Fotovoltaik monofilamente ait görüntüde, hem PEDOT:PSS’nin hem de fotoaktif tabakanın şerite göre daha kalın kaplandığı görülmektedir. Bu durumun fotovoltaik performansı olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Her iki resimde de PEDOT:PSS ile P3HT:PCBM tabakası arasında oluşan arayüzey net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca kullanılan daldırma yönteminin yüzey düzgünlüğüne katkıda bulunduğu da anlaşılmaktadır.



(a): h1: Ag, h2:PEDOT:PSS ve h3: P3HT:PCBM



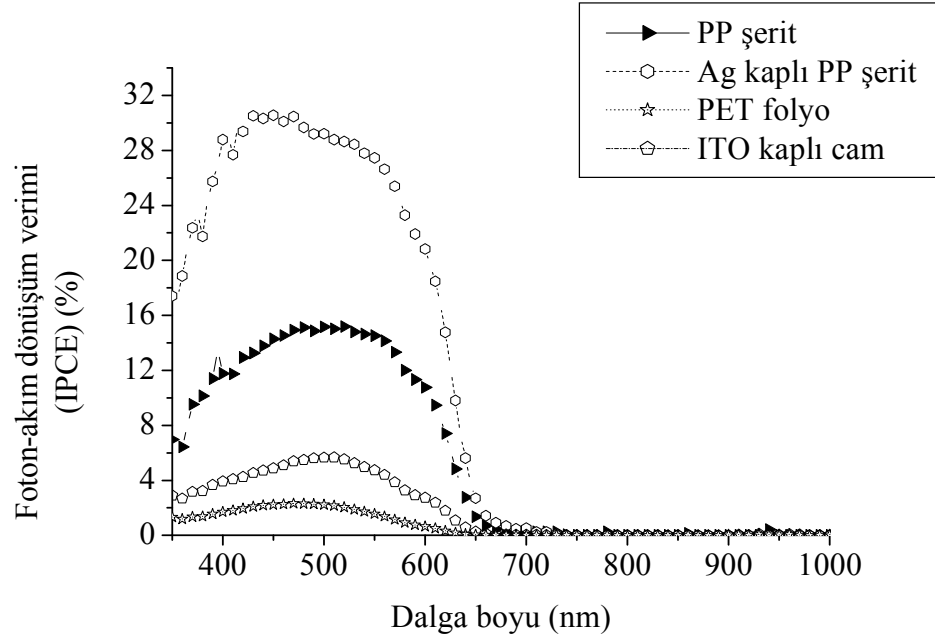
(b): H1: P3HT:PCBM ve H2: PEDOT:PSS

Şekil 5.17 100 nm Ag kaplı PP taşıyıcı şerit (a) ve monofilamentin (b) üzerinde Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al piline ait enine kesiti gösteren SEM resimleri (50.000 büyütme)

#### 5.1.2.4 Foton-Akım Dönüşüm Verimi Özellikleri

Düşük ışınım şiddetindeki monokromatik ışık altında gelen fotonun, elektrik akımına dönüşüm verimi olarak nitelendirilen IPCE (Incident Photon to Current

Conversion Efficiency) ölçümleri, 350-1000 nm dalga boyu aralığında eldivenli kabin içerisinde güneş pilinin üst elektrot yönünden alınmıştır (Şekil 5.18). Taşıyıcı tabaka/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al sistemli organik güneş pillerinin IPCE ölçümü grafikleri Şekil 5.18’da (a) şerit, (b) Ag kaplı şerit, (c) PET folyo ve (d) ITO kaplı cam için verilmiştir.



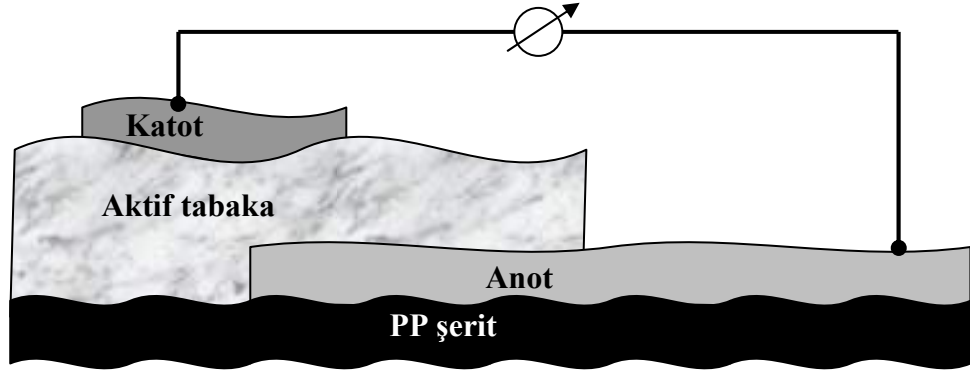
Şekil 5.18 Taşıyıcı tabaka/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/LiF/Al polimer esaslı organik güneş pillerinin foton-akım dönüşüm veriminin gelen ışık dalga boyuna göre değişimlerinin karşılaştırılması

Elde edilen grafikler incelendiğinde alt elektrot için 100 nm Ag kaplı örneğin en yüksek IPCE(%) değerini (yaklaşık %15) verdiği görülmektedir.

#### 5.1.2.5 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi

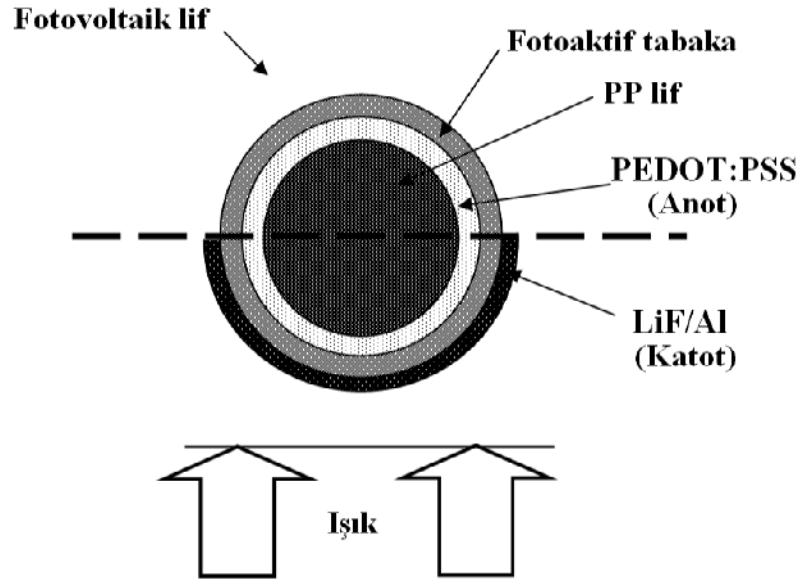
Bilinen güneş pilleri, genellikle cam gibi düz, dayanıklı ve pürüzsüz taşıyıcı malzemeler üzerinde üretilmekte ve kullanılmaktadır. Ancak tekstil materyalleri esnek, ortam koşullarına daha dayanıksız ve pürüzlü yapılardır. Buna rağmen,

yaklaşık 10 nm kalınlığında yarı-şeffaf metal elektrot (LiF/Al) kullanılan bu çalışmada polipropilen şerit organik güneş pili oluşturan malzemeleri üzerinde dayanıklı bir şekilde taşımıştır. Şekil 5.19'da PP şeritler kullanılarak elde edilmiş fotovoltaiik pil yapısının pürüzlü yüzeyine vurgu yapan bir gösterilimi yer almaktadır.



Şekil 5.19 Pürüzlü tekstil yüzeyi esaslı fotovoltaiik pil

Elektriksel özellikler açısından, kesiti yuvarlak PP monofilamente güneş pili malzemelerinin uygulanması, şerit üzerindeki pillerden daha düşük değerler elde edilmesi ile sonuçlanmıştır. Monofilament, aydınlatıldığında, yuvarlak dış yüzeyi nedeniyle ışığın vurduğu her bölgede, ışığı aynı açıdan alamamaktadır (Şekil 5.20) ve aydınlatma açısı, lif üzerinde ışık etkisiyle düz yüzeylere göre elektriksel açıdan farklı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca daldırma yöntemi kullanılarak kaplanan PEDOT:PSS ve P3HT:PCBM malzemelerinin beklenenden daha kalın bir tabaka oluşturduğu SEM resimleri ile görülmüştür.



Şekil 5.20 Güneş ışığı simülöründe lifin fotovoltaik karakterinin ölçülmesi sırasındaki görünümü

Taşıyıcı tabaka şerit ile PEDOT:PSS tabakası arasında, ITO malzemesinin yerini alabilme durumunu gözlemek amacıyla, alt metal elektrot olarak 100 nm Ag kaplanmıştır. Kaplı olan örneklerin kısa devre olma miktarında, Ag kaplı olmayanlara göre bir artış gözlenmemiştir ve pillerin elektriksel özelliklerini iyileştirerek cam üzerindeki pillerle karşılaştırılabilir sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

### 5.1.3 Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al/Ag Pil Sistemine Ait Sonuçlar

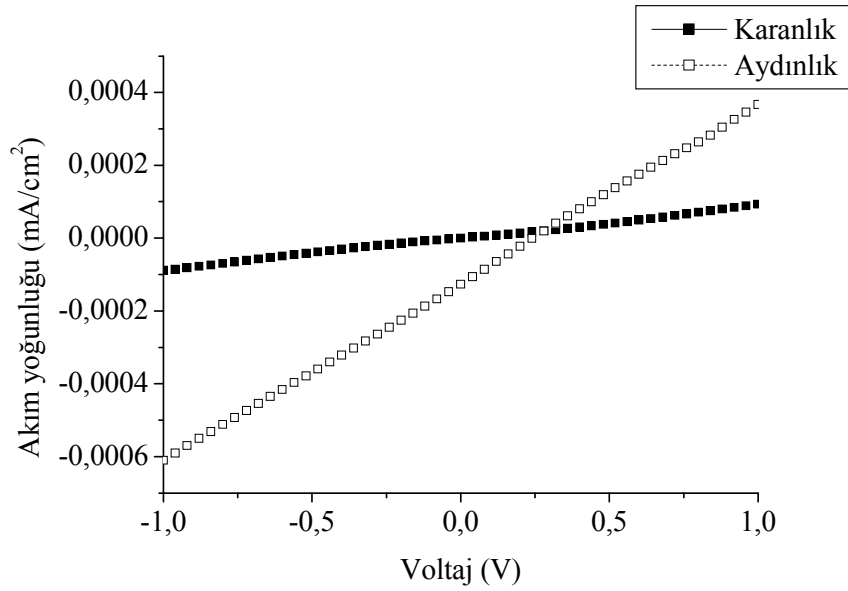
Bu bölümde, alüminyum ile kıyaslandığında havanın oksijeni ve nemine daha dayanıklı bir metal olan gümüşün üst metal elektrot olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Ancak gümüş tek başına elektrot olarak fotoaktif tabaka üzerine kaplanırken, çoğu zaman polimer esaslı bu tabaka içerisine girmekte (difüze olmakta) ve alt elektrotla temas ederek kısa devreler meydana getirmektedir. Bu nedenle, ilk aşamada, daha önce üst elektrot olarak denenen alüminyum (3 nm), ince bir tabaka halinde vakumda ısı ile buharlaştırma yöntemi ile Ag tabakasının altına kaplanmış, ikinci aşamada ise Ag (7 nm), Al metal tabakasının üstüne kaplanmıştır.

Üst elektrodun değiştirilmesi ile elde edilen fotovoltaik tasarım, PP şeritler üzerinde denenmiştir.

### 5.1.3.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri

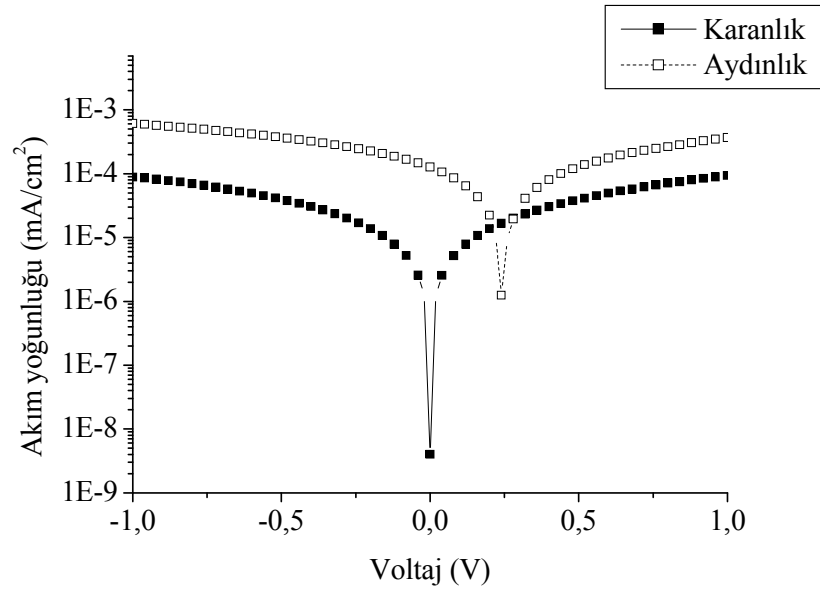
PP taşıyıcı şerit/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/Al/Ag sistemi ile elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.21'de görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,57 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 320 mV, FF: 0,250 ,  $\eta$  :%0,05'dur.



(a)



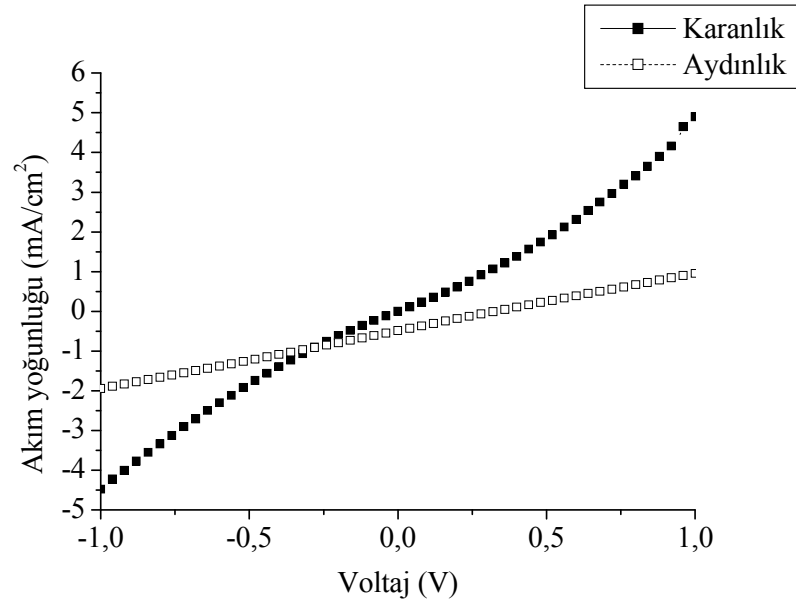


(b)

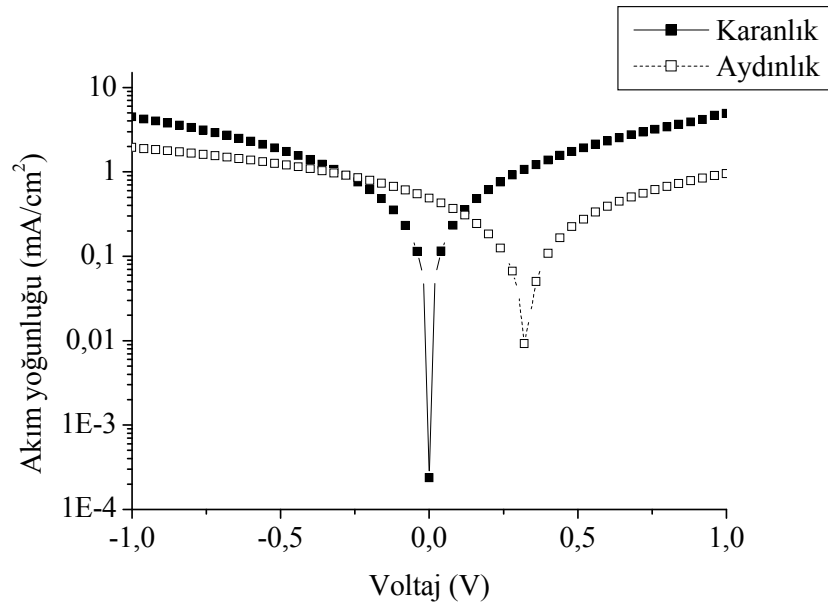
Şekil 5.21 PP şerit/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/Al/Ag güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP taşıyıcı şerit/Ag/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/Al/Ag sistemi ile elde edilen I-V grafikleri Şekil 5.22'de görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,40 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 240 mV, FF: 0,253 ,  $\eta$  :%0,09'dur.



(a)

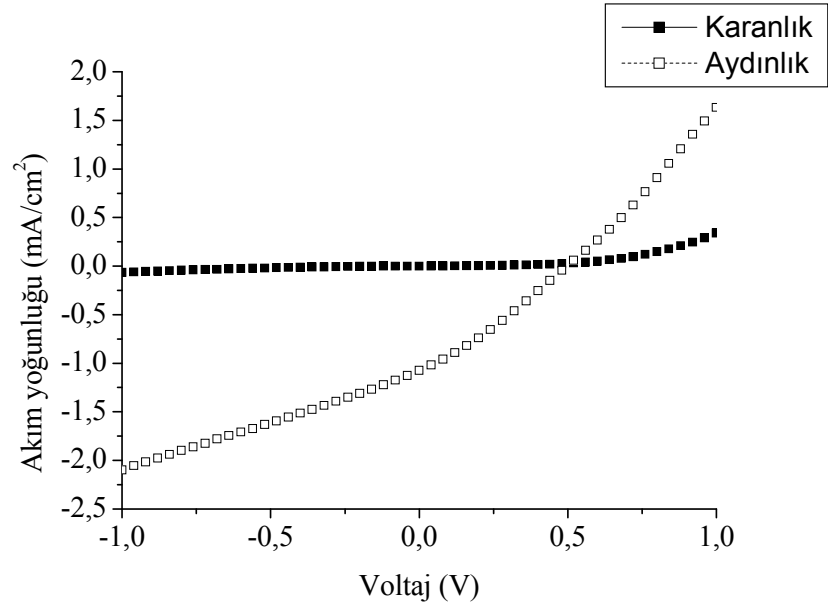


(b)

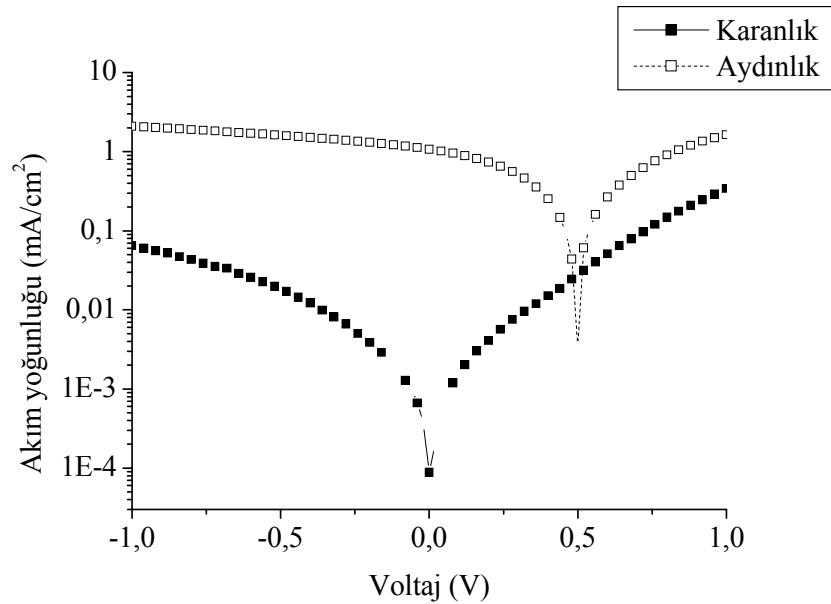
Şekil 5.22 PP şerit/Ag/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/Al/Ag güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP şerit/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al/Ag sistemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 5.23'de verilmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,07  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}$ : 500 mV, FF: 0,294 ,  $\eta$  :%0,16'dır.



