

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORİKASİT KATKILANMIŞ VE GAMA IŞINI DOZLANMIŞ PEDOT:PSS  
TABAKASININ P3HT:PCBM ESASLI FOTOVOLTAİK HÜCRELERDE  
KULLANILMASI**

**ÖZLEM YAĞCI**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
FİZİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. ORHAN İÇELLİ**

**İSTANBUL, 2016**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BORİKASİT KATKILANMIŞ VE GAMA IŞINI DOZLANMIŞ PEDOT:PSS  
TABAKASININ P3HT:PCBM ESASLI FOTOVOLTAİK HÜCRELERDE  
KULLANILMASI**

Özlem YAĞCI tarafından hazırlanan tez çalışması 03.08.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ahmet GÜL  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Mustafa OKUTAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sait Eren SAN  
Gebze Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Serço Serkis YEŞİLKAYA  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Bu alışma, 2211-C ncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı ve 113-F-391 numaralı proje ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve 2013-01-01-DOP01 numaralı proje ile Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Doktora çalışmalarım süresince; tezin her aşamasında gerekli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, desteğini esirgemeyen ve büyük emeği geçen danışman Hocam Sn. Prof. Dr. Orhan İÇELLİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme komitesi üyeleri Hocalarım Sn. Prof. Dr. Ahmet GÜL, Sn. Prof. Dr. Serap GÜNEŞ, Sn. Doç. Dr. Ali ERDOĞMUŞ ve Sn. Doç. Dr. Mustafa OKUTAN'a tezimle ilgili çok değerli fikir ve önerileri için teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca, deney ortamının sağlanması, deneylerin yapılmasında sağladıkları destek ve değerli fikir ve önerileri için Sn. Prof. Dr. Serap GÜNEŞ, Sn. Doç. Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL, Sn. Prof. Dr. Yusuf YERLİ, Sn. Doç. Dr. Serço Serkis YEŞİLKAYA, Sn. Arş. Gör. Dr. Fatih ONGÜL ve Gebze Teknik Üniversitesi'nden Sn. Prof. Dr. Sait Eren SAN hocalarıma çok teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım Sn. Sinem TÜRKÖĞLU BOZAR, Sn. Arş. Gör. Mehmet KAZICI ve Gebze Teknik Üniversitesi'nden Sn. Arş. Gör. Betül CANIMKURBEY'ye çok teşekkür ederim.

Dozlama çalışmalarımızın yürütülmesine olanak sağlayan ve desteklerini esirgemeyen İstanbul Üniversitesi Onkoloji Enstitüsü'nden Sn. Yrd. Doç. Dr. Murat OKUTAN ve değerli çalışma ekibine çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince, beni burslarıyla (2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı) ve 113-F-391 numaralı proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve 2013-01-01-DOP01 numaralı Doktora Tez Projesi (DOP) ile destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP) teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen en değerli varlıklarım canım anneme, babama, kardeşlerime ve değerli eşlerine ve yeğenlerime tüm kalbimle teşekkür ediyorum, iyi ki varsınız...

Ağustos, 2016

Özlem YAĞCI

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------|------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                           | viii |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                        | x    |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                           | xii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                        | xiv  |
| ÖZET .....                                                   | xv   |
| ABSTRACT.....                                                | xvii |
| BÖLÜM 1                                                      |      |
| GİRİŞ.....                                                   | 1    |
| 1.1    Literatür Özeti .....                                 | 1    |
| 1.1.1    Güneş Enerjisinin Önemi .....                       | 1    |
| 1.1.2    Fotovoltaik Hücrelerin Gelişimi .....               | 2    |
| 1.1.3    Fotovoltaik Hücre Teknolojileri .....               | 3    |
| 1.1.4    Organik Fotovoltaik Hücreler .....                  | 4    |
| 1.1.5    P3HT:PCBM Esaslı Organik Fotovoltaik Hücreler ..... | 6    |
| 1.1.6    Gama Işını ve Organik Fotovoltaik Hücreler.....     | 13   |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                     | 15   |
| 1.3    Hipotez .....                                         | 15   |
| BÖLÜM 2                                                      |      |
| GENEL BİLGİLER.....                                          | 17   |
| 2.1    Organik Yarıiletkenler .....                          | 17   |
| 2.2    Alıcı (Acceptor)-Verici (Donor) Kavramı.....          | 21   |
| 2.3    Organik Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensibi ..... | 22   |
| 2.3.1    Eksiton (elektron-boşluk çifti) Üretimi .....       | 22   |
| 2.3.2    Eksiton Difüzyonu .....                             | 23   |
| 2.3.3    Eksiton Ayrılması .....                             | 24   |

|                           |                                                                                               |    |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4                     | Yüklerin Elektrotlara Taşınması .....                                                         | 24 |
| 2.4                       | Organik Fotovoltaik Hücre Konfigürasyonları .....                                             | 25 |
| 2.4.1                     | Tek Tabakalı Aygıtlar .....                                                                   | 26 |
| 2.4.2                     | Düzlemsel İki Tabakalı Aygıt Konfigürasyonu .....                                             | 26 |
| 2.4.3                     | Hacim Heteroeklem Aygıt Konfigürasyonu .....                                                  | 27 |
| 2.4.4                     | Tandem (Çok Eklemlı) Aygıt Konfigürasyonu .....                                               | 29 |
| 2.5                       | Organik Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu .....                                         | 30 |
| 2.5.1                     | Kısa Devre Akımı .....                                                                        | 31 |
| 2.5.2                     | Açık Devre Voltajı .....                                                                      | 32 |
| 2.5.3                     | Dolum Faktörü .....                                                                           | 33 |
| 2.5.4                     | Güç Dönüşüm Verimi (PCE) .....                                                                | 34 |
| 2.5.5                     | Dış kuantum verimi (EQE) .....                                                                | 36 |
| 2.6                       | Malzemeler .....                                                                              | 36 |
| 2.6.1                     | İndiyum Kalay Oksit (ITO) .....                                                               | 37 |
| 2.6.2                     | Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-Poly(styrenesulfonate)<br>(PEDOT:PSS) .....                  | 38 |
| 2.6.3                     | Poly(3-hexylthiophene):Phenyl-C61-butyric acid methyl ester<br>(P3HT:PCBM) .....              | 39 |
| 2.6.4                     | Bor .....                                                                                     | 41 |
| 2.6.4.1                   | Boraks (Tinkal) .....                                                                         | 43 |
| 2.6.4.2                   | Kolemanit .....                                                                               | 44 |
| 2.6.4.3                   | Üleksit .....                                                                                 | 44 |
| 2.6.4.4                   | Probertit .....                                                                               | 44 |
| 2.6.4.5                   | Kernit (Razorit) .....                                                                        | 44 |
| 2.6.4.6                   | Hidroborasit .....                                                                            | 44 |
| 2.6.4.7                   | Pandermit .....                                                                               | 45 |
| 2.6.4.8                   | Borikasit .....                                                                               | 45 |
| 2.6.5                     | Borikasit Elde Etme Yöntemleri .....                                                          | 46 |
| 2.6.5.1                   | Tinkalden Borikasit Üretimi .....                                                             | 46 |
| 2.6.5.2                   | Kolemanitten Borikasit Üretimi .....                                                          | 47 |
| 2.6.5.3                   | Borakslı Göl Sularından Borikasit Üretimi .....                                               | 48 |
| BÖLÜM 3                   |                                                                                               |    |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR ..... |                                                                                               | 49 |
| 3.1                       | Fotovoltaik Hücrelerin Üretilmesi .....                                                       | 49 |
| 3.1.1                     | Altlıkların Hazırlanması .....                                                                | 49 |
| 3.1.2                     | Deneyde Kullanılan Çözeltilerin ve İnce Filmlerin Hazırlanması .....                          | 50 |
| 3.1.2.1                   | Borikasit Katkılı PEDOT:PSS Karışımlarının Hazırlanması .....                                 | 50 |
| 3.1.2.2                   | P3HT:PCBM Karışımlarının Hazırlanması .....                                                   | 50 |
| 3.1.2.3                   | PEDOT:PSS:H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> Tabakası ve Fotoaktif Tabakanın Kaplanması .....     | 51 |
| 3.1.2.4                   | Metal Üst Elektrotun Kaplanması .....                                                         | 51 |
| 3.1.2.5                   | Düşük Doz Gama Işınına Maruz Bırakılan Fotovoltaik Hücrelerin<br>Hazırlanması .....           | 52 |
| 3.1.3                     | Üretilen Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonlarında Kullanılan<br>Deney Geometrileri ..... | 54 |

|                                |                                                                                                                      |           |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3.1                        | Elektriksel Karakterizasyonlar .....                                                                                 | 54        |
| 3.1.3.2                        | Optik Karakterizasyonlar .....                                                                                       | 54        |
| 3.1.3.3                        | Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonlar .....                                                                       | 56        |
| <b>BÖLÜM 4</b>                 |                                                                                                                      |           |
| <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b> |                                                                                                                      | <b>59</b> |
| 4.1                            | Farklı Oranlarda $H_3BO_3$ Katkılanmış PEDOT:PSS Tabakası İçeren Fotovoltaik Hücreler İle Elde Edilen Sonuçlar ..... | 60        |
| 4.1.1                          | Fotovoltaik Hücre Üretiminde Kullanılan İnce Filmlerin Karakterizasyonu.....                                         | 60        |
| 4.1.2                          | Üretilen Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu .....                                                               | 66        |
| 4.2                            | Gama Işını Uygulanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ Tabakası İçeren Fotovoltaik Hücreler İle Elde Edilen Sonuçlar .....       | 70        |
| 4.2.1                          | Fotovoltaik Hücre Üretiminde Kullanılan İnce Filmlerin Karakterizasyonu.....                                         | 71        |
| 4.2.2                          | Üretilen Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu .....                                                               | 76        |
| 4.3                            | Çalışmanın Özgün Yönleri .....                                                                                       | 78        |
| 4.4                            | Öneriler .....                                                                                                       | 79        |
| 4.5                            | Tez Çalışmaları Esnasında Yapılan Diğer Çalışmalar .....                                                             | 81        |
| 4.5.1                          | Projeler .....                                                                                                       | 81        |
| 4.5.2                          | Makaleler .....                                                                                                      | 83        |
| 4.5.3                          | Bildiriler .....                                                                                                     | 84        |
| 4.5.4                          | Patent .....                                                                                                         | 87        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>         |                                                                                                                      | <b>88</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>          |                                                                                                                      | <b>95</b> |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                    |                                               |
|--------------------|-----------------------------------------------|
| Å                  | Angström                                      |
| AM1.5 G            | Güneş spektrumunun standart spektral ışınlımı |
| c                  | Işık hızı                                     |
| °C                 | Santigrat                                     |
| D                  | Eksiton yayını                                |
| dk                 | Dakika                                        |
| e                  | Elementel yük                                 |
| E                  | Elektrik alan                                 |
| mA/cm <sup>2</sup> | Miliamper/Santimetre kare                     |
| E <sub>g</sub>     | Yasak enerji aralığı                          |
| eV                 | Elektro volt                                  |
| FF                 | Dolum faktörü                                 |
| fs                 | Femtosaniye                                   |
| g/cm <sup>3</sup>  | Gram/Santimetre küp                           |
| g/mol              | Gram/Mol                                      |
| Gy                 | Gray                                          |
| h                  | Planck sabiti                                 |
| I <sub>M</sub>     | Maksimum güç noktasındaki akım                |
| I <sub>sc</sub>    | Kısa devre akımı                              |
| I-V                | Akım -Voltaj                                  |
| J <sub>sc</sub>    | Kısa devre akım yoğunluğu                     |
| kJ/mol             | Kilojoule/Mol                                 |
| L <sub>D</sub>     | Difüzyon uzunluğu                             |
| mg/ml              | Miligram/Mililitre                            |
| μ                  | Mobility (hareketlilik)                       |
| n                  | Taşıyıcı yük yoğunluğu                        |
| nm                 | Nanometre                                     |
| ns                 | Nanosaniye                                    |
| P <sub>in</sub>    | Gelen ışığın güç yoğunluğu                    |
| P <sub>M</sub>     | Maksimum güç çıkış noktası                    |
| sn                 | Saniye                                        |
| τ                  | Eksitonun doğal ömrü                          |
| V                  | Volt                                          |

|            |                                               |
|------------|-----------------------------------------------|
| $V_M$      | Maksimum güç noktasındaki voltaj              |
| $V_{oc}$   | Açık devre voltajı                            |
| $W/m^2$    | Watt/Metre kare                               |
| $\gamma$   | Gama ışını                                    |
| $\lambda$  | Dalga boyu                                    |
| $1/\alpha$ | Organik maddelerin optik absorbsiyon uzunluğu |
| $2\theta$  | İki teta açısı                                |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|                                    |                                                      |
|------------------------------------|------------------------------------------------------|
| AFM                                | Atomik kuvvet mikroskobu                             |
| Al                                 | Alüminyum                                            |
| AgO <sub>x</sub>                   | Gümüş Oksit                                          |
| Au                                 | Altın                                                |
| B                                  | Bor                                                  |
| Bis-PCBM                           | Bis(1-[3-(methoxycarbonyl)propyl]-1-phenyl)-[6,6]C62 |
| C60                                | Buckminsterfulleren                                  |
| CdS                                | Kadmiyum Sülfür                                      |
| CdSe                               | Kadmiyum Selenid                                     |
| CdTe                               | Kadmiyum Tellür                                      |
| CIGS                               | Bakır İndiyum Galyum Diselenid                       |
| CPD                                | Lokal temas potansiyel farkı                         |
| CuPc                               | Bakır Ftalosiyanın                                   |
| Cu <sub>x</sub> S                  | Bakır Sülfid                                         |
| DSSC                               | Boya duyarlı fotovoltaiik hücre                      |
| EDOT                               | Etilendioksitiyofen                                  |
| EG                                 | Etilen Glikol                                        |
| EQE                                | Dış kuantum verimi                                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NPs | Demir (III) Oksit nanoparçacıklar                    |
| FTIR                               | Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi          |
| GaAs                               | Galyum Arsenide                                      |
| H <sub>2</sub> O                   | Su                                                   |
| H <sub>2</sub> Pc                  | H <sub>2</sub> -ftalosiyanın                         |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>     | Sülfürik asit                                        |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>     | Borikasit                                            |
| HCl                                | Hidroklorik asit                                     |
| HNO <sub>3</sub>                   | Nitrik asit                                          |
| HOMO                               | En Yüksek Enerjili Dolu Moleküler Orbital            |
| IR                                 | Kızılötesi                                           |
| ITO                                | İndiyum Kalay Oksit                                  |
| IQE                                | İç Kuantum Verimi                                    |
| LUMO                               | En Düşük Boş Moleküler Orbital                       |
| mbar                               | Milibar                                              |

|                               |                                                                                                             |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MDMO-PPV                      | Poly [2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene]                                           |
| Me-PTC                        | Perylenetetracarboxylic türevi                                                                              |
| MgPc                          | Magnezyum ftalosiyenin                                                                                      |
| MoO <sub>3</sub>              | Molibden Trioksit                                                                                           |
| MWCNT                         | Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler (Multi-Walled Carbon Nanotubes)                                               |
| NiO                           | Nikel (II) Oksit                                                                                            |
| OPV                           | Organik fotovoltaiik hücre                                                                                  |
| P3HT                          | Poly (3-hexylthiophene)                                                                                     |
| PCBM-60                       | Phenyl-C61 -butyric acid methyl ester                                                                       |
| PCBM-70                       | Phenyl-C71-butyric acid methyl ester                                                                        |
| PCPDTBT                       | Poly[2,6-(4,4-bis-(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta[2,1-b;3,4-b']dithiophene)-alt- 4,7-(2,1,3-benzothiadiazole)] |
| PCE                           | Güç dönüşüm verimliliği                                                                                     |
| PEDOT:PSS                     | Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrenesulfonate)                                                    |
| PPV                           | Poly(p-phenylene vinylene)                                                                                  |
| PSC                           | Polimer fotovoltaiik hücre                                                                                  |
| PV                            | Fotovoltaiik                                                                                                |
| RMS                           | Kuadratik Ortalama Pürüzlülük                                                                               |
| Rpm                           | Dakika başına dönüş                                                                                         |
| Sa                            | Ortalama yüzey pürüzlülüğü                                                                                  |
| SEM                           | Taramalı elektron mikroskobu                                                                                |
| Si                            | Silikon                                                                                                     |
| SKPM                          | Taramalı Kelvin prob mikroskobu                                                                             |
| SO <sub>3</sub> H             | Sülfonik Asit                                                                                               |
| TG/DTA                        | Termogravmetrik analiz                                                                                      |
| TiN                           | AFM iletken ucu                                                                                             |
| TW                            | Terawatt                                                                                                    |
| UV-VIS                        | Görünür bölge ve mor ötesi spektroskopisi                                                                   |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Vanadyum (V) Oksit                                                                                          |
| WO <sub>3</sub>               | Tungsten Trioksit                                                                                           |
| XPS                           | X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi                                                                         |
| XRD                           | X-Işınları Kırınım Difraktometresi                                                                          |

## ŞEKİL LİSTESİ

|             | Sayfa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 1. 1  | Organik fotovoltaiik hücrelerin gelişimindeki bazı önemli olaylar .....6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Şekil 1. 2  | Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan alıcı (acceptor) ve verici (donor) malzemelerin kimyasal yapısı .....7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 1. 3  | P3HT:PCBM esaslı organik fotovoltaiik hücrelerin gelişimindeki bazı önemli olaylar.....9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Şekil 2. 1  | OPV'lerin gerçekleştirmesi amaçlanan kritik üçgen: kararlılık, verim ve maliyet .....18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Şekil 2. 2  | Organik yarıiletkenlerin HOMO ve LUMO enerji seviyelerinin çizimi .....19                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Şekil 2. 3  | Çalışma koşulları altında elektron alıcı (acceptor) ve verici (donor)malzemeler ile aygıtın şematik gösterimi.....21                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Şekil 2. 4  | Hacim heteroeklem aygıtlarda fotoakım üretim mekanizmasının şematığı (i) Bir fotonun absorpsiyonu ile eksiton (elektron-boşluk çifti) üretimi. (ii) Alıcı (acceptor)-verici (donor) arayüzüne eksiton (elektron-boşluk çifti) difüzyonu. (iii) Yük çiftinin ayrılması. (iv) İlgili elektrotlara yük iletimi. (v) Yük toplanması. Bu süreçlerin aygıt üzerinde meydana geliş biçimi (sol) ve basitleştirilmiş enerji diyagramında meydana geliş biçimi (sağ) gösterilmektedir .....22 |
| Şekil 2. 5  | Çift tabakalı organik fotovoltaiik hücre yapısı .....27                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Şekil 2. 6  | Bir hacim heteroeklem fotovoltaiik hücre yapısı .....28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Şekil 2. 7  | Tandem organik fotovoltaiik hücre yapısı .....30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Şekil 2. 8  | Karanlıkta ve aydınlatma altındaki organik fotovoltaiik hücrelerin Akım-Voltaj ( $I - V$ ) karakteristiğı .....31                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 2. 9  | Dünyaya gelen güneş spektrumu .....35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Şekil 2. 10 | PSS ile katkılanmış PEDOT yapısı .....38                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Şekil 2. 11 | P3HT ve PCBM yapısı .....40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Şekil 2. 12 | Borikasit üretim süreci diyagramı .....47                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Şekil 3. 1  | ITO altlıkların temizlenmesinde kullanılan ultrasonik banyo .....50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Şekil 3. 2  | İnce filmlerin kaplanmasında kullanılan spin coater (döndürerek kaplama) cihazı .....51                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Şekil 3. 3  | Isıl buharlaştırma sistemi .....52                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Şekil 3. 4  | Gama ışını uygulamada kullanılan sistemin görüntüsü .....53                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Şekil 3. 5  | Test edilen fotovoltaiik hücrelerin aygıt yapısı .....53                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Şekil 3. 6  | Optik karakterizasyonlarda kullanılan deney geometrisi .....55                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3. 7  | FTIR ölçümlerinde kullanılan deney geometrisi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 55 |
| Şekil 3. 8  | XRD ölçümlerinde kullanılan deney geometrisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 56 |
| Şekil 3. 9  | Film kalınlıklarının ölçümünde kullanılan deney geometrisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 57 |
| Şekil 3. 10 | Yüzey görüntülerinin incelenmesinde kullanılan deney geometrisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 57 |
| Şekil 3. 11 | Sıcaklığa bağlı özelliklerin incelenmesinde kullanılan deney geometrisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 58 |
| Şekil 4. 1  | Katkısız ve farklı konsantrasyonlarda $H_3BO_3$ ile katkılanmış PEDOT:PSS ince filmlerinin FTIR spektrumları .....                                                                                                                                                                                                                                          | 60 |
| Şekil 4. 2  | (a) PEDOT:PSS, (b) 1,25 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS, (c) 5,00 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS, (d) ITO altlığının XRD grafiği.....                                                                                                                                                                                                                  | 61 |
| Şekil 4. 3  | ITO cam üzerine kaplanan (a) katkısız PEDOT:PSS, (b) PEDOT:PSS (1,25mg/ml $H_3BO_3$ ), (c) PEDOT:PSS(1,25 mg/ml $H_3BO_3$ )/PEDOT:PSS ince filmlerin AFM görüntüleri.....                                                                                                                                                                                   | 62 |
| Şekil 4. 4  | ITO cam üzerine kaplanan (a) katkısız PEDOT:PSS, (b) PEDOT:PSS (0,25 mg/ml $H_3BO_3$ ), (c) PEDOT:PSS(0,5 mg/ml $H_3BO_3$ ), (d) PEDOT:PSS (0,75 mg/ml $H_3BO_3$ ), (e) PEDOT:PSS (1 mg/ml $H_3BO_3$ ), (f) PEDOT:PSS (1,25 mg/ml $H_3BO_3$ ), (g) PEDOT:PSS (1,5 mg/ml $H_3BO_3$ ), (h) PEDOT:PSS (2 mg/ml $H_3BO_3$ ) ince filmlerin SEM görüntüleri..... | 63 |
| Şekil 4. 5  | (a) Katkısız, (b) 1,25 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS, (c) 5 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS ince filmi içeren PEDOT:PSS/P3HT:PCBM tabakalarının absorpsiyon eğrileri.....                                                                                                                                                                             | 64 |
| Şekil 4. 6  | Katkısız ve farklı konsantrasyonlarda Borikasit katkılanmış PEDOT:PSS filmlerinin iletkenlik değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 65 |
| Şekil 4. 7  | Farklı oranlarda $H_3BO_3$ içeren PEDOT:PSS tabakası ile hazırlanan organik fotovoltaiik hücrelerin $I - V$ eğrileri.....                                                                                                                                                                                                                                   | 67 |
| Şekil 4. 8  | (1)Katkısız, (2) 1,25 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS, (3) 5 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS filmleri ile hazırlanmış organik fotovoltaiik hücrelerin dış kuantum verimi .....                                                                                                                                                                          | 68 |
| Şekil 4. 9  | Katkısız ve 1,25 mg/ml $H_3BO_3$ katkılanmış PEDOT:PSS filmleri ile hazırlanmış organik fotovoltaiik hücrelerin yaşam süresi.....                                                                                                                                                                                                                           | 69 |
| Şekil 4. 10 | (a) ITO, (b) katkısız PEDOT:PSS film (c) 1,25 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS, (d) 5 mg/ml $H_3BO_3$ katkılı PEDOT:PSS filmlerinin Magnitüd -Yüzey potansiyeli eğrileri.....                                                                                                                                                                              | 70 |
| Şekil 4. 11 | Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ filmlerinin FTIR spektrumları.....                                                                                                                                                                                                                                                               | 72 |
| Şekil 4. 12 | (a) dozlanmamış PEDOT:PSS, (b) dozlanmış PEDOT:PSS, (c) dozlanmamış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ , (d) dozlanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ filmlerin XRD kırınım deseni.....                                                                                                                                                                                             | 73 |
| Şekil 4. 13 | Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ filmlerinin absorpsiyon spektrumları.....                                                                                                                                                                                                                                                        | 75 |
| Şekil 4. 14 | Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ filmlerinin TGA eğrileri.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 76 |
| Şekil 4. 15 | Gama ışını ile dozlanmış katkısız ve $H_3BO_3$ ile katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılarak üretilen fotovoltaiik hücrelerin $I - V$ eğrileri .....                                                                                                                                                                                                      | 78 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

|              | Sayfa                                                                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çizelge 2. 1 | Dünya bor rezervleri (2012)..... 43                                                                                                          |
| Çizelge 2. 2 | Borikasin sıcaklığa bağlı sudaki çözünürlüğü.....46                                                                                          |
| Çizelge 4. 1 | Farklı konsantrasyonlarda $H_3BO_3$ katkılanmış PEDOT:PSS tampon tabakası bulunduran aygıtların fotovoltaiik parametreleri..... 66           |
| Çizelge 4. 2 | Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ tampon tabakası ile hazırlanan aygıtların fotovoltaiik hücre parametreleri.....74 |

**BORİKASİT KATKILANMIŞ VE GAMA IŞINI DOZLANMIŞ PEDOT:PSS  
TABAKASININ P3HT:PCBM ESASLI FOTOVOLTAİK HÜCRELERDE  
KULLANILMASI**

Özlem YAĞCI

Fizik Bölümü

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

Bu tez çalışmasında, ilk defa P3HT:PCBM esaslı organik fotovoltaiik hücrede boşluk toplayıcı tabaka olarak kullanılan PEDOT:PSS tabakasına son derece düşük maliyetli ve kolay elde edilebilen borikasit ( $H_3BO_3$ ) katkılanarak fotovoltaiik parametrelere etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı konsantrasyonlarda (0; 0,625; 1,25; 2,50; 3,75 ve 5,00 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanarak hazırlanan PEDOT:PSS çözeltileri, ince film olarak ITO altlıkları üzerine spin coater (döndürerek kaplama) ile kaplanmıştır. Daha sonra bu PEDOT:PSS tabakaları üzerine spin coater (döndürerek kaplama) ile P3HT:PCBM aktif tabakası kaplanmıştır. Son olarak aktif tabakanın üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile Alüminyum (Al) metali kaplanarak ITO/PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ /P3HT:PCBM/Al tabakalarından oluşan yapılar üretilmiştir.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, farklı oranlarda  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılarak fotovoltaiik hücrelerin performansını geliştiren optimum katkı oranının belirlenmesi için çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde bu optimum katkı oranının 1,25 mg/ml olduğunun tayin edilmesinin ardından, 1,25 mg/ml oranında  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası gama ışınına (40 Gray) maruz bırakılarak, radyasyonun  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücrelerin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üretilen yapıların, karanlık ve aydınlık

ortamlarda ölçülen akım-gerilim ( $I-V$ ) karakteristiklerinden güç dönüşüm verimi ( $PCE$ ), dolum faktörü ( $FF$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) gibi temel fotovoltaiik hücre parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca üretilen yapıların optik, morfolojik, yapısal ve termal karakteristikleri, UV-VIS, FTIR, SEM, AFM, TG/DTA, XRD ve mekanik profilometre ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada  $H_3BO_3$  ve gama ışınının etkisinin belirlenmesi için ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al referans yapısı üretilmiştir.

Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlara göre  $H_3BO_3$ 'ün ITO'nun iş fonksiyonunu arttırdığı ve PEDOT:PSS'nin iletkenliğini ve morfolojisini iyileştirdiği belirlenmiştir. 1,25 mg/ml'lik katkı oranında fotovoltaiik hücrelerin en yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Bu tez çalışmasının diğer önemli bir sonucu; düşük doz gama ışını uygulanmış PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücrelerin parametrelerinde iyileşme olduğu belirlenmiştir. Özellikle  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücrelerin performansında daha fazla iyileşme meydana gelmiştir. Ayrıca yapılan termal karakteristik analizlerinde  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmlerinin sıcaklığa karşı daha kararlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** PEDOT:PSS, Borikasit, P3HT:PCBM, polimer esaslı organik fotovoltaiik hücre, organik fotovoltaiik hücre

## ABSTRACT

---

### USE OF BORIC ACID DOPED AND GAMMA RAY DOSED PEDOT:PSS LAYER IN P3HT:PCBM BASED PHOTOVOLTAIC CELL

Özlem YAĞCI

Department of Physics

Ph.D. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

In this thesis, PEDOT:PSS layer, which is used as hole collector layer in P3HT:PCBM based organic solar cells, is doped with extremely low cost and easy manufactured boric acid for the first time and its effect on the photovoltaic parameters is investigated. In this study, for the preparation of the PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> buffer layer, various ratios of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (0; 0,625; 1,25; 2,50; 3,75 ve 5,00 mg/ml) was added in PEDOT:PSS solution and it was spin coated on ITO substrates. Then, the active layer of P3HT:PCBM was spin cast onto PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> films. Finally aluminum (Al) contact metal was deposited by thermal evaporation on active layer and device structure was in the form of ITO/PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/P3HT:PCBM/Al.

In the first step of this thesis worked to determine the optimal contribution rate that improves the maximum performance of the solar cell using with different concentrations of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> doped PEDOT:PSS layer. We have reported that the optimum addition rate of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> is 1,25 mg/ml, then we investigated the effect of radiation on the performance of solar cell by irradiating 1,25 mg/ml H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> doped PEDOT:PSS layer under the irradiation of gamma ray (40 Gy). Basic electronic characteristics such as power conversion efficiency (*PCE*), fill factor (*FF*), short circuit current (*I<sub>sc</sub>*) and open circuit voltage (*V<sub>oc</sub>*) of fabricated solar cells were determined by Current-Voltage (*I–V*) measurements in dark and under illumination. In addition, the optical,

morphological, structural and thermal characteristics of produced structures were determined by UV-VIS, FTIR, SEM, AFM, TG/DTA, XRD and stylus profilometer measurements. To determine the effect of  $\text{H}_3\text{BO}_3$  and gamma rays, reference device structure was produced in the form of ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al.

Results show that an increase in the work function of ITO, improvement in the conductivity and morphology of PEDOT:PSS obtained by introducing  $\text{H}_3\text{BO}_3$  as dopant into the PEDOT:PSS layer. It has been observed that at a specific concentration of  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (1,25 mg/ml) the solar cells showed the best PV performance. Experimental results showed that the parameters of solar cell improved with exposure to the low dose of gamma radiation. Especially more improvements has occurred in performance of the solar cell which contains  $\text{H}_3\text{BO}_3$  doped PEDOT:PSS layer. Also, it was determined that the boric acid doped PEDOT:PSS is more stable to temperature.

**Keywords:** PEDOT:PSS, boric acid, P3HT:PCBM, polymer-based organic solar cells, organic solar cells

#### 1.1 Literatür Özeti

##### 1.1.1 Güneş Enerjisinin Önemi

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla beraber, enerji talebinin 2035 yılına kadar %40 artacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle yakın tarihin en büyük görevlerinden biri, bu sorunun üstesinden gelecek yeni teknolojiler geliştirmektir. Günümüzde enerji pazarında fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz) baskın olsa da, sınırlı olmaları, her geçen gün artan fiyatları ve çevresel kaygılar sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının (fotovoltaik, termal güneş enerjisi, rüzgâr, hidro, jeotermal, gelgit ve biyoyakıt) gelecek yıllarda radikal bir biçimde gelişme sağlayacağı muhtemeldir [1, 2]. Ancak, en iyi durumda bile su, rüzgâr, biokütle ve jeotermal kaynakların erişilebilir kapasiteleri 22 terawatt (TW) iken, güneşin toplam kapasitesi 120,000 TW'dır. Bu miktar diğer tüm kaynakların toplam kapasitesinden çok daha fazladır. Bu durum güneş enerjisinin, geleneksel enerji kaynaklarına alternatif bir enerji kaynağı olarak kabul görmesini sağlamaktadır [3]. Bir saat içinde insan nüfusunun bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak kadar güneş enerjisi yeryüzüne ulaşmaktadır. Ancak hidro-tabanlı olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi 2009 yılında sadece yaklaşık %3 idi ve güneş bunun küçük bir kısmını kapsamaktadır [2]. Bunun başlıca nedenleri arasında, yüksek maliyetli, yavaş üretilen ve geniş yer kaplayan silikon (Si) esaslı inorganik fotovoltaik hücrelerin fotovoltaik pazarına hâkim olması (>%80) olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, düşük maliyetli, yüksek verime sahip, kolay üretilen ve entegre edilebilen, esnek, hafif ve rekabetçi yeni fotovoltaik hücre yapılarının

geliştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmış ve bu amaçla yoğun araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Günümüzde, inorganik fotovoltaiik hücrelere alternatif olarak boya duyarlı fotovoltaiik hücreler, polimer/fulleren karışımlarına dayalı organik fotovoltaiik hücreler, küçük organik moleküllerle ince film fotovoltaiik hücreler ve hibrid/nanokristal fotovoltaiik hücreler gibi farklı teknolojilere dayalı aygıtlar üretilmektedir. Organik fotovoltaiik hücreler (OPV), inorganik fotovoltaiik hücrelerde gerekli olan yüksek erime sıcaklıkları veya kompleks işlemler gerektirmemektedir. OPV'lerde kullanılan malzemeler, çözücüler içinde çözülerek ve altlıklar üzerine sol-jel (sol-gel) veya silindir döndürerek boyama (roll to roll printing) gibi ıslak-işleme teknikleri kullanılarak kaplanabilmektedir. Çözelti işleme, geniş alana kaplama ve düşük maliyetli bir üretimi mümkün kılmaktadır [4]. Son on yılda organik malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar sonucu güç dönüşüm verimliliği 2001 yılında %2,5'tan 2012 yılında %9'a kadar geliştirilmiştir [2].

### **1.1.2 Fotovoltaiik Hücrelerin Gelişimi**

Fotovoltaiik hücrelerin çalışma prensibi fotovoltaiik ilkeye dayanmaktadır. Fotovoltaiik hücreler, üzerine düşen güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren aygıtlardır. İlk kez 1839 yılında Alexandre-Edmond Becquerel bir elektrolit çözelti içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, çözelti üzerine düşen ışıktan kaynaklandığını gözlemleyerek fotovoltaiik etkiyi keşfetmiştir. Katılarda fotovoltaiik etkiyi ilk olarak 1877 yılında Adams ve Day, selenyumda gözlemlemiş ve yaptıkları çalışmalar neticesinde 1914 yılında selenyum ve bakır oksitten oluşan yaklaşık %1 verime sahip bir fotovoltaiik hücre üretmişlerdir. Bunu izleyen yıllarda, 1954 yılında Chapin vd. güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren Si esaslı fotovoltaiik hücre üretmişlerdir. Aynı yıl Reynolds vd. ilk defa %6 verime sahip  $Cu_xS/CdS$  ekleminde oluşan ince film fotovoltaiik hücre üretmeyi başarmışlardır. Daha sonra, 1956 yılında Jenny vd. %4 verime sahip bir p-n homoekelem GaAs fotovoltaiik hücre üretmişlerdir. 1958 yılında Chapin vd. Si esaslı fotovoltaiik hücrelerin verimini %14'e çıkarmayı başarmışlardır. 1980 yılında Bragnolo vd.  $Cu_xS/CdS$  hücrelerin verimini %9 olarak geliştirmişlerdir. Fotovoltaiik hücrelerin elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları devam etmiş ve 1988 yılında Verlinden vd. Si kontak

fotovoltaik hücrelerin verimini %28 olarak rapor etmişlerdir. Ancak bu inorganik fotovoltaik hücrelerin üretiminde, üretim maliyeti ve enerji geri dönüş süresinin artmasına neden olan kompleks üretim süreçleri ve aygıt gerekliliği gibi problemler bulunmaktadır. Bu nedenle, izleyen yıllarda yüksek verimli, düşük maliyetli ve kolay üretilen fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesi için Si esaslı fotovoltaik hücrelere alternatif olarak çok daha az yarıiletken malzeme gerektiren ve bu nedenle maliyeti oldukça düşüren fotovoltaik hücreler üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir.

