



**GÜMÜŞ, ALTIN ve GÜMÜŞ-ALTIN  
ALAŞIMLI NANOPARÇACIKLARIN  
ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN  
PERFORMANSINA ETKİLERİ**

**Hatice KAÇUŞ**

**Doktora Tezi  
Fizik Anabilim Dalı  
Katıhal Fiziği Bilim Dalı  
Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN  
2018  
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**GÜMÜŞ, ALTIN ve GÜMÜŞ-ALTIN ALAŞIMLI  
NANOPARÇACIKLARIN ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN  
PERFORMANSINA ETKİLERİ**

**Hatice KAÇUŞ**

**FİZİK ANABİLİM DALI  
Katıhal Fiziği Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2018**

**Her Hakkı Saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

**GÜMÜŞ, ALTIN ve GÜMÜŞ-ALTIN ALAŞIMLI NANOPARÇACIKLARIN ORGANİK  
GÜNEŞ PİLLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİ**

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında, Hatice KAÇUŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 28/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu** (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Emin BACAŞIZ

İmza :

Üye : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Emre GÜR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Betül GÜZELDİR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **10.01./2019** tarih ve **..02.../...38....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi 212T012 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir.

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

## ÖZET

Doktora Tezi

### GÜMÜŞ, ALTIN ve GÜMÜŞ-ALTIN ALAŞIMLI NANOPARÇACIKLARIN ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİ

Hatice KAÇUŞ

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

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Bu tez çalışmasında, P3HT:PCBM aktif tabakasına altın, gümüş ve bunların alaşımı olan altın -gümüş nanoparçacıkları katkılanarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimini nasıl etkilediği araştırıldı. Öncelikle, ITO yüzeyi kimyasal temizlik prosesinden geçirildikten sonra döndürme ile film kaplama yöntemiyle hol taşıyıcı tabakası olarak kullanılan PEDOT:PSS ile kaplandı. Daha sonra farklı çözücüler (kloroform, klorobenzen) kullanılarak P3HT:PCBM aktif tabakası hazırlandı. Kloroform organik çözücüsü kullanılarak hazırlanan 1:0,8 oranındaki P3HT:PCBM ve klorobenzen kullanılarak hazırlanan 1:1 oranındaki P3HT:PCBM katmanı eldivenli kabin içerisinde PEDOT:PSS kaplı olan ITO'lar üzerine kaplandı. Kloroform ve klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakaların ve nanoparçacık katkılı aktif tabakaların optik soğurma, AFM, SEM ve XRD ölçümleri alındı. Hem iki çözücü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaların hem de nanoparçacık katkılı ince filmlerin yasak enerji band aralıkları hesaplandı. Farklı çözücüler kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM yüzeyine termal buharlaştırma ünitesi yardımıyla 1 nm kalınlığında elektron taşıyıcı tabaka olarak kullanılan LiF kaplandı. Ardından da bu film üzerine 100 nm kalınlığında Al metali kaplanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al referans organik güneş pili yapısı elde edildi ve farklı çözücülerin organik güneş pillerinin karakteristik parametrelerine etkisi incelendi. Elde edilen referans aygıt tasarımlarında kloroform çözücüsüyle elde edilen verim %1,56 iken klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan yapıda verim %2,11 olarak hesaplandı. Organik güneş pillerinde optik yol uzunluğunu arttırarak yeni elektron-hol çiftlerinin oluşumunu sağlamak için aktif tabakaya farklı oranlarda altın, gümüş, altın-gümüş alaşımından oluşan nanoparçacıkları katkılı ve böylece P3HT:PCBM: Au NP, P3HT:PCBM: Ag NP, P3HT:PCBM: (Au:Ag) NP aktif tabakaları elde edildi. Nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinde güç dönüşüm veriminin katkı oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakaya %1 oranında altın nanoparçacığıyla katkılanmasıyla elde edilen en yüksek güç dönüşüm verimi %3,35 iken aynı çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakaya %0,5 oranında gümüş nanoparçacığıyla katkılanmasıyla elde edilen en yüksek güç dönüşüm verimi %3,50 olarak elde edildi. Aynı şekilde klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakaya %1,5 altın nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen en yüksek güç dönüşüm verimi %3,11 iken aynı çözücüyle hazırlanan aktif tabakaya %0,5 gümüş nanoparçacığıyla katkılanmasıyla elde edilen en yüksek güç dönüşüm verimi %3,20 olarak elde edildi. Benzer şekilde iki çözücüyle hazırlanan, altın-gümüş alaşımlarından oluşan nanoparçacıkların aktif tabakalarına %1,2 Au: %0,3 Ag oranlarında katkılanmasıyla elde edilen en yüksek güç dönüşüm verimi sırasıyla %2,77 ve %3,29 olarak hesaplandı. Sonuç olarak her iki çözücü için yüksek katkı oranlarında güç dönüşüm veriminin daha düşük katkı oranına göre azaldığı gözlemlendi.

2018, 131 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Organik Güneş Pili, P3HT:PCBM, Heteroeklem, LiF, Au, Ag

## ABSTRACT

Ph.D. Thesis

### THE EFFECTS OF SILVER, GOLD AND ALLOYED SILVER-GOLD NANOPARTICLES ON THE PERFORMANCE OF ORGANIC SOLAR CELLS

Hatice KAÇUŞ

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

Supervisor: Prof. Şakir AYDOĞAN

In this Ph.D. thesis, It was investigated how do silver, gold, alloyed silver-gold which are doped in P3HT:PCBM active layer affect the power conversion efficiency of organic solar cells . Firstly, PEDOT: PSS as a hole transport layer was coated on ITO surface by using the rotating film coating method after the surface was subjected to the chemical cleaning process. Then, P3HT:PCBM active layer was prepared using different solvents (chloroform, chlorobenzene). The P3HT:PCBM active layers were prepared in 1:0,8 ratio, using chloroform and in 1:1 ratio, using chlorobenzene organic solvent were coated on the PEDOT:PSS coated ITO layer, in the glove box. Optical absorption, AFM, SEM and XRD measurements of active layers prepared using chloroform and chlorobenzene solvent and of active layers doped nanoparticles were obtained. Both optical band gap of the active layers prepared by using both solvents and of the thin films doped nanoparticles were calculated. The surface of P3HT:PCBM film prepared by different solvents was coated with LiF with 1 nm thickness, as an electron transport layer by using thermal evaporation. Then, this film surface was coated with Al metal which has 100 nm thickness and it was obtained ITO/PEDOT: PSS/ P3HT:PCBM/LiF/Al reference organic solar cell structure and was investigated effect of different solvents on the characteristic parameters of organic solar cells The power conversion efficiency of reference device prepared with chloroform solvent was calculated 1.56%, while it was calculated as 2.11% for prepared with chlorobenzene solvent. Gold, silver, alloyed gold-silver nanoparticles were doped in the active layer at different proportions by increasing the optical path length in organic solar cells in order to form new electron-hol pairs and thus P3HT:PCBM: Au NPs, P3HT:PCBM: Ag NPs, P3HT:PCBM:(Au:Ag) NPs active layers were obtained. It was observed that the power conversion efficiency in organic solar cells changed with doped nanoparticles depending on the doping ratios. The highest power conversion efficiency was obtained as 3,35 % for the active layer doped with 1 % gold nanoparticles, prepared using chloroform solvent. And the highest power conversion efficiency was obtained as 3,50 % for doped with 0,5 % silver nanoparticles prepared by the same solvent. In the same way, the highest power conversion efficiency was obtained as 3,11 % for doped with 1,5 % gold nanoparticles, the active layer prepared by chlorobenzene solvent. However, the highest power conversion efficiency was obtained as 3,20 % for doped with 0,5 % silver nanoparticles, prepared by the same solvent. As a result, for both solvents it was observed that the power conversion efficiency decreased at the high doping ratios with respect to the lower doping ratios.

**2018, 131 pages**

**Keywords:** Organic Solar Cell, P3HT:PCBM, Heterojunction, LiF, Au, Ag

## TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma, Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım boyunca desteğini gördüğüm, bilgilerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a teşekkürlerimi arz ederim.

Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanoaygıt Üretim ve Karakterizasyonu Laboratuvarında çalışma imkânı sağlayan Ardahan Üniversitesi Rektörümüz Sayın Prof. Dr. Mehmet BİBER'e teşekkürlerimi arz ederim.

Laboratuvar çalışmalarım süresince kıymetli vakitlerini harcayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali BALTAKESMEZ'e teşekkürlerimi arz ederim.

Nanoparçacık malzemelerin morfolojik özelliklerinin incelenmesinde katkısı olan Sayın Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkürlerimi arz ederim.

Nanoparçacık malzemelerin sentezinde katkısı olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melike SEVİM'e çok teşekkür ederim. Çalışma ekibimizde olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zakir ÇALDIRAN'a, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıza DENİZ'e, Sayın Öğr. Gör.Yılmaz ŞAHİN'e, Sayın Öğr.Gör. L . Bilal TAŞYÜREK'e ve İlknur GÜMÜŞ'e teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince sabır ile beni destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

**Hatice KAÇUŞ**

**Aralık, 2018**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                      |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| ÖZET.....                                                                            | i        |
| ABSTRACT.....                                                                        | ii       |
| TEŞEKKÜR.....                                                                        | iii      |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                 | vii      |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                 | ix       |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                              | xiv      |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                                 | <b>1</b> |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>                                                     | <b>7</b> |
| 2.1. Güneş pillerinin Tarihsel Gelişim Süreci ve Literatürde Yapılan Çalışmalar..... | 7        |
| 2.2. Yarıiletkenlerin Safsızlık Atomlarıyla Katkılanması .....                       | 17       |
| 2.3. Denge Durumunda $p$ - $n$ Eklem Oluşumu .....                                   | 19       |
| 2.4. Fotoelektrik Etkinin Oluşumu .....                                              | 21       |
| 2.5. Güneş Pilleri .....                                                             | 22       |
| 2.6. Güneş Pillerinde Elektrik Akım Oluşumu.....                                     | 22       |
| 2.7. Güneş Pili Teknolojisinin Çeşitleri .....                                       | 24       |
| 2.7.1. Tek katmanlı inorganik güneş pilleri teknolojisi.....                         | 24       |
| 2.7.2. İki katmanlı inorganik güneş pilleri teknolojisi .....                        | 24       |
| 2.7.3. Tek kristal silisyum güneş pilleri teknolojisi .....                          | 24       |
| 2.7.4. Çok kristal silisyum güneş pilleri teknolojisi .....                          | 25       |
| 2.7.5. İnce film güneş pilleri teknolojisi.....                                      | 25       |
| 2.7.6. Amorf silisyum güneş pilleri teknolojisi .....                                | 26       |
| 2.7.7. Çok kristalli ince film güneş pilleri teknolojisi .....                       | 26       |
| 2.7.8. İnce film kalgonit güneş pilleri teknolojisi.....                             | 26       |
| 2.7.9. Kadmiyum tellür güneş pilleri (CdTe) teknolojisi .....                        | 27       |
| 2.7.10. Bakır indiyum diselenit güneş pilleri teknolojisi .....                      | 27       |
| 2.7.11. Bakır indiyum galyum diselenit güneş pilleri (CIGS) teknolojisi.....         | 27       |
| 2.7.12. Çok eklemli güneş pilleri teknolojisi.....                                   | 28       |
| 2.7.13. Nanofotovoltaik güneş pilleri (NanoPV) teknolojisi.....                      | 28       |
| 2.7.14. Kuantum noktalı güneş pilleri teknolojisi .....                              | 29       |

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.7.15. Boya duyarlı güneş pilleri teknolojisi .....                                  | 29        |
| 2.7.16. Organik güneş pilleri teknolojisi .....                                       | 29        |
| 2.7.16.a. Organik güneş pillerinin çalışma prensibi .....                             | 32        |
| 2.8. Güneş Pillerinde Enerji Kayıpları .....                                          | 33        |
| 2.8.1. İdeal güneş pillerinde enerji kayıpları .....                                  | 34        |
| 2.8.2. Gerçek güneş pillerinde enerji kayıpları .....                                 | 35        |
| 2.9. Heteroeklemler .....                                                             | 37        |
| 2.10. Güneş Pillerinin Karakteristiği .....                                           | 38        |
| 2.10.1. Güç dönüşüm verimi .....                                                      | 39        |
| 2.10.2. Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) .....                                           | 39        |
| 2.10.3. Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ).....                                         | 40        |
| 2.10.4. Dolum faktörü (FF) .....                                                      | 40        |
| 2.10.5. Maksimum güç noktası (MPP).....                                               | 41        |
| 2.11. Bir Güneş Pili'nin Eşdeğer Devresi.....                                         | 41        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                                                     | <b>43</b> |
| 3.1. Giriş .....                                                                      | 43        |
| 3.2. Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Cihazlar .....                    | 44        |
| 3.2.1. Temiz oda (Clean room).....                                                    | 44        |
| 3.2.2. Atmosferik kontrollü, sızdırmaz, oksijensiz kabinler (eldivenli kabinler)..... | 44        |
| 3.2.3. Çeker ocak.....                                                                | 45        |
| 3.2.4. Döndürme ile film kaplama cihazı .....                                         | 45        |
| 3.2.5. Termal buharlaştırma ünitesi.....                                              | 46        |
| 3.2.6. Yapay güneş ışığı cihazı (Solar simülatör).....                                | 46        |
| 3.2.7. $I$ - $V$ (akım voltaj) karakterizasyon sistemi .....                          | 46        |
| 3.2.8. Isıtıcı tabla (Hot plate).....                                                 | 47        |
| 3.3. Organik Güneş Pili Üretiminde Kullanılan Materyaller .....                       | 47        |
| 3.3.1. ITO (İndiyum kalay oksit).....                                                 | 47        |
| 3.3.2. PEDOT:PSS .....                                                                | 48        |
| 3.3.3. P3HT:PCBM .....                                                                | 49        |
| 3.3.4. Altının (Au) kimyasal yapısı .....                                             | 51        |
| 3.3.5. Altın (Au) nanoparçacıkların sentezi .....                                     | 51        |
| 3.3.6. Gümüşün (Ag) kimyasal yapısı .....                                             | 53        |

|                                                                                                                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.7. Gümüş (Ag) nanoparçacıkların sentezi .....                                                                                                                                      | 54         |
| 3.4. Organik Güneş Pillerinin Hazırlanışı ve Karakterizasyon Aşamaları.....                                                                                                            | 56         |
| 3.4.1. ITO'nun kimyasal temizlik aşamaları .....                                                                                                                                       | 57         |
| 3.4.2. Hol taşıyıcı tabaka olarak kullanılan PEDOT:PSS'in hazırlanması .....                                                                                                           | 57         |
| 3.4.3. P3HT:PCBM aktif tabaka malzemelerinin hazırlanması .....                                                                                                                        | 57         |
| 3.4.4. Altın, gümüş ve altın- gümüş nanoparçacık katkılı organik güneş<br>pillerinin hazırlanış aşamaları .....                                                                        | 58         |
| 3.5. Organik Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyonu .....                                                                                                                       | 60         |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>                                                                                                                                                    | <b>62</b>  |
| 4.1. Giriş .....                                                                                                                                                                       | 62         |
| 4.2. İki Farklı Çözücü Kullanılarak ile Hazırlanan Nanoparçacık Katkılı<br>Organik Güneş Pillerinin Optik, Morfolojik ve Yapısal Karakterizasyonu .....                                | 62         |
| 4.2.1. Soğurma ölçümleri .....                                                                                                                                                         | 63         |
| 4.2.2. AFM görüntüleri.....                                                                                                                                                            | 82         |
| 4.2.3. SEM görüntüleri .....                                                                                                                                                           | 89         |
| 4.2.4. XRD ölçümleri .....                                                                                                                                                             | 93         |
| 4.3. Kloroform ve Klorobenzenle hazırlanan P3HT:PCBM Tabanlı Organik<br>Güneş Pillerinin J-V (Akım Yoğunluğu-Voltaj) Ölçümleri .....                                                   | 97         |
| <b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....</b>                                                                                                                                                      | <b>119</b> |
| 5.1. İki Farklı Çözücü Kullanılarak Elde Edilen P3HT:PCBM, P3HT:<br>PCBM:Ag, P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Ag:Au filmlerinin Optik,<br>Morfolojik ve Yapısal Karakterizasyon Sonuçları..... | 121        |
| 5.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları .....                                                                                                                                       | 125        |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                                                                        | 128        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                                                                         | 133        |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

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

|                 |                                                         |
|-----------------|---------------------------------------------------------|
| mm              | milimetre                                               |
| MW              | Megawatt                                                |
| mW              | Miliwatt                                                |
| nm              | Nanometre                                               |
| NPs             | Nanoparçacık                                            |
| NREL            | Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı                |
| NRs             | Nanorod                                                 |
| OPV             | Organik Fotovoltaik                                     |
| P3HT            | Poly 3-hexylthiophene                                   |
| PCBM            | 6,6-phenyl C <sub>61</sub> butyric acid methyl ester    |
| PEDOT:PSS       | Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) |
| PV              | Fotovoltaik                                             |
| QDPV            | Kuantum Dot Fotovoltaikler                              |
| REN             | Yenilenebilir Küresel Durum Raporu                      |
| R <sub>S</sub>  | Seri Direnç                                             |
| R <sub>SH</sub> | Paralel Direnç                                          |
| SEM             | Taramalı Elektron Mikroskobu                            |
| Si              | Silisyum                                                |
| V.B.            | Valans Bandı (Değerlik Bandı)                           |
| V <sub>OC</sub> | Açık Devre Voltajı                                      |
| XRD             | X-Işını Kırınımı                                        |
| $\lambda$       | Dalga Boyu                                              |
| $\Phi$          | İş Fonksiyonu                                           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Güneş ışığının Türkiye’deki dağılımı.....                                                                | 2  |
| Şekil 2.1. Organik güneş pillerinin tarihsel gelişim diyagramı .....                                                | 9  |
| Şekil 2.2. Web of Science’da organik güneş pilleri üzerinde yapılan yayın<br>sayılarının yıllara göre dağılımı..... | 17 |
| Şekil 2.3. Antimon ve bor katkılanmış silisyum örgüsünün gösterimi.....                                             | 19 |
| Şekil 2.4. Bir $p-n$ eklemının uzay yükü bölgesi ve enerji-band diyagramı.....                                      | 20 |
| Şekil 2.5. Fotoelektrik etkinin şematik gösterimi .....                                                             | 21 |
| Şekil 2.6. Bir güneş pilinin çalışma prensibi .....                                                                 | 23 |
| Şekil 2.7. P3HT:PCBM aktif tabakalı klasik organik güneş pilinin şematik<br>gösterimi .....                         | 31 |
| Şekil 2.8. Işğın soğurulması ve yük taşıyıcı transferleri .....                                                     | 33 |
| Şekil 2.9. Güneş ışğının ve enerji kayıplarının şematik olarak spektral<br>dağılımının gösterimi.....               | 35 |
| Şekil 2.10. a) $p$ ve $n$ tipi iki farklı yarıiletkenin ve b) $p-n$ heteroeklemin enerji<br>band diyagramları.....  | 38 |
| Şekil 2.11. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık lineer $I-V$ karakteristiğİ .....                                | 39 |
| Şekil 2.12. Bir güneş pilinin eşdeğer devresi.....                                                                  | 42 |
| Şekil 3.1. Laboratuvar’da bulunan atmosferik kontrollü, sızdırmaz, oksijensiz<br>eldivenli kabinin fotoğrafı .....  | 45 |
| Şekil 3.2. Organik güneş pillerinde kullanılan ITO’ların kesilmiş görüntüsü .....                                   | 48 |
| Şekil 3.3. PEDOT (altta) ve PSS’nin (üstte) kimyasal yapısı.....                                                    | 49 |
| Şekil 3.4. P3HT ve PCBM’nin kimyasal yapısı .....                                                                   | 50 |
| Şekil 3.5. Altın nanoparçacıklarının sentezindeki reaksiyon aşamaları .....                                         | 52 |
| Şekil 3.6. Altın (Au) nanoparçacıkların (a) TEM ve (b) SEM görüntüsü .....                                          | 52 |
| Şekil 3.7. Altın (Au) nanoparçacıkların XRD ölçümü .....                                                            | 53 |
| Şekil 3.8. Tek dağılımlı gümüş (Ag) nanoparçacıkların sentezi.....                                                  | 54 |
| Şekil 3.9. Gümüş (Ag) nanoparçacıkların (a) TEM ve (b) SEM görüntüsü .....                                          | 55 |
| Şekil 3.10. Gümüş (Ag) nanoparçacıkların XRD ölçümü .....                                                           | 56 |

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.11.</b> ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin görüntüsü.....                                                                                                                                                      | 60 |
| <b>Şekil 3.12.</b> Güneş pili <i>I-V</i> (akım-voltaj) karakterizasyon sisteminin şematik gösterimi.....                                                                                                                                    | 61 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in soğurma grafiği .....                                                                                                                                                     | 64 |
| <b>Şekil 4.2.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği.....                                                                             | 65 |
| <b>Şekil 4.3.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in soğurma grafiği .....                                                                                                                                                       | 66 |
| <b>Şekil 4.4.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği.....                                                                               | 67 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Kloroform ve Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in soğurma grafiği.....                                                                                                                                         | 68 |
| <b>Şekil 4.6.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafiği.....                                                                        | 69 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafikleri..... | 70 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri.....                                                                     | 71 |
| <b>Şekil 4.9.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri.....              | 72 |
| <b>Şekil 4.10.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri .....                                                                     | 73 |
| <b>Şekil 4.11.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri.....                 | 74 |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.12.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri .....                                                                                     | 75 |
| <b>Şekil 4.13.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri .....                                | 76 |
| <b>Şekil 4.14.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın ve gümüş nanoparçacıkların birlikte katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri .....                                                            | 77 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) ve gümüş (Ag) nanoparçacıkların birlikte katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri ..... | 78 |
| <b>Şekil 4.16.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın ve gümüş nanoparçacıklarının birlikte katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri .....                                                            | 79 |
| <b>Şekil 4.17.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) ve gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri .....                 | 80 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkların soğurma grafikleri .....                                                                                                                                                                   | 81 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Gümüş (Ag) nanoparçacıkların AFM görüntüsü .....                                                                                                                                                                                         | 83 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Altın (Au) nanoparçacıkların AFM görüntüsü .....                                                                                                                                                                                         | 83 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasının AFM görüntüsü .....                                                                                                                                             | 84 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan gümüş nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü .....                                                                                     | 85 |
| <b>Şekil 4.23.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklarının oluşturduğu P3HT:PCBM:Au filminin AFM görüntüsü .....                                                                                   | 85 |

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.24.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın ve gümüş nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü ..... | 86  |
| <b>Şekil 4.25.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasının AFM görüntüsü .....                                                                    | 87  |
| <b>Şekil 4.26.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan gümüş nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü .....            | 88  |
| <b>Şekil 4.27.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklarının oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü .....          | 88  |
| <b>Şekil 4.28.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü .....            | 89  |
| <b>Şekil 4.29.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM .....                                                                                                            | 90  |
| <b>Şekil 4.30.</b> P3HT:PCBM (a) P3HT:PCBM:Ag:Ag'nın (d) SEM görüntüsü .....                                                                                                     | 91  |
| <b>Şekil 4.31.</b> P3HT:PCBM (a) P3HT:PCBM:Ag'ün (b) P3HT:PCBM:Ag'nın (c) SEM görüntüsü .....                                                                                    | 92  |
| <b>Şekil 4.32.</b> P3HT:PCBM (a) P3HT:PCBM:Ag:Ag'nın (b) SEM görüntüsü .....                                                                                                     | 93  |
| <b>Şekil 4.33.</b> Klorobenzen ve kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in XRD ölçümü .....                                                                                 | 95  |
| <b>Şekil 4.34.</b> Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'e altın, gümüş, altın-gümüş nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen filmlerin XRD ölçümü .....           | 96  |
| <b>Şekil 4.35.</b> Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'ye altın, gümüş, altın-gümüş nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen filmlerin XRD ölçümü .....            | 97  |
| <b>Şekil 4.36.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin karanlıktaki ve ışık altındaki J-V karakteristikleri .....  | 100 |

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.37.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan<br>ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin<br>karanlıktaki ve ışık altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri .....                          | 101 |
| <b>Şekil 4.38.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan (farklı oranlarda<br>Au NP katkılı) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au NP/LiF/Al<br>organik güneş pilinin ışık altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri ..... | 103 |
| <b>Şekil 4.39.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan<br>ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin ışık<br>altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri .....                                     | 106 |
| <b>Şekil 4.40.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan<br>ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin<br>ışık altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri .....                                  | 109 |
| <b>Şekil 4.41.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan<br>ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au/LiF/Al organik güneş pilinin ışık<br>altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri .....                                       | 112 |
| <b>Şekil 4.42.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan<br>ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin ışık<br>altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri .....                                       | 114 |
| <b>Şekil 4.43.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan<br>ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin<br>ışık altındaki <i>J-V</i> karakteristikleri .....                                  | 116 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 4.1.</b> Klorobenzen (KB) ve kloroform (KF) gibi farklı çözücüler kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri..... | 102 |
| <b>Çizelge 4.2.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO/ PEDOT: PSS / P3HT:PCBM:Au/ LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri.....                             | 105 |
| <b>Çizelge 4.3.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT: PSS/ P3HT:PCBM:Ag/ LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri.....                               | 108 |
| <b>Çizelge 4.4.</b> Klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO / PEDOT: PSS / P3HT:PCBM:Au:Ag/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri.....                          | 111 |
| <b>Çizelge 4.5.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM:Au/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri.....                                | 113 |
| <b>Çizelge 4.6.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri.....                                | 115 |
| <b>Çizelge 4.7.</b> Kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/ P3HT:PCBM:Au:Ag/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri.....                                | 118 |

## 1. GİRİŞ

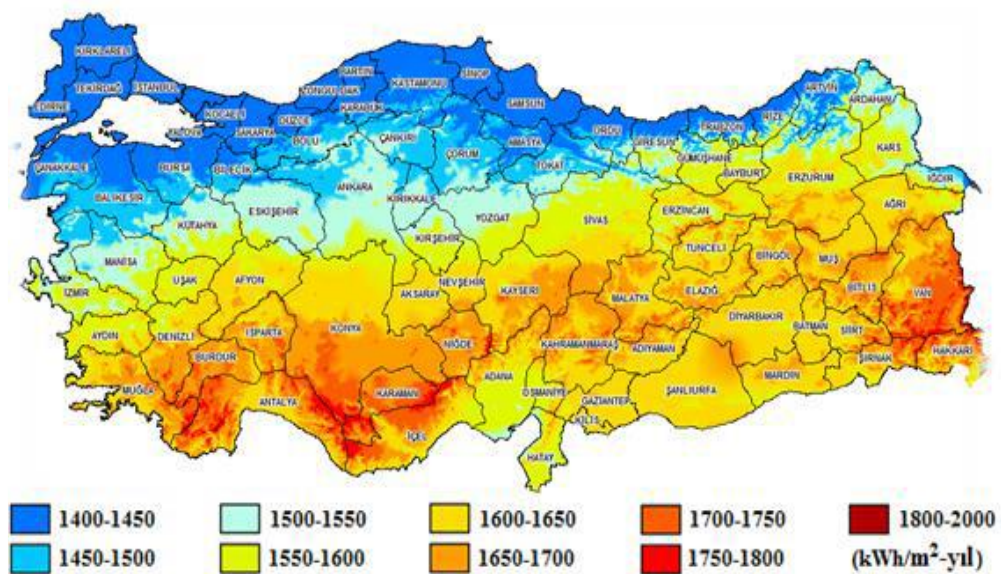
İnsanlar tarafından tüketilen enerjinin büyük bir kısmı, kirlilik gibi çevre sorunlarına neden olan fosil yakıtlarından kaynaklanmaktadır. Bu tüketim çoğunlukla insan nüfusundaki artıştan veya gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmesinden ötürü artmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları sınırlıdır ve yakın gelecekte yeterli olmayacaktır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı geliştirilmelidir. Güneş enerjisi, en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi kullanımının önemi her geçen yıl biraz daha artmaktadır. Yirminci yüzyılın sonlarına gelindiğinde dünya nüfusu 6 kat artarken ihtiyaç duyulan enerji talebi 24 kat artmıştır. Yeryüzünde yaşayan insanların şu anki yaşam tarzlarını sürdürebilmesi için gerekli olan enerji miktarı, yaklaşık olarak 16 TW (terawatt) civarındadır. Yapılan araştırmalara göre 2050 yılına gelindiğinde, insanoğlunun enerji talebi günümüze nazaran 10 TW daha fazla olacaktır. Bu ise şu anlama gelmektedir; küresel ısınma dikkate alınmaksızın enerji elde etmek için 2050 yılına kadar her gün 1 gigawatt(GW)'lık nükleer enerji santrali kurulması gerekecektir. Yeryüzü üzerindeki rüzgâr enerjisinin toplam potansiyeli 2-4 TW, hidroelektrik enerjisinin 0,5 TW, jeotermal enerjisinin 12 TW, gelgit ve okyanus akıntılarından üretililecek enerji miktarı 2 TW ve dünya üzerinde kullanılabilecek güneş enerjisi miktarı ise 120.000 TW dır (Doğan 2013). Bu bulgular, güneş enerjisi kullanımının önemini somut bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çapı yaklaşık 1.4 milyon kilometre olan güneş insanoğlunun tükenmez yaşam kaynağı olarak düşünülmüştür. İç kısmı yoğun gazlarla kaplı olan güneş bize 151.106 milyon km uzaklıktadır. Güneş yeryüzündeki tüm yakıtların temeli olup içerisinde sürekli hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon tepkimeler gerçekleşmektedir. Bu tepkimeler esnasında oluşan kütle farkı, ısı enerjisine dönüşerek uzay boşluğuna yayılmaktadır. Güneşin iç kısmı bu tepkimelerin gerçekleşmesi için uygun bir yerdir. Bu tepkimeler esnasında yaklaşık olarak 657 milyon ton hidrojenin 653 ton helyuma dönüşmektedir. Bu tepkimeler sonucunda meydana gelen kütle kayıpları enerjiye dönüşmektedir. Uzun süren araştırmalar sonucunda bilim adamları yaklaşık 11 milyar yıl sonra Güneşteki hidrojenin

biteceğini içindeki tepkimelerin son bulacağını ve çekim kuvvetlerinin etkisiyle büzülüp ölü yıldız olan beyaz cüce adı verilen bir yıldıza dönüşeceği beklenmektedir. Güneş içerisinde meydana gelen tepkimeler sonucunda açığa çıkan enerjinin 1.395 kW'ı yeryüzüne ulaşmaktadır. Yeryüzü üzerine düşen ışıının bu kadar az olmasının temel sebepleri katedilen yolun uzun olması ve atmosferde bulunan karbondioksit, su buharı ve ozon gibi gazların gelen ışıınımları soğurmasıdır.

Güneşin yenilenebilir enerji kaynağı olması, onu diğer alternatif enerjilere göre bir adım öne çıkarmaktadır. Yıllar içerisinde Güneş ışıınlarından yararlanmak için pek çok teknoloji geliştirilmiştir. Bu teknolojilerin bir kısmı güneş enerjisini ışık ya da ısı enerjisi şeklinde direkt olarak kullanırken, diğer teknolojiler güneş enerjisinden elektrik elde etmek şeklinde kullanılmaktadır.

Ülkemizde Güneş ışığından yararlanan fazlaca şehirlerin bulunması bize büyük bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 1.1'de ülkemizin şehirlere göre güneş ışığından yararlanma durumu incelendiğinde yüz ölçümünün yarıdan fazlasının yıllık yaklaşık 1600 kW/m<sup>2</sup>'lik güneş ışığına maruz kaldığı görülmektedir.



Şekil 1.1. Güneş ışıının Türkiye'deki dağılımı

Güneş enerjisinin diğer enerji çeşitlerine göre çok sayıda avantajları vardır:

- Güneş bol ve tükenmeyen tek enerji kaynağıdır.
- En temiz enerji çeşididir; çevreyi kirletici, duman, gaz, karbon monoksit, kükürt ve radyasyon gibi artıkları yoktur.
- Yerel uygulamalar için elverişli olduğu için ihtiyaç duyulan, her yerde güneş enerjisinden yararlanmak mümkündür.
- Herhangi bir dış etkiye bağlı olmadığından, ortaya çıkabilecek ekonomik krizlerden bağımsızdır.
- Uygulamaları için herhangi bir teknolojiye gerek duymamaktadır.
- Ulaşım problemi yoktur, güneşin olduğu her yerde bu enerjiden faydalanılabilir.
- İşletme/Bakım masrafları çok azdır.

Fotovoltaik (PV), güneş enerjisini elektrik akımına dönüştürme teknolojisidir. Silikon gibi bazı materyaller güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çevirmek gibi bir özelliğe sahiptir. Buna fotovoltaik etki denir. Fotovoltaik güneş hücreleri, üzerine güneş ışığı düştüğünde güneş enerjisini doğrudan DC elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerden oluşan sistemlerdir. İnorganik yarıiletken tabanlı fotovoltaikler en çok kullanılan güneş pili aygıtlarıdır (Wang *et al.* 2011). Örneğin, silisyuma dayalı güneş pilleri yaklaşık %25'lik güç dönüştürme verimliliğine sahiptirler (Zhou *et al.* 2010). Fakat, bu inorganik güneş pillerinin üretimi için yüksek sıcaklık, yüksek vakum ve sayısız litografik adımlar gereklidir ve tüm bunlar üretim maliyetini arttırmaktadır (Zhou *et al.* 2010). Bu durumlar etkin, uygun fiyatlı fotovoltaik aygıtların geliştirme arayışını ve Si yerine farklı materyallerin kullanılması gereğinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu nedenle, Si yerine daha uygun bir alternatif olarak polimer esaslı organik fotovoltaikler çok ilgi çekmiş ve yoğun araştırma konusu haline gelmiştir (Bi and LaPierre 2009). Organik, polimer esaslı fotovoltaik aygıtlar düşük üretim maliyeti, oda sıcaklığında çalışma ve mekanik esneklik imkanı sağlamaktadır (Zhou *et al.* 2010; Wang *et al.* 2011). Bu avantajlarından dolayı cihazlara kolay entegre olabilmek özelliklerine sahiptirler. Ayrıca, ekonomik ve çevre dostu olması teknolojik çalışmalara

gelecek vadetmesini sağlamıştır. Araştırmacılar, güneş pilinin kalitesini verime dayandırmaktadırlar. Son yıllarda organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi %7.4'e yükselmiştir (Wang *et al.* 2011). Şayet organik güneş pillerinin optik uyarılmasından yük toplanmasına kadar olan süreçteki kayıp mekanizmaları tespit edilip ve müdahale edilirse yakın gelecekte verimin %10'a ulaşması sağlanabilir. Fakat, polimer esaslı organik güneş pillerinde ışıkla üretilen taşıyıcıların düşük kapasiteli olması ve mevcut organik yarıiletkenlerin yüksek direncinden dolayı güç dönüştürme verimliliği düşüktür (Hiramoto *et al.* 2005).

Bu yüzden organik güneş pillerinin güç dönüştürme verimliliğini arttırma yolları araştırılmıştır. Organik güneş pilinin güç dönüşüm verimini arttırmak için yeterli fotoakım ve built-in (dahili) potansiyel oluşturulmalıdır (Hiramoto *et al.* 2005). Buna ek olarak, ışıkla üretilen taşıyıcılar serbest yüklere ayrılmak için donör ve akseptör arayüzeyinde difüze olabilirler. Eksitonlar, yani elektron-hol çiftleri elektrostatik coulomb kuvvetiyle birbirlerine bağlıdır ve nötr oldukları için, difüzyonları herhangi bir elektrik alandan etkilenmez fakat elektrik alanla eksitonlar rastgele hareketler yaparlar.

Çoğu konjuge polimer için eksitonları difüzyon uzunlukları yaklaşık 10-20 nm arasındadır ve daha sonra bu eksitonlar rekombine olurlar. Rekombine olan eksitonlar fotoakıma katkı sağlamazlar (Zhou *et al.* 2010). Aktif tabakanın düşük yük taşıyıcı mobilitesinden dolayı built-in potansiyeli tarafından ışıkla üretilen taşıyıcıların dışa sürüklenmesi bulk heteroeklem filmindeki ışıkla üretilen taşıyıcıların rekombinasyonu ile kısıylandırılabilir durumdadır. Bu probleme başka bir çözümde, aygıtın verimini arttırmak için film kalınlığını azaltarak rekombinasyon oranları azaltılabilir (Wang *et al.* 2011). Soy metal nanoparçacıkları aygıtın verimliliğini arttırmak için güneş pillerinde kullanılabilir. Bu metal nanoparçacıklar hem güneş ışığı enerjisini yüzey plazmon etkisi vasıtasıyla dönüştürmüş hemde daha uzun yol uzunluğu için filmde ışığı hapsedmişlerdir (Wiesner and Bottero 2007). Metal atomunun iletkenlik bandındaki serbest elektronlar tektir ve optik özellikler için önemlidir. Işık metal nanoparçacıkları tarafından soğurulduğunda serbest elektronlar ışık dalgasının elektrik alanı boyunca

uyumlu bir şekilde titreşirler. Bu durum yüzey plasmon rezonansı olarak bilinir ve soy metaller tarafından sıklıkla gözlemlenmiştir (Köhler and Fritzsche 2007). Yüzey plazmon rezonansı görünür bölgede güçlü soğurma bandının gözlenmesinin bir sonucudur (Güneş *et al.* 2007). Anizotropik morfolojilere sahip altın nanoparçacıkları, benzersiz optik ve plazmonik özellikleri, yakın -IR'deki güçlü soğurma nedeniyle çok ilgi çekmişlerdir (Kambayashi *et al.* 2005). Ayrıca, 10 nm'den daha büyük çaplara sahip nispeten büyük nanoparçacıklar ışığı yansıtabilir ve saçabilir, bu yüzden bulk heteroeklem film içindeki optik yol uzunluğunu arttırabilirler (Goetzberger and Hoffmann 2005). Bu durum hareketli taşıyıcılarının ışıkla üretimini geliştirebilir. Donor ve akseptör materyallerin nanoyapılı kompozitlerine dayanan fotovoltaiik aygıtlar, düşük maliyetli enerji üretimine gelecekte çözüm sunma olanağı sağlar. Nanoparçacıkların benzersiz katalitik, elektronik ve optik özellikleri nanoteknolojiye çeşitli kullanım alanı sunar. Çoğu uygulamalarda nanoparçacıkların kullanılacağı yüzeyler stabilizasyon gerektirir. Bu işlem nanoparçacıkların sıvı ya da gaz fazında sentezlenmesinden sonra bir yüzeye aktarılmasıyla yapılabilir. Başka bir yol ise doğrudan Si, ITO veya cam gibi yüzeylere nanoparçacıkların büyütülüyor olmasıdır. Bu yaklaşım, nanoparçacıkların yüzeylerde stabilize edilmesini ve fotovoltaiik aygıtlarda dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalar için pratik bir yol sağlar.

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmayı yapmamızdaki amaç metal nanoparçacıklarının organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine nasıl etkilediğini incelemektir. Bu çalışmada P3HT:PCBM fotoaktif tabakası hem kloroform ve klorobenzen gibi farklı çözücülerde hazırlandı hem de farklı çözücülerle hazırlanan aktif tabakaya Au , Ag ve bunların alaşımı olan Au-Ag nanoparçacıkları belli oranlarda katkılanarak organik güneş pillerinin performansı araştırıldı. Aktif tabaka için kullanılan organik materyallerin yani P3HT:PCBM, altın katkılı P3HT:PCBM: AuNP, gümüş katkılı P3HT:PCBM: AgNP ve altın-gümüş katkılı P3HT:PCBM: (Au:Ag)NP ince filmlerinin optik, morfolojik ve yapısal karakterizasyonu incelendi ve *J-V* (Akım yoğunluğu-Voltaj) ölçümleri ile elde edilen güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri incelendi.

Bu çalışmanın birinci bölümü, konunun amacı ve önemini belirten “Giriş” kısmından oluşmaktadır. İkinci bölüm, konu ile ilgili yapılan literatür çalışmaları ve teorik bilgi içeren “Kuramsal Temeller” den oluşmaktadır. Üçüncü bölümde nanoparçacık katkılanmamış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al, farklı oranlarda metal nanoparçacıklardan ve farklı çözücülerden hazırlanan aktif tabakalara Au nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AuNP/LiF/Al, Ag nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AgNP/LiF/Al ve Au:Ag alaşımından oluşan nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP/LiF/Al organik güneş pillerinin hazırlanma aşamaları ve karakterizasyon süreçlerini anlatan “Materyal ve Yöntem” den oluşmaktadır. Dördüncü bölüm, organik güneş pillerinde kullanılan malzemelerin yapısal, optiksel ölçümlerinden ve  $J-V$  ölçümlerinden elde edilmiş karakteristik parametrelerini içeren “Araştırma Bulguları”ndan oluşmaktadır. Son bölüm olan “Tartışma ve Sonuç” ile veriler değerlendirilerek tez çalışması tamamlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Güneş pillerinin Tarihsel Gelişim Süreci ve Literatürde Yapılan Çalışmalar

Güneş pilleri gelişen teknolojiyle yeni bir çılgır olarak görülmesine rağmen tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. Fotovoltaik etki ilk kez 1839'da Fransız fizikçi Edmond Becquerel tarafından keşfedildi (Shaheen *et al.* 2005). Becquerel elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayını bulmuştur. 1858'de Vanguard I isimli uzay aracında ilk defa bir güneş pili kullanılmıştır. Bu güneş pili %9 verimle çalışıyordu ve  $100 \text{ cm}^2$ 'ye  $0.1 \text{ W}$  güç ürettiyordu.

1883'te Charles Fritts selenyum kullanarak %1 verimli ilk ciddi güneş pilini yapmış oldu. Güneş pilleri ilk olarak 19. yüzyılın son yarısında kullanılmaya başlamıştır. William Grylls Adams ve öğrencisi Richard Evans Day da dâhil olmak üzere araştırmacılar, ışık düşme miktarının aygıt performansına etkisini araştırdılar. Bu araştırma grubu ışığın katı bir malzemeden elektrik üretmesine neden olduğunu keşfetti. 1887'de Heinrich Rudolf Hertz morötesi ışığının fotovoltaik etkisinin araştırmıştır.

1904 yılında Wilhelm Hallwachs bakır ve bakır oksit bazlı bir güneş pili denemesinde bulundu. Aynı yıl Albert Einstein güneş ışığının elektrik akımı oluşturduğuna yönelik bir makale yayınlamıştır.

1914 yılında fotovoltaik aygıtların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik aygıtlar ilk kez 1954 yılında Pearson ve Fuller tarafından silisyum kristali üzerine gerçekleştirilmiştir.