(a)

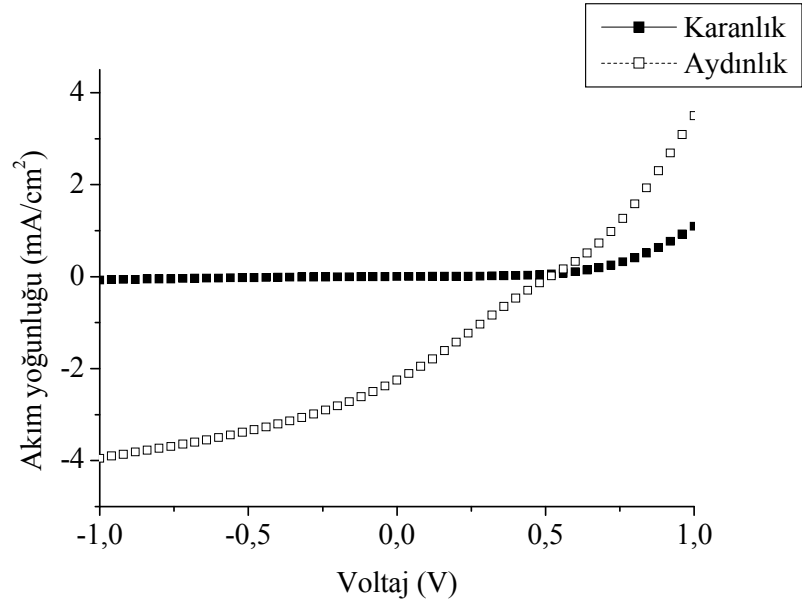


(b)

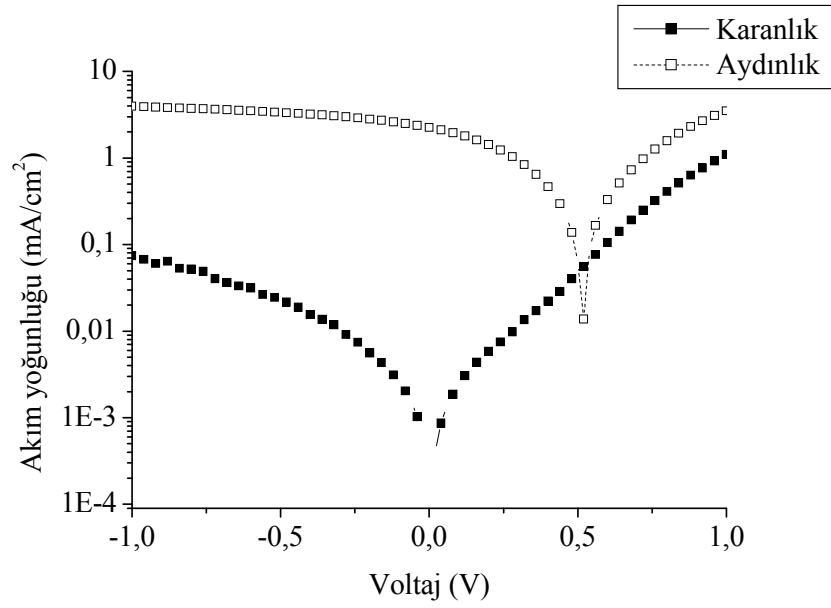
Şekil 5.23 PP şerit/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al/Ag güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP şerit/Ag/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al/Ag sistemine ait I-V grafiği Şekil 5.24'de verilmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaiik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 2,25 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 520 mV, FF: 0,253 ,  $\eta$  :%0,29'dur.

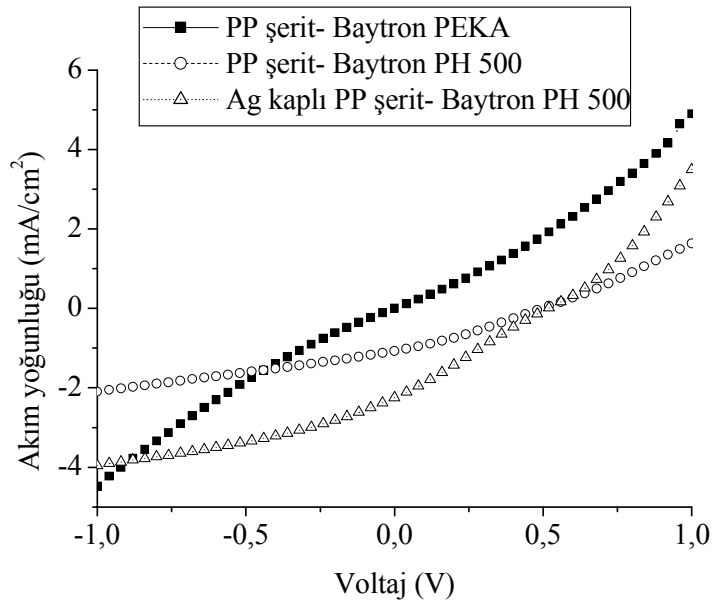


(a)

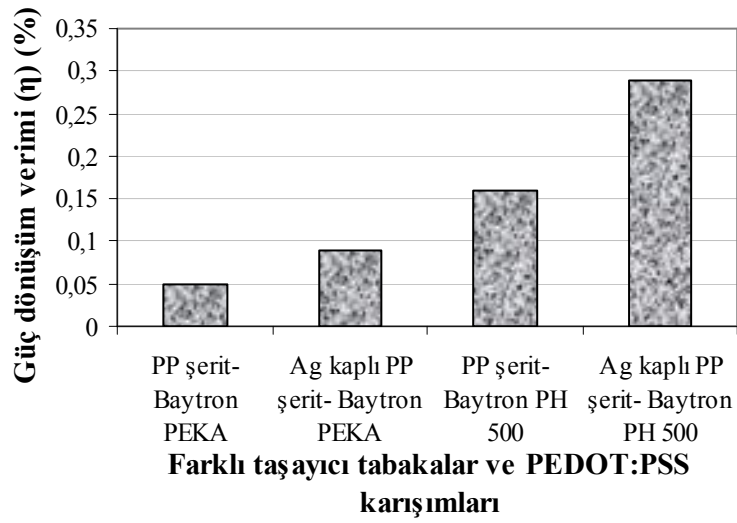


(b)

Şekil 5.24 PP şerit/Ag/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al/Ag güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği



Şekil 5.25 Üretilen pillerin farklı taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS tipleri açısından akım-voltaj değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.26 Üretilen pillerin farklı taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS tipleri açısından güç dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

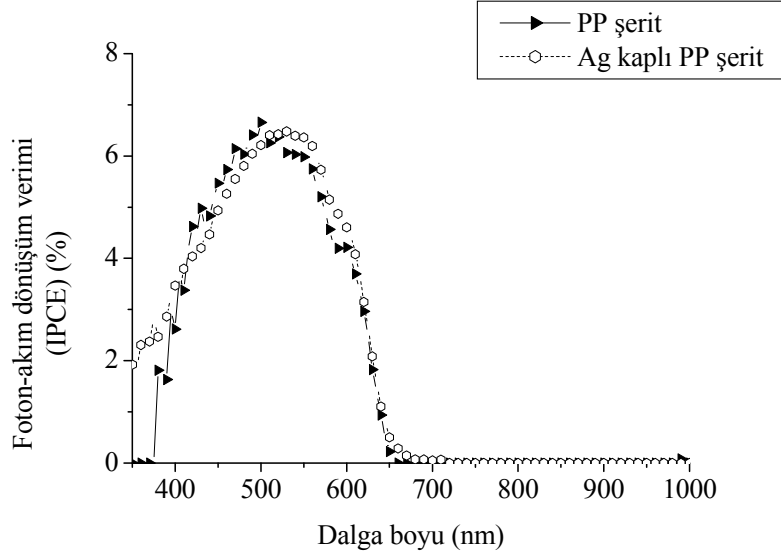
Tablo 5.3, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26, üretilen polimer esaslı organik güneş pillerinin fotovoltaik performanslarının karşılaştırmasını vermektedir. PEDOT:PSS tabakasının altına kaplanan Ag tabakası, pilden boşlukların toplanmasını iyileştirerek fotovoltaik performansı önemli derecede arttırmıştır.

Tablo 5.3 Üretilen pillerin farklı taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS tipleri açısından fotovoltaik performanslarının karşılaştırılması

Taşıyıcı ve PEDOT:PSS tabaka tipi	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	η (%)
PP şerit- Baytron PEKA	0,57	320	25	0,05
Ag kaplı PP şerit- Baytron PEKA	1,40	240	25,3	0,09
PP şerit- Baytron PH 500	1,07	500	29,4	0,16
Ag kaplı PP şerit- Baytron PH 500	2,25	520	25,3	0,29

### 5.1.3.2 Foton-Akım Dönüşüm Verimi Özellikleri

Monokromatik ışık yardımıyla elde edilen IPCE (%) ölçümleri Şekil 5.27’de PP şerit (a) ve ve 100 nm Ag kaplı PP şerit (b) için gösterilmiştir. Grafikten de görüleceği gibi Ag kaplamanın belirgin bir katkısının olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.27 Taşıyıcı tabaka/Baytron PH 500/P3HT:PCBM/Al/Ag sistemli güneş pillerinin foton-akım dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

Foton-akım dönüşüm verimi açısından piller %7 IPCE değerini vermişlerdir.

### 5.1.3.3 Kullanılan Farklı Üst Elektrotların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi

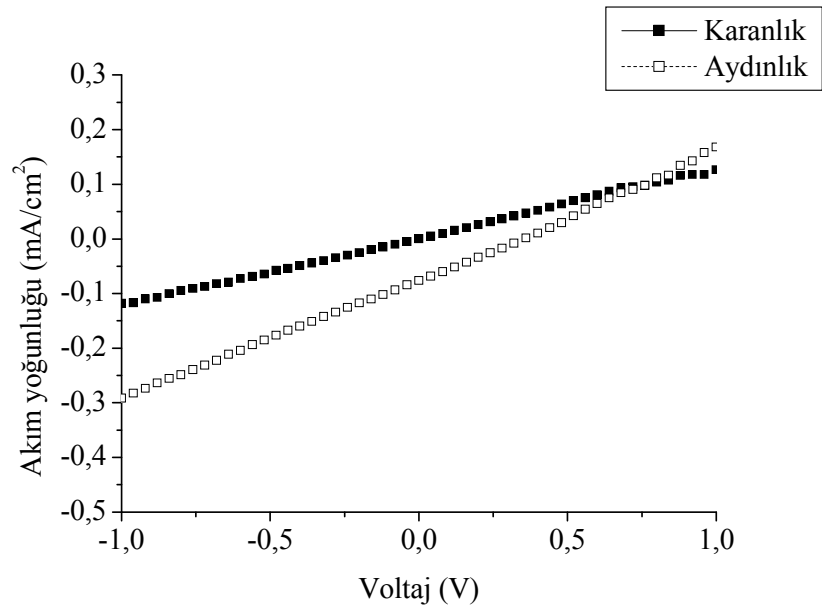
Al/Ag üst metal elektrot kullanılan örneklerin, ışık geçirgenliği LiF/Al katoda göre, daha fazla olmasına rağmen, LiF/Al kullanılan örneklere göre denemeler sırasında, daha fazla kısa devre oluşturmuştur. Elde edilen sonuçlar içerisinde, diğer uygulamalarda olduğu gibi, 100 nm Ag kaplı şeritlerle yapılan uygulamalar fotoelektriksel açıdan daha iyi sonuç vermiştir (Tablo 5.3).

### 5.1.4. Taşıyıcı Tabaka/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al Pil Sistemine Ait Sonuçlar

#### 5.1.4.1 Akım- Voltaj Karakteristikleri

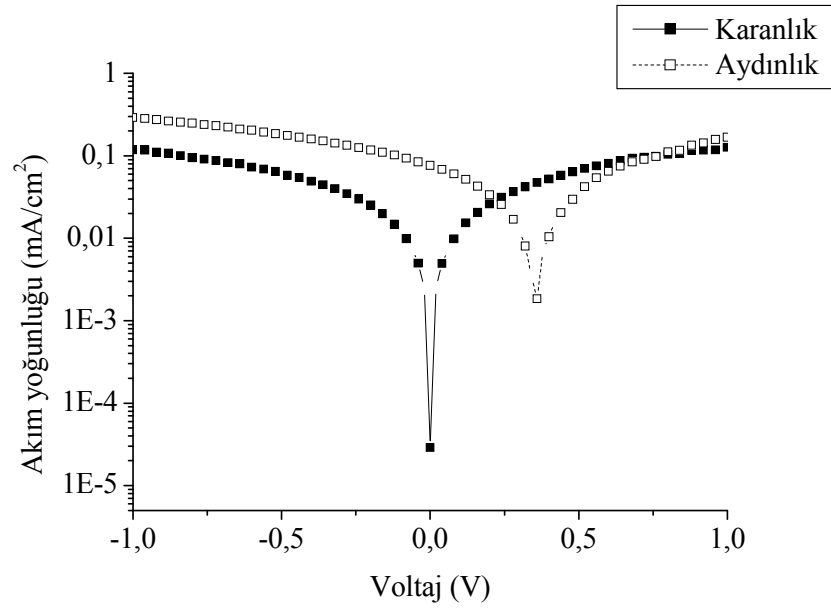
PP şerit/Baytron PEKA-CNT:PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al tabakaları ile oluşturulmuş polimer esaslı organik güneş piline ait doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) I-V grafikleri Şekil 5.28'de verilmektedir.

Bu yapıdaki pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,08 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 360 mV, FF: 0,249 ,  $\eta$  :%0,007'dir.



(a)



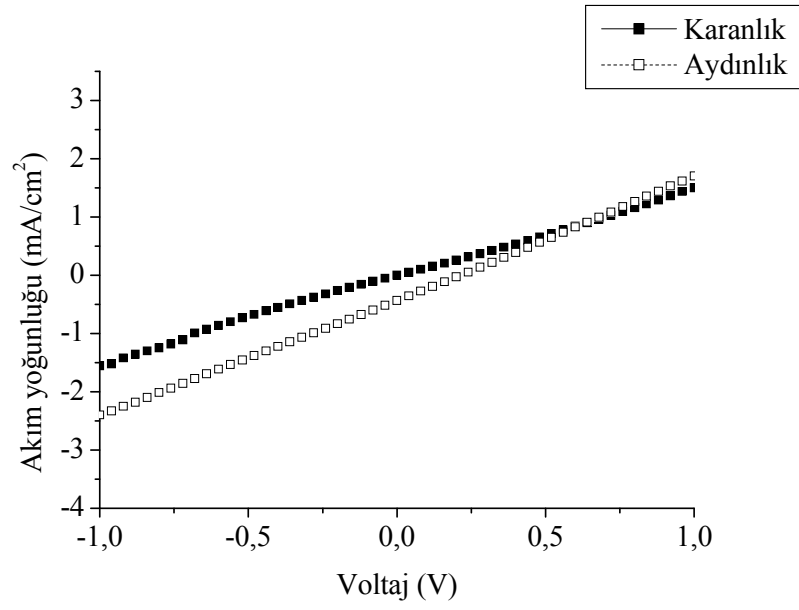


(b)

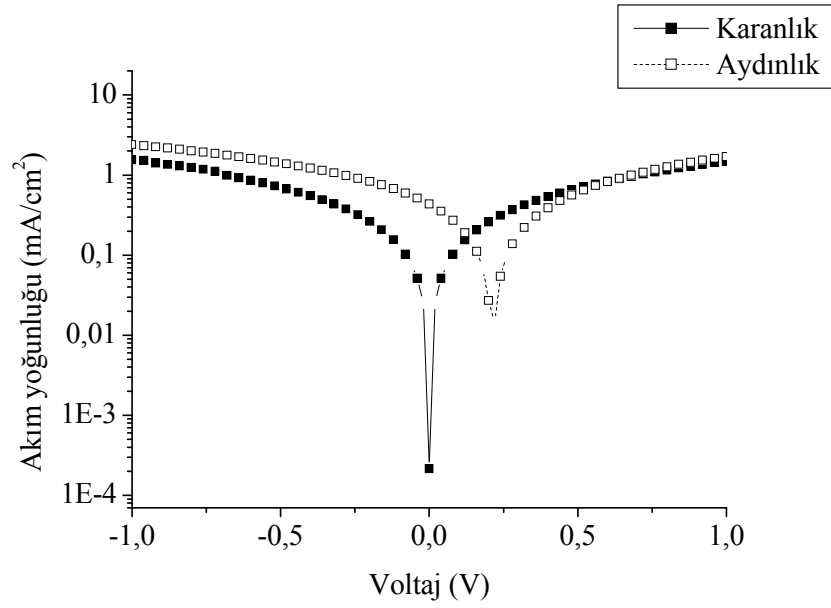
Şekil 5.28 PP şerit/ Baytron PEKA: CNT-PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP şerit/Baytron PH 500-CNT:PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al tabakaları ile oluşturulmuş polimer esaslı organik güneş piline ait doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) I-V grafikleri Şekil 5.29'da verilmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,43 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 220 mV, FF: 0,243 ,  $\eta$  :%0,023'tür.



(a)

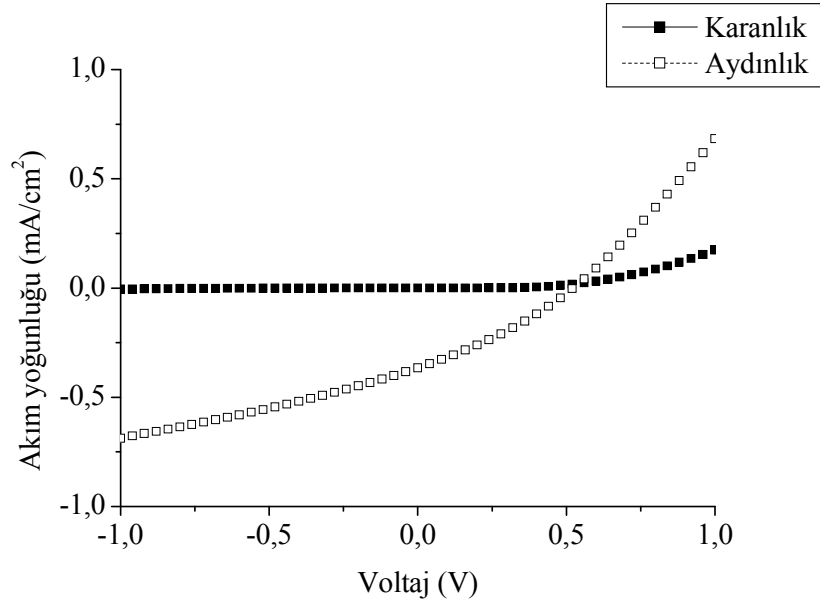


(b)

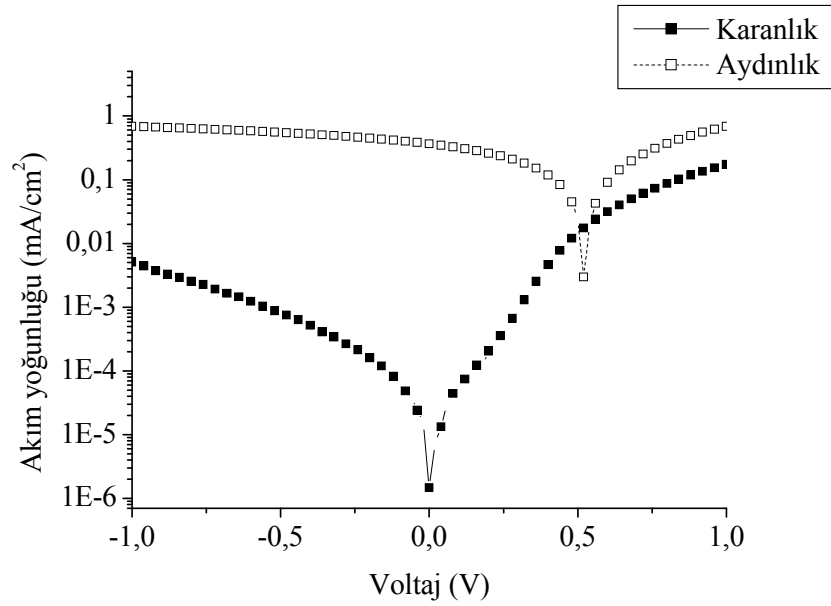
Şekil 5.29 PP şerit/Baytron PH 500: CNT-PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP şerit/Ag/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/LiF/Al yapısındaki güneş pili için PP şeritler üzerine ısıyla buharlaştırma yöntemi kullanılarak taşıyıcı tabakanın yarısına kadar olacak şekilde 100 nm Ag kaplanmıştır. Bu yapı üzerine boşluk toplayıcı olarak Baytron PEKA (PEDOT:PSS), üstüne P3HT:PCBM (1:0,8) Bölüm 4’de belirtildiği şekilde kaplanmıştır. 0,7 nm LiF ve 10 nm Al elektrot vakumda ısı ile buharlaştırılarak yapı üzerine kaplanmıştır. Bu pile ait doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) I-V grafikleri Şekil 5.30’da verilmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,37 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 520 mV, FF: 0,310 ,  $\eta$  :%0,06’dir.