### **1.1.3 Fotovoltaik Hücre Teknolojileri**

Fotovoltaik hücre teknolojisindeki gelişmeler üç nesil olarak sınıflandırılmaktadır. Genellikle ilk fotovoltaik hücreler birinci nesil fotovoltaik hücre olarak adlandırılır ve Si kristaline dayalı fotovoltaik hücreler bu sınıfa dahil edilir. Son 20 yıldır mükemmel güç dönüşüm verimliliği (*PCE*) (yaklaşık %30 [5]) ve yüksek kararlılıkları ile Si kristaline dayalı inorganik fotovoltaik hücreler, fotovoltaik (PV) sektöründe önemli bir yere sahiptir. Ancak bu fotovoltaik hücrelerden üretilen elektrik, yüksek üretim maliyetleri, zor ve uzun üretim süreçleri nedeniyle oldukça pahalıdır. Bu nedenle ticari değeri olan geleneksel Si fotovoltaik hücrelerde meydana gelen gelişmeler, bu fotovoltaik hücrelerin yerini alabilecek, verimleri aynı ama üretim teknolojileri daha kolay ve daha az maliyet gerektiren yeni fotovoltaik hücre teknolojileri geliştirme amacıyla sonuçlanmıştır.

İkinci nesil fotovoltaik hücreler, farklı kaplama yöntemleri ile (çözelti süreci, buharlaştırma ve elektroliz yöntemiyle kaplama) Kadmiyum Tellür (CdTe), Kadmiyum Selenid (CdSe), Bakır İndiyum Galyum Diselenide (CIGS), amorf Si vb. ince filmlerin, düşük maliyetli altlıklar üzerine (cam) kaplanması ile hazırlanmaktadır. İkinci nesil fotovoltaik hücrelerde, Si esaslı fotovoltaik hücrelere nazaran daha az malzeme kullanılması maliyeti bir miktar düşürmüş olsa da istenilen düzeyde verim değeri elde edilememiştir. Fotovoltaik hücrelerin devam eden verim ve maliyet problemleri, araştırmacıları yeni malzeme arayışına yönlendirmiştir. Düşük maliyetle ve kolay yöntemlerle sentezlenmeleri ve imal edilebilmeleri (vakumda buharlaştırma veya süblimleştirme, çözelti veya silindir döndürerek boyama (roll to roll printing)) nedeniyle

fotovoltaik hücre üretiminde organik malzemelerin kullanımı umut verici bir gelişim olmuştur.

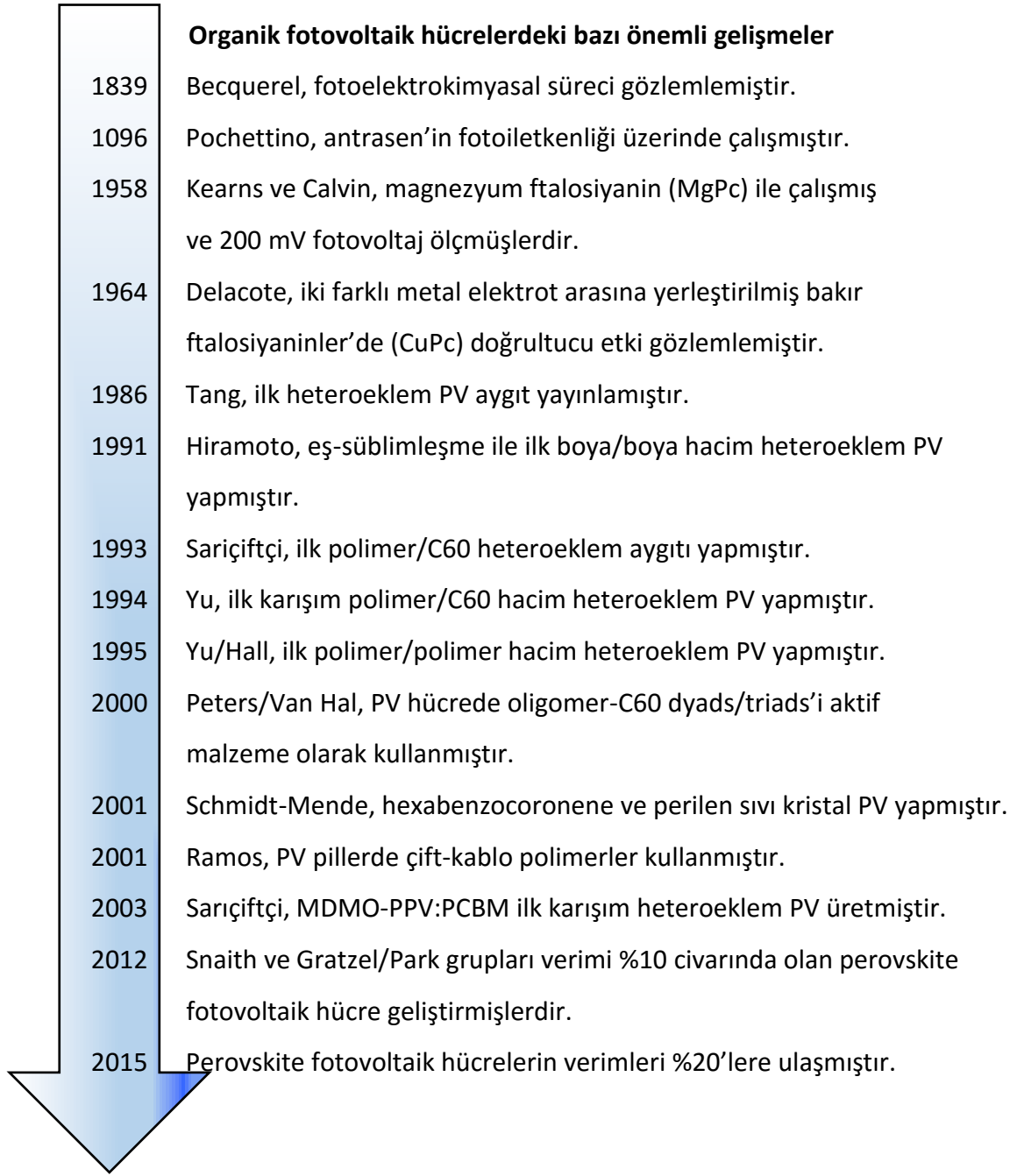
Üçüncü nesil fotovoltaik hücre olan organik fotovoltaik hücreler (OPV), şeffaf bir elektrot ve bir metal elektrot arasına yerleştirilmiş bir organik fotovoltaik aktif tabakadan oluşmaktadır. Polimer ya da küçük moleküllerden oluşan organik fotovoltaik hücreler özünde ikinci nesil ince film fotovoltaik hücrelere benzerdir. Organik malzeme içermesi dışında bir farklılığı yoktur. Boya duyarlı fotovoltaik hücreler (DSSC) ve hibrid fotovoltaik hücreler de üçüncü nesil fotovoltaik hücre olarak sınıflandırılmaktadır. DSSC cihazlar, bir organik boya esaslı elektrokimyasal redoks sistemi, bir elektrolit ve bir gözenekli metal oksit yarı iletkeninden oluşmaktadır. %13'lük [6] verime sahip olan DSSC cihazların, verim ve ömrünün inorganik fotovoltaik hücreler ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu görülmektedir. Hibrid fotovoltaik hücreler, inorganik ve organik yarıiletken malzemelerden oluşan hücrelerdir. %17'lik [7] bir güç dönüşüm verimliliğine sahiptir [8-11].

#### **1.1.4 Organik Fotovoltaik Hücreler**

İnorganik fotovoltaik hücreler ile kıyaslandığında organik fotovoltaik hücreler pek çok avantajlara sahiptir. Organik yarıiletkenlerin çözülebilir olması, geniş alan OPV'lerin düşük maliyetle üretimi için büyük bir potansiyeldir. Düşük sıcaklıkta üretim imkânı sağlamaları, imalat sırasında az enerji gerektirmekte ve enerji geri dönüş süresini azaltmaktadır. İnorganik fotovoltaik hücreler gibi kompleks üretim süreci ve cihazlar gerektirmemektedirler. Plastik altlıkların üzerine kaplanabilmeleri taşınabilir elektronik uygulamalar sağlamaktadır. Ayrıca organik yarıiletkenler kimyasal yapılarında değişikliğe olanak sağladıkları için, malzeme ya da elektronik özellikleri geleneksel fotovoltaik hücreler için mümkün olandan çok daha uygun hale getirilebilmektedir. Ancak sahip oldukları pek çok avantajlara rağmen, organik fotovoltaik hücrelerin verim ve ömürlerinin düşük olması gibi önemli problemleri bulunmaktadır. Günümüzde organik iletken malzemeler elektronik cihaz uygulamaları için son derece ilgi çekici adaylar olması sebebiyle organik fotovoltaik hücrelerin bu zorluklarının çözülebilmesi için yoğun çalışmalar devam etmektedir.

İlk organik fotovoltaiik hücre, 1958 yılında Kearns ve Calvin tarafından iki elektrot arasına magnezyum ftalosiyenin (MgPc) konularak üretilmiş ve güç dönüşüm verimliliği %0.1 olarak rapor edilmiştir. Organik fotovoltaiik hücreler üzerine çalışmalar sürerken 1986 yılında Tang, İndiyum kalay oksit (ITO) ve Alüminyum (Al) elektrotları arasına buharlaştırma yöntemi ile kapladıkları Bakır ftalosiyenin (CuPc) ve perylene diimide yarıiletken organik malzemeler ile verimi %1 olan organik fotovoltaiik hücre üretmiştir. Bu sonuç organik fotovoltaiik hücreler için oldukça yenilikçi bir gelişme olmuştur. Yaklaşık 20 yıllık bir gelişmenin ardından şuan organik yarıiletken esaslı fotovoltaiik hücrelerin verimi %10'u geçmiştir. Şekil 1.1'de organik fotovoltaiik hücrelerin gelişim tarihinde büyük önem taşıyan dönüm noktaları gösterilmektedir [8].

Yaklaşık 20 yıllık bir gelişmenin ardından şuan organik yarıiletken esaslı fotovoltaiik hücrelerin verimi %10'u geçmiştir. Şekil 1.1'de organik fotovoltaiik hücrelerin gelişim tarihinde büyük önem taşıyan dönüm noktaları gösterilmektedir [8].



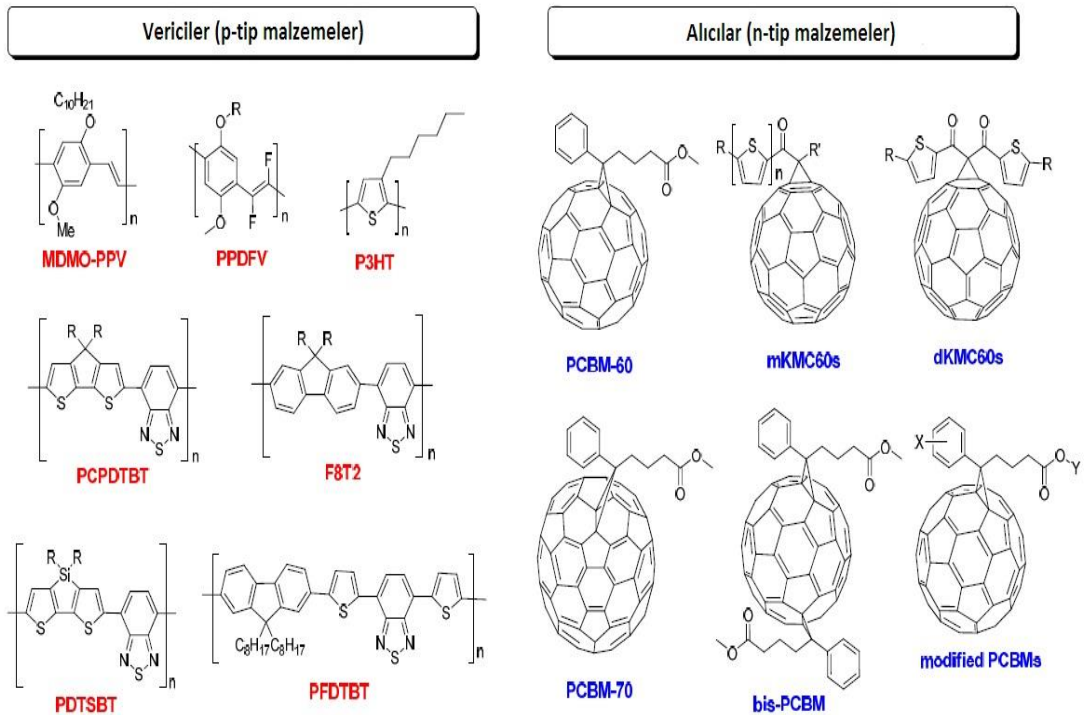
Şekil 1. 1 Organik fotovoltaik hücrelerin gelişimindeki bazı önemli olaylar [8, 12]

#### 1.1.5 P3HT:PCBM Esaslı Organik Fotovoltaik Hücreler

Organik yarı iletkenler, genel olarak küçük moleküller (molekül ağırlığı <900 dalton ve büyüklüğü  $10^{-9}$  m olan organik bileşikler) ve polimerler olarak iki kategoriye ayrılabilir. Küçük moleküller genellikle buharlaştırma işlemi ile kaplanırken, polimerler spin coating (döndürerek kaplama) metodu ile kaplanmaktadır. Ayrıca küçük moleküller ile karşılaştırıldığında polimerler havaya ve sıcaklığa karşı daha karardır. Polimerin bu

avantajları sebebiyle OPV'lerin başarılı bir türü olan polimer fotovoltaiik hücreler (PSC) daha fazla dikkat çekmektedir. Tipik bir PSC'nin aktif tabakası, elektron verici (donor) konjuge bir polimer ve elektron alıcı (acceptor) küçük bir molekülün karışımından oluşmaktadır. Yüksek performanslı PSC'ler için ideal özelliklere sahip fotovoltaiik malzeme tasarımı büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle konjuge polimerler ve fulleren türevleri kilit öneme sahip fotovoltaiik malzemelerdir.

Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, PSC'lerde en yaygın kullanılan alıcı (acceptor) ve verici (donor) malzemeler, poly[2,6-(4,4-bis-(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta[2,1-b;3,4-b']dithiophene)-alt-4,7-(2,1,3-benzothiadiazole)] (PCPDTBT), poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MDMO-PPV), poly(3-hexylthiophene) (P3HT), phenyl-C61 -butyric acid methyl ester (PCBM-60), phenyl-C71-butyric acid methyl ester (PCBM-70), Bis(1-[3-(methoxycarbonyl)propyl]-1-phenyl)-[6,6]C62 (bis-PCBM) vb. malzemelerdir. Bu malzemeler arasında organik fotovoltaiik hücrelerde aktif tabaka olarak, en yaygın kullanılan ve en iyi optimize edilmiş malzemeler P3HT/PCBM'dir [13].



Şekil 1. 2 Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan alıcı (acceptor) ve verici (donor) malzemelerin kimyasal yapısı

P3HT:PCBM'in organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan diğer malzemelerden daha fazla ilgi görmesinin nedenleri arasında, yüksek kararlık, yüksek boşluk hareketliliği,

yüksek kristal özelliği ve yaklaşık 650 nm dalga boyuna kadar ışığı absorbe edebilme gibi özelliklere sahip olması bulunmaktadır [14]. P3HT ile PCBM ilk olarak 2003 yılında J.C. Hummelen vd., tarafından karıştırılarak %0,2 güç dönüşüm verimliliğine (*PCE*) sahip fotovoltaiik hücre elde etmişlerdir. *PCE*, fotovoltaiik hücreden çıkan enerjinin, fotovoltaiik hücreye giren enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. P3HT ve PCBM'in ilk karıştırıldığı dönemde, genellikle PPV [poli (p-fenilenvinilen)] esaslı verici (donor) malzemeler ile PCBM, 1:4 oranında karıştırılarak kullanılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar sonucu, P3HT:PCBM karışımının daha gelişmiş bir absorbsiyon sağladığı belirlenmiştir. Bu nedenle verici (donor) malzeme olarak P3HT'nin kullanımı daha yaygınlaşmıştır. Aynı yıl F. Padingger vd., P3HT:PCBM karışım oranını 1:1 oranında değiştirerek ve fotoaktif tabakayı 4 dakika süreyle 75°C'de tavlayarak verimi %3,5 olarak geliştirmişlerdir. İzleyen süreçte C. J. Brabec, D. A. Carroll, Y. Yang, D. D. C. Bradley, G. C. Bazan, ve A. J. Heeger gibi çeşitli araştırmacılar ısıtma işlemi veya çözücü buharlaştırma yöntemleri ile aygıt verimini arttırmayı sürdürmüşlerdir. 2008 yılında Konarka Teknolojileri A.Ş. tarafından P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücrelerin verimi %5'in üzerine çıkarılmıştır. P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücrelerin gelişim sürecinde meydana gelen önemli olaylar Şekil 1.3'de gösterilmektedir.

| <b>P3HT:PCBM esaslı fotovoltatik hücrelerdeki bazı önemli gelişmeler</b> |                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2003                                                                     | J.C. Hummelen vd., P3HT:PCBM (1:4), <b>PCE=%0,2</b> , <b>tavlanmamış</b>                           |
| 2003                                                                     | F. Padingger vd., P3HT:PCBM (1:1), <b>PCE=%3,5</b> , <b>75 °C'de 4 dk. tavlanmış</b>               |
| 2004                                                                     | Christoph J. Brabec (Siemens) P3HT:PCBM (1:1), <b>PCE=%5</b>                                       |
| 2005                                                                     | Marisol Reyes-Reyes vd., P3HT:PCBM (1:0.6), <b>PCE=%5,2</b> , <b>155 °C'de 3 dk. tavlanmış</b>     |
| 2005                                                                     | K. Kim vd., P3HT:PCBM (1:0.8), <b>PCE=%4,9</b> , <b>155 °C'de 5 dk. tavlanmış</b>                  |
| 2006                                                                     | Y. Kim vd., P3HT:PCBM (1:1), <b>PCE=%4,4</b> , <b>140 °C'de 120 dk. tavlanmış</b>                  |
| 2006                                                                     | P. Schilinsky vd., P3HT:PCBM (1:1), <b>PCE=%5</b> , Ca-Ag elektrot/ <b>xylene</b> çözeltisi dökme  |
| 2006                                                                     | K. Lee vd., P3HT:PCBM (1:0.8), <b>PCE=%5</b> , TiO <sub>x</sub> optik ara tabaka                   |
| 2007                                                                     | G. C. Bazan vd., PCPDTBT:PC71BM (1:2), <b>PCE=%5,5</b> , thiol uygulanmış                          |
| 2007                                                                     | K. Lee vd., P3HT:PCBM/ PCPDTBT:PC71BM, <b>PCE&gt;%6</b> , TiO <sub>x</sub> optik ara tabaka,Tandem |
| 2008                                                                     | Plextronics, P3HT: <b>Yeni Acceptor</b> , <b>PCE&gt;%5,98</b>                                      |
| 2008                                                                     | Konarka, yeni düşük bant aralıklı vericiler, <b>PCE&gt;%6,23</b>                                   |
| 2009                                                                     | K. Lee, Y. Yang, Y. Lian vd., yeni düşük bant aralıklı vericiler, <b>PCE&gt;%6</b>                 |
| 2009                                                                     | Solamer, yeni düşük bant aralıklı vericiler, <b>PCE~%7,9</b>                                       |

Şekil 1. 3 P3HT:PCBM esaslı organik fotovoltatik hücrelerin gelişimindeki bazı önemli olaylar [15]

P3HT, organik çözücü maddelerde yüksek çözünürlük sağlayan 6-C'lu yan zinciri olan bir politiyofendir. P3HT iyi bir elektron verici (donor) ve boşluk ileten bir malzemedir. PCBM, solüsyon işlemleri organik fotovoltatik hücrelerde kullanılan Buckminsterfulleren' in (C60) çözülebilen bir türevi olan en başarılı elektron alıcı malzemelerden biridir. PCBM molekülünden moleküle çok etkili bir şekilde elektron taşımaktadır. P3HT ile PCBM karışımının aktif tabaka olarak kullanıldığı organik fotovoltatik hücrelerde güç dönüşüm verimliliği %10'a ulaşmıştır [16].

Organik esaslı elektronik ve opto-elektronik cihazların performansı doğrudan elektrot/ organik arayüzlere ve arayüzde yük taşıyıcı enjeksiyon verimliliğine bağlıdır [17]. Bu

nedenle arayüz mühendisliği aygıtların performansının iyileştirilmesi için oldukça önemlidir. Arayüz tabakalarının, morfolojisi, kararlılık ve bozulma mekanizmasının anlaşılması aygıt performansının geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Geleneksel PSC'lerde en yaygın kullanılan ara katman malzemeleri, Molibden trioksit ( $\text{MoO}_3$ ), Nikel (II) oksit ( $\text{NiO}$ ), Vanadyum (V) oksit ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ), Tungsten trioksit ( $\text{WO}_3$ ), Gümüş oksit ( $\text{AgO}_x$ ) ve poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) vb. dir.

Anot olarak ITO'nun kullanıldığı aygıt yapısında, genellikle anot ara katmanı olarak PEDOT:PSS kullanılmaktadır. PEDOT:PSS yüksek iletkenlik, görünür bölgede yüksek şeffaflık, uzun süreli kararlılık, kolay işlenmesi ve toksik olmaması gibi kendine özgü avantajları nedeniyle, en başarılı iletken polimerlerden biridir. PEDOT:PSS, poli (3,4-ethylenedioxythiophene) konjuge polimeri ve katkı işlevi gören polistiren sülfonik asit (PSS) karışımından oluşmaktadır. İletken özelliği nedeniyle PEDOT:PSS ince filmleri, sensörler, termoelektrik, optoelektronik aygıtlar, anti-statik kaplama vb. çok sayıda uygulamada kullanılmaktadır. PEDOT:PSS filmleri, damlatma, spin coating (döndürerek kaplama), püskürtme, screen printing (film baskı), inkjet printing (inkjet baskı) ve elektrospinning gibi yaygın tekniklerle hazırlanabilmektedir. PEDOT:PSS filminin pratik bir avantajı, organik çözücülere karşı son derece dayanıklı olmasıdır. Anot tampon tabakası olarak kullanılan PEDOT:PSS'nin temel işlevlerinden biri ITO'nun yüzeyini iyileştirmektir. Genellikle, ITO yüzeyi, püskürtme işlemi nedeniyle rastgele dağılan bazı kusurlar ile karakterize edilmektedir. Bu kusurların boyutu, cihaz performansı ve kararlılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Rutherford geri saçılma çalışmaları ve X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ile PEDOT:PSS'nin asidik yapısının ITO'yu aşındırdığı ve bunun ITO/PEDOT:PSS arayüzünde kötü bir kimyasal kararlılığa neden olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, PEDOT:PSS'nin elektriksel homojensizliği, elektron-engelleme yeteneğini sınırlayabilmekte ve böylece anotta elektron sızıntısına yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra, aygıtların performansını önemli ölçüde etkileyen PEDOT:PSS tabakasının düşük iletkenlik gibi bir sorunu da bulunmaktadır. Bu nedenle, fotovoltaiik hücrelerin performansının geliştirilmesi için yapılan çalışmaların büyük bir kısmı ITO/PEDOT:PSS arayüzünün iyileştirilmesi için yapılmaktadır. Bu amaçla, morfolojik ve iletkenlik özelliklerinin iyileştirilmesi için PEDOT:PSS çeşitli organik çözücüler ya da katkı maddeleri ile karıştırılmaktadır. Çeşitli katkı maddeleri ( $\text{WO}_x$ ,

MoO<sub>x</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NiO<sub>x</sub>, Demir (III) Oksit nanoparçacıklar (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs), Etilen Glikol (EG) ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüpleri (Multi-Walled Carbon Nanotubes: MWCNT)) eklenmesi sonucu PEDOTPSS'nin elektrik iletkenliği ve iş fonksiyonunun değiştirilmesi ile aygıt performansının önemli ölçüde etkilendiğini gösteren birçok yaklaşım vardır [18-24]. Bu çalışmalarda, boşluk toplayıcı tabaka olarak PEDOT:PSS'ye Etilen Glycol (%10) [25], NiO<sub>x</sub> (5:1 oranında) [18], Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs (ağırlıkça %0,7) [26] ve MWCNT (%4) [27] eklenmesi ile *PCE* 'de sırasıyla %29, %10, %32 ve %23 artış görülmüştür. Fakat bu katkı maddeleri yüksek maliyetli, zor ve uzun üretim süreçleri gerektirmektedir [28]. Bu nedenle fotovoltaiik hücre performansını geliştirecek kolay üretilebilen, düşük maliyetli katkı malzemesi arayışları devam etmektedir. Bu tez çalışması da bu arayışın bir göstergesi olarak sunulmuş ve ilk kez PEDOT:PSS'ye borikasit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) eklenerek aygıt performansının artırılması hedeflenmiştir.

Yabancı atomlarla katkılama, özünde ana malzemenin özelliklerini nano, mikro, makro ve dış etkenler açısından değiştirmek için etkili bir yöntemdir. Fotovoltaiik hücre performansının iyileştirilmesi için yapılan çalışmalarda, aygıt üretiminde kullanılan ince filmlerin optik, elektrik ve dayanıklılıklarının geliştirilmesi için katkılama yapılması en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Katkılanmamış ince filmler daha düşük iletkenlik ve dayanıklılığa sahip olabilmektedir. Daha yüksek iletkenlik ve dayanıklılığa sahip ince filmler çatlakların ve oksijen boşluklarının yerine geçen yabancı atomlar ile sağlanabilmektedir. Bor elementi, fotovoltaiik malzemelerin elektriksel, optik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmede katkı malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bor, ışık fotonlarının etkin biçimde transferini sağlamaktadır. Ancak elementel borun elde edilmesi yüksek basınç ve sıcaklık koşulları gerektirdiğinden oldukça zor ve yüksek maliyetlidir. Bu nedenle bu tez çalışmasında H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> kullanılarak, daha düşük maliyetli ve kolay yeni bir bor katkılama tekniği geliştirilmesi hedeflenmiştir. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> oldukça düşük maliyetli, işlenmesi kolay, stratejik ve endüstriyel öneme sahip önemli bor bileşiklerinden biridir. Çoğunlukla cam, seramik, tekstil, kâğıt, deterjan, nükleer enerji, kullanıldığı malzemelere sertlik ve dayanıklılık kazandırdığı için savunma sanayisinde, binaların yalıtımında vb. gibi çok sayıda endüstriyel uygulamaların yanı sıra tarım, tıp, eczacılık ve elektronik sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> başta olmak üzere bor bileşiklerinin sahip oldukları üstün özellikler (yüksek aşınma ve

korozyon direnci, yüksek ergime sıcaklığı, difüzyon bariyeri) nedeniyle nano, mikro ve makro boyutlu pek çok teknolojik uygulamada bu bileşiklerin tercih edilirlikleri her geçen gün artarak devam etmektedir. Ancak  $H_3BO_3$ 'ün fotovoltaiik hücre çalışmalarında kullanımına pek sık rastlanılmamaktadır.  $H_3BO_3$ 'ün fotovoltaiik hücrelerde kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların birinde, Chuanmin Ruan vd.,  $H_3BO_3$  katkılı ve katkısız titanyum dioksit nanotüp fotoanotların fotoelektrokimyasal özelliklerini incelemiştir. Hem UV ve hem de görünür spektrum aydınlatma altında  $H_3BO_3$  içeren  $TiO_2$  nanotüp elektrolitin daha iyi fotoelektrokimyasal özelliklere sahip olduğunu rapor etmiştir. Yapılan bir başka çalışmada ise, Alagesan Subramanian vd., boya duyarlı fotovoltaiik hücrelerde  $TiO_2$  nanotüplerine (TNA)  $H_3BO_3$  katkılamış ve  $H_3BO_3$ 'ün TNA'nın iletkenlik bandının kaymasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Buna bağlı olarak  $H_3BO_3$  katkılanmış TNA'nın katkısız olandan daha iyi performans gösterdiğini rapor etmiştir. Bir diğer çalışmada, Rahman vd.,  $H_3BO_3$ 'ün ZnO nanotüplerin yapısal, optiksel, morfolojik özelliklerine ve  $H_3BO_3$  katkılı ZnO nanotüplerin boya duyarlı fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisini araştırmışlardır. Rahman vd.,  $H_3BO_3$ 'ün artan miktarı ile beraber ZnO nanotüplerinin kalınlığının ve çapının azaldığını rapor etmiştir. Ağırlıkça %2  $H_3BO_3$  kullanılarak hazırlanan ZnO nanotüp bulunduran DSSC'nin  $2,67 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) ve %0,29 güç dönüşüm verimi ( $PCE$ ) ile en yüksek performans gösterdiğini bildirmişlerdir. Ancak literatürde  $H_3BO_3$ 'ün polimer esaslı fotovoltaiik hücrelerde kullanımı ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, ilk defa P3HT:PCBM esaslı organik fotovoltaiik hücrede boşluk toplayıcı tabaka olarak kullanılan PEDOT:PSS tabakasına son derece düşük maliyetli ve kolay imal edilebilen  $H_3BO_3$  katkılanarak fotovoltaiik parametrelere etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı konsantrasyonlarda (0; 0,625; 1,25; 2,50; 3,75 ve 5,00 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanarak hazırlanan PEDOT:PSS çözeltileri, ince film olarak ITO altlıklar üzerine spin coater (döndürerek kaplama) ile kaplanmıştır. Organik esaslı fotovoltaiik hücrelerde anot olarak kullanılacak malzemenin hem elektriksel olarak iletken hem de optik olarak özellikle, görünür bölgedeki ışık için, geçirgen olması gerekir. Bu nedenle organik esaslı fotovoltaiik hücrelerde, 4,7 eV iş fonksiyonuna sahip ve P3HT'nin en yüksek enerjili dolu moleküler orbitali (Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO)) ile oldukça uyumlu olan ITO en çok kullanılan anot malzemesidir [29, 30]. Bu tez çalışmasında da anot

malzemesi olarak ITO kullanılmıştır. Daha sonra PEDOT:PSS tabakaları üzerine spin coating (döndürerek kaplama) yöntemi ile P3HT:PCBM aktif tabakası kaplanmıştır. Son olarak aktif tabakanın üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile Al metali kaplanarak ITO/PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/P3HT:PCBM/Al tabakalarından oluşan yapılar üretilmiştir. Düşük iş fonsiyonuna sahip olması ve PCBM'in LUMO'su ile uyumlu olması sebebiyle katot malzemesi olarak en yaygın Al (4,2 eV) metali kullanılmaktadır. Yapılan optik, elektrik ve morfolojik ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlara göre H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>'ün ITO'nun iş fonsiyonuna arttırdığı ve PEDOT:PSS'nin iletkenliğini ve morfolojisini iyileştirdiği belirlenmiştir. 1,25 mg/ml'lik katkı oranında fotovoltaiik hücrelerin en yüksek performans gösterdiği görülmüştür.

#### **1.1.6 Gama Işını ve Organik Fotovoltaiik Hücreler**

Gama ( $\gamma$ ) ışını radyasyonu, polimerizasyon mekanizmaları üzerindeki etkilerinin anlaşılması için radyasyon kimyasının yoğun ilgi odağı olmuştur. Son zamanlarda, aygıt performanslarının geliştirilmesi için geleneksel yöntemlere bir alternatif olarak polimerler üzerine radyasyon uygulama oldukça ilgi görmektedir. Gama radyasyonunun, kimyasal bağları etkileyerek polimerleri kolayca değiştirdiği ve optiksel ve elektriksel özelliklerinde değişikliklere yol açtığı bilinmektedir. Bunun bir sonucu olarak, polimerlerin kararlılığı, çözünürlüğü, elektronik ve optik özelliklerinde kolayca değişikliğe yol açan radyasyon dozlama işlemlerinin fotovoltaiik hücre uygulamaları için gerekli olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu tez çalışmasında, organik fotovoltaiik hücre uygulamalarında henüz çok yaygın kullanılmayan gama ışınının fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir [31].

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında farklı oranlarda H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılarak fotovoltaiik hücrelerin performansını geliştiren optimum katkı oranının belirlenmesi için çalışma yapılmıştır. Yapılan pek çok deneme neticesinde bu optimum katkı oranının 1,25 mg/ml olduğunun belirlenmesinin ardından, 1,25 mg/ml oranında H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılanmış PEDOT:PSS tabakası gama ışını (40 Gray) ile dozlanarak, radyasyonun H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılı PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücrelerin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Literatürde yapılan önceki çalışmalarda genellikle numunelerin ışınlanmasında daha yüksek dozlar kullanılmış ve radyasyonun

numune ya da aygıtta meydana getirdiği bozulmaların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde gama ışınının  $H_3BO_3$  katkılı P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücre performansı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmaya rastlanılmamaktadır. Bu nedenle bu tez çalışması gama ışının organik fotovoltaiik hücreler üzerindeki etkisinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışmada, hem  $H_3BO_3$  hem de gama ışınının etkisinin belirlenebilmesi için katkısız ve radyasyona maruz bırakılmayan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al referans yapısı üretilmiştir.

Üretilen yapıların, karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen akım-gerilim ( $I-V$ ) karakteristiklerinden güç dönüşüm verimi ( $PCE$ ), dolum faktörü ( $FF$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) gibi temel fotovoltaiik hücre parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca üretilen yapıların optik, morfolojik termal karakteristikleri, görünür bölge ve mor ötesi (UV-VIS) spektroskopisi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR), Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy: SEM), Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic-force microscopy: AFM), Termogravimetrik analiz (Thermogravimetric analysis: TG/DTA), X-Işınları Kırınım Difraktometresi (X-Ray Diffraction: XRD) ve mekanik profilometre ölçümleri yapılarak belirlenmiştir.

Elde edilen ölçümlerin analizinden, PEDOT:PSS'ye  $H_3BO_3$  katkısının  $PCE$ 'yi arttırdığı görülmüştür.  $H_3BO_3$ 'ün 1,25 mg/ml katkı oranında en yüksek performans elde edilmiştir.  $H_3BO_3$ 'ün PEDOT:PSS tabakasının iletkenliğine etkisinin belirlenmesi için yapılan ölçümlerde, belli bir katkı oranına kadar (1,75 mg/ml)  $H_3BO_3$ 'ün PEDOT:PSS'nin iletkenliğini iyileştirdiği görülmüştür. Yapılan yaşam süresi testlerinde  $H_3BO_3$  bulunan fotovoltaiik hücrelerin daha kararlı olduğu görülmüştür. Düşük doz gama ışını uygulanmış PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücrelerin parametrelerinde gelişme olduğu belirlenmiştir. Özellikle  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücrelerin veriminde daha fazla artış meydana gelmiştir. Ayrıca yapılan termal karakteristik analizlerinde  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmlerinin sıcaklığa karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, düşük maliyetli, kolay elde edilebilir ve Türkiye'nin öz kaynağı bir malzeme olan  $H_3BO_3$  kullanılarak fotovoltaik hücrelerin verim ve kararlılığının geliştirilmesidir. Daha önce yapılan çalışmalarda, organik fotovoltaik hücrelerde anot tampon tabakası olarak kullanılan PEDOT:PSS tabakasının fotovoltaik hücrelerin performansı üzerinde doğrudan etkisi olduğu rapor edilmiştir. Bu nedenle fotovoltaik hücrelerin veriminin iyileştirilmesi için yapılan çalışmaların önemli bir bölümünde PEDOT:PSS tabakasının morfolojisinin ve iletkenliğinin geliştirilmesi için girişimlerde bulunulmuştur. Bu amaçla PEDOT:PSS tabakasına farklı malzemeler ile katkılama yapılmıştır. Bu çalışmada, daha önceki pahalı ve zor üretilen katkı malzemelerine alternatif olarak ucuz ve kolay elde edilebilen  $H_3BO_3$ 'ü PEDOT:PSS tabakasına katkılararak, fotovoltaik hücrelerin performansına etkisi incelenmiştir.