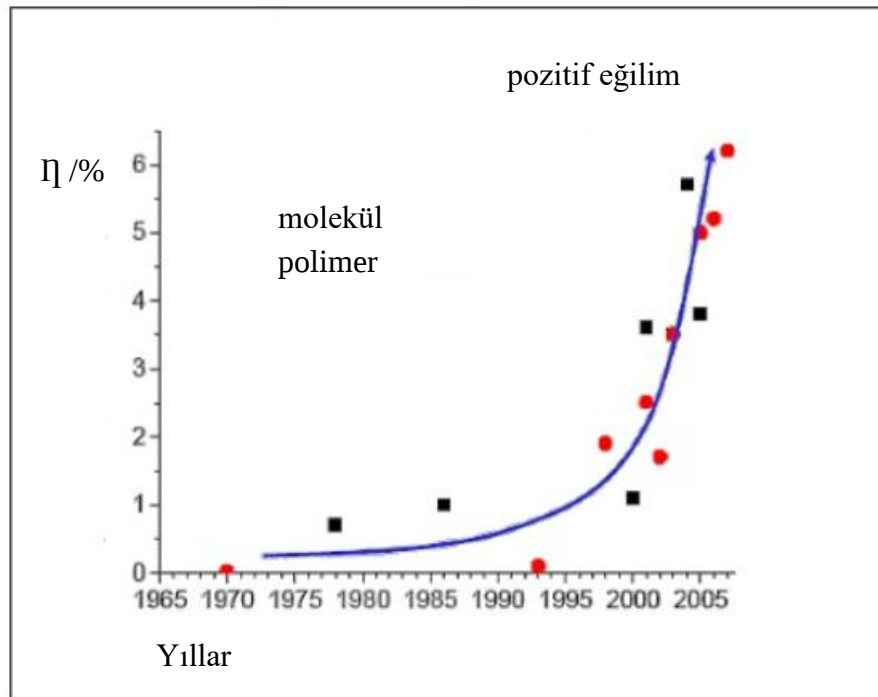
1932 yılında Audobert ve Stora Kadmiyum-Selenyum (CdS) kullanarak uzun bir süre kullanılacak olan fotovoltaik bir yöntem bulmuşlardır. 1954'de Pearson ve Fuller

silisyumunun fotovoltaik etkisi gösterdiğini keşfetmişlerdir ve %5 verimli bir güneş pili üretmeyi başarmışlardır (Chapin *et al.* 1954). 1957 yılına gelindiğinde Pearson ve grubunun çalışmaları olumlu sonuçlar vermiştir ve güneş pilindeki verim %8'lere kadar ulaşmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri uzay araçların kullanılmasında bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir ve 1960'ların başından beri uzay çalışmaların güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

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

1980'li yıllarında Alan Heeger, Alan McDiarmid ve Hideki Shirakawa araştırma grubu iletken polimere dayalı birçok çalışmalar yapmışlardır . Bu çalışmaların olumlu cevap vermesi onları yarıiletken polimerlere dayalı organik güneş pilli çalışmalarına yönlendirmiştir (Facchetti 2011). Bu yarıiletken polimerlerin icat edilmesi organik elektronik teknolojisinin gelişmesini sağlamıştır. Bu organik elektronik teknolojisi organik temelli ışık saçan diyot gibi aygıtlarda önemli bir gelişme göstermektedir (Farchioni 2001). Bu polimer teknolojisini ; ışık saçan diyotlarda (Zhao 2008), foto algılayıcılarda (Wei 2009) ve organik güneş pillerinde (Amarasinghe 2008) kullanılmasını sağlamıştır. Bu çalışma zamanlarında Delaware Üniversitesinde  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$  teknolojisine dayalı çalışmalar yapılmıştır. 2005 yıllarında polikristal silisyum dayalı güneş pilleri ile ilgili birçok çalışmalar

yapılmış ve büyük gelişmeler kaydedilmiştir. . Bu teknolojik gelişmelerin ilerlemesiyle son durum incelendiğinde fotovoltaik güç üretimi yılda %25-%30 civarında artacağı beklenmektedir. Bu fotovoltaik güç üretimi güç ihtiyacımızın yalnızca yüz binde dört kadarı karşılamaktadır. Bu oranlar 2010 yılında %0.13 civarında , 2020’de %1 ve 2030 ile 2050 yılları arasında %5 ile %10 civarında olacağı tahmin edilmektedir. Organik güneş pillerinin yıllara göre güç dönüşüm verimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Organik güneş pillerinin tarihsel gelişim diyagramı

Kim and Carrola, (2005) tarafından yapılan çalışmada P3OT, C60 donör ve akseptör olarak kullanılarak 4:1 oranında P3OT:C60 aktif tabakası elde edilmiştir. Hazırlanan P3OT:C60 aktif tabakası farklı oranlarda Au ve Ag nanoparçacıkla katkılanmıştır. Nanoparçacıkla katkılı filmlerin yüzey dalgalanmalarında önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Au ve Ag nanoparçacıklarının katkı miktarlarının artması film iletkenliklerini arttırmıştır. Nanoparçacıklarının türüne bakılmaksızın katkı miktarlarındaki artış nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin seridirenç değerlerini 46 dan 15–20  $\Omega$  cm<sup>2</sup> azaltmıştır. Ag katkılı organik güneş pilleri katkılanmamış

aygıtlarla karşılaştırıldığında düz bant bölgesinden daha yüksek bir akım yoğunluğuyla karşılaşmışlardır. Akımın artışı, katkılanma miktarı arttıkça artmıştır. Au nanoparçacık katkılı aygıtlarda da akım yoğunluğunda artış Ag nanoparçacık katkılı aygıtlara göre daha düşük değerde olmuştur. Dikkate diğer önemli bir nokta organik güneş pillerinde nanoparçacıklarının katkı miktarları arttıkça Ag katkılı organik güneş pillerinin doğrultma oranında önemli ölçüde azalmalar olmuştur. Bu durum ise Ag nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin doyma akımını arttırdığı anlamına gelir. Açık devre voltajı, katkı miktarı arttıkça artmış fakat yaklaşık olarak katkı oranı %3 civarında olduğunda azalmalar başlamıştır. P3OT'den nanoparçacıklara olan hol transferi P3OT ve C60 arayüzeyi arasında built-in potansiyelinin artmasına yardımcı olmuş ve bu nedenle nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin açık devre voltajında artmalar olmuştur. Yüksek katkı oranında açık devre voltajının düşmesinin nedeni tam belli olmamasına rağmen iki ihtimal üzerinde durulmuştur. Birincisi, film yüzeyi üzerinde artan nanoparçacıkların, metal elektrot ile doğrudan temas halinde olması yani katodun LiF/Al'den Ag veya Au olarak değişmesidir, bu durumda indirgenmiş bir açık devre voltajı ile sonuçlanmıştır. Diğer olasılık ise metal nanoparçacıklarından C60 elektron transferinin C60'ın elektron ilgisini azaltabilir olmasıdır. Yüksek miktarda nanoparçacıkla katkılanmış organik güneş pillerinde açık devre voltajındaki düşüş güç dönüşüm verimi, akım yoğunluğu, dolum faktöründe de azalmalara neden olmuştur. Organik güneş pillerinde önemli problemlerden biri de aktif tabakanın kalınlığıdır. Altın katkılı organik güneş pilinin maksimum veriminde aktif tabakanın kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür. Fakat katkılanmamış organik güneş pillerin aktif tabakanın kalınlığı 100nm az olduğunda verimde azalmalar başlamıştır (Kim and Carrolla 2005).

Spyropoulos *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmada plazmonik Au ve Ag nanoparçacıkları kullanılarak yüksek verimli organik güneş pillerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada plazmonik nanoparçacıkların güç dönüşüm verimini %20'ye kadar geliştirdiği gösterilmiştir. Burada 1:1 oranında P3HT ve PCBM kloroform içerisinde çözünerek aktif tabaka elde edilmiş ve elde edilen karışım yaklaşık bir saat boyunca 60°C'de karıştırılmıştır. Ardından elde edilen aktif tabaka PEDOT:PSS kaplı ITO'lar üzerine döndürmeli film kaplama cihazıyla 1000 rpm de 60 sn

kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra elde edilen filmler 30 dk 80°C’de azot gazıyla tavlansmıştır. Daha sonra bu aktif tabakanın üzeri termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak katot olarak kullanılan alüminyum ile kaplanmıştır. Yapılan çalışmada aktif tabakaya Au ve Ag nanoparçacıkları katkılanarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur. Au ve Ag nanoparçacıkların içindeki iletken elektronların lokalize yüzey plazmon etkileri aktif tabaka içerisinde soğurmaya arttırarak kısa devre akımının artmasını sağlamıştır. Ayrıca aktif tabakaya katkılanan nanoparçacıklar dolum faktörünü ve kısa devre akım yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirirken, açık devre voltaj değerlerini çok değiştirmemiştir. Sonuç olarak Au nanoparçacıklarının güneş pillerinin verimini iki katına çıkarırken, Ag nanoparçacıkları verimi %1.5’a çıkarmıştır.

Xie *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada metal nanoparçacıklar (NP), organik güneş pilleri gibi ince film aygıtlarının performansını arttırmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada metal nanoparçacıklarının elektronları yük birikme etkileriyle indüklenerek bir üst seviyeye uyarılmıştır. Titanyum oksit tabakasına yerleşmiş metal nanoparçacıklar (Au, Ag) invert organik güneş pillerinin (OSC’ler) performanslarını arttırmak için oldukça verimli bir taşıma katmanı olarak işlev görmüş ve bu da fotoakımı önemli bir şekilde arttırmış ve güç dönüştürme verimliliğini %8,20’ye ulaştırmıştır. Elektron taşıyıcı tabakası içerisindeki metal nanoparçacıklarının optiksel plazmonik etkileri organik güneş pillerinin verimini etkilemede çok küçük bir faktördür. Bunun yerine, güneş ışığı altında yüklerin uyarılması ultraviole bölgede uyarılan elektronların TiO<sub>2</sub> elektron taşıyıcı tabakadan metal nanoparçacıklara transfer olmasıyla açıklanmıştır. Ultraviole ışınlamadan sonra elektron yığılması elektron taşıyıcı kompozit tabakanın iş fonksiyonunu azaltmıştır. Ultraviole ışınlarına maruz bırakılan metal NP-TiO<sub>2</sub> tabakası yüklerin yeniden dağıtılmasına, organik güneş pillerinde yüklerin uyarılmasına yardımcı olabilir. TiO<sub>2</sub> elektron taşıyıcı tabakasına Au ve Ag nanoparçacıklarının eklenmesi kısa devre akım yoğunluğunu, dolum faktörünü ve güç dönüşüm verimini arttırmıştır. Ayrıca birçok araştırma yük birikiminin aygıtlarının performanlarına yani, açık devre gerilimini bozmadan kısa devre akımını iyileştirme etkileri üzerine yapılmaktadır. Sonuç olarak, teorik ve deneysel sonuçlara göre metal

nanoparçacıkların organik güneş pillerine katkılanması yarıiletkendeki katkı etkilerinden farklıdır ve bu çalışmada metal NP'ların TiO<sub>2</sub> tabakasına aktarılması organik optoelektronik aygıtlarda elektrotlara çok iyi yk topladığı gösterilmiştir.

Yu *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada klorobenzen çözücüsü kullanılarak 1:1 oranlarında P3HT:PCBM aktif tabakası hazırlanmıştır. Bu karışıma TiO<sub>2</sub> ve Pt nanoparçacıkları eklenerek P3HT:PCBM:TiO<sub>2</sub>:Pt hibrit filmi organik güneş pillerinin aktif tabakası olarak kullanılmıştır. Hibrit film içindeki metal Pt nanoparçacıkları yüksek mobiliteye sahip olduğundan organik güneş pillerinin verimini arttırmıştır. Kimyasal temizliği yapılmış ve PEDOT: PSS kaplı ITO'nun üzeri 1000rpm de döndürme ile film kaplama cihazı kullanılarak nanoparçacık katkılı aktif tabaka ile kaplanmıştır. Daha sonra aktif tabaka film üzerine termal buharlaştırma nitesi kullanılarak 60nm Ca kaplanmış ardından bu tabaka üzerine 80nm Al kaplanarak Al/Ca/P3HT:PCBM:TiO<sub>2</sub>:Pt/PEDOT:PSS/ITO aygıt yapısı elde edilmiştir. Metal nanoparçacıkların aktif tabaka içerisine karıştırılması taşıyıcı mobilitelerini önemli bir şekilde yükseltmiştir. Aktif tabakadaki platinin optimum miktarı seri direnci azaltmış ve böylece taşıyıcıların daha kolay taşınması sağlamıştır. P3HT: PCBM: TiO<sub>2</sub> aktif tabakası içerisine %0.03 Pt nanoparçacık eklenmesiyle akım yoğunluğu 7.31 mA/cm<sup>2</sup> den 10.10 mA/cm<sup>2</sup> arttırmıştır. Platin nanoparçacıkları organik maddelerin iletkenliğini ve yk mobilitelerini arttırarak seri direnci azaltıp ve aygıt verimliliğini arttırmıştır. Aktif tabakanın yüksek miktarda Pt nanoparçacıklarıyla katkılanması seri direncin artmasına ve aktif tabaka içerisinde platin nanoparçacıklarının kümelenmesine yani topaklanmasına neden olmuştur. Bu topaklanmalar en iyi TEM sonuçlarında görülmüştür. Pt nanoparçacıkların miktarının %0.04 veya daha büyük değerlerde olması aygıtın performansında düşüşler meydana getirmiştir ve bu durum topaklanmış Pt nanoparçacıkların elektron-hol çiftlerinin hareketini engellemesine atfedilmiştir.

Ikram *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada P3HT:PCBM'den oluşan aktif tabakaya ZnO nanoparçacıkları eklenerek aygıt performansı incelenmiştir. P3HT:PCBM ve çinko-oksit (ZnO) nanoparçacıkları dikrobenzen (DKB) ve klorobenzen (KB) zeltiilerinde çözülerek aygıt performansı incelenmiştir. ZnO nanoparçacıklarının

P3HT:PCBM güneş pillerinde güç dönüşüm verimliliğini (PCE) önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Çözücü olarak klorobenzen kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya ZnO nanoparçacıklarının ilave edilmesi ile soğurma spektrumunun kırmızıya doğru kaymasını sağlamış ve görünür bölgedeki soğurmayı arttırmıştır. Aktif tabakaya ZnO nanoparçacıkların dâhil edilmesi aktif katmanın yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Ayrıca organik bulk heteroeklem aygıtların aktif tabakasına ZnO nanoparçacıkların dâhil edilmesi yük mobilitesini arttırarak güneş pillerinin maliyetini azaltmıştır. P3HT:PCBM aktif tabakasındaki ZnO nanoparçacıkların artmasıyla birlikte kısa devre akımı ve açık devre voltajı artmıştır. Çözücü olarak klorobenzen kullanılmasıyla seri direnç değerleri ZnO nanoparçacıkların artmasıyla birlikte  $40.4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  den  $13 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'ye azalmıştır. Seri direnç değerindeki azalmalar aktif tabakaya ZnO nanoparçacıkların eklenmesiyle bulk öz direncinin azalmasına atfedilmiştir. Şönt direncindeki önemli artışlar ise ZnO nanoparçacık ağlarının sızıntı akımlarını durdurmasına atfedilmiştir. Klorobenzen ve kloroform gibi her iki çözültülerde P3HT:PCBM güneş pillerinin güç dönüşüm verimi artmıştır. Klorobenzen ve diklorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış aktif tabaya ZnO nanoparçacıklarının aşırı katkılanması geniş topaklanmalara neden olmuştur. Bu durum yük ayrışmasını önleyerek kısa devre akımını azaltmıştır. Ayrıca ZnO nanoparçacık miktarının artması yüzey dalgalanmalarına sebep olup ışığın aktif tabakada haps edilmesini sağlamıştır. P3HT:PCBM:ZnO üçlü karışımından oluşan aygıtın açık devre voltajındaki artış P3HT ve ZnO'nin HOMO seviyelerindeki enerji seviyeleri arasındaki uyuma atfedilmiştir. XRD sonuçlarına göre P3HT:PCBM karışımına ZnO nanoparçacıklarının eklenmesi P3HT'nin kristalleştiğini göstermiştir. Bu bölgesel kristalleşmeler hem aygıtın güç dönüşüm verimini hem de soğurmayı arttırmıştır.

Lee *et al.* (2015) tarafından yapılan çalışmada hol taşıyıcı tabakası olarak kullanılan PEDOT:PSS'ye indirgenmiş grafen-oksit (rGO) ve altın (Au) nanoparçacıkları katkılarak Au NP:PEDOT:PSS:rGO ince filmleri elde edilmiştir. Elde edilen filmler ITO üzerine 4000rpm'de yaklaşık 40nm kaplanmış ve 130°C'de 20dk tavlannmıştır. Bu çalışmada aktif tabaka olarak 1:1.5 oranında PTB7:PC70BM kullanılmış ve klorobenzen içerisinde çözünmüştür. Elde edilen aktif tabaka 500rpm'de 25 saniye

kaplanmıştır. Daha sonra bu tabakalar üzerine termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak 100nm Al kaplanmış ve ITO/Au NP:PEDOT:PSS:rGO/PTB7: PC70BM/PFN:Al aygıt yapısı elde edilmiştir. PEDOT: PSS: rGO'nun yüksek iletkenliğe sahip bir kompozit malzeme olması organik güneş pillerinde olumlu etki göstermiştir. PEDOT:PSS:rGO karışımına Au nanoparçacıklarının katkılanması daha iyi bir güç dönüşüm verimine ve kısa devre akımına sebep olmuştur. Au nanoparçacıklarının %4 oranından fazla katkılanmalardan sonra aygıt veriminde azalmalar görülürken rGO miktarının artması PEDOT:PSS:rGO karışımının iletkenliğini arttırmıştır. AFM görüntülerinden ITO üzerine kaplanmış PEDOT: PSS'nin yüzey dalgalanmaları yaklaşık 0,77 nm iken Au nanoparçacık katkılı PEDOT: PSS'nin yüzey dalgalanmaları 2,28 nm olarak gözlenmiştir. Fakat Au nanoparçacıklarının PTB7: PC70BM aktif tabakaya katkılanması yüzey dalgalanmalarını 3,88nm'den 0,8nm'ye düşürmüştür. Hol taşıyıcı tabakanın çok miktarda nanoparçacıkla katkılanması filmlerin homojenliğini bozmuş ve taşıyıcıların hareketliliğini sınırlamıştır. Ayrıca aktif tabaka içerisine katkılanan nanoparçacıklar aygıt performansını arttırmasının yanı sıra yapısal kararlılığıda arttırmıştır.

Yagci *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada PEDOT:PSS'ye 0-5mg/ml konsantrasyonlarında borik asit katılarak PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> hol taşıyıcı tabakası elde edilmiştir. Katkılanmamış ve borik asit katkılanmış PEDOT:PSS filmleri spin kaplama tekniği ile kaplanmış ve elde edilen filmlerin elektriksel iletkenlik ölçümleri XRD, UV, AFM ve FTIR karakterizasyonları yapılmıştır. Hol taşıyıcı tabakasına H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ilave edilmesiyle cihazın güç dönüşüm veriminin %20 dolum faktörünün yaklaşık %23 arttığı tespit edilmiştir. Katkı konsantrasyonundaki artış PEDOT:PSS:H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> filmlerinin kalınlığını değiştirmemiştir. PEDOT:PSS tabakasına borik asit ilavesinin (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) yüzey dalgalanmalarını iyileştirdiği ve PEDOT:PSS tabakasının iş fonksiyonunu arttırdığı için açık devre voltajını ve dolum faktörünü de arttırmıştır. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> içermeyen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş pilleri %1,79'luk bir güç dönüştürme verimliliğine sahipken, PEDOT: PSS'de 1.25 mg/ ml H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> konsantrasyonuna sahip ITO/PEDOT:PSS: H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> /P3HT:PCBM/Al güneş pilleri AM 1.5G aydınlatması altında %2,14'lük güç dönüştürme verimliliğine sahip olup daha yüksek bir performans

göstermiştir. Borik asit katkılı PEDOT:PSS filmi katkısız PEDOT: PSS filmlerine kıyasla ITO ve PEDOT:PSS arasındaki arayüzey etkilerini geliştirdiği ve dolayısıyla aygıtın açık devre voltajını arttırdığı gözlemlenmiştir. Borik asit ihtiva eden PEDOT:PSS aygıtının  $R_{sh}$  değerleri 3 kV'dan 11.47 kV'a artmıştır.  $R_{sh}$  değerlerinin artışı ve  $R_s$  değerlerinin azalması aygıtın dolum faktörünün artmasına sebep olmuştur.

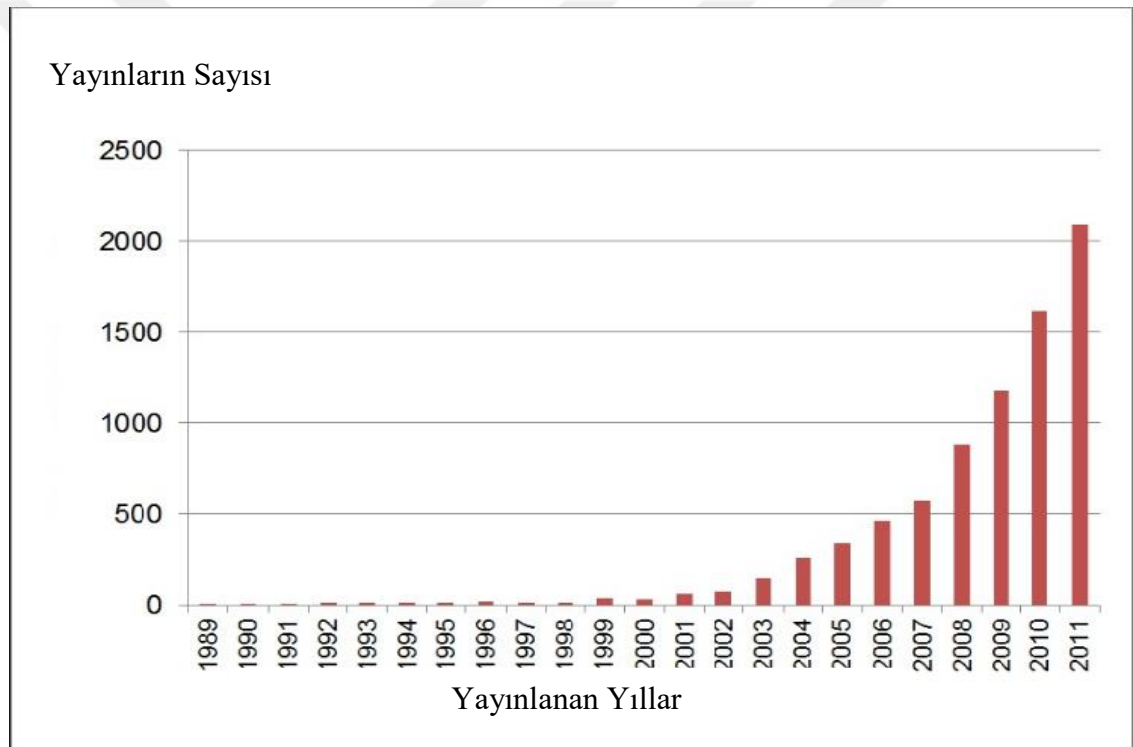
Ikram *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada organik güneş pilin aktif tabakası inorganik metal oksit nanoparçacıkları kullanılarak farklı oranlarda (1:0.7:0:0, 1:0.55:0.075:0.075, 1:0.35:0.175:0.175, 1:0.15:0.275:0.275, 1:0:0.35:0.35) P3HT:PCBM:ZnO:TiO<sub>2</sub>'den oluşmuştur. Farklı oranlarda hazırlanan karışımlar 1 mL klorobenzen ve diklorobenzen içerisinde çözünerek aktif tabaka hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlar hol taşıyıcı tabaka olan PEDOT:PSS üzerine kaplanmıştır. Daha sonra bu filmler azot ortamında ısıtıcı tabla üzerinde 150°C de 15 dk tavlantıya tabi tutulmuştur. Ardından bu film üzerine termal buharlaştırma ünitesi yardımıyla 0.3 nm LiF ve 100 nm Al kaplanmış ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:ZnO:TiO<sub>2</sub>/LiF/Al aygıt yapısı elde edilmiştir. ZnO'nin iletkenlik bandı LiF'ün iletkenlik bandına yakındır ve durum elektronların sırasıyla elektrotlara ulaşmasını sağlamıştır. Metal nanoparçacıklarının yüksek iletkenlikleri ve film morfolojisini iyileştirdiğinden dolayı aygıtların seri direnç değerleri azalmış dolum faktörü, açık devre voltajı ve şönt direncini arttırmıştır. P3HT:PCBM karışımına ZnO ve TiO<sub>2</sub> metal oksit parçacıklarının eklenmesi soğurmayı arttırmıştır. Soğurmadaki bu artış aktif tabaka içerisindeki metal nanoparçacıkların miktarındaki artmasıyla birlikte yüzey dalgalanmalarının artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Gelen ışık, yüksek orandaki dalgalı yüzeylerden saçılabilir ve aktif tabaka içinde yol uzunluğunu arttırabilir. Aktif tabakaya metal oksit nanoparçacıklarının eklenmesi yük taşıyıcı mobilitesini arttırmıştır. Optiksel ve elektriksel karakterizasyonlar hibrit güneş pillerinin aktif tabakasına eklenen metal oksit nanoparçacıklarının soğurma aralığını genişlettiğini göstermiştir. Sonuç olarak metal oksitler nanoparçacıklarının iyi fiziki ve kimyasal stabiliteye ve nispeten yüksek elektron mobilitesine sahip olması onları organik güneş pilleri için kullanılabilir hale getirmiştir.

Nourolahi *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada mezoporus heteroeklem perovskit güneş hücrelerinin özellikleri üzerinde gümüş nanoparçacıklarının plazmonik etkileri araştırılmıştır. Ag nanoparçacıkları, perovskit güneş pillerinde yaygın olarak hol bloke katmanı olan kompakt  $\text{TiO}_2$  tabakasına gömülmüştür.  $\text{TiO}_2$  tabakasına nanoparçacık katkılanması güneş pillerinde güç dönüşüm veriminde %30'dan fazla bir artışa neden olmuştur. Fotoaktif perovskit tabakasındaki Ag nanoparçacıkların ışığın saçılmasını, ışığın optik yol uzunluğunu ve aktif tabaka içerisinde foton soğurmalarını arttırarak aygıt performansını arttırmıştır.

Gollu *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada elektron taşıyıcı tabakaya olarak ZnO kullanılmış ve bu tabaka %0,2 , %0,4 , %0,6 ve %0,8 oranında indirgenmiş grafen oksit ile katkılanmıştır. İndirgenmiş grafen oksit katkılı ZnO çözeltisi ITO yüzeyine püskürtme yöntemi kullanılarak 60 nm kalınlıkta kaplanmıştır. Bu çalışmada klorobenzen çözücüsü kullanılarak 1:1 oranında P3HT:PCBM aktif tabakası elde edilmiştir. Bu aktif tabaka %20 oranında Au ve Ag nanoparçacık ve nanorodlarıyla katkılanmıştır. Bu elektron taşıyıcı tabakanın üzeri Au ve Ag katkılı P3HT:PCBM ile 2000 rpm'de 100 nm kaplanmıştır. Daha sonra bu aktif tabakanın üzeri termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak hol taşıyıcı tabakası olarak 20 nm kalınlığında  $\text{MoO}_3$  kaplanmış ardından 100 nm kalınlığında Ag metali kaplanarak invert organik güneş pili aygıtı elde edilmiştir. Hem elektron taşıyıcı tabakaya katkılanan rGO hemde aktif tabakaya katkılanan Au ve Ag nanoparçacıkları soğurma şiddetini arttırmıştır. ZnO'e %0,4 rGO katkılanması aygıtın güç dönüşüm verimini %3,13'ten %3,81'e artmıştır. Aktif tabakaya Au nanoparçacık katkılanması güneş pilinin güç dönüşüm verimi %3,77'den %4,44'e ve Au nanorod katkılı olduğunda %3,77'den %4,85'e çıkartmıştır. Elde edilen sonuçlara göre aktif tabaka ve elektron taşıyıcı tabakaya katkılanan nanoparçacıkların aygıt verimini ve soğurma şiddetini arttırmıştır.

Zhang *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada aktif tabaka olarak 1:1 oranında P3HT:PCBM kullanılmıştır. Hazırlanan bu tabaka yaklaşık 11 nm boyutlarında  $\text{F}_3\text{O}_4$  nanoparçacıklarıyla katkılanarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi incelenmiştir.  $\text{F}_3\text{O}_4$  nanoparçacığı organik güneş pillerinin verimini %2,24'ten %2,70'e

çıkartmıştır. Farklı kalınlıklarda aktif tabaka hazırlanmış ve en yüksek verim 90 nm de elde edilmiştir. Eksitonların difüzyon uzunluğu kısa olduğundan film kalınlığının azalması organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimini arttırması beklenmiş ama ışığın aktif tabakada soğurma şiddeti azalmış olması güç dönüşüm verimini azaltması beklenmiştir. Fakat bu çalışmada ve aktif tabaka ince olmasına rağmen güç dönüşüm veriminin artması katkılanan  $F_3O_4$  nanoparçacıklarının soğurmayı ve taşıyıcı transferini arttırması ile açıklanmıştır. Şekil 2.2 Web of Science’da organik güneş pilleri üzerinde yapılan yayın sayılarının yıllara göre dağılımı görülmektedir.



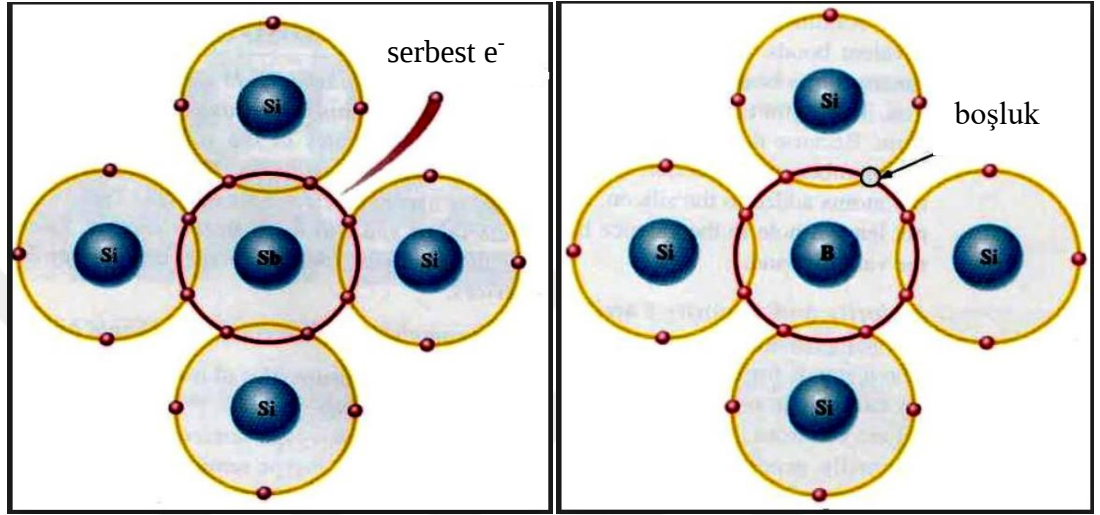
**Şekil 2.2.** Web of Science’da organik güneş pilleri üzerinde yapılan yayın sayılarının yıllara göre dağılımı

## 2.2. Yarıiletkenlerin Safsızlık Atomlarıyla Katkılanması

Yarıiletken teknolojisinde yarıiletkenlerin uygun yabancı atomlar katkılanması elektriksel özellikleri önemli ölçüde değiştirmektedir. Katkılanmamış yarıiletkenin yapısal değiştirmeyecek şekilde kristale dışardan yerleştirilen atomlara “safsızlık-

atomları” ve bu yerleştirme işleminde “katkılama” denir. Doğada çok bulunması ve kolay elde ediliyor olabilmesinde dolayı silisyum kristal katkılamayı anlatmak için iyi bir örnek teşkil etmektedir. 5 tane valans elektronlarına sahip atomlara arsenik (As), fosfor (P), bizmut (Bi) veya antimon örnek verilebilir. Katkılanmamış silisyum kristali 5 tane valans elektronları olan antimon ile belli oranda katkıldığında, diğer silisyum atomları ile nasıl bir kovalent bağ oluşturulduğu Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Antimon atomunda bulunan 4 valans elektronu, silisyumun 4 valans elektronu ile kovalent bağ yapar. Antimon’un 1 valans elektronu kovalent bağ oluşumuna katılmaz dışarda kalır ve ayrılır. Dışarda kalan elektron herhangi bir atoma bağlı olmadığından iletkenliği artırır. İletkenlik, dışarıda kalan elektron sayıları ile doğrudan ilişkilidir. Bu ise silisyum kristaline katılan atomların sayısına bağlıdır. Antimonun silisyum kristaline katılanması sonucu oluşan iletkenlik elektronu valans bandında bir boşluk oluşturmaz. Katkılanma sonucunda akım taşıyıcıların çoğunluğu elektron olduğundan bu silisyum kristaline n-tipi yarıiletken malzeme denir. Yani n-tipi yarıiletkende elektronlar, çoğunluk akım taşıyıcılar olarak adlandırılırlar. Bu yüzden n-tipi yarıiletken yapılarda akım taşıyıcıları elektronlardır. Fakat bu yarıiletken malzemelerde boşluklar ısı ile meydana gelmekte olup 5-değerlikli olan antimon katkı maddesi ile oluşturulmamıştır. Antimon katkı maddesi ile oluşturulan n-tipi malzemelerde boşluklar azınlık taşıyıcı olarak görev yapmaktadır. Katkısız silisyum kristali içerisine 3 valans elektronuna sahip bor atomu belli oranlarda katkılanırsa yeni bir kristal yapısı meydana gelmektedir. Bor atomu katkılanmış bu yeni kristal yapıda boşluk sayısı artırılmış olur. Periyodik tabloda 3 valans elektrona sahip atomlara alüminyum (Al), bor (B) ve galyum (Ga) örnek verilebilir. Saf silisyum içerisi belli oranda bor atomuyla katkılanırsa; bor atomunun 3 valans elektronu silisyumun 3 valans elektronu ile ortak kovalent bağ yapar. Fakat silisyumun 1 valans elektronu bağ yapımına katılmadığından boşta kalır. Bu durumda 1 elektron eksikliği oluşur. Buna “boşluk” veya “hole” denir. Silisyuma katkılanan bor atomları ile boşluk sayıları kontrol edilebilir. Bor atomunun silisyum kristaline katılanmasıyla elde edilen malzemeye p- tipi yarıiletken malzeme denir. Oluşan boşluklar pozitif yüklü olup p-tipi yarıiletkende çoğunluk akım taşıyıcılarıdır. P-tipi yarıiletken malzemede elektronlar azınlık akım taşıyıcılarıdır. P-tipi malzemede birkaç adet serbest elektronda oluşmuştur. Bunlar ısı ile

oluşan boşluk çifti esnasında meydana gelmiştir. Bu serbest elektronlar, silisyuma yapılan katkı esnasında oluşturulamazlar. Elektronlar elektrik alan ile ters yönde hareket ederken, boşluklar elektrik alan doğrultusunda hareket ederler.

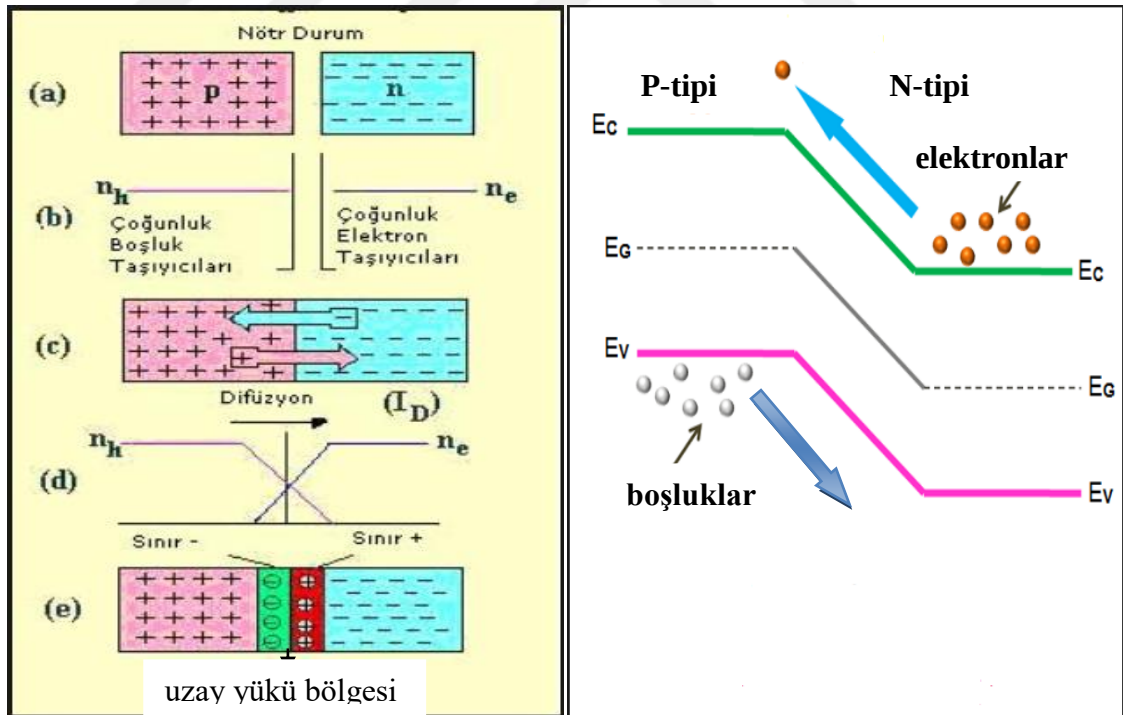


Şekil 2.3. Antimon ve bor katkılanmış silisyum örgüsünün gösterimi

### 2.3. Denge Durumunda $p$ - $n$ Eklem Oluşumu

Modern elektronik uygulamalar ve yarıiletken teknolojisinde önemli bir rol oynayan  $p$ - $n$  eklemi; elektronik devrelerde doğrultucu, anahtarlamada oldukça yaygın olarak kullanılır. Uygulanan beslem altında,  $p$ - $n$  eklem mikrodalga ya da fotonik aygıt şeklinde çalışır (Sze 2002).  $P$  ve  $n$ - tipi yarıiletkenler atomik boyutta birleştirildiğinde eklemdeki yüksek taşıyıcı konsantrasyon gradienti, taşıyıcıların difüzyona uğramasına neden olur.  $P$  tarafındaki eklem yakınında bulunan boşluklar  $n$ -tarafına,  $n$ -tarafında eklem yakınındaki elektronlarda  $p$ -tarafına difüze olurlar. Boşluklar  $p$ -tarafından ayrıldıkça, eklem yakınında negatif alıcı iyonlar ( $N_A^-$ ) oluşur. Boşluklar hareketli iken, negatif alıcı iyonlar yarıiletken örgüde sabittirler. Benzer şekilde elektronlar  $n$ -tarafından ayrıldıkça, eklem yakınında pozitif verici iyonlar ( $N_D^+$ ) oluşur. Sonuç olarak, eklemin  $p$ -tarafında negatif ve  $n$ -tarafında pozitif uzay yükü bölgesi oluşur ve bir engel potansiyeli meydana gelir (Frosch and Drrick 1957). Bu uzay yükü bölgesinin hareket taşıyıcı yoğunluğu sıfırdır. Bu bölgede pozitif yükten negatif yüke doğru bir elektrik alan oluşur. Bu

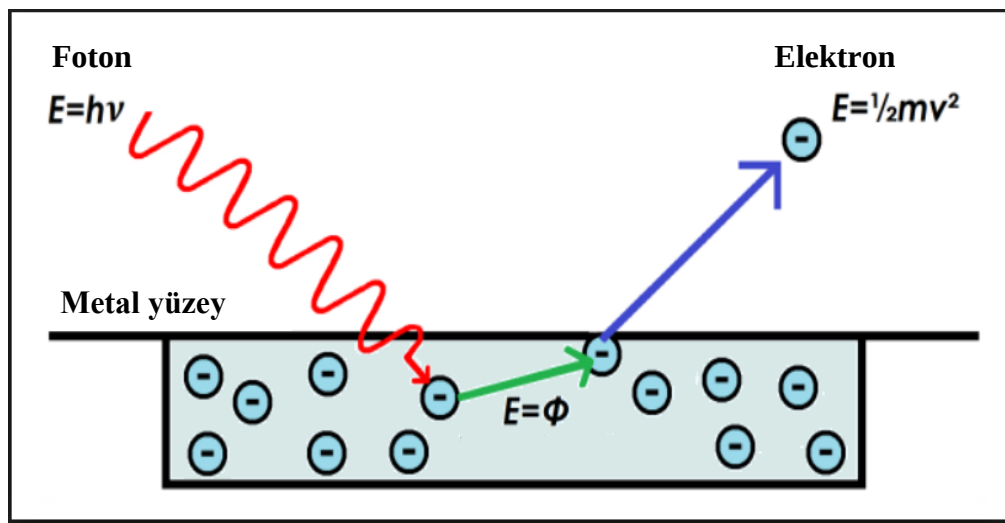
elektrik alan taşıyıcıların n-tipi veya p-tipi olmasına göre difüzyon kuvvetinin yönüne zıt yönde, boşluklar ve elektronlar üzerinde bir elektrik alan kuvveti oluşturur. Termal denge durumunda difüzyon kuvveti elektrik alan kuvvetine eşit olur ve yük akışı tamamlanır. Fermi enerji seviyelerindeki değişimlerinden dolayı iletkenlik ve valans bant enerjileri uzay yükü bölgesi boyunca bükülür ve fermi seviyesi bütün sistem boyunca sabit olur. N- tarafındaki iletkenlik bandındaki elektronlar p-tarafındaki iletkenlik bandı içerisine yerleşmeye çalıştığında bir potansiyel engel görülür. Bu potansiyel engeli “yerleşik potansiyel ” engeli olarak adlandırılır. Bu yerleşik potansiyel engeli n-tarafındaki çoğunluk taşıyıcı elektronları ile p-tarafındaki azınlık taşıyıcı elektronları arasındaki dengeyi ve yine p-tarafındaki çoğunluk taşıyıcı boşlukları ile n - tarafındaki azınlık taşıyıcı boşluklar arasındaki dengeyi sağlar. Yani bu potansiyel dengeyi koruduğundan bu voltajla bir akım üretilemez (Sağlam and Ateş 2012). Şekil 2.4’de bir *p-n* eklemının uzay yükü bölgesi ve enerji-band diyagramı göstermektedir.



Şekil 2.4. Bir *p-n* eklemının uzay yükü bölgesi ve enerji-band diyagramı

## 2.4. Fotoelektrik Etkinin Oluşumu

Işık ışınının davranışını tanımlamada bir tanecik modeli oluşturmak için “ fotoelektrik etki ” kavramının bilinmesi gerekir. Yeteri kadar enerjiye sahip bir ışın metalik bir yüzeye çarptığında metalden elektronlar yayılır. Yayılan elektronların enerjisi, metale çarpan ışının frekansı ile ilişkilidir ve  $E=h\nu-w$  eşitliği ile ifade edilir.  $w$  iş fonksiyonudur ve metalden vakuma elektronları çıkarmak için gerekli işi gösterir.  $E$  doğrudan frekansa bağımlı olduğundan ışın demetinin şiddetinden dolayı değişmez, ışının şiddeti arttıkça sadece  $E$  enerjisi ile “ çıkarılan elektronların sayısı” artar. Metale çarpan ışının metal yüzeyine düzgün bir şekilde dağılması halinde, hiç bir elektronun kopmak için gerekli enerjiyi kazanamadığı hesaplarla saptanmıştır. Bu durum, enerjinin ışık demetinde muntazam bir şekilde dağılmadığını, bazı noktalarda yoğunlaştığı veya enerji tanecikleri halinde bulunduğu varsayımına yol açmaktadır. Elektronların emisyonu için gerekli iş,  $w$ , her metal için farklıdır. Alkali metallerin iş fonksiyonları düşüktür ve görünür bölgedeki ışının etkisi ile elektron yayarlar. Periyodik tabloda da alkali metallerin sağında bulunan metallerin iş fonksiyonları daha yüksektir ve fotoelektrik etki için daha yüksek enerjili morötesi ışınlara gereksinim gösterirler. Şekil 2.5’de fotoelektrik etkinin şematik gösterimini göstermektedir.



Şekil 2.5. Fotoelektrik etkinin şematik gösterimi

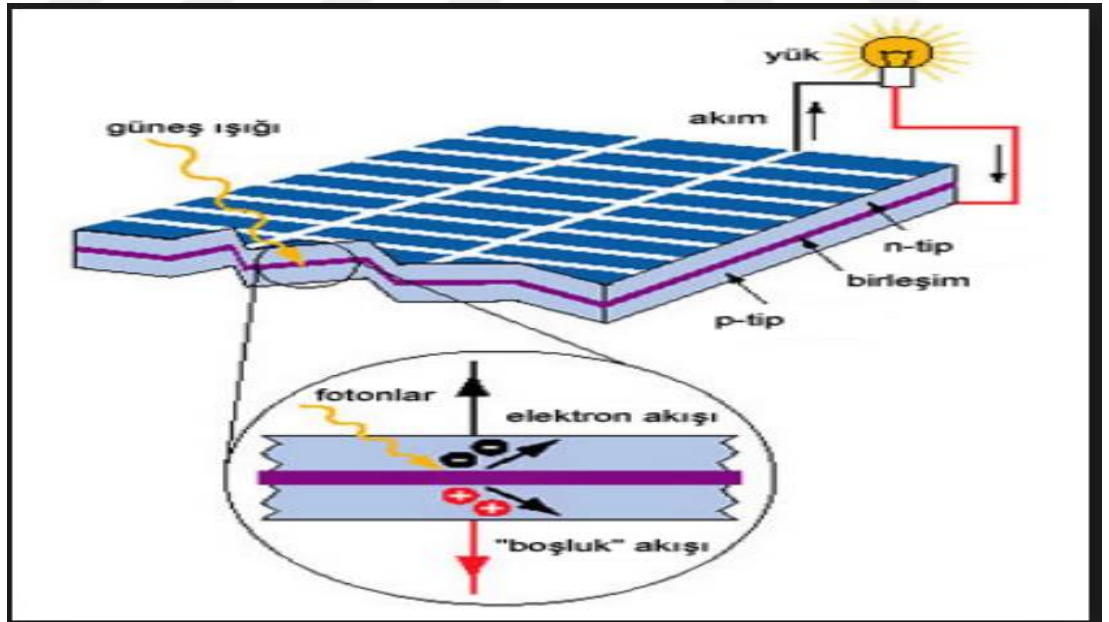
## 2.5. Güneş Pilleri

Güneş pilleri üzerine gelen güneş ışığının bir kesrini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken aygıtlardır. Güneş pilleri fotovoltatik ilkeye bağlı olarak çalışırlar, yani üzerine düşen ışık yarıiletkenlerin uçları arasında elektrik gerilimine dönüşür. Güneş pilleri, belli güneşlenme şartlarında, birim alan başına belirli bir akım ve voltaj üretirler. Güneş enerjisi, güneş pillinin yapısına bağlı olarak %5 ile %20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını arttırmak için çok sayıda güneş pilleri birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü denir. Güneş pilleri elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pilleri modül uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devrelerinde kullanılır. Güneş pili teknolojisi öncelikle uzak yerleşim yerlerinde, elektrik şebeke sisteminin olmadığı yerlerde ve jeneratör sistemlerinin olduğu yerlerde yakıt taşıma zor ve pahalı olduğunda için buralarda kullanılırken, artık şebeke bağlantısı olan şehir merkezlerinde özellikle evlerin çatılarında ve gelişmiş santral uygulamalarında kullanımı oldukça yüksektir.