(a)

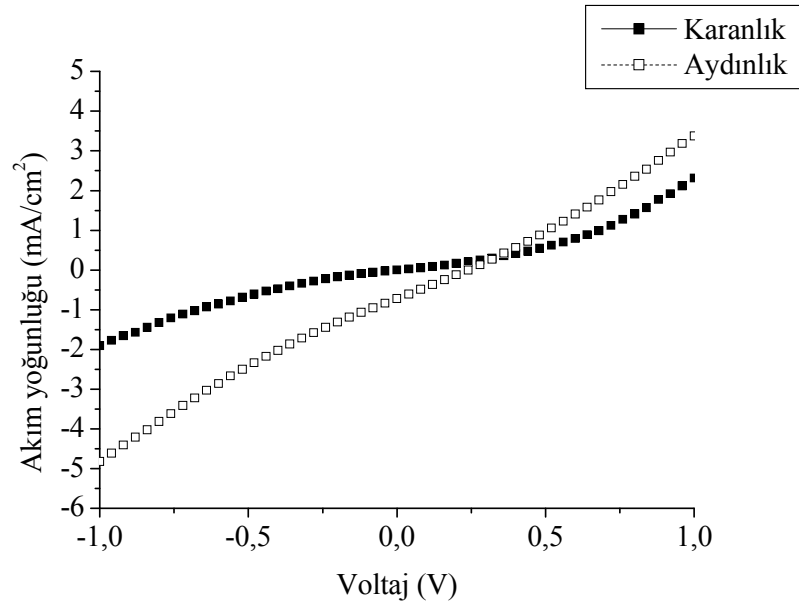


(b)

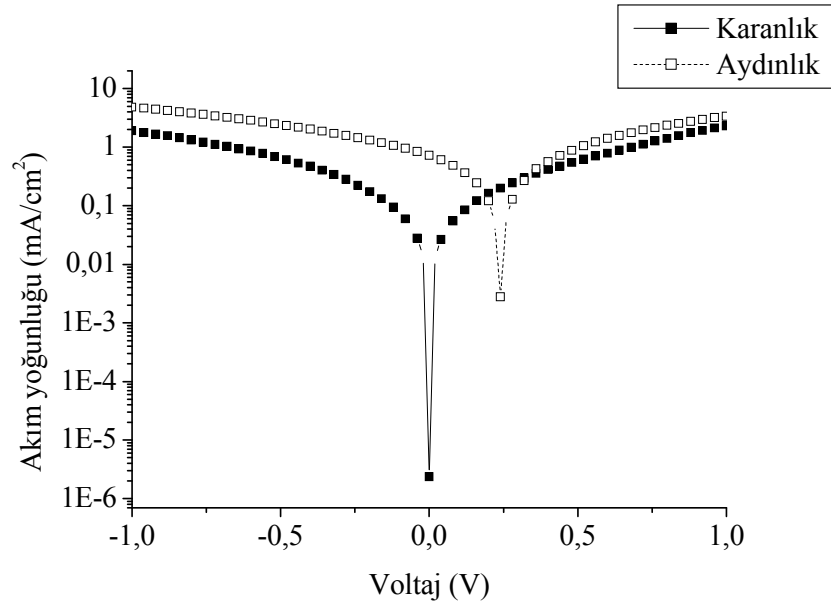
Şekil 5.30 PP şerit/Ag/Baytron PEKA/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (c) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

ITO kaplı cam/Baytron PH 500-CNT:PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al pil yapısında olan güneş piline ait üst elektrot tarafından ölçülerek elde edilen doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) I-V grafikleri Şekil 5.31’de gösterilmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,18 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 500 mV, FF: 0,303 ,  $\eta$  (%): 0,18 olarak elde edilmiştir.

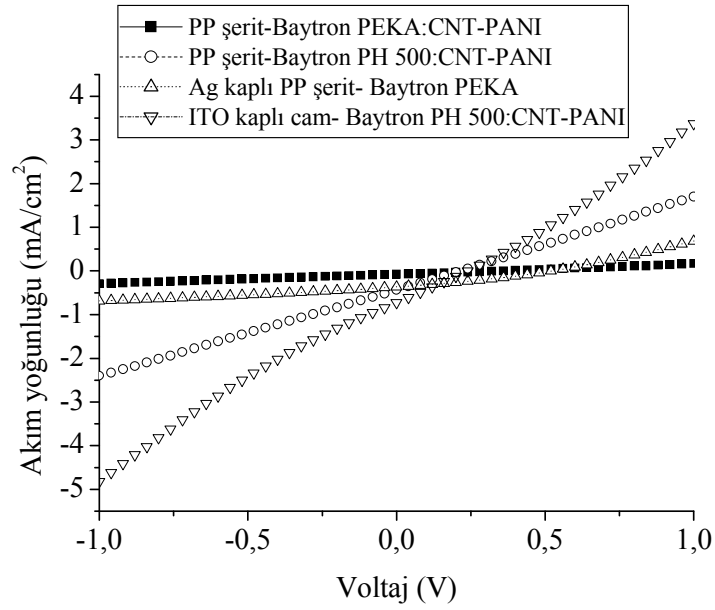


(a)

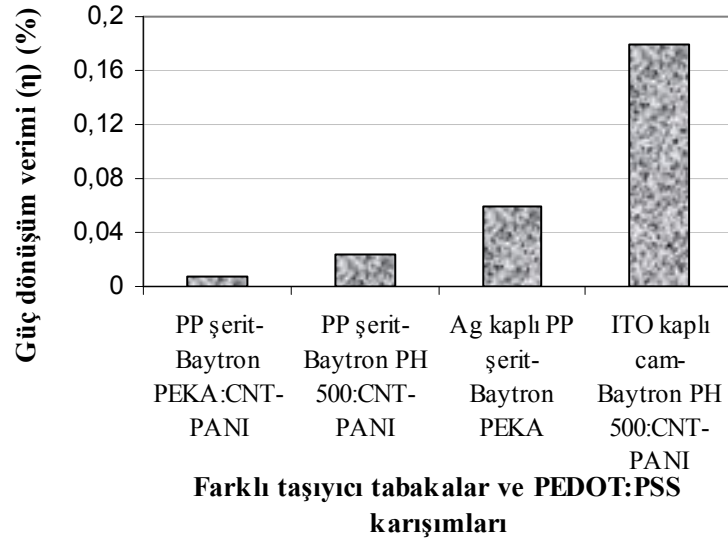


(b)

Şekil 5.31 ITO kaplı cam/Baytron PH 500-CNT-PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği



Şekil 5.32 Üretilen pillerin farklı taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS tipleri açısından akım-voltaj özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.33 Üretilen pillerin farklı taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS tipleri açısından güç dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.4, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’de, üretilen polimer esaslı organik güneş pillerinin fotovoltaj performanslarının karşılaştırmasını vermektedir. ITO kaplı cam

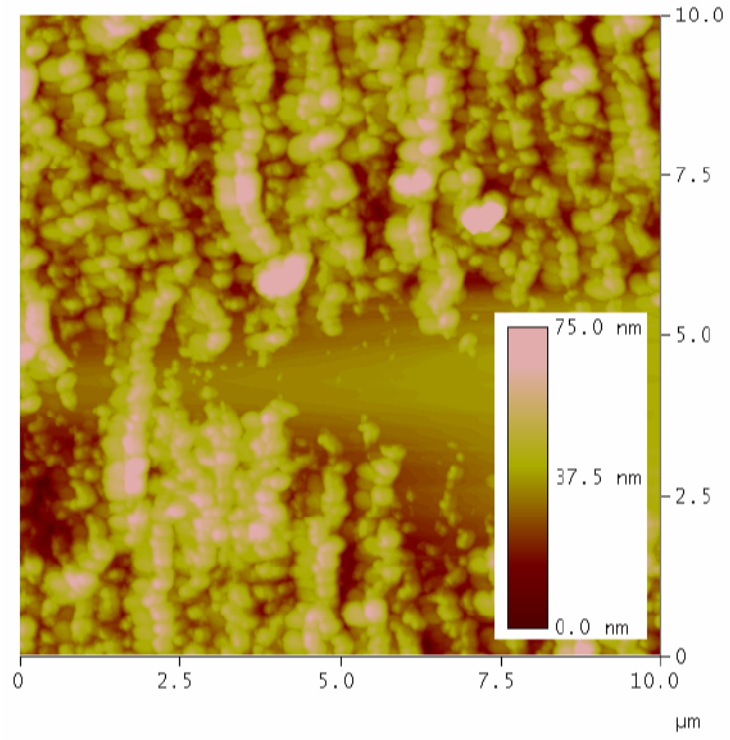
üzerinde Baytron PH 500:CNT-PANI kullanılarak üretilen piller %0,18 ile en iyi verimi vermiştir. PP şerit üzerinde ise verim, oldukça düşmüştür.

Tablo 5.4 Üretilen pillerin farklı taşıyıcı tabaka ve PEDOT:PSS tipleri açısından fotovoltaik performanslarının karşılaştırılması

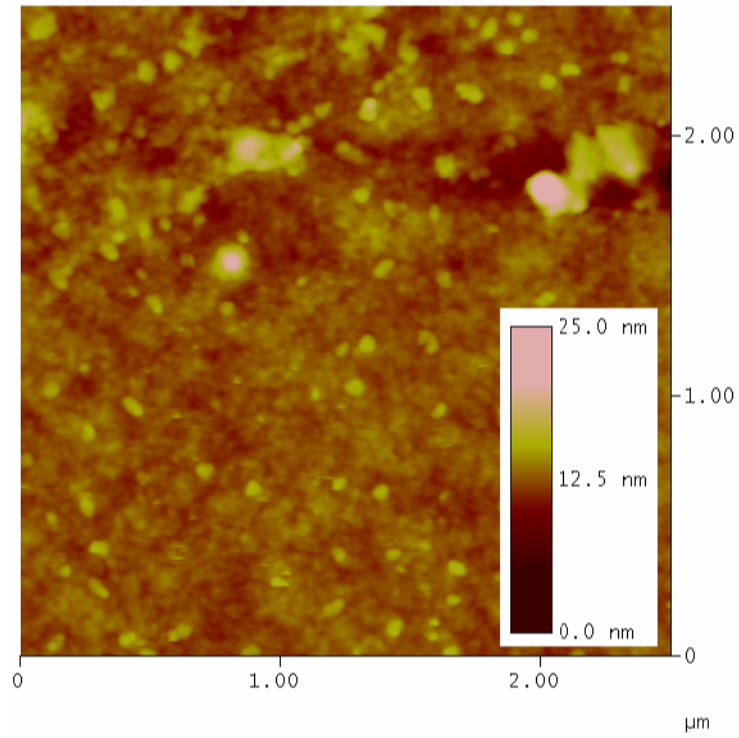
<b>Taşıyıcı tabaka tipi</b>	<b>I<sub>sc</sub> (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>V<sub>oc</sub> (mV)</b>	<b>FF (%)</b>	<b>η (%)</b>
PP şerit-Baytron PEKA:CNT-PANI	0,08	360	24,98	0,007
PP şerit-Baytron PH 500:CNT-PANI	0,43	220	24,3	0,023
Ag kaplı PP şerit- Baytron PEKA	0,37	520	31,0	0,060
ITO kaplı cam- Baytron PH 500:CNT-PANI	1,18	500	30,3	0,180

#### 5.1.4.2 Morfolojik Gözlemler

Şekil 5.34'den görüldüğü üzere, şerit üzerinde elde edilen pilin yüzey görünümü, ITO kaplı cam üzerinde geliştirilen pile göre daha pürüzlüdür. Bu durum fotovoltaik performansı doğrudan etkilemektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.34 PP taşıyıcı şerit (a) ve ITO kaplı cam üzerinde (b) Baytron PH 500:CNT-PANI/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş piline ait AFM görüntüleri



### *5.1.4.3 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların ve PEDOT:PSS Tiplerinin Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi*

Yaklaşık 10 nm yarı-şeffaf metal elektrot (LiF/Al) kullanılan bu denemelerde organik güneş pili malzemeleri PP şerit ve cam üzerine uygulanmıştır. Farklı PEDOT:PSS karışımlarının LiF/Al metal elektrodu ile nasıl bir sonuç göstereceğini belirlemek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Ancak PEDOT:PSS malzemesine, CNT-PANI eklenmesi, daha önceki üst elektrot olarak 10 nm Al kullanan örneklerde olduğu gibi, CNT-PANI eklenmemiş örneklerle karşılaştırıldığında sistemi kötüleştirmiştir. Ayrıca kısa devre olan örnek miktarını da arttırmıştır.

## 5.2 MDMO-PPV:PCBM Esaslı Pillere Ait Sonuçlar

Karışım heteroeklem (=bulk heterojunction) olarak isimlendirilen kavram esas olarak P-tipi elektron verici ve N-tipi elektron alıcı malzemenin uygun biçimde kombine edilmesi ile verimli organik güneş pillerinin imalinde önemli bir adımdır. Bu konuda ilk içiçe geçmiş ağ yapının test edildiği güneş pili MDMO-PPV:PCBM'dir. Şimdiye kadar laboratuarda elde edilen en yüksek verim %3,3'tür (Munters ve ark., 2002).

Farklı taşıyıcı tabakalar üzerinde, fotoaktif tabaka olarak MDMO-PPV:PCBM ve polimerik anot olarak yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS (Baytron PH 500) malzemeleri kullanılarak üretilen pillere ait sonuçlar bu bölümde gösterilmiştir. Pil sistemlerinde daha önce olduğu gibi farklı tipte katotlar (LiF/Al ve Al/Ag) denenmiştir.

### 5.2.1 Taşıyıcı tabaka/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al Pil Sistemine Ait Sonuçlar

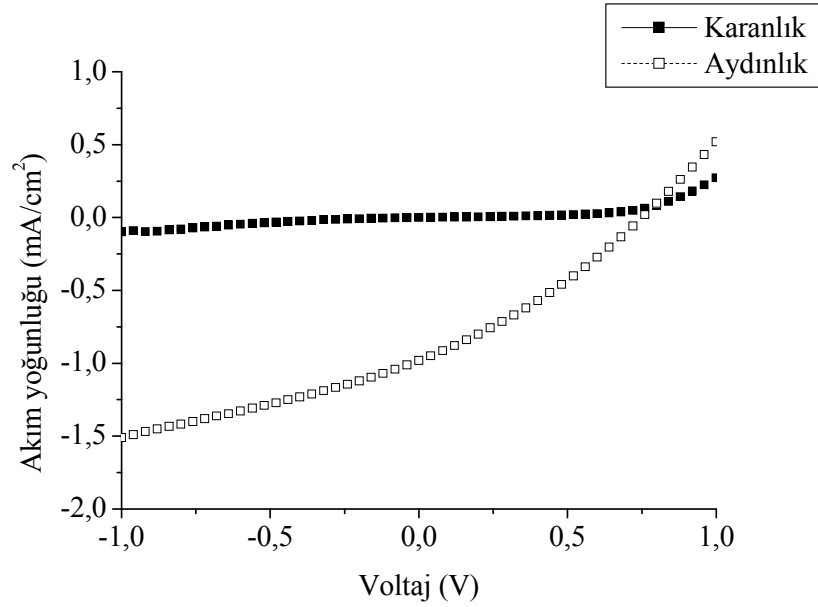
Çalışmanın bu bölümünde, beş farklı tip taşıyıcı tabaka üzerinde PEDOT:PSS ve MDMO-PPV:PCBM kullanılarak güneş pilleri üretilmiştir: PP yuvarlak enine kesitli mono filament, PP şerit, Ag kaplı PP şerit, PET ince film, ITO kaplı cam. Üst elektrot olarak yarı-şeffaf LiF/Al metal tabakası kullanılmıştır.

#### 5.2.1.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri

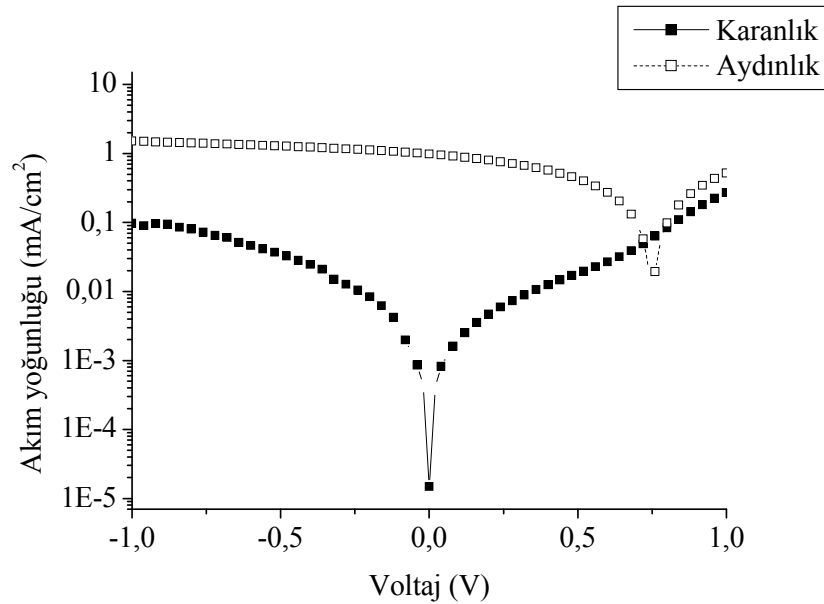
Güneş pillerinin aydınlıkta ve karanlıkta akım-voltaj grafikleri ölçülmüştür.

PP şerit/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al yapısındaki pil sistemine ait çalışmada, Şekil 5.35'de verilen I-V grafiklerinde doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,98  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}$ : 760 mV, FF: 0,306 ,  $\eta$  :%0,23.