Ayrıca  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabası düşük doz gama ışını (40 Gray) ile dozlanarak gama ışınının organik fotovoltaik hücre performansına etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylece, polimerlerin optik ve elektriksel özelliklerinde değişiklik yapabilen gama ışının, fotovoltaik hücre performansını geliştirmek için kullanılan geleneksel yöntemlere alternatif bir yöntem olarak kullanımının yaygınlaştırılması ve ayrıca uzay araştırmalarında gereksinim duyulan enerjiye ışık tutması amaçlanmıştır. Gama ışını radyasyon kaynakları, sağlık, gıda, sterilizasyon vb. pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanıldığından kolay ulaşılabilen ve pahalı olmayan bir ışın kaynağıdır. Bu nedenle fotovoltaik hücre çalışmalarında üretim sürecini zorlaştıracak veya maliyeti arttıracak bir özelliği bulunmamaktadır.

## 1.3 Hipotez

Pahalı ve zor üretim süreçleri nedeni ile fotovoltaik hücrelerin ticarileşmesini engelleyen geleneksel Si esaslı fotovoltaik hücrelere alternatif olarak geliştirilen organik fotovoltaik hücreler ile beraber üretim maliyetleri bir miktar düşürülmüş olsa da henüz istenilen düzeylere ulaşılabilmiş değildir. Bunun yanı sıra bu fotovoltaik hücrelerin düşük güç dönüşüm verimliliği ve kısa kararlılık süresi gibi problemleri de bulunmaktadır. Organik fotovoltaik hücrelerin daha düşük maliyetli üretilmeleri, yüksek verim ve kararlılık sağlayacak yeni ucuz malzeme arayışları devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında oldukça düşük maliyeli ve kolay imal edilebilen  $H_3BO_3$ 'ün yüksek üretim maliyeti, düşük verim ve kararlılık problemlerinin tümüne çözüm olabileceği düşünülmüş ve elde edilen sonuçlar bu hipotezi desteklemiştir.

Ayrıca polimerlerin optik ve elektriksel özelliklerini etkilediği bilinen gama ışının, PEDOT:PSS'nin optik ve elektriksel özelliklerinde değişikliğe yol açabileceği düşünülmüştür. Aynı zamanda gama ışınının,  $H_3BO_3$  varlığı sebebiyle PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  ve PEDOT:PSS tabakalarına etkilerinin farklı olması beklenmiştir. Yapısal, optik ve morfolojik ölçümler neticesinde gama ışınına maruz bırakılan katkılı ve katkısız PEDOT:PSS tabakasının sonuçlarının birbirinden farklı olduğu belirlenmiş ve gama ışınına maruz bırakılan PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakası içeren fotovoltaiik hücrelerin en yüksek verime sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar bu hipotezi desteklemiştir.

## BÖLÜM 2

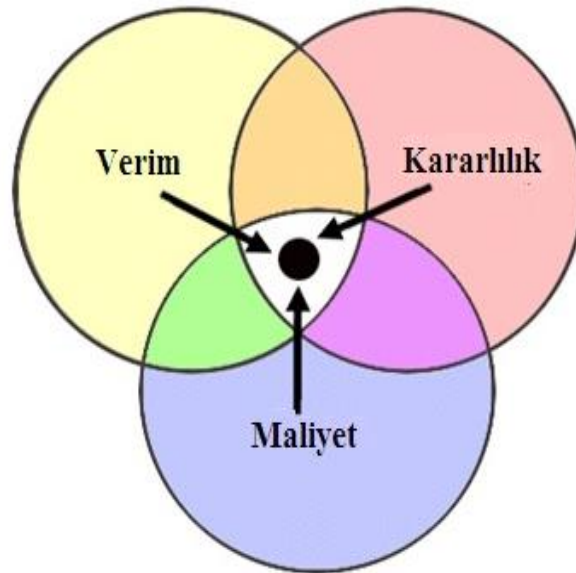
### GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Organik Yarıiletkenler

Fosil yakıtların sınırlı olması ve CO<sub>2</sub> emisyonunun sınırlandırılması zorunluluğu, yenilenebilir ve sürdürülebilir yeni enerji kaynakları ihtiyacını doğurmuştur [32]. Son yıllarda, fotovoltaik hücreler, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak küresel enerji ve çevre sorunlarının karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Fotovoltaik cihazlar (PV), güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. PV cihazların çalışma mekanizması ışığın kuantum teorisine dayanmaktadır. Işık veya bir elektromanyetik dalga foton olarak tanımlanan enerji paketlerinden oluşmaktadır. Bir fotonun enerjisi, ışığın frekansı ya da rengine bağlıdır. Yarıiletkenlerde, görünür bölge fotonlarının enerjisi, elektronları valans bandından iletkenlik bandına uyarmak için yeterlidir. Uyarılan elektronlar nanosaniye (ns) mertebesinde bir ömür süresi içinde düşük enerjili duruma geri dönerler. Ancak, fotovoltaiklerde uyarılmış elektron ve boşluklar birleşmeden önce bir dış devreye doğru çekilirler. Böylece, elektronlar ve boşlukların elektrotlara ulaşması ile elektrik üretilir.

Güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürebilme kabiliyetleri nedeniyle, çeşitli fotovoltaik teknolojiler gelecekteki enerji arzında önemli bir rol oynamaya hazır duruma gelmiştir. Fakat geleneksel kristal Si esaslı fotovoltaik hücrelerin üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, düşük maliyetli ve yüksek verimli yeni nesil fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur. Yapılan pek çok girişimler neticesinde organik polimer esaslı fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesi düşük maliyetli

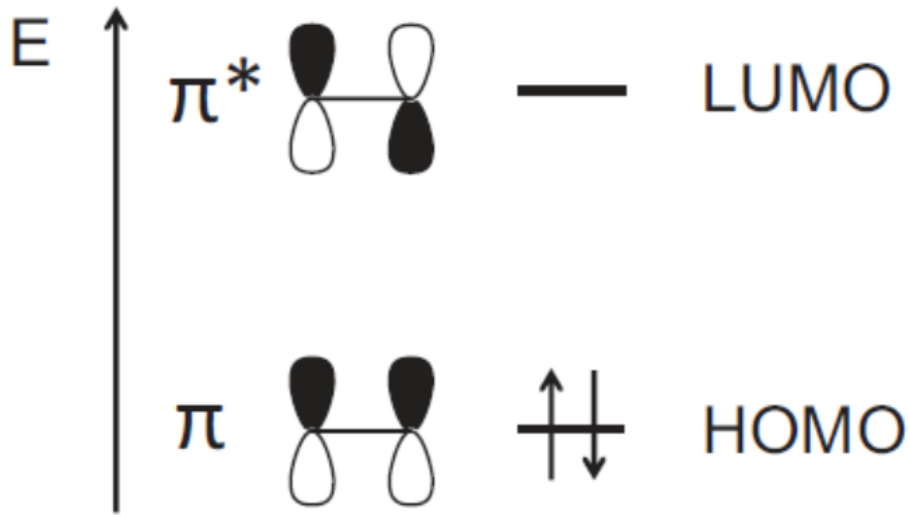
ve kolay enerji üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. OPV'lerin verimleri henüz inorganik emsallerine (yaklaşık %30) ulaşamamış olmasına rağmen, düşük maliyetli üretim potansiyelleri organik fotovoltaiik aygıtları cazip hale getirmektedir. Son on yılda, OPV'lerin güç dönüşüm verimliliğinde hızlı bir artış görülmesi bilimsel ve ekonomik ilgi görmelerini sağlamıştır. Ancak fotovoltaiiklerin geniş bir pazarda yer bulabilmeleri için verimlilik, kararlılık ve maliyet gibi kritik gereksinimleri aynı anda yerine getirmeleri gerektirmektedir (Şekil 2.1). Organik fotovoltaiik hücreler bu unsurları başarılı bir şekilde yerine getirme potansiyeline sahip olduklarından geliştirme çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 2. 1 OPV'lerin gerçekleştirilmesi amaçlanan kritik üçgen: kararlılık, verim ve maliyet.

Organik yarı iletkenler, genel olarak küçük moleküller ve polimerler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Moleküler ve polimerik yarı iletkenlerin tümü ana zincir boyunca karbon atomlarının (ya da azot, oksijen, kükürt, vs.)  $sp^2$  hibridleşmesi yaptığı ve hibridleşmeye katılmayan bir p-atomik orbitalin bulunduğu karbon esaslı malzemelerdir. Zincir boyunca bu p-orbitallerinin örtüşmesi yeri değiştirilmiş  $\pi$  moleküler orbitallerinin oluşumuna yol açmaktadır.  $\pi-\pi^*$  geçişleri elektronların yerleşmesi için iki enerji durumu sağlar. Bu orbitaller, yarıiletkenlerdeki değerlik ve iletim bantlarına karşılık gelen En Yüksek Enerjili Dolu Moleküler Orbital (Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO)) ve En Düşük Enerjili Boş Moleküler Orbital

(Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO)) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, yarıiletkenlerin optik ve elektrik özelliklerini belirleyen elektronlarla dolu HOMO ve serbest elektronların bulunduğu LUMO farklı enerji seviyesine sahiptir. Bunların konumu ve ayrılması, organik yarı iletkenin moleküler yapısını değiştirerek ayarlanabilir. HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkı, inorganik yarıiletkenlerdeki valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji bant aralığını da temsil eden  $E_g$  ile ifade edilmektedir. Organik yarı iletkenler genel olarak karanlıkta ve oda sıcaklığında ihmal edilebilir bir düşük iç yük taşıyıcı yoğunluğu ile kendiliğinden geniş bant aralıklı yarı iletkenlerden (bant aralıkları 1,4 eV'ün üzerinde) yalıtkanlara kadar (bant aralığı 3 eV'ün üzerinde) olan aralığı kapsamaktadır [33, 34].



Şekil 2. 2 Organik yarıiletkenlerin HOMO ve LUMO enerji seviyelerinin çizimi

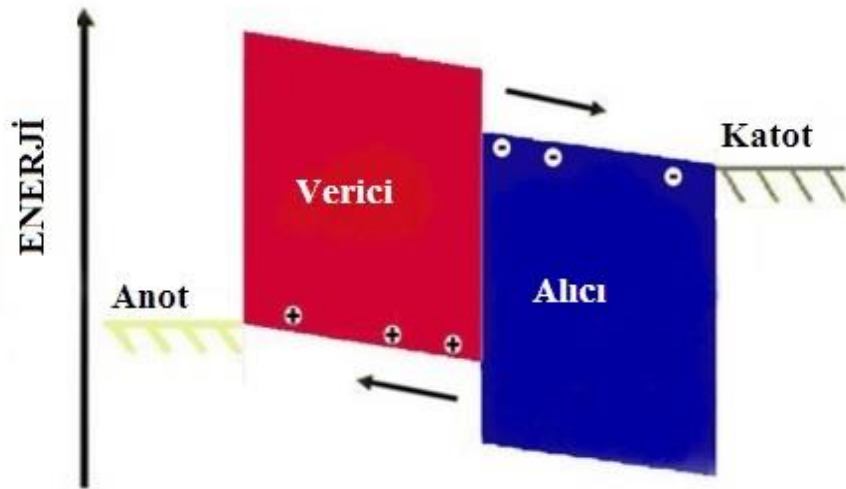
Birbirlerine ardışık tek ve çift karbon bağları ile bağlanan ve tekrarlanan gruplardan oluşan uzun zincirli yapılar konjuge polimer olarak adlandırılmaktadır. Konjuge polimerlerin bant genişliği yaklaşık 2 eV'dir. Bu durum, fotovoltaiik spektrumunun 650 nm'nin altındaki dalga boylarında soğrulmasını sınırlamaktadır. Öte yandan silikonun bant aralığı (~1,1 eV) oldukça küçük ve spektrumun 1100 nm'ye kadarlık kısmını kullanabilmektedir. Absorbsiyon spektrumu geniş, HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkı küçük, absorpsiyon katsayıları nispeten yüksek ( $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) ve çok ince aktif katmanlarda verimli absorpsiyona izin veren yeni konjuge organik malzemeler daha verimli, ucuz ve hafif fotovoltaiik hücreler üretilmesine olanak sağlamaktadır [35].

Organik malzemelere dışsal yük taşıyıcıları, kimyasal, fotokimyasal ya da elektrokimyasal yolla katkılanmaktadır. Yük taşıyıcı hareketliliği organik yarı iletkenler için önemli bir parametredir. Komşu moleküller veya polimer zincirleri arasındaki sınır  $\pi$  moleküler orbitallerinin örtüşmesi moleküller arası elektronik bağlantının gücünü temsil etmektedir. Yük taşıyıcının konumu ve polaronların oluşması inorganik emsalleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşük bir taşıyıcı hareketliliğine yol açmaktadır. Organik yarı iletkenlerde taşıyıcı iletimi molekülden moleküle atlamalı polaronlara dayanmaktadır. Atlamalı mekanizma nedeniyle yük taşıyıcı hareketliliği, moleküler yoğunluk, moleküler bozukluk, sıcaklık, yabancı maddelerin varlığı, yük taşıyıcı yoğunluğu, elektrik alanı, boyut/moleküler ağırlık, basınç dâhil olmak üzere birçok faktör tarafından belirlenmektedir. Bunun bir sonucu olarak, organik yarı iletken filmlerin morfolojisi, düzensiz amorf malzemeden yüksek düzenli kristal filmlere geçerken molekül büyüklüğünde değişim meydana gelebildiğinden, yük taşıyıcı mobilitesini önemli ölçüde etkilemektedir.

Organik fotovoltaiik hücre (OPV) malzemeleri, arayüzey tabaka malzemeleri, boşluk ileten n-tipi yarı iletkenler ve elektron ileten p-tipi yarı iletkenleri kapsamaktadır. Küçük moleküller ve polimerik yarı iletkenler p-tipi malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Klasik küçük moleküller porfirinler, ftalosiyaninler vb. malzemeleri içermektedir. Polimerik analogları ile karşılaştırıldığında küçük moleküller, yüksek yük taşıyıcı hareketliliğine yol açan yüksek saflık ve düzenli moleküler yapıları sahiptir. İlk OPV, magnezyum ftalosiyanin küçük molekülü kullanılarak üretilmiştir. Polimer yarı iletkenler, çözelti işlenebilirliği ve yapılarının çeşitliliği nedeniyle baskın p-tipi malzemelerdir. Baskın n-tipi malzemeler ise, hızlı yk ayırma ve iyi elektron hareketliliği nedeniyle fulleren türevleridir. Arayüzey tabakası olarak kullanılan OPV malzemeleri, elektron veya boşluk toplama tabakası, eksiton (elektron-boşluk çifti) ayrışma tabakası, morfoloji kontrolü tabakası ve tandem (ok eklemlı) fotovoltaiik hücreler için birleştirme tabakası vb. fonksiyonlarına göre farklı kategoriler şeklinde sınıflandırılmaktadır [36].

## 2.2 Alıcı (Acceptor)-Verici (Donor) Kavramı

Tipik OPV mimarisi şeffaf elektrot ve bir yansıtıcı metal elektrot arasına yerleştirilmiş bir organik malzemeden oluşur. Işığın absorblanması, eksiton (Coulomb etkileşmesi nedeniyle bağlı elektron-boşluk çifti) ayırma ve yüklerin taşınması gibi tüm süreç organik tabakada meydana geldiği için bu tip aygıtlar zayıf eksiton (elektron-boşluk çifti) ayrılması nedeniyle düşük verim gösterirler. Bu aygıt yapısını iyileştirmek için, eksitonların ayrılmasına yardımcı olacak ikinci bir organik ya da inorganik malzeme ilave edilir. HOMO ve LUMO enerji düzeyleri birbiriyle eşleşecek şekilde dengelenen bir elektron verici (donor) malzeme ve bir elektron alıcı (acceptor) malzeme bir araya getirilir ve bu birleşme heteroeklem olarak adlandırılır. Bağlı elektron-boşluk çifti (eksiton) arayüzeyde ayrıştıktan sonra, vericiden (donor) alıcıya (acceptor) elektron transferi ve alıcıdan (acceptor) vericiye (donor) boşluk transferi gerçekleşir (Şekil 2.3). 1992 yılında, Sarıçiftci vd., bir konjuge polimerden C60 fullerene çok hızlı bir şekilde elektron transferi gerçekleştiğini ve fullerenlerin alıcı maddeler olarak büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir. Heteroeklem fotovoltaiik hücrelerde verimli yük taşınmasının yanında, aynı zamanda fotovoltaiik spektrumunun farklı bölümlerini absorbe eden iki malzeme kullanılarak absorbsiyon spektrumunun genişletilmesi fotovoltaiik hücre performansının geliştirilmesi için yararlı olmaktadır.



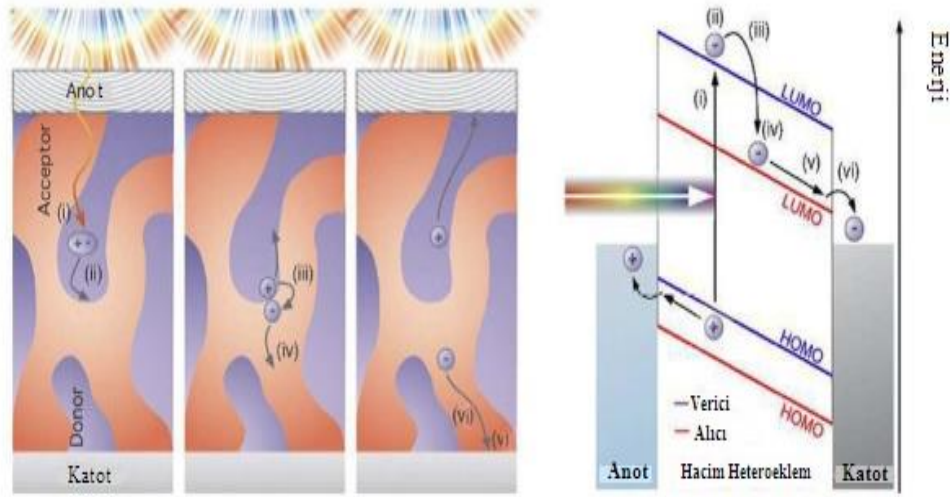
Şekil 2. 3 Çalışma koşulları altında elektron alıcı (acceptor) ve verici (donor) malzemeler ile aygıtın şematik gösterimi

### 2.3 Organik Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensibi

Organik fotovoltaik hücrelerde ışığın elektrik akımına dönüşmesi dört basamakta gerçekleşir. Bunlar;

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

Şeklinde gerçekleşmektedir. Süreçlerin meydana geliş biçimi Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 4 Hacim heteroeklem aygıtlarda fotoakım üretim mekanizmasının şematiki (i) Bir fotonun absorpsiyonu ile eksiton (elektron-boşluk çifti) üretimi. (ii) Alıcı (acceptor)-verici (donor) arayüzüne eksiton (elektron-boşluk çifti) difüzyonu. (iii) Yük çiftinin ayrılması. (iv) ilgili elektrotlara yük iletimi. (v) Yük toplanması. Bu süreçlerin aygıt üzerinde meydana geliş biçimi (sol) ve basitleştirilmiş enerji diyagramında meydana geliş biçimi (sağ) gösterilmektedir [37]

#### 2.3.1 Eksiton (Elektron-Boşluk Çifti) Üretimi

Gelen ışıktan bir foton absorblandıktan sonra, organik yarı iletkenin bir elektronu HOMO dan LUMO’ya uyarılır. Bu süreç inorganik yarıiletkenlerdeki bir elektronun valans bandından iletkenlik bandına uyarılmasına benzerdir. Ancak,  $\pi$ -konjuge organik malzemelerin düşük dielektrik sabiti nedeniyle, bu uyarılma süreci inorganik yarı iletkenlerdekinin aksine, eksiton olarak adlandırılan elektron ve boşluk arasında Coulombik çekim bulunmaktadır. Elektron-boşluk çifti arasındaki bağlanma enerjisi,

inorganik yarıiletkenlerden birkaç milivolt daha yüksek ve 0,1-1,4 eV mertebesindedir. Bunun bir sonucu olarak, konjuge polimerlerde fotouyarımların sadece %10'unun serbest yük taşıyıcılarının oluşmasına neden olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle eksitonları ayırmak için biri elektron verici (donor) ve diğeri elektron alıcı (acceptor) iki bileşen gerekmektedir.

Organik yarıiletkenlerin bant genişliği fotovoltaiik spektrumunun absorbsiyon genişliğini belirler. Bant aralığı küçük organik yarı iletkenler, daha geniş bir spektrumda absorbsiyon yapabilir. Bant genişliği 1,1 eV olan bir malzemenin fotovoltaiik ışığının %77'sini absorbe edebildiği rapor edilmiştir. Bu nedenle, OPV'lerden yüksek verimlilik elde etmek için düşük bant aralıklı organik maddeler kullanmak önemli bir adımdır. Ayrıca, organik maddelerin soğurma katsayıları  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  mertebesinde olduğundan, yansıtıcı bir arka kontak ile beraber 100 nm kalınlığında organik yarı iletken filmin fotonların çoğunu absorbe edebileceğine dikkat çekilmiştir [38].

### 2.3.2 Eksiton Difüzyonu

Işğın absorblanması ile oluşan eksitonların negatif ve pozitif yük olarak ayrılabilmesi için nanosaniye (ns) ölçeğinde bir yaşam süresi içinde alıcı (acceptor)-verici (donor) yüzeyine difüze olması gerekmektedir. Aksi durumda, enerjilerini kaybetmeleri sonucu arayüze ulaşmadan yeniden birleşirler. Bu nedenle, eksiton difüzyon uzunluğu, ikili katmanların kalınlığını ve alıcı (acceptor)-verici (donor) faz ayırma uzunluğunu sınırlamaktadır. Eksitonların yer değıştirmesi difüzyon uzunluğu olarak tanımlanmakta ve

$$L_D = \sqrt{D \times \tau} \quad (2.1)$$

denklemleri ile gösterilmektedir.  $D$  eksiton yayınımlarını ve  $\tau$  eksitonun doğal ömrünü ifade etmektedir. Eksiton difüzyon uzunluğu ( $L_D$ ) genel olarak, organik maddelerin  $1/\alpha$  optik absorbsiyon uzunluğundan çok daha düşüktür. Örneğın, bir polimer fotovoltaiik hücrede %60 ışık yoğunluğu absorbsiyonu için 100 nm civarında bir kalınlıkta foto aktif madde olarak kullanılan P3HT'nin difüzyon uzunluğu, yaklaşık 20 nm olarak bildirilmiştir. Eksiton difüzyon verimliliğini maksimize etmek için, eksitonun alacağı

mesafeyi azaltmak amacıyla yaygın olarak geniş bir arayüzey alanına sahip hacim heteroeklemler kullanılmaktadır.

### **2.3.3 Eksiton Ayrılması**

Eksitonların serbest yük taşıyıcıları şeklinde ayrılabilmesi için, düşük dielektrik sabitlerinden dolayı organik yarı iletkenlerde oluşan Coulombik çekimi yenmeleri gerekmektedir. Bu nedenle oda sıcaklığında ( $kBT \sim 0,025$  eV) yalnız termal aktivasyon enerjisi ile güçlü bir bağlanma enerjisi ( $\sim 0,1-1,0$  eV) ile bağlı eksitonlar ayrılamaz. Eksitonları bölmek için ya dış elektrik alanlar veya alıcı (acceptor)-verici (donor) arayüzde yerel elektrik alanlar sağlanmalıdır. Arayüzde alıcı (acceptor) ve vericilerin (donor) potansiyel enerjisindeki değişiklikler nedeniyle güçlü yerel elektrik alanlar oluşur. Bu nedenle, enerji farkı ile heteroeklem arayüzleri yaratmak için bir elektron alıcısı (acceptor) ile verici (donor) konjuge malzemelerin karıştırılması nötr eksitonları bölmek için etkili bir yöntemdir. Organik malzemeler ile oluşturulan heteroeklemlerde bağlanma enerjisinde bir azalma olmakta ve eksitonun ayrılmasını sağlamaktadır. Alıcı (acceptor)-verici (donor) sisteminde bu fotokimyasal yük transferinin 45 femtosaniyelik (fs) bir zaman ölçeğinde gerçekleştiği rapor edilmiştir. Örneğin, fotolüminesans sürecinin zaman ölçeği yaklaşık 1 nanosaniye (ns)'dir [39].

### **2.3.4 Yüklerin Elektrotlara Taşınması**

Yüksek verimli fotovoltaik hücreler elde etmek için ayrılmış yüklerin birleşmeden önce elektrotlara taşınması gerekir. Alıcı (acceptor)-verici (donor) malzemelerin mobilitesi (hareketliliği), yük taşıyıcı iletimi için kritik öneme sahiptir. Eksitonların rastgele atlamalı hareketinin yerine, boşluklar ve elektronlar sırasıyla itici güçleri ile anot ve katoda hareket eder. İlk olarak, alıcı (acceptor)-verici (donor) ekleminde bulunan elektron ve boşlukların potansiyelindeki değişme, alıcının (acceptor) LUMO'su ve vericinin (donor) HOMO'sunun dengesi ile belirlenir. Böylece, bu iç elektrik alan maksimum açık devre voltajını belirler ve yük taşıyıcıların hareketini yönlendirir. İkinci olarak, bir dış elektrik alan, elektronun toplanması için düşük iş fonksiyonlu bir metal ve boşlukların toplanması için yüksek iş fonksiyonlu bir metal asimetrik kontak kullanarak oluşturulabilir. Son olarak, ilgili yüklerin konsantrasyon değişimi difüzyon

akımlarına yol açabilir. Organik maddelerin ve elektrotların arayüzüne yük taşıyıcıları taşındıktan sonra, elektrotlara çekilir. Organik maddelerin ve elektrotlar arasındaki bir omik kontak, anota boşluk ve katota elektronların verimli bir şekilde toplanması için önemlidir. Elektrot/organik maddelerin arayüzlerinin doğası karmaşıktır. Farklı stratejiler elektrotların iş fonksiyonlarını ve maddelerin enerji düzeylerini hizalamayı başarmıştır. İlk olarak, katot ve anot için farklı iş fonksiyonlarına sahip metal elektrotlar kullanılmıştır. Örneğin, P3HT/PCBM sisteminde, PCBM'in LUMO'sunu eşleştirmek için düşük iş fonksiyonlu Al (4,2 eV) gibi metal kullanılırken P3HT'nin HOMO'su ile eşleştirmek için 4,7 eV'lik bir iş fonksiyonu olan ITO kullanılmıştır. İkinci olarak, elektrotlar ve aktif tabakalar arasına ara tabaka kaplanması, arayüzey yük yoğunluğu dağılımını ve/veya organik elektronik enerji seviyeleri ve elektrotların Fermi seviyelerinin hizalanmasını etkileyerek geometrik değişimlere yol açmaktadır [40]. Bununla birlikte, arayüzey mekanizması hala tartışmalıdır. Bu arayüzlerin karmaşık ayrıntılarının tam olarak anlaşılması için çalışmalar devam etmektedir.

## **2.4 Organik Fotovoltaik Hücre Konfigürasyonları**

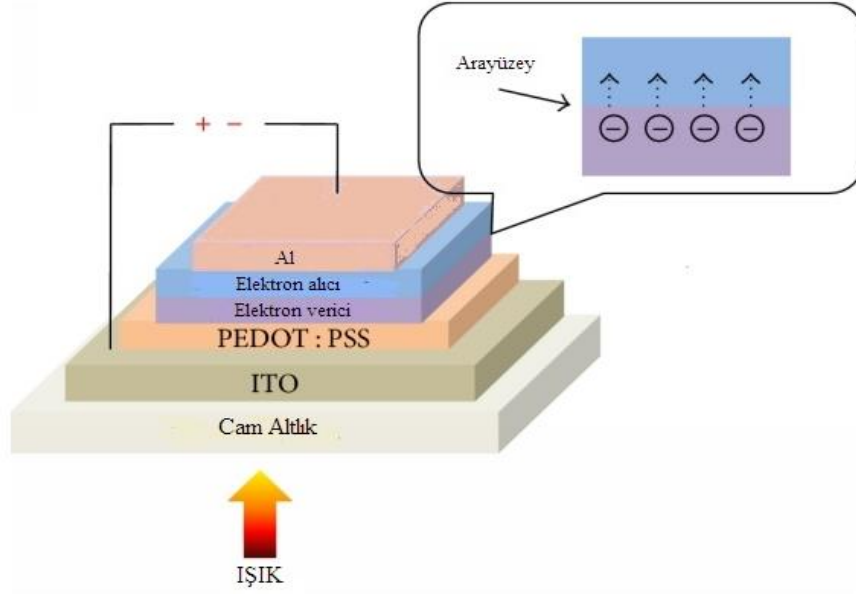
Yüksek performanslı fotovoltaik hücreler elde etmek için konjuge malzemelerin özelliklerinin önemli olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte aygıt yapısının da verimi etkilediği bilinmektedir. Aygıt mimarisindeki tasarımlarla beraber hücrelerin veriminde de gelişmeler olmuştur. Örneğin, iki elektrot arasına sandviç edilmiş tek ışık absorblayıcı konfigürasyondan elektrotlar arasına iki tabakalı alıcı (acceptor)/verici (donor) organik heteroeklem yapısına geçiş ile beraber verimliliğin %0,1'den %1'e önemli ölçüde değişimi yüksek verimli OPV'lerin gelişimine ışık tutmuştur [41-45]. Ayrıca, alıcı (acceptor) ve verici (donor) malzemelerin karıştırılması ile oluşturulan heteroeklem yapı ve aygıtların üst üste eklenmesi ile oluşturulan tandem (çok eklemlili) aygıt yapısı ile günümüzde organik fotovoltaik hücre verimi %10'u geçmiştir [46]. Bu bölümde farklı aygıt yapıları tartışılacaktır.

#### **2.4.1 Tek Tabakalı Aygıtlar**

Bu aygıt konfigürasyonu, iki metal elektrot arasına bir polimer tabakanın kaplanması ile oluşur. Bu yapıda, eksitonlar sadece iki arayüzde ayrılabilir. Tek tabakalı fotovoltaiik hücrelerin zayıf elektron hareketliliği nedeniyle verimleri düşüktür.

#### **2.4.2 Düzlemsel İki Tabakalı Aygıt Konfigürasyonu**

Düzlemsel iki tabakalı heteroeklem fotovoltaiik aygıt yapısı, 1986 yılında Tang tarafından verici (donor) ve alıcı (acceptor) olarak CuPc ve PTCBI kullanılarak geliştirilmiştir. Şekil 2.5'de bir anot, boşluk ileten tabaka, alıcı (acceptor), verici (donor) ve bir katot içeren klasik aygıt yapısı gösterilmiştir. Bu yapı OPV'lerin temel çalışma prensibini anlamak için basit bir konfigürasyonu temsil etmektedir. Bu yapıda elektron ileten tabaka da kullanılabilir. Boşluk ve elektron taşıma katmanları, gereksiz yük birleşmesini önlemek için elektron ve boşlukları bloke etme ve Omik kontak oluşturmak için elektrotların çalışma fonksiyonunu değiştirmek gibi çeşitli işlevlere sahiptir. Tek tabakalı aygıt konfigürasyonu ile karşılaştırıldığında cihaz verimliliğinin önemli bir ölçüde artışının nedeni, organik aktif katmanda ışık ile oluşturulan eksitonların verimli bir şekilde serbest yüklere ayrılmasını sağlayan alıcı (acceptor)/verici (donor) arasındaki heteroeklemdir. İki tabakalı aygıt yapısı, farklı alıcı (acceptor) ve verici (donor) malzemeler ve aynı zamanda yeni organik maddelerin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır.

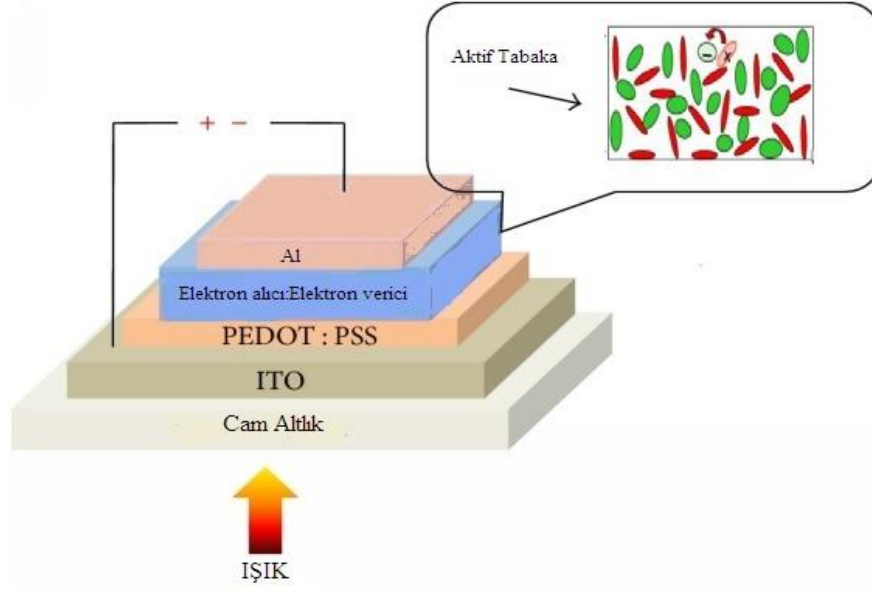


Şekil 2. 5 Çift tabakalı organik fotovoltaiik hücre yapısı

İki tabakalı aygıtlarda, kısa eksiton difüzyon mesafesi nedeniyle verimlilik düşüktür. Sınırlı eksiton difüzyon katsayısı sabiti nedeniyle, aktif tabakaların kalınlığının 100 nm'den fazla olmaması gerekmektedir. Arayüzey tabakası mühendisliği, kısa eksiton difüzyon mesafesinde de kalın aktif tabakaların kullanımını mümkün kılacak bir çözümdür.

#### 2.4.3 Hacim Heteroeklem Aygıt Konfigürasyonu

Organik yarıiletkenlerdeki kısa eksiton difüzyon mesafesi nedeniyle düzlemsel iki tabakalı OPV'ler tarafından sergilenen düşük verimlilikte etkileyici bir iyileşme ile sonuçlanan hacim heteroeklem kavramı ilk kez Heeger vd., tarafından önerilmiştir (Şekil 2.6). Verimdeki bu gelişme, karıştırılan alıcı (acceptor)/verici (donor) filmlerin nano ölçekte sürekli ve iç içe ağ oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, alıcı (acceptor) ve verici (donor) arasındaki arayüzey alanı önemli ölçüde artmakta ve her bir arayüz eksiton difüzyon uzunluğundan daha az bir mesafede yer almaktadır.