## 2.6. Güneş Pillerinde Elektrik Akım Oluşumu

Güneş ışığı, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgelerin bulunan düşük enerjiye sahip fotonlar ile mor ötesi bölgede yer alan yüksek enerjili fotonlar arasında kalan ışık fotonlarının birleşmesiyle oluşur. Güneş pili teknolojisinde elektrik üretimi fotovoltatik etki ile gerçekleşmektedir. Bu etki ,güneş ışığının elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Güneş pili üzerine düşürülen ışık bir kısmı yansır ,bir kısmı güneş pili tarafından soğurulur ve bir kısımda güneş pilinin içerisinden geçer. Başka bir deyişle , yasak enerji bant aralığına sahip enerjili fotonlar , serbest elektronlar oluşturmak için soğurulurlar. Yasak enerji bant aralığındaki enerjiden az enerjiye sahip fotonlar materyal boyunca ilerler. Fotonun soğurulması ile hareketli elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. Soğurulan fotonun enerjisi kristal örgü içindeki bir elektrona verilir. Genellikle bu elektron değerlik bandı içindedir

ve kovalent bağa sıkıca bağlıdır. Foton tarafından verilen enerji elektroni iletkenlik bandı içine doğru uyarır. Bu durumda kovalent bağın bir elektroni azalmış olur ve böylece boşluk oluşmuş olur. Oluşan boşluğa komşu atomların bağlı elektronları hareket eder ve gerideki boşluk örgü boyunca yayılır. Bant aralığı enerjisine eşit enerjili fotonlar, serbest elektronları oluşturmak için absorplanırlar. Bant aralığındaki enerjiden az enerjiye sahip fotonlar materyal boyunca ilerlerler. Foton absorpsiyonu ile hareketli elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. Absorplanan fotonun enerjisi kristal örgü içindeki bir elektrona verilir. Genellikle bu elektron değerlik bandı içindedir ve kovalent bağla sıkıca bağlıdır. Foton tarafından verilen enerji, elektroni iletkenlik bandı içine doğru uyarır. Bu durumda kovalent bağın bir elektroni azalmış olur ve böylece boşluk (hol) oluşmuş olur. Oluşan boşluğa komşu atomların bağlı elektronları hareket eder ve gerideki boşluk örgü boyunca yayılır. Serbest elektronlar malzeme boyunca elektrik üretmek için akar. Gelen fotonlar soğurulduğunda, elektronlar eklemin pozitif tarafına, boşluklar ise negatif tarafa doğru hareket eder. Bu hareket neticesinde elektrik akımı meydana gelir. Şekil 2.6'da bir güneş pilinin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Bir güneş pilinin çalışma prensibi

## 2.7. Güneş Pili Teknolojisinin Çeşitleri

Güneş pili çeşitleri teknolojisi kristal yapı teknolojisi, ince film teknolojisi, birleşik teknoloji ve nanoteknoloji olmak üzere dört ana teknolojiden oluşmaktadır. Bütün güneş pili teknolojisinin çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

### 2.7.1. Tek katmanlı inorganik güneş pilleri teknolojisi

İnorganik güneş pili teknolojisi, tek katmanlı olup silisyum ve germanyum gibi yarıiletkenler kullanılmaktadır. Bu teknolojiye farklı iş fonksiyonuna sahip iki metal elektrot arasına silisyum gibi inorganik yarıiletkenlerin yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Tek katmanlı bir yapıya sahip olduğundan verimleri düşüktür.

### 2.7.2. İki katmanlı inorganik güneş pilleri teknolojisi

İki katmanlı inorganik güneş pilleri teknolojisinde n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki çeşit yarıiletken kullanılmaktadır. Bu yapılarda yük ayrımı, iki yarıiletkenler sınırı arasındaki bölgede gerçekleşmektedir. Bu iki katmanlı inorganik güneş pilleri kimyasal ve ısıya karşı oldukça kararlılardır. Bu güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %30'dur.

### 2.7.3. Tek kristal silisyum güneş pilleri teknolojisi

Güneş paneli yapımında tek kristal silisyum güneş pilleri teknolojisi önemli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojiye kullanılan tek kristal silisyumun maliyeti oldukça yüksektir. Bu yüzden bu teknoloji yerine daha ucuz olan çok kristalli güneş pilleri kullanılmaktadır. Silisyum yarıiletkeni elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri kararlı olduğundan dolayı güneş pili yapımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat saf tek kristal silisyum teknolojisi oldukça maliyetli ve zordur. Yeryüzünde oksijenden sonra en çok bulunan element silisyumdur.

Silisyum elementinin en yaygın kullanılma türü kum ve kuvarstır. Bunlar arasında en çok tercih edilen kuvarstır. Bu maddenin yaklaşık olarak %90'ı silisyumdan oluşmaktadır. Bu malzeme birçok aşamadan geçirildikten sonra %99 gibi bir saflıkta silika elde edilir. Elde edilen silikadan silisyum elde edilmektedir. Daha sonra silisyumlar saflaştırılarak yarıiletken özellik gösteren çok kristalli silisyumlar elde edilir fakat maliyetleri oldukça yüksektir. Bu güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %15 ile %23 arasındadır.

#### **2.7.4. Çok kristal silisyum güneş pilleri teknolojisi**

Çok kristal silisyum güneş pilleri tek kristal güneş pilleriyle kıyaslandığında üretimi daha kolay ve maliyeti düşüktür. Bu çok kristal silisyumun elde edilmesinde dökme metodu kullanılmaktadır. Bu metodu kısaca şu şekilde açıklayabiliriz; ilk önce tek kristal silisyumun elde edilmesi için uygulanan işlemler aynen tekrarlanır ve eritilen yarıiletken silisyum, kalıplara boşaltılarak soğumaya bırakılır. Kalıplardan çıkarılan silisyumlar kare şeklinde kesilir. Bu metotla elde edilen güneş pillerinin maliyeti düşük olmasına rağmen verimleri düşüktür. Bu güneş pillerinin verimi %12-15 arasında değişmektedir.

#### **2.7.5. İnce film güneş pilleri teknolojisi**

İnce film güneş pilleri teknolojisi, üst üste büyütülen aşırı ince yarıiletken tabakalardan oluşmaktadır. Bu güneş pilleri çok çeşitli malzemelerden özellikle amorf silisyumdan elde edilir. Amorf silisyum dışında çok kristal bakır indiyum diselenit ve kadmiyum tellür gibi malzemelerden de yapılmaktadır. İnce film hücre teknolojisinde çok çeşitli çökeltme yöntemleri vardır. Bu çökeltme yöntemlerinin maliyeti oldukça düşüktür. Bu yöntemler kullanılarak 2×2 inç büyüklüğünde güneş pili elde edilebilir. Tabakalar cam ve plastik gibi maliyeti düşük malzemeler üzerine çökeltirilir. Tek kristal silisyum, birbirlerine bireysel olarak bağlanırken ince film güneş pillerinde tek bir ünite şeklinde bağlanır. Bu güneş pillerinin arka kısmına

yansıtma yan özelliğine sahip kaplama ve iletken oksit katmanlar eklenir. Bu güneş pillerinin verimi %8-12 arasında değişmektedir.

#### **2.7.6. Amorf silisyum güneş pilleri teknolojisi**

Amorf silisyum yalıtkan benzer elektriksel özellik göstermektedir. Sonra yıllarda bilim adamları tarafından yapılan çalışmalarda amorf silisyumun güneş pillerinde kullanılması fikri ortaya atılmıştır. Günümüzde amorf silisyum, düşük güçte sahip aygıtlarda kullanılmaktadır. Çok amaçlı aygıtlar geliştirmek için karbon, germanyum, azot ve kalay ile amorf silisyum kullanılmaktadır. Amorf silisyumla elde edilen güneş pilleri yaklaşık %13'den daha verime sahiptir. Galyum arsenit ile elde edilen ince film güneş pilleri %24'den daha fazla verime sahiptir.

#### **2.7.7. Çok kristalli ince film güneş pilleri teknolojisi**

Çok kristalli ince film güneş pili teknolojisinin yapısını oluşturulan yarıiletkenlerin çok küçük olan kristal tanecikleri kullanılmaktadır. Bu güneş pillerinde kullanılan yarıiletkenler silisyumdan farklı bir yapıya sahiptir. Bu yapılarda farklı iki yarıiletken malzeme arasındaki oluşan arayüzde daha kolay elektrik alan meydana gelir. Bu güneş pili, pencere olarak adlandırılan 0,1 mikron'dan daha ince kalınlıktaki üst tabakaya sahiptirler. Bu tabaka yüksek enerji taşıyan ışınım enerjisini soğurmaktadır. Bu band boşluğu özelliğine sahip olması için yeterince ince olmalıdır.

#### **2.7.8. İnce film kalgonit güneş pilleri teknolojisi**

1960 yıllarında bilim adamları tarafından yapılan çalışmalarda  $\text{Cu}_x\text{S}$ -CdS,  $\text{Cu}_x\text{Se}$ -CdSe ve  $\text{Cu}_x\text{Te}$ -CdTe ince film güneş pili teknolojisi geliştirilmiştir. Bu güneş pillerinin yapımı oldukça kolaydır. CdS, CdSe ve CdTe filmleri kimyasal çökeltme tekniği ile üretilmektedir.  $\text{Cu}_x\text{S}$ ,  $\text{Cu}_x\text{Se}$  ve  $\text{Cu}_x\text{Te}$  tabakaları ise CdS, CdSe ve CdTe filmleri ile aynı anda CuCl çözeltisinde 1-2 dakika daldırılarak üretilir. Bu güneş

pillerinin verimi yaklaşık olarak %10 dur. Bu güneş pillerindeki bakır kalgonit tabakalar, bakır difüzyonu ile bozulduğundan dolayı artık çalışılmamaktadır.

#### **2.7.9. Kadmiyum tellür güneş pilleri (CdTe) teknolojisi**

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

#### **2.7.10. Bakır indiyum diselenit güneş pilleri teknolojisi**

Bakır indiyum diselenit güneş pilleri teknolojisinde periyodik tablonun 1., 3. ve 6. grup elementlerinin üçünün veya daha fazlasının belirli şartlar altında biraraya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu elementlerin bir araya gelmesiyle oluşan yarıiletkenin soğurma katsayısı yüksektir. Bakır indiyum diselenit güneş pili, bakır,indiyum ve selenyum ile meydana gelen birleşik bir yarıiletkendir. Bu yarıiletkenlerin iletkenliği ve öz dirençleri isteğe göre değiştirilebilir. Bu yarıiletken malzemenin ilk 1 mikron kalınlığındaki tabakası, ışığın %99'unu soğurabilir. Dış ortam şartlarına karşı çok dayanıklı ve kararlıdır. Bu özelliğinden dolayı bu yarıiletken malzemesi ticari amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca yukarıda bahsedilen yapıya Ga (galyum) elementi katılırsa, daha yüksek verime sahip güneş pilleri elde edilebilir(Öztürk 2013).

### 2.7.11. Bakır indiyum galyum diselenit güneş pilleri (CIGS) teknolojisi

İnce film güneş pili çeşitleri teknoloji çeşitlerinden biride Bakır indiyum galyum diselenittir. Bu yapı kısaca CIGS olarak ifade edilir. Bu güneş pili, esnek yapıya sahip bir yarıiletken tabaka üzerinde yapılır. Bakır indiyum galyum diselenit güneş pili diğer ince film güneş pilleriyle kıyaslandığında daha iyi bir verime sahiptir. Diğer ince film güneş pilleri %8 verime sahipken olmasına rağmen bu güneş pili %10 civarında bir verime sahiptir. CIGS ve CdTe güneş pilleri teorik çalışmalarda %30 verime sahip olması beklenirken, laboratuvar şartlarında en fazla %25 verime sahiptir (Öztürk 2013).

### 2.7.12. Çok eklemli güneş pilleri teknolojisi

Tek tip malzeme kullanılarak elde edilen güneş pilleri teroikte %30 verime sahip iken laboratuvar şartlarında %25 verim elde edilmektedir. Bu yüzden çok eklemli güneş pili teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu güneş pili çeşidinde 2 veya 2'den fazla yarıiletken tabakalardan meydana gelmektedir. Bu tabakalardan birisi mavi ışığı soğururken ,diğer tabaka ise kırmızı ışığı soğurmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı çok eklemli güneş pilleri tek tabakalı güneş pillerine göre daha yüksek verime sahiptir. Teorik olarak ideal güneş pilleri; mor ve kırmızı ötesi arasında bulunan farklı dalga boyuna sahip tabakalardan oluşabilir. Bu yapıya sahip uygun tabakalar sağlandığında %70 gibi bir verim elde edilebilir. Ancak bu ideal güneş pili uygulama açısından pek mümkün değildir. Bu yüzden bilim adamları birkaç tabakaya sahip güneş pilleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çok eklemli güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %35-40 civarındadır(Öztürk 2013).

### 2.7.13. Nanofotovoltaik güneş pilleri (NanoPV) teknolojisi

Nanofotovoltaik güneş pilleri (NanoPV) bilim adamları tarafından geleceğin güneş pili teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji nano-mikro kristale sahip yüksek verime sahip güneş pillerini kapsamaktadır. Bu güneş pilleri yapısında a-

Si:H (hidrojen amorf silikon) bulundurduğundan dolayı yaklaşık olarak %8-10 civarında bir verime sahiptir. Bu nano -yapılı güneş pilleri optik,elektriksel ve kimyasal açıdan oldukça iyi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden bu güneş pillerinin verimleri geliştirilebilir(Öztürk 2013).

#### **2.7.14. Kuantum noktalı güneş pilleri teknolojisi**

Kuantum noktalı güneş pilleri teknolojisinde yer alan kristal yarıiletkenler nanometre büyüklüğünde olup değişik yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu güneş pillerindeki kuantum noktaları basit bir çapa sahip olup , ışığın soğurulmasına olanak sağlamaktadır. Bu güneş pillerinde yer alan kuantum noktaları yapay atom olarak görev yapmaktadır. Bu noktalar 3 boyutlu kısıtlama oluşturarak taşıyıcıların kontrol edilmesine olanak sağlanmaktadır. Bu kuantum noktaları elektronlar için 3 boyutlu engel işlevi görmektedir. Kuantum noktalı yapı nanometre seviyesinde olup yasak enerji band aralıkları değiştirilebilir. Teorikte verimi %63 olarak düşünülmüştür. Kuantum noktalı güneş pillerinin verimini arttırmak için noktalar kaynaştırılarak soğurma arttırılmıştır. Bu metot ile akım sürüldüğünde çok eklemli güneş pillerinden daha yüksek verim elde edilir(Öztürk 2013).

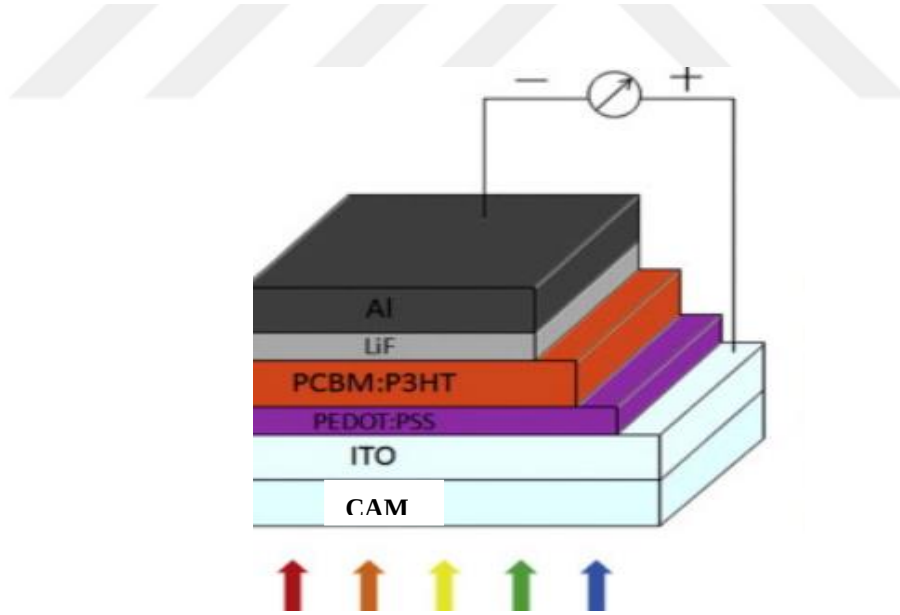
#### **2.7.15. Boya duyarlı güneş pilleri teknolojisi**

Boya duyarlı güneş pilini teknolojisi, silisyum yarıiletkeni ve su gibi çözücülerde kolay çözünebilen tuzlardan oluşan bir elektrolit sıvı içermektedir. Yarıiletken ve elektrolit üzerine güneş ışığı gönderildiğinde üretilen yakın elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılır. Güneş ışığı tarafından uyarılan taşıyıcıların kaynağı ışığa duyarlı boyalardır. Bu güneş pillerinde en çok kullanılan boya türü iyodürdür. Ayrıca, titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) gibi nanomalzemeside boya moleküllerine destek sağlamak için kullanılmaktadır. Bu güneş pillerinde elektron-boşluk taşıyıcıların oluşumu bitkilerdeki klorofil hareketine benzemektedir. Bu boyaya duyarlı güneş pillerinde taşıyıcıların oluşması bitkilerdeki fotosentez yöntemine benzemektedir(Öztürk 2013).

### 2.7.16. Organik güneş pilleri teknolojisi

Organik güneş pilleri üçüncü nesil güneş pilleri olarak adlandırılır. Bu güneş pilleri organik tabanlı malzemelerin iki elektrot arasına yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Organik güneş pillerinde organik temelli malzeme olarak yarıiletken polimerler kullanılmıştır. İletken olan bu organik moleküller istenilen özelliğe göre kolaylıkla değiştirilebilir olması, ucuz, kolay üretilibilmeleri ve hafif olmaları gibi avantajlara sahip olması onları cazip hale getirmiştir (Hoppe and Sarıçiftçi 2004). İnorganiklerin çeşitliliği sınırlı iken organik moleküllerin sayılarının milyonlar düzeyinde olması bu malzemeleden elde edilecek aygıtların verimini ve kararlılığını artırma imkânı sağlar. Kaynak sıkıntısı olmaması nedeniyle, organik malzemeler bu tip çalışmalar için çok ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. En çok kullanılan aygıt şekli, biri alıcı (donor, p) diğeri verici (akseptör, n) malzemelerin bir arada kullanıldığı pn eklem şeklindedir. Organik güneş pillerinin avantajlarından biri de kullanılan malzemelerin kimyasal yapılarının kolay değiştirilebiliyor olmasıdır. Organik malzemelerin bu özelliğiyle kullanılacak malzemelerin soğurma aralığı güneş spektrumuna uygun hale getirilerek, daha fazla foton enerjisi soğurması sağlanmıştır. Fakat verimleri anorganik malzemelerin kullanıldığı güneş pillerine göre daha düşüktür. Organik güneş pillerinin verimlerinin düşük olmasının yanı sıra kararlılık sorunları da vardır. Yani ışık, su buharı ve oksijen altında organik güneş pillerinin verimi hızlı bir şekilde düşmektedir (Kroon *et al.* 2007). Verimin düşük olması iki katmanlı güneş pillerinde oluşan elektron - boşluk çiftlerinin ayrımının sadece katmanların arayüzeyinde gerçekleştiriliyor olmasıdır. Yani arayüzeylerde elektron-boşluk çiftlerinin yeteri miktarda ayrılamamasıdır (Tang 1986). Güneş ışığının soğurulmasıyla oluşan eksitonlar, yük taşıyıcıların oluşmasını sağlamaktadır. Organik güneş pillerinde fotoakımın oluşması için eksitonların olumlu bir şekilde akması gerekmektedir. Organik güneş pillerinde yaşam süreleri uzun olan eksitonlar foto-akıma katkıda bulunurlar. Organik güneş pillerinde ışığın aktif tabakada soğurmasını arttırmak için katmanlı heteroeklem ve hacimli heteroeklem olarak bilinen iki yöntem geliştirilmiştir. Bu organik güneş pillerinde donor ve akseptör gibi iki farklı malzeme uygun çözücü sayesinde karışım halinde bulunmaktadır ve bu sayede yük ayrımı en yüksek seviyeye çıkarılmıştır.

Uygun çözücülerin kullanılmasının dışında güneş pillerine sıcaklık uygulanması da önemli bir etkidir. Ancak bu işlemler malzemeden malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Ancak aktif tabaka olarak kullanılan filmlerin düzgün olarak oluşması için malzemelerle katkılanması gerekmektedir. Bütün durumlar dikkate alınarak organik malzemelerin güneş pilleri için uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle organik güneş pillerinde güç dönüşüm verimini arttırmak için çok farklı polimerlerin üretilmesi hız kazanmıştır (Liang *et al.* 2010). Bu çalışmalar polimer üretim teknolojisinin gelişmesine katkı sağlamıştır. İletken polimerler, maliyetleri düşük olduğundan ve ince film oluşturabilmesinden dolayı kullanım alanları her geçen gün biraz daha genişlemektedir. Bu kullanım alanlarına organik fotovoltailer (OPV), alan etkili transistörler (FET), fotodiyot teknolojisi, lazer teknolojisi, yarıiletkenler, çipler, entegre devreler, sensörler, bilgisayar ve çeşitli teknolojik aygıtlar örnek verilebilir (Moons 2002). Şekil 2.7’de P3HT:PCBM aktif tabakalı klasik organik güneş pilinin şematik gösterimi gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** P3HT:PCBM aktif tabakalı klasik organik güneş pilinin şematik gösterimi

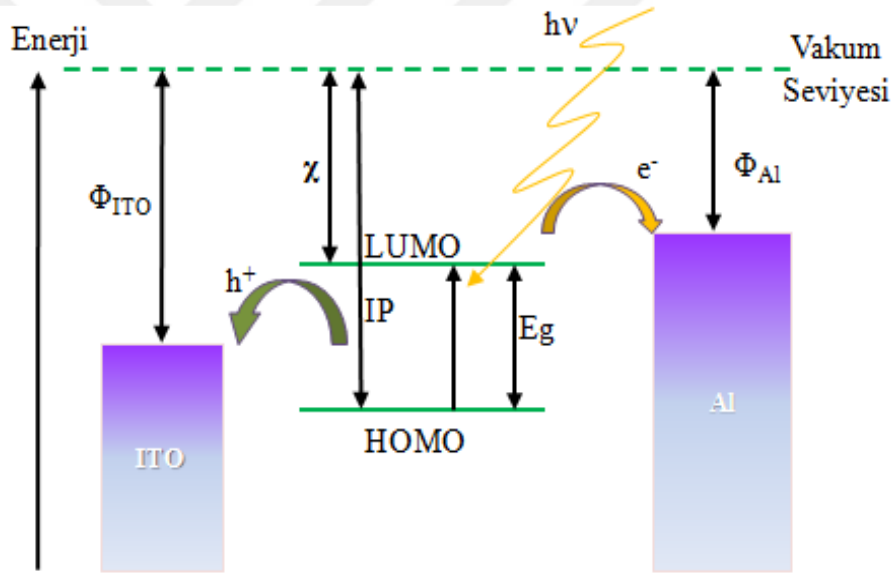
### 2.7.16.a. Organik güneş pillerinin çalışma prensibi

Organik malzemelerde üç boyutlu kristal yapı yoktur, farklı molekül içi ve moleküller arası etkileşimler mevcuttur. Organik güneş pillerinin çalışma prensibini anlamak için p-n eklemnin çalışma prensibi dikkate alınmaktadır. Organik güneş pillerinde ışığın elektrik akımına dönüşmesi aşağıdaki adımlarla açıklanabilir;

1. Işığın soğurulmasıyla elektron -boşluk çiftinin oluşması,
2. Donor ve akseptör bölgeleri arası arayüzeyinde elektron -hol çiftlerinin difüzyonu,
3. Arayüzey bölgesinde yük ayrımının olması,
4. Son olarak akımın elde edilmesi için boşlukların anotta ve elektronların katoda toplanması (Gregg and Hanna 2003).

Organik güneş pillerinin çalışma prensibine göre elektron-boşluk çiftlerinin kısa mesafelerde ayrışması gerekmektedir. Elektron transferi ile gerçekleşen elektron-boşluk çiftlerinin ayrışması metal kontak ile organik yarıiletken arayüzeyinde gerçekleşmektedir. Elektron ve boşluklar coulomb çekim kuvvetinden daha güçlü bir elektrik alan tarafından ayrılırlar. Ayrılan elektron ve boşluklar birbirinden farklı bölgelere taşınmaktadır. Bu işlem uygulanan potansiyelden oluşan elektrik alanda gerçekleşmektedir. Geri yük geçişini önlemek amacı ile elektron ve boşluklar farklı malzemelerde taşınmaktadır. Yani bu sistemlerde elektron iletkenliği iyi olan akseptör ve boşluk iletkenliği iyi olan donor malzemelerin kullanımı daha uygundur. Organik güneş pillerinde yüksek verim elde etmek için yarıiletken malzeme ile metal elektrot arasında herhangi bir enerji engelini oluşmaması gerekmektedir. Bu enerji engelini engellemek için bir ilave malzeme kullanılır ve organik güneş pillerinin verimleri arttırılır (Zafer 2006).  $h\nu$  enerjisine sahip bir foton yasak enerji aralığının enerjisinden büyük enerjiye sahip olması durumunda foton yarıiletken malzemeler tarafından soğurulur ve elektron arkasında bir boşluk bırakarak HOMO yani en yüksek işgal edilmiş molekül orbital seviyesinden LUMO olarak adlandırılan en düşük işgal edilmemiş molekül orbital seviyesine çıkar. Enerji seviyeleri ve ışığın soğurulması şekil 2.8 de gösterilmiştir. Bu süreç elektron ve boşlukların ayrılmasıyla devam etmektedir.

Bu sistemlerde yük ayrımının olması için elektrik alana ihtiyaç vardır. Elektrik alan ise iş fonksiyonlarından sağlanmıştır (Spanggaard and Krebs 2004). Organik güneş pillerinde yükler ayrıştıktan sonra elektronlar katoda, boşluklar anoda doğru hareket ederek potansiyel farkından akım üretirler. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere  $\chi$  elektron ilgisi olup elektronu LUMO bandından vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan enerjidir. IP ise iyonizasyon enerjisi olup bir atom veya molekülden bir elektron çıkarmak için gereken minimum enerjidir.  $\Phi_{Al}$  ve  $\Phi_{ITO}$  iş fonksiyonları olup elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir.  $E_g$  yasak enerji aralığı olup HOMO seviyesinin maksimumu ile LUMO seviyesinin minimumu arasındaki enerji farkıdır.



Şekil 2.8. Işığın soğurulması ve yük taşıyıcı transferleri (Schilinsky *et al.* 2002).

## 2.8. Güneş Pillerinde Enerji Kayıpları

Güneş pilleri enerji kayıplardan dolayı düşük verimle çalışmaktadırlar. Güneş pillerinde ilk çalışma anından başlayarak görülen kayıplar aşağıdaki gibi verilmiştir:

### 2.8.1. İdeal güneş pillerinde enerji kayıpları

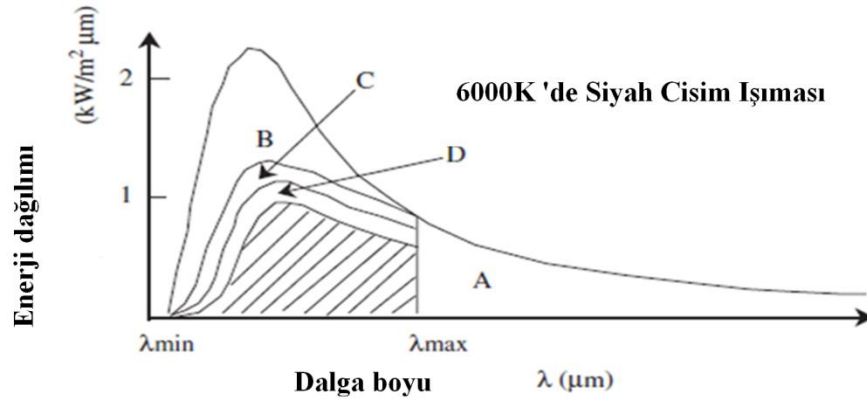
İdeal bir p-n eklemli güneş pillerinin verimliliğini kısıtlayan birkaç etken vardır;

**Birincisi;** yasak enerji aralığının enerjisinin altındaki düşük enerjili fotonların yarıiletken tarafından soğurulamıyor olmasıdır. Güneş pilleri yeterli kalınlıkta olsalar bile yasak enerji aralığından düşük enerjili fotonlar ( $h\nu < E_g$ ) yarıiletkenlerde soğurulmazlar. Bu enerji kaybı Şekil 2.9'da gösterilmiştir ve bu da 6000 K'de kara cisim ışıması ihtiva edilen bir güneş enerji spektrumudur (Şekil 2.9, A bölgesi).

**İkincisi;** yasak enerji aralığının enerjisinin üzerindeki fotonlar fazla enerjisini ( $h\nu - E_g$ ) yapıya ısı olarak aktarması sonucu bir enerji kaybı meydana gelir. Fotonların bu fazla enerjisi ( $h\nu - E_g$ ) örgü titreşimlerine katkı sağlar (Şekil 2.9, B bölgesi).

**Üçüncüsü;** sırasıyla elektronlar ve holler iletkenlik bandının altında valans bandının üstünde oluşturulmuş olsa bile, açık devre gerilimi yasak enerji aralığından daima küçüktür, çünkü fermi enerji seviyesi yasak enerji seviyesinin içine yerleşmiştir. Bir p-n ekleminde maksimum voltajdan tam olarak yararlanamadığından dolayı oluşan bu kayıp da üçüncü sebeptir. Şekil 2.9 C ile gösterilmiştir.

**Dördüncüsü,** dolum faktörünün 1'den küçük olmasıdır . Eğer maksimum güç optimum yükten çıkarılmış ise , çalışma voltajı açık devre voltajından daha küçük olur ve bu yüzden dolum faktörü küçülür (Şekil 2.9 D). Bu nedenle yalnızca Şekil 2.9'da taralı alanla gösterilen enerji p-n eklemli güneş pilleri tarafından kullanılabilir.



**Şekil 2.9.** Güneş ışığının ve enerji kayıplarının şematik olarak spektral dağılımının gösterimi

A - yarıiletken tarafından soğurulamayan enerjiye karşılık gelir, B- ısıya dönüşen aşırı enerji kaybı , C- voltaj faktörüne bağlı kayıp ve D- dolum faktörüne bağlı kayıp

### 2.8.2. Gerçek güneş pillerinde enerji kayıpları

Genellikle gerçek güneş pillerinin güç dönüşüm verimi sahip oldukları çeşitli mekanizmalardan dolayı ideal güneş pillerinin veriminden düşüktür. Bu kayıplar aşağıda açıklanmıştır.

**1) Yansıma kayıpları:** Bu kayıp mekanizması ışığın güneş pili üzerine düştüğü yüzeyde gözlenir. Güneş pili, üzerine düşen ışığın tamamını soğurmaz bir kısmının yüzeyden yansıtır. Yüzeydeki yansılardan dolayı soğurulan fotonların sayısı yani fotoelektronların sayısında azalmalar gözlenir. Bu durum da kısa devre akımında azalmalara neden olur. Örneğin; saf, silisyumun yansıma oranı %30 olduğundan sadece gelen güneş enerjinin %70'ini enerji dönüşümü için kullanabilir. Yansımadan kaynaklanan kayıplar aktif tabakanın kırılma indisine ve sönüm katsayısına da bağlıdır. Bu iki parametrede dalga boyunun bir fonksiyonudur. Güneş pillerinde bu yansıma kayıplarını azaltmak için yüzey yansıma önleyici bir malzeme ile kaplanır. Kullanılacak yansıma önleyici malzemenin kırılma indisi ve kalınlığı güneş pillerinin verimini önemli ölçüde etkiler (Norman *et al.* 2006).

**2) Rekombinasyon Kayıpları:** Aktif tabakada soğurulan fotonlar elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasına neden olurlar. Oluşan elektron-boşluklar arayüzeye ulaştıklarında yeniden birleşmeden birbirlerinden ayrılabilirler. Şayet birbirinden ayrılarak serbest

haldeki yüklere dönüştürülemezlerse güneş pillerinin elektrotları arasındaki potansiyel farka sebep olan yükler yok olmuştur. Bu durum güneş pillerinde açık devre voltajının azalmasına sebep olur. Bu rekombinasyon kayıpları güneş pillerinde gözlemlenen en baskın kayıp mekanizmasıdır ve rekombinasyon kayıplarına birçok mekanizmadan katkı gelir. Bunlar; band dan banda rekombinasyon, tuzaklar yardımıyla rekombinasyon, yüzeydeki rekombinasyon ve Auger rekombinasyonu olarak sınıflandırılabilir. Rekombinasyon, iletkenlik bandındaki bir elektron ile valans bandındaki boşluğun enerji yaymak suretiyle birleşmesi olayıdır. Tuzaklar yardımıyla yeniden rekombinasyon güneş pillerinde en baskın rekombinasyondur ve güneş pillerinde kullanılan malzemelerin katkı atomları içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu katkı atomları, yarıiletkenin yasak enerji aralığında enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur. Oluşan bu enerji seviyeleri elektron ve boşlukları yakalayan bir tuzak görevi yapar. Tuzaklar yardımıyla rekombinasyon iki aşamalı bir süreçtir. Elektronlar ve boşluklar önce rekombine olurlar sonra da valans bandına dönerler. Yüzeydeki rekombinasyon, kullanılan yarıiletken malzemelerin yüzeyinde doymamış bağlar içermesinden kaynaklanır. Bu doymamış bağların hepsi bir rekombinasyon merkezi görevi yapar. Yüzeyde oluşturulan yükler doymamış bağlara düşerler orada boşluklarla birleşirler. Auger rekombinasyonu özellikle güneş pilleri yüksek şiddete maruz bırakıldığında gözlemlenen bir rekombinasyondur. Auger rekombinasyonu üç parçacıktan oluşan bir süreçtir. Valans bandında bulunan bir boşluk iletkenlik bandındaki bir elektron ile birleştiğinde açığa çıkan enerji iletkenlik bandında bulunan diğer bir komşu elektron tarafından soğurularak elektronun daha yüksek bir enerji seviyesine çıkmasına neden olur. Bu elektron kazandığı enerjiyi salarak iletkenlik bandına geri döner. Deplasyon bölgesinde gerçekleşen rekombinasyonlar, bu bölgede bir elektrik alanının varlığından dolayı yüzeydeki rekombinasyonlardan daha az önemlidir. Deplasyon bölgesindeki elektron-boşluk çiftleri rekombinasyona uğramadan elektrik alan tarafından ayrışır (Sajjad 2013).

**3) Seri ve şönt direnç kayıpları:** Seri direnç bulk yarıiletken, kontak ve bağlantılar arasındaki temastan kaynaklanır. Şönt direncin kaynağı ise güneş pillerinin kenarları boyunca meydana gelen sızıntı akımları ve örgü kusurlarıdır. Güneş pilleri yeteri kadar kalın olmadığı zaman ışığın bir kısmı güneş pili boyunca geçer yani soğurulmaz ve

kayıplar meydana gelir. Sınırlı üretim maliyeti altında ideal ve kaliteli güneş pili üretmek zordur bu yüzden kayıpların toplamını azaltmak gerekir (Neamen 2003).

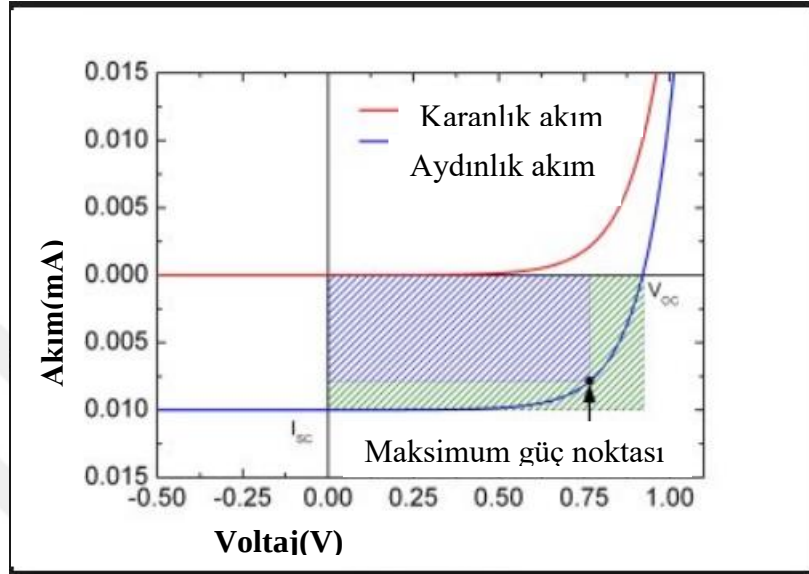
**4) Isısal Kayıplar:** Güneş pillerine gelen ışığın enerjisi bir elektron-boşluk çiftinin oluşması için gereken enerjiden fazladır. Bu fazla enerji ortama ısı olarak bırakılır bu durumda güneş pillerinin ısınmasına sebep olur. Bu durum yasak enerji aralığını, difüzyon uzunluğunu, azınlık taşıyıcıların ömrünü ve katkısız taşıyıcı yoğunluğunu etkiler. Yani güneş pillerinin sıcaklığındaki artış ile difüzyon uzunluğu, azınlık taşıyıcı konsantrasyonu ve katkısız taşıyıcı yoğunluğu artarken yasak enerji aralığı azalır. Bu da doyma akımının artmasına sebep olur. Doyma akımının artması açık devre geriliminin azalması anlamına gelir (Sze 1985).

## 2.9. Heteroeklemler

Heteroeklem birbirinden farklı yasak enerji band aralığına ve kristal yapısına sahip iki yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşur. Heteroeklemler bir araya getirilen yarıiletkenin iletim tiplerine bağlı olarak izotip ve anizotip eklem olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Aynı iletim tipine yani aynı katkıya sahip (her ikisi  $n$ -tipi ya da  $p$ -tipi) yarıiletkenlerin oluşturduğu eklem izotip, farklı iletim tipine sahip (biri  $n$ -tipi diğeri  $p$ -tipi) yani farklı katkıları olanlarda anizotip heteroeklem denir (Sharma and Purohit 1974). Şekil 2.9'da açıklanan dar band yasak enerji aralığına ( $E_{g1}$ ) sahip  $p$ -tipi yarıiletken ile geniş yasak aralığına ( $E_{g2}$ ) sahip  $n$ -tipi yarıiletkenler sırasıyla  $\Phi_1$  ve  $\Phi_2$  iş fonksiyonlarına  $\chi_1$  ve  $\chi_2$  elektron ilgisine sahiptirler. İş fonksiyonu elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine, elektron ilgisi ise elektronu iletkenlik bandından vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan enerjidir. Bu iki yarıiletken arasında kontak sağlandığında heteroeklemler termal dengeye gelene kadar eklemelerden karşılıklı olarak elektron-boşluk akışı olacaktır.  $P$ - $n$  eklem bölgesinde olduğu gibi  $n$  bölgesinde iyonlaşmış donörler ve  $p$  bölgesinde ise iyonlaşmış akseptörler ile heteroeklemlerde bir deplasyon bölgesi oluşmuştur. Sistem dengede iken her iki taraftaki fermi seviyeleri çakışıktır. Heteroeklemleri oluşturan yarıiletkenlerin yasak enerjileri farklı olmasından dolayı iletim bandı sınırında bir süreksizlik oluşur. Bantlarda oluşan süreksizlikler, güneş pillerinde istenmeyen bir durumdur. Ancak uygun katkılama işlemleri ve uygun



göstermektedir. Bu eğriden belirlenen parametreler birbiriyle ilişkilidir. Şekilde görülen küçük dikdörtgenin büyük dikdörtgene oranı dolum faktörünü vermektedir.



Şekil 2.11. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık lineer  $I$ - $V$  karakteristiği

### 2.10.1. Güç dönüşüm verimi

Güneş pilinin güç dönüşüm verimi  $\eta$  sembolüyle gösterilir ve güneş piline uygulanan güneş ışığının gücü ile pilin çıkış gücünün birbirine oranı şeklinde ifade edilir. Yani açık devre gerilim, kısa devre akım ve dolum faktörünün çarpımının yani pilden çıkan toplam gücün pile gelen ışığının gücüne oranıyla hesaplanır. Dolayısıyla verim;

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

### 2.10.2. Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )

**Kısa devre akımı** bir güneş pilinde gerilimin olmadığı ( $V=0$ ) zamanki akım değeridir. Güneş pillerinde güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde kısa devre akımı önemli bir parametredir. Güneş pilleri tarafından soğurulan ışık miktarı ve bu ışığın taşıyıcılara

dönüşme oranı (dahili kuantum verimi-IPCE) kısa devre akımını belirler. Kısa devre akımı yük direnci sıfırken üretilen akımdır . Bu yüzden elde edilen güneş pillerinin seri direnci mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bu durumda elektron-boşluklar ayrılır ve bu yük taşıyıcılar içte var potansiyel tarafından sürülür.

### 2.10.3. Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )

Güneş pili devresinin açık olduğu zamandaki kısa devre akımı ( $I_{sc}=0$ ) sıfırdır. Kısa devre akımının sıfır olduğu anda ölçülen gerilim değerine açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) denir. Genellikle açık devre voltajı 0.5 - 1.5 V aralığındaki değerleri alır. Güneş pili devresi kapalı değil iken yani açıkken aydınlatılırsa elektronlar ve boşluklar ayrılır. Bu elektron ve boşluklar sırasıyla düşük ve yüksek iş fonsiyonlarına doğru akarlar. Açık devre geriliminin ulaşacağı en yüksek değer iki elektrodun iş fonsiyonu arasındaki farka bağlıdır. Polimer malzemelerde HOMO seviyesinin arttırılması ve alıcının LUMO seviyesinin azaltılması açık devre voltajının artmasına sebep olur. Açık devre gerilimi polimere dayalı güneş pillerinde aktif tabakanın nano-morfolojisinden etkilenebilir (Liu *et al.* 2001). Açık devre gerilimi, devreden akım geçmiyor iken ölçüm alındığından dolayı yoldan ısıtım şiddetine bağlı olur.

### 2.10.4. Dolum faktörü (FF)

Dolum faktörü, güneş pillerinin seri direnci ve organik katmanlardaki yük taşıyıcıların hareketliliğiyle belirlenir. Dolum faktörü güneş pillerinin kalitesinin bir ölçüsüdür. Organik güneş pillerinde dolum faktörü değeri yaklaşık olarak 0.55-0.7 aralığındadır. Dolum faktörü, açık devre gerilimi, kısa devre voltajı ve maksimum gerilim- akımın oranına doğrudan bağlıdır. Buna göre;

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

formülüyle elde edilir. Bu oranın 1 olması sadece teoride mümkündür. Bu sebeple 0.8 ve üstü değerlerdeki  $FF$  iyi bir değer olarak kabul edilebilir. Yapılan güneş pilleri ideal diyot karakteristiğine ne kadar yakınsa dolum faktörü de o kadar yüksek olur. Bu durumda dolum faktörü ne kadar büyük ise elde edilen güneş pillerinin verimi de o kadar büyük olur. Güneş pilleri yapımında kullanılan malzemelerin kontak durumunda oluşturduğu iç direnç ve paralel direncin dolum faktörü üzerinde önemli etkisi vardır. Elde edilen güneş pillerinde akımın aygıt üzerinden akması için paralel direnç büyük olmalıdır. Güneş pillerinin verimi dolum faktörü arttıkça artar. Yüksek dolum faktörü değerlerinin elde edilmesinde mobilitenin önemi büyüktür (Kietzke 2007).

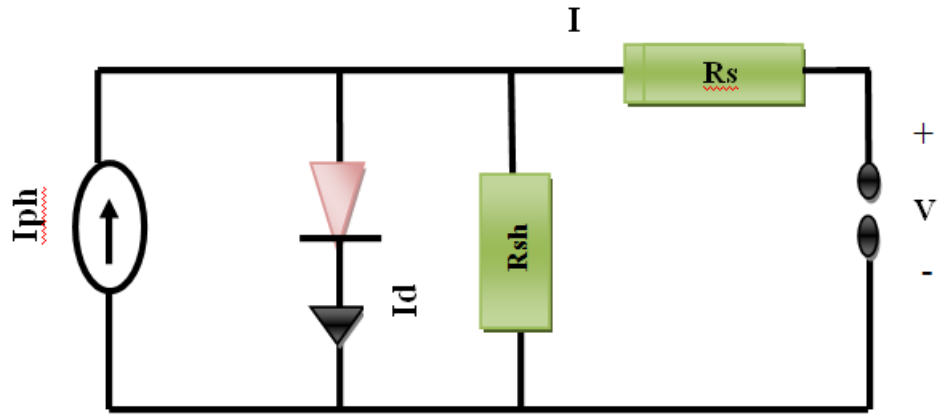
#### 2.10.5. Maksimum güç noktası (MPP)

**Maksimum güç noktası**, I-V grafiğinde akımın ve gerilimin maksimum olduğu noktayı ifade eder. Bu noktada elde edilen akım, pilin maksimum akımı ( $I_{mpp}$ ), gerilim ise pilde elde edilen maksimum gerilimdir ( $V_{mpp}$ ). Maksimum güç, verim hesaplamasındaki oranlamada kullanılmak için elde edilir. Buna göre;

$$MPP = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \text{ (mW) dir.} \quad (2.3)$$

#### 2.11. Bir Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi

Şekil 2.12’de örnek bir güneş pilinin eşdeğer devresi gösterilmiştir. Güneş pili, doğrultucu bir diyoda paralel bağlanmış bir akım kaynağı olarak düşünülebilir. Burada  $R_s$  ve  $R_p$  güneş pili verimini etkileyen seri ve paralel direnç değerlerini göstermektedir. Paralel dirençi kristal içerisindeki kusurlar meydana getirirken, seri dirençi yarıiletken yapılarındaki kontaklar ve yarıiletken malzeme içindeki tabakaların iç dirençleri oluşturmaktadır. Paralel direnç etkisi güneş pillerinin açık devre gerilimini ve dolum faktörünü azaltan bir etkidir. Seri direnç etkisi ise güneş pillerinin kısa devre akımını ve dolum faktörünü azaltan bir etkidir. Bu devredeki bütün parametreler sıcaklığa ve ışık şiddetine bağlıdır.