(a)

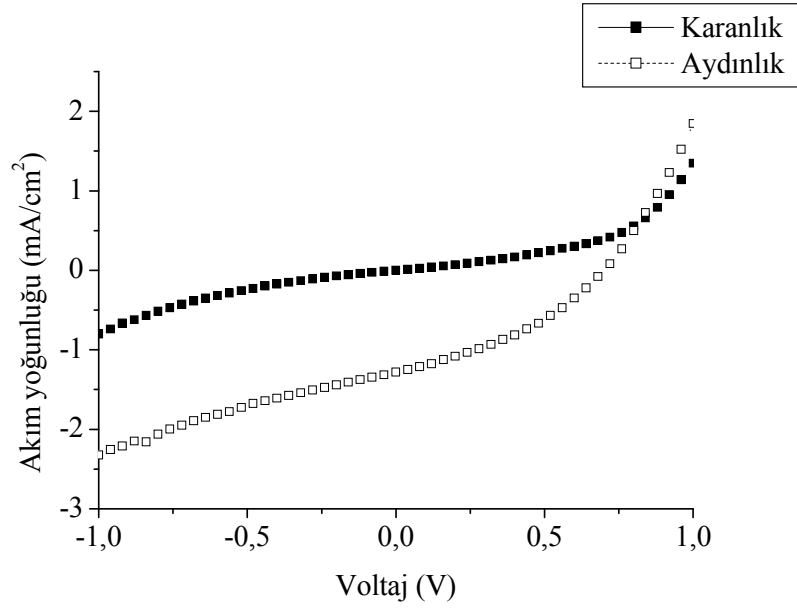


(b)

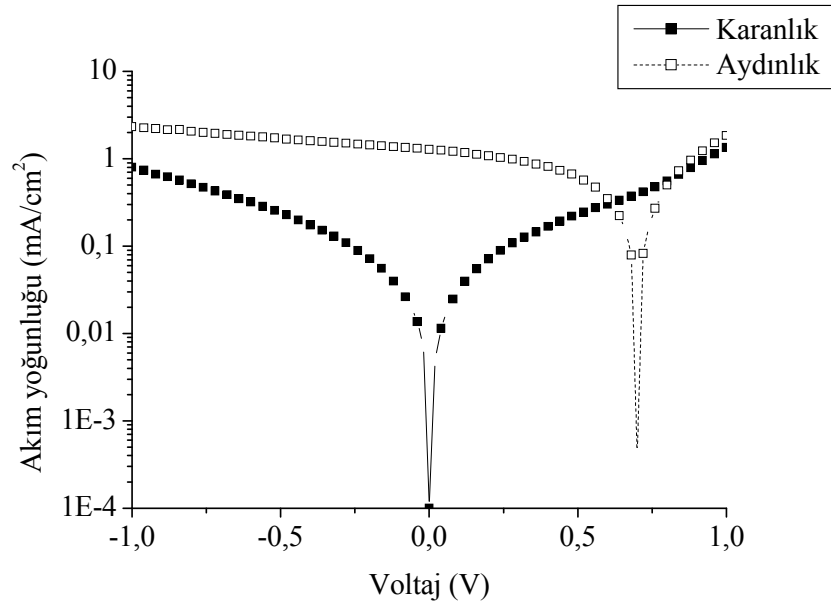
Şekil 5.35 PP şerit/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al güneş pileine ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP şerit/Ag/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al yapısındaki pil sistemine ait çalışmada, Şekil 5.36'da verilen I-V grafiklerinde doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaiik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,28 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 700 mV,  $FF$ : 0,365 ,  $\eta$  :%0,33.



(a)

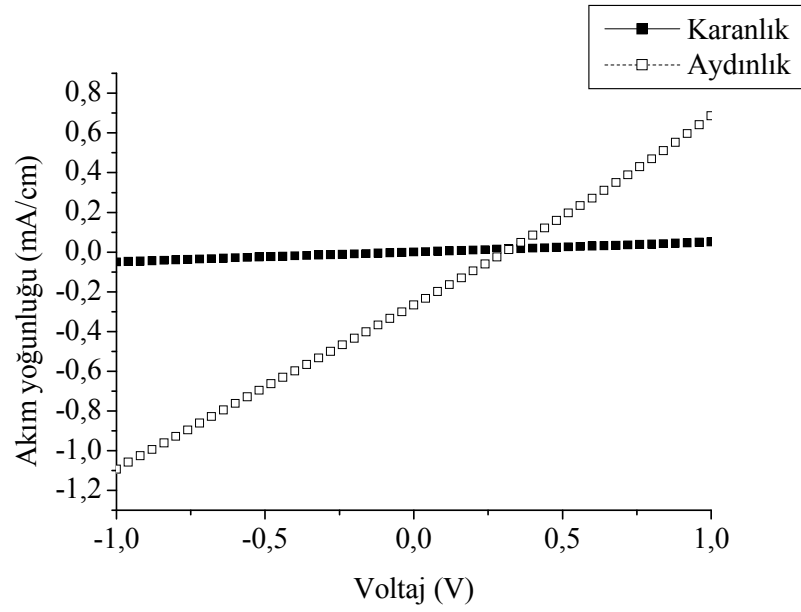


(b)

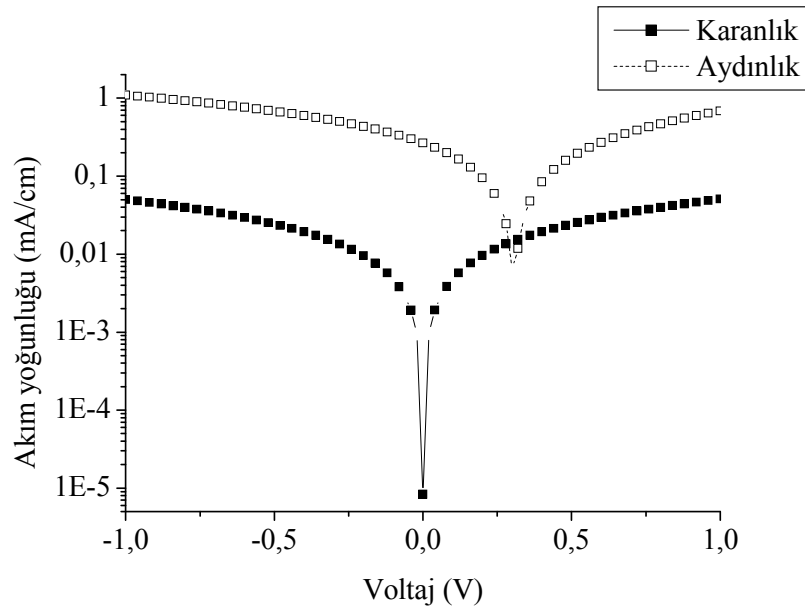
Şekil 5.36 PP şerit/Ag/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PP lif/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al pil sistemine ait I-V grafikleri Şekil 5.37’de doğrusal (a) ve yarı-logaritmik(b) olarak verilmiştir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,26 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 300 mV,  $FF$ : 0,260 ,  $\eta$  :%0,02’dir.



(a)

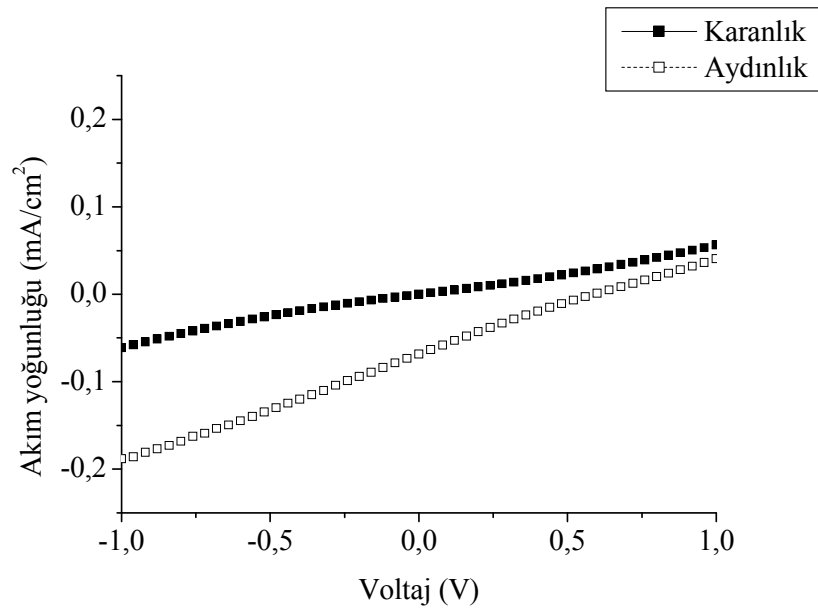


(b)

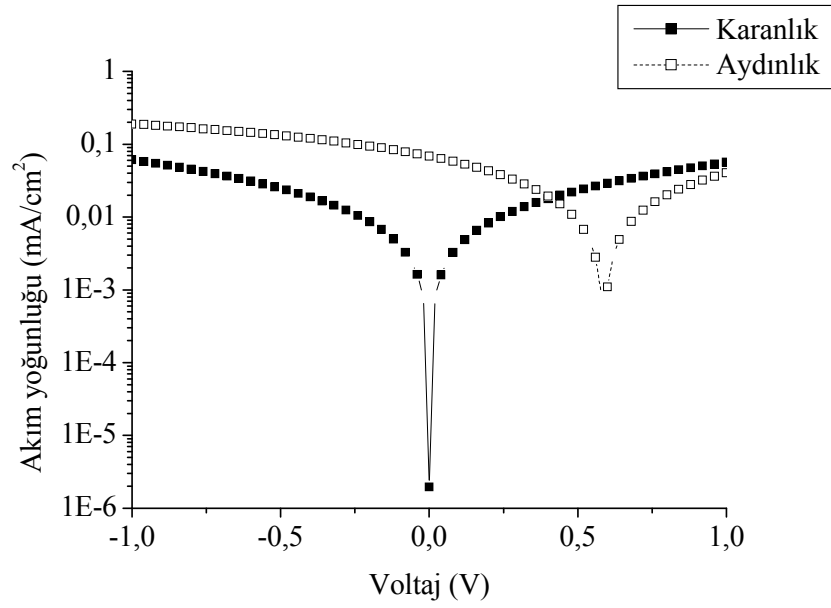
Şekil 5.37 Yuvarlak lif/ Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PET folyo/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al yapısındaki pil sistemine ait çalışmada, Şekil 5.38’de üst elektrot Al tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafiklerinde doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,07 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 580 mV,  $FF$ : 0,234 ,  $\eta$  :%0,01.



(a)



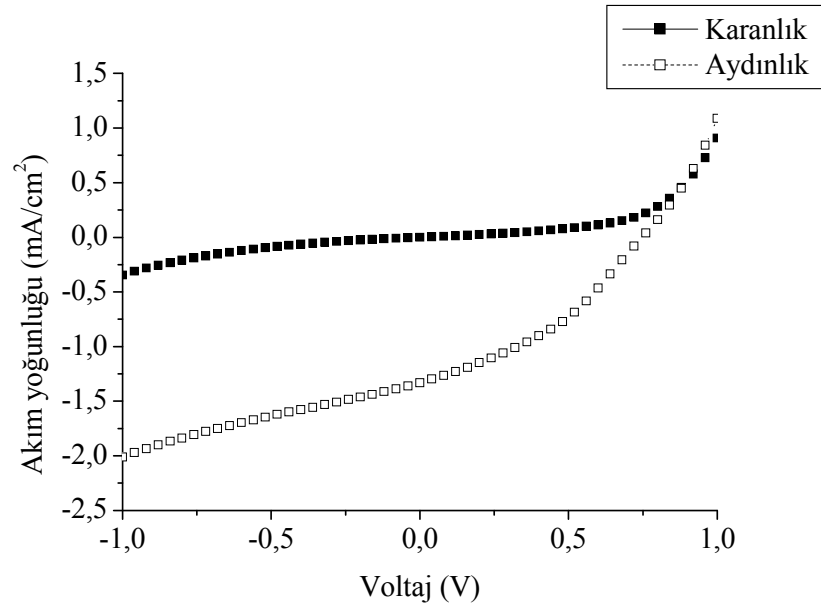
(c)

Şekil 5.38 PET folyo/ Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

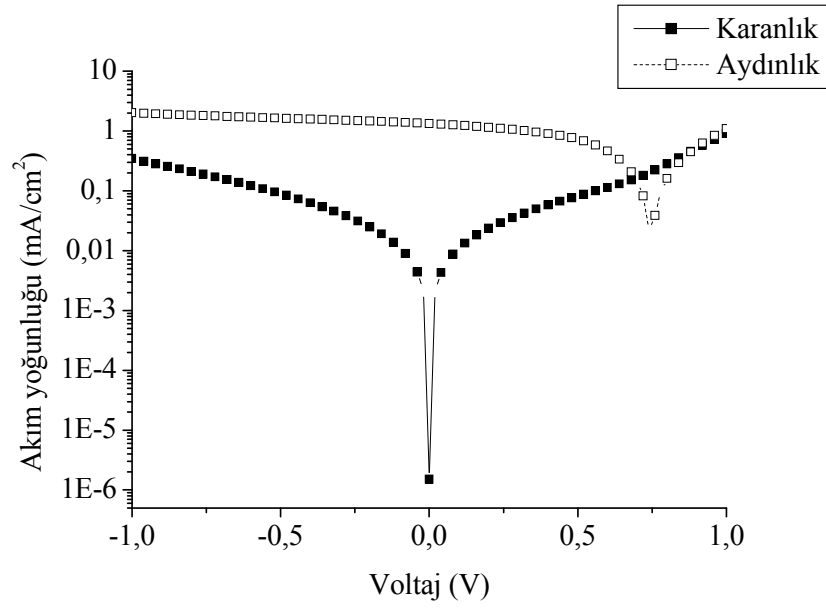
ITO kaplı cam/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al pil sistemine ait çalışmada Şekil 5.39'da üst elektrot Al yönünden ölçülerek elde edilen I-V grafiklerinde doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,33 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 740 mV,  $FF$ : 0,377,  $\eta$ : %0,37.





(a)

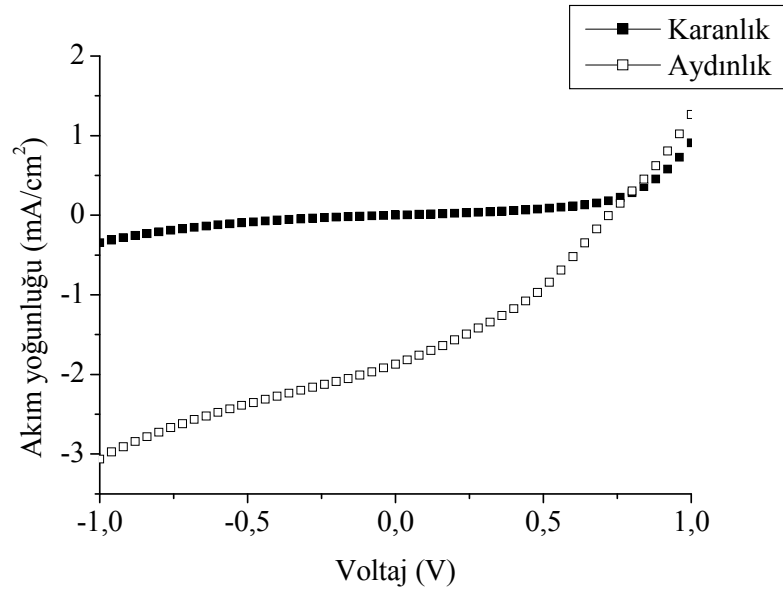


(b)

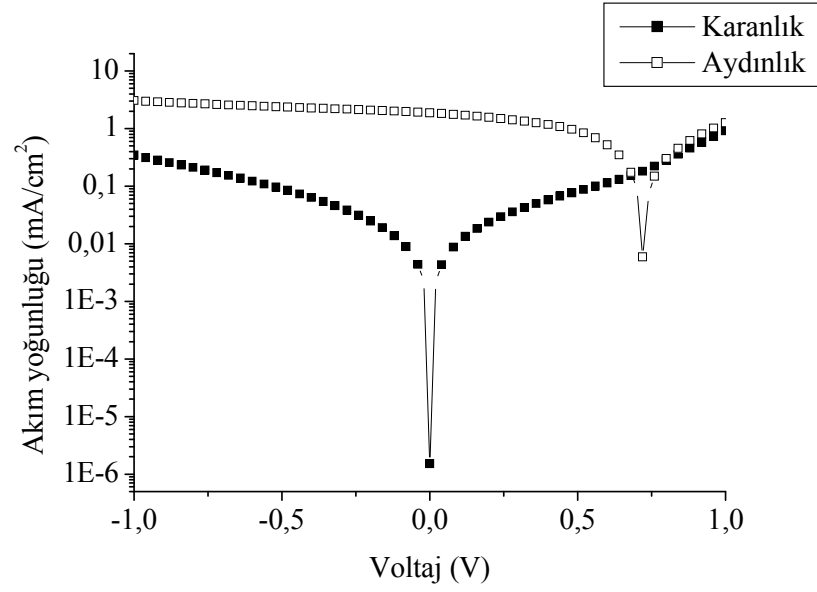
Şekil 5.39 ITO kaplı cam/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

ITO kaplı cam/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al pil sistemine ait çalışmada Şekil 5.40'da alt elektrot ITO kaplı cam tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafiklerinde doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,85 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 780 mV,  $FF$ : 0,373 ,  $\eta$  :%0,54.



(a)

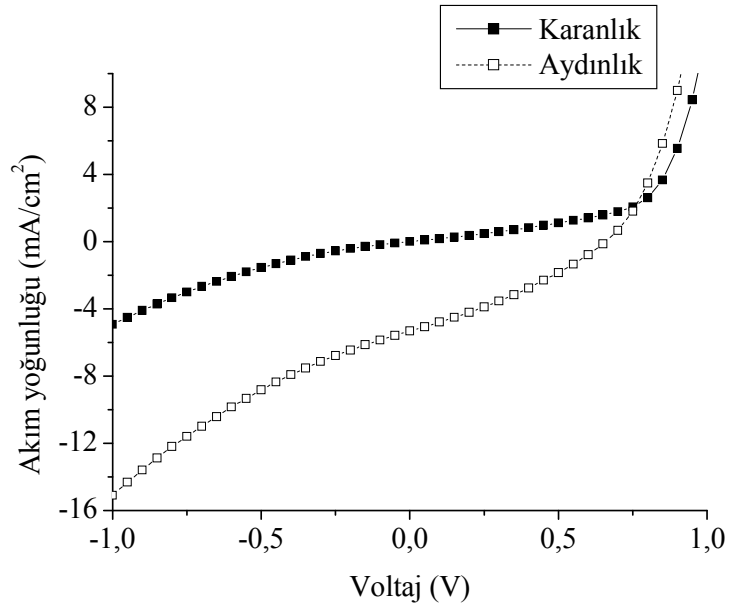


(b)

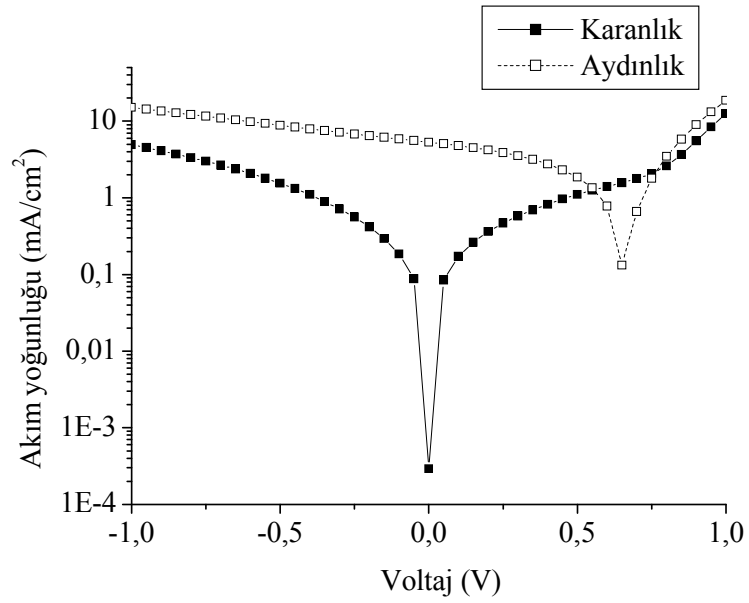
Şekil 5.40 ITO kaplı cam/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

ITO kaplı cam/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al (100 nm Al) pil sistemine ait çalışmada Şekil 5.41’de alt elektrot ITO kaplı cam tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafiklerinde doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 5,31 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 650 mV,  $FF$ : 0,321 ,  $\eta$  :%1,11.