Şekil 2. 6 Bir hacim heteroeklem fotovoltaiik hücre yapısı

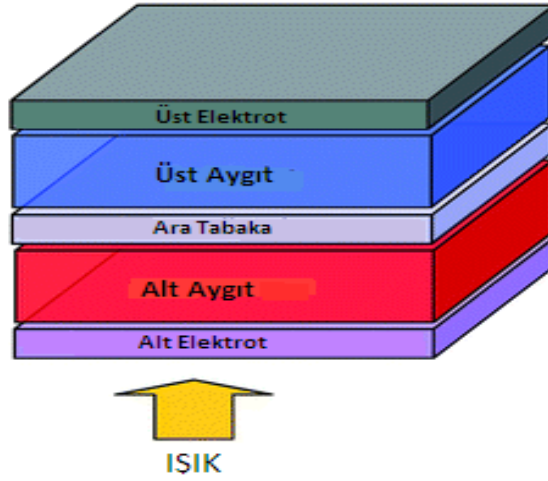
Beklendiği gibi, bazı heteroeklem fotovoltaiik hücrelerde yüksek bir iç kuantum verimliliği ile güneş ışığı toplanabilmektedir. Bu ışık ile üretilen eksitonların arayüze ulaşabildiği ve bir elektron ve boşluk olarak ayrılabilirdiği anlamına gelmektedir.

Düzlemsel iki tabakalı aygıt yapısında, alıcı (acceptor) ve verici (donor) fazlar tamamen birbirinden ayrı ve boşluk ve elektronlar sırasıyla anot ve katoda taşınabiliyorken, hacim heteroeklem aygıt yapısında alıcı (acceptor) ve verici (donor) fazlar rastgele karıştırılmakta ve her iki elektrotta aynı anda temas etmektedir. Maddeler ve elektrot arasındaki elverişsiz teması (örneğin, verici (donor) ile katot arasındaki temas veya alıcı (acceptor) ile anot arasındaki temas) ve elverişsiz yük toplamayı engellemek için aktif tabaka ve elektrotlar arasına elektron ileten tabaka ve/veya boşluk ileten tabaka olarak arayüzey tabakaları yerleştirilmektedir. Yüklerin hareketine yardımcı olacak bir lokal alan oluşturmak için farklı iş fonksiyonuna sahip elektrotlar kullanılmaktadır. Ayrıca, boşlukları ve elektronları elektrotlara taşımak için sızıntı sağlayacak yollar oluşturulması gerekmektedir. Aksi takdirde, termodinamik faz ayrılması sırasında tuzaklama adaları veya çıkmaz yollar oluşabilmekte ve cihaz verimini azaltabilmektedir. Bu nedenle aktif tabaka filminin morfolojisi yüksek performanslı fotovoltaiik hücre üretimi için kritik öneme sahip olduğu bilinmektedir. Hacim heteroeklem fotovoltaiik hücre oluşturmak için çözelti dökme ve biriktirme gibi iki yöntem kullanılmaktadır. Alıcı

(acceptor) ve verici (donor) pigmentlerin biriktirilmesi ile düzlemsel iki tabakalı yapıdan çok daha verimli fotovoltaiik hücreler elde edilebilmektedir. Çözelti dökme yönteminde, polimer/polimer, polimer/molekül ya da molekül/molekül alıcı (acceptor)-verici (donor) karışımları kolayca kaplanabilmektedir. Poly(p-phenylene vinylene) (PPV) polimeri hacim heteroeklem fotovoltaiik hücrelerde kullanılan ilk polimerdir. Poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-p-phenylene vinylene] (MDMO-PPV) ve PCBM'in karıştırılması ile %2,5 verim elde edilebilmektedir. İkinci baskın verici (donor) madde olarak P3HT, %5'in üzerinde bir verimle fotovoltaiik hücrelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son 5 yılda, P(BDT-FTT) serisi polimerler sahnenin ortasına durmakta ve bu polimerlerin kullanıldığı tek kavşak OPV'lerin verimliliği % 10'a ulaşmıştır.

#### **2.4.4 Tandem (Çok Eklemlili) Aygıt Konfigürasyonu**

Aktif tabakada alıcı (acceptor) olarak PCBM kullanıldığında, verici (donor) malzemelerin optimum bant aralığının 1,2-1,7 eV aralığında olması gerektiği hesaplanmıştır. Bunun nedeni LUMO'nun dengelemesi için 0,3 eV enerji farkı gerektiği varsayımına dayanmaktadır [47]. Bunun bir sonucu olarak, kızılötesi (IR) spektrumun çoğu kullanılamaz ve eksitonlara dönüştürülemez. Aynı zamanda, organik yarı iletkenlerin düşük yük taşıyıcı hareketliliği, güneş ışığını absorbe etme için kalınlıklarını sınırlamaktadır. Tek kavşak yapının bu iki sınırlamalarının üstesinden gelmek için, üst üste birkaç hücre istifleyerek tandem (çok eklemlili) fotovoltaiik hücreler kavramı önerilmiştir (Şekil 2.7). Tipik bir organik tandem (çok eklemlili) fotovoltaiik hücre iki farklı aygıtın üst üste istiflenmesi ile oluşmaktadır. İki hücre, bir hücreden gelen boşluklarla diğer hücreden gelen elektronların birleşmesine izin veren bir ara tabaka ile bağlanır.



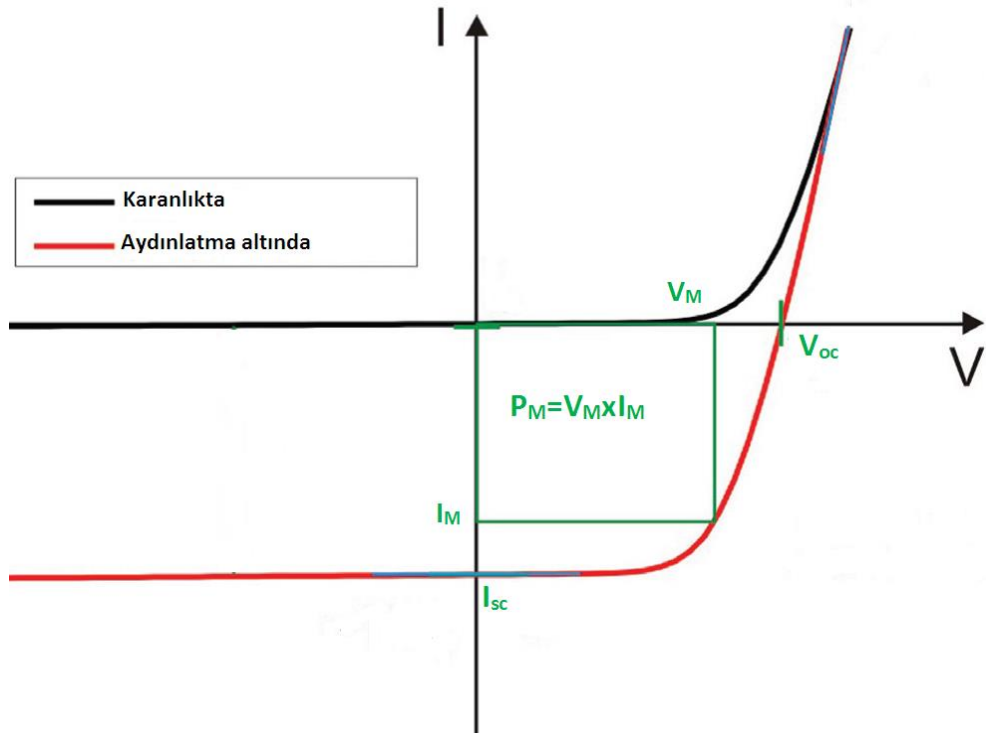
Şekil 2. 7 Tandem organik fotovoltaiik hücre yapısı

İlk organik tandem (çok eklemlı) fotovoltaiik hücreler, 1990 yılında Hiramoto tarafından rapor edilmiş ve özdeş iki katmanlı fotovoltaiik hücreler ile üretilmiştir [48]. Bu fotovoltaiik hücrede  $H_2$ -ftalosiyenin ( $H_2Pc$ ) (50 nm) ve perylenetetracarboxylic türevi (Me-PTC) (70 nm) tabakaları kullanılmıştır. Omik kontak yapmak için çok ince bir altın (Au) (2 nm) geçiş tabakası bu iki fotovoltaiik hücre arasına yerleştirilmiştir. Bu ilk tandem (çok eklemlı) organik fotovoltaiik hücreden, tek fotovoltaiik hücreden elde edilenin yaklaşık iki katı kadar bir  $V_{oc}$  elde edilmiştir. Tandem OPV performansını artırmak için farklı üretim teknikleri (örneğin, termal buharlaşma ve çözelti işleme), yeni malzemeler (örneğin, küçük moleküler makromoleküler ve inorganik parçacıklar) ve çeşitli aygıt yapıları (örneğin, inorganik/organik hibrid yapı ve çok sayıda terminalli tandem (çok eklemlı) OPV) geliştirme gibi muazzam çabalar sarfedilmektedir. Bütün bu girişimler sonucunda tandem (çok eklemlı) OPV'lerin performansı çok hızlı gelişmektedir. Son zamanlarda Heliatek GmbH, vakum-işlemlı tandem (çok eklemlı) OPV'lerin verimini %12 olarak rapor etmiştir [33].

## 2.5 Organik Fotovoltaiik Hücrelerin Karakterizasyonu

Fotovoltaiik hücreler, AM 1.5 spektrumu olarak adlandırılan dünya yüzeyine 48,2°'lik bir açıyla gelen bir fotovoltaiik spektrum ile eşleşen  $1000 \text{ W/m}^2$  ışık altında karakterize edilmektedir. Fotovoltaiik hücrelerin performansı ve elektriksel özellikleri, karanlık ve aydınlatma altında Akım -Voltaj ( $I-V$ ) karakteristikleri ölçülerek tespit edilmektedir (Şekil 2.8).  $I-V$  karakteristik eğrileri bir elektronik aygıttan akan akım ve uçlar arasında

uygulanan voltaj arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Fotovoltaik hücrelerin performansı ve elektriksel özellikleri, kısa devre akımı (short circuit current ( $J_{sc}$ )), açık devre voltajı (open circuit voltage ( $V_{oc}$ )), dolum faktörü (fill factor ( $FF$ )) ve güç dönüşüm verimliliği (power conversion efficiency ( $PCE$ )) gibi kavramlar kullanılarak belirlenmektedir. Tüm bu parametreler fotovoltaik hücrelerin  $I-V$  eğrisinden çıkarılabilmektedir.  $I-V$  eğrisi üzerindeki  $P_M$  noktası maksimum güç çıkışının olduğu noktayı ifade etmektedir. Maksimum güç noktasında akım ve voltaj,  $V_M$  ve  $I_M$  olarak ifade edilir. Maksimum güç,  $V_M$  ve  $I_M$ 'nin çarpımına karşılık gelir. Grafik üzerinde gösterilen  $P_M$  alanı fotovoltaik hücrelerin güç dönüşüm verimi ile doğru orantılıdır.



Şekil 2. 8 Karanlıkta ve aydınlatma altındaki organik fotovoltaik hücrelerin Akım-Voltaj ( $I-V$ ) karakteristiği

### 2.5.1 Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), aydınlatma altında gerilim uygulanmıyorken elde edilen akımdır.  $I_{sc}$ , ışık etkisiyle üretilen yük taşıyıcı yoğunluğu ve organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcı hareketliliği ile belirlenir:

$$I_{sc} = ne\mu E \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de,  $n$  taşıyıcı yük yoğunluğu,  $e$  elementel yük,  $\mu$  mobility (hareketlilik) ve  $E$  elektrik alandır. Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), fotovoltaiik hücre alanı ile kabaca orantılı olduğundan, genellikle fotovoltaiik hücreleri karşılaştırmak için kısa devre akım yoğunluğu,  $J_{sc} = I_{sc}/A$  kullanılmaktadır. Yüksek yük taşıyıcı yoğunluğu elde etmek için küçük bant aralıklı bir yarı iletken ve geniş bir güneş spektrumu kullanılmalıdır. Ayrıca, yük taşıyıcı hareketliliği organik yarıiletken ince filmlerin morfolojisine duyarlı olduğundan, morfolojilerini optimize etmek için farklı malzeme katkılama, farklı çözücü ve kaplama yöntemleri geliştirme gibi çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, katkısız PEDOT:PSS ve maksimum verimin elde edildiği 1,25 mg/ml’lik  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasının bulunduğu fotovoltaiik hücrelerin  $J_{sc}$  değerleri sırasıyla 8,75 mA/cm<sup>2</sup> ve 7,57 mA/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür.  $H_3BO_3$  katkısı ile beraber  $J_{sc}$  değerinde bir miktar düşüş olsa da  $V_{oc}$  ve  $FF$  gibi diğer parametrelerdeki artış sebebiyle fotovoltaiik hücrenin veriminde artış görülmüştür. Düşük doz gama ışınının  $H_3BO_3$  içeren fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmada, katkısız ve dozlanmamış PEDOT:PSS tabakası kullanılan referans aygıt 4,48 mA/cm<sup>2</sup>  $J_{sc}$ , dozlanmamış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre 5,66 mA/cm<sup>2</sup>  $J_{sc}$ , 40 Gy gama ışını ile dozlanmış katkısız PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre 5,18 mA/cm<sup>2</sup>  $J_{sc}$  ve 40 Gy gama ışını ile dozlanmış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanan fotovoltaiik hücre 6,28 mA/cm<sup>2</sup>  $J_{sc}$  sergilemiştir.  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakasına düşük doz gama ışını uygulanması fotovoltaiik hücrelerin  $J_{sc}$  değerinde artışa neden olmuştur.  $J_{sc}$  değerindeki artış fotovoltaiik hücrenin veriminde artışa neden olmuştur.

### 2.5.2 Açık Devre Voltajı

Fotovoltaiik hücre üzerinde herhangi bir akımın akmadığı durumdaki voltaja açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) denir. OPV’lerde açık devre voltajı aktif tabaka ve elektrotlar arasında bir omik kontak oluşturmak üzere, alıcının (acceptor) LUMO enerji seviyesi ve vericinin (donor) HOMO enerji seviyesi arasındaki farkla lineer olarak bağlantılıdır. Verici (donor) malzemenin HOMO’sunun düşürülmesi ve alıcı (acceptor) malzemenin LUMO’sunun

arttırılması  $V_{oc}$  değerinde artışa yol açmaktadır. Konjuge polimerlerin çoğu <600 nm'lik bir dalga boyuna karşılık gelen 2 eV'den daha büyük bir bant aralığı enerjisine sahiptir. Güneş spektrumunu daha geniş bir aralıkta absorbe etmek için optimal bant aralığı enerjisi <1,8 eV'dir. Bu nedenle  $V_{oc}$ 'yi geliştirmek için çoğu zaman yeni alternatif malzemeler tasarlanmaktadır. Polimer/fulleren heteroeklem fotovoltaiik hücrelerde açık devre voltajı, aktif tabakanın morfolojisinden etkilenmektedir. Elektrotların iş fonksiyonları arayüzler ile değiştirilebildiğinden, açık devre voltajı arayüzlere de duyarlıdır.

Bu tez çalışmasında, katkısız PEDOT:PSS ve maksimum verimin elde edildiği 1,25 mg/ml'lik  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasının bulunduğu fotovoltaiik hücrelerin  $V_{oc}$  değerleri sırasıyla 0,535 V ve 0,602 V olarak ölçülmüştür.  $H_3BO_3$  katkısı ile beraber  $V_{oc}$  değerinde artış görülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda,  $V_{oc}$ 'deki artış ITO'nun iş fonksiyonundaki değişim ile açıklanmıştır. Düşük doz gama ışınının  $H_3BO_3$  içeren fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmada, katkısız ve dozlanmamış PEDOT:PSS tabakası kullanılan referans aygıt 0,460 V  $V_{oc}$ , dozlanmamış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre 0,500 V  $V_{oc}$ , 40 Gy gama ışını ile dozlanmış katkısız PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre 0,520 V  $V_{oc}$  ve 40 Gy gama ışını ile dozlanmış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanan fotovoltaiik hücre 0,500 V  $V_{oc}$  sergilemiştir. PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$  katkılanması  $V_{oc}$ 'de artış sağlamıştır. Bununla beraber düşük doz gama ışını uygulanması  $V_{oc}$  değerinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.

### 2.5.3 Dolum Faktörü

Dolum faktörü ( $FF$ ), hücrelerin maksimum elektrik gücünün ( $P_{max}$ ) açık devre voltajı ve kısa devre akımının çarpımına bölümü ile ifade edilmektedir.  $P_{max}$ ,  $I-V$  eğrisinde maksimum güç noktası ile belirlenir. Dolum faktörü,

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.3)$$

denklemini ifade edilmektedir. Dolum faktörü, yük taşıyıcıların yeniden birleşmesi ve iletimi arasında bir rekabet olmasına rağmen elektrotlara ulaşan yük taşıyıcılarından etkilenen bir parametredir. Ayrıca, hücrelerin seri direnci önemli ölçüde dolum faktörünü etkilemekte ve bu nedenle optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, katkısız PEDOT:PSS ve maksimum verimin elde edildiği 1,25 mg/ml'lik  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasının bulunduğu fotovoltaiik hücrelerin  $FF$  değerleri sırasıyla %38.3 ve %46.9 olarak hesaplanmıştır.  $H_3BO_3$  katkısı ile beraber  $FF$  değerinde artış görülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda, dolum faktöründeki artış PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$  eklenmesi morfolojideki iyileşme ile açıklanmıştır.

Bu tez çalışmasının diğer önemli bir çıktısı olan düşük doz gama ışınının  $H_3BO_3$  içeren fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmada, katkısız ve dozlanmamış PEDOT:PSS tabakası kullanılan referans aygıt %40  $FF$ , dozlanmamış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre %39  $FF$ , 40 Gy gama ışını ile dozlanmış katkısız PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre %35  $FF$  ve 40 Gy gama ışını ile dozlanmış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanan fotovoltaiik hücre %39  $FF$  sergilemiştir. Düşük doz gama ışını  $FF$  değerinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.

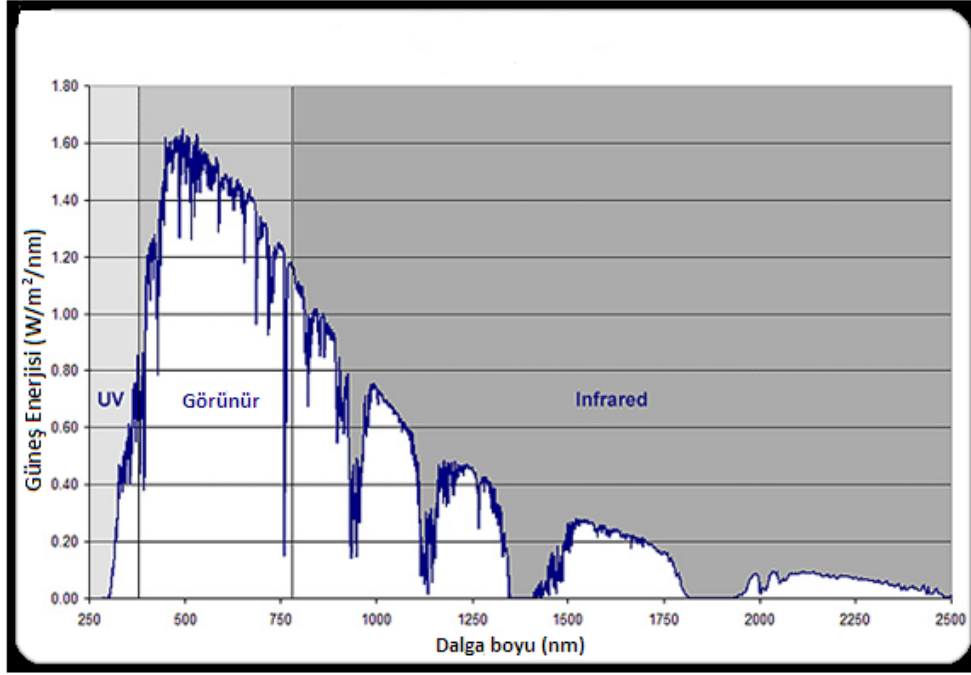
#### 2.5.4 Güç Dönüşüm Verimi (PCE)

Fotovoltaiik hücrelerin en önemli parametrelerinden biri güç dönüşüm verimi ( $PCE$ ) dir.  $PCE$ , aygıtın güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme konusunda ne kadar etkili olduğunu ifade etmek için kullanılan bir terimdir.  $PCE$ , aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$PCE = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.4)$$

$V_{oc}$  açık devre voltajı,  $I_{sc}$  kısa devre akımı,  $FF$  dolum faktörü ve  $P_{in}$  gelen ışığın güç yoğunluğudur. Denklem 2.4'den görüleceği gibi  $PCE$ ,  $FF$ ,  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$ 'ye bağlıdır. Ayrıca  $PCE$  ışık kaynağının gücüne ve spektrumuna da bağlıdır. Çünkü fotovoltaiik hücreler tüm dalga boylarını aynı verimle absorblayıp ve fotonları elektrona dönüştürememektedir. Çeşitli fotovoltaiik hücreler arasında karşılaştırma yapılırken,

*PCE*'nin hesaplanması için standart bir spektrum seçilmelidir. Yeryüzünde güneş ışığı spektrumu konum, bulut örtüsü ve diğer faktörlere göre değişmektedir. Şekil 2.9, dış mekân kullanımı için tasarlanmış fotovoltaiklerin performansını ölçmek ve karşılaştırmak için en yaygın kullanılan AM1.5 G standart spektrumunu göstermektedir. Laboratuvarda standart lambalar ile bu spektrumu oluşturmak zor olduğundan dış kuantum verimi ölçümleri ile güç dönüşüm verimi ölçümleri doğrulanmaktadır.



Şekil 2. 9 Dünyaya gelen güneş spektrumu

Bu tez çalışmasında, ilk defa katkısız PEDOT:PSS ve maksimum verimin elde edildiği 1,25 mg/ml'lik  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasının bulunduğu fotovoltaik hücrelerin *PCE* değerleri sırasıyla %1,79 ve %2,14 olarak hesaplanmıştır.  $H_3BO_3$  katkısı ile beraber *PCE* değerinde yaklaşık %20'lik bir artış görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, düşük doz gama ışınının  $H_3BO_3$  içeren fotovoltaik hücrelerin performansına etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmada, katkısız ve dozlanmamış PEDOT:PSS tabakası kullanılan referans aygıt %0,82 *PCE*, dozlanmamış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaik hücre %1,10 *PCE*, 40 Gy gama ışını ile dozlanmış katkısız PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaik hücre %0,94 *PCE* ve 40 Gy gama ışını ile dozlanmış ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanan fotovoltaik hücre %1,22 *PCE* sergilemiştir. Katkısız ve dozlanmamış

referans aygıt yapısı ile karşılaştırıldığında  $H_3BO_3$  katkılanmış ve düşük doz gama ışını uygulanmış fotovoltaiik hücrelerin *PCE* değerinde %49'luk bir artış meydana gelmiştir.

### 2.5.5 Dış kuantum verimi (EQE)

Bir aygıtın dış kuantum verimi (external quantum efficiency (*EQE*)), gelen fotonların akıma dönüşen kısmını ifade eder ve dalga boyuna bağlıdır. Dalga boyuna bağlı olmasının bir nedeni, aktif tabakaların absorpsiyonunun dalga boyunun bir fonksiyonu olmasıdır. Bir başka nedeni, özellikle inorganik fotovoltaiik hücrelerde, aygıtta absorbe edilen fotonun konumudur. Bu yüklerin toplanma ya da birleşme ve kaybolma olasılığını etkileyen bir durumdur. Aydınlatma altında beklenen kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ), *EQE*'den tahmin edilebilmektedir. Standart AM1.5 G spektrum için,

$$J_{sc} = \int_0^{\infty} eEQE(\lambda) \frac{\lambda}{hc} E_{\lambda}^{AM1.5G}(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

denklemleri ile  $J_{sc}$  hesaplanabilmektedir.  $E_{\lambda}^{AM1.5G}$ , AM1.5 G spektrumunun spektral ışınımı,  $\lambda$  dalga boyu,  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı ve  $e$  elementel yükü ifade etmektedir. *EQE*, doğru verim ölçme, yeni malzeme değerlendirme veya teknoloji işleme açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, doğru ölçüm için aygıtın aktif alanını tanımlama çok önemlidir. Bu nedenle, cihaz alanından daha küçük açıklıkta bir maske aydınlatılmış alanı tanımlamak için kullanılır.

Bu tez çalışmasında, ilk defa katkısız PEDOT:PSS ve maksimum verimin elde edildiği 1,25 mg/ml'lik  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakası ve 5 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasının bulunduğu fotovoltaiik hücrelerin *EQE* ölçüm sonuçları elde edilen fotovoltaiik parametreler ile uyumludur.

## 2.6 Malzemeler

Geçtiğimiz 10 yıl içinde, organik fotovoltaiik hücrelerden solüsyon işlemli küçük molekül fotovoltaiik hücrelerin güç dönüşüm verimi %10 iken hacim heteroeklem polimer fotovoltaiik hücrelerin verimi %2,5'ten %11'e kadar yükselmiştir. Verimdeki bu hızlı ilerleme yeni malzeme ve aygıt yapısı üretiminin geliştirilmesi ile başarılmıştır. Günümüzde, sarf edilen çabaların büyük bölümü, yeni alıcı (acceptor), verici (donor) ve

arayüzey malzemelerin gelişimi, aktif tabakanın nanoyapısının optimize edilmesi, yeni aygıt mimarilerinin üretimi vb. kapsamaktadır.

Bu bölümde, bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler tanıtılacaktır.

### **2.6.1 İndiyum Kalay Oksit (ITO)**

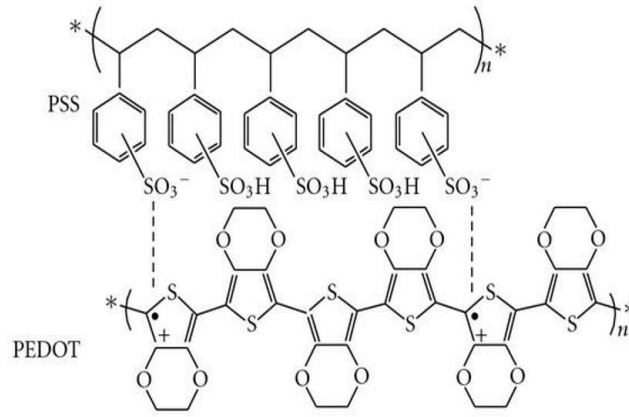
Kalay ile katkılanmış indiyum oksit (ITO), şeffaf iletken kaplama yapmak için kullanılır. ITO ince film tabakası, elektron-demeti buharlaştırma veya saçtırma ile kaplanabilmektedir. ITO, görünür bölgede şeffaf, iyi elektrik iletkenliği ve altlığa iyi tutunma gibi teknolojik olarak ilginç özellikleri bir arada bulunduran birkaç metal oksitten biridir. Şeffaflık ve yüksek iletkenlik nedeniyle ITO anot kontak olarak organik ışık yayan cihazlarda (OLED) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ITO kaplı altlıklar, dokunmatik panel kontakları, LCD için elektrotlar ve elektrokromik ekranlar, enerji muhafaza eden mimari pencereler, otomobil camları, ampul verimliliği artırmak için ısı yansıtıcı kaplamalar, gaz sensörleri, antistatik pencere kaplamaları, cam üzerinde aşınmaya dayanıklı kaplamalar vs. uygulamalarda kullanılmaktadır.

ITO yüzeyine kaplanan organik ince filmler ITO ile doğrudan temas halinde olduğundan, ITO'nun yüzey özelliklerinin doğrudan cihazın karakteristiklerini etkilemesi beklenmektedir. Kısa devre, lineer olmayan  $I-V$  özellikleri ve cihazın sürekli çalışma sonrası üst katot temas yüzeyinde hasar oluşması gibi anormal cihaz davranışları ITO yüzeyleri üzerine inşa edilen OLED'lerde gözlenmiştir. ITO'nun düşük boşluk enjeksiyon verimi, aygıtlarda sınırlı boşluk iletimi ile sonuçlanmaktadır. Şimdiye kadar bu sorunların azaltılması, organik malzemelerin özelliklerini değiştirme veya ITO ve aktif tabaka arasına uygun taşıyıcı enjeksiyon/ileten özelliklerine sahip bir ara stabilizasyon tabakası yerleştirilmesi ile olmuştur [49-51].

Bu tez çalışmasında fotovoltaiik hücrelerin hazırlanmasında anot tabakası olarak üzeri ITO kaplanmış ve kısa devre oluşmaması için bir kısmı asit çözeltisi kullanılarak kaldırılmış cam örnekler kullanılmıştır.

### 2.6.2 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-Poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)

PEDOT, poly(3,4-ethylenedioxythiophene)'nin kısaltmasıdır ve tiofenlerin türevlerinden biridir. Ethylenedioxythiophene (EDOT) monomerlerinden yapılmış bir konjuge polimerdir. Sırayla değişen tek ve çift bağlardan oluşan bir zincir yapısına sahip polimerlere konjuge polimerler denmektedir. PSS, poly(styrenesulfonate)'ın kısaltmasıdır ve aynı zamanda bir polimerdir. Monomerin her styrene halkası bir asidik sülfonik asit ( $\text{SO}_3\text{H}$ ) grubuna sahiptir. PSS ile katkılanmış PEDOT yapısı Şekil 2.10'da gösterilmektedir [52].



Şekil 2. 10 PSS ile katkılanmış PEDOT yapısı

PEDOT:PSS yüksek iş fonksiyonu, görünür bölgede geçirgen olması, yüksek iletkenlik, mekanik esneklik, kolay işlenebilme, düşük oksidasyon potansiyeli ve katkılı durumda iyi bir kararlılık ile orta bant aralığı gibi özellikleri nedeniyle elektronik, optik, elektrokimyasal ve biyomedikal uygulamalar için son derece büyük ilgi gören bir polimerdir. PEDOT:PSS organik fotovoltaiik hücrelerde ITO ve organik aktif tabaka arasındaki bağlantıyı geliştirmek ve etkili boşluk toplanması ve iletimi için ITO'nun iş fonksiyonunu arttırmak amacı ile anot ara tabakası olarak kullanılmaktadır. Organik fotovoltaiik hücrelerde arayüzey tabakaları önemli bir rol oynar. Bu nedenle, bu tabakaların kararlılığının ve bozulma mekanizmalarının geliştirilmesi fotovoltaiik hücre performansı için son derece büyük bir öneme sahiptir. Ancak PEDOT:PSS'nin asidik doğası nedeniyle ITO ve aktif tabaka ile etkileşimi sonucunda aygıt yapısında bozulmalar meydana gelmekte ve böylece verim ve kararlılığın düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu bozulmanın önüne geçmek ve PEDOT:PSS'nin iletkenliğinin

ve morfolojisinin geliştirilmesi için farklı katkılama ve çözelti işleme çalışmaları yapılmaktadır. Çok sayıda yaklaşım, katkı ilavesi ile beraber PEDOT:PSS'nin iş fonksiyonunun ve iletkenliğinin değiştiğini göstermiştir. Bu bulgular katkı maddeleri ile beraber PEDOT:PSS'nin elektriksel özellikleri ve pürüzlülüğünün kontrol altına alınabilme olasılığının olduğunu göstermektedir [18].

PEDOT:PSS'nin iletkenliğinin ve morfolojisinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda  $WO_x$ ,  $MoO_x$ ,  $V_2O_5$ ,  $NiO_x$ , Etilen Glikol (EG), Dimetil Sülfoksit (DMSO) gibi katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Ancak yüksek maliyetleri, zor ve uzun üretim süreçleri nedeniyle bu katkı malzemelerine alternatif ucuz yeni malzeme arayışları devam etmektedir.

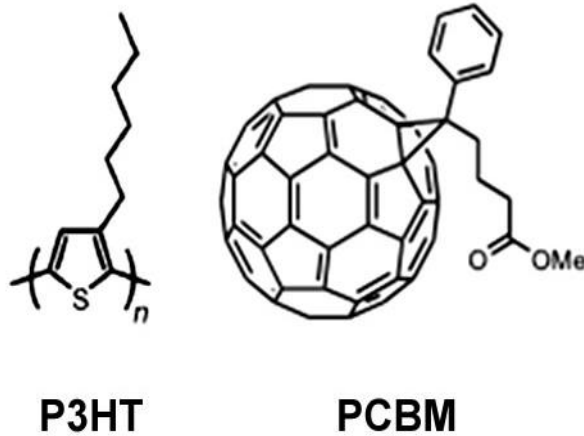
Bu tez çalışmasında ilk defa PEDOT:PSS'ye  $H_3BO_3$  katkılanmış ve  $H_3BO_3$ 'ün PEDOT:PSS morfolojisinde ve fotovoltaiik hücre parametrelerinde iyileşme sağladığı görülmüştür. Daha sonraki aşamada fotovoltaiik hücre parametrelerinde en fazla iyileşme sağlayan 1,25 mg/ml katkı oranı kullanılarak hazırlanan PEDOT:PSS tabakasına 40 Gray gama ışını uygulanmış ve bu tabakanın bulunduğu fotovoltaiik hücrelerin en yüksek verime sahip olduğu belirlenmiştir.

### **2.6.3 Poly(3-hexylthiophene):Phenyl-C61-butyric acid methyl ester (P3HT:PCBM)**

Organik fotovoltaiik hücrelerde en yaygın kullanılan polimerik verici (donor) malzeme Şekil 2.10'da gösterilen regioregular poli(3-hexylthiophene) (P3HT)'dir. Aygıt üretiminde kullanılan poly(p-phenylene vinylene) (PPV) ile kıyaslandığında iyi çevresel kararlılık, yüksek boşluk hareketliliği ve geliştirilmiş absorpsiyon imkânı sağlamaktadır. En iyi alıcı özelliklere sahip malzemeler Buckminsterfullerene (C60) ve onun türevleridir. En çok kullanılan fulleren Şekil 2.11'de gösterilen [6,6]-Phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM)'dir. C60, buharlaştırma gerektirirken, PCBM, organik çözücüler içinde çözünbildiğinden daha fazla kullanılmaktadır. Fullerenlerin iyi alıcı özellikleri küresel şekillerinden ve uygun elektron afinitesinin (elektron ilgisi) sonucudur. PCBM, görünür spektrumda oldukça düşük absorpsiyon ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir. Aktif tabakanın optimize edilmesi ile beraber P3HT:PCBM karışımının kullanıldığı aygıtlarda verim yaklaşık %5'e ulaşmıştır. Birkaç yeni malzeme

ile %10'dan daha yüksek verime ulaşmanın mümkün olduğu son on yılda rapor edilmiştir.

Polimer tasarımının temel sorunları arasında yüksek  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  elde etmek için uygun bant aralığı ve enerji seviyeleri dizaynı, yüksek taşıyıcı hareketliliğine ulaşmak için düzlemselliğin arttırılması, malzeme işlenebilirliği ve kararlılığı konuları bulunmaktadır. P3HT'nin HOMO seviyesi 0,6 V civarında bir  $V_{oc}$  'ye karşılık gelen -5,1 eV'dir ve polimer tasarımında referans olarak kullanılmaktadır. Elektron bakımından fakir gruplar kullanıldığı durumlarda polimerlerin HOMO seviyesi düşürülebilmekte ve bu durum  $V_{oc}$  'de artışa yol açmaktadır. Öte yandan,  $I_{sc}$  'yi artırmak için ise güneş spektrumunun daha geniş kapsamaya olanak sağlayacak düşük bant aralıklı malzemeler tasarlamaktır. P3HT:PCBM sisteminin verimi, işlem koşullarına göre ayarlanabilen film morfolojisine sıkı bir şekilde bağlıdır. P3HT 4nm'lik bir eksiton (elektron-boşluk çifti) difüzyon uzunluğu sunduğundan, eksiton (elektron-boşluk çifti) birleşmesini azaltmak için aktif tabakada nanoboyutta faz ayrılması boyutu belirlenmelidir. P3HT'de fotoluminesans zayıftır ve rekombinasyon sonrası çıkan enerji ısıya dönüştürülür [53].