Şekil 2.12. Bir güneş pilinin eşdeğer devresi

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Giriş

Bu bölüm klorobenzen ve kloroform çözücülerini kullanarak referans P3HT:PCBM ile Altın (Au), Gümüş (Ag) ve bunların alaşımı olan Altın (Au) - Gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmış P3HT:PCMB'e dayalı organik güneş pillerinin yapımında kullanılan malzemeler, bunların hazırlanma prosedürü ve güneş pillerinin üretimi ve karakterizasyonu ile ilgili bilgileri içermektedir. Bu çalışma, organik güneş pillerinin hazırlanması, fabrikasyonu ve karakterizasyonu olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada ITO'nun kimyasal olarak temizlenmesi, PEDOT:PSS'in filitreden süzülmesi, P3HT:PCBM'in kloroform ve klorobenzen çözeltilerinde uygun oranlarda hazırlanması, Altın ve Gümüş nanoparçacıkların sentezlenmesi ve çözelti olarak hazırlanması gibi işlemleri içermektedir. İkinci aşamada klorobenzen ve kloroform çözücülerıyla hazırlanmış aktif tabaka kullanılarak referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pili, aynı tasarımda klorobenzen ve kloroform çözücülerini kullanarak hazırlanan aktif tabakaya Altın nanoparçacığı katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AuNP/LiF/Al , Gümüş nanoparçacığı katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AgNP/LiF/Al ve Altın-Gümüş alaşımı katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au:AgNP/LiF/Al organik güneş pillerinin yapımı gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise elde edilen farklı oranlarda nanoparçacık katkılanmış organik güneş pillerinin optik , morfolojik , yapısal analizleri yapıldı. Elde edilen güneş pillerinin karanlık ve ışık altındaki *J-V* (akım yoğunluğu - voltaj) ölçümleri yapıldı. Organik güneş pil yapımında kullanılan cihazlarda bu bölümde anlatılacaktır.

### **3.2. Organik Güneş Pillerinin Üretiminde Kullanılan Cihazlar**

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

#### **3.2.1. Temiz oda (Clean room)**

Temiz oda havada uçan partikül sayımının yapılan ölçümler ile sürekli olarak denetim altında tutulduğu, parçacık girişini, parçacık çoğalmasını ve parçacık barınmasını en aza indirecek şekilde inşa edilen ve kullanılan, ayrıca sıcaklık, nem, basınç, hava akış çizgileri gibi diğer değişkenlerin gerekli ölçüde denetim altında tutulduğu özel odalardır. Temiz oda sistemleri günümüzde, yarıiletken sanayi, iletken sanayi, elektronik sanayi, optik üretim sanayi gibi birçok alanda öncelikli gereksinimler arasındadır. Bu anlamda kontrol altında tutulan parçacık sayısına göre uluslararası standartlarca belirlenmiş (ISO 14644) referans alınması gereken bir kaynaktır.

#### **3.2.2. Atmosferik kontrollü, sızdırmaz, oksijensiz kabinler (Eldivenli kabinler)**

Atmosferik şartların kontrol altında tutulduğu ve oksijenin olmadığı vakum odası olarak adlandırılan bu kabinlerin güvenlik seviyesi Class III dür. Bu Class III güvenlik seviyesine sahip temiz odalar feet 3 başına 0,5 mikron ve daha büyük parçacıkların toplam sayısı 100 ile 1000 arasında değişen bir özelliğe sahiptir. Argon, azot veya helyum gibi asal gazlar kabinler içerisinde özel bir anarobik atmosfer oluşmasını sağlar. Bu oksijensiz kabinler kapalı devre gaz döngüsüne sahip olup , difüzyon pompası ve zeolidler yardımıyla ortam konsantrasyonunu bozacak H<sub>2</sub>O ve O<sub>2</sub> dışarı atmaktadır. Laboratuvarımızda kullandığımız kabinler içerisinde spin kaplama cihazı, sıcak plate, güneş simülatör, termal buharlaştırma ünitesi ve elektriksel karakterizasyon ölçüm cihazı vardır. Çalışmalarımızda aktif tabakanın kaplanma ve tavlama işlemleri, metal buharlaştırma işlemleri ve üretilen aygıtların elektriksel

ölçümleri bu kabin içinde yapıldı.Çalışmalarımızın yapıldığı eldivenli kabin sistemi Şekil 3.1’de görülmektedir.



**Şekil 3.1.** Laboratuvar’da bulunan atmosferik kontrollü, sızdırmaz, oksijensiz eldivenli kabinin fotoğrafı

### 3.2.3. Çeker ocak

Laboratuvar ortamının temelini oluşturan cihazlar arasında yer alan çeker ocak hassas testlerin gerçekleşmesi için kullanılması gereken en önemli sistemdir. Çeker ocaklar laboratuvar ortamlarında meydana gelen zararlı gaz ve buharlar uygun emiş gücüne ve çalışma koşullarına dayanıklı olarak üretilmiştir. Kullandığımız laboratuvarlarda ITO veya altlık olarak kullanılacak diğer malzemelerin kimyasal temizliği çeker ocakta yapılacaktır.

### 3.2.4. Döndürme ile film kaplama cihazı

Döndürme kaplama ile organik-inorganik çözeltiler bir alttaş üzerinde döndürülerek merkezci kuvvetin etkisiyle tüm alana yayılır ve kaplanır. Bu yüzden her biri

laboratuvarlarda yüksek verim ve hatasız düzeyde homojen kaplama sağlamak amacıyla tasarlanmış ve üretilmiştir. Tez çalışmasında PEDOT:PSS ve P3HT:PCBM aktif tabakanın kaplanması bu sistem ile yapılacaktır.

### 3.2.5. Termal buharlaştırma ünitesi

Organik Güneş pillerinde elektron taşıyıcı olarak kullanılan Al metalinin kaplanmasında termal buharlaştırma sistemi kullanılacaktır. Bu sistem eldivenli kabin içine bağlanmıştır. Sistemin kaplama hızı, kalınlık ve güç değerleri dışarda bilgisayar ile kontrol edilmektedir. Turbo pompa  $10^{-8}$  Torr vakuma düşmektedir. Ayrıca sistem organik malzemeleri ve metali buharlaştırmak için iki farklı potaya sahiptir. Potaların birinde Al metali buharlaştırılırken diğerinde elektron taşıyıcı tabaka olarak kullanılan LiF buharlaştırılmaktadır.

### 3.2.6. Yapay güneş ışığı cihazı (Solar simülatör)

Yapay Güneş Işığı Cihazı doğal güneş ışığına benzer ışık üreten bir cihazdır. Bu cihazın amacı kapalı sistem içerisinde üretimi tamamlanan aygıtı aydınlatarak onun karakterizasyonunu yapmaktır.

### 3.2.7. *I-V* (akım voltaj) karakterizasyon sistemi

Eldivenli kabinlerde yapılan organik güneş pillerinin karanlık ve aydınlık ölçümleri dışarı çıkarılmadan bilgisayar programı ile KEITHLEY 4200 multimetre yardımıyla yapılacaktır. Bu aygıtın kısa devre akımı, açık devre voltajı, doluluk faktörü gibi karakteristik parametreleri *I-V* (akım-voltaj) ölçümlerinden hesaplanır.

### 3.2.8. Isıtıcı tabla (Hot plate)

Isıtıcı tablalar laboratuvarlarda numune tüpleri, beherleri ısıtmak ve numuneleri tavlama için kullanılır. Sayısal sıcaklık göstergesiyle numune sıcaklıkları hassas şekilde kontrol edilebilir.

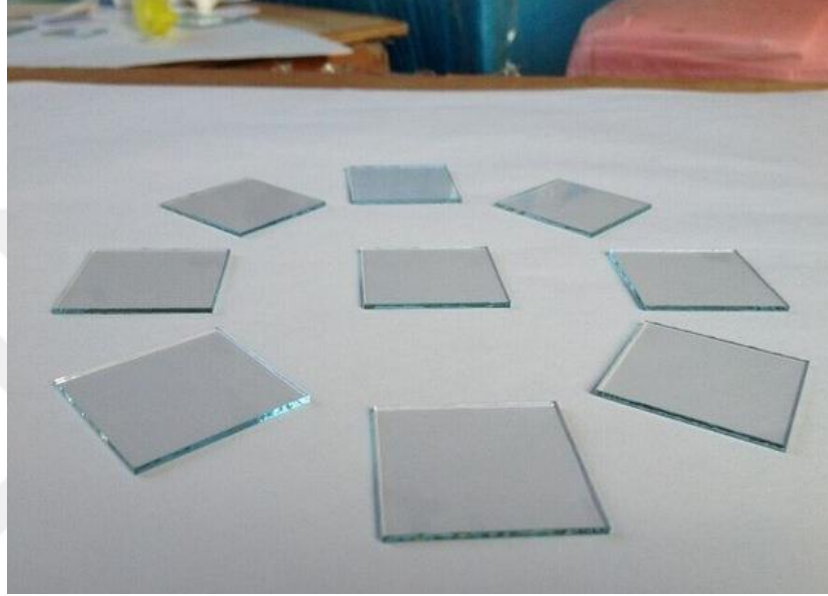
### 3.3. Organik Güneş Pili Üretiminde Kullanılan Materyaller

Organik güneş pillerinin üretiminde hem ışık geçirgenliği hem de iletkenliğinden dolayı alttaş olarak indiyum kalay oksit (ITO) kullanılmıştır. Boşluk taşıyıcı katman veya elektron engelleyici katmanı olarak PEDOT:PSS, aktif tabaka olarak da farklı çözücüler kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM karışımı, elektronların kolay taşınmasını sağlayan katman olarak da LiF ve metalizasyon işlemi için de Al metali kullanıldı. Altın ve Gümüş nanoparçacıkları Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Metin araştırma grubu tarafından sentezlendi. Organik güneş pillerinin yapımı ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanoaygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan class 1000 nanoparçacıklardan arındırılmış oda (clean room) şartlarında ve eldivenli kabinler içerisinde gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3.1. ITO (İndiyum kalay oksit)

İndiyum oksit ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ve kalay oksit ( $\text{SnO}_2$ ) karışımı olan indiyum kalay oksit (ITO) iyi bir saydam iletken oksittir. Bu yapı indiyum oksit yapısına kalay atomlarının katkılanmasıyla elde edilen yapısı bozulmuş n-tipi geniş bant aralıklı bir yarıiletkenidir. ITO filmleri görünür bölgede yüksek ışık geçirgenliğine ve yüksek iletkenliğe sahip olduğundan güneş pilleri, fotodiyot gibi çeşitli elektronik uygulamalarında kullanılmıştır. ITO en yaygın kullanılan şeffaf iletken oksittir. Deneysel çalışmalarım boyunca direnci 8-12  $\Omega$ , dalga boyu 550 nm ve geçirgenliği %83 özelliğe sahip ITO kullanıldı. ITO'nun iş fonksiyonu 4,8 eV olup organik güneş pillerinde alttaş ve elektron toplayıcı tabaka olarak kullanılmaktadır (Nickel *et al.* 2009). Optik bant

aralıkları 3 eV'dan büyük malzemeler olarak bilinmektedir. ITO'nun dezavantajları ise; indiyumun az ve maliyetinin çok yüksek olması, ITO'lerin esnek olmamaları ve kırılkan olmasıdır. Şekil 3.2'de organik güneş pillerinde kullanılan ITO'ların kesilmiş görüntüsü görülmektedir.

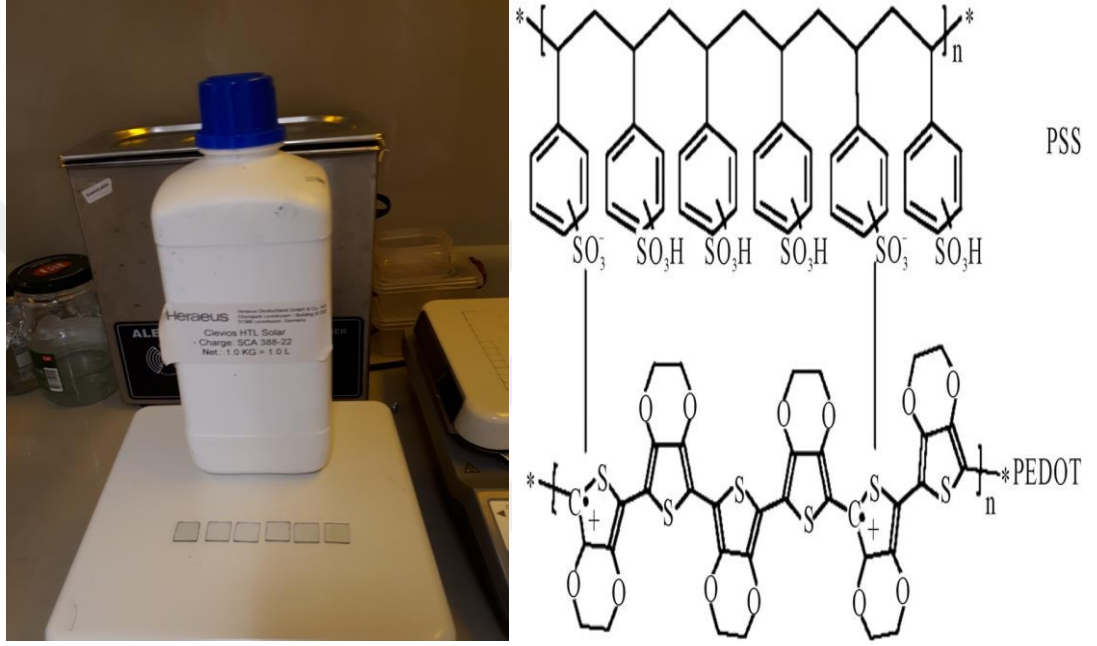


**Şekil 3.2.** Organik güneş pillerinde kullanılan ITO'ların kesilmiş görüntüsü

### 3.3.2. PEDOT:PSS

PEDOT:PSS, sodyum polistiren sülfonat ve konjuge polimer olan poli (3,4 etilendioksitiyofen)'in karışımıyla elde edilen su bazlı bir organik çözeltilidir. Yüksek bir şekilde şekil değişimine sahip olmasından dolayı değişik uygulamalarda saydam, iletken polimer olarak kullanılır. Bu su bazlı organik çözeltiliden elde edilen filmler güneş pillerinde, transistörlerde, elektrokromatik cihazlarda ve genel elektrik devreleri gibi birçok sistemlerde kullanılmaktadır (Nardes *et al.* 2008). Organik güneş pillerinde ITO ve aktif tabaka arasında yer alan PEDOT:PSS açık devre geriliminde artış sağlamaktadır. PEDOT:PSS organik güneş pillerinde sadece boşluk taşıyıcı ve eksiton engelleyici olarak çalışmaz aynı zamanda ITO kaplı cam yüzeyi pürüzleştirir. Ayrıca aktif tabakayı oksijene karşı korur ve elektron tuzaklarına neden olan katodun aktif katmana difüze olmasını engeller (Benanti and Venkataraman 2006). Şeffaf, iletken

olması ve ITO yüzeyine homojen dağılmasından dolayı organik güneş pillerinde çok tercih edilen bir malzemedir. Bu tez çalışmam boyunca Heraeus-Clevios pH 500 PEDOT:PSS kullandık. Şekil 3.3’de PEDOT (altta) ve PSS’nin (üstte) kimyasal yapısı gösterilmektedir.

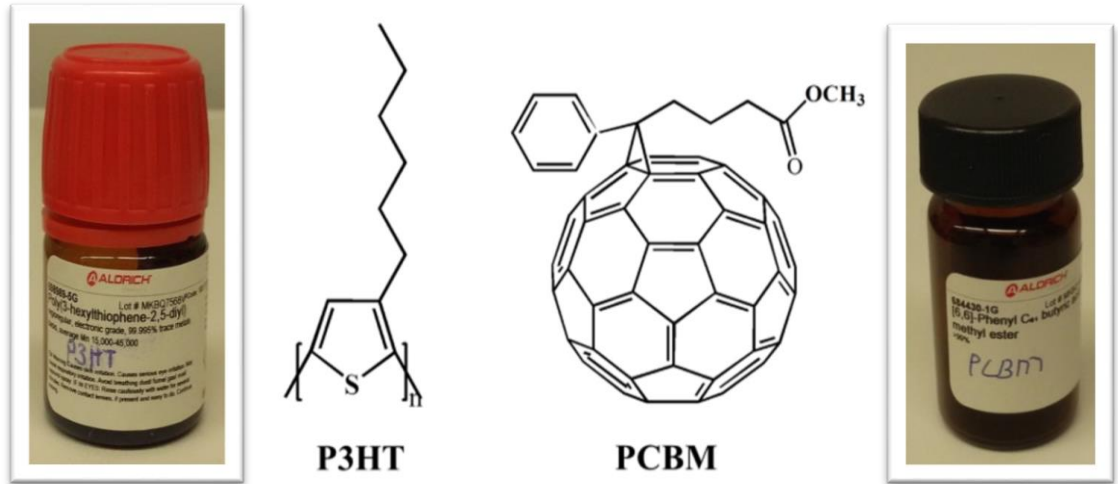


**Şekil 3.3.** PEDOT (altta) ve PSS’nin (üstte) kimyasal yapısı

### 3.3.3. P3HT:PCBM

P3HT poly(3- hexylthiophene) iyi çözünürlüğü, kimyasal kararlılık ve yüksek elektriksel iletkenliğinden dolayı geniş alanda kullanılma özelliğine sahiptir. 650 nm’lere kadar uzanan soğurma özelliğinden dolayı güneş spektrumuyla uyumludur ve bundan dolayı organik güneş pillerinde en çok tercih edilen bir polimerdir. P3HT, Poli (3-heksiltiyofen), tiyofenin polimerizasyonu ile meydana gelir. Yüksek mobilite özelliğine sahip P3HT organik güneş pillerinde akseptör (p -tipi) malzeme olarak kullanılır. Üzerinde en çok çalışılan polimer olup ve band aralığı 2.1eV’dir. P3HT, diğer polimerler gibi uygun çözücü içerisinde çözünür ve çeşitli kaplama yöntemleriyle geniş yüzeylere kaplanabilir. PC<sub>61</sub>BM, [6,6]-fenil-C<sub>61</sub> bütirik asit metil ester, bir fulleren türevidir ve organik güneş pillerinde donör (n-tipi) malzeme olarak

kullanılmaktadır. P3HT ve PCBM'nin klorobenzen, diklorobenzen, kloroform gibi organik çözücülerde çözünebilir olması cam ve plastik yüzeylere ince film olarak kaplanabilmesine neden olmuştur. P3HT ve PCBM organik güneş pillerinde ayrı olarak kaplanabildiği gibi birbirleriyle belli oranlarda karıştırılarak da kaplanabilir. P3HT ve PCBM organik malzemelerin difüzyon uzunlukları kısa olduğunda üst üste kaplanma yerine belli oranlarda karıştırılarak çözelti olarak ve tek film halinde organik güneş pillerinde kullanılabilir. Bu durumda yük taşınımını ve yüklerin oluşumunu kolaylaştırmıştır. P3HT:PCBM aktif tabakası farklı kırılma indisine sahip olan malzemeler arasında yer aldığından ışık herhangi bir tabakadan aktif tabakaya ulaşmadan yansıyabilir (Brabec *et al.* 2002). Ayrıca P3HT:PCBM aktif tabakasının havaya ışığa maruz kalması optik ve elektriksel özelliklerinin düşmesine neden olmaktadır (Dennler *et al.* 2009). Bu tez çalışmasında kullanılan P3HT ve PCBM piyasadan satın alındı (Sigma-Aldrich). P3HT ve PCBM belli oranlarda alınarak kloroform ve klorobenzen içerisinde çözündü ve P3HT:PCBM çözeltisi elde edildi. P3HT ve PCBM'in kimyasal yapısı Şekil 3.4'de verilmiştir.



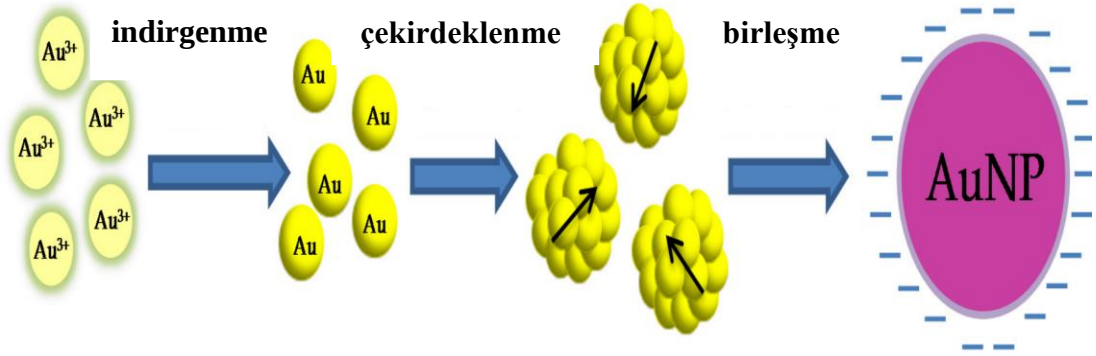
**Şekil 3.4.** P3HT ve PCBM'nin kimyasal yapısı

### 3.3.4. Altının (Au) kimyasal yapısı

Altın, asil bir metal olarak kabul edilir. Kimyasal olarak pasiftir. Bunun nedeni, diğer elementlerle reaksiyona girmeye çok dirençli olmasıdır. Altının oksidasyon durumu -1'den +5'e değişir. +1 ve +3 altınların en yaygın oksidasyon durumlarıdır. Altın, yeni bileşikler yaratmak için reaksiyona girmek yerine civa ile birleşme eğilimi gösterir. Çoğu asit etkisine karşı dayanıklıdır ve bu nedenle kolayca paslanmaz. Dolayısıyla, genel olarak altın çok reaktif bir bileşik değildir. Asitler dışında, altın oksijen ve halojenler ile kolayca birleşmez. Altın, ısı ve elektrik için çok iyi bir iletir. Bu nedenle ince tellere dönüştürülür ve elektrik devrelerinin bağlanmasında kullanılır. Aynı zamanda ısı ve ışığı yansıtma kabiliyeti nedeniyle güneş ışınlarını yansıtma için gökdelenlerin pencerelerine ince bir film uygulamak için kullanılır. Altının periyodik cetvelde atom numarası  $Z=79$ , atom ağırlığı  $M=196,967$  ve simgesi Au'dur. Elektropozitif özelliği zayıf bir metal olması nedeniyle, kimyasal etkinliği çok düşüktür ve bozunmaz. Kristal bir yapıya sahip olan altının erime noktası  $1064,43^{\circ}\text{C}$ 'dir. Kaynama noktası ise  $2807,0^{\circ}\text{C}$ 'dir. Kristal yapısı yüzey merkezli kübiktir. Sıcaklık ne olursa olsun havadan etkilenmez ama klor ve bromla tepkimeye girer, civada ise çözünür. Tek başına hiçbir asit altını etkilemezken hidroklorik ve nitrik asitlerin karışımından oluşan kral suyunda çözünür.

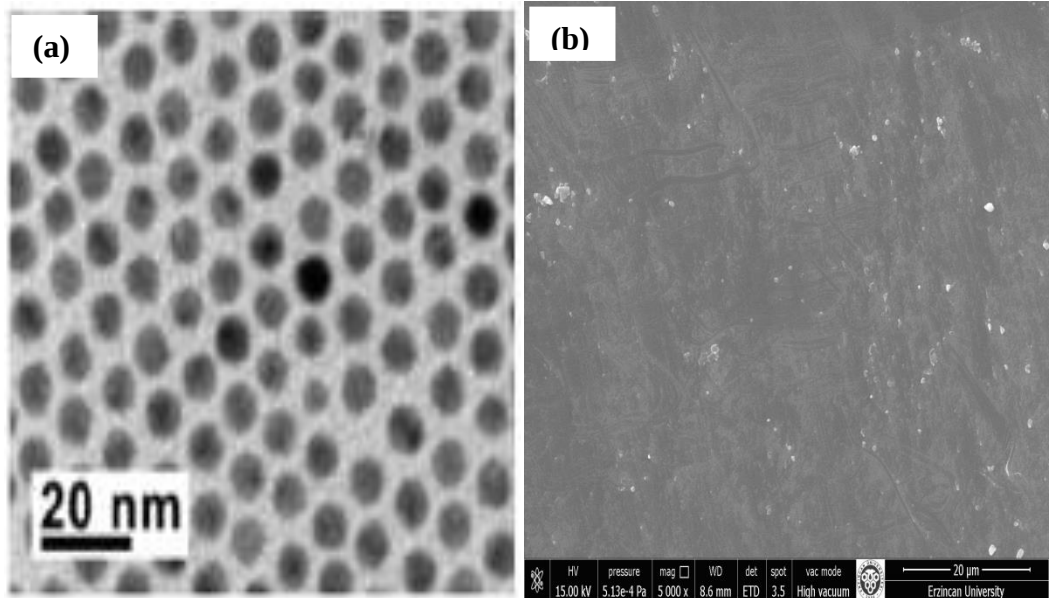
### 3.3.5. Altın (Au) nanoparçacıkların sentezi

$\text{HAuCl}_4$  altın tuzu 200 mg alındı, 10 ml tetralin ve 10 ml oleyilaminde oda sıcaklığında çözüldü. Buz banyosu yardımıyla sıcaklık  $4-5^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanarak, indirgeyici borantersiyer bütül amin eklenerek 2 saat karıştırıldı. Aseton ve etanol ile santrifüj yapılarak hekzan içerisinde 4-5 nm kolloidal nanoparçacıklar elde edildi. Şekil 3.5'de altın nanoparçacıklarının sentezindeki reaksiyon aşamaları görülmektedir.



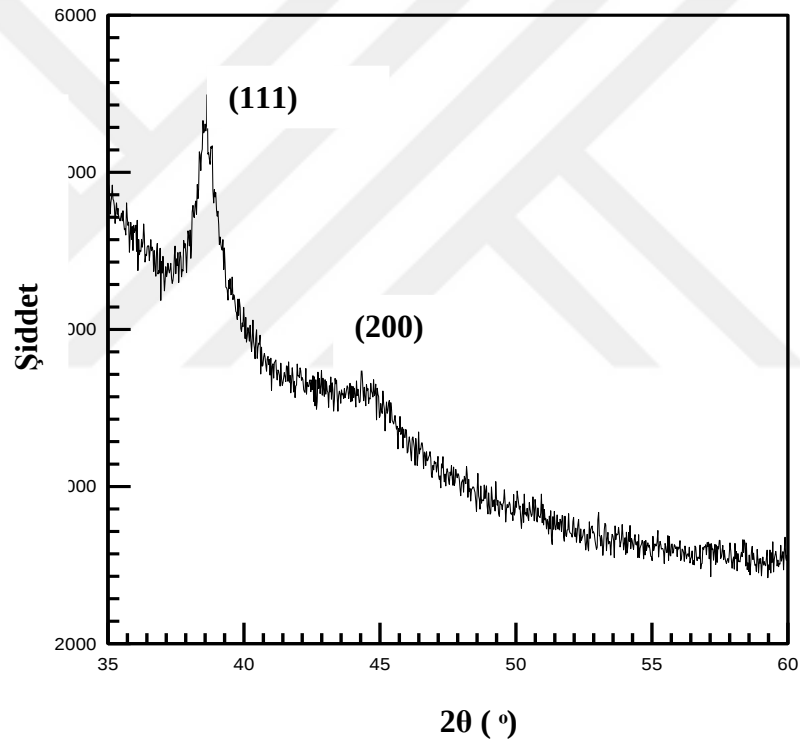
**Şekil 3.5.** Altın nanoparçacıklarının sentezindeki reaksiyon aşamaları

TEM ölçümlerinden tek dağılımlı altın (Au) nanoparçacıklarının boyutları  $7.7 \pm 0.3$  nm olarak ölçülmüştür. Küresel ve ince boyutta homojen dağılım gösteren altın (Au) nanoparçacıkların TEM görüntüsü Şekil 3.6 (a) da verilmiştir. TEM analiziyle sentezlenen nanoparçacıkların geometrik şekilleri ve boyutları incelenmiştir. Cam yüzeyine ince film olarak kaplanan altın nanoparçacıklarının SEM görüntüsü de Şekil 3.6 (b) de verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Altın (Au) nanoparçacıkların (a) TEM ve (b) SEM görüntüsü

Altın nanoparçacıklarının kristal iç yapısının morfolojik özelliklerinin tanımlanması ve kristal yapının incelenmesinde X-ışını kırınimleri oldukça önemli bilgiler sağlar. X-ışını kırınım analizleri nanoparçacıkların ilk çekirdeklenmeden son kristalleşme olaylarına kadar tüm yapısal değişimlerini takip etmektedir. Sentezlenen altın nanoparçacıkları (111) ve (200) kırınım piklerine sahip olup bu safhada yüzey merkezli kübik kristal yapısı özelliği göstermiştir. Ayrıca sentezlediğimiz altın nanoparçacıkların XRD sonuçları (Krishnamurthy *et al.* 2014) tarafından yapılan çalışmayla uyumlu olup aynı açı değerlerinde aynı kırınım pikleri verdiği Şekil 3.7’de görülmüştür.



**Şekil 3.7.** Altın (Au) nanoparçacıkların XRD ölçümü

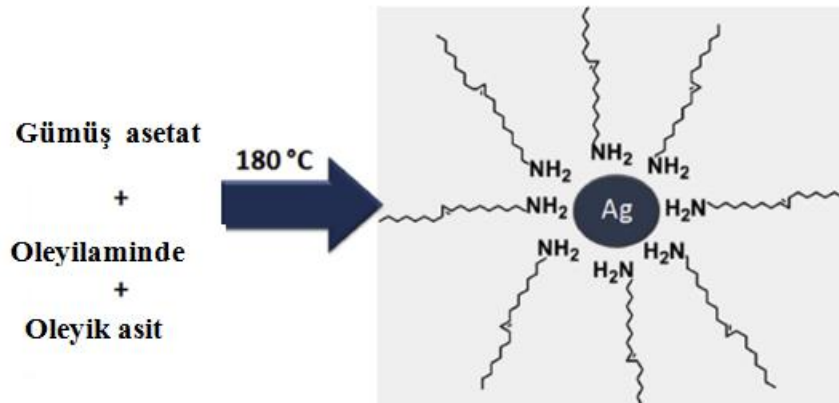
### 3.3.6. Gümüşün (Ag) kimyasal yapısı

Gümüş ışığı etkili bir şekilde yansıtabilen, kolay bir biçimde şekil alabilen sünek bir metaldir. Gümüş gramajı göz önüne alındığında en az maddeyle en çok verim elde edilen elementlerdendir. 1 gram gümüş kullanılarak yaklaşık olarak 2 km uzunluğunda bir tel çekilebilmektedir. Kristallenme özelliği de bulunan gümüş altıgen ve küp olarak

kullanılır. Atmosfer ortamında kolay bir şekilde oksitlenmeye uğramaz. Bakır ve altın elementi ile kıyaslandığı zaman altından daha kolay, bakırdan daha zor oksitlenir. Bazı organik maddelere ve asitlere karşı dayanıklı bir maddedir. Fakat sülfürik asit ya da nitrik asite maruz kaldığında kolayca erimektedir. Kükürt ve kükürt bileşiğini içeren bir çok madde ile hemen birleşir. Gümüş eşyaların kararması olayı bu havada bulunan hidrojen sülfür ya da yumurta gibi yiyeceklerde bulunan kükürttten kaynaklanmaktadır. Çoğu özelliği bakır ile aynı olan gümüş, bakırın bazı bileşiklerinde 2 değerlikli olmasından dolayı gümüşten ayrılmaktadır. Gümüş, Ag sembolü ile gösterilen oda koşulunda katı halde bulunan simli beyaz rengine sahip bir elementtir. Element serisi Geçiş Metali olan Gümüş, periyodik tablonun 1B grubunda yer almaktadır. Atom numarası 47'dir. Gümüş elementinin atom ağırlığı 107.8682 g/mol, oda sıcaklığındaki yoğunluğu 10,49 g / cm<sup>3</sup>, erime noktası 961,93°C , kaynama noktası 2.212,00°C olarak bilinmektedir. Dövülebilir ve yumuşak mekanik özelliğine sahiptir.

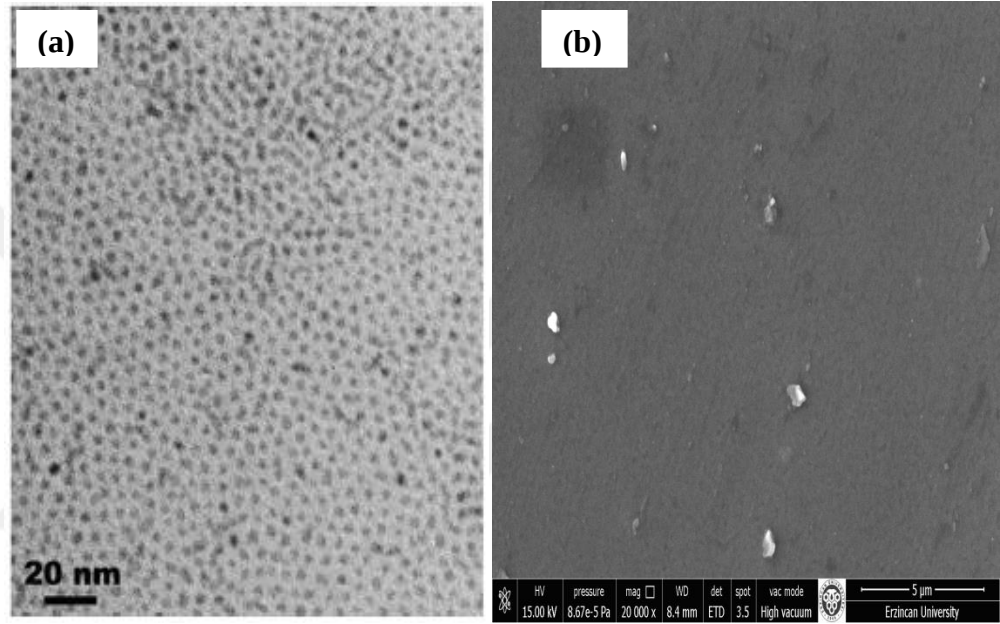
### 3.3.7. Gümüş (Ag) nanoparçacıkların sentezi

Gümüş asetat tuzu 170 mg tartılıp, 10 ml oktadesen, 4.5 ml oleyik asit ve 1 ml oleyilaminde çözünür. 60°C'de 5 dakika, 180°C'de 20 dakika reaksiyona tabi tutuldu. İzopropanol ve etanol ile santrifüj yapılarak hekzan içerisinde 4-5 nm kolloidal nanopartiküller elde edildi. Şekil 3.8'de tek dağılımlı gümüş (Ag) nanoparçacıkların sentezi



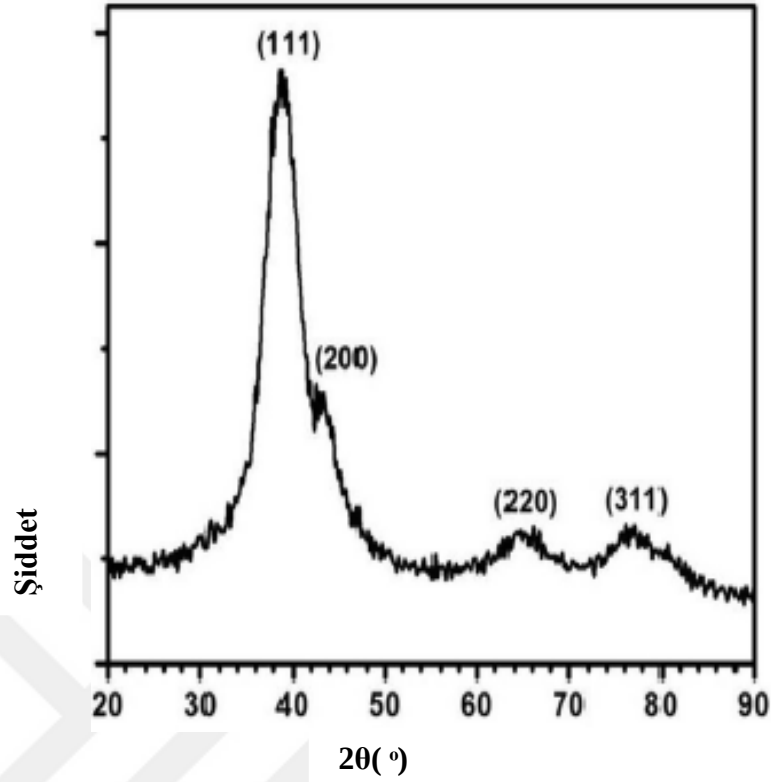
**Şekil 3.8.** Tek dağılımlı gümüş (Ag) nanoparçacıkların sentezi

Tek dağılımlı gümüş (Ag) nanoparçacıklarının TEM ölçümlerinden boyutları 3nm olarak belirlenmiştir. Küresel ve homojen dağılım gösteren gümüş (Ag) nanoparçacıklarının TEM görüntüsü Şekil 3.9 (a) da verilmiştir. Cam yüzeyine ince film olarak kaplanan gümüş nanoparçacıklarının SEM görüntüsü de Şekil 3.9 (b) de verilmiştir.



**Şekil 3.9.** Gümüş (Ag) nanoparçacıkların (a) TEM ve (b) SEM görüntüsü

Sentezlenen gümüş nanoparçacıkları (111) , (200) , (220) , (311) kırınım piklerine sahip olup bu safhalarda yüzey merkezli kübik kristal yapısı özelliği göstermiştir. Sentezlenen gümüş nanoparçacıklarının XRD sonuçları literatürle uyumludur (Şenol *et al.* 2016). Şekil 3.10’da bu sonuçlara bağlı olarak miller indislerinin hesaplanmasıyla gümüş nanoparçacıklarının fazlara ait yapısal özellikler hakkında bilgi sahibi olmamız sağlanır.



**Şekil 3.10.** Gümüş (Ag) nanoparçacıkların XRD ölçümü

Yukarıda özellikleri ve sentezleme yöntemi belirtilen gümüş, altın ve bunların karışımı olan altın-gümüş nanoparçacık çözeltileri hacimce farklı oranlarda P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi incelendi.

### 3.4. Organik Güneş Pillerinin Hazırlanışı ve Karakterizasyon Aşamaları

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

### 3.4.1. ITO'nun kimyasal temizlik aşamaları

Daha öncede belirtilen özelliklere sahip ITO'lar satın alındı ve 1,25 x 1,25 mm<sup>2</sup> boyutlarında kesildi. Kesilme işleminden sonra ITO'lar aşağıdaki kimyasal temizlik işlemlerine tabi tutuldu.

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

### 3.4.2. Hol taşıyıcı tabaka olarak kullanılan PEDOT:PSS'in hazırlanması

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) %1.1 H<sub>2</sub>O, piyasadan satın alındı. Satın alınan PEDOT:PSS 0,45 µm gözenekli PVDF (Polyvinylidene fluoride veya polyvinylidene difluoride), filitreden süzülerek kullanıma hazır hale getirildi.

### 3.4.3. P3HT:PCBM aktif tabaka malzemelerinin hazırlanması

*P*-tipi P3HT ve *n*-tipi PC<sub>61</sub>BM organik malzemelerinin belirli oranlarda ve farklı çözücüler kullanılarak karıştırılmasıyla elde edilen aktif tabaka üç aşamada tamamlandı;

1. 1 mg P3HT içerisine 0,1ml kloroform ve klorobenzen çözücülerini karıştırılarak iki farklı çözelti hazırlandı. Hazırlanan bu iki farklı çözelti 60 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılarak homojen P3HT+klorobenzen ve P3HT+kloroform çözeltileri elde edildi.
2. 1 mg PCBM içerisine 0,1ml kloroform ve klorobenzen çözücülerini karıştırılarak iki farklı çözelti hazırlandı. Hazırlanan bu iki farklı çözelti 60 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılarak homojen PCBM+klorobenzen ve PCBM+kloroform çözeltileri elde edildi.
3. Farklı kaplardaki P3HT ve PCBM aynı kaba aktararak kütlece 1:1 oranında P3HT: PCBM + klorobenzen çözeltisi ve kütlece 1:0,8 oranında P3HT: PCBM + kloroform çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan bu çözeltiler 12 saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra kullanıma hazır hale getirildi. Aktif tabaka yani P3HT:PCBM'in hazırlanması ile ilgili tüm aşamalar eldivenli kabinde gerçekleştirildi.

#### **3.4.4. Altın, gümüş ve altın- gümüş nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin hazırlanış aşamaları**

Kimyasal temizliği yapılmış ITO yüzeyi anot sırası ile hol taşıyıcı tabaka olarak PEDOT:PSS, aktif tabaka olarak farklı çözücülerle hazırlanmış ve nanoparçacık katkılanmış P3HT: PCBM, elektron taşıyıcı tabaka olarak kullanılan LiF ve katot olarak da Al kullanılarak organik güneş pil yapısı elde edildi.

##### **1. Aşama: PEDOT:PSS Kaplanması**

Döndürme ile film kaplama cihazı ile 4000 rpm de 50 s'de azot ortamında ITO yüzeyi hol taşıyıcı tabaka olan PEDOT:PSS ile kaplandı. Daha sonra numuneler 115°C'de 5 dakika boyunca ısıtıcı tabla üzerinde tavlandı. PEDOT: PSS kaplama işlemi Laurell marka WS-650MZ-23NPPB model döndürme film kaplama cihazı ile gerçekleştirildi.

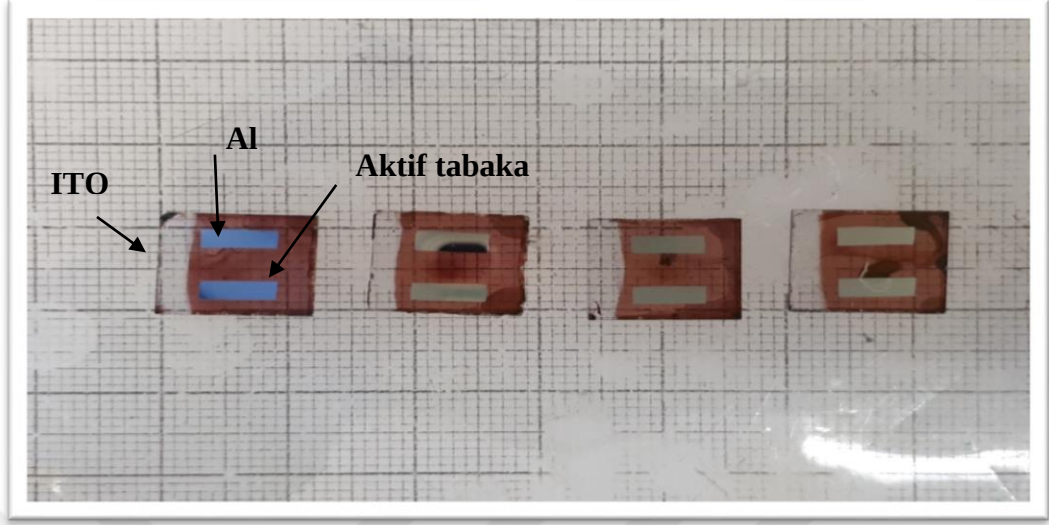
##### **2. Aşama: P3HT:PCBM Kaplanması**

PEDOT:PSS kaplanmış ITO'ler eldivenli kabine aktarıldı. Daha sonra klorobenzen ve kloroform çözücülerini kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası PEDOT:PSS

kaplanmış ITO yüzeyine kaplandı. Farklı oranlarda hazırlanan P3HT:PCBM tabakaları ile yapılan ölçümlerde yani kloroform çözücüsüyle kütlece 1 : 0,8 oranında hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasıyla elde edilen güç dönüşüm verimi klorobenzen çözücüsüyle kütlece 1:1 oranında hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasında yüksektir. Hazırlanan aktif tabaka için uygun şartlar tespit edildikten sonra, farklı çözücülerle elde edilen P3HT:PCBM aktif tabakasına hacimce farklı oranlarda altın, gümüş, altın-gümüş nanoparçacıkları katkılıdır. Yukarıda belirtildiği gibi klorobenzen çözücü ile hazırlanan P3HT:PCBM, P3HT:PCBM: AuNP, P3HT:PCBM: AgNP, ve P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP çözeltileri döndürme ile film kaplama cihazı ile 1000rpm de 60 s de kaplanırken, kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM, P3HT:PCBM: Au , P3HT:PCBM: Ag ve P3HT:PCBM: Au: Ag çözeltileri döndürme ile film kaplama cihazı ile 800rpm de 60 s de PEDOT:PSS yüzeyine kaplandı. Kaplama işlemi bittikten numuneler 115°C’de 5 dakika ısıtıcı tabla üzerinde tavlandı. Döndürme ile film kaplama cihazı kullanılarak kaplama işlemleri bittikten sonra numuneler metal kaplama işlemi için termal buharlaştırma ünitesine aktarıldı.