(a)

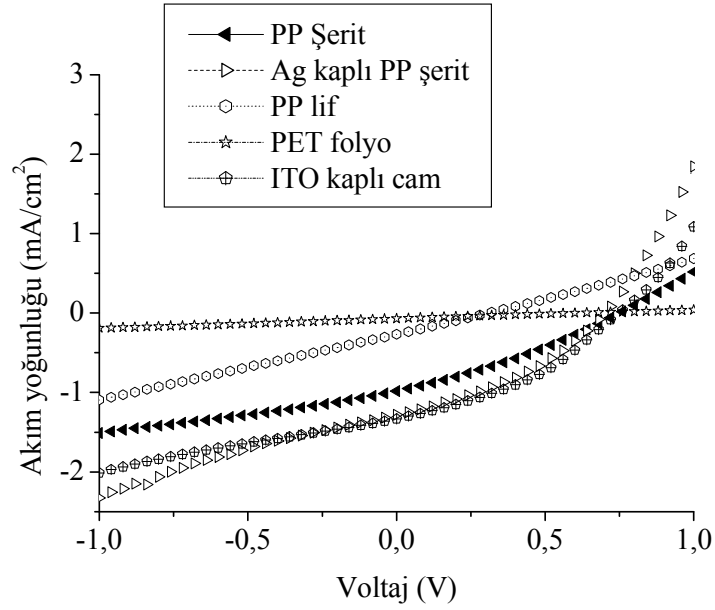


(b)

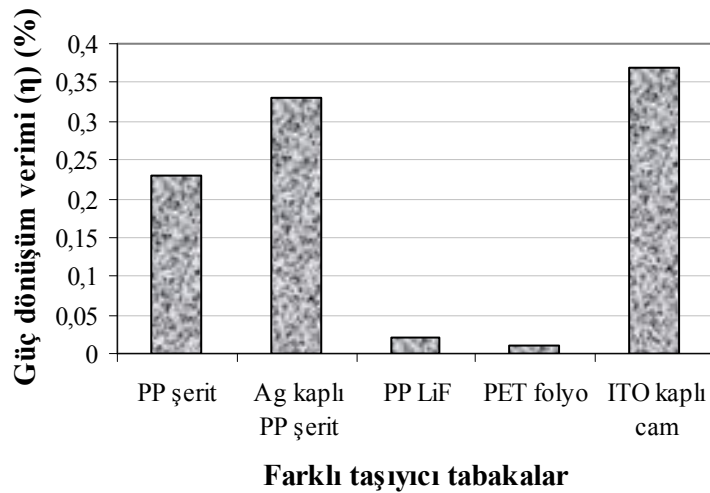
Şekil 5.41 ITO kaplı cam/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al (100 nm Al) güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

Şekil 5.41 incelendiğinde, ITO kaplı cam üzerinde geliştirilen ve 100 nm üst elektrot kaplanmış, bilinen güneş pilinin verimi, Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'de

gösterilen uyarlanan ve diğer tekstil esaslı güneş pillerine göre (Şekil 5.36 ve Şekil 5.37), üst elektrodun kalınlığının ve ITO'nun geçirgenlik özelliğinin etkisiyle çok daha yüksek elde edilmiştir. Ancak, 100 nm kalınlıktaki katot, üst eektrot yönünden ışığı geçirmemektedir.



Şekil 5.42 Üretilen polimer esaslı organik güneş pillerinin akım-voltaj özelliklerinin karşılaştırılması



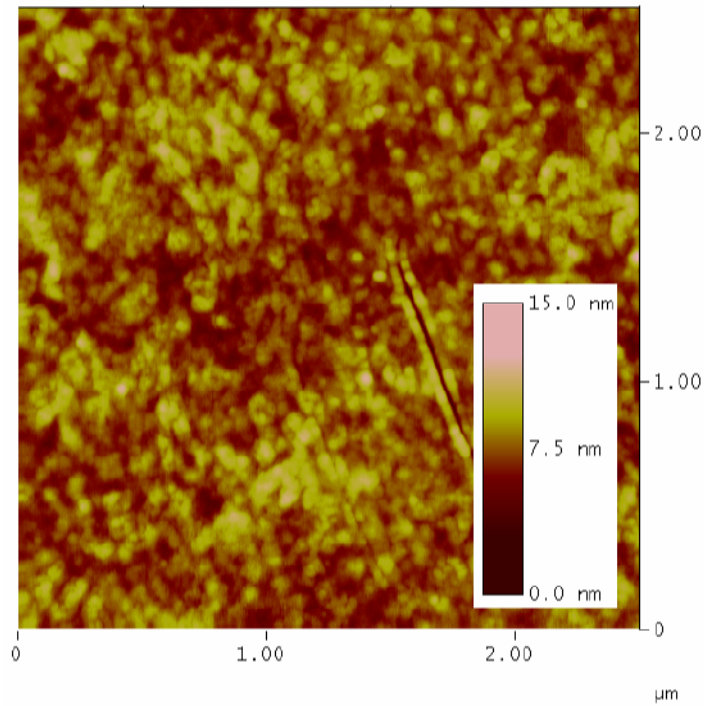
Şekil 5.43 Üretilen polimer esaslı organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.5, Şekil 5.42 ve Şekil 5.43 üretilen polimer esaslı beş farklı organik güneş pilinin fotovoltaik performanslarının karşılaştırmasını vermektedir. Elde edilen güneş pilleri incelendiğinde 100 nm Ag kaplı şeritin en iyi verimi verdiği görülmektedir.

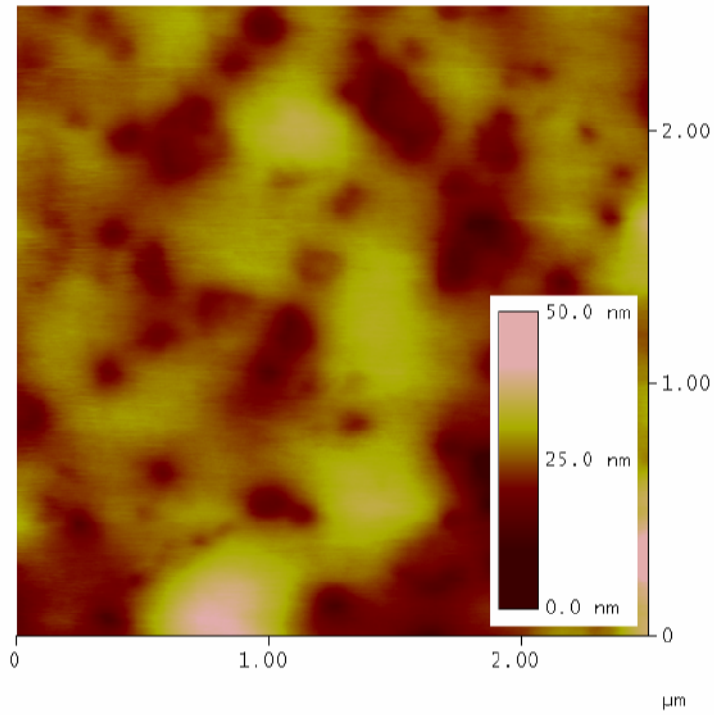
Tablo 5.5 Üretilen pillerin aynı yönden aydınlatılarak fotovoltaik performanslarının karşılaştırılması

Taşıyıcı tabaka tipi	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)
PP şerit	0,98	760	30,6	0,23
Ag kaplı PP şerit	1,28	400	36,5	0,33
PP LiF	0,26	300	26,0	0,02
PET folyo	0,07	580	23,4	0,01
ITO kaplı cam	1,33	740	37,7	0,37

### 5.2.1.2 Morfolojik Gözlemler



(a)



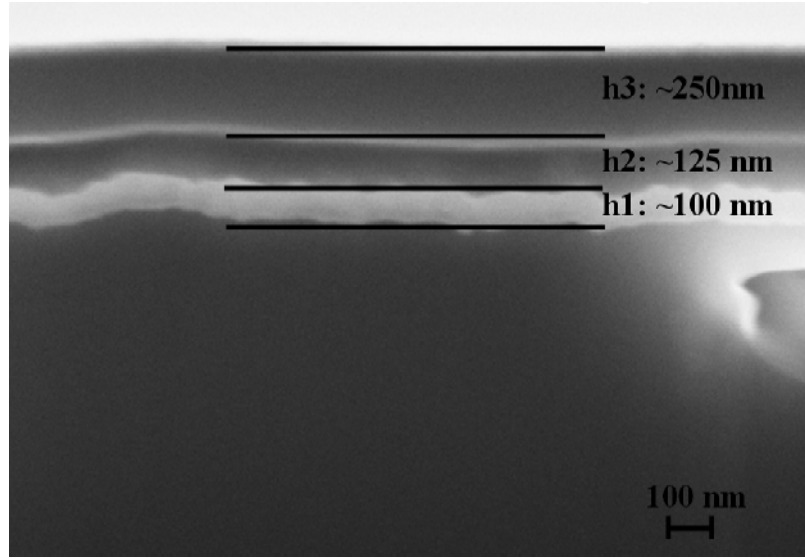
(b)

Şekil 5.44 PP taşıyıcı şerit (a) ve ITO kaplı cam (b) üzerinde Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al kullanılarak geliştirilen organik güneş pillerine ait AFM görüntüleri

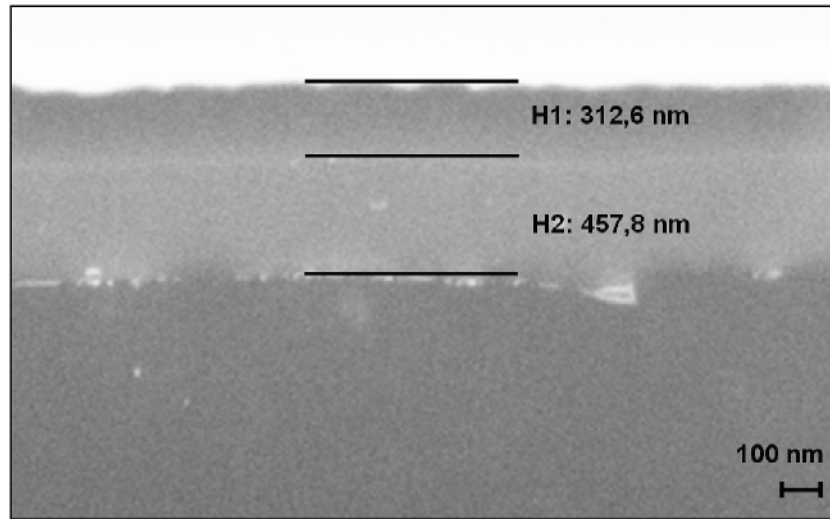
Şekil 5.44’de, atomik güç mikroskobu ile tapping modda PP şerit ve ITO kaplı cam üzerinden alınan resimler sırasıyla gösterilmektedir.

### 5.2.1.3 Enine Kesit Görüntüleri

Şekil 5.45’de Ag kaplı PP şerit (a) ve PP lif (b) esaslı fotovoltaik pil sistemlerinin SEM’de enine kesit görüntüleri sırasıyla verilmektedir. Resimlerde çok ince kaplanmış olan katot dışındaki tüm katmanlar ve daldırma yönteminin yüzey düzgünleştirici etkisi açıkça görülebilmektedir.



(a): h1: Ag, h2:PEDOT:PSS ve h3: MDMO-PPV:PCBM



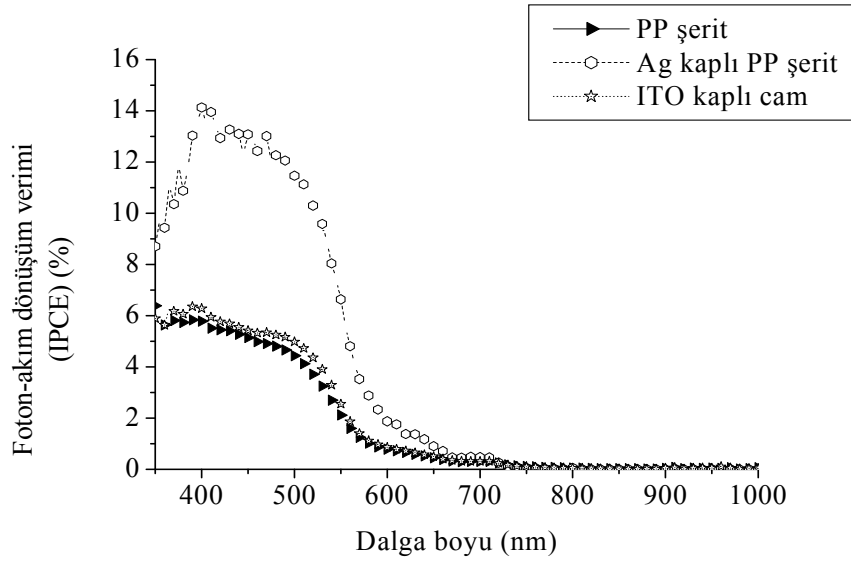
(b): H1: MDMO-PPV:PCBM ve H2:PEDOT:PSS

Şekil 5.45 100 nm Ag kaplı PP taşıyıcı şerit ve PP lif üzerinde Baytron PH 500 /MDMO-PPV:PCBM/LiF/Al piline ait enine kesiti gösteren SEM resimleri (50.000 büyütme)

#### 5.2.1.4 Foton-Akım Dönüşüm Verimi

PP şerit, Ag kaplı PP şerit ve ITO kaplı cam üzerinde gerçekleştirilen güneş pillerine ait IPCE (%) ölçümleri Şekil 5.46'da karşılaştırılmaktadır.





Şekil 5.46 Taşıyıcı tabaka/PP taşıyıcı şerit/ Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM /LiF/Al organik güneş pillerinin foton-akım dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.46 incelendiğinde en iyi IPCE(%) değeri %15 ile, 100 nm Ag kaplı PP şerit üzerindeki pillerle elde edildiği görülmektedir.

#### 5.2.1.5 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin Değerlendirilmesi

Fotovoltaik performans değerleri incelendiğinde (bakınız Tablo 5.5) 100 nm Ag kaplı PP şerit üzerinde üretilen organik fotovoltaik pillerin, diğer uyarlanmış sisteme yakın ve iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

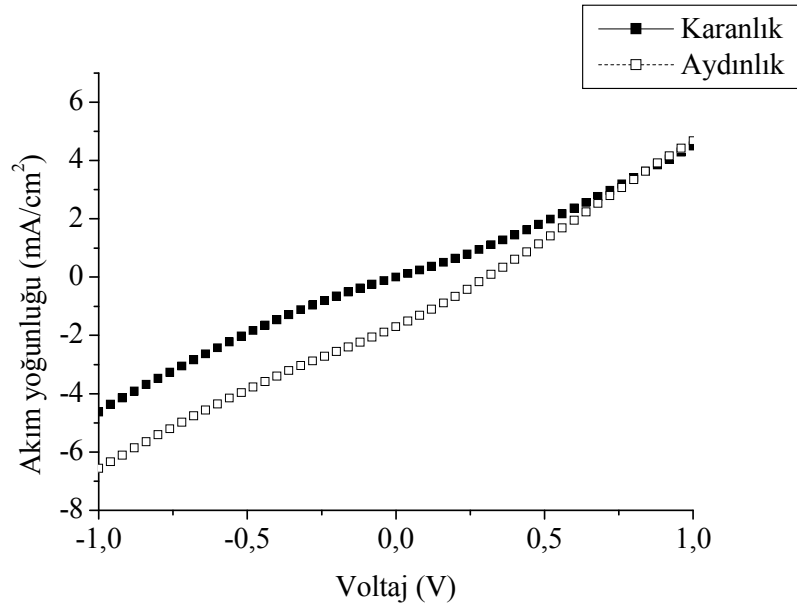
#### 5.2.2 Taşıyıcı Tabaka/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM /Al/Ag Pil Sistemine Ait Sonuçlar

MDMO-PPV:PCBM fotoaktif tabakası kullanılarak gerçekleştirilen çalışmanın bu kısmında, üç farklı tip taşıyıcı tabaka kullanılmıştır: PP şerit, PET ince film, ITO kaplı cam ve bunlar üst elektrot olarak çok ince yarı-şeffaf Al/Ag metal tabakası ile kaplanmıştır.

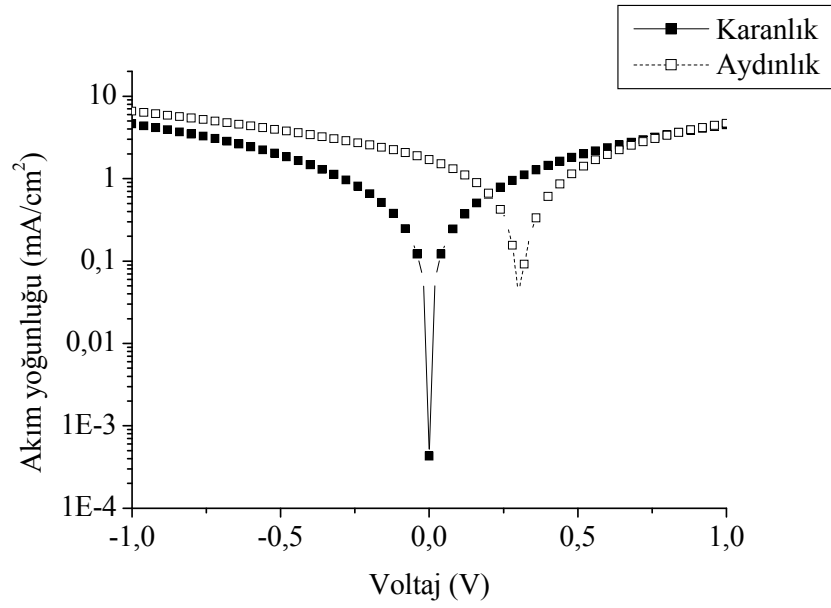
### 5.2.2.1 Akım-Voltaj Karakteristikleri

PP taşıyıcı şerit/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag sistemi şeklinde oluşturulan bu pil sistemi Şekil 5.47’de üst elektrot Ag tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafikleri doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,7 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 300 mV, FF: 0,279 ,  $\eta$  :%0,14.



(a)

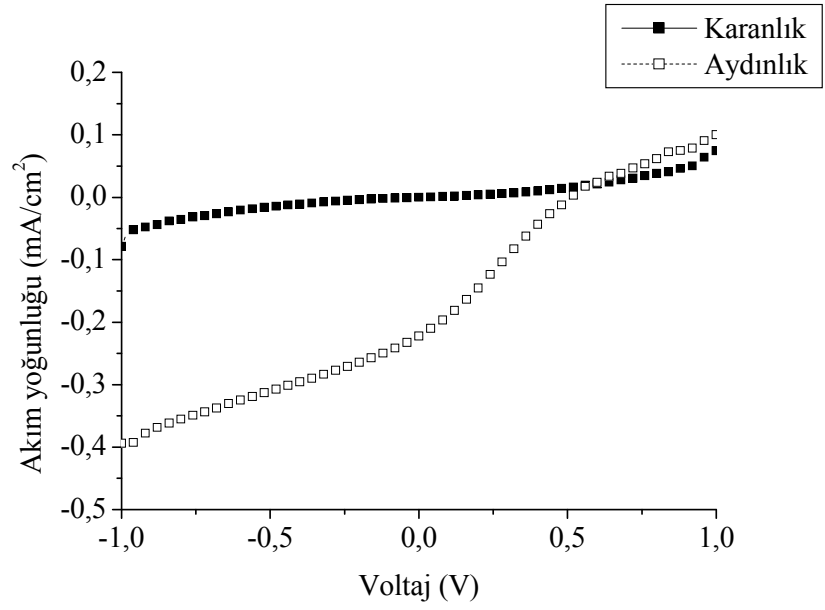


(b)

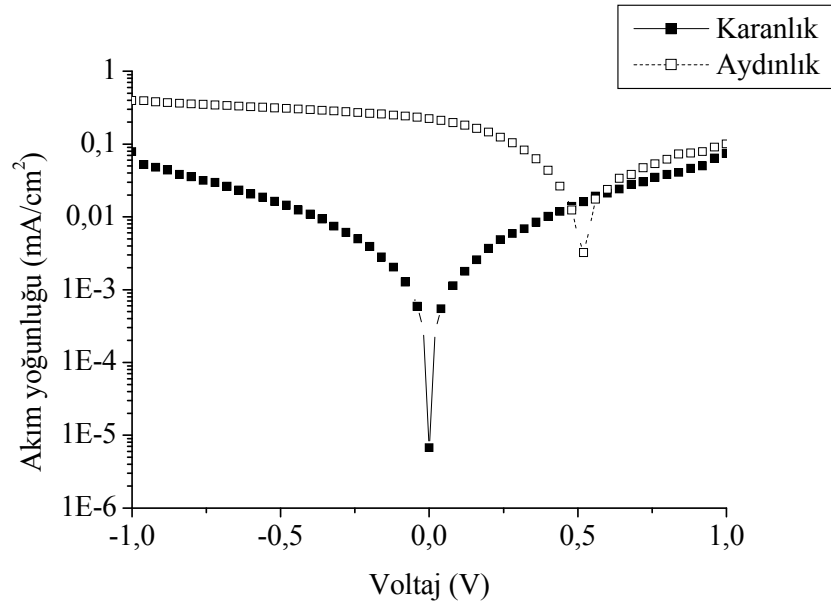
Şekil 5.47 PP şerit/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

PET folyo/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag pil sisteminde, Şekil 5.48'de üst elektrot Ag tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafikleri doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 0,22 mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$ : 500 mV, FF: 0,267,  $\eta$ : %0,03.