Şekil 2. 11 P3HT ve PCBM yapısı

Yapılan çalışmalar neticesinde optimal P3HT:PCBM karışım oranı 1:1; 1:0.8; 1:0.6 ile 1:0.43 olarak belirlenmiştir [54]. Bu tez çalışmasında P3HT:PCBM karışım oranı 1:0.55 (12 mg P3HT ve 6,5 mg PCBM)'dir. Karışım oranındaki değişiklik bant aralığında değişime yol açmaktadır [13]. Ayrıca, P3HT:PCBM içindeki PCBM içeriğini azaltmak verimliliği arttırmaktadır [55]. Alıcıdaki eksiton üretimi, verici (donor) ile

karşılaştırıldığında azdır [56]. Bu nedenle, aktif tabakadaki ayarlama alıcının, PCBM, kalınlığını değiştirmek için yapılır. Organik malzeme için, en az 100 nm kalınlıktaki filmlerde yüksek absorption katsayısı ( $10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) nedeniyle yüksek optik yoğunluklar elde edebilmektedir. Termal tavlama P3HT:PCBM optimum 85 nm kalınlığa sahiptir. Elektronun elektrota başarılı transferi için, üretilen yük sürüklenme mesafesinin aktif tabaka kalınlığına en az eşit veya daha fazla olması gerekmektedir [57].

#### 2.6.4 Bor

Bor, atom numarası 5 ve kimyasal sembolü B olan kimyasal elementtir. Periyodik cetvelde IIIA grubunun metal olmayan tek elementidir. Erime sıcaklığı  $2300^\circ\text{C}$ , kaynama sıcaklığı ise  $4000^\circ\text{C}$  'dir. Atom ağırlığı 10,81 olan borun çeşitli allotropları vardır: amorf borun toz hali koyu kahverengidir; kristal bor ise sert ve siyah renktedir ve oda sıcaklığında düşük iletkenidir. Elementel bor doğada bulunmaz. Yüksek saflıkta borun elde edilmesi için yüksek basınç ve sıcaklık gereklidir. Elementel bor, yarı iletken endüstrisinde bir dopant olarak kullanılmaktadır.

Dış yörüngesinde 3 tane elektron bulunduğundan bor elementi 3 tane bağ yapabilmektedir. Bor kristalinin birim hücresinde 12 bor atomu bulunmaktadır ve 12 bor atomu içeren birimlerin birbirine farklı bağlanmasıyla Alfa-rombohedral, Tetragonal, Beta-rombohedral olmak üzere üç farklı kristal yapı meydana gelmektedir.

Elementel bor,  $800^\circ\text{C}$  ve üstü sıcaklıklarda yükseltgenerek farklı oksitler oluşturmaktadır. Oda koşullarında son derece karardır. Sulu ortamda çözünmemektedir. Ancak kaynatıldığında oksitlerine çok az dönerek yavaşça çözünmektedir. Nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ) haricinde mineral asitlerine karşı oldukça dayanıklıdır. Kömür tozu gibi karbonlu bileşiklerle havasız ortamda  $1250\text{-}1600^\circ\text{C}$  gibi yüksek sıcaklıklarda işleme tabi tutulan elementel bor, bor karbürüne dönüşmektedir. Yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gibi ilave şartlarda sert bir malzeme olan kübik bor nitrid oluşmaktadır. Yanıcı bir malzeme olan borun tutuşma sıcaklığı yüksektir. Bununla beraber yanma sonucunda kolaylıkla aktarılabilen katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi özellikleri nedeniyle katı yakıt pili olarak kullanılmaktadır.

1700'lü yılların başında borakstan borikasit elde edilmiş ve 1800'lü yılların başında da elementer bor elde edilmiştir. Genel olarak bor içeren doğal minerallere boratlar denilmekte ve boratlar binlerce yıldır kullanılmaktadır. Modern bor endüstrisi 13. yy'da Marco Polo tarafından Avrupa'da başlamıştır. 1771 yılında, İtalya'nın Tuscani bölgesindeki sıcak su kaynaklarında borikasit ürünü bulunduğu belirlenmiştir ve 1852'de Şili'de ilk boraks madenciliği başlamıştır. Pek çok bölgesinde yatakların bulunup işletilmeye alınmasıyla beraber ABD dünya bor gereksinimini karşılayan ilk ülke haline gelmiştir. Türkiye'de ilk işletmenin 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir.

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye (%72,5) ve ABD'de (%6,2) olup, bor üretiminin yaklaşık %80'ini Türkiye ve ABD yapmaktadır. Çeşitli bölgelerde bilinen bor rezervleri ve % oranları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Bor bileşiklerinin kullanım alanı ve miktarı ise bölgesel olarak farklılık göstermektedir. ABD'de bor mineralinin %68'i cam, %5'i deterjan, %3,5 seramik, %3,5 tarım ve %3,5 alev geciktirici endüstrisinde kullanılırken, Avrupa'da %35'i deterjan, %23'ü cam, %10'u seramik ve %2'si tarım endüstrisinde kullanılmaktadır. Türkiye'de Bor bileşiklerinin tüketimi çok düşük seviyede olup, dünya tüketiminin %1-2'sini oluşturmaktadır. 2000 yılından bu yana Türkiye'de borun %38'i seramik ve firit, %27'si demir-çelik, %12'si cam ve cam elyafı, %12'si deterjan, %5'i kimya ve %6'sı diğer sektörlerde tüketilmiştir.

Günümüzde bilimsel ve teknolojik gelişmelerin getirdiği modern uygulamalara bakıldığında bor ürünlerinin tekstil elyaflarından, camlara, nükleer uygulamalardan, sağlığa, elektronikten, ilaca kadar çok büyük bir yelpazede kullanıldığı görülmektedir. Bor bileşiklerinin kullanıldığı alanlarda tüketimin hızla artışı kadar, yeni kullanım alanlarının da günden güne artışı ve borun yakın gelecekte enerji üretim kaynağı olarak kullanılabilme olasılığı bu hammaddeyi ayrıcalıklı bir noktaya taşımaktadır. Bu açıdan, bor bileşikleri pek çok sektör ve teknoloji alanını yakından ve doğrudan ilgilendiren bir "tekno-ekonomik" faktör haline gelmiştir. Dünyadaki en büyük bor rezervine sahip Türkiye için bunun son derece hayati ve stratejik bir kaynak olarak değerlendirilmesi gerektiği açıkça görülmektedir.

Çizelge 2. 1 Dünya bor rezervleri (2012)

| Ülkeler       | Toplam Rezerv<br>(Bin ton B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Dağılım (%) |
|---------------|-----------------------------------------------------------|-------------|
| Türkiye       | 935,800                                                   | 72,5        |
| A.B.D         | 80,000                                                    | 6,2         |
| Rusya         | 100,000                                                   | 7,7         |
| Çin           | 47,000                                                    | 3,6         |
| Arjantin      | 9,000                                                     | 0,7         |
| Bolivya       | 19,000                                                    | 1,5         |
| Şili          | 41,000                                                    | 3,2         |
| Peru          | 22,000                                                    | 1,7         |
| Kazakistan    | 15,000                                                    | 1,2         |
| Sırbistan     | 22,000                                                    | 1,7         |
| <b>TOPLAM</b> | <b>1.290.800</b>                                          | <b>100</b>  |

Türkiye’de boraks bileşikleri, susuz boraks, boraks pentahidrat ve monohidrat, boraks dekahidrat, üleksit, kolemanit, borikasit, sodyum perborat ticari olarak üretilmekte ve büyük bir bölümü ihraç edilmektedir. ABD’de potasyum pentaborat, susuz boraks, boraks pentahidrat, sodyum penta borat, kernit minerali, borikasit, bor oksit, sodyum metaborat gibi bor ürünleri ticari amaçlarla üretilmektedir. Bor içeren boratların özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

#### 2.6.4.1 Boraks (Tinkal)

Boraks (Tinkal) (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O), tabiatta genellikle renksiz ve saydam olarak bulunur. Ancak ihtiva ettiği bazı maddeler nedeniyle pembe, sarımsı, gri renkleri de bulunmaktadır. Sertliği 2-2,5; özgül ağırlığı 1,7 g/cm<sup>3</sup>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %36,5'dir. Türkiye'de Eskişehir-Kırka yataklarından üretilmektedir.

#### **2.6.4.2 Kolemanit**

Kolemanit ( $\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), bor bileşikleri içinde en yaygın kullanılan bileşiktir. Renksiz ve saydamdır. Sertliği 4-4,5; özgül ağırlığı  $2,42 \text{ g/cm}^3$ 'dir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği % 50,8'dir. Suda yavaş çözünürken, HCl asitte hızlı bir şekilde çözünür. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarında, dünyada ABD'de bulunur.

#### **2.6.4.3 Üleksit**

Üleksit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), genellikle beyaz renklidir. Ayrıca ipek parlaklığında olanları da vardır. Doğada lifsi ve sütun şeklinde bulunmaktadır. Sertliği 2,5; özgül ağırlığı  $1,955 \text{ g/cm}^3$ 'dir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %43'tür. Genelde kolemanit, hidroboroksit ve probertit ile birlikte oluşur. Türkiye'de Kırka, Bigadiç ve Emet yörelerinde, dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır.

#### **2.6.4.4 Probertit**

Probertit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), kirli beyaz veya açık sarımsı renklere olup ışınsal ve lifsi şekilli kristaller şeklinde bulunur. Sertliği 3,5; özgül ağırlığı  $2,14 \text{ g/cm}^3$ 'dir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %49,6'dır. Türkiye'de Kestelek yataklarında, Emet, Doğanlar ve İğdeköy bölgesinde bulunmaktadır.

#### **2.6.4.5 Kernit (Razorit)**

Kernit (Razorit) ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), doğada renksiz, şeffaf, kısmen beyaz uzunlamasına iğne şeklinde küme kristaller halinde bulunur. Sertliği 3, özgül ağırlığı  $1,95 \text{ gr/cm}^3$ 'dir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği ise %51'dir. Soğuk suda az çözünür. Türkiye'de Kırka'da ve Dünya'da ise Arjantin ve ABD'de bulunmaktadır.

#### **2.6.4.6 Hidroborasit**

Hidroborasit ( $\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), beyaz renkte, içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak (arsenik içeriğine göre) sarı ve kırmızımsı renklere kolemanit, üleksit, probertit ile birlikte bulunur. Bir merkezden ışınsal ve iğne şeklindeki kristallerin rastgele yönelmiş ve birbirini kesen kümeler halinde bulunur. Sertliği 2-3, özgül ağırlığı  $2,167 \text{ gr/cm}^3$ 'dir.

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ise %50,5'tir. Lifsi bir dokuya sahiptir. Türkiye'de Emet, Doğanlar, İğdeköy yörelerinde ve Kestelek'te oluşmuştur.

#### 2.6.4.7 Pandermit

Pandermit (Ca<sub>4</sub>B<sub>10</sub>O<sub>19</sub>·7H<sub>2</sub>O), beyaz renklidir. Sertliği 3-3,5; zgl ağırlığı 2,42 gr/cm<sup>3</sup>'dir. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %49,8'dir. Türkiye'de Sultançayıırı ve Bigadiç yataklarında gözlenmektedir.

#### 2.6.4.8 Borikasit

Borikasit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), pek çok bor bileşiğinin hidrolizinin son ürünüdür ve ortoborikasit ve borikasit olarak ta bilinmektedir. Kokusuz, küçük özbiçimli, beyaz ve parlak görünümlü kristal şeklindedir. Molekül ağırlığı 61,83 g/mol, özgül ağırlığı 1,44 g/cm<sup>3</sup>'dr ve B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %56,3'tür. Erime noktası 171°C, oluşum ısısı -1089 kJ/mol ve çözünme ısısı +22,2 kJ/mol'dür. Kristal yapısı triklinikdir. Birim hücrede dört molekül H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> bulunmaktadır ve düzlemsel sıralı BO<sub>3</sub>'lerin asimetrik H bağlılarıyla bağlanmasığan oluşur. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü azdır. Ancak sıcaklık yükselmesi ile beraber çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>'n sıcaklığa bağlı çözünürlük değişimi izelge 2.2'de gösterilmektedir. Bu nedenle, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>' kristallendirmek için genellikle doygun çözeltiyi 80°C'den 40°C'ye soğutmak yeterli görülmektedir.

Çizelge 2. 2 Borikasitin sıcaklığa bağlı sudaki çözünürlüğü

| Sıcaklık (°C) | Doygun Çözeltideki % $H_3BO_3$ |
|---------------|--------------------------------|
| 25            | 5,43                           |
| 30            | 6,34                           |
| 35            | 7,19                           |
| 40            | 8,17                           |
| 45            | 9,32                           |
| 50            | 10,23                          |
| 55            | 11,54                          |
| 60            | 12,96                          |
| 65            | 14,42                          |
| 70            | 15,75                          |
| 80            | 19,06                          |
| 90            | 23,27                          |
| 100           | 27,52                          |
| 103,3 (K.N.)  | 31,0                           |

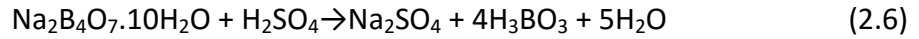
#### 2.6.5 Borikasit Elde Etme Yöntemleri

$H_3BO_3$ ; boraks, borasit, üleksit, kernit, kolemanit gibi bor bileşiklerinin  $H_3BO_3$ 'ten daha güçlü bir asit çözeltisi (hidroklorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, propionik asit, asetik asit ve nitrik asit) ile reaksiyonu sonucu oluşmaktadır.  $H_3BO_3$  üretim süreci kullanılan asite göre değişmektedir. Düşük maliyeti sebebiyle genellikle sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) çözeltisi kullanılmaktadır. Aşağıda bazı  $H_3BO_3$  elde etme yöntemleri anlatılmaktadır.

##### 2.6.5.1 Tinkalden Borikasit Üretimi

Tinkalden  $H_3BO_3$  üretimi birçok farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Tinkal konsantresinin nitrik asit veya klorik asit ile çözülmesi veya 80°C'deki sulu çözeltisinin elektrolizi ile  $H_3BO_3$  üretilebilmektedir. Ancak bu yöntemler, kuvvetli asitler nedeniyle kullanılan ekipmanların ömrünün azalması ve enerji sarfiyatının yüksek olması gibi

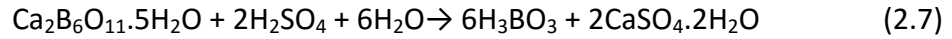
dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle genellikle sülfürik asit tercih edilmektedir. Tinkalden  $H_3BO_3$  üretimi aşağıdaki (2.6) reaksiyon denklemine göre gerçekleşmektedir.



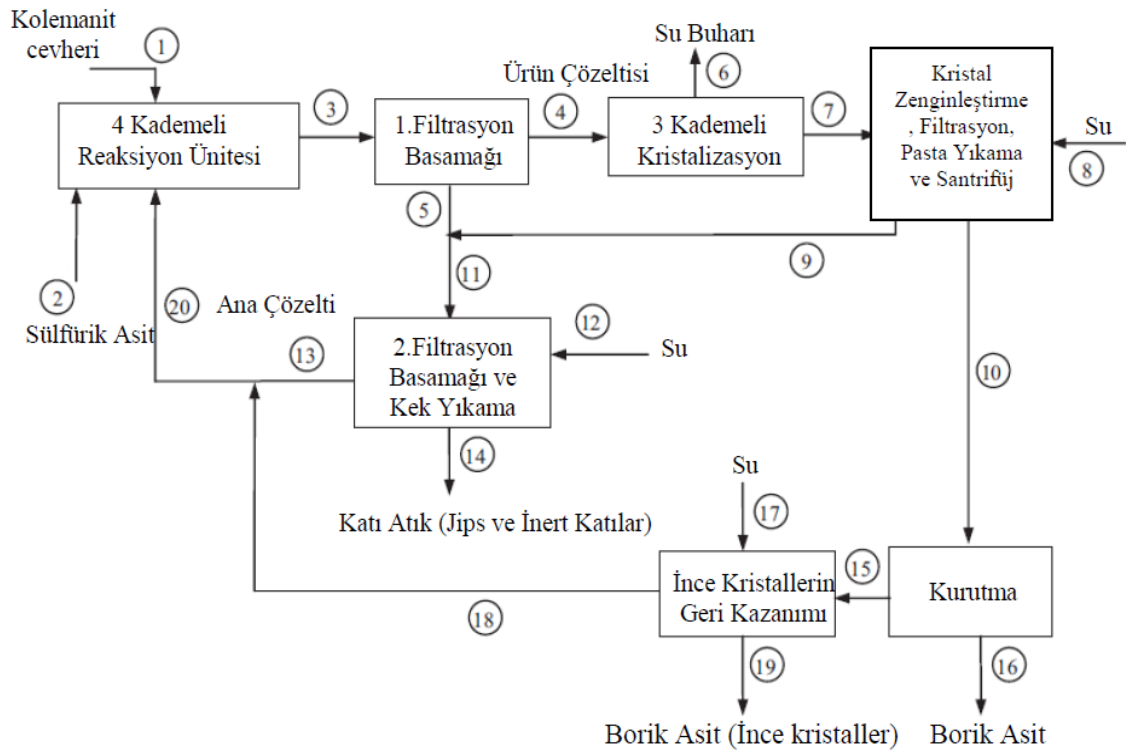
$H_3BO_3$  üretiminde tinkal kullanımı %33  $H_2SO_4$  tasarrufu sağlanmaktadır. Bu nedenle  $H_3BO_3$  üretiminde tinkal kullanımı daha uygundur. Ayrıca bu yöntemde yan ürün olarak üretilen  $Na_2SO_4$  deterjan ve kağıt sanayiinde kullanılmaktadır.

### 2.6.5.2 Kolemanitten Borikasit Üretimi

Kolemanitten  $H_3BO_3$ 'ün üretimi (2.7) reaksiyonuna göre gerçekleşmektedir.



Reaksiyon 4 aşamada gerçekleşmektedir. Üretim süreci diyagramı Şekil 2.12'de gösterilmektedir.



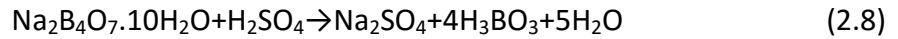
Şekil 2. 12 Borikasit üretim süreci diyagramı

Kolemanitin sıcak  $H_2SO_4$  çözeltileriyle reaksiyonu sonucunda oluşan  $H_3BO_3$  çözeltide kalırken, düşük çözünürlüklü  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  çözeltide doymunluk değerine ulaşarak

kristallenmektedir. 80-95°C sıcaklık aralığında yürütülen reaksiyonda çöken  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'ün filtrasyon ile ayrılmasının ardından oluşan berrak çözelti soğutularak  $\text{H}_3\text{BO}_3$  kristallendirilmektedir. Türkiye'de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  kolemanitten üretilmektedir.

#### 2.6.5.3 Borakslı Göl Sularından Borikasit Üretimi

Göl sularından elde edilen boraks çözeltisinden  $\text{H}_3\text{BO}_3$  üretimi (2.8) reaksiyonuna göre gerçekleşmektedir.



$\text{H}_2\text{SO}_4$  ve boraks karışımı vakum kristalizatörlerinde soğutulur ve  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 'ten önce  $\text{H}_3\text{BO}_3$  kristalleşir. Ortamının sıcaklığı  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 'ün kristalleşme sıcaklığının üstünde tutularak karışımdan süzme veya santrifüj yoluyla  $\text{H}_3\text{BO}_3$  kristalleri ayrıştırılır. Ayrıştırılan kristalleri saflaştırmak için suda çözülür. Ardından çözelti süzülür ve  $\text{H}_3\text{BO}_3$  tekrar kristalleştirilir. Ana çözeltiden de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  elde edilir.

Bor bileşikleri arasından  $\text{H}_3\text{BO}_3$  stratejik ve endüstriyel öneme sahip en önemli bileşiklerden biridir. Kolay üretilen ve son derece ucuz bir malzemedir. Cam, seramik, tekstil, deterjan, ve nükleer güç gibi endüstriyel uygulamalar, tarım, sağlık, ilaç ve elektronik gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak  $\text{H}_3\text{BO}_3$ 'ün fotovoltaik hücre uygulamalarında kullanımı henüz yaygınlaşmamıştır. Bu nedenle ucuz ve üretimi kolay olan  $\text{H}_3\text{BO}_3$ 'ün organik fotovoltaik hücrelerin verim, kararlılık ve maliyet sorunlarına çözüm olmaya aday bir malzeme olup olmadığının belirlenmesi fotovoltaik uygulamaları için yararlı olacaktır.

Bu tez çalışmasında, ilk kez P3HT:PCBM esaslı fotovoltaik hücrelerde PEDOT:PSS tampon tabakasına katkı malzemesi olarak kullanılmış ve fotovoltaik hücrelerin performansına etkisi araştırılmıştır. Böylece literatürde kullanılan pahalı malzemelere alternatif olacak düşük maliyetli ve yerli  $\text{H}_3\text{BO}_3$  ile hücrelerin verim ve kararlılığının iyileştirilmesi ve maliyetinin düşürülmesi amaçlanmıştır.

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Fotovoltaik Hücrelerin Üretilmesi

Bu bölümde, fotovoltaik hücrelerin üretimi ve aygıt karakterizasyonları için kullanılan deneysel metotlar tanıtılacaktır.

Tez çalışmasında öncelikle PEDOT:PSS tabakasına farklı oranlarda (0; 0,625; 1,25; 2,50; 3,75 ve 5,00 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılayarak fotovoltaik hücre performansını en fazla geliştiren optimum katkı oranının belirlenmesi için çalışma yapılmıştır. Verimin en yüksek olduğu katkı oranının belirlenmesinin ardından, katkısız ve optimum katkı oranında  $H_3BO_3$  içeren PEDOT:PSS ince filmleri düşük doz (40 Gray) gama ışını ile dozlanarak fotovoltaik hücre üretiminde kullanılmış ve gama ışının fotovoltaik hücre performansına etkisi incelenmiştir. Fotovoltaik hücre üretimi ve karakterizasyon aşamaları aşağıda belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

##### 3.1.1 Altlıkların Hazırlanması

Bu tez çalışmasında, Kintek firmasından temin edilen,  $<15 \Omega\text{cm}$  tabaka direncine sahip 1,5 cmx1,5 cm ölçülerindeki ITO cam altlıklar kullanılmıştır. Kısa devre oluşmaması için 30 dk boyunca  $HCl:HNO_3:H_2O$  (4,5 ml:1 ml:3 ml) asit çözeltisinde bekletilen ITO'nun bir kısmı kaldırılmıştır. Yüzeydeki tüm ITO'nun aşınmaması için korunması istenilen kısım scotch bant ile kaplanmıştır. Aşındırma işleminden sonra ITO altlıkların ölçülen tabaka direnci  $13 \Omega\text{cm}$ 'dir. Daha sonra bant kaldırılmış ve yarısı ITO kaplı olan camın tamamı 15'er dakika sırasıyla Aseton ve Isopropanol içeren ultrasonik banyoda temizlenmiştir.

(Şekil 3.1). Her kimyasal temizlemeden sonra cam altlıklar distile su ile durulanmıştır. Temizleme işlemlerin sonunda ITO altlıklar azot gazı ile kurutularak kaplamaya hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3. 1 ITO altlıkların temizlenmesinde kullanılan ultrasonik banyo

### 3.1.2 Deneyde Kullanılan Çözeltilerin ve İnce Filmlerin Hazırlanması

Bu çalışmada üretilen fotovoltaik hücrelerin hazırlanmasında kullanılan ince filmleri oluşturmak için çeşitli karışımlar ve çözeltiler hazırlanmıştır. Bu karışım ve çözeltilerin hazırlanma prosedürleri aşağıda belirtildiği gibidir;

#### 3.1.2.1 Borikasit Katkılı PEDOT:PSS Karışımlarının Hazırlanması

Bu tez çalışmasında Clevios marka PEDOT:PSS kullanılmıştır. PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tabakasının hazırlanması için PEDOT:PSS çözeltisine değişen oranlarda (0; 0,625; 1,25; 2,50; 3,75 ve 5,00 mg/ml) H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> eklenmiştir. Hazırlanan tüm çözeltiler 8 saat boyunca karanlıkta manyetik karıştırıcı üzerinde karıştırılmıştır.

#### 3.1.2.2 P3HT:PCBM Karışımlarının Hazırlanması

Organik fotovoltaik hücrelerde aktif tabaka oluşturmada en yaygın kullanılan P3HT:PCBM karışımıdır. Tez çalışmasında Sigma-Aldrich marka P3HT ve PCBM kullanılmıştır. 12 mg P3HT ve 6,5 mg PCBM malzemeleri, 1 ml klorobenzen içerisinde karıştırılarak aktif tabaka çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım oda sıcaklığında 8

saat boyunca karanlıkta maddeler tamamen çözülene kadar manyetik karıştırıcı üzerinde karıştırılmıştır.

### 3.1.2.3 PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> Tabakası ve Fotoaktif Tabakanın Kaplanması

Temizlenen ITO kaplı cam altlıkların üst yüzeyine, hazırlanan PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> çözeltileri spin coater (döndürerek kaplama) ile 2000 rpm’de 60 sn döndürülerek kaplanmış ve 150°C’de ortam koşullarında 4 dk tavlammıştır.

Daha sonra P3HT:PCBM aktif tabakası, N<sub>2</sub> atmosferi altında glove box (havasız ortam kabini) içerisinde spin coater (döndürerek kaplama) ile 800 rpm’de 60 sn döndürülerek PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tampon tabakası üzerine kaplanmış ve 3 dakika boyunca 120°C’de tavlammıştır. Tavlama işlemi homojen yapı oluşturma ve istenmeyen kirliliklerin yüzeyden uzaklaştırılması için yapılmaktadır. İnce filmlerin kaplamasında kullanılan spin coater (döndürerek kaplama) cihazı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 İnce filmlerin kaplanmasında kullanılan spin coater (döndürerek kaplama) cihazı

### 3.1.2.4 Metal Üst Elektrotun Kaplanması

Metal elektrot tabakasının kaplanması fotovoltaiik hücre üretiminin son aşamasıdır. Bu çalışmada üretilen tüm fotovoltaiik hücrelerde metal elektrot tabakası olarak %99

saflıkta Sigma-Aldrich marka Alüminyum (Al) kullanılmıştır. Maske yardımı ile metal elektrot tabakasının kaplanması işlemi ısı buharlaştırma yöntemi ile ve  $\sim 5 \times 10^{-6}$  mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir.

Al kaplanacak örneğin üst yüzeyi buharlaşacak metale bakacak biçimde yerleştirilmiştir. Yalnızca kaplanmak istenen temas yüzeyi açıkta bırakacak ve diğer kısımları örtecek metal maske kullanılmıştır. Böylece aktif tabaka üzerine termal buharlaştırma ile 100 nm kalınlığında Al metal kontak kaplanmış ve fotovoltaiik hücre yapısı tamamlanmıştır. Bu işlem için Vaksis ısı buharlaştırma sistemi kullanılmıştır. Metal kaplama işlemlerinde kullanılan sistemin fotoğrafı Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 3 Isıl buharlaştırma sistemi

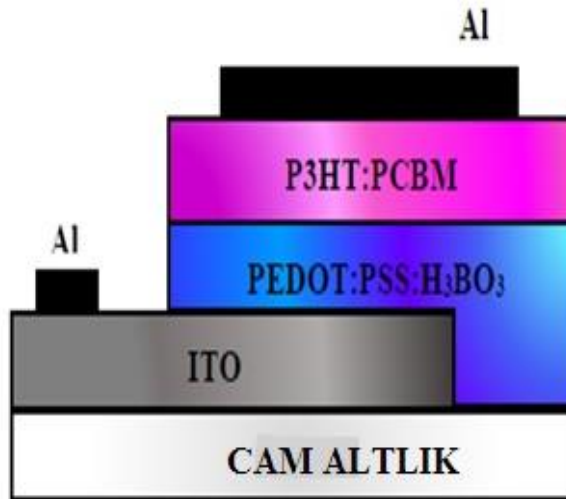
#### **3.1.2.5 Düşük Doz Gama Işınına Maruz Bırakılan Fotovoltaiik Hücrelerin Hazırlanması**

Temizlenen ITO altlıklar üzerine PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ve karşılaştırma yapmak için katkısız PEDOT:PSS çözeltileri spin coater (döndürerek kaplama) ile 60 sn 2000 rpm’de kaplanmış ve oda koşulları altında, 4 dakika boyunca 150°C’de tavlansmıştır. Gama ışınının PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerine etkisinin belirlenebilmesi için hazırlanan katkılı ve katkısız ince filmlerin bir kısmına İstanbul Üniversitesi Onkoloji Enstitüsü’nde geleneksel ışınlama odasında bulunan bir Kobalt-60 radyasyon  $\gamma$ -ışını kaynağı kullanılarak 40 Gy doz ile yaklaşık 30 dk gama ışını uygulanmıştır. Gama ışını dozlamada kullanılan sistemin görüntüsü Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Gama ışını dozlamada kullanılan sistemin görüntüsü

Işınlanan katkısız ve  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS filmleri üzerine P3HT:PCBM aktif tabakası spin coater (döndürerek kaplama) ile 60 sn 800 rpm'de kaplanmış ve oda koşulları altında 3 dakika boyunca  $120^\circ C$ 'de tavlansmıştır. Son olarak, aktif tabaka üzerine termal buharlaştırma ile 100 nm kalınlığında Al metal kontak kaplanmıştır. Bu çalışmada  $H_3BO_3$  içeren fotovoltaik hücre performansının düşük doz ışınlama ile beraber geliştirilmesi hedeflenmiştir. Tez çalışmasında üretilen aygıt yapıları ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ve ITO/PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ /P3HT:PCBM/Al şeklindedir ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 5 Test edilen fotovoltaik hücrelerin aygıt yapısı

### **3.1.3 Üretilen Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonlarında Kullanılan Deney Geometrileri**

Bu bölümde, üretilen fotovoltaik hücrelerin elektriksel, optik ve morfolojik karakterizasyonlarının yapılmasında kullanılan deney geometrileri tanıtılacaktır.

#### **3.1.3.1 Elektriksel Karakterizasyonlar**

Üretilen fotovoltaik hücrelerin elektriksel karakterizasyonları oda sıcaklığında ve ortam koşullarında karanlık ve aydınlık ortamlardaki Akım-Gerilim ( $I-V$ ) karakteristikleri ölçülmek suretiyle gerçekleştirilmiştir.  $I-V$  ölçümleri  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM. 1.5G) ışınlama altında Abet marka solar simülatör ve Keithley 2400 model programlanabilir bir kaynak ölçüm cihazı yardımıyla yapılmıştır. Kaynak ölçüm cihazı ile  $-2$  volt ile  $+2$  volt arasında değişen gerilimler uygulanmış ve her bir gerilim değerine karşılık gelen akım değerleri yine aynı kaynak ölçüm cihazı ile ölçülerek bilgisayar yazılım programı tarafından eş zamanlı kaydedilmiştir.

#### **3.1.3.2 Optik Karakterizasyonlar**

Tez çalışmasında, farklı oranlarda  $\text{H}_3\text{BO}_3$  katkılanmış PEDOT:PSS ince filmi içeren PEDOT:PSS/P3HT:PCBM tabakalarının ve dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $\text{H}_3\text{BO}_3$  filmlerinin optik karakterizasyonları (dalga boyuna bağlı soğurma katsayıları)  $200 \text{ nm}$  ile  $1100 \text{ nm}$  dalga boyu aralığında Perkin Elmer Lambda2 UV-VIS kullanılarak tayin edilmiştir. Optik karakterizasyonlarda kullanılan deney geometrisi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 6 Optik karakterizasyonlarda kullanılan deney geometrisi

Farklı oranlarda  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmleri ve dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  filmlerinde  $H_3BO_3$  varlığının araştırılması için, dalga sayısına bağlı geçirgenlik ölçülmesi suretiyle 600 ile 4000  $cm^{-1}$  dalga sayısı aralığında Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektrumu (FTIR) Perkin Elmer spectrometer- ATR mod kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan deney geometrisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7 FTIR ölçümlerinde kullanılan deney geometrisi

### 3.1.3.3 Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonlar

Bu tez çalışmasında üretilen tüm ince filmlerde  $H_3BO_3$  ve gama ışınının PEDOT:PSS filminin yapısal özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, 40 kV ve 30 mA'de çalıştırılan monokromatik radyasyon  $CuK\alpha$  X'Pert X-ışını difraktometresi (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan deney geometrisi Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



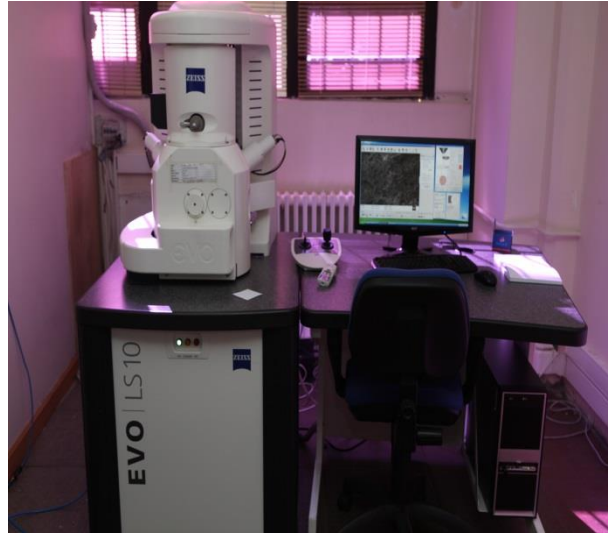
Şekil 3. 8 XRD ölçümlerinde kullanılan deney geometrisi

Fotovoltaik hücre üretiminde kullanılan tabakaların kalınlıkları ve morfolojik özellikleri yüklerin ayrılması ve iletiminde oldukça etkilidir. Bu nedenle fotovoltaik hücre yapısında kullanılacak tabakaların morfolojilerinin ve kalınlıklarının incelenmesi, fotovoltaik hücre parametrelerinin geliştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu tez çalışmasında  $H_3BO_3$  katkılanmış ve gama ışınına maruz bırakılan PEDOT:PSS filmlerinin morfolojik özelliklerinin incelenmesi ve kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla, 12.5  $\mu m$ 'lik yarıçaplı iğne ve 6 mg kuvvet kullanılarak Dektak XT profilometre ve ezAFM Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılmıştır. Film kalınlıklarının ölçümünde kullanılan deney geometrisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 9 Film kalınlıklarının ölçümünde kullanılan deney geometrisi

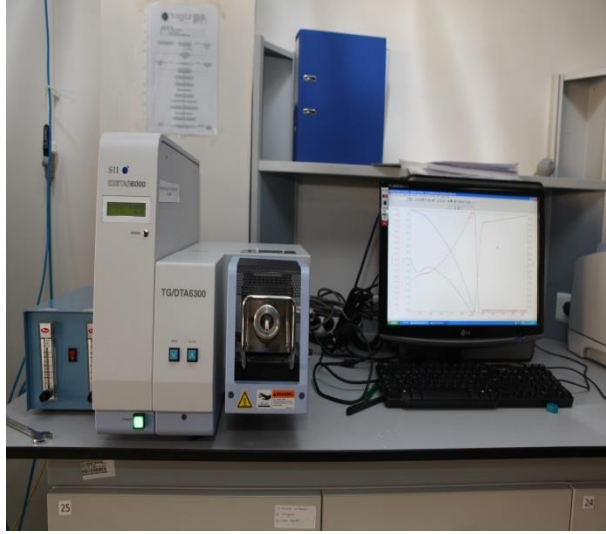
Tez çalışmasında hazırlanan ince filmlerin morfolojik özelliklerinin incelenmesinde ZEİSS LS EVO 10 marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı kullanılmıştır. Kullanılan deney geometrisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 10 Yüzey görüntülerinin incelenmesinde kullanılan deney geometrisi

Fotovoltaik hücreler çevre koşullarına son derece duyarlı aygıtlardır. Bu nedenle sıcaklık değişimlerine karşı tepkilerinin belirlenmesi performansları ve ömürlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu amaçla, tez çalışmasında hazırlanan  $H_3BO_3$  katkılanmış ve gama ışınına maruz bırakılan PEDOT:PSS filmlerinin sıcaklığa bağlı karakteristiği, 25 ile 800°C aralığında  $10^\circ C\ dk^{-1}$  sıcaklık oranı ile kuru hava akışı altında

SII Nanotechnology SII6000 Exstar TG/DTA 6300 Termogravimetrik Analiz (TGA) kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan deney geometrisi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11 Sıcaklığa bağlı özelliklerin incelenmesinde kullanılan deney geometrisi

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücrelerde ilk defa PEDOT:PSS tampon tabakasına farklı oranlarda (0-5 mg/ml) borikasit ( $H_3BO_3$ ) katkılanarak, fotovoltaiik hücrelerin performansının ve kararlılığının geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, fotovoltaiik hücrelerin performansını en fazla geliştiren optimum katkı oranı belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının ikinci aşaması olarak, fotovoltaiik hücrenin performansını en fazla geliştiren optimum katkı oranı ile hazırlanan PEDOT:PSS tabakasına düşük dozda (40 Gray) gama ışını uygulanmış ve gama ışınının fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisi incelenmiştir. Literatürde PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$  katkılanarak yapılmış çalışma bulunmamaktadır. Bu yönüyle bu tez çalışması orjinallik taşımaktadır. Ayrıca katkısız ve  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasına gama ışını uygulama çalışması da bulunmamaktadır.