### 3. Aşama: LiF ve Al Metal Kaplama

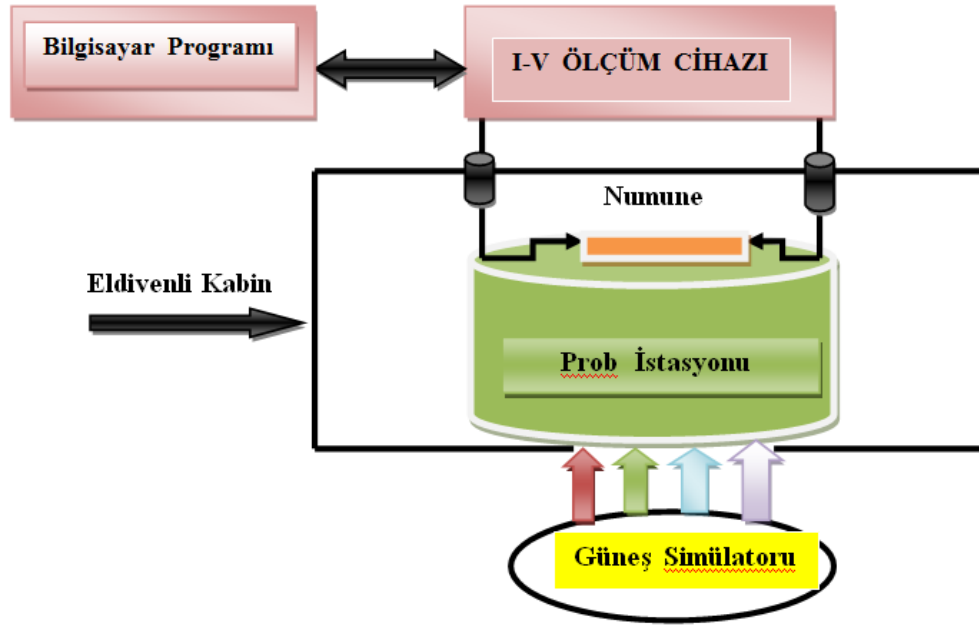
Eldivenli kabin içerisinde olan termal buharlaştırma ünitesine aktarılan numunelere öncelikle elektron taşıyıcı tabaka olan 2 nm kalınlığında LiF kaplandı. Bu kaplama işlemi  $1 \times 10^{-7}$  Torr basınç ve 1 Å/s oranındaki değerlerde yapıldı. Elektron taşıyıcı tabaka olan LiF tabakası üzerine 75 nm kalınlığında Al metali kaplandı. Bu kaplama işlemleri bittikten sonra iki farklı çözücünden elde edilen referans olarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al yapısı, altın nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: AuNP/LiF/Al yapısı, gümüş nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: AgNP/LiF/Al yapısı ve altın-gümüş nanoparçacıklar katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP/LiF/Al yapısı elde edildi. Termal buharlaştırma uygulamaları için NANOVAK marka Glove Box Adapted Coating System model termal buharlaştırma ünitesi kullanıldı. Şekil 3.11’de ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 3.11.** ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin görüntüsü

### 3.5. Organik Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyonu

Üretilen organik güneş pillerinin akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) ölçümleri eldivenli kabinde karanlık ortam ve  $1000 \text{ W/m}^2$  ışık altında alındı. Elde edilen organik güneş pillerinin akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) ölçümleri kabine bağlanmış bilgisayar programı ile kontrol edilen KEITHLEY 4200 ölçüm cihazı ve Sciencetec marka yapay güneş ışığı cihazı yardımıyla yapıldı. Eldivenli kabin içinde yer alan akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) ölçüm cihazının şematik gösterimi Şekil 3.12’de verilmiştir. Yapılan organik güneş pillerinin açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ), dolum faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi  $I$ - $V$  ölçümlerinden hesaplandı.



**Şekil 3.12.** Güneş pili  $I$ - $V$  (akım-voltaj) karakterizasyon sisteminin şematik gösterimi

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Giriş

Bu bölümde materyal ve yöntem bölümünde ayrıntılı olarak anlatılan farklı çözeltilerle ve aynı aygıt tasarımına sahip referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al, Altın (Au) nanoparçacık katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AuNP/LiF/Al , Gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AgNP/LiF/Al ve Altın-Gümüş (Au-Ag) nanoparçacık katkılanmış ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP/LiF/Al organik güneş pillerinin *I-V* (Akım-Voltaj) ölçümleri ve ölçümlerden elde edilen kısa devre akımı, açık devre gerilimi, dolum faktörü, seri direnç ve şönt direnç parametreleri yer almaktadır. Aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM'e nanoparçacık katkılanarak elde edilen filmlerin optik , morfolojik ve yapısal karakterizasyon sonuçları bu bölümde yer almaktadır. Ayrıca bu çalışmada aktif tabaka hazırlanırken kullanılan klorobenzen ve kloroform iki farklı çözücü kullanılarak elde edilen aktif tabakanın optik, morfolojik ve yapısal karakterizasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Daha sonra klorobenzen ve kloroformla hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına hacimce farklı oranlarda altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları katkılanarak bu malzemelerin organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi incelendi. İki farklı çözeltiyle hazırlanan aktif tabaka için en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilen organik güneş pillerinin optik, morfolojik ve yapısal ölçümleri yapıldı. Aktif tabakaya katkılanan nanoparçacıklarla elde edilen organik güneş pillerinin temel karakteristik parametrelerini gösteren çizelge ve grafikler ilgili değişimler de bu bölümde yer almaktadır.

### 4.2. İki Farklı Çözücü Kullanılarak ile Hazırlanan Nanoparçacık Katkılı Organik Güneş Pillerinin Optik, Morfolojik ve Yapısal Karakterizasyonu

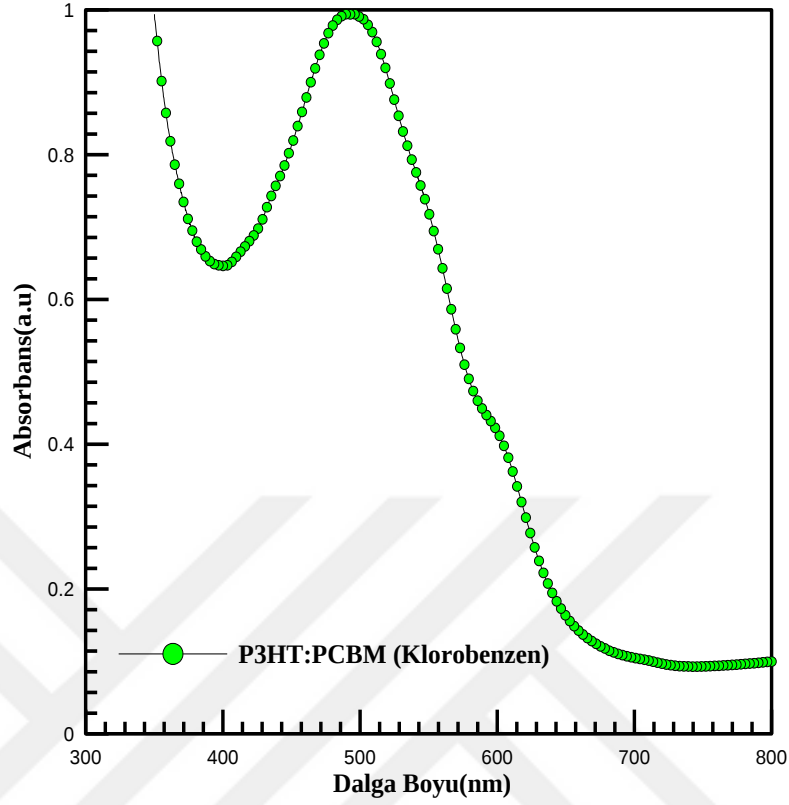
Organik güneş pil aygıt yapısında kullanılan iki farklı çözücü kullanılarak hazırlanan ikili yapı P3HT:PCBM, üçlü yapı P3HT:PCBM:AuNP, P3HT:PCBM:AgNP ve dörtlü

yapı P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP malzemelerinin önceki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılan kaplama metodu ile ITO yüzeyi ince film olarak kaplandı. Klorobenzenle hazırlanan 1:1 oranında karıştırılmış P3HT:PCBM'e Au nanoparçacıkları hacimce %1,5 oranında, Ag nanoparçacıkları hacimce %0,5 ve Au:Ag nanoparçacıkları hacimce sırasıyla %12:%3 oranında katkılanmıştır. Kloroformla hazırlanan 1:0,8 oranında karıştırılmış P3HT:PCBM'e Au nanoparçacıkları hacimce %1,5 oranında, Ag nanoparçacıkları hacimce %0,5 ve Au:Ag nanoparçacıkları hacimce sırasıyla %12:%3 oranında katkılanmıştır. Bu hacimce yüzde oranları nanoparçacık katkılanmış en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilen değerlerdir. İki farklı çözücüde elde edilen nanoparçacık katkılanmış ve nanoparçacık katkılanmamış filmlerin soğurma, AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ölçümleri alındı. Tüm bu ölçümler Erzincan Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında yapıldı.

#### 4.2.1. Soğurma ölçümleri

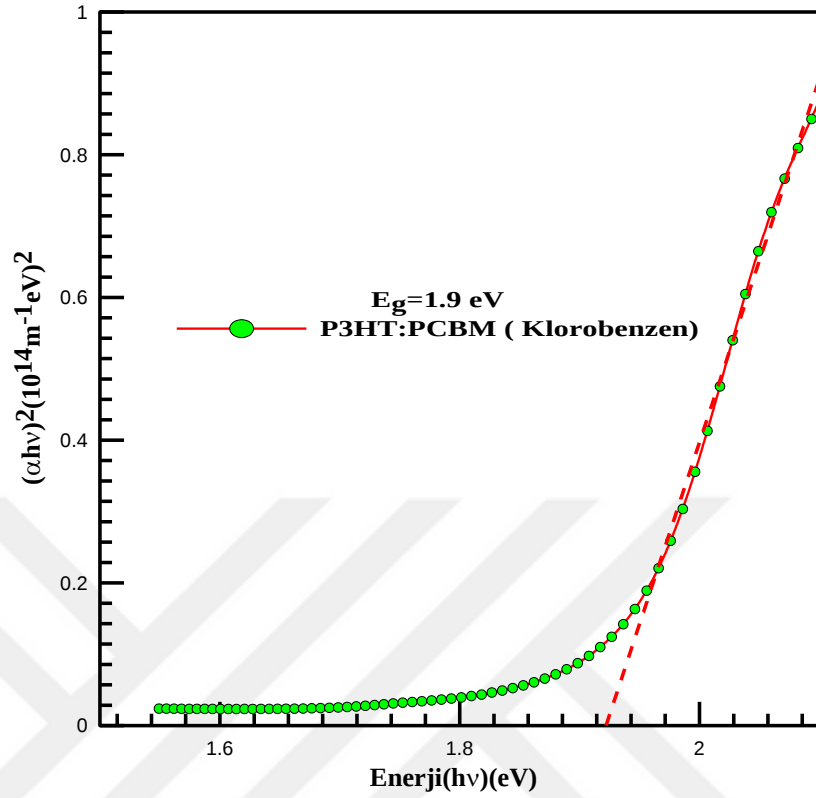
Organik güneş pillerinde klorobenzen ve kloroform gibi iki farklı çözücü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası ince film olarak ITO üzerine kaplanarak soğurma ölçümleri alındı. Daha sonra iki farklı çözeltiyle hazırlanan aktif tabakaya nanoparçacık katkılanarak katkı konsantrasyonuna bağlı olarak soğurma ölçümleri alındı. Bu ölçümler 300nm ile 800nm dalga boyu arasında Perkin-Elmer UV-visible spectrometry (Lambda 2S) ile gerçekleştirildi.

Şekil 4.1'de klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakanın soğurma grafiği verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi klorobenzenle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasının en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 505nm arasında gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu sonuç Supriyanto *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir. Bu değer görünür bölge sınırları (400nm-800nm) arasındadır. Bu çözücü ile hazırlanan aktif tabakanın soğurma spektrumu güneşin soğurma spektrumuna göre daha dar aralıkta olduğu görülmektedir.



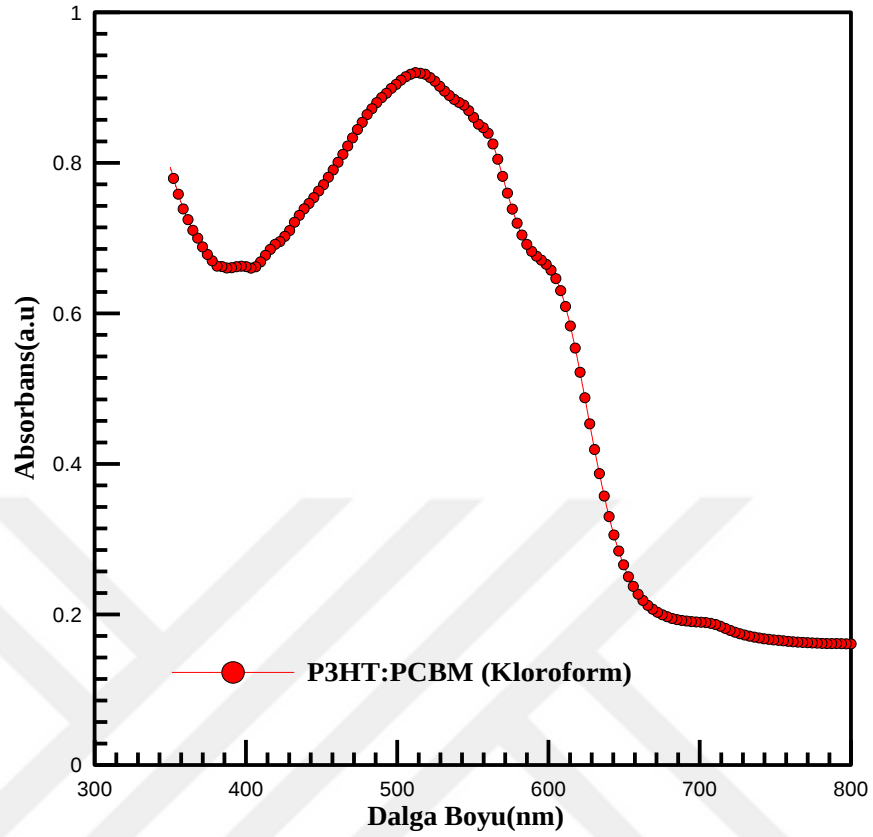
**Şekil 4.1.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in soğurma grafiği

Dahili soğurma teorisinde soğurmayı belirleyen soğurma katsayısı ve fotonun enerjisidir.  $\alpha(h\nu)=A(h\nu-E_g)^{1/2}$  bu formülde A sabit bir değerdir ve  $E_g$  ise enerji band aralığıdır. Bu formülde  $\alpha$  soğurma katsayısı,  $h\nu$  fotonun enerjisidir. Bu çalışmada klorobenzen ve kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası ince film olarak ITO üzerine kaplanarak oda sıcaklığında soğurma ölçümleri alındı. Enerji band aralığını belirlemek için  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafiği çizildi. Çizilen bu grafiğe uygun fit çizilerek enerji eksenini kestiği nokta filmin enerji band aralığı olarak belirlendi. Buna bağlı olarak şekil 4.2'de klorobenzen çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafiğini göstermektedir. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin yasak enerji band aralığı optik soğurma spekturumu yardımıyla 1.9 eV olarak hesaplandı. Bu sonuçlar Supriyanto *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir.



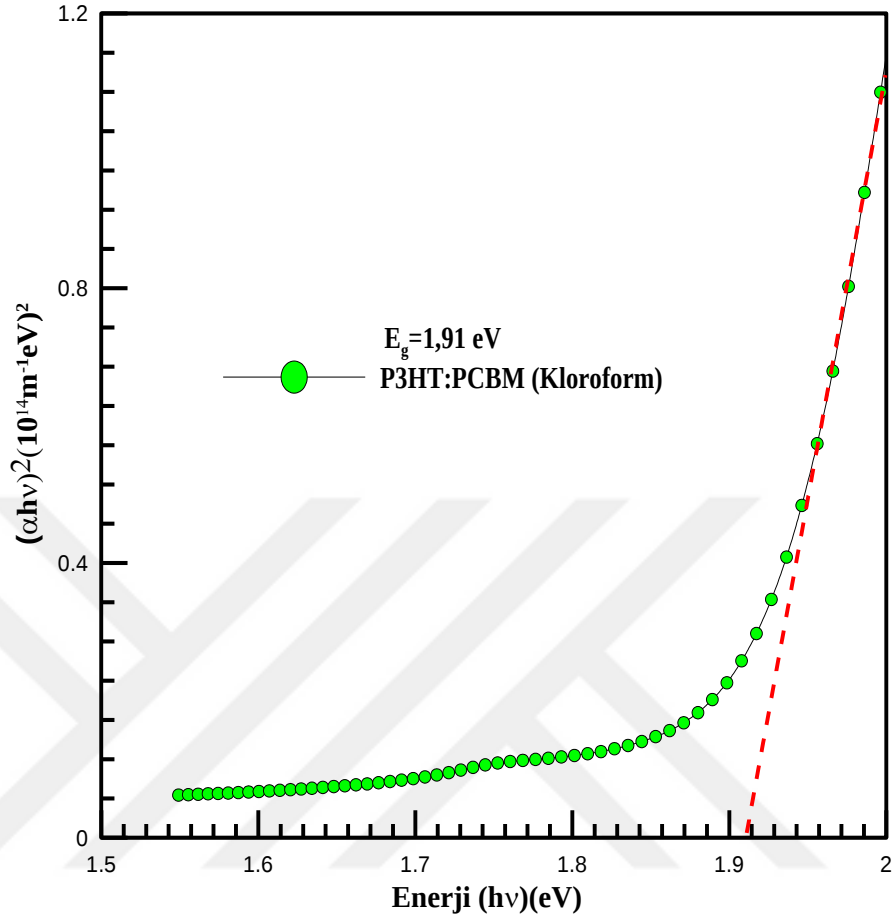
**Şekil 4.2.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafiği

Şekil 4.3'de kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakanın soğurma grafiği verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi kloroform hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 483 nm arasında gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu sonuç Supriyanto *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir. Bu çözücü ile hazırlanan aktif tabakanın soğurma spektrumu güneşin soğurma spektrumu ile uyumlu olup daha geniş aralıkta soğurma gerçekleşmektedir. Bu artış foton depolamayı arttırdığı için dalga fazla eksiton oluşumu anlamına gelmektedir. Bu soğurma pikleri aynı zamanda  $\pi$ - $\pi^*$  geçişlerin olduğuna ve geçişlerin UV-Vis bölgede oluşur.



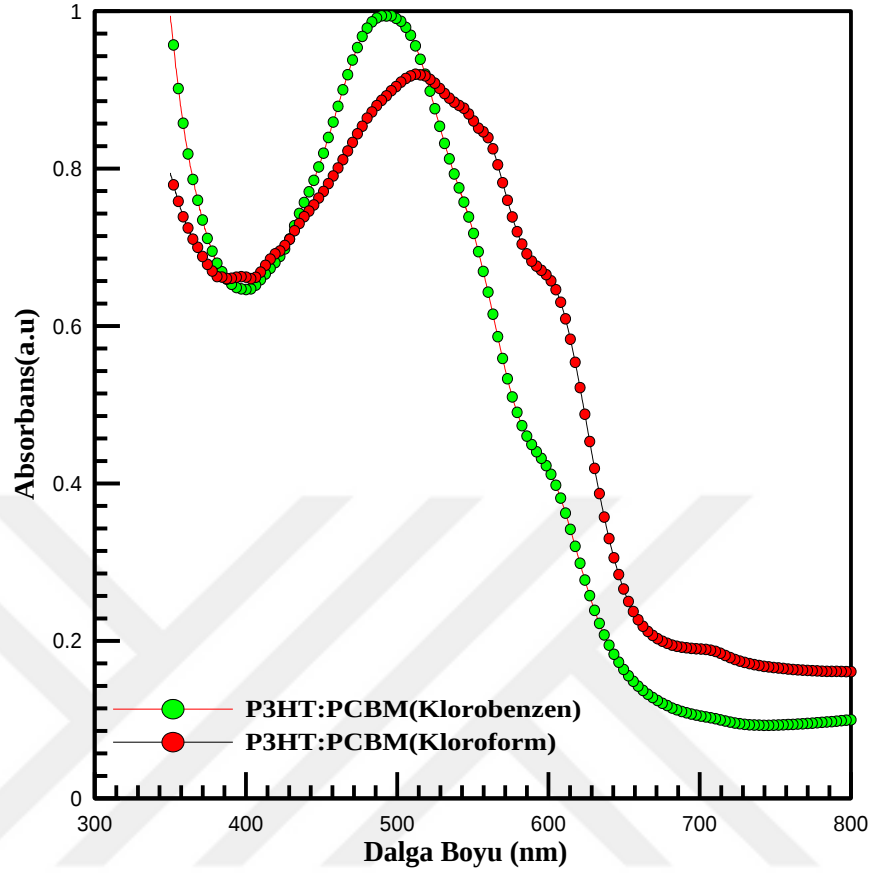
**Şekil 4.3.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in soğurma grafiği

Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin yasak enerji band aralığı soğurma spekturumu yardımıyla 1.91 eV olarak hesaplandı. Bu sonuçlar Supriyanto *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir. Şekil 4.4'de kloroform çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafiği verilmiştir.



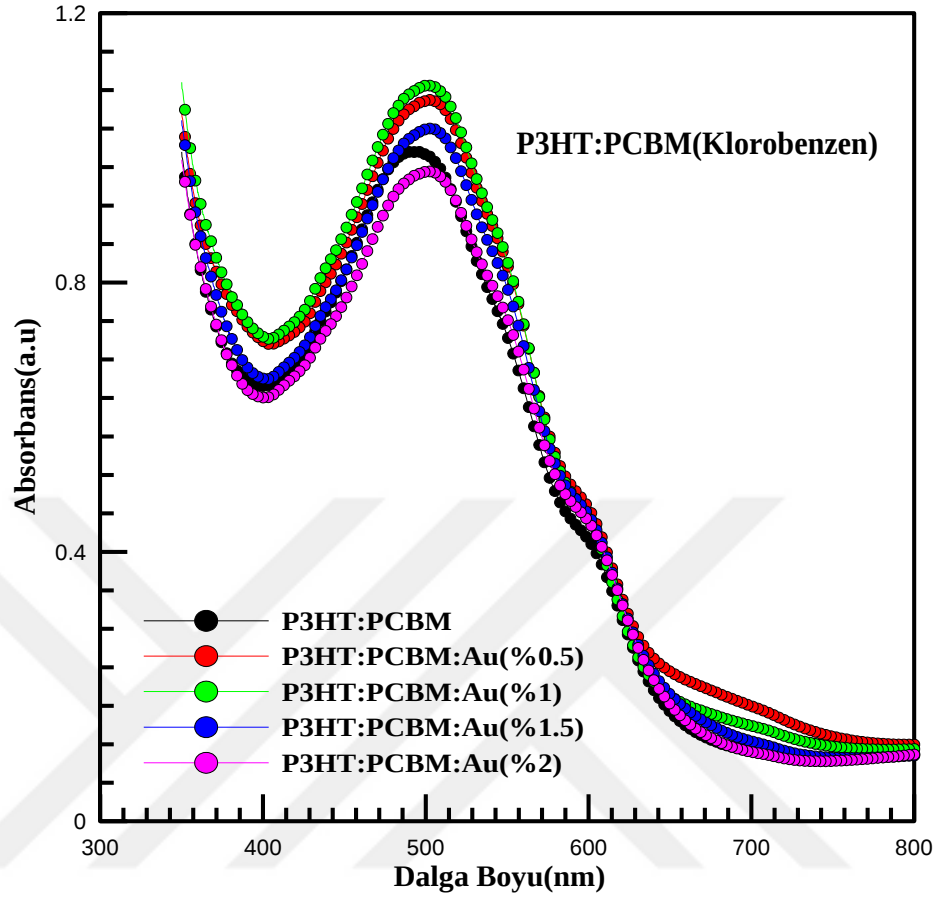
**Şekil 4.4.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafiği

Şekil 4.5'de klorobenzen ve kloroform çözeltilisiyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasının soğurma grafikleri verilmiştir. Bu soğurma grafiklerinde de görüldüğü gibi kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası daha geniş soğurma spektrumuna sahiptir. P3HT:PCBM aktif tabakasındaki P3HT organik malzemesi yaklaşık olarak 2 eV'luk yasak enerji band aralığına sahip iken PCBM organik malzemeside yaklaşık olarak 1.2-1.7 eV yasak enerji band aralığına sahiptir. Bu çalışmada da görüldüğü gibi P3HT:PCBM aktif tabakası hazırlanırken kullanılan klorobenzen ve kloroform çözücüsünün yasak enerji aralığı hemen hemen aynıdır. Bu tez çalışmasında klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka için 1:1 oranında P3HT:PCBM kullanılırken, kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakada 1:0,8 oranı P3HT:PCBM kullanılmıştır. En iyi soğurmayı bu oranlara sahip tabakalardan elde ettiğimiz için bu tabakaların soğurma ölçüleri alınmıştır.



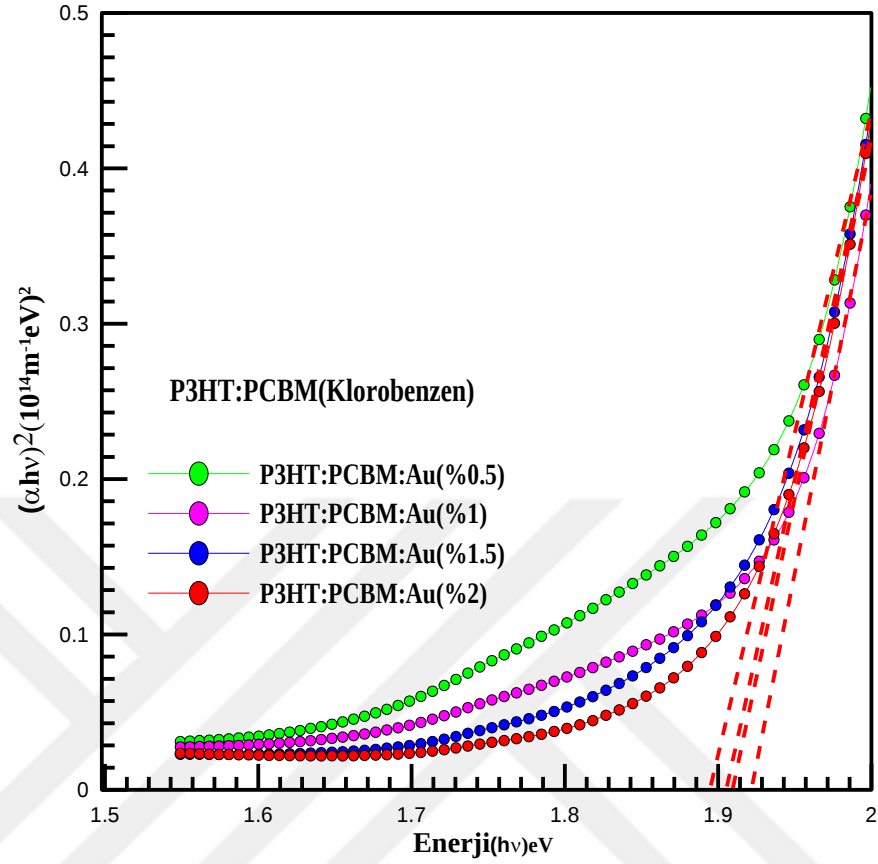
**Şekil 4.5.** Kloroform ve Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in soğurma grafiğı

Şekil 4.6'da klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasına altın (Au) nanoparçacıklar %0,5, %1, %1, 5 ve %2 oranında katkılanarak elde edilen filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Bu soğurma grafiğıne göre P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1 ve %1,5 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini arttırmıştır. Fakat P3HT:PCBM aktif tabakasının %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. Bu sonuçlara göre P3HT:PCBM aktif tabakasına nanoparçacıkların katkılanmasıyla soğurma şiddetinin arttırması katkılan nanoparçacıkların çevresinde güçlü bölgesel bir alanın oluştuğunun bir sonucudur (Stratakis and Kymakis 2013). Soğurma şiddetindeki azalmalar ise kullanılan P3HT ve PCBM polimerinin yapısının bozulduğuna ve P3HT polimerindeki  $\pi$ - $\pi$  zincirlerinin yapısının bozulduğuna atfedilmiştir (Facchetti 2011).



**Şekil 4.6.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafiği

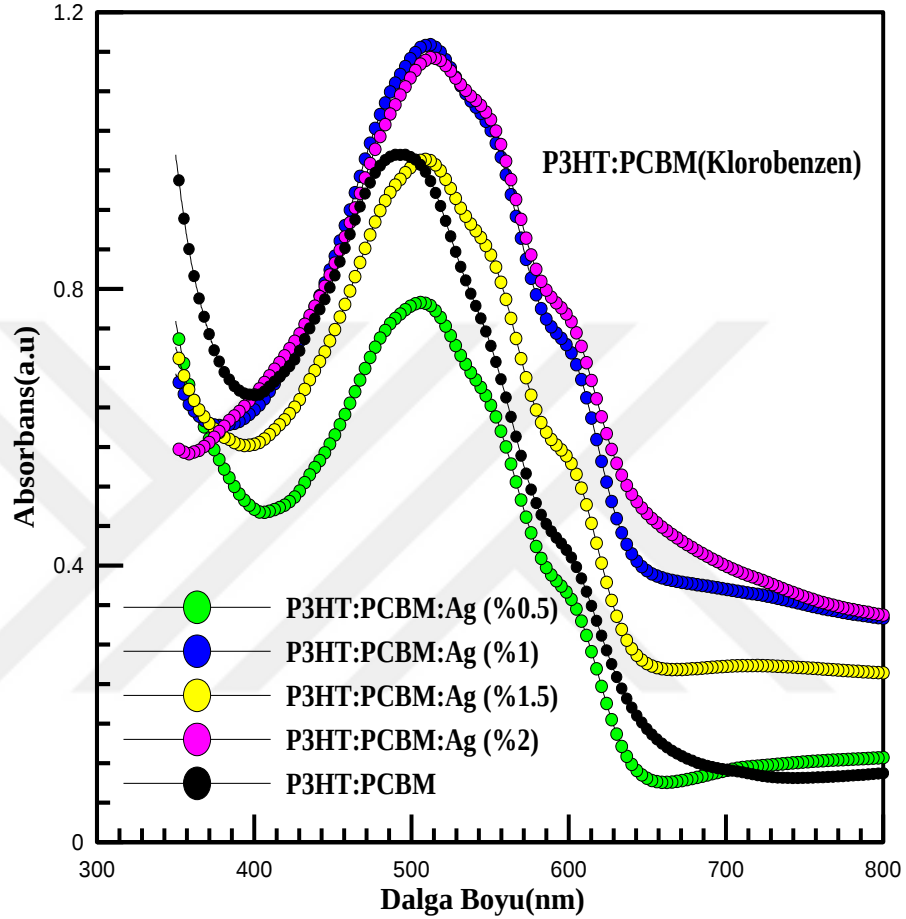
Şekil 4.7 klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarda altın nanoparçacığın katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafiklerini göstermektedir. Elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı optik soğurma yardımıyla hesaplandı. Yapılan hesaplamalarda klorobenzen ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5 altın nanoparçacık katkılanması ile elde edilen yasak enerji band aralığı 1,89 eV'dur. Aktif tabakaya %1, %1,5 ve %2 oranlarında altın nanoparçacıkların katkılanması yasak enerji band aralığını 1,92 eV'a yaklaştırmıştır. Yapılan yasak enerji band aralığı hesaplamalarından da görüldüğü gibi P3HT:PCBM aktif tabakasına altın nanoparçacıkların katkılanması yasak enerji band aralığını değiştirmiştir.



**Şekil 4.7.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafikleri

Şekil 4.8'de klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasına gümüş (Ag) nanoparçacıklarının %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında katkılanması ile elde edilen filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Bu soğurma ölçümlerine göre P3HT:PCBM aktif tabakasının %1, %1,5 ve %2 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini arttırmıştır. Fakat P3HT:PCBM aktif tabakasının %0.5 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. Bu sonuçlara göre soğurma şiddetindeki artış P3HT:PCBM aktif tabakasındaki nanoparçacık miktarının artması yüzey pürüzlülüğünü artırarak gelen ışığı dağıtır ve optik yol uzunluğunu artırır (Ikram *et al.* 2016). Klorobenzen ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına nanoparçacıklarının katkılanması soğurma spektrumunun kırmızıya doğru kaymasını sağlamıştır (Ikram *et al.* 2016). Ayrıca P3HT, PCBM ve nanoparçacıklar

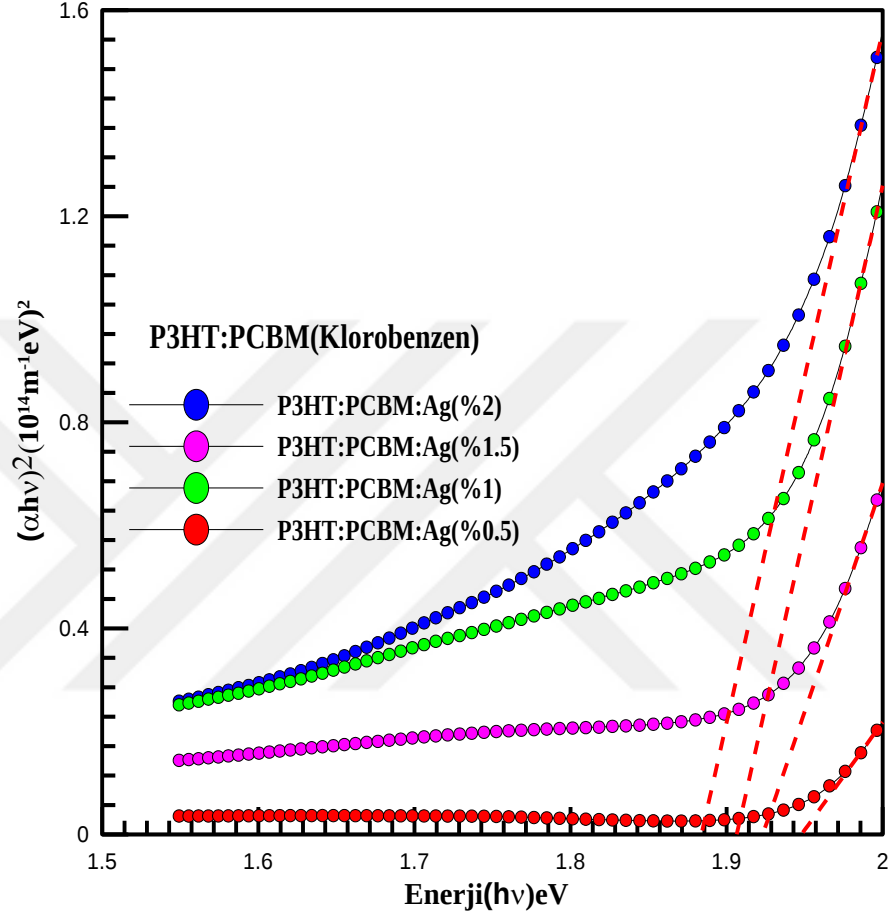
arasındaki etkileşim ve yük aktarımı da soğurmayı etkileyen başka bir etken olarak gösterilebilir (Kadem *et al.* 2014).



**Şekil 4.8.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri

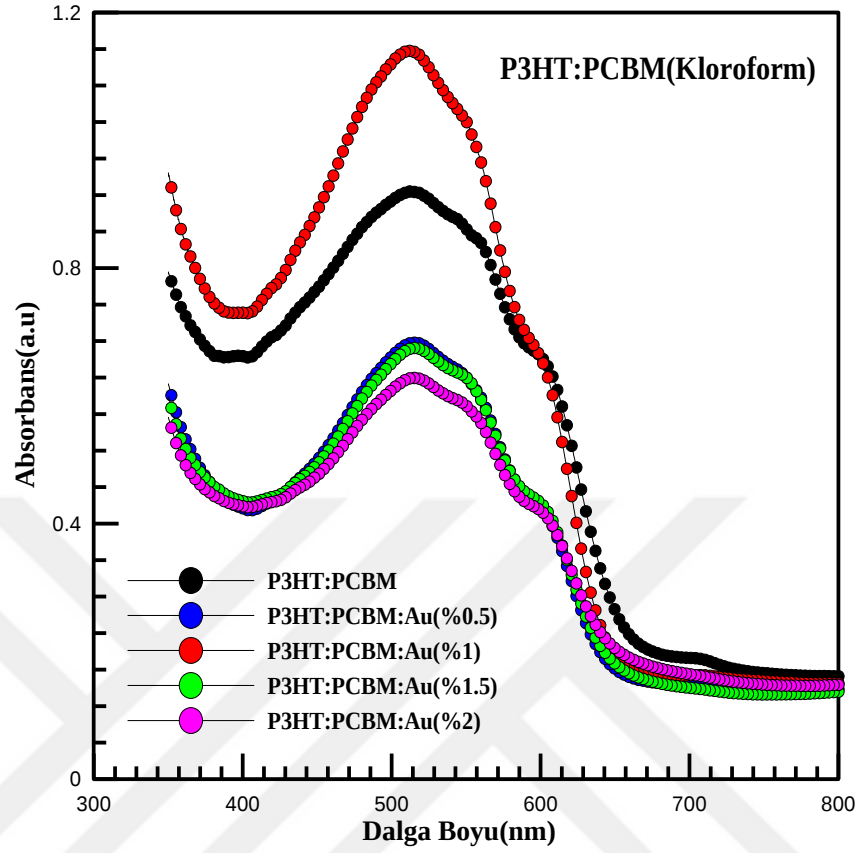
Şekil 4.9 klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarda gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığındaki  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafiklerini göstermektedir. Elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı optik soğurma yardımıyla hesaplandı. Yapılan hesaplamalarda %0,5, %1, %1,5 oranında gümüş nanoparçacıkları aktif tabakanın yasak enerji band aralığını 1,94 eV'a yaklaştırmıştır. %2 oranında gümüş nanoparçacıkların aktif tabakaya katkılanması yasak enerji band aralığını 1,88 eV'a düşürmüştür. Bu

hesaplanan değerler hemen hemen birbirine yakındır ve gümüş nanoparçacıklarında P3HT:PCBM aktif tabakasının yasak enerji band aralığını çok az değiştirmiştir.



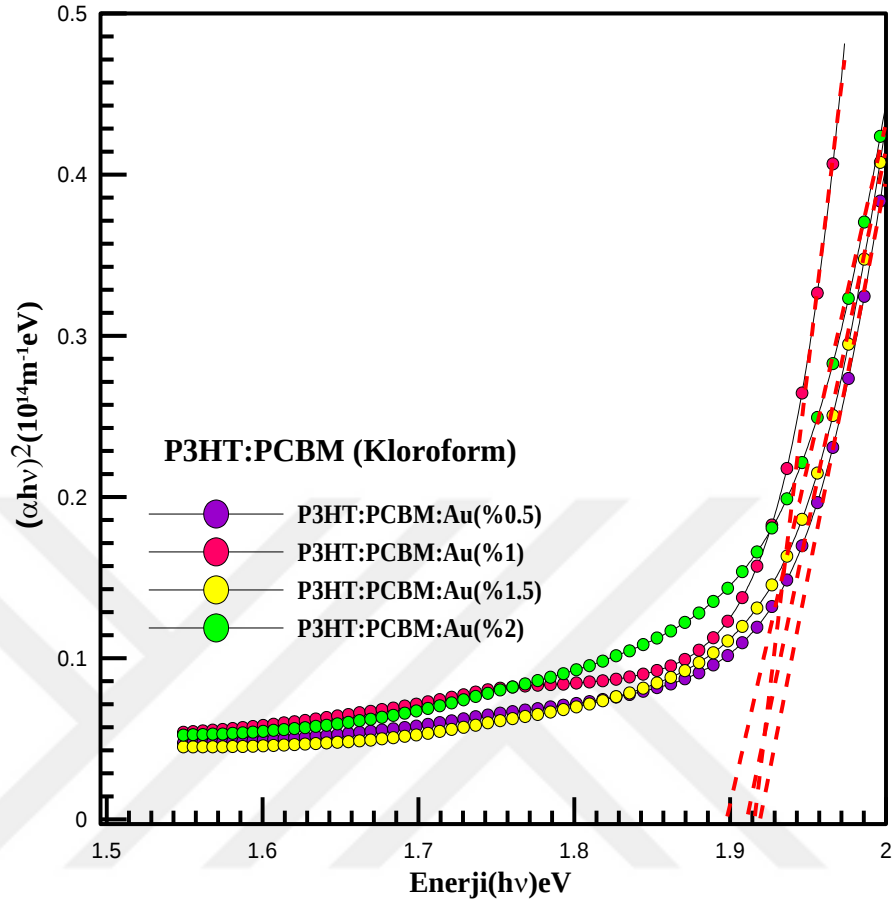
**Şekil 4.9.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığındaki  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri

Şekil 4.10'da kloroform çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasına altın (Au) nanoparçacıkların %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında katkılanmasıyla elde edilen filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Bu soğurma grafiğine göre P3HT:PCBM aktif tabakasına %1 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini arttırmıştır. Fakat P3HT:PCBM aktif tabakasının %0,5, %1,5 ve %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. P3HT:PCBM aktif tabakasına nanoparçacık katkılanması ve film kalınlıklarının farklı olması soğurma şiddetinde azalmaya ve artmaya sebep olmuştur (Aly *et al.* 2015).



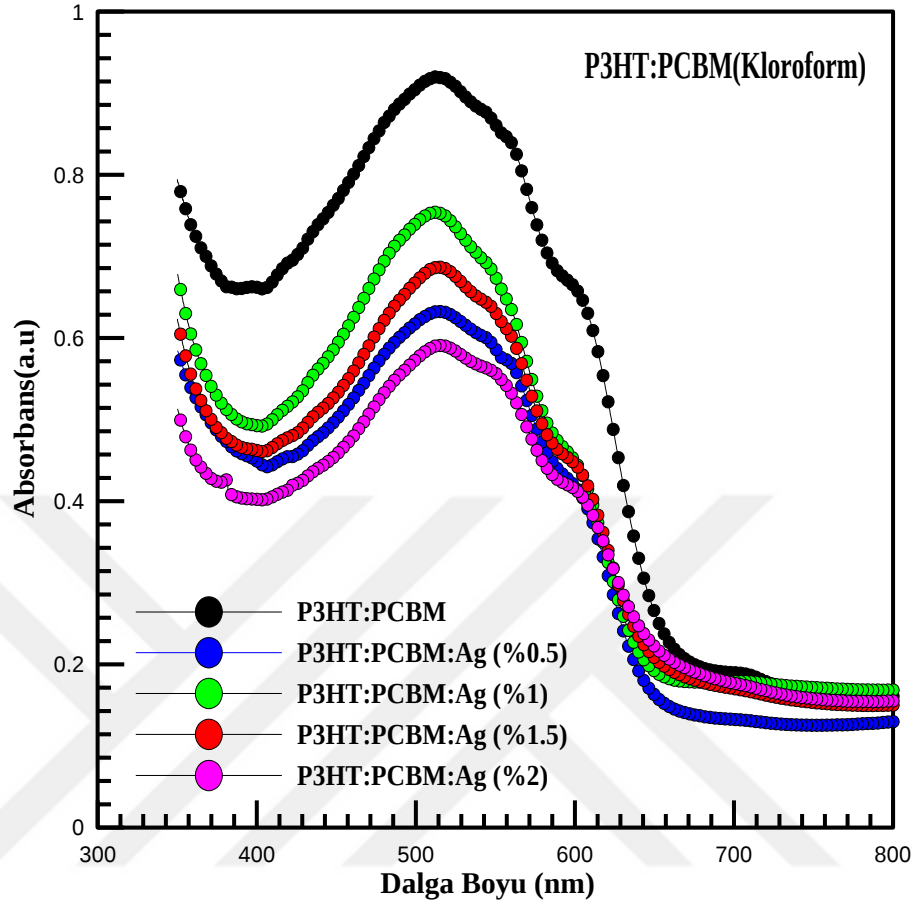
**Şekil 4.10.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri

Şekil 4.11’de kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarda altın nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri verilmiştir. Elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı optik soğurma yardımıyla hesaplandı. Yapılan hesaplamalarda %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında altın nanoparçacıkları aktif tabakanın yasak enerji band aralığını 1,89 eV’dan 1,92 eV’a yaklaştırmıştır. Bu hesaplanan değerler hemen hemen birbirine yakındır ve altın nanoparçacıkları da P3HT:PCBM aktif tabakasının yasak enerji band aralığı çok az değişmiştir. Ayrıca bu sonuçlar klorobenzen çözücüyle hazırlanan altın nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM aktif tabakasından elde edilen yasak enerji aralığıyla uyum içerisindedir.