(a)

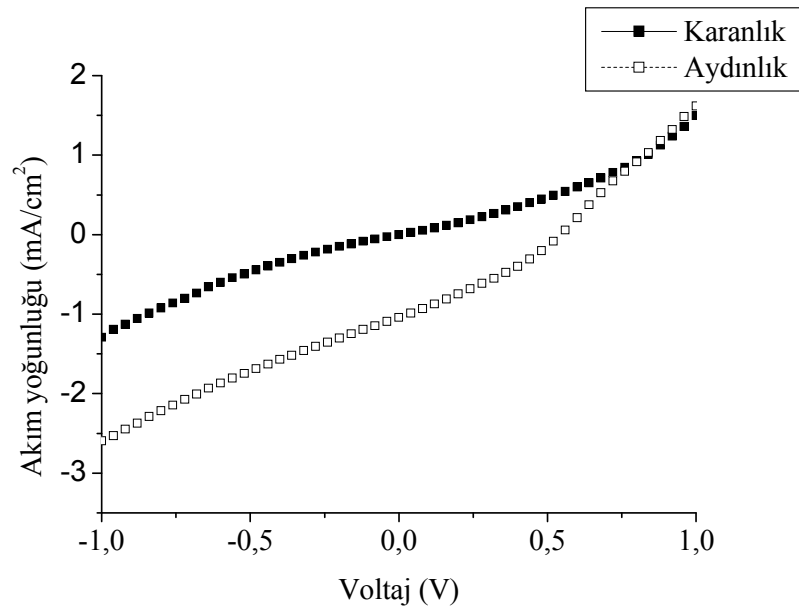


(b)

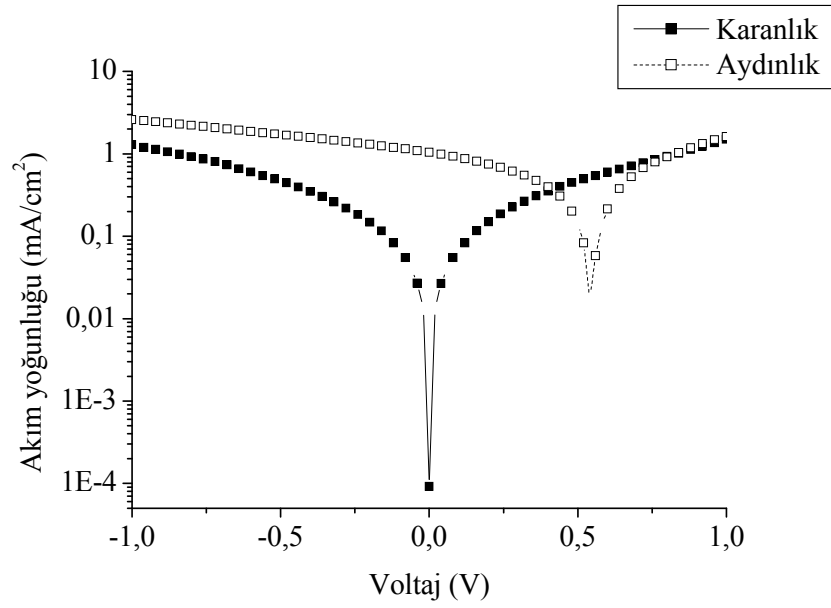
Şekil 5.48 PET folyo/Bayron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag güneş piline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği

ITO kaplı cam/Bayron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag pil sisteminde Şekil 5.49'da üst elektrot Ag tarafından ölçülerek elde edilen I-V grafikleri doğrusal (a) ve yarı-logaritmik (b) olarak görülmektedir.

Bu yapıdaki söz konusu pile ait fotovoltaiik performans değerleri,  $I_{sc}$ : 1,04  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}$ : 540 mV, FF: 0,313 ,  $\eta$  :%0,18.

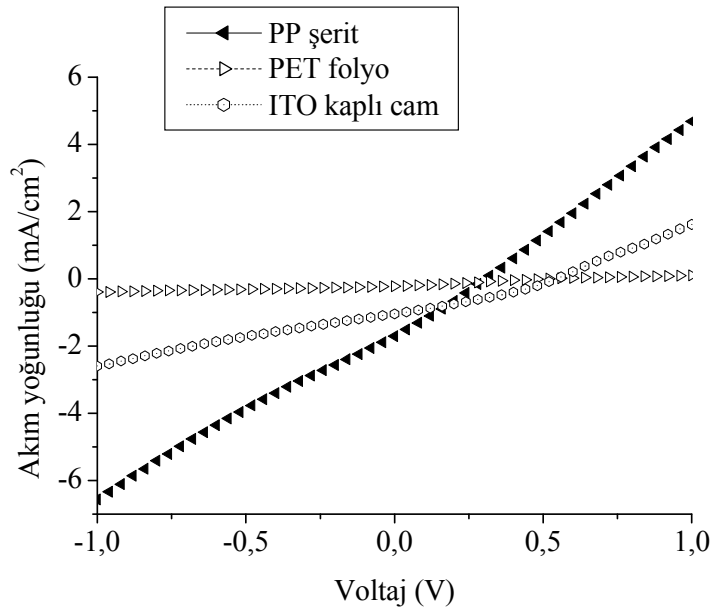


(a)

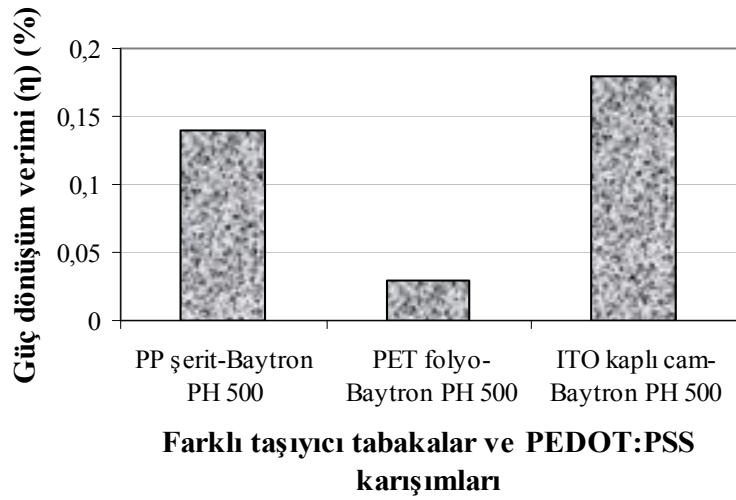


(b)

Şekil 5.49 ITO kaplı cam/Bayron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag güneş pilline ait lineer (a) ve yarı-logaritmik (b) akım yoğunluğu/voltaj grafiği



Şekil 5.50 Üretilen pillerin akım-voltaj özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.51 Üretilen pillerin güç dönüşüm verimlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.6, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51 üretilen polimer esaslı organik güneş pillerinin fotovoltaiik performanslarının karşılaştırmasını vermektedir. Fotovoltaiik şeritler için en iyi verim %0,14 olarak elde edilmiştir.

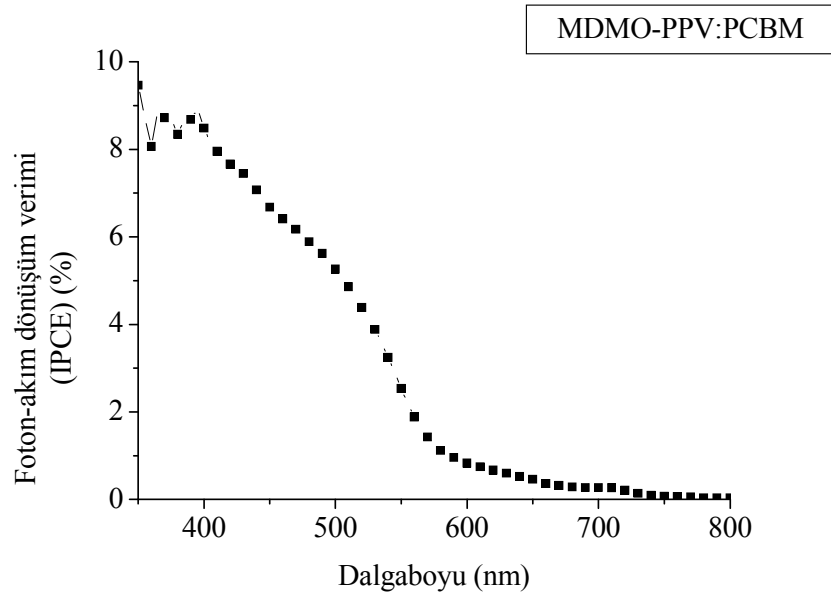
Tablo 5.6 Üretilen pillerin fotovoltaiik performanslarının karşılaştırılması

Taşıyıcı tabaka tipi	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	η (%)
PP şerit-Baytron PH 500	1,7	300	27,9	0,14
PET folyo-Baytron PH 500	0,22	500	26,7	0,03
ITO kaplı cam- Baytron PH 500	1,04	540	31,3	0,18

100 nm Ag ile kaplanan PP şerit üzerinde geliştirilen piller, MDMO-PPV:PCBM fotoaktif tabakası ve Al/Ag katot ile kısa devre olmuştur.

#### 5.2.2.2 Foton Akım Dönüşüm Verimi

Şekil 5.52'de PP taşıyıcı şerit üzerinde Al/Ag üst elektrot kullanılarak elde edilen güneş piline ait IPCE (%) grafiği verilmektedir.



Şekil 5.52 PP şerit/Baytron PH 500/MDMO-PPV:PCBM/Al/Ag polimer esaslı organik güneş pilinin foton-akım dönüşüm verimi

Şekil 5.52’de gösterilen pile ait IPCE(%) değeri %9 olarak gerçekleşmiştir.

### 5.2.2.3 Kullanılan Farklı Taşıyıcı Tabakaların Fotovoltaik Performansa Etkilerinin İncelenmesi

Çalışmada, katot olarak Al/Ag metal tabakası kullanılmış şerit üzerinde üretilen fotovoltaik pilin özellikleri, PET folyo ve ITO kaplı cam üzerinde üretilen pillerle karşılaştırılmıştır. ITO kaplı camın taşıyıcı tabaka olarak kullanıldığı güneş pilin fotovoltaik performansı diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır (Tablo 5.6).



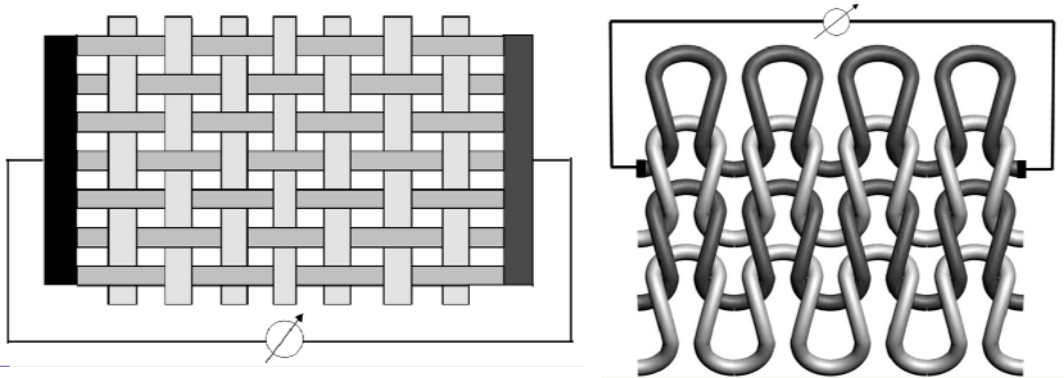
### 5.3. Fotovoltaik Tekstillerin Kullanım Biçimlerine Öneriler

Polimer esaslı organik güneş pili yapısı uygulanarak üretilebilecek tekstil esaslı malzemeler, lif ve şerit olarak (Şekil 5.53) tek başlarına kullanılacakları gibi tekstil yüzeyleri oluşturarak (örneğin dokuma ya da örme) da kullanılabilirler (Şekil 5.54). Fotovoltaik tekstil malzemeleri, iç ve dış ortamlarda, çeşitli dış giysiler, çadır, çanta, bavul vb. tekstil esaslı ürünlerde kullanılabilir.



Şekil 5.53 Elde edilecek lifin/şeritin tek başına görünümü

Elde edilebilecek tekstil lif ve şeritleri uygun bir şekilde bir araya getirilerek, fotovoltaik etki gösterecek dokuma, örme veya dokusuz yüzeyler oluşturabilir.



Şekil 5.54 Fotovoltaik lif veya şeritlerin kumaş yapısı içerisinde kullanılması

### 5.4 Maliyet Analizi

Bu tez çalışması boyunca kullanılan organik güneş pili ana malzemeleri, kimyasal madde satan şirketlerden küçük miktarlarda sağlanmıştır. Bu özel maddelerin fiyatları ile ilgili yaklaşık fiyat bilgisi Tablo 5.7'de verilmektedir (Bu tabloya

çözücüler, temizlik için kullanılan kimyasallar, makine ve enerji maliyetleri dahil edilmemiştir) (www.sigmaaldrich.com, 2009).

Tablo 5.7 Organik güneş pili oluşturmak için kullanılan kimyasal malzemelerinin fiyatları (Sigma-Aldrich, 2009)

Kimyasal madde adı	Miktarı (g)	Fiyatı (€)
PEDOT:PSS	25	136,50
P3HT	1	660
MDMO-PPV	1	504
PCBM	0,5	746

Elde edilen fotovoltaik şerit kullanılarak 1 m<sup>2</sup> photovoltaik tekstil yüzeyi oluşturmak için gerekli kimyasal malzeme maliyeti basitçe şöyle ifade edilebilir:

100 cm<sup>2</sup>'lik bir alan oluşturmak için kıvrım almış uzunlukları atı ve çözgü için 100'er cm olsun. Kıvrımlı uzunlukları ise atkı için 120 cm ve çözgü için 120 cm olsun. Sıklıkları atkı yönünde; 12 iplik/cm ve çözgü yönünde 15 iplik/cm olsun. Dolayısıyla gerekli atkı ipliği miktarı 1440 cm ve çözgü ipliği miktarı 1800 cm olarak hesaplanabilir. Toplam iplik uzunluğu 3240 cm'dir.

Ortalama malzeme kalınlığı 200 nm =200\*mm

Uzunluk 3240 cm = 32400 mm

Eni 4mm

$$\text{Hacim} = 4 * 200 * 10^{-6} * 32400 = 25,92 \text{ mm}^3$$

$$\rho_{\text{PCBM}} = 1,5 \text{ g/cm}^3 \text{ (Greens ve ark., 2004)}$$

$$\rho_{\text{P3HT}} = 1,33 \text{ g/cm}^3 \text{ (Erwin ve ark., 2002)}$$

$$\text{Kaplanan malzeme yoğunluğu} = 1,5 * 0,8 + 1,33 * 1 = 2,53 / 1,8 = 1,4056 \text{ g/cm}^3$$

P3HT:PCBM karışımı için;

$$d = 1,4056 \text{ g/cm}^3 = 1,4056 \text{ mg/mm}^3$$

$$\text{Gerekli madde miktarı} = 36,432 \text{ mg (P3HT:PCBM)}$$

P3HT:PCBM ise 1:0,8 oranında karıştırıldı. Bu durumda,  
20,24 mg P3HT ve 16,192 mg PCBM şeritler üzerine tek yönlü kaplanır. Eğer daldırma yöntemi kullanılırsa, gerekli malzeme miktarı iki katına çıkacaktır. Bu durumda,

40,48 mg P3HT ve 32,384 mg PCBM şeritler üzerine kaplanır.

P3HT maliyeti;

$660 \cdot 28,80 / 1000 = 26,717 \text{ €}$  iki yönlü kaplama

PCBM maliyeti;

$746 \cdot 32,384 / 500 = 48,317 \text{ €}$

PEDOT:PSS için;

Hacim =  $4 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \cdot 32400 / 2 = 12,96 \text{ mm}^3$

$d = 1,011 \text{ g/cm}^3 = 1,011 \text{ mg/mm}^3$

Gerekli madde miktarı = 13,10 mg (PEDOT:PSS) tek yöne kaplama

İki yöne kaplama miktarı =  $13,10 \cdot 2 = 26,20$

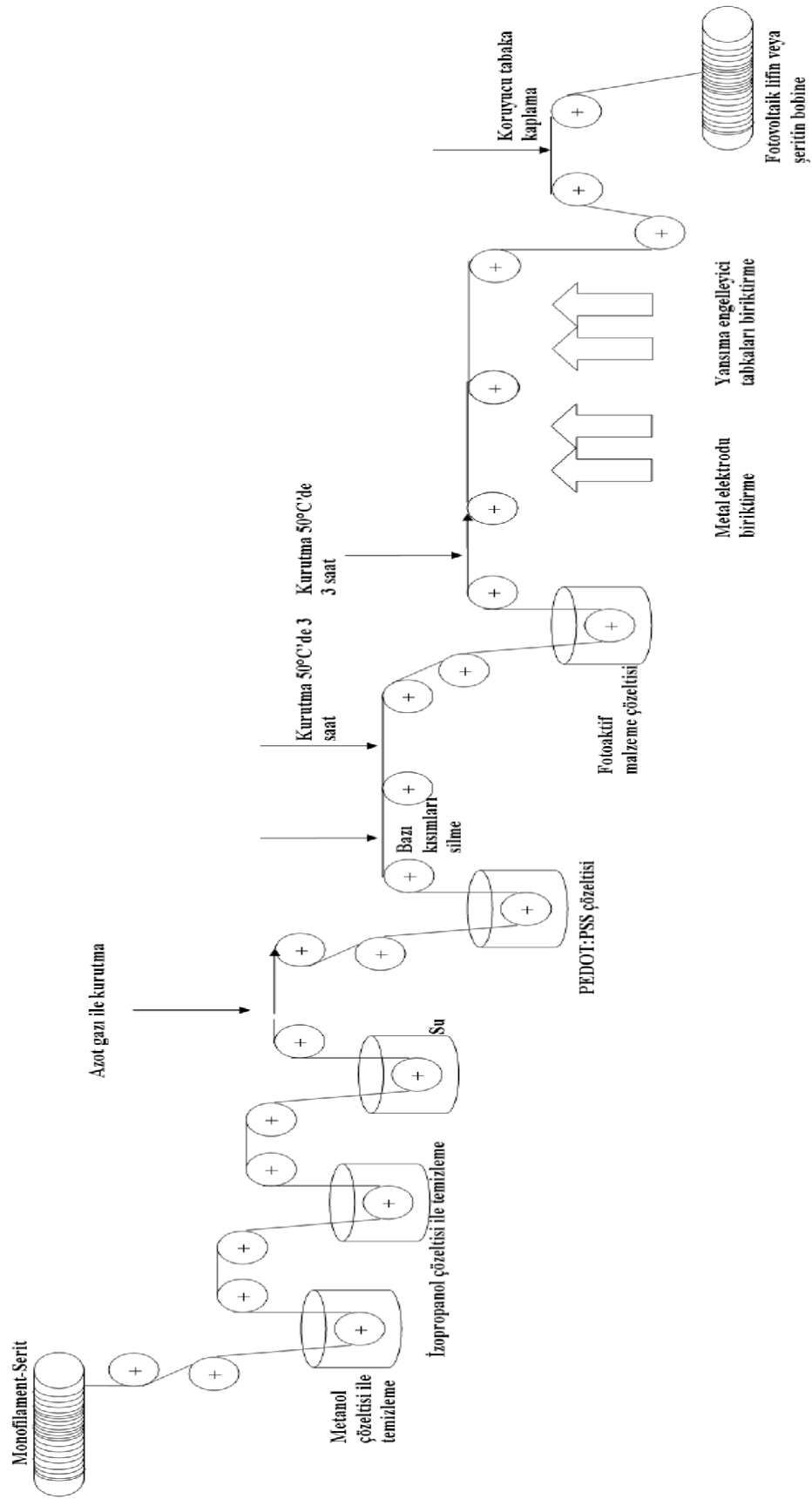
PEDOT:PSS'nin maliyeti;

$13,10 \cdot 136,50 / 25000 = 0,072 \text{ €}$  tek yön için

$0,072 \cdot 2 = 0,144 \text{ €}$  çift yön maliyeti

## 5.5 Fotovoltaik Liflerin Seri Üretimi İçin Öneriler

Fotovoltaik monofilament veya şeritlerin seri üretim aşamaları ve gerekli işlemler Şekil 5.55'de gösterildiği gibi önerilmektedir.