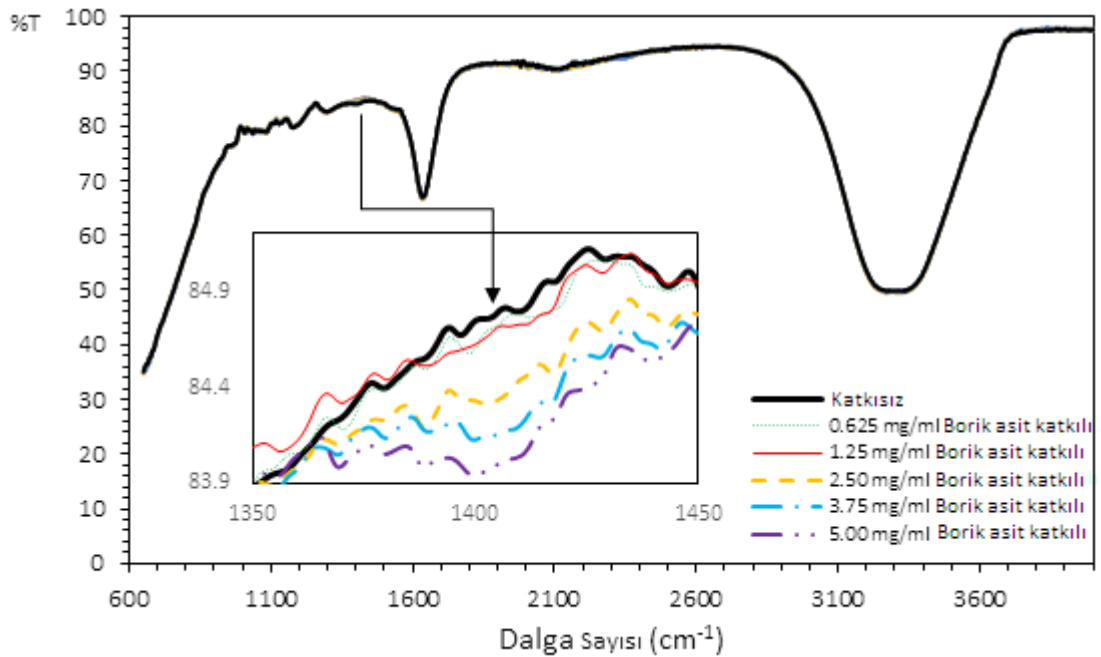
Bu tez çalışmasının öncelikli amacı, oldukça düşük maliyetli ve kolay üretilebilen  $H_3BO_3$  kullanılarak fotovoltaiik hücrelerin verim, kararlılık ve maliyet gibi en önemli problemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamak olmuştur.

Bu bölümde, üretilen fotovoltaiik hücrelerin karakterizasyonlarının belirlenmesi için yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar tanıtılacaktır.

#### 4.1 Farklı Oranlarda $H_3BO_3$ Katkılanmış PEDOT:PSS Tabakası İçeren Fotovoltaik Hücreler İle Elde Edilen Sonuçlar

##### 4.1.1 Fotovoltaik Hücre Üretiminde Kullanılan İnce Filmlerin Karakterizasyonu

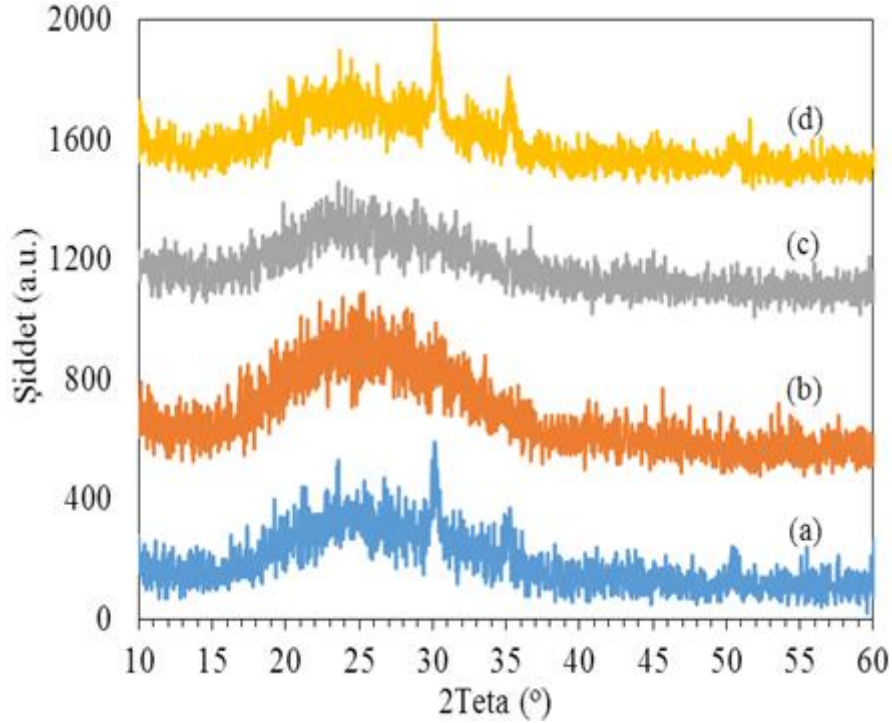
Bu tez çalışmasında üretilen fotovoltaik hücrelerde kullanılan farklı oranlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmlerinde  $H_3BO_3$  varlığının araştırılması için FTIR spektrumu kullanılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, elde edilen FTIR spektrumunda B-O gerilmesinden kaynaklanan  $1400\text{ cm}^{-1}$  piki görülmüştür. Bu PEDOT:PSS içerisinde  $H_3BO_3$ ’den kaynaklı bor varlığına işaret olmaktadır. Aynı zamanda beklenildiği gibi  $H_3BO_3$  katkı oranının artması ile pik şiddetinin arttığı da görülmektedir.



Şekil 4. 1 Katkısız ve farklı konsantrasyonlarda  $H_3BO_3$  ile katkılanmış PEDOT:PSS ince filmlerinin FTIR spektrumları

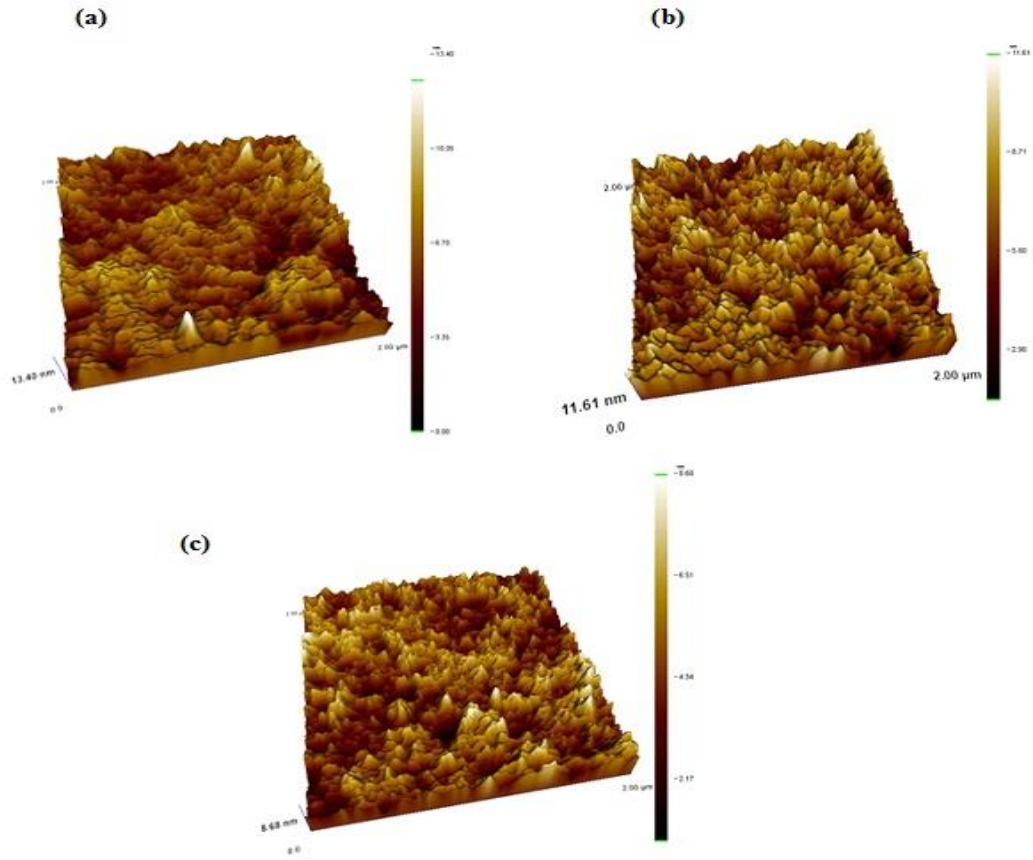
Katkısız ve  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS filmleri ve ITO altlığının XRD karakteristikleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir.  $2\theta=25-26^\circ$  arasında PEDOT:PSS polimerinin (020) düzlemine ait zayıf ve geniş bir pik gözlenmiştir. Şekil 4.2’den görüldüğü gibi katkısız ve katkılı PEDOT:PSS’nin geniş piklerinin hafifçe birbirlerine doğru kaydığı görülmektedir. PEDOT:PSS, PEDOT:PSS (1,25 mg/ml) ve PEDOT:PSS (5 mg/ml)’nin piklerinin konumları, doğrusal bir background (geri plan) çıkarımından sonra bir gaussian pik fitleme kullanılarak belirlenmiştir. 25,04; 25,28; 25,47 piklerinin  $2\theta$  değerlerine karşılık gelen d-

mesafesi değerleri sırasıyla 3,56, 3,53 ve 3,50 Å'dur. En düşük d-uzaklığı, PEDOT bağlarının en yakın sık dizim gösterdiği PEDOT:PSS (5 mg/ml) filmlerinden elde edilmiştir.



Şekil 4. 2 (a) PEDOT:PSS, (b) 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS, (c) 5,00 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS, (d) ITO altlığının XRD grafiği

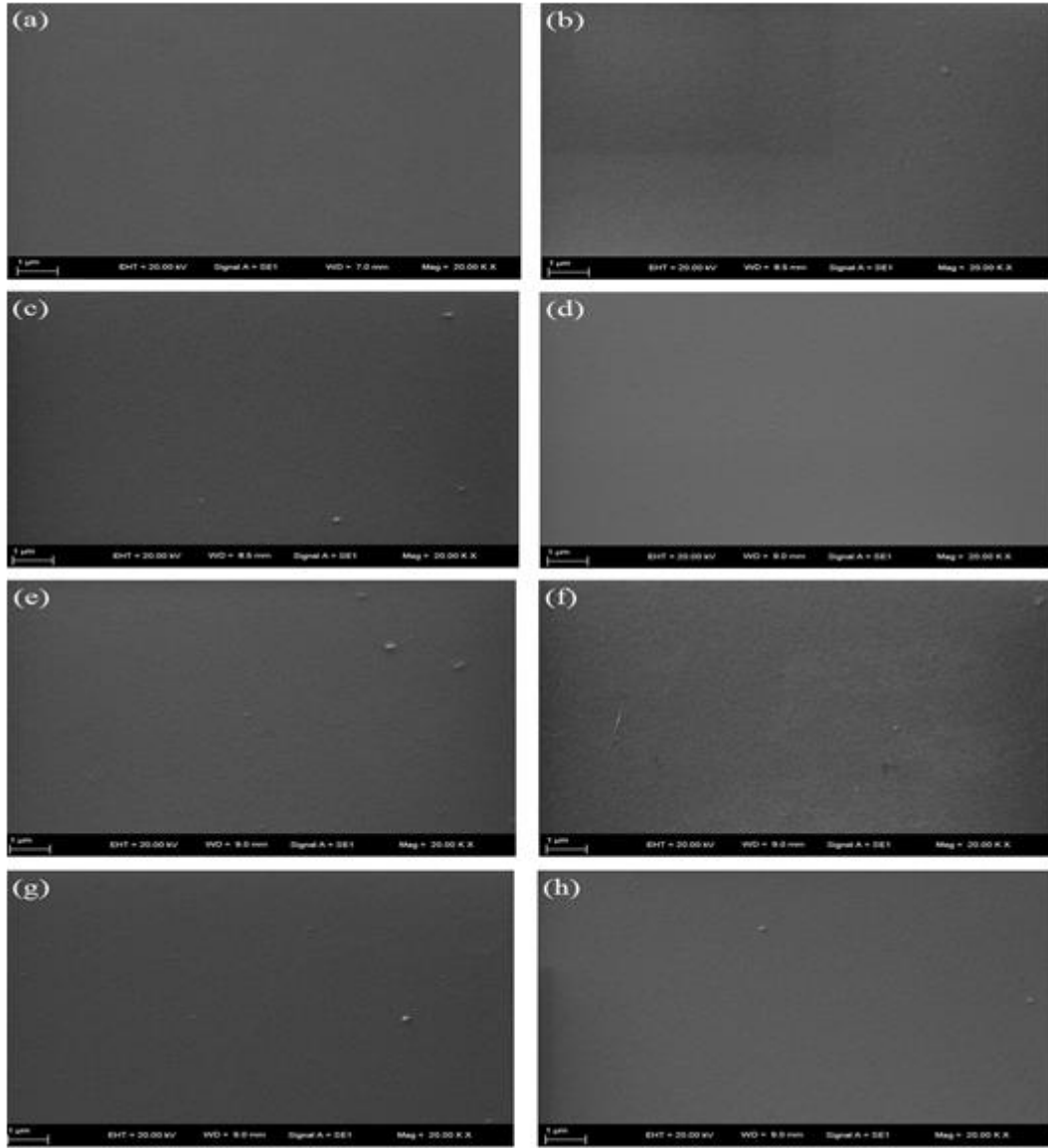
Organik fotovoltaiik hücrelerde hücre oluşturan tabakaların morfolojik görüntülerinin incelenmesi aygıt performansı hakkında fikir sahibi olmak açısından önemlidir. Şekil 4.3, (a), (b) ve (c) sırasıyla ITO cam üzerine kaplanan katkısız PEDOT:PSS, 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS üzerine kaplanan PEDOT:PSS ince filmlerin AFM görüntülerini göstermektedir. Tepe ile çukur arasındaki yükseklik değerleri, ITO/PEDOT:PSS için 13,40; ITO/PEDOT:PSS (1,25 mg/ml  $H_3BO_3$ ) 11,61 ve ITO/PEDOT:PSS (1,25 mg/ml  $H_3BO_3$ )/PEDOT:PSS için 8,68 iken, Kuadratik Ortalama Pürüzlülük (Root Mean Square (RMS)) değerleri sırasıyla 1,37 nm, 1,36 nm, 1,15 nm'dir. AFM görüntüleri yardımıyla, PEDOT:PSS tabakası içine  $H_3BO_3$  eklenmesinin pürüzlülüğü azaltarak daha iyi bir morfolojiye yol açtığı gözlenmiştir.  $H_3BO_3$ 'ün daha iyi morfolojiye sahip film oluşturma özelliği dolum faktörünün gelişmesine yol açmıştır. Bu da verimin artmasını sağlamıştır.



Şekil 4. 3 ITO cam üzerine kaplanan (a) katkısız PEDOT:PSS, (b) PEDOT:PSS (1,25 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (c) PEDOT:PSS(1,25 mg/ml  $H_3BO_3$ )/PEDOT:PSS ince filmlerin AFM görüntüleri.

Yapılan ölçümler ile ilgili yorumları güçlendirmek ve aygıt performansını iyileştirmek için PEDOT:PSS filmlerinin morfolojisinin incelenmesinde kullanılan bir diğer yöntem SEM olmuştur.  $H_3BO_3$ 'ün PEDOT:PSS morfolojisine etkisinin belirlenmesi için farklı oranlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS ince filmleri hazırlanmıştır. Örneklerin görüntüleri alınmadan önce yüzeyleri Quorum marka sputter coater (püskürtmeli kaplayıcı) ile 20 nm kalınlığında altın ile kaplanmıştır. ITO cam üzerine kaplanan (a) katkısız PEDOT:PSS, (b) PEDOT:PSS (0,25 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (c) PEDOT:PSS(0,5 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (d) PEDOT:PSS (0,75 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (e) PEDOT:PSS (1 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (f) PEDOT:PSS (1,25 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (g) PEDOT:PSS (1,5 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (h) PEDOT:PSS (2 mg/ml  $H_3BO_3$ ) ince filmlerin SEM görüntüleri Şekil 4.4'te gösterilmektedir. SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi katkısız PEDOT:PSS görüntüsü literatürde yer alan

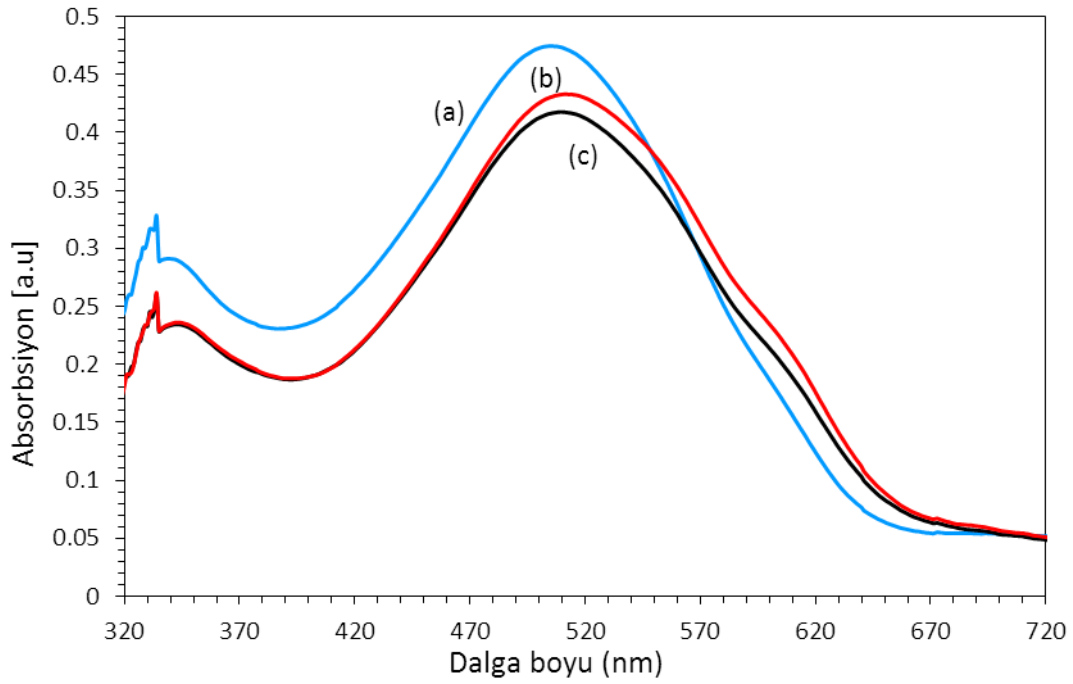
görüntü ile aynıdır. Bununla beraber  $H_3BO_3$  katkısı PEDOT:PSS ince filmlerinin morfolojisinde belirgin bir değişikliğe yol açmamıştır. Katkısız ve  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS filmleri homojen bir görünüme sahiptir.



Şekil 4. 4 ITO cam üzerine kaplanan (a) katkısız PEDOT:PSS, (b) PEDOT:PSS (0,25 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (c) PEDOT:PSS(0,5 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (d) PEDOT:PSS (0,75 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (e) PEDOT:PSS (1 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (f) PEDOT:PSS (1,25 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (g) PEDOT:PSS (1,5 mg/ml  $H_3BO_3$ ), (h) PEDOT:PSS (2 mg/ml  $H_3BO_3$ ) ince filmlerin SEM görüntüleri

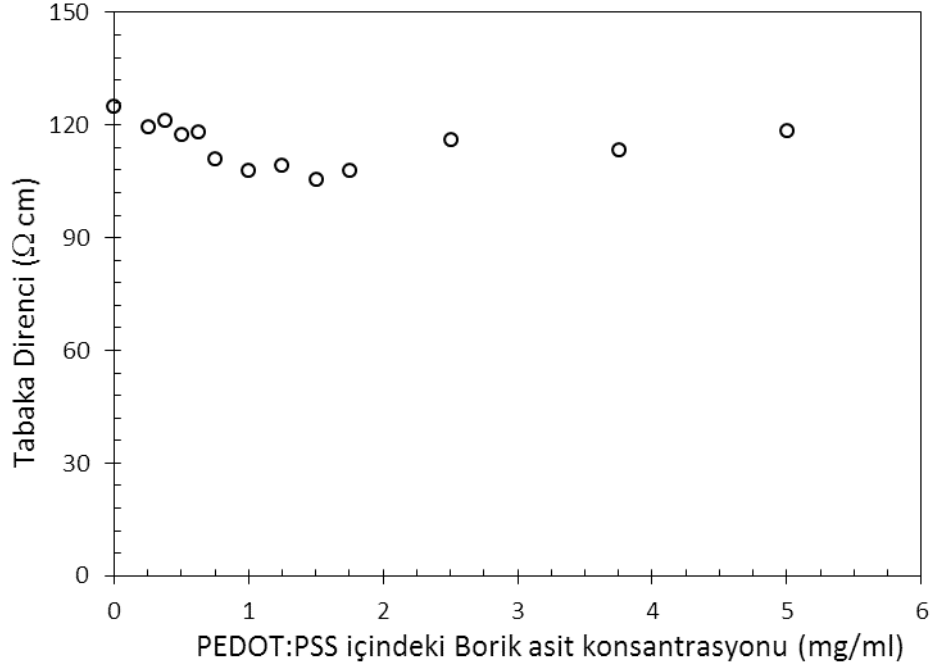
Farklı konsantrasyonlarda  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS ince filmi içeren PEDOT:PSS/P3HT:PCBM tabakalarının dalga boyuna bağlı absorpsiyon grafikleri Şekil 4.5’de gösterilmektedir. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi PEDOT:PSS/P3HT:PCBM ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ /P3HT:PCBM’in absorpsiyon spektrumunda, 320-330 nm ve

maksimum absorpsiyonun görüldüğü yaklaşık 500-530 nm’de olmak üzere iki bölgesinde absorpsiyon piki görülmüştür. PEDOT:PSS’ye  $H_3BO_3$  eklenmesi absorpsiyonda bir miktar kırmızıya kaymaya neden olmuştur. Aynı zamanda PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$  eklenmesi ile beraber görünür bölgede absorpsiyon şiddetinde bir miktar azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4. 5 (a) Katkısız, (b) 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS, (c) 5 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS ince filmi içeren PEDOT:PSS/P3HT:PCBM tabakalarının absorpsiyon eğrileri

Organik fotovoltaiik hücrelerin, aygıt performansını da önemli oranda etkileyen, tampon tabaka iletkenliklerinin düşük olması gibi bir problemi bulunmaktadır. Bu nedenle bu tabakanın iletkenliğinin geliştirilmesi yönünde önemli çabalar sergilenmektedir [27]. Bu çalışmada, katkılı ve katkısız PEDOT:PSS filmlerinin ölçülen iletkenlik sonuçları Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Sonuçlarda görüldüğü üzere, katkısız PEDOT:PSS ile karşılaştırıldığında  $H_3BO_3$ ’ün 1,75 mg/ml konsantrasyonuna kadar tabaka direnci %5-20 oranında azalmıştır. Bu sonucun  $H_3BO_3$  etkisiyle olduğu FTIR spektrumunda B-O piki görülmesi ile desteklenmiştir. Katkı oranı 1,75 mg/ml’nin üzerine çıktığında ise direncin arttığı görülmüştür. Tabaka direncinin artması fotovoltaiik hücre veriminin azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4. 6 Katkısız ve farklı konsantrasyonlarda  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmlerinin iletkenlik değişimi

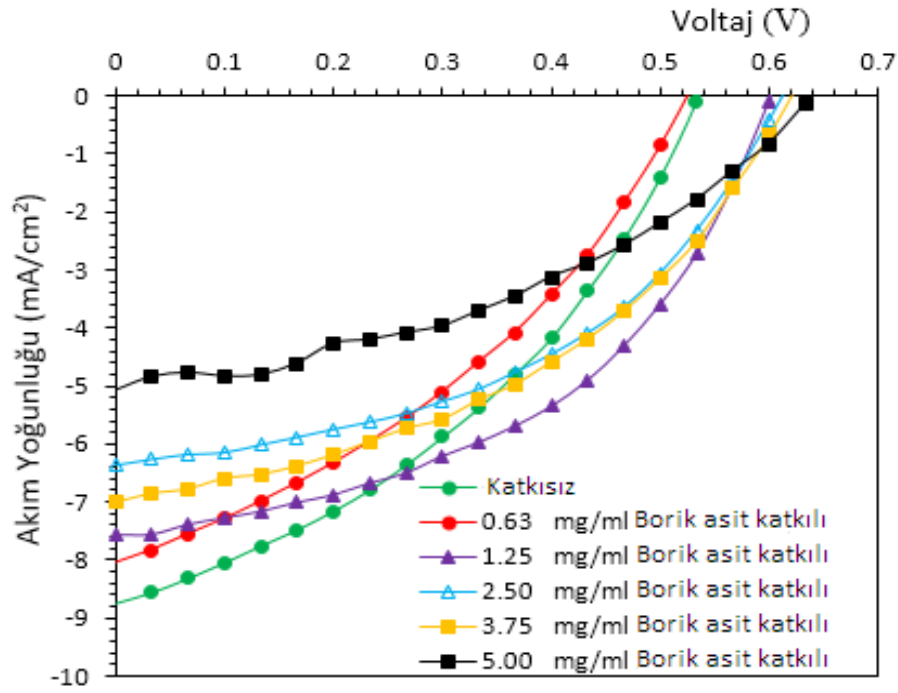
Farklı konsantrasyonlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası ile hazırlanan organik fotovoltaiik hücrelerin karanlıkta ve ışık altında ölçülen  $I-V$  karakteristikleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir.  $H_3BO_3$ ’ün organik fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisini belirlemek amacıyla  $H_3BO_3$  bulundurmeyan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al referans yapısı üretilmiştir.  $H_3BO_3$ ’ün fotovoltaiik karakteristiklere etkisinin belirlenmesi için hesaplanan parametreler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1 Farklı konsantrasyonlarda  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tampon tabakası bulunduran aygıtların fotovoltaiik parametreleri

| PEDOT:PSS tabakasında borik asit konsantrasyonu (mg/ml) | Film kalınlığı (nm) | $V_{oc}$ (Volt) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | PCE (%) | $R_s$ (k $\Omega$ ) | $R_{sh}$ (k $\Omega$ ) |
|---------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|--------------------------------|--------|---------|---------------------|------------------------|
| 0                                                       | 56,85               | 0,535           | 8,75                           | 38,3   | 1,79    | 0,486               | 3,017                  |
| 0,625                                                   | 56,33               | 0,525           | 8,00                           | 36,5   | 1,53    | 0,680               | 2,981                  |
| 1,25                                                    | 56,08               | 0,602           | 7,57                           | 46,9   | 2,14    | 0,625               | 11,47                  |
| 2,50                                                    | 57,19               | 0,612           | 6,37                           | 45,8   | 1,78    | 0,600               | 9,153                  |
| 3,75                                                    | 55,67               | 0,620           | 7,00                           | 42,2   | 1,83    | 0,600               | 8,000                  |
| 5,00                                                    | 56,23               | 0,640           | 5,10                           | 39,0   | 1,27    | 1,400               | 9,803                  |

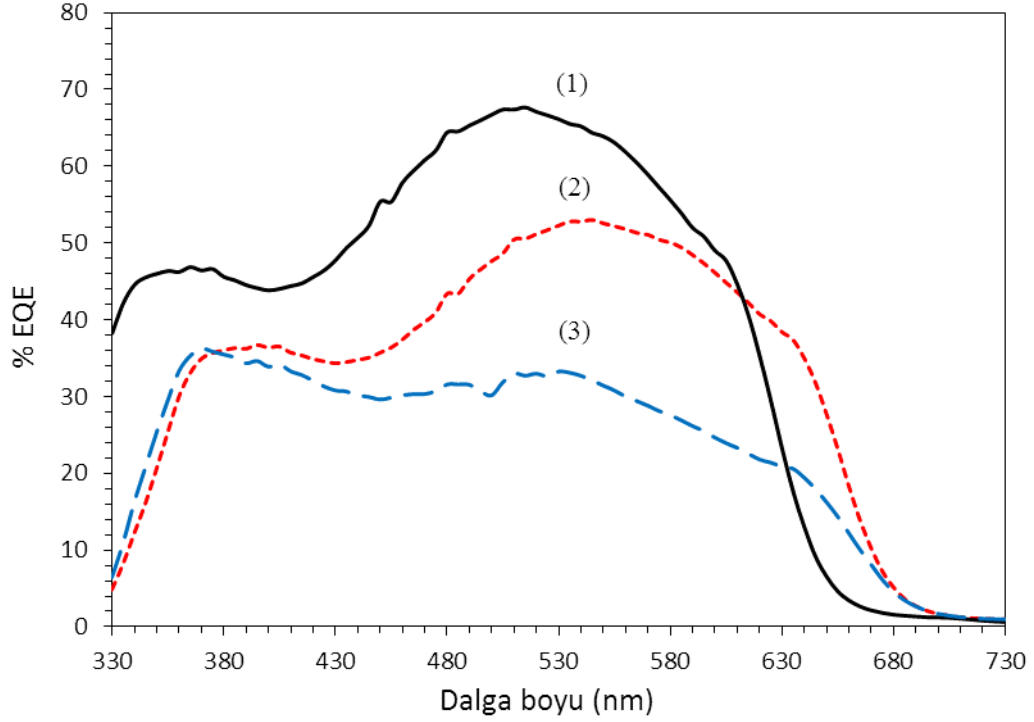
#### 4.1.2 Üretilen Fotovoltaiik Hücrelerin Karakterizasyonu

Şekil 4.7, farklı oranlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası bulunan ve ITO/PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ /P3HT:PCBM/Al tabakalarından oluşan fotovoltaiik hücrelerin karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen  $I-V$  karakteristikleri gösterilmiştir.  $H_3BO_3$  içermeyen referans fotovoltaiik hücre için kısa devre akım yoğunluğu  $J_{sc}=8,75$  mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı  $V_{oc}=0,535$  V olarak ölçülmüş ve  $FF=38,3$  olarak hesaplanmıştır. Bu da %1,79'lık bir verime sebep olmuştur. 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücreli için  $J_{sc}=7,57$  mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}=0,602$  V olarak kaydedilmiş ve  $FF=46,9$  olarak hesaplanmıştır. Bu da %2,14'lik bir verime sebep olmuştur.  $H_3BO_3$ 'ün belli bir konsantrasyonunda (1,25 mg/ml) en iyi PV performansı gözlenmiştir. Fotovoltaiik parametrelere bakıldığında  $H_3BO_3$  eklenmesinin temel etkisi  $V_{oc}$  ve  $FF$ 'yi artırmak olmuştur.  $V_{oc}$ 'deki artış iş fonksiyonundaki değişim ile açıklanabilirken,  $FF$ 'deki artış ise PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$  eklenmesi ile morfolojide meydana gelen iyileşme ile açıklanabilmektedir.



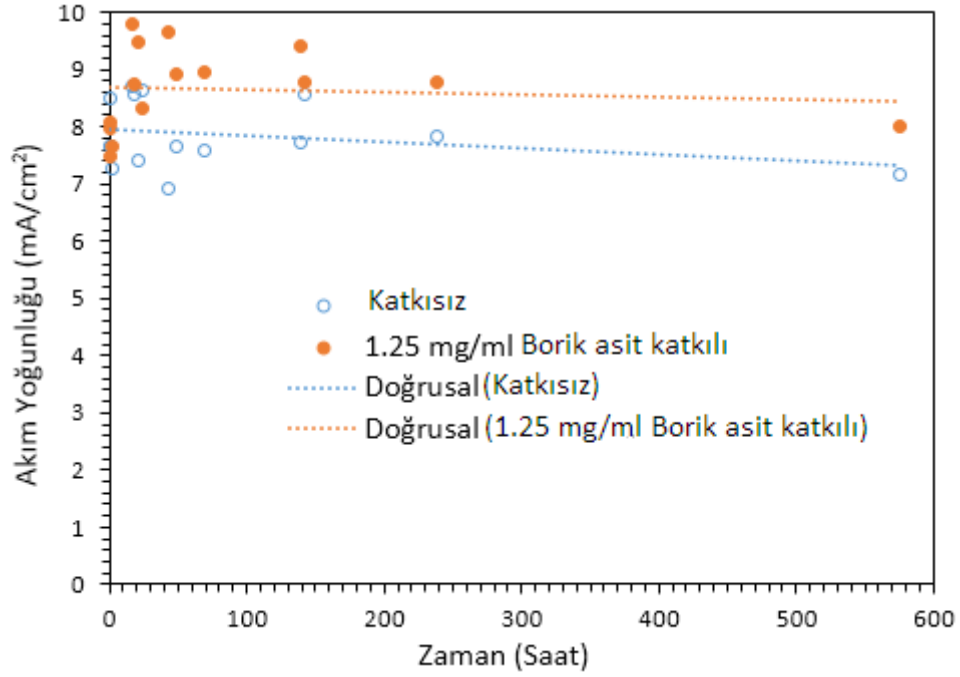
Şekil 4. 7 Farklı oranlarda  $H_3BO_3$  içeren PEDOT:PSS tabakası ile hazırlanan organik fotovoltaiik hücrelerin  $I - V$  eğrileri

Fotovoltaiik hücrelerin kuantum verim değeri, belirli bir dalga boyunda fotonlar ile ışınlanan hücrelerin ürettiği akım miktarını ifade etmektedir. Fotovoltaiik hücrelerin kuantum verimi, dış kuantum verimi ve iç kuantum verimi şeklinde iki tür olarak sınıflandırılmaktadır. Dış kuantum verimi ( $EQE$ ), gelen fotonların sayısının fotovoltaiik hücre tarafından toplanan yük taşıyıcıların sayısına oranıdır. İç Kuantum Verimi ( $IQE$ ), fotovoltaiik hücre tarafından absorblanan belirli bir enerjili fotonların sayısının fotovoltaiik hücre tarafından toplanan yük taşıyıcılarının sayısına oranıdır.  $IQE$ 'nin ölçülebilmesi için önce  $EQE$ 'nin ölçülmesi gerekmektedir. Kuantum verimlerinin ölçülmesi ile aygıtın yük taşıyıcı üretim mekanizması hakkında bilgi alınabilmektedir. Tez çalışmasında üretilen fotovoltaiik hücrelerin ölçülen dış kuantum verimi ( $EQE$ ) Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Farklı oranlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakaları içeren aygıtların  $EQE$  eğrileri karşılaştırılmıştır.  $EQE$  değerleri aygıtın kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) ile ilgilidir. 400-600 nm aralığında katkısız PEDOT:PSS ile hazırlanmış aygıt en yüksek  $EQE$  değerine sahiptir.  $EQE$  eğrisinde görüldüğü gibi, 300 ile 750 nm arasındaki spektrum aralığı fotovoltaiik veriler ile uyumludur.