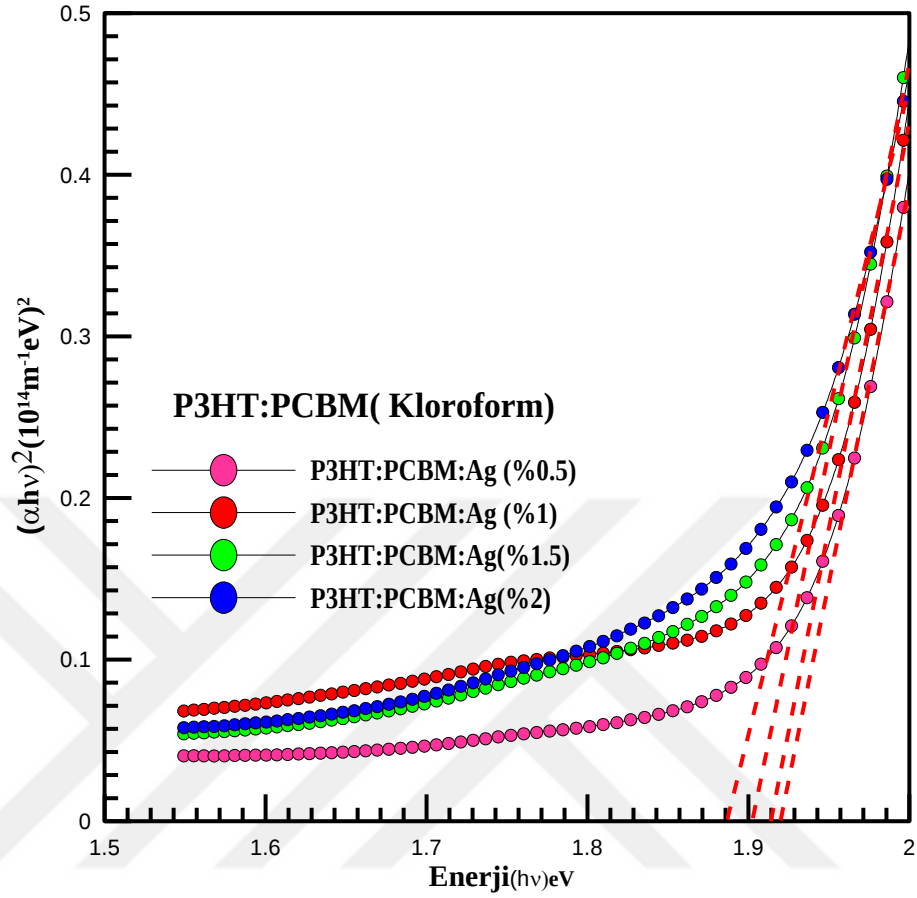
**Şekil 4.11.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri

Şekil 4.12 kloroform çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasına gümüş (Ag) nanoparçacıklarının %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında katkılanmasıyla elde edilen filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Bu soğurma grafiklerine göre P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. P3HT:PCBM aktif tabakasında kullanılan nanoparçacıklarının şekilleri ve boyutlarının farklı olması da soğurma şiddetinde azalmaya ve artmaya sebep olmuştur (Wu *et al.* 2013; Marumoto *et al.* 2017).



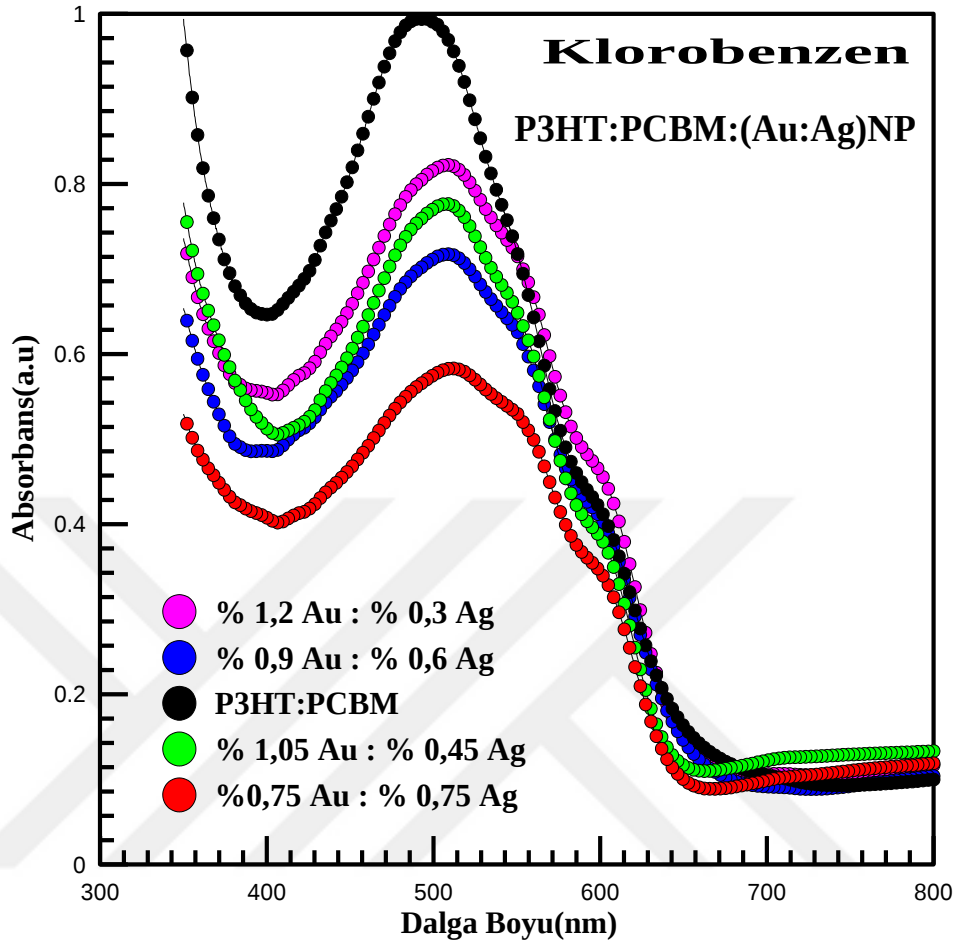
**Şekil 4.12.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri

Şekil 4.13’de kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarda gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri verilmiştir. Elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı optik soğurma yardımıyla hesaplandı. Yapılan hesaplamalarda %2 oranında gümüş nanoparçacıkların katkılanması yasak enerji aralığını 1,89 eV’a düşürmüştür. %0,5, %1 ve %1,5 oranında gümüş nanoparçacıkları aktif tabakanın yasak enerji band aralığını 1,92eV’a yaklaştırmıştır. Optik soğurmadaki bu değişiklikler P3HT deki  $\pi$ - $\pi$  bağlarının kimyasal yapısındaki değişikliklere atfedilebilir (Sajjad, 2013).



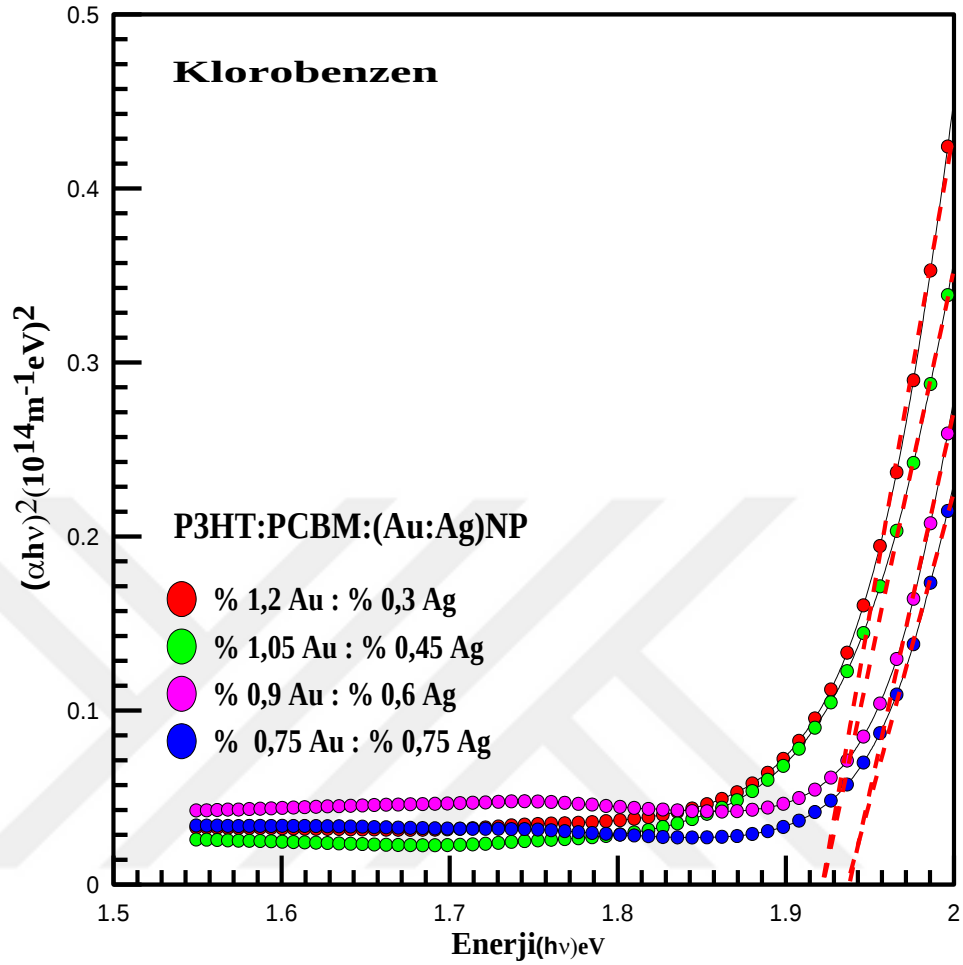
**Şekil 4.13.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filminin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri

Şekil 4.14’de klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakası %1,2 Au : %0,3 Ag , %1,05 Au : %0,45 Ag , %0,9 Au : %0,6 Ag , %0,75 Au : %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkları ile katkılanarak P3HT: PCBM:(Au:Ag)NP dörtlü karışımların oluşturduğu filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Bu soğurma grafiğine göre P3HT:PCBM aktif tabakasındaki gümüş nanoparçacıkların miktarı arttıkça soğurma şiddeti azalmıştır. Soğurma şiddetindeki azalma film kalınlığıyla doğrudan ilişkili olup bu durum film kalınlığının azalmasına atfedilmiştir (Coakley *et al.* 2004). Altın ve gümüş nanoparçacıkları uyarılan fotonların aktif tabaka içerisinde daha fazla saçılmasını sağlamıştır. Bu özellikde organik güneş pillerinde foto-akım üretimine ve daha fazla ışığın soğurulmasına fayda sağlamaktadır (Akimov *et al.* 2010).



**Şekil 4.14.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın ve gümüş nanoparçacıkların birlikte katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri

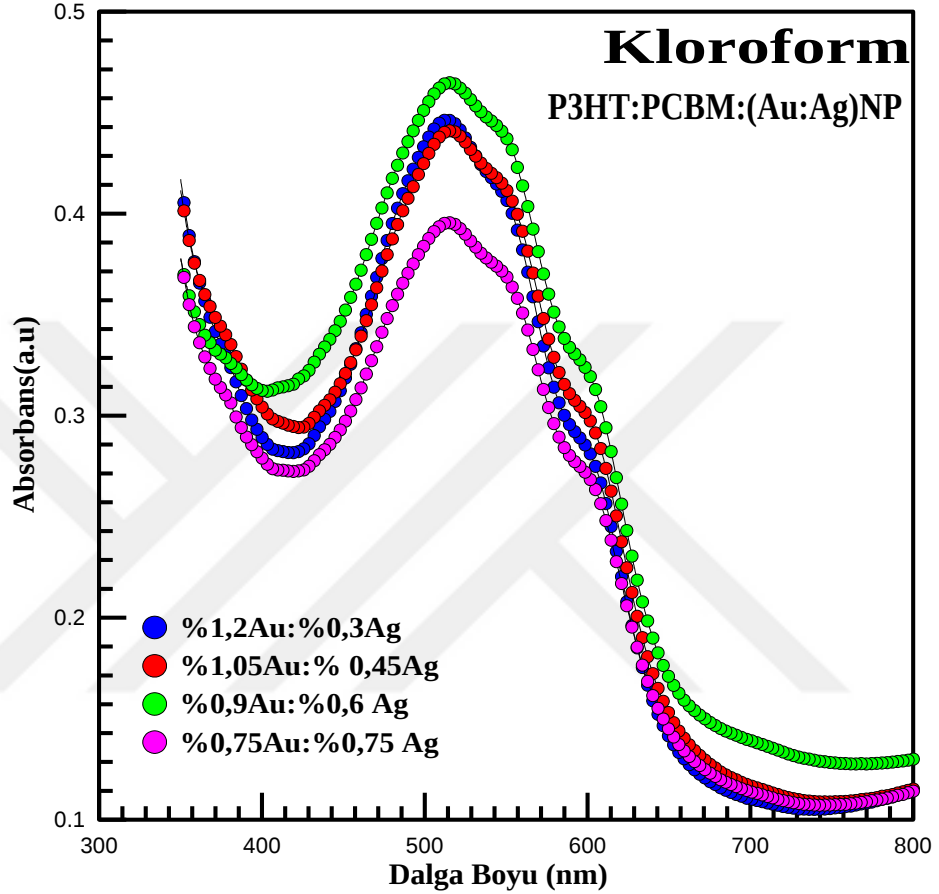
Şekil 4.15’de klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %1,2 Au :%0,3 Ag, %1,05 Au :%0,45 Ag , %0,9 Au :%0,6 Ag , %0,75 Au :%0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkların birlikte katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri verilmiştir. Elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı optik soğurma yardımıyla hesaplandı. Yapılan hesaplamalarda %1,2 Au : %0,3 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla yasak enerji aralığı 1,92 eV’a olarak hesaplanmıştır. %1,05 Au : %0,45 Ag , %0,9 Au : %0,6 Ag, %0,75 Au: %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin enerji band aralığının 1,93 eV’a yaklaştırmıştır. Aktif tabakadaki gümüş nanoparçacıklarının artması yasak enerji band aralığını çok az da olsa arttırmıştır.



**Şekil 4.15.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) ve gümüş (Ag) nanoparçacıkların birlikte katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri

Şekil 4.16’da kloroform çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakası %1,2 Au : %0,3 Ag , %1,05 Au : %0,45 Ag , %0,9 Au : %0,6 Ag, %0,75 Au : %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkları ile katkılanarak P3HT : PCBM:(Au:Ag)NP dörtlü karışımların oluşturduğu filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan dörtlü karışımda gümüş miktarının artması soğurma spektrumun kırmızıya doğru kaymasını sağlamıştır. Ayrıca bu dörtlü karışımdaki gümüş oranları değiştirilerek altın-gümüş karışımı olan nanoparçacıklarının yüzey plazmon rezonansı (LSPR) altın ve gümüşün yüzey plazmon bantları arasında ayarlanabilir. Bu çözücüyle hazırlanan dörtlü karışımın en yüksek soğurması yaklaşık olarak 505nm gerçekleşmektedir. Bu dörtlü filmlerin soğurma spektrumu yüzey plazmon rezonansı

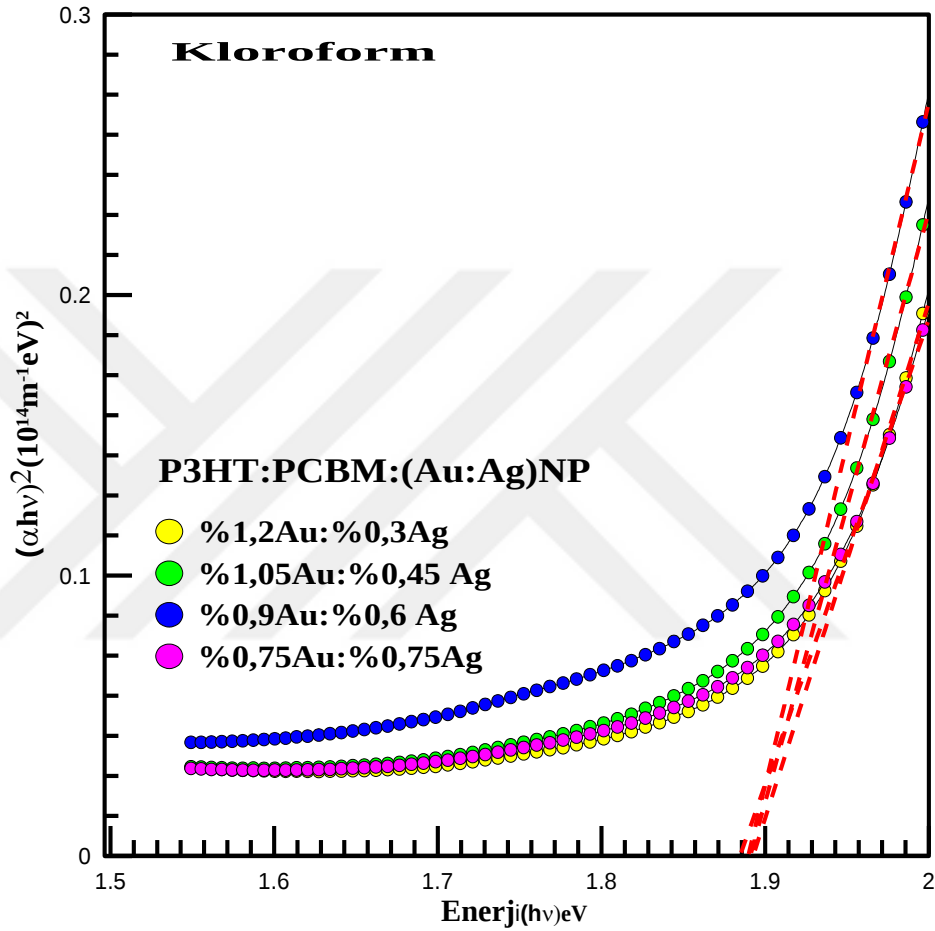
piki yakınında bir yamaça sahiptir ve durum bize bu bölgede kısmi parçacık toplanmasını olduğu göstermiştir (Dengler *et al.* 2012).



**Şekil 4.16.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın ve gümüş nanoparçacıklarının birlikte katkılanmasıyla elde edilen soğurma grafikleri

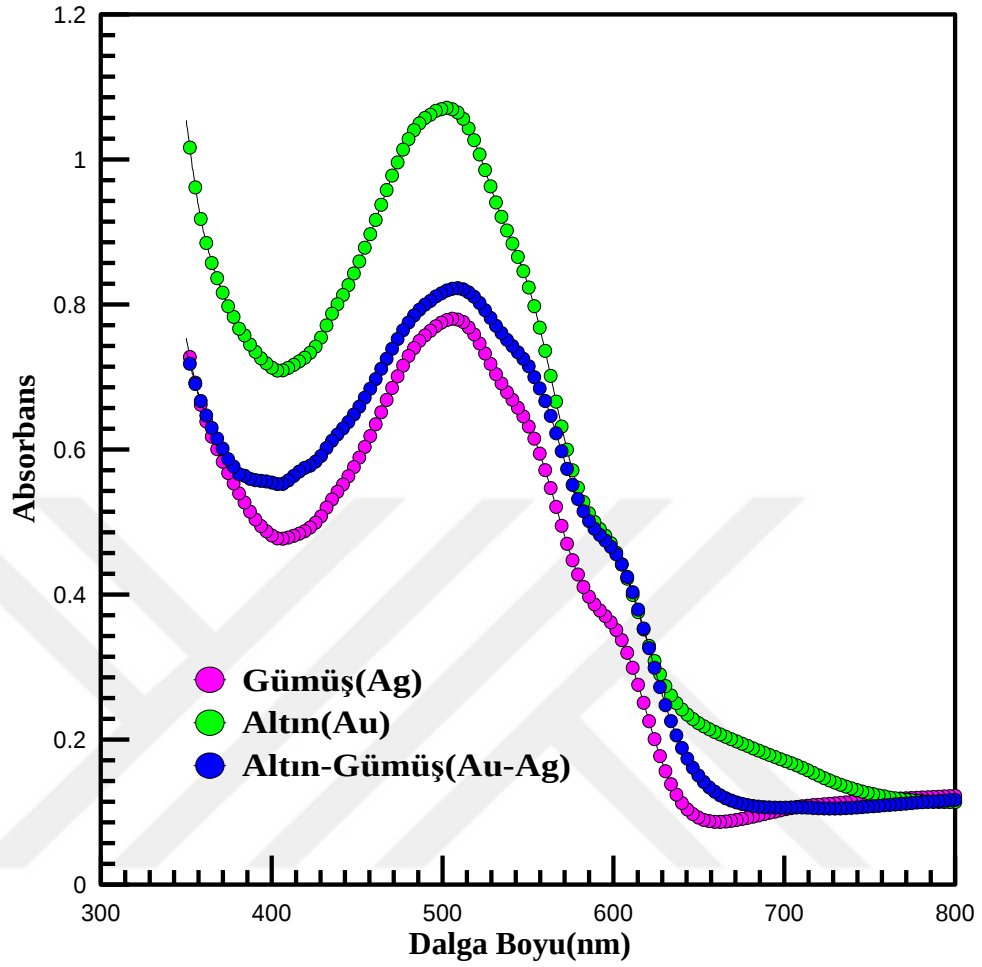
Şekil 4.17’de kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT : PCBM aktif tabakasına %1,2 Au : %0,3 Ag , %1,05 Au : %0,45 Ag , %0,9 Au : %0,6 Ag , %0,75 Au : %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıklarının birlikte katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri verilmiştir. Elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı optik soğurma yardımıyla hesaplandı. Yapılan hesaplamalarda %1,2 Au : %0,3 Ag , %1,05 Au : %0,45 Ag ve %0,75 Au: %0,75 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla yasak enerji band aralığı 1,89 eV olarak hesaplanmıştır. %0,9 Au: %0,6 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkların aktif tabakaya katkılanmasıyla elde edilen yasak enerji band aralığı 1,88 eV olarak

hesaplanmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan farklı oranlarda altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Ag:Au filmlerinin yasak enerji band aralığı çok az değişmiştir.



**Şekil 4.17.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına farklı oranlarda altın (Au) ve gümüş (Ag) nanoparçacık katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin oda sıcaklığında  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafikleri

Şekil 4.18’de altın, gümüş ve altın- gümüş nanoparçacıklarının oluşturduğu filmlerin soğurma grafikleri verilmiştir. Soğurma grafiklerinde görüldüğü gibi altın nanoparçacıkların ışığı soğurması gümüş nanoparçacıklarından daha fazladır. Altın-gümüş karışımının oluşturduğu alaşımların soğurmasında bu iki nanoparçacığın soğurma spektrumu arasındadır. Gümüş çabuk oksitlenen bir malzeme olduğundan yapısı kolayca bozulur bu yüzden soğurması düşüktür.



**Şekil 4.18.** Altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkların soğurma grafikleri

Bu bölümde farklı çözücülerle hazırlanan aktif tabakaya altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen filmlerin yasak enerji band aralığı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalardan da görüldüğü üzere P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanan nanoparçacıklar aktif tabakayı oluşturan organik yarıiletkenlerin özellikle de P3HT'deki  $\pi$ - $\pi$  bağlarının yapısını bozarak taşıyıcı konsantrasyonun artmasına sebep olmuştur. Bu nanoparçacıklar organik yarıiletkenlerin yapısını bozarak yarıiletkenlerin dejenere yarıiletken özelliği göstermesine sebep olmuştur. Nanoparçacıklar organik yarıiletken içerisindeki atomlarla etkileşerek HOMO veya LUMO seviyelerinin genişlemesine sağlayarak fermi enerji seviyelerinin bu seviye içerisine girmesini sağlamıştır. Bu yüzden ölçülen yasak enerji band aralığı çok az da olsa artmıştır. Bizim bu tez kapsamında amacımız kullandığımız nanoparçacıkların daha

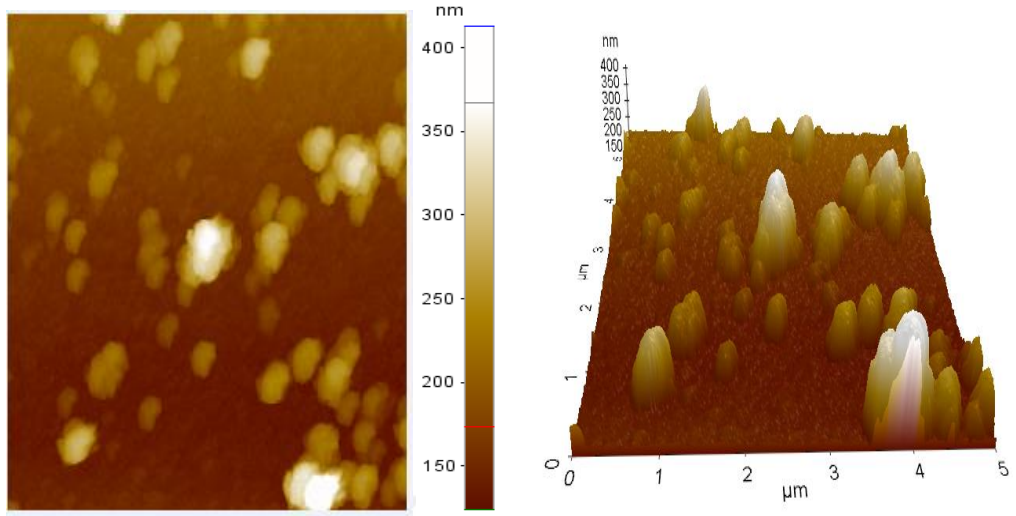
fazla ışıık soğurarak yeni elektron-hol çiftleri oluşturarak elde edilen güneş pillerinin akımına katkı sağlayarak verimi arttırmasıdır.

#### 4.2.2. AFM görüntüleri

AFM görüntüleri, ITO üzerine iki farklı çözücü kullanılarak hazırlanan kaplanan P3HT:PCBM aktif tabakaları ve bu aktif tabakalara katkılanan nanoparçacıkların oluşturduğu filmlerin yüzey görüntüleri hakkında net bilgi elde etmemizi sağlamıştır. Bu çalışmada AFM ölçüleriyle iki ve üç boyutlu yüzey profili elde edilmiştir. Yapılan ölçümler esnasında elde edilen filmlerin yüzey morfolojisini bozacak herhangi bir metal kaplama yapılmamıştır.

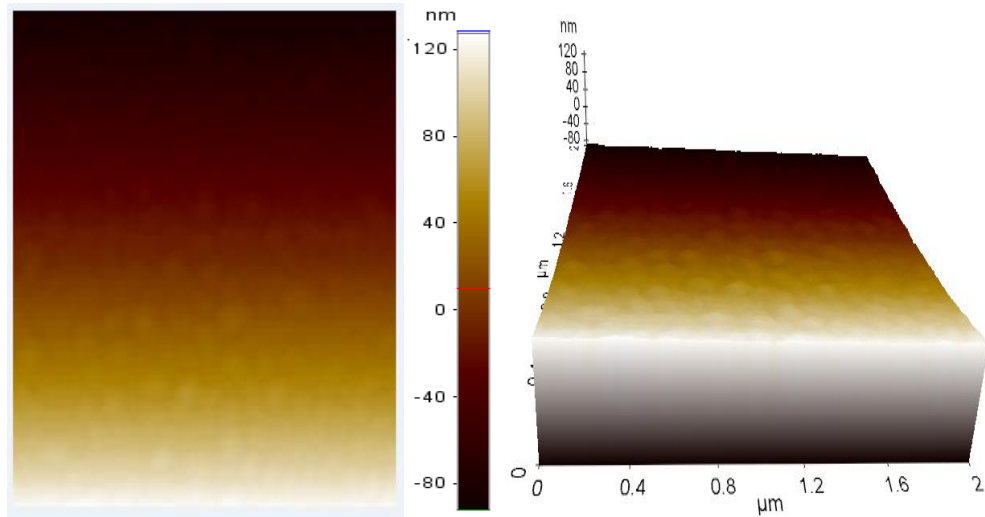
Bu tez çalışmasında öncelikle organik güneş pillerinde güç dönüşüm verimliliği arttırmak için kullanılan altın ve gümüş nanoparçacıkların AFM görüntüleri verilerek daha sonra klorobenzen ve kloroform çözücüleri kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM filmler ve bu iki çözücü ile hazırlanmış aktif tabakalara altın, gümüş ve bunların alaşımı olan altın-gümüş nanoparçacıkları katkılanarak elde edilen bu filmlerin AFM görüntüleri verilecektir.

Şekil 4.19’da cam yüzeyi gümüş nanoparçacıklarıyla ince film olarak kaplanarak iki ve üç boyutlu alınan AFM görüntüleri görülmektedir. Görüntülerden de görüldüğü üzere gümüş nanoparçacıkları yüzey üzerine homojen olarak dağılmıştır. Bu AFM görüntüleri incelendiğinde farklı boyutlarda sözde küresel parçacıklar görüyoruz ve benzer sonuçlar (Alahmad 2014) tarafındanda görünmüştür. Kaplanan filmlerin bazı bölgelerinde gümüş nanoparçacık yığılmaları gözlenmiştir ve durum nanoparçacıkların AFM tarama alanı içerisinde gözlenmesini nispeten zorlaştırmıştır (Rao *et al.* 2007). Bu yığınsal gümüş nanoparçacıkları hem yatay hemde dikey yönde büyümüştür ve benzer sonuçlar Li *et al.* 2016 tarafından da bulunmuştur.



**Şekil 4.19.** Gümüş (Ag) nanoparçacıkların AFM görüntüsü

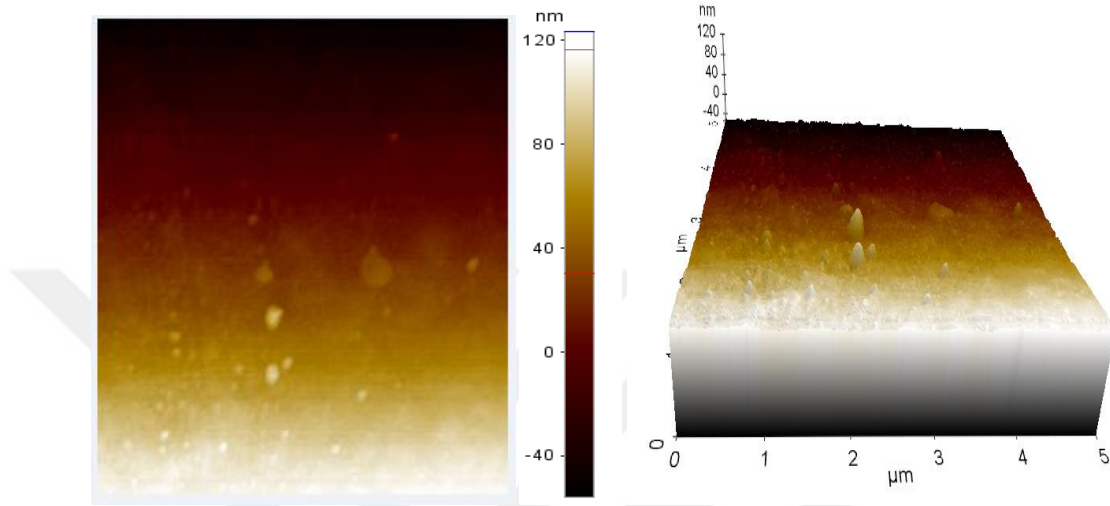
Şekil 4.20.'de cam yüzeyi altın nanoparçacıklarıyla ince film olarak kaplanmış iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri görülmektedir. Altın nanoparçacıklarının AFM görüntüsü incelendiğinde düz bir yüzey üzerinde homojen ve düzenli küresel nanoparçacıklar görülmektedir.



**Şekil 4.20.** Altın (Au) nanoparçacıkların AFM görüntüsü

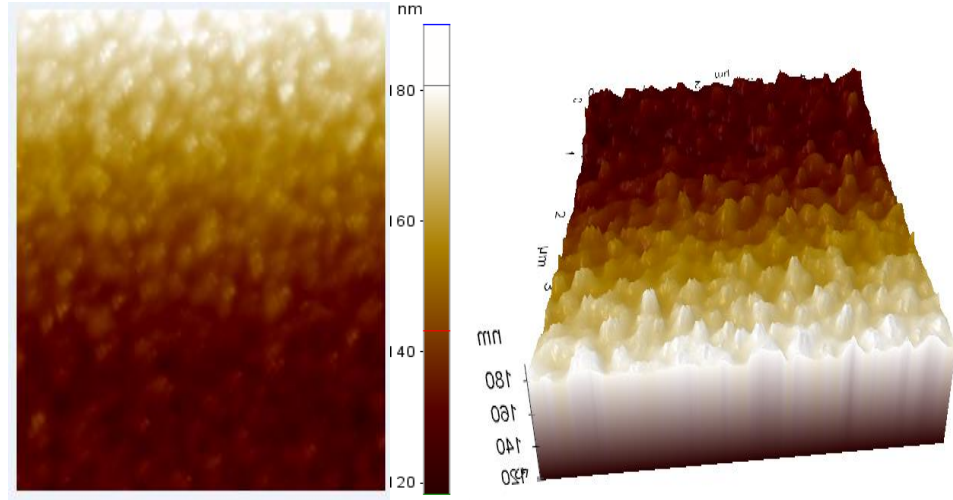
Şekil 4.21'de klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası ince film olarak ITO üzerine kaplanan iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri

görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde P3HT ve PCBM'in oluşturduğu aktif tabaka yüzeye homojen bir şekilde kaplanmış ve yüzey pürüzlülüğünün nispeten daha az olduğu gözlemlenmiştir.



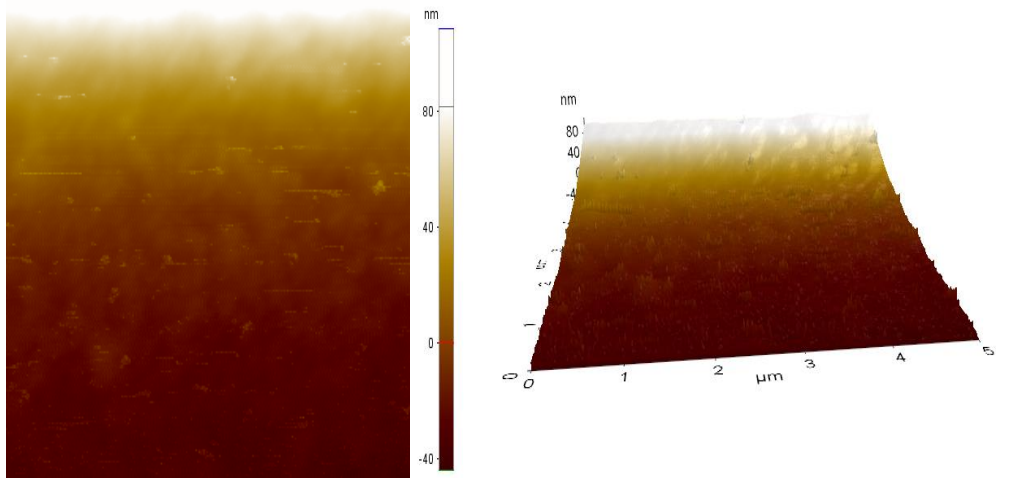
**Şekil 4.21.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasının AFM görüntüsü

Şekil 4.22’de ITO yüzeyi üzerine klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakaya gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Ag filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü gibi P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanan gümüş nanoparçacıkları yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Bu artışı en iyi gümüş nanoparçacık katkılanmamış P3HT:PCBM filmi (Şekil 4.22) ile gümüş nanoparçacık katkılanmış P3HT:PCBM:Ag filminin (Şekil 4.23) AFM görüntülerinin karşılaştırılmasıyla görebiliriz. Bu nanoparçacıkların oluşturduğu yüzey pürüzlülükleri ışığın aktif tabaka içerisinde tuzaklanmasını sağlayarak ışığın daha uzun süre aktif tabaka içerisinde kalmasını bekleriz.



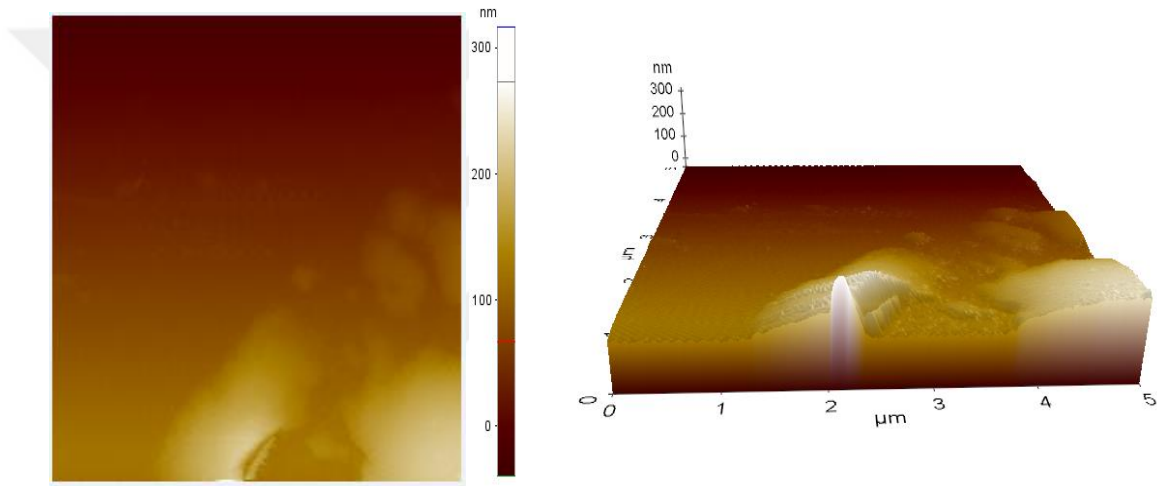
**Şekil 4.22.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan gümüş nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü

Şekil 4.23’de ITO yüzeyi üzerine klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakaya altın nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Ag filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri görülmektedir. P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanan altın nanoparçacıkları kısmen yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan nanoparçacık katkısız film yani Şekil 4.22 altın nanoparçacık katkılı film ile kıyaslandığında daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülebilir.



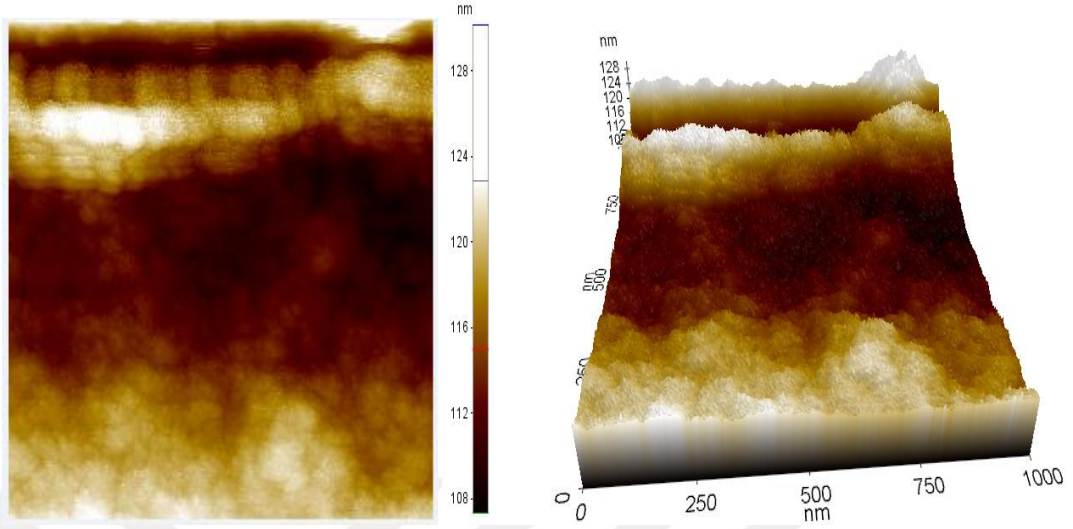
**Şekil 4.23.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklarının oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü

Şekil 4.24’de ITO yüzeyi üzerine klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakaya altın ve gümüş nanoparçacıklarının birlikte katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Au:Ag filminin iki ve üç boyutlu AFM alınan görüntüleri verilmiştir . Şekildeki görüntülerden de görüldüğü üzere altın ve gümüş nanoparçacıkları birleşerek büyük nanoparçacık yığılmaları görülmektedir. Bu yığılmalar ITO yüzeyinin kenarlarında görülmektedir. Diğer altın ve gümüş nanoparçacık katkılanan filmlere kıyasla nanoparçacıkların yüzeye homojen dağılmadığı sonucu çıkarılabilir.



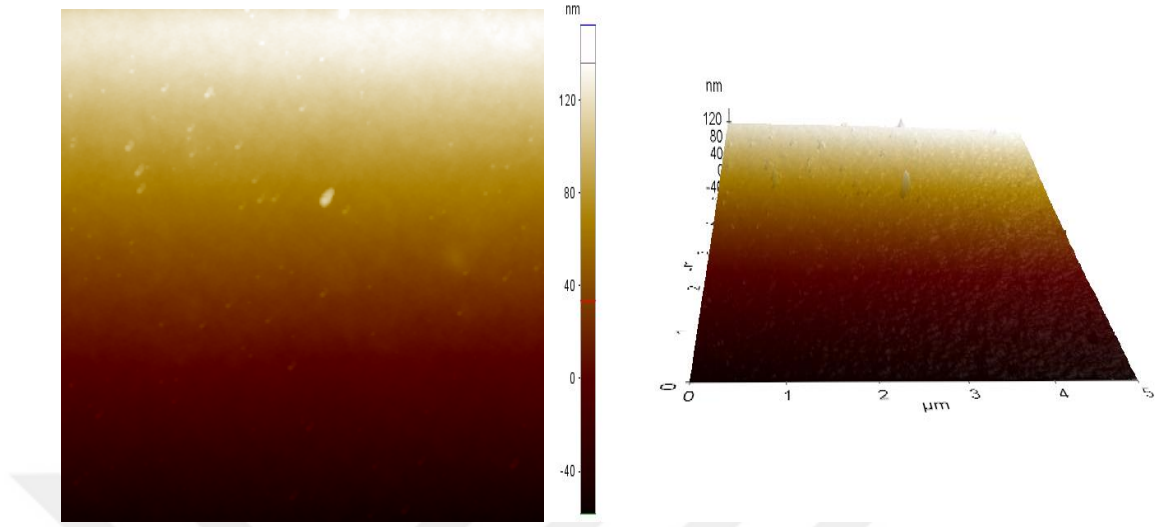
**Şekil 4.24.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın ve gümüş nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Au:Ag filminin AFM görüntüsü

Şekil 4.25’de kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası ITO yüzeyine kaplanarak filmlerin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri alınmıştır. Şekillerden de görüldüğü üzere klorobenzen ve kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakaları karşılaştırıldığında klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka yüzeye daha homojen olarak dağılmıştır. Bu durumda P3HT ve PCBM organik yarıiletkenlerinin klorobenzen içerisinde daha iyi çözündüğünü AFM görüntüleri karşılaştırılarak görülebilir. Bu sonuçlar elektriksel ölçümler ile uyum sağlamaktadır.



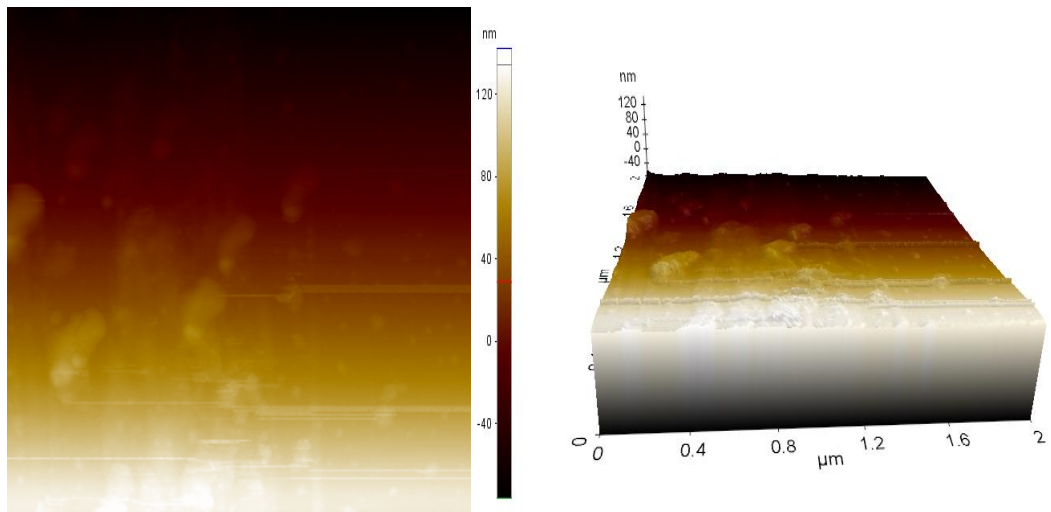
**Şekil 4.25.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasının AFM görüntüsü

Şekil 4.26’da ITO yüzeyi kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakaya gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Ag filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanan gümüş nanoparçacıkları daha pürüzlü bir yüzey oluşturarak akım yoğunluğun artmasını sağlamıştır (Marumoto *et al.* 2016). Klorobenzen ve kloroform çözücü ile hazırlanan aktif tabakalara katkılanan gümüş nanoparçacıkları ile hazırlanan filmler karşılaştırıldığında klorobenzenle hazırlanan aktif tabakalarda gümüş nanoparçacıkların yüzeylerinin daha pürüzlü oldukları AFM resimlerinde görülmektedir.