Şekil 5.55 Fotovoltaik monofilament veya şerit için üretim akış şeması önerisi

## BÖLÜM ALTI

### GENEL SONUÇLAR, ÇALIŞMANIN ÖZGÜN YÖNLERİ VE ÖNERİLER

#### 6.1 Genel Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, gelecekte endüstriyel tekstil ürünlerinde veya günlük giysilerde yer alabilecek, tek başına veya kumaş içerisinde kullanılacak fotovoltaiik etki gösteren polipropilen esaslı monofilament ve şerit yapıları geliştirilmiştir.

Çalışmada, farklı taşıyıcı tabakalar üzerinde iki farklı fotoaktif malzemenin, farklı üst ve alt elektrotlarla birlikte kullanılması ile elde edilen fotovoltaiik yapıların özellikleri incelenmiştir. Fotoaktif malzeme olarak P3HT:PCBM ve MDMO-PPV:PCBM karışımları, alt elektrot olarak düşük ve yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS'ler, Ag metal tabakası ve CNT:PANI karışımı ile birlikte PEDOT:PSS karışımları, üst elektrot olarak ise Al, LiF/Al ve Al/Ag ince metal tabakaları kullanılmıştır. Fotovoltaiik tekstiller ile ilgili elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

##### ***6.1.1 P3HT:PCBM Kullanılan Fotovoltaiik Tekstillerden Elde Edilen Sonuçlar:***

10 nm Al metal tabakasının üst elektrot olarak kullanıldığı fotovoltaiik şeritlerde, yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS karışımının kullanıldığı pillerde en yüksek verim elde edilmiştir. Baytron PEKA ile, 0,47 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 480 mV açık devre voltajı ve %0,056 verim elde edilirken, Baytron PEKA:CNT-PANI ile, 0,028 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 200 mV açık devre voltajı ve %0,00146 verim ve Baytron PH 500 ile 1,40 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 300 mV açık devre voltajı ve %0,110 verim elde edilmiştir.

0,7 nm Lif ve 10 nm Al metal tabakasının üst elektrot ve yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS'nin alt elektrot olarak kullanıldığı fotovoltaiik tekstillerde, 100 nm Ag

tabakası kaplı PP şeritler üzerinde geliştirilen fotovoltaik yapılarda en yüksek verim elde edilmiştir. Bu yapıdaki fotovoltaik tekstil  $1,60 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı, 520 mV açık devre voltajı ve %0,33 verim göstermiştir. Sadece PP şerit ile  $1,04 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı, 580 mV açık devre voltajı ve %0,16 verim elde edilirken ve PP monofilament ile  $0,11 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı, 360 mV açık devre voltajı ve %0,01 verim elde edilmiştir. Referans olarak alınan ve tekstil esaslı güneş pilleri ile aynı yönden aydınlatılan ITO kaplı cam taşıyıcılı güneş pili ile ise  $1,12 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı, 620 mV açık devre voltajı ve %0,25 verim elde edilmiştir. 100 nm Ag kaplı fotovoltaik şeritler en yüksek foton-akım dönüşüm verimi (IPCE) değerini (%32) göstermişlerdir.

0,7 nm Lif ve 10 nm Al metal tabakasının üst elektrot ve farklı PEDOT:PSS:CNT-PANI karışımlarının alt elektrot olarak kullanıldığı fotovoltaik tekstillerde, en yüksek verim 100 nm Ag tabakası kaplı PP şeritler üzerinde geliştirilen fotovoltaik yapılarda elde edilmiştir. Bu yapı, 0,37 kısa devre akımı, 520 mV açık devre voltajı ve %0,06 verim vermiştir. Baytron PEKA:CNT-PANI kullanılan pil ile 0,08 kısa devre akımı, 360 mV açık devre voltajı ve %0,007 verim elde edilirken Baytron PH 500:CNT-PANI ile 0,43 kısa devre akımı, 220 mV açık devre voltajı ve %0,023 verim elde edilmiştir. Referans olarak alınan ve tekstil esaslı güneş pilleri ile aynı yönden aydınlatılan, Baytron PH 500:CNT-PANI kullanılan ITO kaplı cam taşıyıcılı güneş pili ile ise  $1,18 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı, 500 mV açık devre voltajı ve %0,18 verim elde edilmiştir.

3 nm Al ve 10 nm Ag metal tabakasının üst elektrot olarak kullanıldığı fotovoltaik şeritlerde, en yüksek verim, 100 nm Ag tabakası kaplı PP şeritler üzerinde geliştirilen yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS karışımının kullanıldığı pillerde gözlenmiştir. Bu yapı  $2,25$  kısa devre akımı, 520 mV açık devre voltajı ve %0,29 verim göstermiştir. Baytron PEKA ile  $1,40$  kısa devre akımı, 240 mV açık devre voltajı ve %0,09 verim elde edilirken ve Baytron PH 500 ile,  $1,07 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı, 500 mV açık devre voltajı ve %0,16 verim elde edilmiştir. Referans olarak kullanılacak olan ITO kaplı cam taşıyıcılı güneş pili ise kısa devre olmuştur. Yüksek iletkenlikli

PEDOT:PSS kullanılan şerit ve 100 Ag kaplı şerit yaklaşık %7 foton-akım dönüşüm verimi (IPCE) göstermiştir.

### **6.1.2 MDMO-PPV:PCBM Kullanılan Fotovoltaik Tekstillerden Elde Edilen**

#### **Sonuçlar:**

0,7 nm Lif ve 10 nm Al metal tabakasının üst elektrot ve yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS'nin alt elektrot olarak kullanıldığı fotovoltaik tekstillerde, 100 nm Ag tabakası kaplı PP şeritler üzerinde geliştirilen fotovoltaik yapılarda en yüksek verim elde edilmiştir. Bu yapıdaki fotovoltaik tekstiller, 1,28 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 400 mV açık devre voltajı ve %0,33 verim göstermiştir. Sadece PP şerit ile 0,98 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 760 mV açık devre voltajı ve %0,23 verim elde edilirken ve PP monofilament ile 0,26 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 300 mV açık devre voltajı ve %0,02 verim elde edilmiştir. Referans olarak alınan ve tekstil esaslı güneş pilleri ile aynı yönden aydınlatılan ITO kaplı cam taşıyıcılı güneş pili ile ise 1,33 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 740 mV açık devre voltajı ve %0,37 verim elde edilmiştir. 100 nm Ag kaplı fotovoltaik şeritler en yüksek foton-akım dönüşüm verimi (IPCE) değerini (%15) göstermişlerdir.

3 nm Al ve 10 nm Ag metal tabakasının üst elektrot ve yüksek iletkenlikli PEDOT:PSS'nin alt elektrot olarak kullanıldığı fotovoltaik tekstillerde, PP şeritler üzerinde geliştirilen fotovoltaik yapılarda en yüksek verim elde edilmiştir. Bu yapıdaki fotovoltaik tekstil 1,7 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 300 mV açık devre voltajı ve %0,14 verim göstermiştir. Referans olarak alınan ve tekstil esaslı güneş pilleri ile aynı yönden aydınlatılan ITO kaplı cam taşıyıcılı güneş pili ile ise 1,04 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akımı, 540 mV açık devre voltajı ve %0,18 verim elde edilmiştir. 100 nm Ag kaplı şeritler ile yapılan denemeler kısa devre olmuştur. Fotovoltaik şeritler için en yüksek foton-akım dönüşüm verimi (IPCE) %9 olarak gerçekleşmiştir.

Bu tez çalışmasında, bilinen cam güneş pilleri için uygulanan yöntem, malzeme ve cihazlar, tekstil materyallerine göre uyarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, polimer esaslı organik güneş pillerinin esnek tekstil uygulamaları

için uygun olduğu görülmektedir. 100 nm Ag kaplanmış şeritler ile imal edilen güneş pilleri, diğer şerit ve monofilamentlere göre daha yüksek fotovoltaik performans göstermiştir.

Genel olarak, verimleri, günümüzde kullanılan malzemeler ve yöntemler nedeniyle düşük olmasına rağmen, fotovoltaik liflerin ve tekstillerin, önümüzdeki yıllarda, kullanılan organik malzemelerin iyileştirilmesi, mevcut yöntemler üzerinde düzenlemeler yapılması ve yeni uygulama tekniklerinin geliştirilmesi ile daha da iyi sonuçlar vermesi ümit edilmektedir.

## 6.2 Çalışmanın Özgün Yönleri

- Literatür incelendiğinde, araştırmacılar taşıyıcı tabaka olarak cam, plastik folyolar veya optik cam liflerini kullandığını, ancak gerçek tekstil malzemeleri ile çalışma yapmadıklarını görmekteyiz. Bu tez çalışmasında ise, sentetik tekstil malzemesi olan polipropilen monofilament ve şeritler kullanılmış, elde edilen fotovoltaik değerler, standart cam güneş pilleri ve plastik folyolar ile karşılaştırılmıştır.
- Tekstille ilgili çalışmaların pek çoğunda, fotovoltaik etkiyi oluşturacak ışık ya optik liflerdeki gibi lifin içinden geçecek ya da cam ya da plastik taşıyıcı tabakanın altından gelecek şekilde planlanmıştır. Oysa, tekstil malzemelerinin genelde şeffaf olmadıkları göz önünde tutularak, bu çalışmadaki cihaz tasarımlarında, fotovoltaik etkiyi oluşturacak ışık, dış ortamdan veya üst yüzeyden gelecek biçimde planlanmıştır.
- Güneş pilleri ile ilgili önceki çalışmalarda, ağırlıklı olarak cam üzerindeki yapılar konu alındığından, araştırmacılar, herhangi bir ek malzeme kullanmamışlardır. Fotovoltaik etki için kullanılan kimyasal maddelerin, tekstil malzemelerine uygun biçimde kaplanması için bu çalışmada,



iletkenliği arttırıcı DMSO ve tekstil yüzeyinin ıslanmasını kolaylaştırıcı TritonX-100 maddeleri kullanılmıştır.

- Önceki güneş pili çalışmalarında, araştırmacılar, kırılđan, doğada sınırlı miktarda bulunan ve uygulama işlem aşamaları sorunlu ve zor olan ITO alt elektrodu kullanmışlardır. Genelde de, ITO, cam taşıyıcı tabakalara kaplı biçimde piyasadan temin edilmektedir. Tekstil materyallerinin kullanıldığı bu çalışmada ise, ITO'nun yerini alması için, PEDOT:PSS, PEDOT:PSS-CNT:PANI karışımı ve 100 nm Ag tabakası üştünde PEDOT:PSS anot olarak kullanılmıştır.
- Güneş pili üretimini konu alan çalışmalarda, üst elektrot (katot) genellikle geçirgen değildir (~100nm). Bu tez çalışmasında ise, ışığın fotoaktif tabakaya ulaşabilmesi için yarı-şeffaf üst elektrot tasarımı kullanılmıştır (~10 nm).

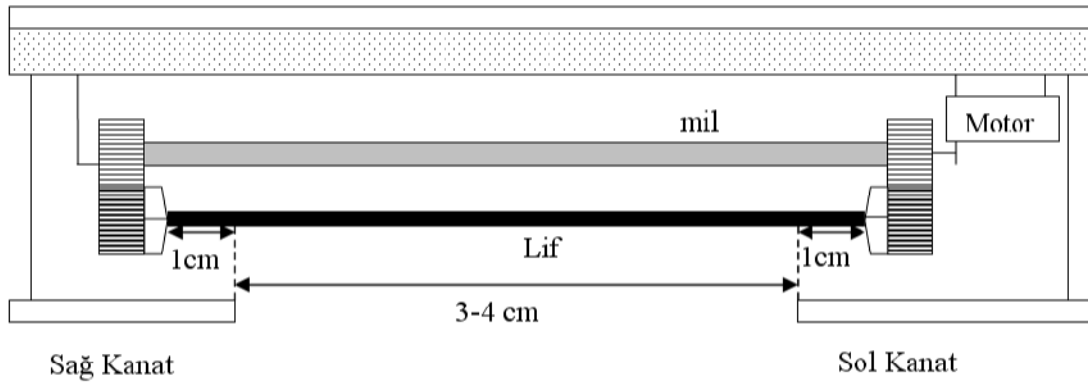
### 6.3 Öneriler

Bu çalışmada, polimer esaslı organik güneş pillerinin tekstil lif ve şeritlerine uygulanması üzerine çalışılmıştır. şu an verimleri geleneksel inorganik (özellikle silikon) esaslı güneş pillerine göre düşük olmasına rağmen, organik güneş pillerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gittikçe daha da hız kazanmaktadır. Özellikle, son yıllarda, kolay işlem, düşük maliyet ve esnek yapılara uygulanabilirlik gibi avantajlarından dolayı çok ilgi çekmektedir. Kullanılabilir üşünlere ulaşmak için, bu araştırma ile ilk adımı atılmış olan fotovoltaik tekstil yapıları ile ilgili çalışmalara devam edilmesi ve mevcut yapıların optimize edilmesi gerekmektedir.

Fotovoltaik tekstiller ile ilgili yapılacak geliştirme ve uygulama çalışmalarında aşağdaki noktalar göz önünde bulundurulabilir:

- İleriki alışmalar için örneklere özellikle enine kesiti yuvarlak liflere, metal alt ve üst elektrotların vakumda ısı ile buharlaştırma makinası içinde daha

kolay kaplanması için mevcut makina içine bir parça monte edilmesi düşünülmektedir. Şekil 6.1’de bu cihazın taslak resmi gösterilmektedir. Bu cihazdaki kanatlar, örneği döndürme mili ve sıralı açma-kapama mekanizmaları ile vakumda ısıyla buharlaştırma yöntemi kullanılarak tüm fotovoltaik yapı malzemelerinin tekstil lifi üzerine sırayla buharlaştırılması da sağlanabilir.



**Şekil 6.1** Fotovoltaik liflerin tüm yüzeylerinin tamamen kaplanması için termal buharlaştırma cihazı içerisine monte edilebilecek sistem

- Karışım heteroeklem güneş hücrelerinin spektral aralığını arttırmak için düşük bant aralıklı malzemeler ( $E_g < 1,8eV$ ) kullanılması, yakalanan foton miktarını arttırabilir. İleriki çalışmalarda, ticari olarak mevcut olacak bu tip malzemelerin kullanılması tavsiye edilir.
- Yüzey düzgünlüğü, ışık alımını ve fotovoltaik performansı etkilemektedir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda, daha iyi yüzey düzgünlüğüne sahip bir tekstil malzemesi ile çalışılmasının daha iyi sonuç vereceği tahmin edilmektedir.
- Üst ve alt metal elektrotların vakumda buharlaştırma ile kaplanması sırasında, buharlaştırma hızı ve miktarı, fotovoltaik pil performansını etkilemektedir ve iyi ayarlanmadığı takdirde kısa devrelere sebep olmaktadır. Özellikle üst elektrotların kaplanmasında, vakumda buharlaştırma yerine kullanılabilecek başka yöntemlerin (özel baskı yöntemleri gibi) araştırılması ve uygulanması, fotovoltaik performans açısından daha iyi sonuçlar verebilir.

Geliştirilebilir organik esaslı fotovoltaik tekstiller, çok ilgi çekicidir ve geleceğin hem modası hem gerekliliği olmaya adaydır. Yukarıdaki konuları da dikkate alan yeni çalışmalarla daha yüksek fotovoltaik performanslar elde edilebilecektir.

## KAYNAKLAR

- Altın, M. (2005). *Research on the architectural use of photovoltaic (PV) components in Turkey from the viewpoint of building shape*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Basım Yeri: İzmir.
- Ahlswede, E., Mühleisen, W., bin Moh Wahi, M.W., Hanisch, J. ve Powalla, M. (2008) Highly efficient organic solar cells with printable low-cost transparent contacts. *Appl. Phys. Lett.* 92, 143307.
- Arias, A.C., Granström, M., Petritsch, K. ve Friend, R.H. (1999). Organic photodiodes using polymeric anodes. *Synthetic Metals*, 102 (1-3), 953-954.
- Avrupa Fotovoltaik Endüstrisi Kurumu [EPIA]. (2008) *Solar generation V-2008, global market outlook for photovoltaics until 2012*. 10 Şubat 2009, [www.epia.org/fileadmin/EPIA\\_docs/publications/epia/EPIA\\_\\_MarketPublication\\_18feb.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/publications/epia/EPIA__MarketPublication_18feb.pdf).
- Baps, B., Eber-Koyuncu, M. ve Koyuncu, M. (2002). Ceramic based solar cells in fiber form. *Key Engineering Materials*, 206 (2), 937-940.
- Bart, J.C.J. (Ed.). (2005). *Additives in polymers: Industrial analysis and applications*. New York: Wiley.
- Berson, S., de Bettignies, R., Bailly, S. ve Guillerez, S. (2007). Poly(3-hexylthiophene) fibers for photovoltaic applications. *Adv. Funct. Mater.*, 17, 1377-1384.
- Bisquert, J., Garcia-Belmonte, G., Munar, A., Sessolo, M., Soriano, A. ve Bolink, H.J. (2008) Band unpinning and photovoltaic model for P3HT:PCBM organic bulk heterojunctions under illumination. *Chemical Physics Letters*, 465 (1-3), 57-62.

- Borsenberger, P. M.; Weiss, D. S.; Borsenberger, M. B. *Organic Photoreceptors for Xerography*. Marcel Dekker Inc.: New York, 1998.
- Brabec, C. J.; Cravino, A.; Meissner, D.; Sariciftci, N. S.; Fromherz, T.; Minse, M.; Sanchez, L.; Hummelen, J. C. (2001b). Origin of the open circuit voltage of plastic solar cells. *Adv. Funct. Mater.* *11*, 374.
- Brabec, C., Dyakonov, V., Parisi, J. ve Sariciftci, N.S. (Ed.). (2003). *Organic photovoltaics: concepts and realization*. New York: Springer.
- Brabec, C.J., Sariciftci, N.S. ve Hummelen, J.C. (2001). Plastic Solar Cells, *Adv. Funct. Mater.* *11*(1), 15-26.
- Brabec, C. J., Shaheen, S. E., Winder, C., Sariciftci, N. S. ve Denk, P. (2002). Effect of LiF/metal electrodes on the performance of plastic solar cells. *Applied Physics Letter*, *80*(7), 1288-1290.
- Brabec, C., Zerza, G., Cerullo, G., De Silvestri, S., Luzatti, S., Hummelen, J. C., Sariciftci, S. (2001a). Tracing photoinduced electron transfer process from a polymer chain to a fullerene moiety in real time. *Chem. Phys. Lett.*, *340*, 232.
- Bube, R.H. (1960). *Photoconductivity of Solids*. New York: Wiley.
- Carrasco-Orozco, M., Tsoi, W.C., O'Neill, M., Aldred, M.P., Vlachos, P., Kelly ve S.M. (2006). New photovoltaic concept: liquid-crystal solar cells using a nematic gel template. *Advanced Materials*, *18* (13), 1754-1758.
- Carter, J.C., Grizzi, I., Heeks, S.K., Lacey, D.J. Latham, S.G., May, P.G., ve diğer. (1997). Operating stability of light-emitting polymer diodes based on poly(*p*-phenylene vinylene). *Appl. Phys. Lett.*, *71* (1), 34.