Şekil 4. 8 (1) Katkısız, (2) 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS, (3) 5 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS filmleri ile hazırlanmış organik fotovoltaiik hücrelerin dış kuantum verimi

Organik fotovoltaiik hücreler alanında aşılması gereken en önemli engellerden biri düşük aygıt kararlılığıdır. Yapılan çalışmalarda, ışık ve/veya çevre koşullarına maruz kalan fotovoltaiik hücrelerin dönüşüm verimliliğinin çok kısa bir süre içinde %25-50 bozulduğu rapor edilmiştir [58]. Bu bozulma genellikle kullanılan malzemelerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum organik fotovoltaiik hücrelerin maliyetini arttırmakta ve ticarileşmelerini engellemektedir. Bu problemin çözülmesi için yapılan girişimler daha çok yeni malzeme arayışları ile ilgilidir. Bu çalışmada, katkısız ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmleri ile hazırlanmış organik fotovoltaiik hücrelerin glove box (havasız ortam kabini) içerisinde incelenen yaşam süresi eğrisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir. 600 saatlik inceleme sonunda, belli aralıklarla 100 mW/cm<sup>2</sup> (AM. 1.5G) ışınlama altında ölçülen  $J_{sc}$  değerleri,  $H_3BO_3$  katkılı fotovoltaiik hücrelerin daha iyi bir kararlılığa sahip olduğu görülmüştür.



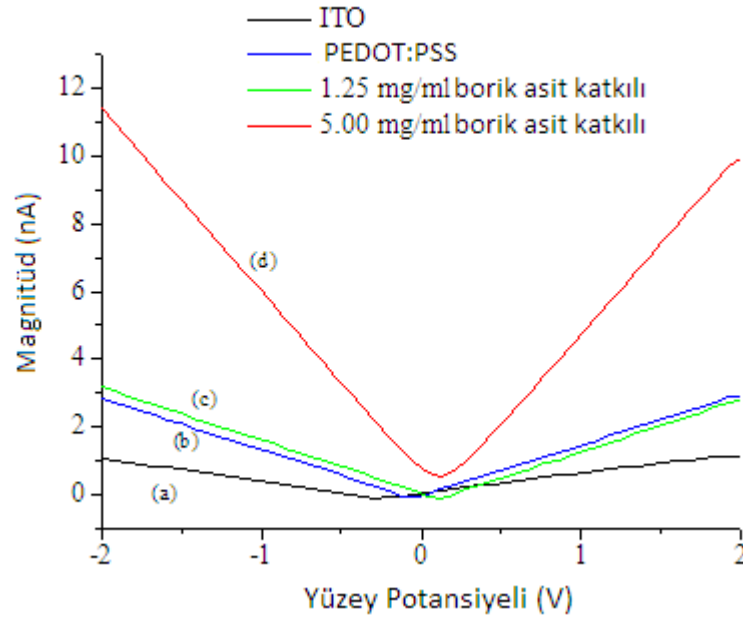
Şekil 4. 9 Katkısız ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS filmleri ile hazırlanmış organik fotovoltaiik hücrelerin yaşam süresi

Bu tez çalışmasında,  $H_3BO_3$  karıştırılmış PEDOT:PSS'nin kontak potansiyel farkı üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için Taramalı Kelvin Prob Mikroskobu (Scanning Kelvin Probe Microscopy (SKPM)) kullanılmıştır (Şekil 4.10 ). SKPM, metalik tip ile taranan örnek yüzey arasındaki potansiyel farkı belirleyen AFM esaslı deneysel bir tekniktir. ITO yüzeyler üzerine kaplanan katkılı ve katkısız PEDOT:PSS filmler ve AFM iletken ucu (TiN) arasındaki lokal temas potansiyeli farkı (CPD) araştırılmıştır. Boş ITO ve TiN tip arasındaki lokal kontak potansiyel farkı -0,281 V olarak ölçülmüş ve bu değer katkısız PEDOT:PSS için -0,0375 V olarak elde edilirken 1,25 mg/ml ve 5 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS için sırasıyla 0,120 V ve 0,124 V olarak elde edilmiştir. Yapılan SKPM ölçümlerinden elde edilen  $\Delta V_{CPD}$  değerlerinden iş fonksiyonu,

$$W_{\text{örnek}} = W_{\text{Tip}} - e \Delta V_{CPD} \quad (4.1)$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir.  $W_{\text{örnek}}$  örneğin iş fonksiyonu,  $W_{\text{Tip}}$  tip'in iş fonksiyonu,  $e$  elektron yükü ve  $\Delta V_{CPD}$  metalik tip ile taranan örnek yüzey arasındaki potansiyel farkını ifade etmektedir. SKPM ölçümlerinden elde edilen değerlerden PEDOT:PSS'nin  $H_3BO_3$  ile katkılanması sonucu ITO yüzeyinin iş fonksiyonunun arttığı görülmektedir. PEDOT:PSS tabakasının en önemli rollerinden biri ITO ve organik tabaka

arasındaki yük transferini kolaylaştırmak için ITO'nun iş fonksiyonunu arttırmaktır. İş fonksiyonundaki artış  $V_{oc}$  'de artışa yol açar.  $V_{oc}$  'deki artış, 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS'nin yüksek iş fonksiyonuna bağlanmıştır.



Şekil 4. 10 (a) ITO, (b) katkısız PEDOT:PSS film (c) 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS film, (d) 5 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS filmlerinin Magnitüd -Yüzey potansiyeli eğrileri

#### 4.2 Gama Işını Uygulanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ Tabakası İçeren Fotovoltaik Hücreler İle Elde Edilen Sonuçlar

Fotovoltaik hücrelerin performansı malzemelerin özelliklerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Bu nedenle daha iyi aygıt performansı elde etmek için yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak anot tampon tabakasını iyileştirmek üzerine yapılmaktadır. Bu malzemelerden biri PEDOT:PSS'dir. PEDOT:PSS tabakası P3HT:PCBM esaslı organik fotovoltaik hücrelerde genellikle kullanılan ve aygıt karakteristiklerini doğrudan etkileyen bir malzemedir.

Bu tez çalışmasında, P3HT:PCBM esaslı fotovoltaik hücrelerde PEDOT:PSS tabakasına farklı oranlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanarak yapılan çalışmalar neticesinde,  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakasının fotovoltaik hücrelerin verimini arttırdığı belirlenmiştir. Böylece,  $H_3BO_3$ 'ün PEDOT:PSS filmlerine katkı malzemesi olarak kullanılabileceği ilk defa rapor edilmiştir. PEDOT:PSS filmine  $H_3BO_3$  katkılanması son derece ucuz ve kolay

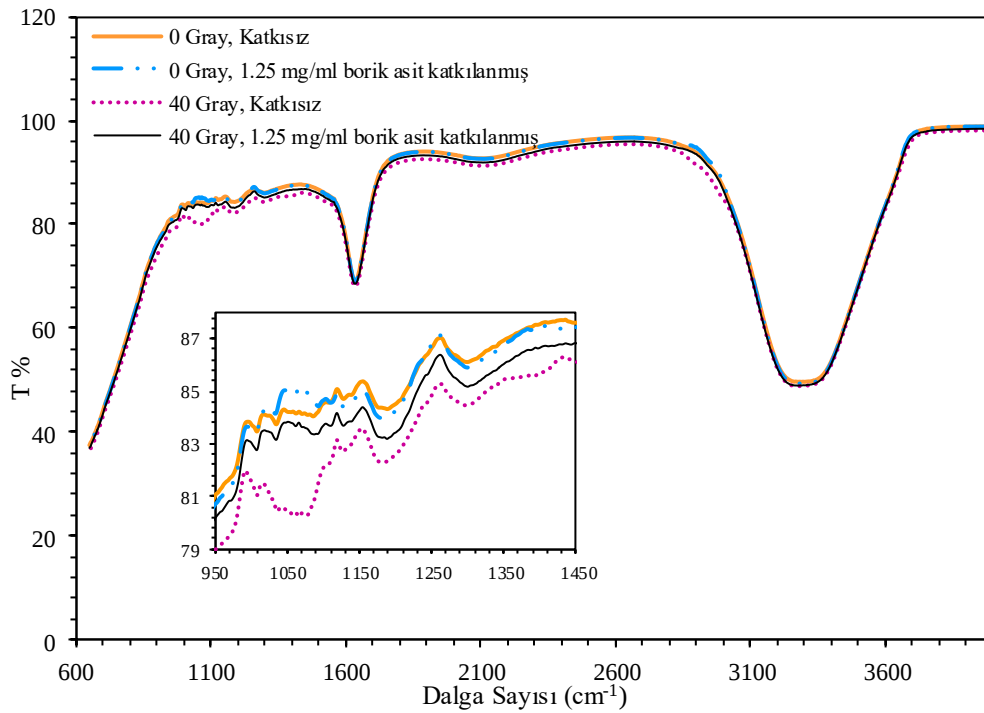
bir metottur. Yapılan çalışmada, PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$ 'ün 1,25 mg/ml konsantrasyonunda katkılanmasıyla üretilen fotovoltaiik hücrelerin en yüksek verim gösterdiği belirlenmiştir. AM 1.5G aydınlatma altında katkısız PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücre %1,79 *PCE* gösterirken 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış yapı %2,14 *PCE* göstermiştir. Katkısız PEDOT:PSS tabakası bulunduran referans aygıt ile karşılaştırıldığında, 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakası bulunduran aygıttaki verim (*PCE*) artışı %20 oranında olmuştur.

P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücrelerin performansının geliştirilmesi için yapılan çalışmaların ikinci aşaması, katkısız ve 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS ince filmine gama ışını (40 Gray) dozlanarak fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisinin incelenmesini kapsamaktadır. Literatürde genellikle, numunelerin yüksek dozlarla ışınlaması sonucu aygıtta ve numunelerde meydana gelen bozulmaların belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır.  $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakası içeren P3HT:PCBM esaslı organik fotovoltaiik hücrelere gama ışını dozlanması ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışma bu alanda yapılan ilk çalışma olma özelliğine sahiptir. Gama ışını, dozlama sistemi, sağlıkta, malzeme modifikasyonunda, tıbbi görüntüleme ve gıda sterilizasyonunda yaygın bir şekilde kullanıldığından ulaşılması oldukça kolay ve çok pahalı olmayan sistemlerdir. Bu nedenle fotovoltaiik hücre performansının geliştirilmesi çalışmalarında kolaylıkla kullanılabilir. Gama ışını ile dozlanan katkısız ve katkılı PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücre üretiminde elde edilen sonuçlar aşağıda belirtildiği gibidir:

#### **4.2.1 Fotovoltaiik Hücre Üretiminde Kullanılan İnce Filmlerin Karakterizasyonu**

Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  filmlerinin, kimyasal yapıları FTIR spektrumu kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, PEDOT:PSS filmi için elde edilen FTIR spektrumu literatürde rapor edilenlere benzerdir. FTIR spektrumunda, tiyofen halkasının meydana getirdiği  $1298\text{ cm}^{-1}$  (C=C),  $933\text{ cm}^{-1}$  (S=O) pikleri görülmüştür.  $1181\text{ cm}^{-1}$  ve  $1082\text{ cm}^{-1}$  de görülen titreşimler, etilendioksi grubundan kaynaklanan C-O-C streç bağıdır.  $1090\text{ cm}^{-1}$  ve  $1205\text{ cm}^{-1}$  tepe noktaları, PSS molekülündeki  $-SO^2$  ve  $-SO^3$  sülfon gruplarına karşılık gelmektedir [59, 60]. PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  karışımında,  $1400\text{ cm}^{-1}$  de  $H_3BO_3$ 'ten kaynaklanan B-O piki ya çok zayıf ya da

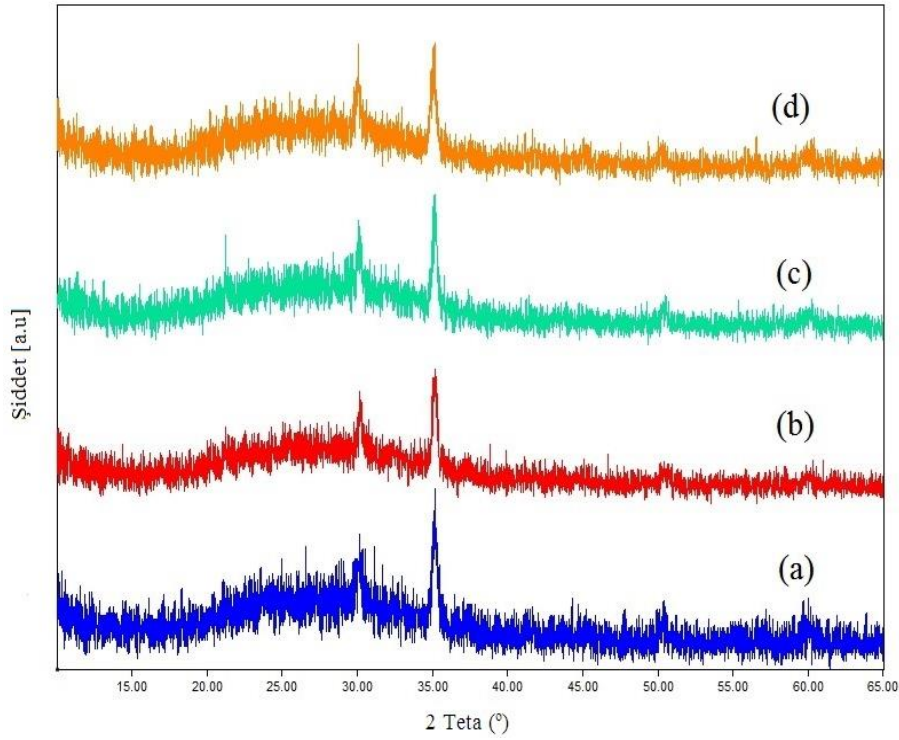
PEDOT:PSS karakteristik piklerileri ile örtüşmesi sebebiyle belirgin değildir. Tez çalışmasının ilk bölümünde, 1,25 mg/ml'lik katkı oranından sonraki katkı oranlarında  $1400\text{ cm}^{-1}$ 'de asimetrik B-O germe pikinin görüldüğü belirtilmiştir [61]. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, gama ışını dozlanması sonrası filmlerin Kızılötesi (IR) spektrumlarında belirgin bir değişiklik olmamıştır. Dozlama sonrası filmlerin geçirgenlik (transmission) şiddetlerinde azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi ışınlamanın PEDOT:PSS bağlarını etkilemesi olabileceği düşünülmektedir [62].



Şekil 4. 11 Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin FTIR spektrumları

Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin yapısal karakterizasyonu XRD analizi ile incelenmiştir. (a) Dozlanmamış PEDOT:PSS, (b) dozlanmış PEDOT:PSS, (c) dozlanmamış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, (d) dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin XRD ölçümleri Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Dozlanmamış PEDOT:PSS filmi, polimer yapısı sebebiyle  $2\theta=25,28^\circ$ 'de zayıf bir difraksiyon piki göstermiştir [63]. Bu  $2\theta$  değeri yaklaşık  $3,52\text{ Å}$  d-uzay değerine karşılık gelmektedir. Dozlanmış PEDOT:PSS, dozlanmamış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ve dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> sırasıyla  $25,49^\circ$ ,  $25,58^\circ$ ,  $25,51^\circ$ 'de pik göstermiştir, bu da sırasıyla,  $3,49\text{ Å}$ ,  $3,48\text{ Å}$  ve

3,49 Å d-uzay değerlerine karşılık gelmektedir. Elde edilen sonuçlarda,  $H_3BO_3$  katkısı ve radyasyonun PEDOT:PSS filmlerinin pik ve d-uzay değerlerini değiştirdiği görülmüştür. Bu durum  $H_3BO_3$  ve radyasyonun PEDOT:PSS'nin moleküler yapısını etkilediğini göstermektedir. Ancak bu değişim moleküler yapısında bir bozulmaya neden olacak oranda olmamıştır.



Şekil 4. 12 (a) Dozlanmamış PEDOT:PSS, (b) dozlanmış PEDOT:PSS, (c) dozlanmamış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, (d) dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerin XRD kırınım deseni

Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin kalınlığı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sa) mekanik profilometre ile belirlenmiştir. Filmlerin ölçülen kalınlıkları ve ortalama pürüzlülükleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Dozlanmamış PEDOT:PSS filminin kalınlığı 45,79 nm'dir. Dozlanmış PEDOT:PSS, dozlanmamış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ve dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin kalınlıklarının sırasıyla 44,18 nm, 48,99 nm ve 45,17 nm olarak ölçülmüştür. Tüm filmlerin kalınlığı yaklaşık aynıdır. Dozlanmamış PEDOT:PSS filminin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sa) 17,06 nm olarak ölçülmüştür. Dozlanmış PEDOT:PSS, dozlanmamış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ve dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin ortalama pürüzlülükleri sırasıyla 20,23 nm, 25,04 nm ve 25,86 nm olarak ölçülmüştür. Dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filminin en

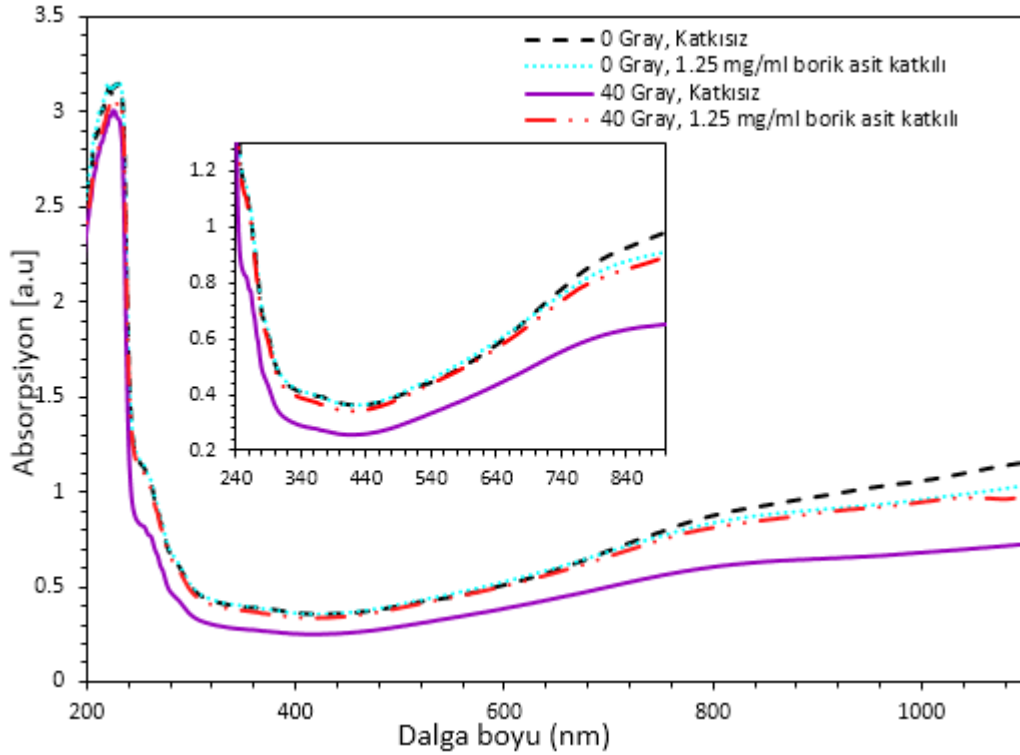
yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür. Fotovoltaik hücrelerde PEDOT:PSS ve aktif tabaka arasındaki arayüzey aygıt performansı açısından oldukça önemlidir [63]. Ölçüm sonuçları, filmlerin gama ışınına maruz kalması ile yüzey pürüzlülüklerinin arttığını göstermektedir. Böylece, PEDOT:PSS ve P3HT:PCBM arayüzeyinin artması ile beraber aktif tabakaya daha fazla ışık ulaşmış olabileceği düşünülmektedir. Bunun bir sonucu olarak, kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) artmıştır, bu da hücrelerin güç dönüşüm veriminde ( $PCE$ ) artış sağlamıştır.

Çizelge 4. 2 Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tampon tabakası ile hazırlanan aygıtların fotovoltaik hücre parametreleri

| Radyasyon dozu ve PEDOT:PSS içindeki H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> katkı oranı | Kalınlık (nm) | Ortalama Pürüzlülük (nm) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%) |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|---------|
| 0 Gy, Katkısız                                                                  | 45,79         | 17,06                    | 4,48                           | 0,460           | 40     | 0,82    |
| 40 Gy, Katkısız                                                                 | 44,18         | 20,23                    | 5,18                           | 0,520           | 35     | 0,94    |
| 0 Gy, 1,25 mg/ml                                                                | 48,99         | 25,04                    | 5,66                           | 0,500           | 39     | 1,10    |
| 40 Gy, 1,25 mg/ml                                                               | 45,17         | 25,86                    | 6,28                           | 0,500           | 39     | 1,22    |

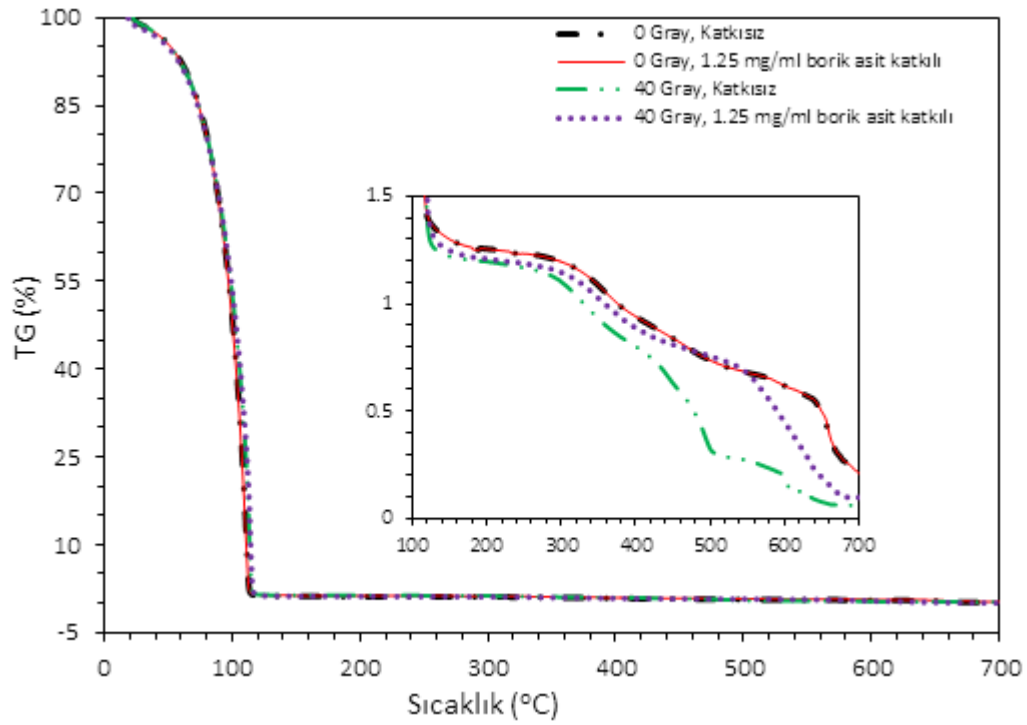
Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerin 200-1100 nm dalga boyu aralığındaki UV-VIS spektral dağılımı Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Bütün filmler 600-900 nm arasında geniş bir absorpsiyon piki göstermiştir. IR bölgesinde filmlerin geniş absorpsiyon bandı oluşması, serbest yük taşıyıcılarının absorpsiyona katkısı olarak yorumlanabilir [64]. 600-900 nm bölgesinde, filmlere gama ışını uygulanmasının ardından absorpsiyon şiddetinde bir azalma görülmüştür. PEDOT:PSS'nin önemli bir özelliği görünür bölgede yüksek şeffaflık göstermesidir. Bu özelliği düşük absorpsiyon gerektiren antistatik kaplamalar, lensler ve film gibi çeşitli uygulamalar için PEDOT:PSS'yi oldukça kullanışlı kılmaktadır [65]. Işınlama sonrası, PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin görünür bölge aralığında yüksek geçirgenlik gösterdiği görülmüştür. Böylece, aktif tabakaya ulaşan ışık miktarı artmaktadır. Buna ek olarak, ince filmlerin yüzey morfolojisinin hacim heteroeklem fotoaktif tabaka absorpsiyonunu etkilediği bilinmektedir. Işığın soğurulması ile üretilen serbest yük taşıyıcıları fotovoltaik hücrelerin  $J_{sc}$  değerinin artmasında etkili bir şekilde katkı sağlamaktadır [66]. PEDOT:PSS filmlerinin, gama ışını ile dozlanması sonucu morfolojilerinde meydana geldiği mekanik profilometre ölçümleri ile gösterilmiştir. Bu

nedenle, gama ışını dozlanmış PEDOT:PSS tabakası bulunduran fotovoltaiik hücredeki verim artışının bu etkiler sonucu olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4. 13 Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin absorpsiyon spektrumları

Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin termal kararlılıklarının belirlenmesi için TGA kullanılmıştır. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi, tüm numuneler, 100°C'nin altında önemli bir kütle kaybı göstermiştir. 100°C ile 700°C arasında tüm örnekler için üç basamaklı bir kütle kaybı görülmüştür. Artan sıcaklık ile, 125°C<T<700°C aralığında, dozlanmamış PEDOT:PSS, dozlanmamış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, dozlanmış PEDOT:PSS ve dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> için kütle kaybı sırasıyla %1,611, %1,490, %1,466 ve %1,423 dür. Sıcaklık artışı ile beraber en düşük kütle kaybı dozlanmış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>'de meydana gelmiştir. Bu durum, çevre koşullarına duyarlı olan fotovoltaiik hücrelerde, borikasit katkılı PEDOT:PSS tabakası bulunduran aygıtın sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanıklı olabileceği şeklinde açıklanabilir.



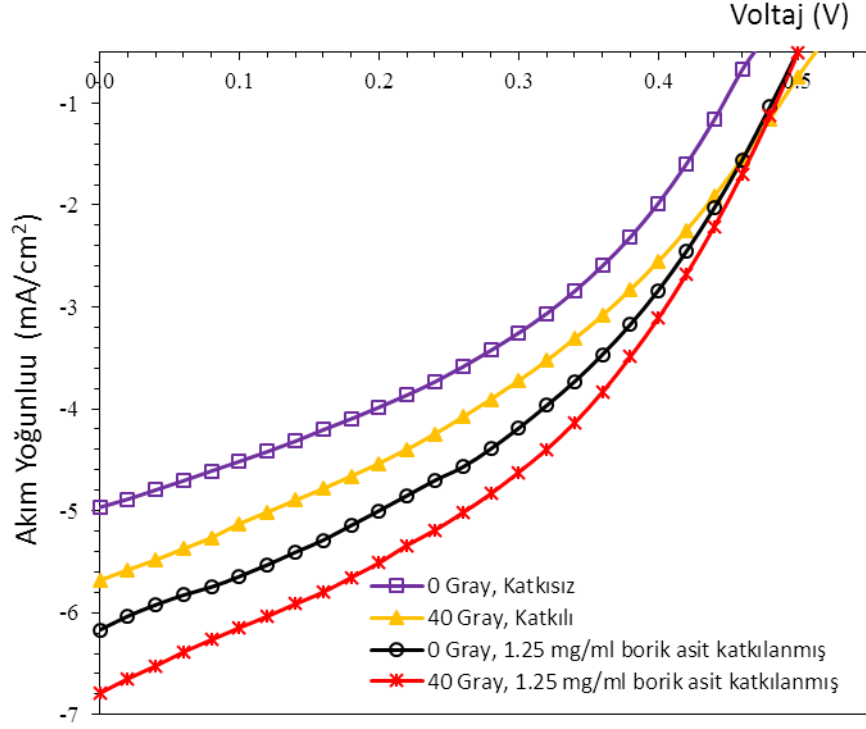
Şekil 4. 14 Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin TGA eğrileri

#### 4.2.2 Üretilen Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu

Tez çalışmasının ilk bölümünde, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>'ün, organik fotovoltaik hücrelerin performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. PEDOT:PSS boşluk toplayıcı tampon tabakasına farklı konsantrasyonlarda (0-5 mg/ml) H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılanarak ITO/PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/P3HT:PCBM/Al fotovoltaik hücreler üretilmiş ve  $I-V$ , XRD, SEM, UV, AFM, FTIR ve elektriksel iletkenlik ölçümleri ile aygıt ve filmlerin karakterizasyonları yapılmıştır.

P3HT:PCBM aktif tabakaları N<sub>2</sub> atmosferi altında glove box (havasız ortam kabini) içerisinde hazırlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>'ün belirli bir konsantrasyonunda (1,25 mg/ml) fotovoltaik hücreler en iyi PV performansı ortaya koymuştur. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> kullanılmayan referans aygıt 8,75 mA/cm<sup>2</sup>  $J_{sc}$  ve 0,535 V  $V_{oc}$  sergilemiştir.  $FF$  %39 olarak hesaplanmıştır ve bu da %1,79'luk bir  $PCE$ 'ye neden olmuştur. 1,25 mg/ml H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> kullanılan fotovoltaik hücre 7,57 mA/cm<sup>2</sup>'lik bir  $J_{sc}$  ve 0,602 V'luk bir  $V_{oc}$  sergilemiştir.  $FF$  %46 olarak hesaplanmıştır ve bu da %2,14'lük bir  $PCE$ 'ye neden olmuştur. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkısı ile beraber verimdeki artış yaklaşık %20 olmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise düşük doz gama ışınının, 1,25 mg/ml  $H_3BO_3$  katkılanmış PEDOT:PSS ile P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücrelerin performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dozlanmış ve dozlanmamış PEDOT:PSS ve PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakası içeren fotovoltaiik hücrelerin  $I-V$  karakterizasyonları Şekil 4.15'de gösterilmiştir.  $H_3BO_3$ 'ün fotovoltaiik parametrelere etkisinin incelendiği ilk aşamada fotovoltaiik hücrelerin aktif tabakası glove box (havasız ortam kabini) içerisinde kaplanırken, çalışmanın bu aşamasında tüm işlemler ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tüm aygıtlardan yaklaşık aynı  $FF$  elde edilmiştir. Katkılanmamış PEDOT:PSS tabakası içeren referans fotovoltaiik aygıt ile kıyaslandığında hem  $H_3BO_3$  katkısı hem de radyasyon uygulanması  $V_{oc}$ 'de artışa yol açmıştır. Dozlanmamış PEDOT:PSS tabakası kullanılan referans aygıt  $4,48 \text{ mA/cm}^2 J_{sc}$  ve  $\%0,82 PCE$  sergilemiştir. Dozlanmamış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakası kullanılan fotovoltaiik hücreler  $5,66 \text{ mA/cm}^2 J_{sc}$  ve  $\%1,10 PCE$  sergilemiştir. 40 Gy gama ışını ile dozlanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılan fotovoltaiik hücre  $5,18 \text{ mA/cm}^2 J_{sc}$  ve  $\%0,94 PCE$  sergilemiştir. 40 Gy gama ışını ile dozlanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakası kullanan fotovoltaiik hücre  $6,28 \text{ mA/cm}^2 J_{sc}$  ve  $\%1,22 PCE$  sergilemiştir. Dozlanmamış katkısız referans aygıt ile kıyaslandığında, dozlanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakası içeren aygıttaki  $PCE$  artışı  $\%49$  ve  $J_{sc}$ 'deki artış  $\%40$  olmuştur. Gama ışını ile dozlanmış PEDOT:PSS: $H_3BO_3$  tabakası içeren fotovoltaiik hücrelerin en iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Görüldüğü gibi, düşük doz gama radyasyonu fotovoltaiik hücrelerin elektriksel özelliklerini iyileştirmiştir. Fotovoltaiik parametreler açısından bakıldığında, ışınlamanın en temel etkisi  $J_{sc}$  ve  $PCE$ 'de dikkat çekici bir artış sağlamış olmasıdır. Bu artış, ışınlama sonrası PEDOT:PSS'nin yüzey morfolojisindeki değişim ile açıklanabilir.



Şekil 4. 15 Gama ışını ile dozlanmış katkısız ve  $H_3BO_3$  ile katkılanmış PEDOT:PSS tabakası kullanılarak üretilen fotovoltaik hücrelerin  $I-V$  eğrileri

#### 4.3 Çalışmanın Özgün Yönleri

- Literatür taraması yapıldığında, araştırmacılar fotovoltaik hücrelerin verim ve kararlılığının geliştirilmesi için PEDOT:PSS tabakasına pek çok farklı malzeme ( $WO_x$ ,  $MoO_x$ ,  $V_2O_5$ ,  $NiO_x$ ,  $Fe_2O_3$  NPs, EG ve MWCNT vb.) katkılamaaktadırlar. Bu tez çalışmasında ise, ilk defa katkı malzemesi olarak  $H_3BO_3$  kullanılmıştır. Elde edilen fotovoltaik değerler, standart organik fotovoltaik hücreler ile karşılaştırılmış ve  $H_3BO_3$ 'ün fotovoltaik hücrelerin verimini %20 arttırdığı görülmüştür.
- PEDOT:PSS'ye katkı olarak literatürde kullanılan malzemeler yüksek maliyetli ve zor ve uzun hazırlanma süreçleri gerektirmektedir. Oysa  $H_3BO_3$  oldukça düşük maliyetli ve kolay elde edilebilen bir bor atığı malzemedir.
- Fotovoltaik hücre çalışmalarında kullanılan malzemeler yurt dışından temin edilen ve ticari değeri yüksek malzemeler olmasına rağmen,  $H_3BO_3$  yerli bir kaynak olması ve bor atığı olması sebebiyle tedariki oldukça kolay bir malzemedir.

- Sağlık, cam, tekstil, nükleer uygulamalar, ilaç, elektronik gibi pek çok alanda kullanılmakta olan bor ürünlerinden biri olan  $H_3BO_3$ 'ün bu tez çalışması ile beraber organik fotovoltaiik hücre uygulamalarına dâhil edilmiş olması dünyadaki en büyük bor rezervine sahip Türkiye için tekno-ekonomik açıdan son derece hayati ve stratejik bir öneme sahiptir.
- $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakası içeren fotovoltaiik uygulamalarında gama ışını dozlama etkisi ile ilgili literatürde bir çalışma olmadığından bu tez çalışması bir ilk olma özelliğine sahiptir.
- Fotovoltaiik hücrelerde gama ışını dozlama etkisinin incelendiği çalışmalarda genellikle yüksek doz radyasyon uygulanmakta ve genellikle hücrede meydana gelen bozulma (degredation) mekanizması incelenmektedir. Ancak bu çalışmada farklı olarak düşük doz gama ışını kullanılmış ve düşük doz gama ışınının hücrelerin veriminde %49 artış sağladığı belirlenmiştir. Verimdeki bu artış  $J_{sc}$ 'deki artıştan kaynaklanmıştır. Gama ışını PEDOT:PSS'nin görünür bölgedeki geçirgenliğini artmıştır. Bunun aktif tabakaya daha fazla foton ulaşmasını sağladığı ve  $J_{sc}$ 'de artışa yol açtığı düşünülmektedir. Böylece bu tez çalışması ile beraber verim iyileştirme çalışmaları düşük doz gama ışını kullanılabileceği görülmüştür.