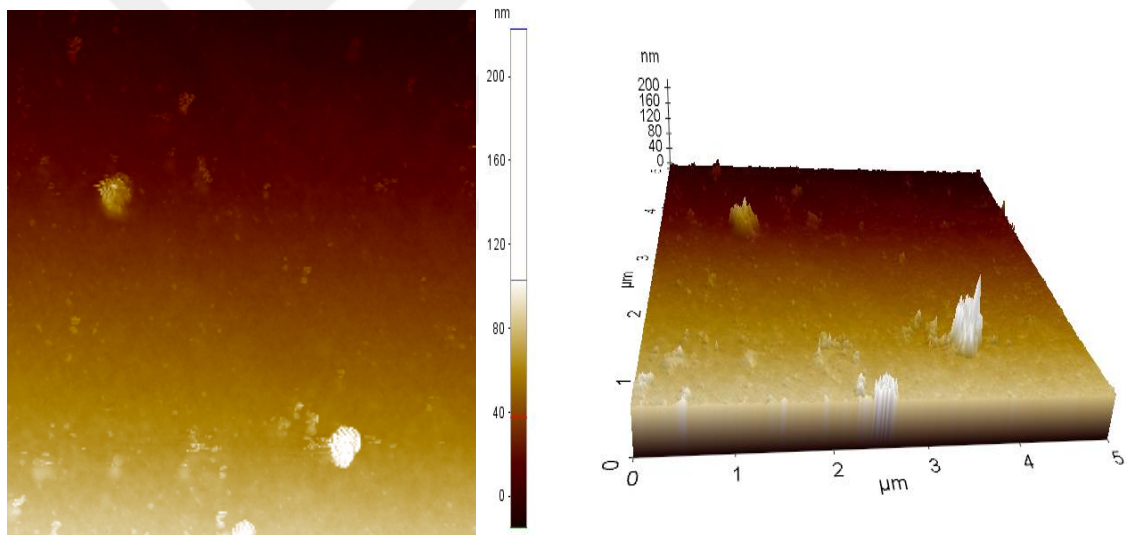
**Şekil 4.26.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan gümüş nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag filminin AFM görüntüsü

Şekil 4.27’de ITO yüzeyi kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakaya altın nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Au filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.27’de görüldüğü gibi kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya altın nanoparçacıklarının katkılanmasıyla film yüzeyinde aşırı büyümüş kümeler meydana gelmiştir. Benzer sonuçlar Baek *et al.* 2010 tarafından da gözlenmiştir.



**Şekil 4.27.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklarının oluşturduğu P3HT:PCBM:Au filminin AFM görüntüsü

Şekil 4.28’de ITO yüzeyi üzerine kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakaya altın ve gümüş nanoparçacıkların birlikte katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:Ag:Au filminin iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi aktif tabaka içerisindeki altın ve gümüş nanoparçacıklar film yüzeyindeki yükseltilerin artmasına ve yük taşıma mesafesini etkili bir şekilde azaltır fakat bu durum ışığın daha verimli kullanılmasını sağlar, kısa devre akım yoğunluğunun ( $J_{SC}$ ) ve güneş pillerinin güç dönüşüm verimini arttırabilir (Bliznyuk *et al.* 2016). Aktif tabaka içerisindeki altın ve gümüş nanoparçacıklar yüzey pürüzlülüğünü artırarak ışık saçılmalarına ve emilimlerini sağlayarak ışığın daha uzun süre aktif tabaka içerisinde kalmasını sağlar (Li *et al.* 2005).

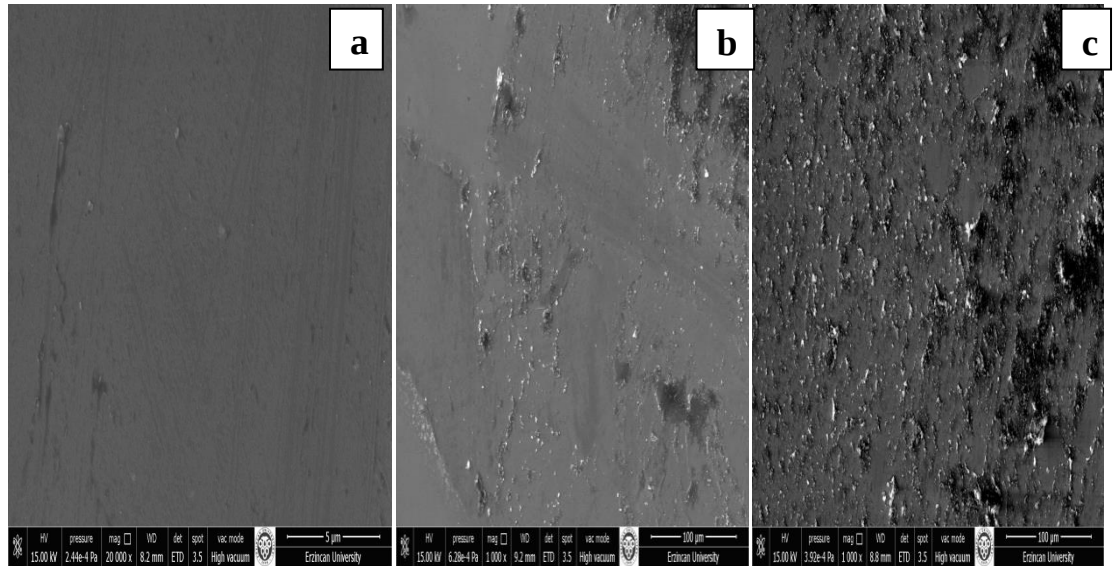


**Şekil 4.28.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıkların oluşturduğu P3HT:PCBM:Ag:Au filminin AFM görüntüsü

#### 4.2.3. SEM görüntüleri

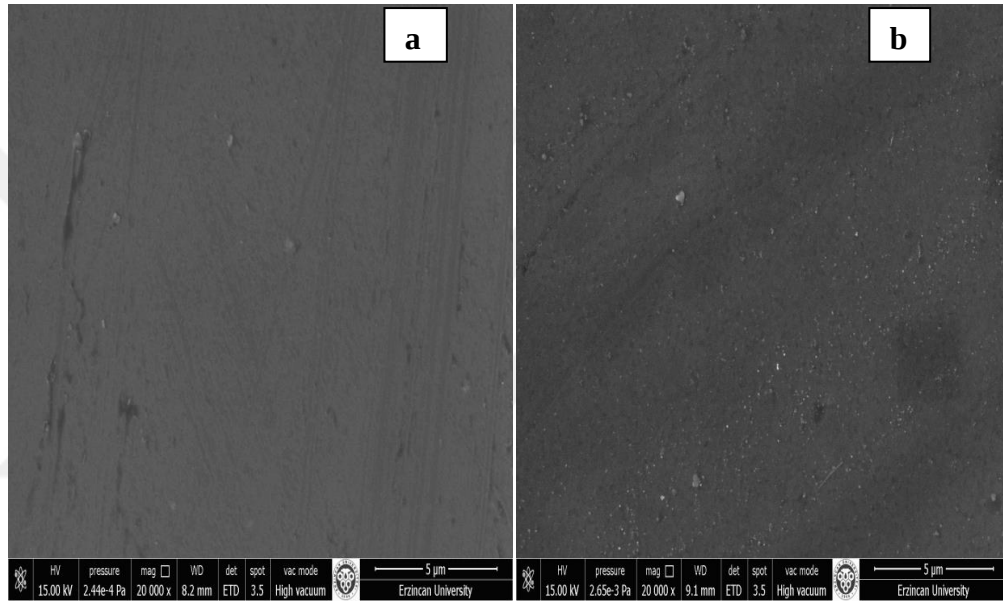
Klorobenzen ve kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakalar altın, gümüş ve altın-gümüş karışımı olan nanoparçacıklar ile katkılanarak oluşan P3HT:PCBM, P3HT:PCBM:AgNP , P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP filmlerinin SEM görüntüleri alındı. Yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronlar bu elde edilen filmlerin üzerine odaklanması ile bu elektron demetinin film yüzeyine taratılması sonucunda

elektron ve filmdeki atomlar arasında oluşan çeşitli girişimler alıcılar tarafından toplanıp sinyallerle güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranlara aktarılmasıyla SEM görüntüleri elde edilir. Klorobenzen çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası ITO yüzeyine 1000 rpm de 50 s süre ile kaplandı ve ardından 115°C’de tavlandı. Şekil 4.29 (a)’da ITO yüzeyi klorobenzen çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM filminin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29(a)’da görüldüğü üzere P3HT:PCBM çözeltisiyle hazırlanan aktif tabaka ITO yüzeyine homojen olarak dağılmış ve yüzeyde herhangi bir pürüzlülük gözlenmemiştir. Şekil 4.29.(b)’de ITO yüzeyine klorobenzen çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM’e gümüş nanoparçacıkları katkılanarak hazırlanan aktif tabakanın SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29(b)’de görüldüğü üzere gümüş nanoparçacıkları yüzeye hemen hemen homojen dağılmıştır. Şekil 4.29(c)’de klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM tabakasına altın nanoparçacıkları katkılanarak elde edilen filmin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29’da görüldüğü üzere altın nanoparçacıkları yüzeyde kısmı kümelenmeler ile birlikte yüzeye homojen olarak dağılmıştır.



**Şekil 4.29.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM  
(a) P3HT:PCBM:Ag’ün (b) P3HT:PCBM:Ag’nın (c) filmlerinin SEM görüntüsü

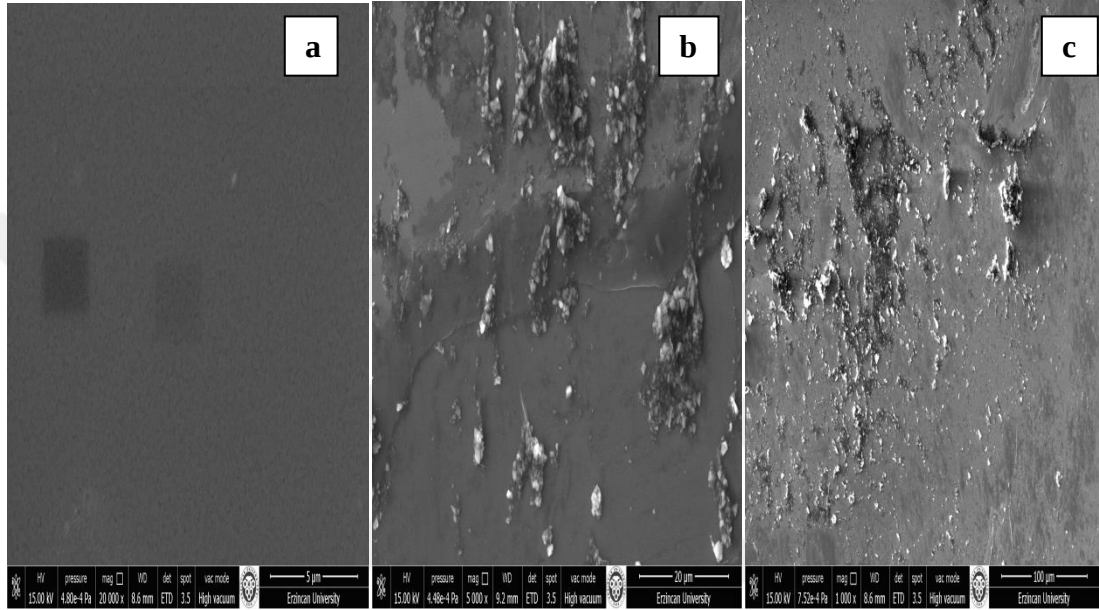
Şekil 4.30'da klorobenzen çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası altın ve gümüş karışımı olan nanoparçacıklar ile katkılanarak elde edilen filmlerin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.30(b)'de görüldüğü üzere bu çözücü ile hazırlanan aktif tabakaya altın ve gümüş karışımı olan nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen filmlerde nanoparçacıklar yarı küreye benzer yuvarlak şekillere sahip küçük parçacıklar şeklinde görülmektedir. Benzer yapılar Shahin *et al.* 2012 tarafından da görülmektedir.



**Şekil 4.30.** P3HT:PCBM (a) P3HT:PCBM:Ag:Au'nın (d) SEM görüntüsü

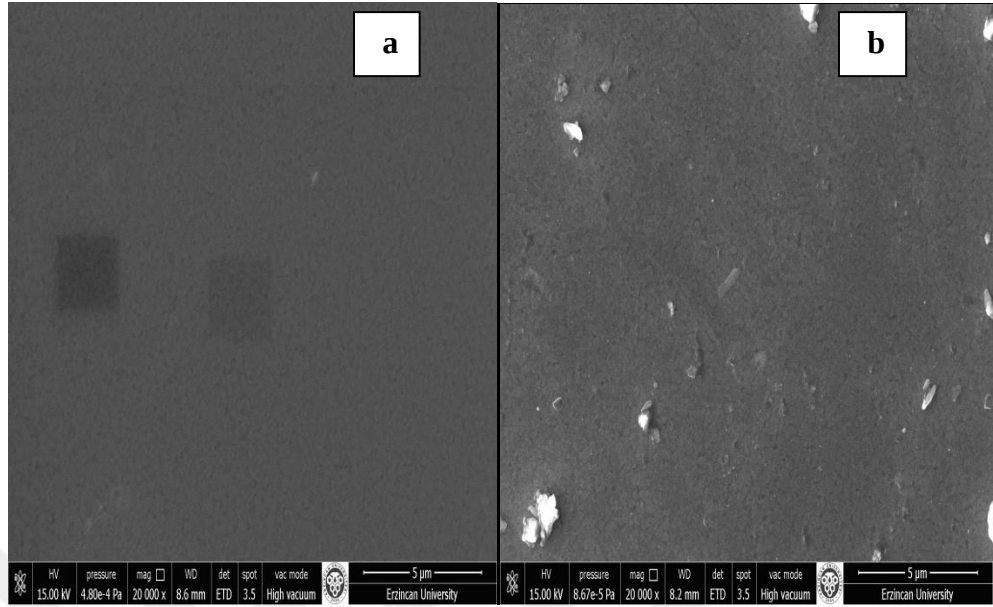
Kloroform çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası ITO yüzeyine 800 rpm de 50 s'lik sürede kaplandı ve ardından 115°C'de tavlandı. Şekil 4.28'da ITO yüzeyi kloroform çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM'nin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil görüldüğü üzere P3HT:PCBM çözeltisiyle hazırlanan aktif tabaka ITO yüzeyine homojen olarak dağılmış ve yüzeyde kısmi çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlakların oluşması kloroform çözücüsünün buharlaşma sıcaklığının düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çatlaklar filmin homojenliğini bozmuş ve film yüzeyinde elektron transferini zorlaştırmıştır. Bu durum filmin yüzey direncinin artmasına sebep olmuş olabilir. Şekil 4.29'da ITO üzerine kloroform çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM'e gümüş nanoparçacıkları katkılanarak hazırlanan aktif tabakanın SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29'da kloroform çözücüsüyle hazırlanan

P3HT:PCBM tabakasına altın nanoparçacıkları katkılanarak elde edilen filmin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da görüldüğü gibi altın ve gümüş nanoparçacıklar homojen dağılmak yerine bazı bölgelerde kümelenmeler oluşmaktadır ve bu durum filmin yüzey direncinin artışına sebep olmaktadır.



**Şekil 4.31.** P3HT:PCBM (a) P3HT:PCBM:Ag’ün (b) P3HT:PCBM:Au’nın (c) SEM görüntüsü

Şekil 4.32(b)’de kloroform çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası altın ve gümüş karışımı olan nanoparçacıklar ile katkılanarak elde edilen filmlerin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.32(b)’de görüldüğü üzere bu çözücü ile hazırlanan aktif tabakaya altın - gümüş karışımı olan nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen filmlerde nanoparçacık kümelenmeleri oluşmuştur (Shahin *et al.* 2012). SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi bu kümelenmeler parçacıklar arasındaki mesafeyi azaltmıştır. Bu durum organik güneş pillerinin performansını önemli bir şekilde etkileyebilir. Bu kümelenmelerin ışığı daha fazla yansıtması beklenir.



**Şekil 4.32.** P3HT:PCBM (a) P3HT:PCBM:Ag:Au'nın (b) SEM görüntüsü

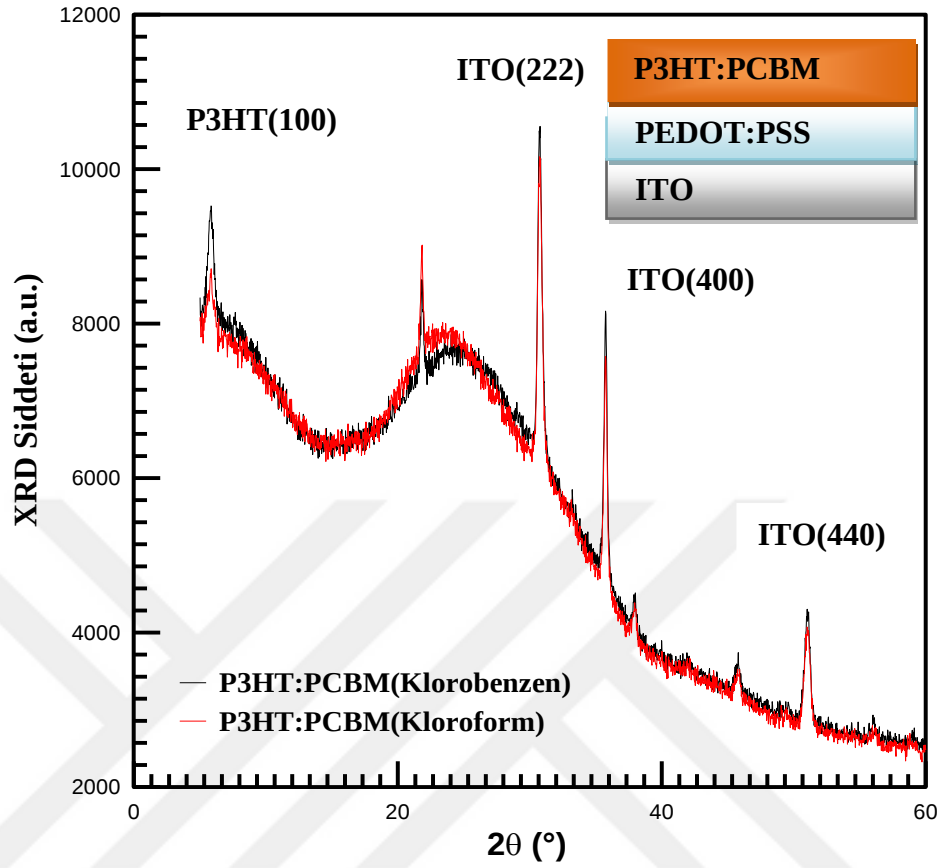
#### 4.2.4. XRD ölçümleri

Bir malzemeyi atomik boyutta incelemek için yüksek çözünürlüğe sahip çeşitli elektron mikroskoplarının kullanılması gerekmektedir. Fakat bilinmeyen yapıların yapısal parametreleri belirlemek için bazı kırınım tekniklerini kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında katıların kristal yapılarını incelemeye en çok kullanılan kırınım tekniği X -ışını kırınımıdır. Bu tekniğin kullanılmasının temel sebepleri şunlardır ; 1. Gönderilen X-ışınlarının dalga boyları, atomik mesafeler ölçüsünde olup yapısal araştırmalar kullanıma imkanı sağlamaktadır. 2. X-ışını kırınım tekniği numunenin yapısını bozmadığında yıkıcı değildirler. X-ışını kırınımı tekniği ile şu bilgileri elde edebiliriz;

- Gönderilen X-ışını ile kristalin yapısını belirlenir
- Kristaldeki atomların ne kadar mükemmel bir şekilde dizildiğine ve fazın saflığının belirlenmesine yardımcı olur
- Kristaldeki atomların doğrultularını belirlemeye yardımcı olur
- Kristaldeki atomların örgü sabitlerini belirlemeye yardımcı olur

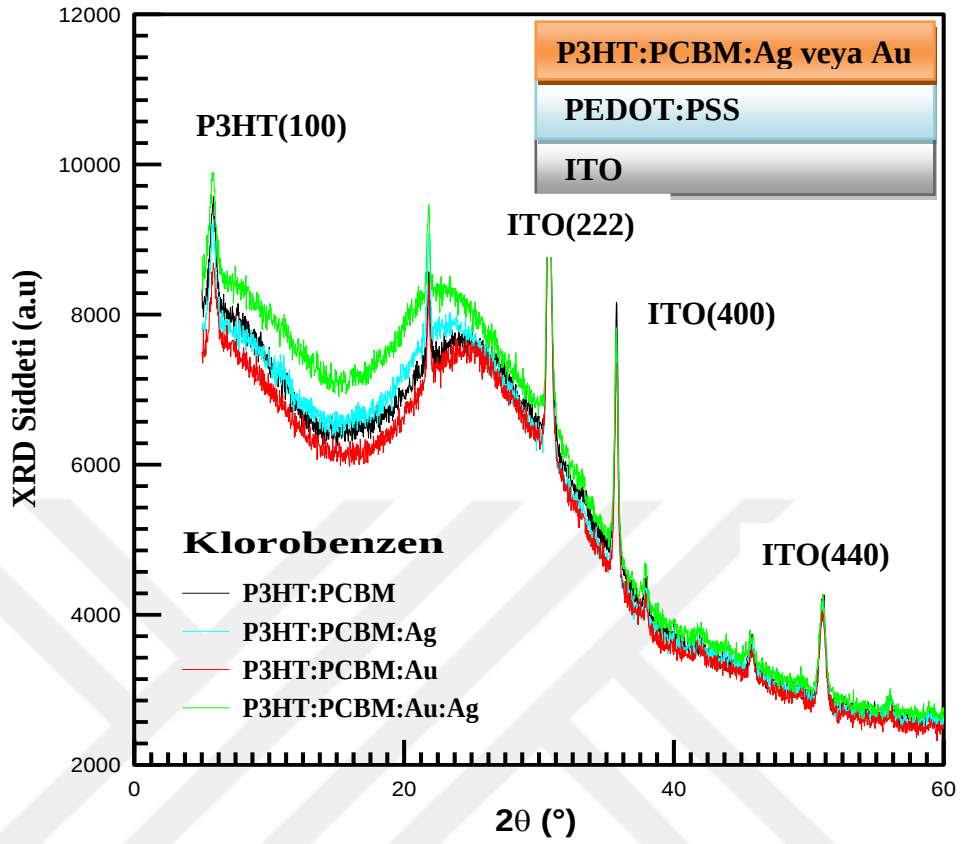
ITO yüzeyi PEDOT:PSS ile kaplanarak üzeri klorobenzen ve kloroform çözücüsü ile hazırlanan 1:1 ve 1:0,8 oranında karıştırılmış P3HT:PCBM, altın nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM:Ag, gümüş nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM:Ag ve altın-gümüş karışımı olan P3HT:PCBM:Ag:Ag malzemeleri ile kaplanarak XRD (X-ışını kırınımı) ölçümleri alındı.

Şekil 4.33’de aygıt tasarımında olduğu gibi klorobenzen ve kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM organik malzemelerinin XRD ölçümleri verilmiştir. İki farklı çözücüyle hazırlanan P3HT:PCBM karışımının XRD ölçümleri incelendiğinde yaklaşık  $2\theta$  da  $5,5^\circ$  civarında keskin XRD pikleri görülmektedir. Fakat bu açı civarında klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM karışımının XRD şiddeti daha fazladır. Bu açı karşılığına gelen pikler (1 0 0) düzlemine karşılık gelir (Lee *et al.* 2011). Bu düzleme karşılık gelen pik P3HT’ye karşılık gelir.  $2\theta=22^\circ$ ,  $2\theta=29^\circ$ ,  $2\theta=34^\circ$  ve diğer pikler PEDOT:PSS, ITO ve PCBM’e karşılık gelir (Lee *et al.* 2016). Polimerin kristal boyutlarının artması, aktif tabaka içerisinde kristalleşmiş polimer alanının artmasıyla açıklanır. Organik güneş pillerinde kullanılan P3HT ve PCBM polimerinin kristalleşmesinin artması, polimer zincirleri ile moleküller arasındaki  $\pi$  - $\pi$  bağları arasında kristalin sırasını etkileyebilir, bu durum aktif tabakanın soğurma, soğurma aralığını ve elektron transferini etkileyebilir. Güçlendirilmiş kristalleşme ile pürüzlendirilmiş yüzey, yük taşıma mesafesini verimli bir şekilde azaltır. Bu durum aktif tabakadan ışık saçılmasını ve ışık soğurmasını artırır. XRD sonuçlarından da görüldüğü üzere klorobenzenle hazırlanan P3HT:PCBM daha fazla kristalleşme özelliğine sahiptir.



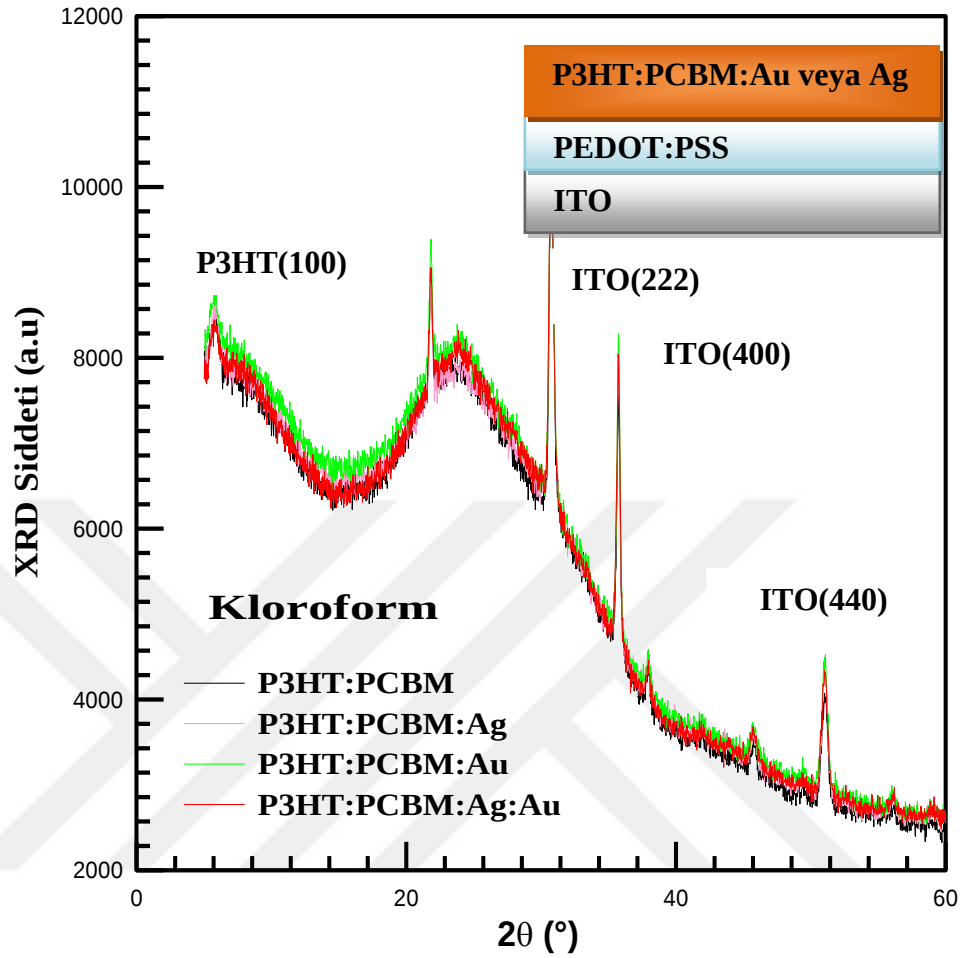
**Şekil 4.33.** Klorobenzen ve kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'in XRD ölçümü

Şekil 4.34'de aygıt tasarımında olduğu gibi klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM ve bu aktif tabakaya altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları katkılanarak elde edilen filmlerin XRD ölçümleri verilmiştir. Aktif tabakaya katkılanan gümüş ve altın - gümüş nanoparçacıkları referans aktif tabakaya göre XRD şiddetini arttırmıştır. Fakat aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklar XRD şiddetini azaltmıştır. XRD ölçümlerinde altın, gümüş, altın-gümüş nanoparçacığına ait pikler çok zayıf olup yaklaşık  $2\theta=38,5^\circ$  ve  $2\theta=45^\circ$  derecesinde sırasıyla (111) ve (200) düzlemleri görülmektedir (Gollu *et al.* 2016).



**Şekil 4.34.** Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'e altın, gümüş, altın-gümüş nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen filmlerin XRD ölçümü

Şekil 4.35'de aygıt tasarımında olduğu gibi kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM ve bu aktif tabaka altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları katkılanarak elde edilen filmlerin XRD ölçümleri verilmiştir. Şekil 4.33'de görüldüğü üzere kloroform çözücüsüyle hazırlanan filmlerin klorobenzen çözüsüyle hazırlanan filmlere göre X-ışını kırınımı şiddeti daha zayıftır. Fakat aktif tabakaya katkılanan altın, gümüş ve altın - gümüş nanoparçacıkları referans aktif tabakaya göre XRD şiddetini arttırmıştır. Aynı pikleri kloroform çözücüsü ile hazırlanan filmlerde de gözlemlemekteyiz. P3HT organik malzemesi iyi kristalleşme özelliğine sahip olduğundan dolayı amorf yapıya sahip olan PCBM ile homojen bir yapı sağlamıştır (Sahare *et al.* 2015).



**Şekil 4.35.** Kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM'ye altın, gümüş, altın-gümüş nanoparçacıklarının katkılanmasıyla elde edilen filmlerin XRD ölçümü

#### 4.3. Kloroform ve Klorobenzenle hazırlanan P3HT:PCBM Tabanlı Organik Güneş Pillerinin *J-V* (Akım Yoğunluğu-Voltaj) Ölçümleri

Bu tez çalışma süresince klorobenzen ve kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakalar kullanılarak iki farklı referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM (klorobenzen)/LiF/Al ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM(kloroform)/LiF /Al aygıtları yapıldı. Daha sonra bu iki farklı çözücü kullanılarak hazırlanan aktif tabakalara farklı oranlarda altın (Au) nanoparçacıklarının katkılандığı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au/LiF/Al, gümüş (Ag) nanoparçacıklarının katkılандığı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al ve altın-gümüş nanoparçacıklarının katkılандığı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au:Ag/LiF/Al organik

güneş pillerinin karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında  $J$ - $V$  (akım yoğunluğu– voltaj) ölçümleri eldivenli kabin içerisinde alındı. 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında alınan  $I$ - $V$  ölçümlerinden elde edilen grafikler kullanılarak temel güneş pili parametreleri olan kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ), Maksimum güç noktası , seri direnç ( $R_S$ ), paralel direnç ( $R_{SH}$ ), dolum faktörü ( $FF$ - Fill Factor) ve maksimum güç dönüşüm verimi ( $\eta$ - PCE) hesaplandı. Dolum faktörü, pilin kalitesinin bir ölçüsüdür. Dolum faktörü, açık devre gerilim, kısa devre voltajı ve maksimum gerilim akımının çarpımının oranına doğrudan bağlıdır. Buna göre;

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

4.1 denkleminde  $I_{MP}$ ,  $I$ - $V$  grafiğinde gerilimin pozitif olduğu bölgede maksimum gerilime karşılık gelen akımı,  $V_{MP}$  ise akımın negatif olduğu bölgede maksimum lineer akıma karşılık gelen gerilimi ifade eder. Dolum faktörünün büyük olması ideal aygıt yapısını karakterize eder ve aygıtın güç dönüşüm veriminin yüksek olmasını sağlar. Dolum faktörünün yüksek olduğu durumlarda güç dönüşüm verimi de yüksek olur.  $I_{SC}$  ve  $V_{OC}$  güneş pillerinin en temel karakteristik parametreleridir. Güneş pillerinin güç dönüşüm veriminin yüksek olmasında bu parametreler de etkilidir. Organik güneş pillerinde güç dönüşüm verimi ve dolum faktörü hesaplamalarında akım yerine akım yoğunluğu kullanıldı. Akım yoğunluğu birim alan başına düşen akım değeridir ve akım yoğunluğu ( $J$ ), cm<sup>2</sup> başına mA olarak deneysel hesaplarda kullanıldı (mA/cm<sup>2</sup>). Bu yüzden 4.1 ifadesi ;

$$FF = \frac{J_{MP} \cdot V_{MP}}{J_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (4.2)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadeye göre aygıtın güç dönüşüm verimi ( $\eta$ )

$$\eta = \% \frac{P_{Çıkan}}{P_{Giren}} \quad (4.3)$$

$$\eta = \% \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{Giren}} \times 100 \quad (4.4)$$

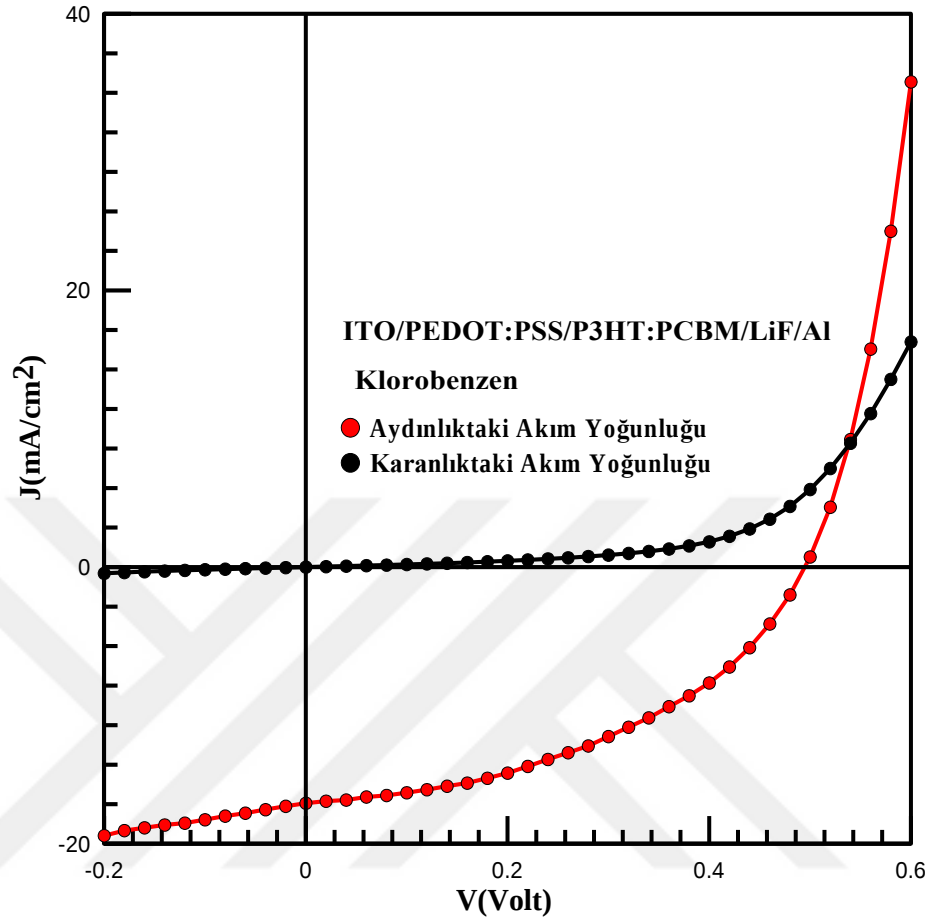
şeklinde hesaplanır (Kymakis *et al.* 2008). Deneysel çalışmalarda üretilen aygıtların yüzey alanı 1,56 cm<sup>2</sup> dir. Işığın atmosferde kat ettiği yolun göstergesi olarak hava kütlesi (air mass) tanımlanmıştır. Güneş, yüzey normaline 48° açıyla gelirken Hava Kütlesi=1,5'dur. Giriş gücü ise AM 1.5 şartlarında 100 mW/cm<sup>2</sup> dir. Dolum faktörü % olarak verilebilir.

Buna göre (1.4) ifadesi

$$\eta = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{100} \quad (4.5)$$

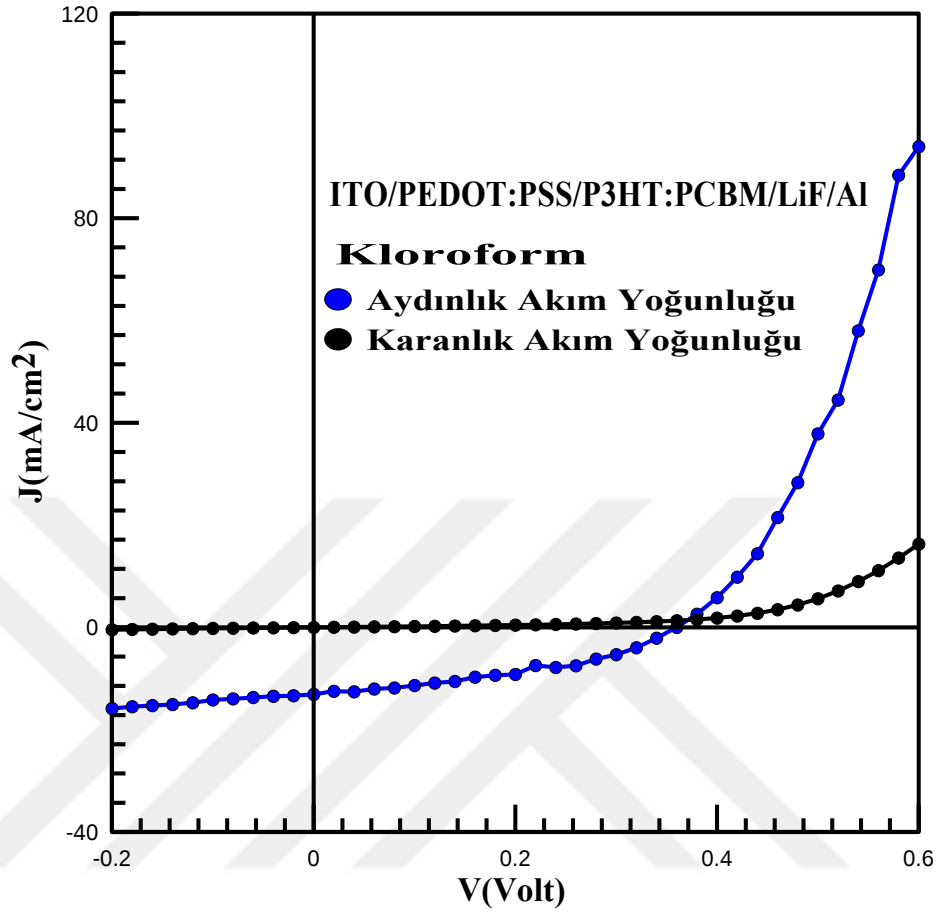
olarak düzenlenebilir.

Deneysel çalışma aşamaları bir önceki bölümde ayrıntılı olarak anlatıldı. Bu çalışmada P3HT ve PCBM organik malzemeleri klorobenzen ve kloroform gibi iki farklı çözücü kullanılarak 1:1 ve 1:0,8 oranında karıştırılarak P3HT:PCBM aktif tabakası elde edildi. Şekil 4.36'da klorobenzen çözücü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakaları kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin karanlık ve ışık altında akım yoğunluğu - voltaj (*J-V*) grafiği verilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki *J-V* ölçümü - 0,2 V ile +0.6 V aralığında 0,02 Voltluk adımlar ile alındı. Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan bu organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (*J<sub>sc</sub>*) 17,06 J(mA/cm<sup>2</sup>), açık devre voltajı (*V<sub>oc</sub>*) 0,48 V, dolum faktörü (*FF*) %45 ve güç dönüşüm verimi (*η*) %2,11 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.36.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin karanlıktaki ve ışık altındaki  $J$ - $V$  karakteristikleri

Şekil 4.37’de kloroform çözücü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakaları kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin karanlık ve ışık altında akım yoğunluğu - voltaj ( $J$ - $V$ ) grafiği verilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki  $J$ - $V$  ölçümü - 0,2 V ile +0.6 V aralığında 0,02 Voltluk adımlar ile alındı. Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan bu organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 14,15 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,34 V, dolum faktörü ( $FF$ ) %43 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %1,56 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.37.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin karanlıktaki ve ışık altındaki  $J$ - $V$  karakteristikleri

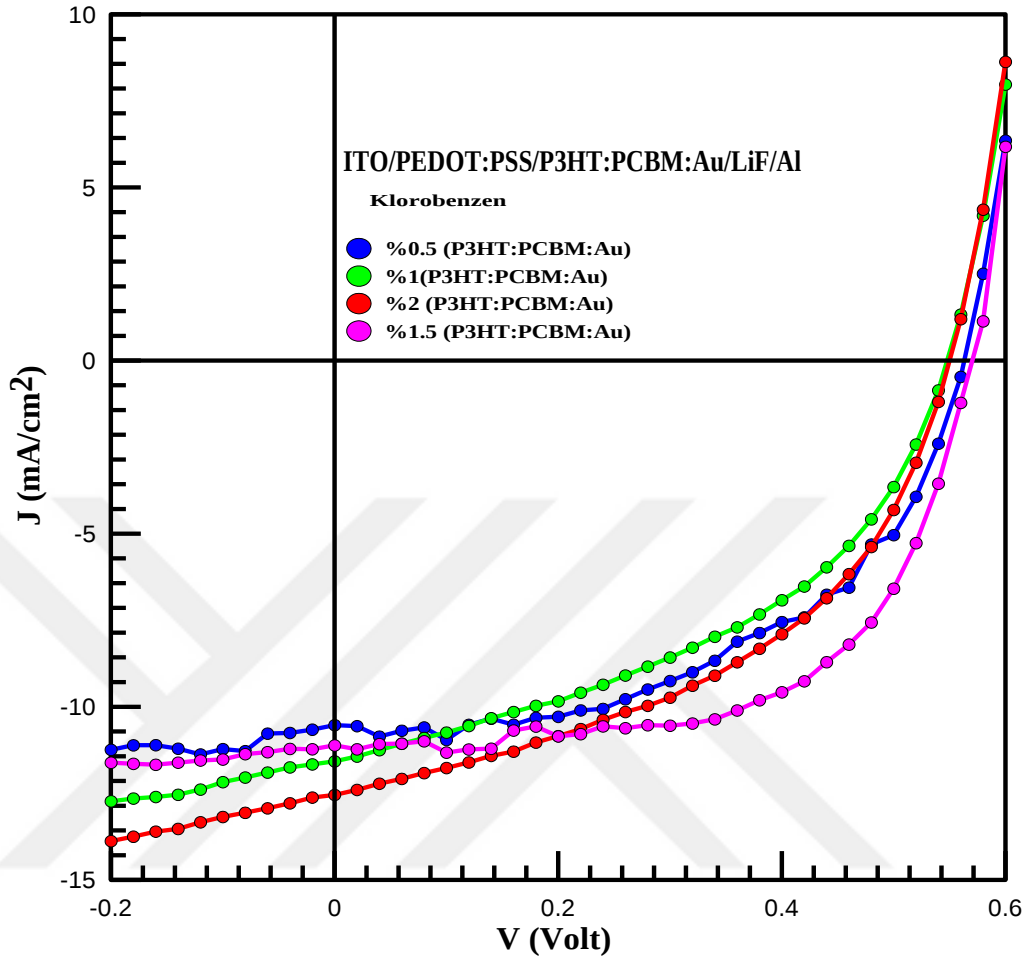
1:1 oranında klorobenzen çözücüyle hazırlanmış P3HT:PCBM ile elde edilmiş ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin ve 1:0,8 oranında kloroform çözücüyle hazırlanmış P3HT:PCBM ile elde edilmiş ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pilinin temel karakteristik parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Klorobenzen (KB) ve kloroform (KF) gibi farklı çözücüler kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygıt Mimarisi                 | P3HT:PCBM Oranı | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$<br>(Volt) | FF<br>(%) | PCE<br>(%) | $R_s$<br>( $\Omega$ ) | $R_{sh}$<br>( $\Omega$ ) |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------|-----------|------------|-----------------------|--------------------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al | (KB)1:1         | 17,06                             | 0,48               | 45        | 2,11       | 396                   | 5723                     |
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al | (KF)1:0,8       | 14,15                             | 0,34               | 43        | 1,56       | 443                   | 1357                     |

Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakadan elde edilen organik güneş pilinin seri direnci kloroform çözücüsüyle hazırlanan organik güneş piline göre daha düşük olup (443  $\Omega$ ’dan 396  $\Omega$ )’a düşmüştür. Bu durum Ikram *et al.* 2014 tarafından yapılan çalışmada film üzerindeki kümelenmeler direncin azalmasına atfedilmiştir. Seri dirençteki bu azalma klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan organik güneş pilinin güç dönüşüm veriminin artmasını sağlamıştır. Bu tez çalışmasında P3HT ve PCBM’in çözünürlüğünü test etmek için klorobenzen ve kloroform kullanıldı. Çizelgede de görüldüğü gibi klorobenzen çözücüsü ile elde edilen organik güneş pilinin güç dönüşüm verimi, kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, dolum faktörü ve şönt direncini artmıştır. Ayrıca bu organik güneş pillerinde aktif tabaka ile metal arasına kaplanan LiF de karakteristik parametreleri olumlu bir şekilde değiştirmiştir.

1:1 oranında klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası altın, gümüş ve altın-gümüş karışımı nanoparçacıklar ile farklı oranlarda katkılanarak bu nanoparçacıkların organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi incelendi. Şekil 4.38’de klorobenzen ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında altın nanoparçacık katkılanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AuNP/LiF/Al organik güneş pillerin ışık altındaki J-V karakteristiği verilmiştir.