Chandrasekhar, S. (1992). *Liquid Crystals* (2. baskı). Cambridge: Cambridge University Press.

Chittibabu, K., Eckert, R., Gaudiana, R., Li, L. , Montello, A., Montello, E., ve diğer. (2005). Photovoltaic fibers. Patent US 6,913,713 B2. 30 Ocak 2007, [www.freepatentsonline.com/6913713.html](http://www.freepatentsonline.com/6913713.html).

Collings, P.J. and Hird, M. (1997). *Introduction to Liquid Crystals*. Bristol, PA: Taylor & Francis.

Comparison for PEDOT:PSS, and ITO, 1 Temmuz 2009, [www.clevios.com](http://www.clevios.com).

Çelik, A. Demir, A. ve Bozkurt, Y. (2008). Recent Developments in Flexible Solar Cells. *Nonlinear Optics and Quantum Optics*, 38, 175–190

De Gennes, P.G. ve Prost, J. (1993). *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford: Clarendon Press. ISBN 0-19-852024-7.

Dittmer, J.J., Marseglia, E.A. ve Friend, R.H. (2000). Electron trapping in dye/polymer blend photovoltaic cells. *Adv. Mater.*, 12 (17), 1270-1274.

Elektrik İdaresi Etüt Müdürlüğü [EİE]. (2008) Yenilenebilir enerji kaynakları, 10 Şubat 2009, [www.eie.gov.tr/turkce/gunes/gunespv.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/gunespv.html)

*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, (b.t). 20 Ocak 2009, [www.enerji.gov.tr/index.php?sf=webpages&b=gunes&bn=233&hn=12&nm=384&id=387](http://www.enerji.gov.tr/index.php?sf=webpages&b=gunes&bn=233&hn=12&nm=384&id=387).

Erwin, M. M., McBride, J., Kadavanich, A.V., ve Rosenthal, S.J. (2002). Effects of impurities on the optical properties of poly-3-hexylthiophene thin films. *Thin Solid Films*, 409, 198–205

- Forrest, S. (2003). Organic photovoltaic devices. Publication No: US 006657378B2, 30 Haziran 2008, [www.freepatentsonline.com/6657378.html](http://www.freepatentsonline.com/6657378.html).
- Frohne, H., Shaheen, S., Brabec, C., Müller, D., Sariciftci, N. S. ve Meerholz, K. (2002). Influence of the anodic work function on the performance of organic solar cells. *Chem Phys Chem*, 9(3), 795.
- Gaynor, W. ve Peumans, P. (2008). Research Project PA/09, Flexible, organic solar cells for power generating textiles, 30 Haziran 2008, [http://peumans-pc.stanford.edu/research/solar-textile/index\\_html](http://peumans-pc.stanford.edu/research/solar-textile/index_html).
- Geens, W., Aernouts, T., Poortmans, J. ve Hadziioannou, G. (2002). Organic co-evaporated films of a PPV-pentamer and C<sub>60</sub>: Model systems for donor/acceptor polymer blends. *Thin Solid Films*, 403-404, 438.
- Geens, W., Martens, T., Poortmans, J., Aernouts, T., Manca, J., Lutsen, L. Ve diğer. (2004) Modelling the short-circuit current of polymer bulk heterojunction solar cells, *Thin Solid Films*, 451 –452, 498–502
- Goetzberger, A., Hebling, C. ve Schock, H.W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and Outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 40 (1), 1-46.
- Goetzberger, A., Luther, J. ve Willeke, G. (2002). Solar cells: past, present, future. *Solar Energy Materials & Solar Cell*, 74, 1–11
- Gonzalez, J.A. (2003). Smart & Interactive Textiles: Advances in Technology, 20 Aralık 2008, [www.ualberta.ca/~jag3/smart\\_textiles](http://www.ualberta.ca/~jag3/smart_textiles).
- Gonzalez, R. ve Pinto, N.J. (2005). Electrospun poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) fiber field effect transistor. *Synthetic Metals*, 15, 275-278.

- Graf, R.F. (1999). *Modern dictionary of electronics* (7th ed.). United States of America: Butterworth-Heinemann.
- Greczynski, C., Fahlman, M. ve Salaneck, W.R. (2001) An experimental study of poly(9,9-dioctyl-fluorene) and its interfaces with Al, LiF and CsF. *Applied Surface Science*, 175-176, 319-325.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y. ve Warta, W. (2008). Solar cell efficiency tables (version 32). *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 16, 435–440.
- Green, M.A., Emery, K., King, D.L., Igari, S. ve Warta, W. (2003). Solar Cell Efficiency Tables (Version 22). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11 (5) 347–352.
- Günes, S., Neugebauer, H. ve Sariciftci, N.S. (2007). Conjugated polymer-based organic solar cells. *Chemical Reviews*, 107, (4) 1324-1338.
- Heeger, A., ve Moses, D. (1997). *Primary Photoexcitations in Conjugated Polymers: Molecular Exciton Versus Semiconductor Band Model*. World Scientific: Singapore.
- Hiramoto, M., Fujiwara, H. ve Yokoyama, M. (1991). Three-layered organic solar cell with a photoactive interlayer of codeposited pigments. *Appl. Phys. Lett.*, 58 (10), 1061-1064
- Huang, J., Wang, X., Kim, Y., deMello, A.J., Bradley, D.D.C., ve deMello, J.C. (2006). High efficiency flexible ITO-free polymer/fullerene photodiodes. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 8, 3904–3908.
- Hugger, S., Thomann, R., Heinzl, T. ve Thurn-Albrecht, T. (2004). Semicrystalline morphology in thin films of poly(3-hexylthiophene). *Colloid & Polymer Science*, 282, 932.



Hung, L.S., Tang, C.W. ve Mason, M.G. (1997). Enhanced electron injection in organic electroluminescence devices using an Al/LiF electrode. *Appl. Phys. Lett.* 70(2), 152.

Hynek, J.S. , Campbell, J.R. ve Bryden, K. M. (2005). Application of digital textile printing technology to integrate photovoltaic thin film cells into wearables. *JTATM*, 4(3).

Im C., Tian W., Bassler H., Fechtenkotter A., Watson M.D., Mullen K. (2003). Exciton dissociation in poly-phenylene-vinylene derivative : perylenediimide and hexabenzocoronene derivative : perylenediimide blend systems. *Synthetic Metals.* 139(3):683-686.

Imahori, H. (2007). Electrophoretic deposition of donor–acceptor nanostructures on electrodes for molecular photovoltaics. *J. Mater. Chem.*, 17, 31 – 41.

IMEC: Organic photovoltaics, 30 Haziran 2007,  
[www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SR2005/html/142357.html](http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SR2005/html/142357.html)

İçli, S. ve Çubukçu, M. (2007). Turkey: PV Technology status and prospects, *I.E.A - PVPS Annual Report 2007*, 101-103, 23.02.2009.

İstanbul tekstil ve konfeksiyon ihracatçı birlikleri [İTKİB], *Teknik tekstiller* üzerine genel ve güncel bilgiler, 30 Aralık 2008,  
[www.itkib.org.tr/ihracat/DisTicaretBilgileri/raporlar/dosyalar/TEKNIK\\_TEKSTIL\\_RAPOR\\_2008.pdf](http://www.itkib.org.tr/ihracat/DisTicaretBilgileri/raporlar/dosyalar/TEKNIK_TEKSTIL_RAPOR_2008.pdf)

Janssen, R. (2006). Absorbing infrared light in polymer solar cells. *SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 11 Kasım 2008,  
<http://spie.org/documents/Newsroom/Imported/315/2006060315.pdf>

- Jong, D., Friedlein, M. P., Osikowicz, R. W., Salaneck, W. R. and Fahlman, M. (2006). Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy of Polymers. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 455, 193.
- Kamei, H., Ozawa, T. ve Katawama, Y. (1972). Photovoltaic effect in the nematic liquid crystal. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1972, 11, 1385-1386.
- Kim, J.S., Granström, M., Friend, R.H., Johansson, N., Salaneck, W.R., Daik, R., ve diğ er. (1998). Indium-tin oxide treatments for single- and double-layer polymeric light-emitting diodes: the relation between the anode physical, chemical, and morphological properties and the device performance. *J. Appl. Phys.*, 84, 6859.
- Konarka Power Plastic*, (b.t). 30 Haziran 2007, [www.konarkatech.com/](http://www.konarkatech.com/)
- Krebs, F. C., Biancardo, M., Winther-Jensen, B., Spanggard, H. ve Alstrup, J. (2006). Strategies for incorporation of polymer photovoltaics into garments and textiles. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90 (7-8), 1058-1067.
- Kushto, G.P., Kim, W. ve Kafafi, Z.H. (2005). Flexible organic photovoltaics using conducting polymer electrodes. *Appl. Phys. Lett.*, 86, 093502.
- Liu, J., Namboothiry, M. A. G. ve Carroll, D. L. (2007). Fiber-based architectures for organic photovoltaics. *Applied Physics Letters*, 90 (6), 063501
- Ma, W., Yang, C., Gong, X., Lee, K. Ve Heeger, A.J. (2005). Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology. *Advanced Functional Materials*, 15 (10), 1617-1622.
- Martens T., D'Haen J., Munters T., Beelen Z., Goris L., Manca J. Ve diğ er. (2003). Disclosure of the nanostructure of MDMO-PPV:PCBM bulk hetero-junction organic solar cells by a combination of SPM and TEM. *Synthetic Metals*, 138 (1), 243-247.

*Mbraun glove box*, (b.t). 1 Temmuz 2009, www.mbraun.com.

Messenger, R.A. ve Ventre, J. (Ed.). (2004). *Photovoltaic Systems Engineering*. Florida: Taylor & Francis.

Miranda, P.B., Moses, D. ve Heeger, A.J. (2001). Ultrafast studies of the photophysics of semiconducting polymers. *Phys. Rev. B* 64, 1201-1209.

Movahed, H.B., Hidalgo, R.C. ve Sullivan D.E. (2006). The phase transitions of semiflexible hard sphere chains liquid. *Phys. Rev. E* 73, 032701.

Mozer, A.J. ve Sariciftci, N.S. (2006). Conjugated polymer photovoltaic devices and materials. *C. R. Chimie*, 9, 568–577

Munters, T., Martens, T., Goris, L., Vrindts, V., Manca, J., Lutsen, L. Ve diğer. (2002). A comparison between state-of-the-art ‘gilch’ and ‘sulphinyl’ synthesised MDMO-PPV / PCBM bulk hetero-junction solar cells. *Thin Solid Films*, 403-404, 247-251

Nakazono, M., Kawai, T. ve Yoshino, K. (1994). Effects of heat treatment on properties of poly(3-alkylthiophene). *Chem. Mater.*, 6 (6), 864.

Nam, J., Park, S., Jung, W. ve Park, Y. (2006) Patent Application Pub.No.:US 2006/0185714 A1, (2006)

Nelson, J. (2002). Organic photovoltaic films. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6 (1), 87-95.

Nunzi, J.M. (2002). Organic photovoltaic materials and devices. *C.R. Physique*, 3 (4), 523–42.

O'Connor, B., Pipe, K.P. ve Shtein, M. (2008). Fiber based organic photovoltaic devices. *Appl. Phys. Lett.* 92, 193306, DOI:10.1063/1.2927533

O'Regan, B. ve Gratzel, M. (1991). Nature A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitised colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature*, 353, 737–740.

Offermans, T., Meskers, S.C.J. ve Janssen, R.A.J. (2007). Photoinduced absorption spectroscopy on MDMO-PPV:PCBM solar cells under operation. *Organic Electronics*, 8 (4), 325-335.

Ouyang, J., Chu, C.-W., Chen, F.-C., Xu, Q. ve Yang, Y. (2005). High-conductivity poly (3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) film and its application in polymer optoelectronic devices. *Adv. Funct. Mater.* 15, 203-208.

*P3HT*, (b.t). 1 Temmuz 2009, [www.riekemetals.com](http://www.riekemetals.com).

*P3HT, PCBM, MDMO-PPV, PEDOT:PSS*, (b.t). 30 Ocak 2009, [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com).

*P3HT, PCBM, MDMO-PPV, PEDOT:PSS*, (b.t). 1 Temmuz 2009, [www.hcstarck.com](http://www.hcstarck.com).

*P3HT, PCBM, MDMO-PPV, PEDOT:PSS, ITO*, (b.t). 30 Ocak 2009, [www.merck.de](http://www.merck.de).

*PCBM*, (b.t). 1 Temmuz 2009, [www.nano-c.com](http://www.nano-c.com).

Petritsch, K. (2000). *Organic solar cell architectures*, Cambridge & Graz.

*Power films*, (b.t). 30 Temmuz 2007, [www.powerfilmsolar.com/products/military/armytents/](http://www.powerfilmsolar.com/products/military/armytents/)

Rowell, M. W., Topinka, M. A., McGehee, M. A., Prall, H. J., Dennler, G., Sariciftci, N. S.; ve diğer. (2006). Organic solar cells with carbon nanotube network electrodes. *Appl. Phys. Lett.*, 88, 233506.

Sato, S. (1981). Photovoltaic Effects in MBBA Cells Containing Organic Dyes. *Jpn. J. Appl. Phys.* 20, 1989-1990.

Schmidt-Mende, L., Fechtenkötter, A., Müllen, K., Moons, E., Friend, R. H., MacKenzie, J.D. (2001). Self-organized discotic liquid crystals for high-efficiency organic photovoltaics. *Science*, 293 (5532), 1119 – 1122.

Schlatman, A.R., Floet, D.W., Hilberer, A., Garten, F., Smulders, P.J.M., Klapwijk, T.M., ve diğer. (1996). Indium contamination from the indium–tin–oxide electrode in polymer light-emitting diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 69, 1764.

Schubert, M.B. ve Werner, J.H. (2006). Flexible solar cells for clothing. *Materialstoday*, 9 (6), 42-50.

SEM (LEO Supra 35), (b.t). 1 Temmuz 2009, www.htskorea.com.

Shaheen, S. E., R. Radspinner, N. Peyghambarian ve G. E. Jabbour. (2001). Fabrication of bulk heterojunction plastic solar cells by screen printing. *Applied Physics Letters* 79(18), 2996-2998.

Shur, M.S. , Sinius, J., Gaska, R. ve Romyantsev, S.L. (2001). CuS thin films on flexible substrates. *Electronic Letters*, 8, 37.

Shur, M.S., Gaskiene, G., Romyantsev, S.L., Rimeika, R., S. Gaska, R. ve Sinius, J. (2001). Photovoltaic effect in threads covered with CdS. *Electronic Letters*, 16, 37.

Sluckin, T.J., Dunmur, D.A. ve Stegemeyer, H. (2004). *Crystals that flow - classic papers from the history of liquid crystals*. London: Taylor & Francis.

*Solar jacket project*, (b.t). 30 Temmuz 2007, [www.maier-sports.de/](http://www.maier-sports.de/)

*Solar jacket*, (b.t). 30 Temmuz 2007,  
[www.scottevest.com/pressrelease/sev\\_solar/images/Solar\\_Jacket\\_Scott\\_HI\\_RES.jpg](http://www.scottevest.com/pressrelease/sev_solar/images/Solar_Jacket_Scott_HI_RES.jpg)

Solar Spectrum, (b.t). 20 Şubat 2009,  
[www.globalwarmingart.com/wiki/Image:Solar\\_Spectrum.png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/Image:Solar_Spectrum.png).

*SOLTEX: Research Project PA/09, Flexible, organic solar cells for power generating textiles*, (b.t). 30 Haziran 2007,  
[www.belspo.be/belspo/fedra/proj.asp?l=en&COD=PA/09#docum](http://www.belspo.be/belspo/fedra/proj.asp?l=en&COD=PA/09#docum)

Spangaard, H. ve Krebs, F.C. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83, 125–146

Swanson, R.M. (2000). The promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 93-111.

Sunlight, (b.t). 20 Şubat 2009, [www.globalwarmingart.com](http://www.globalwarmingart.com).

Tang, C.W. (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 48, 183.

Tang, Li, H., Shinar, J., Resto, O. ve Weisz, S.Z. (1997). Effects of aquaregia treatment on indium tin oxide substrates on the behavior of double layered organic light emitting diodes. *Appl. Phys. Letters*, 70, 2441.

- Tao, X. (Ed.). (2001). *Smart fibres, fabrics and clothing*. London: Woodhead Publishing.
- Toivola, M., Ferenets, M., Lund, P. ve Harlin, A. (2008). Photovoltaic fiber. *Thin Solid Films*, 517 (8), 2799-2802.
- Tsuzuki, T. T., Shirota, J., Rostalski, J. ve Meissner, D. (2000). The effect of fullerene doping on photoelectric conversion using titanyl phthalocyanine and a perylene pigment. *Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*, 61(1), 1-8.
- Wallace, G., Spinks, G.M., Kane-Maguire, L.A.P. ve Teasdale P.R. (2008). *Conductive electroactive polymers : intelligent materials systems* (3.baskı). New York: CRC Press.
- Vanlaeke, P., Swinnen, A., Haeldermans, I., Vanhoyland, G., Aernouts, T., Cheyns, D. ve diğer. (2006). P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cells: Relation between morphology and electro-optical characteristics. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, 90, 2150
- Yamaura, J., Muraoka, Y., Yamauchi, T., Muramatsu, T. ve Hiroi, Z. (2003). Ultraviolet light selective photodiode based on an organic–inorganic heterostructure. *Appl. Phys. Lett.* **83**, (11), 2097.
- Yoshino, M., Mori, T., Mori, M., Takahashi, M., Yoshida, S. ve Shirasawa, K. (1997). Development of photovoltaic modules integrated with a metal curtain wall. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47, 1-4, 235-242.
- Zhang, C., Tong, S.W., Jiang, C., Kang, E.T., Chan, D. S. H. and Zhu, C. (2008). Efficient multilayer organic solar cells using the optical interference peak. *Appl. Phys. Lett.*, 93 (4), 043307.

Zhao, Y., Yuan, G., Roche, P. ve Leclerc, M. (1995). A Calorimetric Study of the Phase Transitions in Poly (3-hexylthiophene). *Polymer*, 36, 2211-2214.

Zhou, Y., Zhang, F., Tvingstedt, K., Barrau, S., Li, F., Tian, W., ve Inganäs, O. (2008). Investigation on polymer anode design for flexible polymer solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, 92, 233308.



## EKLER

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Kısaltma veya Simge</u>	<u>Açıklama</u>
$\lambda$	Dalga boyu
$\eta$	Toplam pil verimi
$C^\circ$	Selsiyus derece
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
CNT:PANI	Karbon nanotüp:polianilin
EG	Bant aralığı
eV	Elektron volt
FF	Dolum faktörü
fs	Femtosaniye ( $10^{-15}$ saniye)
HOMO	En yüksek enerjili dolu orbital
IPCE	Foton-akım dönüşüm verimi
$I_{sc}$	Kısa devre akımı
ITO	İndiyum katkılı kalay oksit
LiF	Lityum florid
LUMO	En düşük enerjili boş orbital
MDMO-PPV	poli[2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilenvinilen)
Nm	nanometre ( $10^{-9}$ metre)
ns	nanosaniye ( $10^{-9}$ saniye)
P3HT	Poli(3-hekziltiofen-2,5-dil))
PCBM	[6,6]-fenil-C61-bütirik asit metil ester
PEDOT:PSS	poli(3,4-etilendioksitiofen:poli(stiren sülfonik asit)
PET	Polietilen tereftalat
PP	Polipropilen
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
VB	Değerlik bandı
$V_{oc}$	Açık devre voltajı