#### 4.4 Öneriler

Bu çalışmada, P3HT:PCBM polimer esaslı organik fotovoltaiik hücrelerde PEDOT:PSS tabakasına farklı oranlarda (0-5 mg/ml)  $H_3BO_3$  katkılanarak, düşük maliyetli bir malzeme ile fotovoltaiik hücrelerin verim ve kararlılığının geliştirilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Hâlihazırda verimleri inorganik fotovoltaiik hücrelere göre düşük olmasına rağmen, düşük maliyet ve kolay üretilebilme potansiyelleri nedeniyle organik fotovoltaiik hücrelerin verimlerinin ve kararlılıklarının iyileştirilmesi çalışmaları hız kazanmıştır. İnorganik fotovoltaiik hücreler ile kıyaslandığından daha düşük maliyetle elektrik üretme olanağı sağlasa da organik fotovoltaiik hücrelerden daha ucuza elektrik üretmek için yoğun çabalar sarf edilmektedir. Bunun için yeni düşük maliyetli malzeme arayışları devam etmektedir.

Bu tez çalışması ile  $H_3BO_3$ 'ün bu arayışları karşılamaya aday olduğu belirlenmiştir. Tez çalışması esnasında öncelikle  $H_3BO_3$  aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM'e katkılanmıştır. Ancak  $H_3BO_3$ 'ün, aktif tabaka çözücüsü olan klorobenzende çözündürülememesi nedeniyle homojen bir aktif tabaka çözeltisi hazırlanamamıştır. Bu nedenle  $H_3BO_3$ , PEDOT:PSS tabakasına katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, fotovoltaik hücre verimini en fazla arttıracak optimum katkı oranının belirlenmesi için yapılan çalışmalarda pek çok katkı oranı denenmiştir. PEDOT:PSS tabakasına katkılanan  $H_3BO_3$  katkı oranı 0-40 mg/ml aralığında denenmiş ve en iyi katkı oranının 1,25 mg/ml olduğu belirlenmiştir. PEDOT:PSS tabakasına  $H_3BO_3$  katkılanması sonucu geliştirilen fotovoltaik hücre verimi, bu tabakaya düşük doz gama ışını uygulanması ile de devam etmiştir. Borlu bileşikler kullanılarak organik fotovoltaik hücrelerin verim ve kararlılıklarının geliştirilmesi için araştırmacılar tarafından gelecekte yapılacak tez ve araştırmalarda aşağıdaki noktalar göz önünde bulundurulabilir:

- Karışım heteroeklem fotovoltaik hücrelerin spektral aralığını arttırmak için P3HT ve/veya PCBM yerine düşük bant aralıklı ( $E_g < 2$  eV) malzemeler (Benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene (BDT), BT (PBDTBT), PDPP, PTDP vb.) kullanılması, yakalanan foton miktarını arttırabilir. Bu nedenle araştırmacılar tarafından ileride yapılacak çalışmalarda, bu tip malzemelerin kullanılması tavsiye edilebilir.
- PEDOT:PSS tabakasına,  $H_3BO_3$  yerine farklı borlu bileşikler (boraks, bor oksit vb.) katkılanarak fotovoltaik hücrelerin performansı incelenebilir.
- $H_3BO_3$  katkılı PEDOT:PSS tabakası fotovoltaik hücre dışında kapasitör, transistör, OLED, sensör ve antistatik kaplamalar vb. gibi pek çok farklı uygulamalarda kullanılabilir.
- Gama ışınının farklı dozları uygulanarak fotovoltaik performansa etkisi incelenebilir.
- Gama ışını dışında X-ışını etkisi incelenebilir.

Borlu bileşikler, organik fotovoltaik esaslı fotovoltaik hücrelerin verim, maliyet ve kararlılık problemlerine çözüm olmaya adaydır. Yukardaki önerileri dikkate alan yeni çalışmalarla daha yüksek performanslı fotovoltaik hücreler elde edilebilir.

#### 4.5 Tez Çalışmaları Esnasında Yapılan Diğer Çalışmalar

Tez çalışmaları esnasında, biri Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve diğeri Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK) tarafından desteklenen iki proje tamamlanmıştır. Ayrıca elde edilen çıktılar, biri yayınlanan ve diğeri incelemede olan iki makale, dört bildiri ve incelemeli patent (20 yıl) olarak (Türk Patent Enstitüsü'nde (TPE) son inceleme aşamasında) olarak derlenmiştir. Yayınlanan tez çıktılarının detayları aşağıda verilmiştir.

##### 4.5.1 Projeler

- 113F391 numaralı 'Bor Mineral Atıklarının Fotovoltaik Uygulamalarda Kullanılması' başlıklı proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (15/03/2014-15/03/2016). Projenin özet bölümü aşağıda verilmiştir;

A solar cell (also called a photovoltaic cell) is an electrical device that produces electricity from light by the photovoltaic effect. Organic solar cells are widely studied due to its properties such as low production cost and mechanical flexibility. However, the power conversion efficiency and stability of the times is still very low despite of intensive researchs.

In this project study, the heterojunction solar cells consisting of ITO/PEDOT:PSS/Active Layer/Al layers by using sol-gel and thermal evaporation techniques will be produced. The basic electronics characteristic parameters of produced heterojunction solar cells will be determined; measuring current-voltage ( $I-V$ ). Together with the measurement such as optic and morphological of the existing structures is defined as the necessary photovoltaic features for the optimization and production of the basic solar cell parameters is aimed. Also ITO/PEDOT:PSS/Active Layer/Al consisting of layers heterojunction structures that with exposure to gamma rays that the effects on the stability of solar cells of boron compounds will be determined.

In this project, we will investigate to increase the life of solar cells by using the properties of  $\text{In}^{+3}$  to prevent the diffusion of Boron into the organic layers. And thus, the energy budgets can be optimized by solar panels with longer lives. We also expect to increase efficiency of solar cells by examining any kind of enhancement effect of Boron compounds on the work function of ITO.

- 2013-01-01-DOP01 numaralı 'Farklı Metal Grupları İçeren Ftalosiyanınların Foto-Voltaik Uygulamalarda Kullanılması' başlıklı proje Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK) tarafından desteklenmiştir (14/06/2013-14/06/2016). Projenin abstract bölümü aşağıda verilmiştir;

Phthalocyanine compounds are finding applications as alternative materials for solar cell applications due to their photovoltaic properties, chemical stabilities and strong absorption rates in visible region. Therefore they are the strongest candidates to replace Si in the future. Almost all of the phthalocyanines reported in literature using phthalocyanines based photovoltaic devices are commercially available. Therefore, in order to produce phthalocyanines based photovoltaic devices with desired efficiencies, the synthesis of novel phthalocyanine compounds with different properties is inevitable. As a result, we are going to test the effects of phthalocyanine that we will synthesize by adding different materials like  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  with solar light storage capabilities, processed boron by product Ulexite, Probertite, Trommel Sieve Waste and Colemanite on the parameters of solar cells with out expert team on the subject.

Literature states that radiation has negative effects on the performance of solar cells. In order to diminish the negative effects caused by the radiation we will use materials like Ulexite, Colemanite, Amethyst, Original tincal, Trommel sieve waste (TSW), Electro coagulation bor waste (ECBW) and Aluminum borate to produce photovoltaic solar cells. Therefore, we are aiming to protect the solar cells from the harmful effects of radiation as we are pioneering to improve the stability by making use of the industrially and technologically significant boron by products on photovoltaic applications.

#### 4.5.2 Makaleler

- ‘Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT:PCBM based organic solar cells’, başlıklı yayınlanan makalenin abstract bölümü aşağıda verilmiştir;

In this study, we fabricated PEDOT:PSS film with different concentrations (0 to 5 mg/ml) of boric acid ( $H_3BO_3$ ) doped PEDOT:PSS film as hole collector layer. Undoped and boric acid doped PEDOT:PSS films are prepared with spin coating technique and characterized by XRD, UV, AFM, FTIR and electrical conductivity measurements. We fabricated polymer solar cells in the form of ITO/PEDOT:PSS: $H_3BO_3$ /P3HT:PCBM/Al. Results show that the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and the fill factor ( $FF$ ) increased by introducing  $H_3BO_3$  as dopant into the PEDOT:PSS layer due to an increase in the work function of PEDOT:PSS layer and improvement of surface roughness, respectively. The solar cells without  $H_3BO_3$  showed a power conversion efficiency ( $PCE$ ) of 1,79% whereas the cells with  $H_3BO_3$  concentration of 1,25 mg/ml in PEDOT:PSS, showed a higher performance resulting in a  $PCE$  of 2,14% under AM 1.5G illumination. [Yagci, Ö., Yesilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongül, F., Varal, N. M., Kus, M., Günes, S., Icelli, O. 2016, ‘Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT:PCBM based organic solar cells’, Synthetic Metals, 212, 12–18.]

- Gama ışını uygulamalarından elde edilen çıktılar ‘Investigating the Performance of P3HT:PCBM Organic Solar Cells Involving Gamma Irradiated PEDOT:PSS Layer’ başlıklı yayın şeklinde hazırlanan ve Radiation Physics and Chemistry dergisinde inceleme altında olan çalışmanın abstract bölümü aşağıda verilmiştir;

In this work, we investigated for the first time the characteristics of (poly(3-hexylthiophene) and [6, 6]-phenyl C61-butyric acid methyl ester) (P3HT:PCBM) blends based organic solar cell with 1,25 mg/ml boric acid ( $H_3BO_3$ ) doped poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) layer which is irradiated under the 40 Gray (Gy) dose of gamma ( $\gamma$ ) ray. Basic electronic characteristics of fabricated solar cells were determined by Current-Voltage ( $I - V$ ) measurements. Effect of  $\gamma$ -irradiation of PEDOT:PSS layer on solar cell

performance was systematically investigated by the characterizations of Fourier transform infrared spectrum (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), Ultraviolet–Visible Spectroscopy (UV-VIS), Thermogravimetric analysis (TGA) and stylus profilometer. Experimental results showed that the parameters of solar cell improved with exposure to the low dose of gamma radiation. In particular, it has provided a significant improvement in short circuit current density ( $J_{sc}$ ) and power conversion efficiency ( $PCE$ ). About 49% increase in  $PCE$  and 40% increase in  $J_{sc}$  was obtained between the bare device and the device containing irradiated PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>. Also, it was determined that the boric acid doped PEDOT:PSS is more stable to temperature. More importantly, solar cell containing irradiated PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> showed best performance comparing to conventional PEDOT:PSS based cell. [Yağci, Ö., Yesilkaya, S. S., İçelli, O. 2016, 'Investigating the Performance of P3HT:PCBM Organic Solar Cells Involving Gamma Irradiated PEDOT:PSS Layer', Radiation Physics and Chemistry (Under review)].

#### 4.5.3 Bildiriler

Tez çalışmasında katılım sağlanan uluslararası kongrelerde sunulan bildirilerin özet bölümleri aşağıda verilmiştir;

- Due to some important properties such as low cost, mechanical flexibility etc., organic solar cells are studied widely worldwide. Despite these condense works power conversion efficiencies and life times of them are still very poor. One of the main reasons of these weaknesses is In<sup>+3</sup> diffusion to organic layers from indium tin oxide (ITO) anode layer. In order to prevent this diffusion, in this work, boron including layers were prepared and ITO/PEDOT:PSS/Boron compounds/Organic(s)/Al, ITO/Boron compounds/PEDOT:PSS/Organic(s)/Al and ITO/PEDOT:PSS/Organic(s):Boron compounds/Al structures were obtained. Electrical and optical properties of the films were measured and heterostructures characterized via  $I-V$  and  $C-V$  measurements and effect of boron compounds on the performance of solar cells were investigated. [Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., İçelli, O. 2014, 'Use of boron mineral wastes in the photovoltaic applications', TFD31, Bodrum].

- In this study we fabricated solar cells that have the structure of ITO/PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/P3HT:PCBM/Al with PEDOT:PSS(Poly(3,4ethylenedioxythiophene)Poly (styrene-sulfonate)) layers containing various concentrations (0 to 5 mg/ml) of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>. For the preparation of the solar cells, PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> was spin coated on ITO substrates at 3000 rpm for 60 s and annealed at 150°C for 4 min under ambient conditions. The active layer of P3HT:PCBM (poly(3-hexylthiophene):(6,6)-phenyl-C61-butyric acid methyl ester) was spin cast onto PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> film at 800 rpm for 60 s. Finally Al back contact metal is deposited by thermal evaporation. The measured *J* – *V* characteristics of organic solar cells using a solar simulator is shown in Fig. 1 and Table I summarizes the photovoltaic performance for each device.

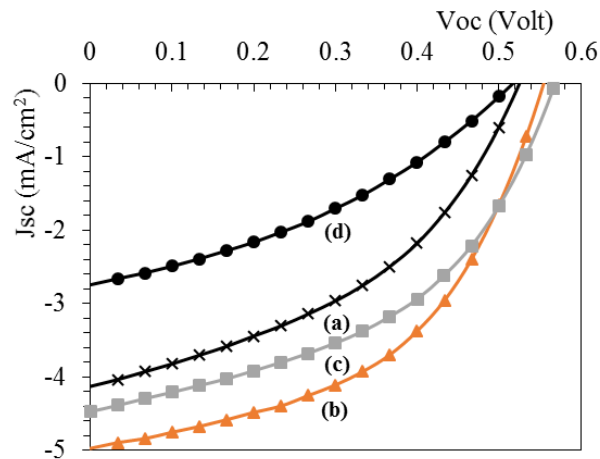


Figure-1: Open circuit voltage versus short circuit current density of organic solar cells using undoped and different ratio boric acid doped PEDOT:PSS buffer layer (a) undoped, (b) 1,25 mg/ml, (c) 2,50 mg/ml, (d) (b) 5,00 mg/ml

**Table-I** Photovoltaic parameters of organic solar cell prepared with different concentrations of boric acid in PEDOT:PSS buffer layer.

| Boric acid | J(mA/cm <sup>2</sup> ) | V <sub>oc</sub> (Volt) | FF (%) | PCE(%) |
|------------|------------------------|------------------------|--------|--------|
| Undoped    | 4,12                   | 0,520                  | 43     | 0,92   |
| 1,25 mg/ml | 4,97                   | 0,533                  | 49     | 1,36   |
| 2,50 mg/ml | 4,46                   | 0,566                  | 46     | 1,18   |
| 5,00 mg/ml | 2,73                   | 0,433                  | 37     | 0,51   |

In the room conditions repeated experiments, the solar cells with a bare active layer showed a power conversion efficiency (*PCE*) of 0,92% while with  $\text{H}_3\text{BO}_3$  at 1,25 mg/ml concentration, showed higher performance resulting a *PCE* of 1,36% under AM 1.5G illumination. A 47% increase in power conversion efficiency was obtained optimized device due to the addition of  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . That is both reduce the cost and increase in efficiency, is an important parameter for photo-voltaic applications. [Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongül, F., Bozar, S.T., Fotovoltaik, S., İçelli, O. 2015, 'In the room conditions improved efficiency of organic solar cells using of boron compounds', OEMT2015, Elazığ].

- In this study we examined effects of radiation in P3HT:PCBM based organic solar cell by using boric acid ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) as dopant into PEDOT:PSS (Poly(3,4 ethylenedioxythiophene)Poly(styrene-sulfonate)) based buffer layer. We fabricated solar cells that have the structure of ITO/PEDOT:PSS: $\text{H}_3\text{BO}_3$ /P3HT:PCBM/Al with PEDOT:PSS layers containing various concentrations (0- 5 mg/ml) of  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . The samples were exposed gamma ray source with radiation dose 5 kGray. Basic electronic characteristics of fabricated solar cells were determined by current-voltage ( $I-V$ ) measurements were carried out before and after exposure. We systematically characterized of PEDOT:PSS: $\text{H}_3\text{BO}_3$  films by TG/DTA and SEM. [Yağci, Ö., İçelli, O. 2015, 'Effect of gamma ray on performance of boric acid containing P3HT:PCBM based photovoltaic cells', AFMAT2015, Antalya].
- In this study we examined effects of radiation in P3HT:PCBM based organic solar cell by using boric acid ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) as dopant into PEDOT:PSS (Poly(3,4 ethylenedioxythiophene) Poly(styrene-sulfonate)) based buffer layer. We fabricated solar cells that have the structure of ITO/PEDOT:PSS: $\text{H}_3\text{BO}_3$ /P3HT:PCBM/Al with PEDOT:PSS layers containing various concentrations (0 and 1,25 mg/ml) of  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . The samples were exposed gamma ray source with radiation dose 0 and 40 Gry. Basic electronic characteristics of fabricated solar cells were determined by current-voltage ( $I-V$ ) measurements. We systematically characterized of PEDOT:PSS: $\text{H}_3\text{BO}_3$  films by TG/DTA and FTIR. [Yağci, Ö., İçelli, O. 2016, 'The effects of radiation of P3HT:PCBM based organic solar Cells by using boric acid ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) as dopant into PEDOT:PSS under gamma irradiation', IPCAP2016, Erzurum].

#### **4.5.4 Patent**

- ‘PEDOT:PSS film Üretiminde Borikasit kullanımı’ başlıklı patent PT2015-00718 referans numarası ile incelemeli patent (20 yıl) olarak Türk Patent Enstitüsü’nde (TPE) son inceleme aşamasındadır [Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Güneş, S., İçelli, O.].

## KAYNAKLAR

---

- [1] International Energy Agency, and Organisation for Economic Cooperation and Development (2011) World energy outlook 2011. IEA, International Energy Agency, OECD, Paris.
- [2] Rand, B.P., Richter, H., (2014). Organic Solar Cells Fundamentals, Devices, And Upscaling, ISBN-13: 978-9814463652, Pan Stanford Publishing, Florida.
- [3] Bruder, I., (2010). Organic solar cells: Correlation between molecular structure, morphology and device performance, Doktora Tezi, Max-Planck-Enstitüsü, Katı Hal Araştırmaları, Stuttgart.
- [4] Freisinger, B., (2013). Investigation of P3HT/PCBM Particle-Based Solar Cells, Doktora Tezi, Mainz Johannes Gutenberg Üniversitesi, Kimya Bölümü, Mainz.
- [5] Li, J., Yu, H., Li, Y., Wang, F., Yang, M. ve Wong, S. M., (2011). 'Low aspect-ratio hemispherical nanopit surface texturing for enhancing light absorption in crystalline Si thin film-based solar cells', Applied Physics Letters, 98:021905.
- [6] Hegazy, A., Kinadjian, N., Sadeghimakki, B., Sivoththaman, S., Allam, N.K. ve Prouzet, E., (2016). 'TiO<sub>2</sub> nanoparticles optimized for photoanodes tested in large area Dye-sensitized solar cells (DSSC)', Solar Energy Materials & Solar Cells, 153:108–116.
- [7] Arici, E. ve Karazhanov, S., (2016). 'Carbon nanotubes for organic/inorganic hybrid solar cells', Materials Science in Semiconductor Processing, 41:137–149.
- [8] Spanggaard, 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.

- [9] Becquerel, A. E., (1839). 'Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires', *Comptes Rendus*, 9:561–567.
- [10] Krebs, F.C., (1998). *Stability and Degradation of Organic and Polymer Solar Cells*, Photovoltaic Materials, ISBN 978-1-119-95251-0, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.
- [11] Ikram, M., Ali, S., Murray, R., Hussain, A., Islah-u-din, I. ve Shah, S.I., (2015). 'Influence of fullerene derivative replacement with TiO<sub>2</sub> nanoparticles in organic bulk heterojunction solar cells', *Current Applied Physics*, 15:48-54.
- [12] Schmidt-Mende, L. ve Weickert, J., (2016). *Organic and Hybrid Solar Cells: An Introduction*, ISBN:9783110283181, Walter de Gruyter GmbH & Co KG, Berlin.
- [13] Marcus, T.C.E., (2012). P3HT:PCBM Bilayer Planar Heterojunction Organic Photovoltaic Thin Film Solar Cell Efficiency Optimisation, Yüksek Lisans Tezi, Malezya Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Fakültesi, Johor Bahru.
- [14] Shen, Y.-M., Chen, C.-S., Yang, P.-C., Ma, S.-Y. ve Lin, C.-F., (2012). 'Improvement of surface morphology of thin films and performance by applying electric field on P3HT:PCBM based solar cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99:263-267.
- [15] Displaybank Co., Ltd., (2010), *Next-Generation Organic Solar Cell Technology and Market Forecast*, Gyeonggi.
- [16] Ćelić, N., Pavlica, E., Borovšak, M., Strle, J., Buh, J., Zavašnik, J., Bratina, G., Denk, P., Scharber, M., Sariciftci, N.S. ve Mihailovic, D., (2016). 'Factors determining large observed increases in power conversion efficiency of P3HT:PCBM solar cells embedded with Mo<sub>6</sub>S<sub>9-x</sub>I<sub>x</sub> nanowires', *Synthetic Metals*, 212:105–112.
- [17] Chiguvare, V.H.Z., (2005). *Electrical and Optical Characterisation of Bulk Heterojunction Polymer-Fullerene Solar Cells*, Doktora Tezi, Carl von Ossietzky Oldenburg Üniversitesi, Matematik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Oldenburg.
- [18] Kanwat, A., Milne, W. ve Jang, J., (2015). 'Vertical phase separation of PSS in Organic photovoltaics with a nickel oxide doped PEDOT:PSS inter layer', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132:623–631.
- [19] Chen, C., Kine, A., Nelson, R.D. ve LaRue, J. C., (2015). 'Impedance spectroscopy study of conducting polymer blends of PEDOT:PSS and PVA', *Synthetic Metals*, 206:106–114.

- [20] Morris, J.D. ve Payne, C.K., (2014). 'Tuning PEDOT:PSS conductivity with iron oxidants', *Organic Electronics*, 15:1707–1710.
- [21] Tevi, T., Birch, S.W.S., Thomas, S.W. ve Takshi, A., (2014). 'Effect of Triton X-100 on the double layer capacitance and conductivity of poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) films', *Synthetic Metals*, 191:59–65.
- [22] Chen, Y., Kang, K.S., Han, K.J., Yoo, K.H. ve Kim, J., (2009). 'Enhanced optical and electrical properties of PEDOT: PSS films by the addition of MWCNT-sorbitol', *Synthetic Metals*, 159:1701–1704.
- [23] Friedel, B., Brenner, T.J.K., McNeill, C.R., Steiner, U. ve Greenham, N. C., (2011). 'Influence of solution heating on the properties of PEDOT:PSS colloidal solutions and impact on the device performance of polymer solar cells', *Organic Electronics*, 12:1736–1745.
- [24] Bryant, D., Mabbett, I., Greenwood, P., Watson, T., Wijdekop, M. ve Worsley, D., (2014). 'Ultrafast near-infrared curing of PEDOT:PSS', *Organic Electronics*, 15:1126–1130.
- [25] Hu, Z., Zhang, J., Hao, Z. ve Zhao, Y., (2011). 'Influence of doped PEDOT:PSS on the performance of polymer solar cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95:2763–2767.
- [26] Park, E.-K., Choi, M., Jeun, J.-H., Lim, K.-T., Kim, J.-M. ve Kim, Y.-S., (2013). 'The effect of metal oxide nanoparticle concentrations in PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT:PCBM organic solar cells', *Microelectronic Engineering*, 111:166–169.
- [27] Singh, V., Arora, S., Arora, M., Sharma, V. ve Tandon, R. P., (2014). 'Characterization of doped PEDOT: PSS and its influence on the performance and degradation of organic solar Cells', *Semiconductor Science and Technology*, 29(4):045020.
- [28] Heo, S.W., Baek, K.H., Lee, T.H., Lee, J.Y. ve Moon, D. K., (2013). 'Enhanced performance in inverted polymer solar cells via solution process: Morphology controlling of PEDOT:PSS as anode buffer layer by adding surfactants', *Organic Electronics*, 14:1629–1635.
- [29] Parker, I.D., (1994). 'Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes', *Journal of Applied Physics*, 75(3):1656.

- [30] Scharber, M.C., Mühlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A.J. ve Brabec, C.J. (2006). 'Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells—towards 10% energy-conversion efficiency' *Advanced Materials*, 18(6):789–794.
- [31] Kim, M.S., Han, J.H. ve Lee, C. E., (2015). 'Electron mobility in poly(3-hexylthiophene) enhanced by gamma-ray irradiation', *Current Applied Physics*, 15:25-28.
- [32] Richter, C., Lincot, D. ve Gueymard, C.A., (2013). *Solar Energy*, ISBN 978-1-4614-5805-0, Springer, Berlin.
- [33] Huang, H. ve Huang, J., (2014). *Organic and Hybrid Solar Cells*, ISBN 978-3-319-10854-4, Springer, Cham (ZUG).
- [34] Nalwa, H.S., (1997). *Handbook of Conductive Molecules and Polymers*, ISBN: 978-0-471-96275-5, John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- [35] Marder, S.R. ve Lee, K.-S., (2008). *Photoresponsive Polymers II*, ISBN: 978-3-540-69452-6, Springer, Berlin.
- [36] Tang, C.W., Albrecht, A.C., (1975). 'Photovoltaic effects of metal-chlorophyll a-metal sandwich cells', *Journal of Chemical Physics*, 62(6):2139-49.
- [37] Nunzi, J.M., (2002). 'Organic photovoltaic materials and devices', *C.R. Physique*, 3(4):523–42.
- [38] Sariciftci, N.S., Braun, D., Zhang, C., Srdanov, V.I., Heger, A.J., Stucky, G. ve Wudl, F., (1993). 'Semiconducting Polymer-Buckminsterfullerene Heterojunctions: Diodes, Photodiodes, and Photovoltaic Cells', *Applied Physics Letters*, 62:585.
- [39] Wong, L.-Y., Png, R.-Q., Silva, F.B.S., Chua, L.-L., Repaka, D.V.M., Shi-Chen, Gao, X.Y., Ke, L., Chua, S.-J., Wee, A.T.S. ve Ho, P.K.H., (2010). 'Interplay of Processing, Morphological Order, and Charge-Carrier Mobility in Polythiophene Thin Films Deposited by Different Methods: Comparison of Spin-Cast, Drop-Cast, and Inkjet-Printed Films', *Langmuir*, 26:15494-15507.
- [40] Coropceanu, V., Cornil, J., da Silva Filho, D.A., Olivier, Y., Silbey, R. ve Brédas, J.L., (2007). 'Charge Transport in Organic Semiconductors', *Chemical Reviews*, 107:926-952.
- [41] Tang, C.W., (1986). 'Two-Layer Organic Photovoltaic Cell', *Applied Physics Letters*, 48(2):183-185.

- [42] Yu, G., Gao, J., Hummelen, J.C., Wudl, F. ve Heeger, A.J., (1995). 'Polymer Photovoltaic Cells-Enhanced Efficiencies Via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions', *Science*, 270:1789-1791.
- [43] Petrella, A., Tamborra, M., Curri, M.L., Cosma, P., Striccoli, M., Cozzoli, P.D. ve Agostiano, A., (2005). 'Colloidal TiO<sub>2</sub> Nanocrystals/MEH-PPV Nanocomposites:Photo(electro)chemical Study', *The Journal of Physical Chemistry B*, 109:1554–1562.
- [44] Arango, A.C., Johnson, L.R., Bliznyuk, V.N., Schlesinger, Z., Carter, S.A. ve Hörhold, H.H., (2000), 'Efficient Titanium Oxide/Conjugated Polymer Photovoltaics for Solar Energy Conversion', *Advanced Materials*, 12:1689–1692.
- [45] Kearns, D. ve Calvin, M., (1958). 'Photovoltaic Effect and Photoconductivity in Organic Laminated Systems', *The Journal of Chemical Physics*, 29: 950–951.
- [46] You, J., Dou, L., Yoshimura, K., Kato, T., Ohya, K., Moriarty, T., Emery, K., Chen, C.C., Gao, J., Li, G. ve Yang, Y., (2013). 'A Polymer Tandem Solar Cell With 10.6 % Power Conversion Efficiency', *Nature Communications*, 4:1446.
- [47] Dennler, G., Scharber, M.C. ve Brabec, C.J., (2010). 'Polymer-Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells', *Advanced Materials*, 21:1323–1338.
- [48] Hiramoto, M., Suezaki, M. ve Yokoyama, M., (1990). 'Effect of Thin Gold Interstitial-Layer on The Photovoltaic Properties of Tandem Organic Solar Cell', *Chemistry Letters*, 19(3):327–330.
- [49] Sheats, A.J.R., Antoniadis, H., Hueschen, M., Leonard, W., Miller, J., Moon, R., Roitman, D. ve Stocking, A., (1996). 'Organic electroluminescent devices', *Science*, 273: 884-888.
- [50] Burrows, P.E., Bulovic, V.S., Forrest, R., Sapochak, L.S., McCarty, D.M. ve Thompson, M.E., (1994). 'Reliability and degradation of organic light emitting devices', *Applied Physics Letters*, 65(23):2922 – 2924.
- [51] Scott, J.C., Kaufman, J.H., Brock, P.J., DiPietro, R., Salem, J ve Goitia, J.A., (1996), 'Degradation and failure of MEH-PPV light-emitting diodes', *Journal of Applied Physics*, 79(5):2745 – 2751.
- [52] Grell, M., PHY411 Organic semiconductors and devices. Ders Notları, Sheffield Üniversitesi, Fizik ve Astronomi Bölümü, 7, 1.3.1, 1.3.2, 9, 1.3.3.

- [53] Li, G., Zhu, R. ve Yang, Y. (2012). 'Polymer solar cells', *Nature Photon*, 6:153–161.
- [54] Thompson, B.C. ve Fréchet, J.M.J., (2008), 'Polymer-fullerene composite solar cells', *Angewandte Chemie*, 47(1): 58-77.
- [55] Parlak, E.A., (2012). 'The blend ratio effect on the photovoltaic performance and stability of poly (3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl-C 61 butyric acid methyl ester (PCBM) and poly(3-octylthiophene):PCBM solar cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 100:174-184.
- [56] Ray, B. ve Alam, M.A., (2012). 'Random vs regularized OPV: Limits of performance gain of organic bulk heterojunction solar cells by morphology engineering', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99:204-212.
- [57] Shen, Y., Li, K., Majumdar, N., Campbell, J.C. ve Gupta, M.C., (2011). 'Bulk and contact resistance in P3HT:PCBM heterojunction solar cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (8):2314-2317.
- [58] Dalal, V.L., Mayer, R., Bhattacharya, J. ve Samiee, M., (2012). 'Stability Of Organic Solar Cells', 2012 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), 15-19 Nisan 2012, Kaliforniya.
- [59] Rattan, S., Singhal, P. ve Verma, A.L., (2013). 'Synthesis of PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrene sulfonate))/NGPs (nanographitic platelets) nanocomposites as chemiresistive sensors for detection of nitroaromatics', *Polymer Engineering & Science*, 53:2045–2052.
- [60] Chen, T., Qiu, J., Zhu, K., Li, J., Wang, J., Lib, S. ve Wangde, X., (2014). 'Ultra High Permittivity And Significantly Enhanced Electric Field Induced Strain In PEDOT:PSS–RGO@PU Intelligent Shape-Changing Electro-Active Polymers', *RSC Advances*, 4:64061- 64067.
- [61] Yağci, Ö., Yesilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongül, F., Varal, N. M., Kuş, M., Güneş, S. ve İçelli, O., (2016). 'Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT:PCBM based organic solar cells', *Synthetic Metals*, 212:12–18.
- [62] Song, H., Liu, C., Xu, J., Jiang, Q. ve Shi, H., (2013). 'Fabrication of a layered nanostructure PEDOT:PSS/SWCNTs composite and its thermoelectric performance', *RSC Advances*, 3:22065-22071.
- [63] Fung, D. D. S., Qiao, L. I., Choy, W. C. H., Wang, C., Sha, W. E. I., Xie, F. ve He, S., (2011). 'Optical and electrical properties of efficiency enhanced polymer solar cells with Au nanoparticles in a PEDOT–PSS layer', *Journal of Materials Chemistry*, 21:16349-16356.

- [64] Pettersson, L.A.A. ve Ghosh, S., Inganäs, O., (2002). 'Optical anisotropy in thin films of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(4-styrenesulfonate)', *Organic Electronics*, 3(3– 4):143–148.
- [65] Mendezab, J. D. ve Weder, C., (2010). 'Synthesis, electrical properties, and nanocomposites of poly(3,4- ethylenedioxythiophene) nanorods', *Polymer Chemistry*, 1:1237-1244.
- [66] Wanninayake, A. P., Li, S., Church, B. C. ve Abu-Zahra, N., (2015). 'Electrical and optical properties of hybrid polymer solar cells incorporating Au and CuO nanoparticles', *Materials Science*, 3(1):35-50.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Özlem YAĞCI  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20.10.1985/Kars  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : oyagci@yildiz.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan          | Okul/Üniversite         | Mezuniyet Yılı |
|-----------|---------------|-------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Fizik         | Marmara Üniversitesi    | 2011           |
| Lisans    | Fizik         | Kocaeli Üniversitesi    | 2008           |
| Lise      | Fen-Matematik | Ümraniye Mevlana Lisesi | 2002           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl  | Firma/Kurum                                          | Görevi |
|------|------------------------------------------------------|--------|
| 2014 | YTÜ Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi | Uzman  |

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongül, F., Varal, N. M., Kuş, M., Güneş, S., İçelli, O. 2016, 'Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT:PCBM based organic solar cells', *Synthetic Metals*, 212, 12–18.
2. Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., İçelli, O. 2016, 'Investigating the Performance of P3HT:PCBM Organic Solar Cells Involving Gamma Irradiated PEDOT:PSS Layer', *Radiation Physics and Chemistry* (Under review)
3. Kavanoz, H.B., Yağci, Ö., Yalçın, Z., İçelli, O., Altındal, A., Okutan, M. ve Mann, K.S., (2014). 'Photon parameters for  $\gamma$ -rays sensing properties of some thick oxide films', *Vacuum*, 101:238-245.

### **Bildiri**

1. Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., İçelli, O. 2014, 'Use of boron mineral wastes in the photovoltaic applications', *TFD31*, Bodrum.
2. Yağci, Ö., Yeşilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongül, F., Bozar, S.T., Fotovoltaik, S., İçelli, O. 2015, 'In the room conditions improved efficiency of organic solar cells using of boron compounds', *OEMT2015*, Elazığ.
3. Yağci, Ö., İçelli, O. 2015, 'Effect of gamma ray on performance of boric acid containing P3HT:PCBM based photovoltaic cells', *AFMAT2015*, Antalya.
4. Yağci, Ö., İçelli, O. 2016, 'The effects of radiation of P3HT:PCBM based organic solar Cells by using boric acid ( $H_3BO_3$ ) as dopant into PEDOT:PSS under gamma irradiation', *IPCAP2016*, Erzurum.

### **Proje**

1. 'Bor Mineral Atıklarının Fotovoltaik Uygulamalarda Kullanılması', (Tübitak-15/03/2014/15/03/2016).
2. 'Farklı Metal Grupları İçeren Ftalosiyeninlerin Foto-Voltaik Uygulamalarda Kullanılması', (YTÜ BAPK-14/06/2013/14/06/2016).