**Şekil 4.38.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan (farklı oranlarda Au NP katkılı) ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Au NP/LiF/Al organik güneş pilinin ışık altındaki J-V karakteristikleri

Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka altın nanoparçacıkları ile katkılıandığında elde edilen organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre artmıştır. Aktif tabaka nanoparçacık ile katkılıandığında organik güneş pilinin açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) artmıştır. Fakat seri direnç değerleri artarken kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) azalmıştır. Bu durum aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklarının film yüzeyinde kısmı kümelenmeler oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %0,5 oranında altın nanoparçacığı ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 10,48 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü (FF) %52 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2.49 olarak

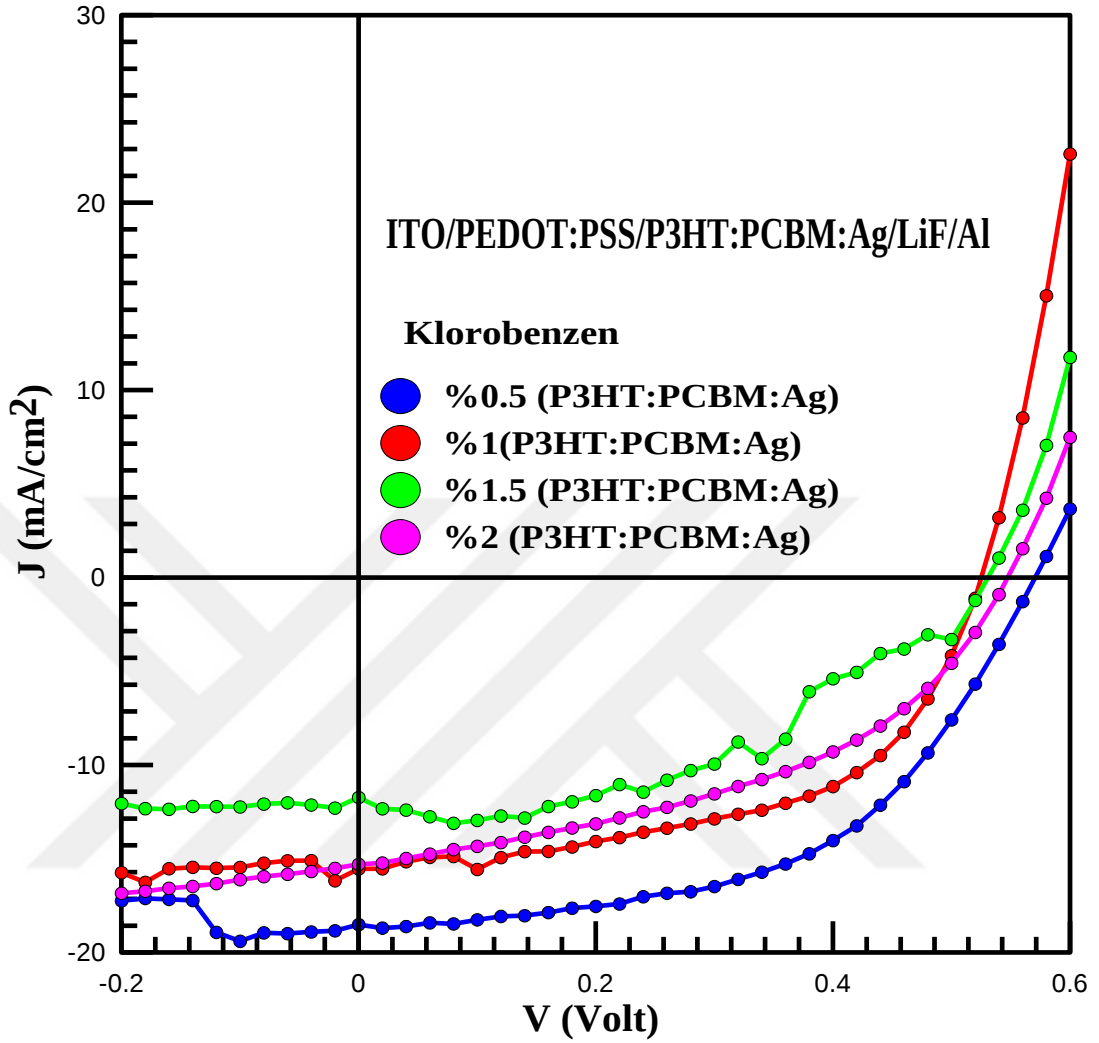
hesaplanmıştır. %1 oranında altın nanoparçaçığı ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 11,57 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,54 V, dolum faktörü (FF) %44 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2.23 olarak hesaplanmıştır. %1,5 oranında altın nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Au/LiF/Al organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 11,11 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü (FF) %62 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3.11 olarak hesaplanmıştır. %2 oranında altın nanoparçaçığı ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 12,90 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,54 V, dolum faktörü (FF) %46 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2.53 olarak hesaplanmıştır. Bu çözücüyle hazırlanan aktif tabaka %2'den fazla altın nanoparçacık ile katkılıandığında organik güneş pillerinin güç dönüşüm veriminde azalma, seri direnç değerlerinde artma gözlenmiştir.

Aktif tabakaya katkılanan altın nanoparçacıklar optiksel soğurmaya ve yük taşıma özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olur (Gollu *et al.* 2016). Bu organik güneş pilinin güç dönüşüm veriminin artması nanoparçacıklardaki iletkenlik elektronlarının yüzey plazmon rezonansı aktif tabakanın soğurmasını geliştirdiğinden dolayı kısa devre akımının artmasına atfedilmiştir (Spyropoulos *et al.* 2011). Nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin gelişmesini sağlayan etki gelen ışığın elektromanyetik alanı ve nanoparçacıkları çevreleyen yüzey elektron yoğunluğu arasındaki rezonans etkileşmesine atfedilmiştir (Spyropoulos *et al.* 2011). P3HT:PCBM aktif tabakasına katkılanan altın nanoparçacıklar iletkenliği arttırarak organik güneş pilinin verimini arttırmıştır (Sahare *et al.* 2015).

**Çizelge 4.2.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO/ PEDOT:PSS / P3HT:PCBM:Ag/ LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygıt Mimarisi                    | Au Katkılama Oranı (%) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%)     | $R_s$ (Ω) | $R_{sh}$ (Ω) |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|-------------|-----------|--------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al | Referans               | 17,06                          | 0,48            | 45     | 2,11        | 396       | 5723         |
|                                   | 0.5                    | 10,48                          | 0,56            | 52     | 2,49        | 478       | 5000         |
|                                   | 1                      | 11,57                          | 0,54            | 44     | 2,23        | 593       | 5126         |
|                                   | 1.5                    | 11,11                          | 0,56            | 62     | <b>3,11</b> | 407       | 4250         |
|                                   | 2                      | 12,90                          | 0,54            | 46     | 2,53        | 530       | 5000         |

Şekil 4.39’da klorobenzen ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında gümüş nanoparçacık katkılanarak ITO/ PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pillerin ışık altındaki *J-V* karakteristikleri verilmiştir.



**Şekil 4.39.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin ışık altındaki J-V karakteristikleri

Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka gümüş nanoparçacıkları ile katkılандığında elde edilen organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre artmıştır. Aktif tabaka gümüş nanoparçacık ile katkılандığında organik güneş pilinin açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) referans organik güneş piline göre artmıştır.

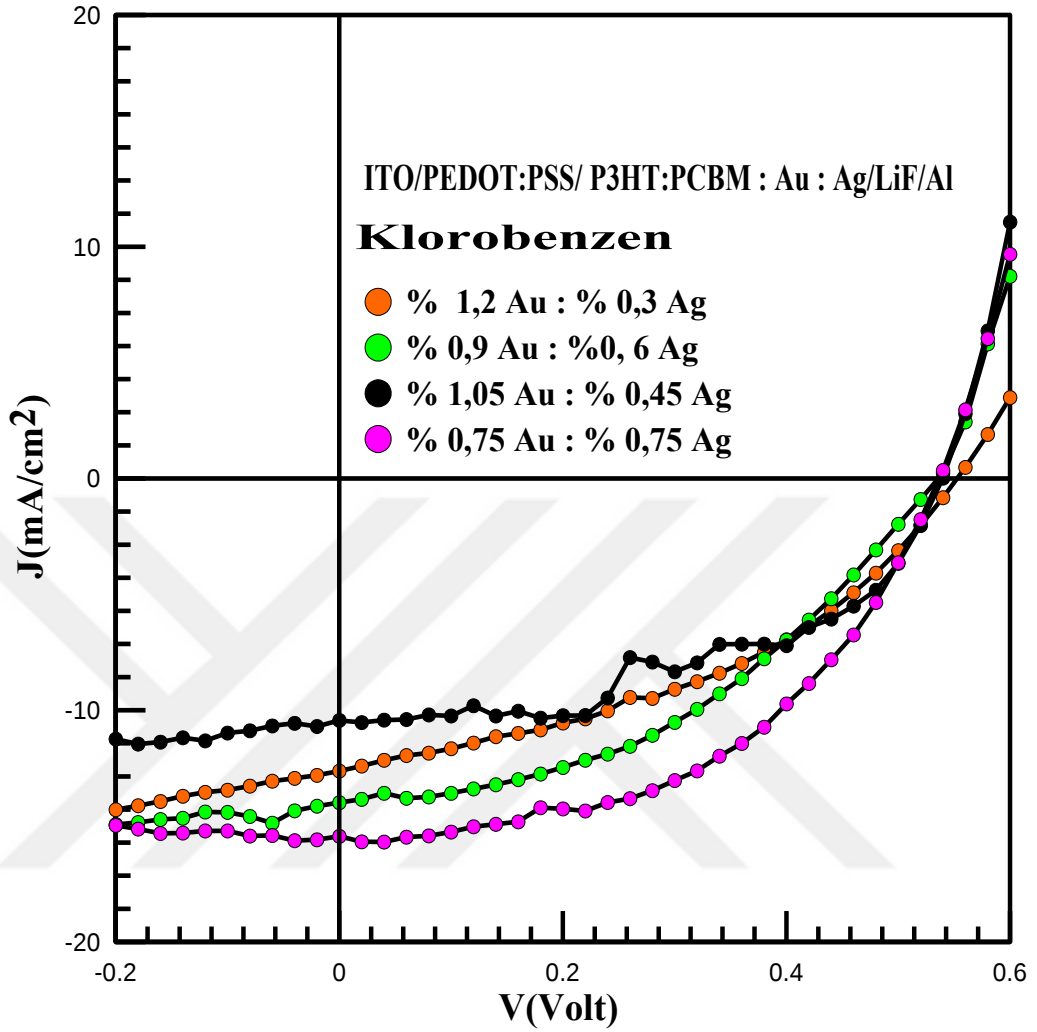
Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %0,5 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılандığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 13,19 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %50 ve güç

dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,20 olarak hesaplanmıştır. %1 oranında gümüş nanoparçacığı ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 13,40 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %49 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,55 olarak hesaplanmıştır. %1,5 oranında gümüş nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 11,82 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,50 V, dolum faktörü (FF) %48 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,62 olarak hesaplanmıştır. %2 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 13,15 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,46 V, dolum faktörü (FF) %43 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,14 olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalardan da görüldüğü gibi %0,5 nanoparçacıklarla katkılanan organik güneş pilinden en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilmiştir. Gümüş nanoparçacığı çabuk oksitlenen bir malzeme olduğundan P3HT:PCBM aktif tabakasına fazla miktarda katkılıandığında aktif tabakanın yapısını bozmaktadır. Yapılan elektriksel ölçümlerden de görüldüğü gibi aktif tabakadaki gümüş nanoparçacık miktarının artması organik güneş pillerinin güç veriminde azalmaya sebep olmuştur. Yani yüksek katkılama oranını organik güneş pilinin güç dönüşüm verimini olumsuz etkilemiştir. Aktif tabakaya katkılanan fazla miktarda nanoparçacıklar P3HT:PCBM'in kristal yapısını etkilemektedir. Film üzerinde fazla nanoparçacıklar kümelenmeler oluşturarak hem film yüzeyinin direncini hem de yük taşıma işlemini etkilemiştir (Sahare *et al.* 2015).

**Çizelge 4.3.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/ P3HT:PCBM:Ag/ LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygit Mimarisi                    | Ag Katkılama Oranı (%) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%) | $R_s$ ( $\Omega$ ) | $R_{SH}$ ( $\Omega$ ) |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|---------|--------------------|-----------------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al | Referans               | 17,06                          | 0,48            | 45     | 2,11    | 396                | 5723                  |
|                                   | 0.5                    | 13,19                          | 0,52            | 50     | 3,20    | 378                | 1691                  |
|                                   | 1                      | 13,40                          | 0,52            | 49     | 2,55    | 308                | 4343                  |
|                                   | 1.5                    | 11,82                          | 0,50            | 48     | 2,62    | 588                | 2470                  |
|                                   | 2                      | 13,15                          | 0,46            | 43     | 2,14    | 453                | 5279                  |

Şekil 4.40'de klorobenzen ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %1,2 Au : %0,3Ag, %1,05Au : %0,45 Ag, %0,9Au : %0,6Ag , %0,75 Au : %0,75 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılanarak ITO/PEDOT:PSS/ P3HT:PCBM:Ag : Ag/LiF/Al organik güneş pillerin ışık altındaki *J-V* karakteristikleri verilmiştir.



**Şekil 4.40.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin ışık altındaki J-V karakteristikleri

Çizelge 4.4’de görüldüğü gibi klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,2Au: %0,3 Ag ve %1,05 Au: %0,45 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılındığında güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre artarken, %0,9Au: %0,6Ag ve %0,75Au: %0,75Ag oranında altın-gümüş nanoparçacıkları ile katkılındığında güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre azalmıştır.

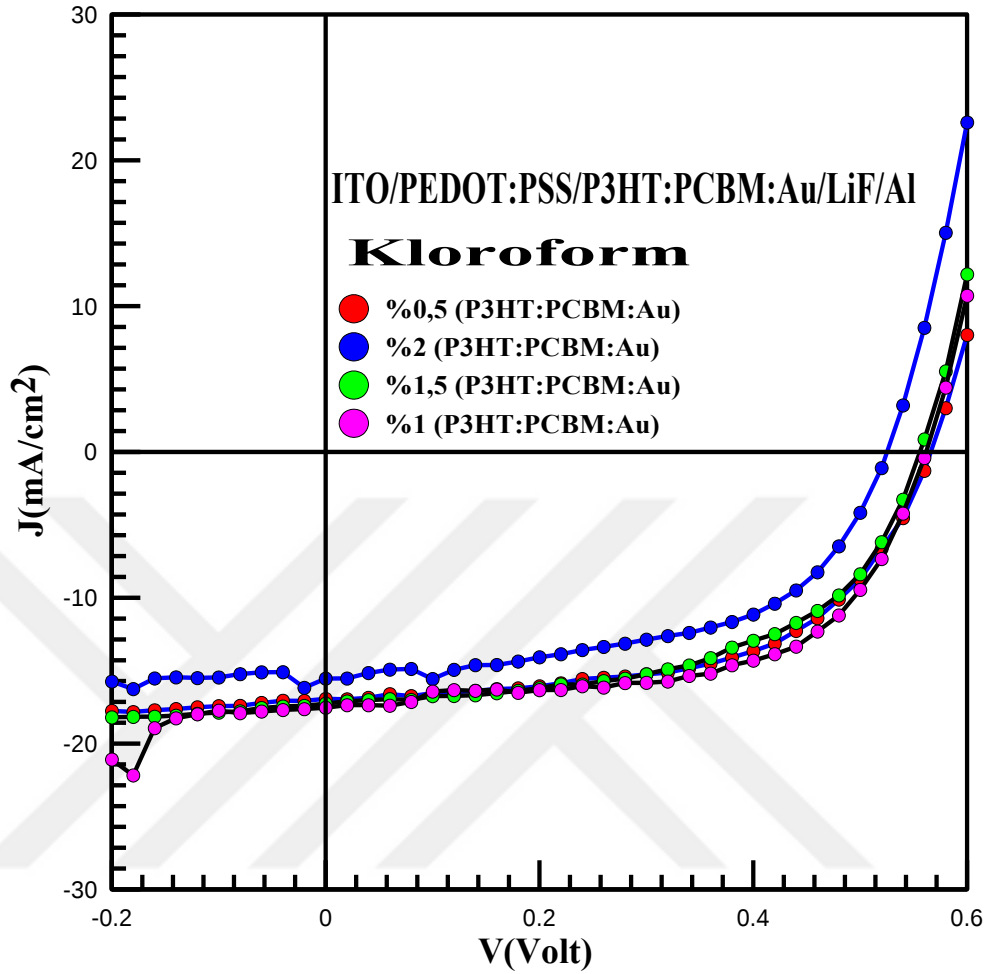
Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,2 Au: %0,3Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılındığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 15,40 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF)

%51 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,29 olarak hesaplanmıştır. %1,05 Au : %0,45 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 10,32 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %53 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2.88 olarak hesaplanmıştır. %0,9 Au: %0,6 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacık katkılı organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 13,92 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %43 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %1,82 olarak hesaplanmıştır. %0,75 Au: %0,75 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 12,61 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,54 V, dolum faktörü (FF) %42 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %1,64 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi aktif tabaka %12 altın ve %3 gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilmiştir. Bu değerinde daha yüksek güç dönüşüm veriminin elde edilmesinin sebebi altının katkılanma oranının çok olmasından kaynaklanmaktadır. Daha önce yapılan gümüş nanoparçacık katkılı organik güneş pilleri altın nanoparçacık güneş pilleriyle karşılaştırıldığında altın nanoparçacıkla katkılanan organik güneş pillerinden elde edilen güneş pilleri daha yüksek güç dönüşüm verimine sahiptir. Gümüş nanoparçacık ile katkılanma yüzdesi arttıkça elde edilen organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi %3,29'dan %1,64'e düşmektedir. Daha önce yapılan hesaplamalardan da görüldüğü gibi altın nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi daha yüksektir. Bu metal nanoparçacıklar aktif tabakanın optik soğurmasını ve aktif tabaka içerisinde ışık tuzakları oluşturarak organik güneş pillerinin verimini arttırmıştır (Hamdan *et al.* 2013).

**Çizelge 4.4.** Klorobenzen çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM:Ag:LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygıt Mimarisi                    | Ag:Au Katkılama Oranı (%) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%) | $R_s$ (Ω) | $R_{SH}$ (Ω) |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|---------|-----------|--------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag:LiF/Al | Referans                  | 17,06                          | 0,48            | 45     | 2,11    | 396       | 5723         |
|                                   | %1,2Au:%0,3Ag             | 15,40                          | 0,52            | 51     | 3,29    | 465       | 9657         |
|                                   | %1,05Au:%0,45Ag           | 10,32                          | 0,52            | 53     | 2,88    | 586       | 12964        |
|                                   | %0,9 Au:%0,6 Ag           | 13,98                          | 0,52            | 43     | 1,82    | 764       | 4089         |
|                                   | %0,75 Au: %0,75Ag         | 12,61                          | 0,54            | 42     | 1,64    | 728       | 3568         |

1 : 0,8 oranında kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası altın, gümüş , altın-gümüş karışımı nanoparçacıklar ile farklı oranlarda katkılanarak bu nanoparçacıkların organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi incelendi. Şekil 4.41’de kloroform ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0.5 , %1, %1.5 ve %2 oranında altın nanoparçacık katkılanarak ITO/ PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pillerin ışık altındaki *J-V* karakteristikleri verilmiştir.



**Şekil 4.41.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Au/LiF/Al organik güneş pilinin ışık altındaki J-V karakteristikleri

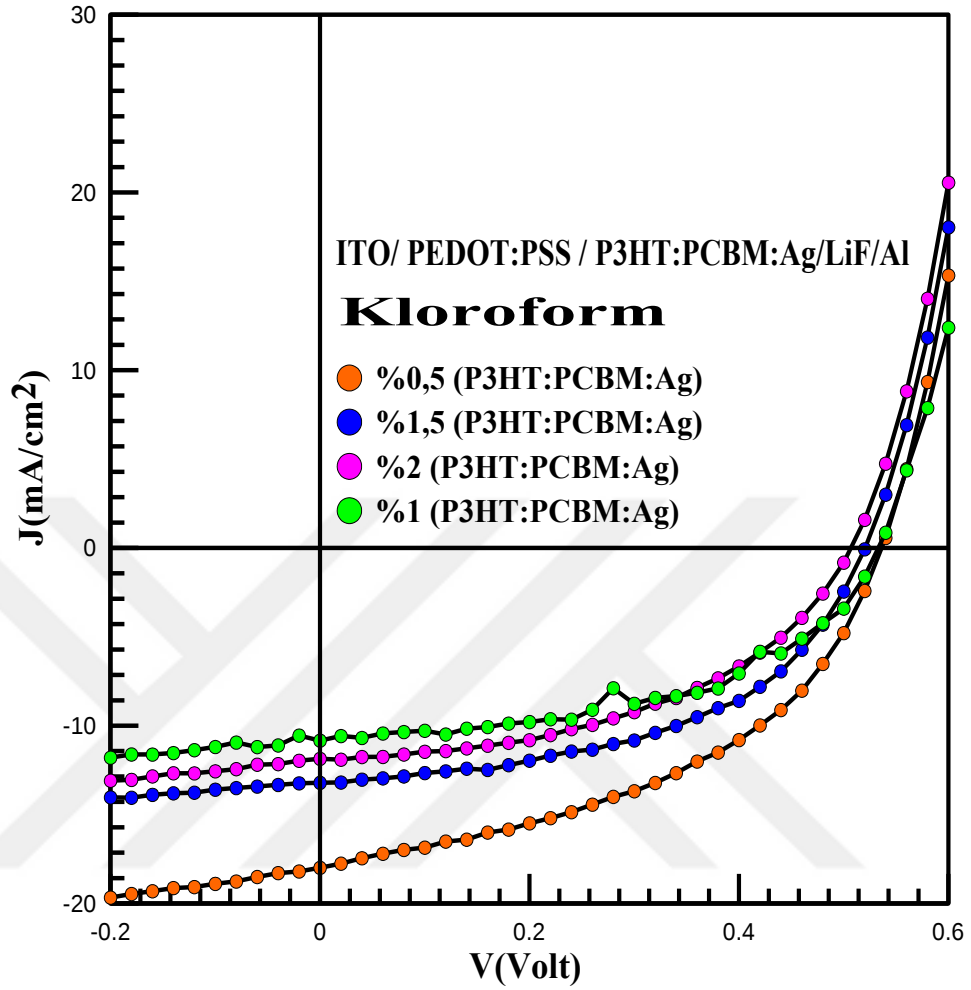
Çizelge 4.5’de görüldüğü gibi kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka altın nanoparçacıkları ile katkılıandığında elde edilen organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre artmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %0,5 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 13,11 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü (FF) %58 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,15 olarak hesaplanmıştır. %1 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 17,52 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü (FF) %59 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,35 olarak hesaplanmıştır. %1,5 oranında altın nanoparçacık katkılı organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 17,23

$\text{mA/cm}^2$ , açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,54 V, dolum faktörü (FF) %56 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,00 olarak hesaplanmıştır. %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılандığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ )  $15,52 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %55 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,55 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.5.** Kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygit Mimarisi                    | Au Katkılama Oranı (%) | $J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%) | $R_s$ ( $\Omega$ ) | $R_{SH}$ ( $\Omega$ ) |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------|--------|---------|--------------------|-----------------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al | Referans               | 14,15                         | 0,34            | 43     | 1,56    | 443                | 1357                  |
|                                   | 0.5                    | 13,11                         | 0,56            | 58     | 3,15    | 306                | 2200                  |
|                                   | 1                      | 17,52                         | 0,56            | 59     | 3,35    | 239                | 9707                  |
|                                   | 1.5                    | 17,23                         | 0,54            | 56     | 3,00    | 323                | 6964                  |
|                                   | 2                      | 15,52                         | 0,52            | 55     | 2,55    | 308                | 4343                  |

Şekil 4.41’de kloroform ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranında gümüş nanoparçacık katkılanarak ITO/ PEDOT:PSS/P3H :PCBM: Ag /LiF/Al organik güneş pillerin ışık altındaki  $J$ - $V$  karakteristikleri verilmiştir.



**Şekil 4.42.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin ışık altındaki  $J$ - $V$  karakteristikleri

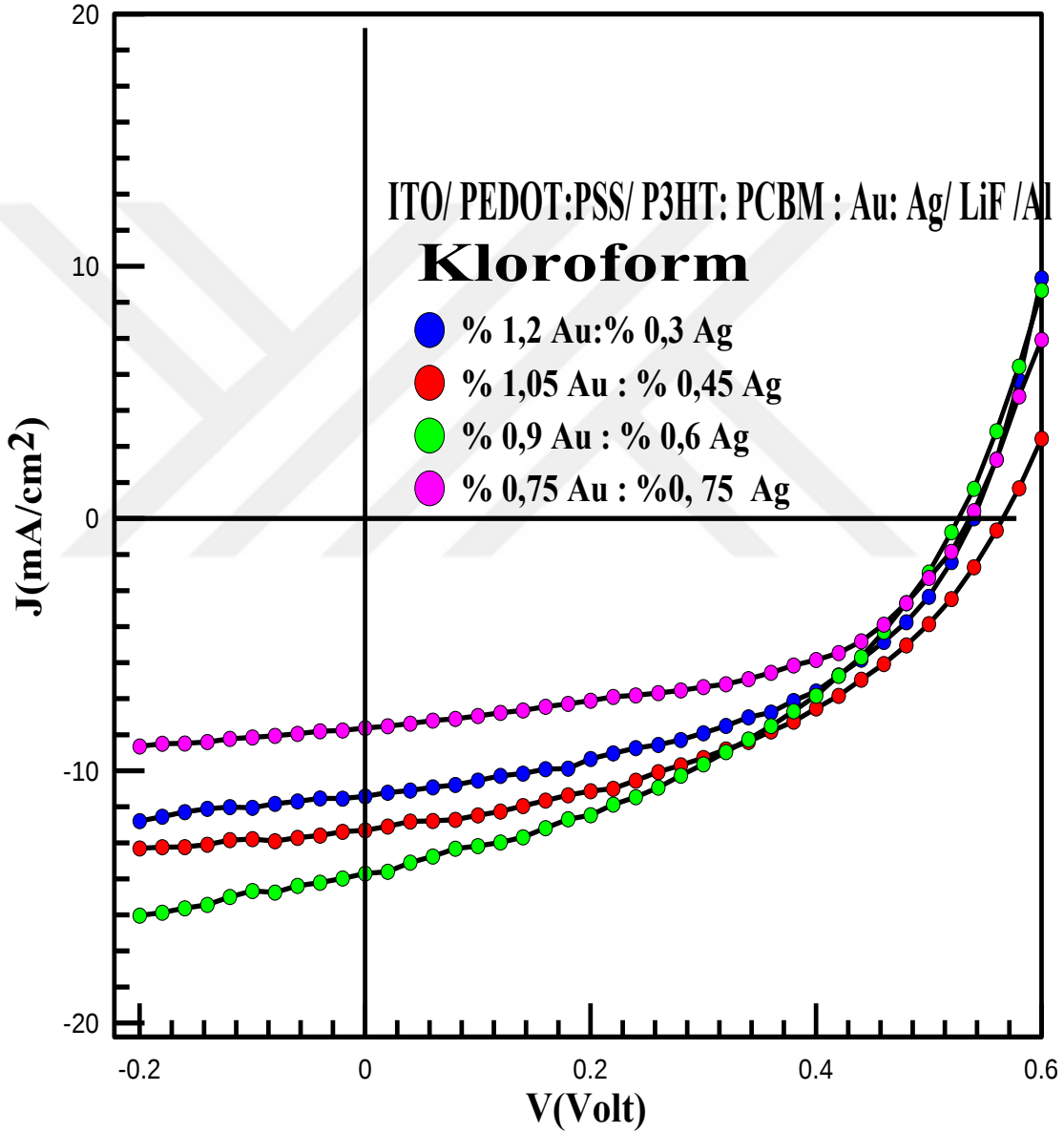
Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka gümüş nanoparçacıkları ile katkılındığında elde edilen organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre artmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %0,5 oranında gümüş nanoparçacığı ile katkılındığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 17,60 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %46 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,50 olarak hesaplanmıştır. %1 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılındığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 10,82 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %53 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,00 olarak hesaplanmıştır. %1,5 oranında gümüş nanoparçacık katkılı organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ )

13,19 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %50 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,75 olarak hesaplanmıştır. %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılандığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) 11,82 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) 0,50 V, dolum faktörü (FF) %48 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,29 olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalardan da görüldüğü gibi %0,5 nanoparçacıkla katkılanan organik güneş pilinden en yüksek güç dönüşüm verimi (%3,50) elde edilmiştir. Yapılan katkılama oranlarından da görüldüğü gibi aktif tabaka %1,5 ve %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılандığında organik güneş pilinin güç dönüşüm veriminde azalmalar görülmektedir. Bu yüzden bu tez çalışmasında katkılama oranı %2'ye kadar yapılmıştır. Aktif tabaka P3HT:PCBM'e katkılanan nanoparçacıklar tabakanın iletkenliğini artırarak organik güneş pillerinin verimini arttırmıştır (Sahare *et al.* 2015). Ayrıca bu nanoparçacıklar aktif tabakanın taşıyıcı konsantrasyonunu arttırıp direncini düşürmüştür (Khan *et al.* 2015).

**Çizelge 4.6.** Kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygit Mimarisi                    | Ag Katkılama Oranı (%) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%) | $R_s$ ( $\Omega$ ) | $R_{SH}$ ( $\Omega$ ) |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|---------|--------------------|-----------------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al | Referans               | 14,15                          | 0,34            | 43     | 1,56    | 443                | 1357                  |
|                                   | 0.5                    | 17,60                          | 0,52            | 46     | 3,50    | 402                | 3086                  |
|                                   | 1                      | 10,82                          | 0,52            | 53     | 3,00    | 606                | 11003                 |
|                                   | 1.5                    | 13,19                          | 0,52            | 50     | 2,75    | 390                | 9231                  |
|                                   | 2                      | 11,82                          | 0,50            | 48     | 2,29    | 479                | 17462                 |

Şekil 4.43’de kloroform ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasına %1,2 Au : %0,3 Ag , %1,05 Au : %0,45 Ag, %0,9 Au : %0,6 Ag, %0,75 Au : %0,75 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkları ile katkılanarak ITO/PEDOT:PSS/ P3HT:PCBM: Au:Ag/LiF/Al organik güneş pillerin ışık altındaki  $J$ - $V$  karakteristikleri verilmiştir.



**Şekil 4.43.** Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM: Au:Ag/LiF/Al organik güneş pilinin ışık altındaki  $J$ - $V$  karakteristikleri

Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,2 Au: %0,3 Ag , %1,05 Au : %0,45 Ag , %0,9 Au : %0,6 Ag ve %0,75 Au : %0,75 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında güç dönüşüm verimi referans organik güneş piline göre artmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,2 Au : %0,3Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 10,98 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %48 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,77 olarak hesaplanmıştır. %1,05 Au : %0,45 Ag oranında altın-gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 12,32 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü (FF) %44 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,44 olarak hesaplanmıştır. %0,9 Au : %0,6 Ag oranında altın - gümüş nanoparçacık katkılı organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 14,06 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %40 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,38 olarak hesaplanmıştır. %0,75 Au: %0,75 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacığı ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 8,28 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %51 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,24 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi aktif tabaka %1,2 altın ve %0,3 gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilmiştir. Gümüş nanoparçacık miktarı arttıkça elde edilen organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi %2,77’den %2,24’e düşmektedir. Yüksek gümüş katkılama oranı organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimini biraz düşürmesine rağmen P3HT: PCBM:Au: Ag yapısında bulunan altın- gümüş nanoparçacıklar eksiton uzunluğunu ve eksitonun yaşam süresini arttırarak elde edilen güneş pillerinin güç dönüşüm verimini referans organik güneş pillerine göre arttırmıştır (Gonzalez *et al.* 2015). Ayrıca bu nanoparçacıklar filminin yüzey pürüzlülüğünü arttırarak ışığın tuzaklanmasını sağlamıştır.

**Çizelge 4.7.** Kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag:LiF/Al organik güneş pillerinin temel karakteristik parametreleri

| Aygıt Mimarisi                    | Ag:Au Katkılama Oranı (%) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (Volt) | FF (%) | PCE (%) | $R_s$ ( $\Omega$ ) | $R_{SH}$ ( $\Omega$ ) |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|---------|--------------------|-----------------------|
| ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag:LiF/Al | Referans                  | 14,15                          | 0,34            | 43     | 1,56    | 443                | 1357                  |
|                                   | %1,2 Au : %0,3 Ag         | 10,98                          | 0,52            | 48     | 2,77    | 692                | 7132                  |
|                                   | %1,05Au:%0,45Ag           | 12,32                          | 0,56            | 44     | 2,44    | 611                | 4740                  |
|                                   | %0,9 Au:%0,6 Ag           | 14,06                          | 0,52            | 40     | 2,38    | 587                | 3830                  |
|                                   | %0,75 Au: %0,75Ag         | 8,28                           | 0,52            | 51     | 2,24    | 817                | 9408                  |

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada organik güneş pillerinde kullanılan P3HT:PCBM aktif tabakası klorobenzen ve kloroform gibi iki farklı çözücünde hazırlandı. Bu hazırlanan aktif tabakalar altın, gümüş ve altın-gümüş karışımı olan nanoparçacıklar ile katkılanarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimine etkisi incelendi. Katkılama işleminden önce P3HT:PCBM aktif tabakası iki farklı çözüsüyle hazırlanarak elde edilen organik güneş pillerinin optimum şartları araştırıldı. Bu kapsamda farklı çözücüler kullanılarak elde edilen P3HT ve PCBM karışımı denenerek *J-V* (Akım Yoğunluğu–Voltaaj) ölçümleri ile yüksek güç dönüşüm verimi sağlayan ideal P3HT:PCBM belirlendi. Her iki çözücü için uygun P3HT ve PCBM karışma oranları ve rpm ler belirlendi. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka için 1:1 oranında P3HT:PCBM ve 1000 rpm olarak ideal şart belirlenirken kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka için 1:0,8 oranında P3HT:PCBM ve 800 rpm ideal şartlar olarak belirlendi. Daha sonra farklı oranlarda altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları iki farklı çözücüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakaya katkılanarak katkı yüzdesine bağlı olarak güç dönüşüm veriminin nasıl değiştiği araştırıldı ve en yüksek güç dönüşüm verimine sahip katkı oranı tespit edildi. Katkılama oranı dikkate alınarak en yüksek güç dönüşüm verimi oranları alınarak iki farklı çözücünün kullanıldığı P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Ag filmlerinin soğurma, AFM, SEM ve XRD ölçümleri alınarak optik, morfolojik ve yapısal özellikleri analiz edildi. İki çözücüyle hazırlanan aktif tabakalar nanoparçacıklarla katkılandıktan sonra katkılanma oranları dikkate alınarak P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Ag filmlerinin optik yasak enerji aralığı hesaplandı.

Organik güneş pillerinin aktif tabaka analizleri yapıldıktan sonra alt tabaka olarak ITO kaplı camlar hazır alındı ve kimyasal temizliği yapıldı. Hollerin kolay bir şekilde ITO'ya aktarılmasını sağlayan hol taşıyıcı tabaka olarak kullanılan PEDOT:PSS malzemesi satın alındı ve 0,45 µm gözenekli PVDF filitrelerden süzüldü. Kimyasal temizleme prosedörüne tabi tutulan ITO üzeri döndürme ile film kaplama cihazı ile 4000 rpm'de ve 50 s'de PEDOT:PSS ile kaplandı. PEDOT:PSS kaplı ITO'lar ısıtıcı

tablada 115°C’de 10 dakika tavlandı. Daha sonra PEDOT:PSS kaplı ITO’lar eldivenli kabinlere aktarıldı. İki çözücü ile hazırlanan aktif tabakalar ve nanoparçacık katkılı aktif tabakalar PEDOT:PSS kaplı ITO’ların üzerine film kaplama cihazı ile eldivenli kabin içerisinde kaplanır. Kloroform çözüsüyle hazırlanan katkısız ve nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM aktif tabakası PEDOT:PSS kaplı ITO’ların üzerine film kaplama cihazı ile 800 rpm’de ve 50 s sürede kaplandı. Benzer şekilde klorobenzen çözüsüyle hazırlanan katkısız ve nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM aktif tabakası PEDOT:PSS kaplı ITO’ların üzerine film kaplama cihazı ile 1000 rpm’de ve 50 s süreyle kaplandı. Farklı çözücülerle hazırlanan nanoparçacık katkılı ve katkısız P3HT:PCBM aktif tabakasının üzeri elektronların taşıyıcı tabakası olarak 2 nm LiF (lityum florür) kaplandı. Daha sonra bu film üzeri  $1 \times 10^{-7}$  Torr basınç değerinde 1 Å/s oranında 100 nm kalınlığındaki Al metali kaplanarak aynı organik güneş pili tasarımında iki farklı referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al yapısı elde edildi. Aynı tasarımda elde edilen iki farklı çözücü ile hazırlanan organik güneş pillerinin aktif tabakasına altın nanoparçacık katkılı olduğunda ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Ag/LiF/Al , gümüş nanoparçacık katkılı olduğunda ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au/LiF/Al ve altın-gümüş nanoparçacık katkılı ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Au:Ag /LiF/Al organik güneş pilleri elde edildi. Farklı çözeltilerde ve farklı oranlarda altın, gümüş ve altın - gümüş nanoparçacık katkılanmış organik güneş pillerinin ışık altında *J-V* ölçümlerinden temel güneş pili parametreleri belirlendi. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan altın nanoparçacık katkılı organik güneş pilinin verimi %1,5 , gümüş nanoparçacık katkılıda %0,5, altın-gümüş nanoparçacık katkılıda %1,2 Au: %0,3 Ag oranlarında en yüksek güç dönüşüm verimi elde edildi. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan altın nanoparçacık katkılı organik güneş pilinin verimi %1, gümüş nanoparçacık katkılıda %0,5 ve altın-gümüş nanoparçacık katkılıda %1,2 Au : %0,3 Ag oranlarında en yüksek güç dönüşüm verimi elde edildi. En yüksek güç dönüşüm verimi elde edilen oranlarda klorobenzenli ve kloroformlu P3HT:PCBM, P3HT:PCBM:Au, P3HT:PCBM:Ag, P3HT:PCBM:Au:Ag filmlerinin optik, morfolojik ve yapısal karakterizasyonları yapıldı.

### 5.1. İki Farklı Çözücü Kullanılarak Elde Edilen P3HT:PCBM, P3HT:PCBM:Ag, P3HT:PCBM:Au, P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Au:Ag filmlerinin Optik, Morfolojik ve Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

ITO yüzeyi iki farklı çözücü kullanılarak elde edilen P3HT:PCBM , P3HT:PCBM :Au , P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Au:Ag filmlerinin 300nm ile 800nm dalga boyu arasında soğurma ölçümleri alındı. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi klorobenzenle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabaka en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 505nm dalga boyunda gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu aktif tabakanın enerji band aralığı 1.9 eV olarak hesaplandı. Şekil 4.3’de kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakanın en iyi soğurmayı yaklaşık olarak 483 nm dalga boyunda vermiş ve olup enerji band aralığı soğurma spektrumunu yardımıyla 1.91 eV olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Supriyanto *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile uyum içerisinde ve görünür bölge sınırları arasındadır. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakası daha geniş soğurma spektruma sahiptir.

Şekil 4.6 klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasının altın (Au) nanoparçacıkları ile %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında katkılanması soğurma şiddetini artırırken %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. Yüksek katkı miktarında soğurma şiddetinin azalması P3HT polimerindeki  $\pi$ - $\pi$  zincirlerinin yapısının bozulduğuna atfedilmiştir (Gonzalez *et al.* 2015). Bu oranlarda elde edilen yasak enerji band aralıkları 1,89 eV ile 1,90 eV arasındadır. Görüldüğü gibi P3HT:PCBM aktif tabakasına altın nanoparçacıkların katkılanmasıyla yasak enerji band aralığı çok az değişmiştir. Şekil 4.7’de klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakası gümüş (Ag) nanoparçacıklarıyla katkılındığında %1, %1,5 ve %2 oranlarında soğurma şiddeti artarken, %0,5 oranında soğurma şiddetini azaltmıştır. %0,5, %1, %1,5 oranında gümüş nanoparçacıkları katkılanması aktif tabakanın yasak enerji band aralığını 1,94 eV’a yaklaştırırken , %2 oranında gümüş nanoparçacıkları aktif tabakanın yasak enerji band aralığını 1,88 eV’a düşürmüştür. Şekil 4.14’de görüldüğü gibi klorobenzen çözücüsüyle hazırlanmış

P3HT:PCBM aktif tabakası %1,2 Au : %0,3 Ag, %1,05 Au : %0,45 Ag , %0,9 Au : %0,6 Ag ve %0,75 Au : %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkları ile katkılандığında soğurma şiddeti azalmıştır. %1,2 Au: %0,3 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla yasak enerji aralığı 1,92 eV olarak hesaplanırken, %1,05 Au : %0,45 Ag, %0,9 Au : %0,6 Ag ve %0,75 Au : %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen ince filmlerin yasak enerji band aralığı 1,93 eV'a yaklaşmıştır.

Şekil 4.10 kloroform çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasına %1 oranında altın nanoparçacık katkılanması ile soğurma şiddetini arttırırken , %0,5 , %1,5 ve %2 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. Yapılan hesaplamalarda %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında altın nanoparçacıkları aktif tabakanın enerji band aralığını 1,89 eV'dan 1,92 eV'a yaklaştırmıştır. Bu çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakası %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma şiddetini azaltmıştır. %2 oranında gümüş nanoparçacık yasak enerji aralığını 1,89 eV'a düşürürken, %0,5, %1 ve %1,5 oranında gümüş nanoparçacık yasak enerji band aralığını 1,92 eV'a yaklaştırmıştır. Şekil 4.12'da kloroform çözücüsüyle hazırlanmış P3HT:PCBM aktif tabakasının %1,2 Au : %0,3 Ag, %1,05 Au : %0,45 Ag, %0,9 Au: %0,6 Ag, %0,75 Au: %0,75 Ag oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıkları ile katkılanması soğurma spektrumunun kırmızıya doğru kaymasını sağlamıştır. Yüksek soğurma bölgesinde bu tür kaymalar konformasyonel kusurların artan yoğunluğuna ve yapıdaki konjugasyon kayıplarına atfedilmiştir (Baek *et al.* 2010). Yapılan hesaplamalarda %1,2 Au : %0,3 Ag, %1,05 Au : %0,45 Ag ve %0,75 Au: %0,75 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla yasak enerji band aralığı 1,89 eV olarak hesaplanmıştır. %0,9 Au: %0,6 Ag oranında altın ve gümüş nanoparçacıkların aktif tabakaya katkılanmasıyla elde edilen yasak enerji band aralığı 1,88 eV olarak hesaplanmıştır. Bu metal nanoparçacıklar yüzeyde pürüzlülükler oluşturarak ışığın saçılımını ve soğurmayı arttırarak ışığın aktif bölgede daha fazla kalmasını sağlayabilir (Li *et al.* 2005).

İki ve üç boyutlu AFM görüntüleri P3HT:PCBM aktif tabakaları ve bu aktif tabakalara katkılanan nanoparçacıklarının oluşturduğu filmlerin yüzey görüntüleri hakkında net bilgi elde etmemizi sağlamıştır. Şekil 4.19'da görüldüğü gibi ITO yüzeyine kaplanan filmlerin bazı bölgelerinde gümüş nanoparçacık yığılmaları gözlenmiştir ve durum nanoparçacıkların gözlenmesini nispeten zorlaştırmıştır (Rao *et al.* 2007). Bu yığınsal gümüş nanoparçacıkları hem yatay hemde dikey yönde büyümüştür (Li *et al.* 2016). Gümüş nanoparçacıkların AFM görüntüleri incelendiğinde farklı boyutlarda sözde küresel parçacıklar görüyoruz. Şekil 4.20'de cam yüzeyi altın nanoparçacıklarla ince film olarak kaplandığında yüzey üzerinde homojen ve düzenli küresel nanoparçacıklar görülmektedir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'deki görüntüler incelendiğinde klorobenzen ve kloroform çözücüsüyle hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakaları karşılaştırıldığında klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka yüzeye daha homojen olarak dağılmış ve yüzeyde daha az pürüzlülük gözlenmiştir.

Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de görüldüğü gibi klorobenzen ve kloroform çözücüsü ile hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakalara katkılanan altın ve gümüş nanoparçacıkları yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Bu nanoparçacıklarının oluşturduğu yüzey pürüzlülükleri ışığın aktif tabaka içerisinde tuzaklanmasını sağlayarak ışığın daha uzun süre aktif tabaka içerisinde kalmasını sağlama imkânı verebilir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de klorobenzen ve kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanmış aktif tabakalara altın- gümüş nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen P3HT:PCBM:(Au:Ag)NP filmin AFM görüntülerinde altın ve gümüş nanoparçacıkları birleşerek büyük nanoparçacık yığılmaları oluşturmuştur. Bu yığılmalar filmin yüzey direncini arttırmıştır. AFM görüntülerinden de görüldüğü gibi aktif tabaka içerisindeki altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıklar film yüzeyindeki yükseltilerin artmasına sebep olarak yük taşıma mesafesini etkili bir şekilde azaltabilirler. PEDOT:PSS ile kaplı ITO'ların üzeri klorobenzen ve kloroform çözücüsü ile hazırlanan 1:1 ve 1:0,8 oranında karıştırılmış P3HT:PCBM, altın nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM:Au, gümüş nanoparçacık katkılı P3HT:PCBM:Ag ve altın-gümüş nanoparçacık karışımı olan P3HT:PCBM:Au:Ag ile kaplanarak XRD (X-ışını kırınımı) ölçümleri alındı. Şekil 4.33'de görüldüğü gibi iki farklı çözücüyle hazırlanan P3HT:PCBM karışımının XRD

ölçümleri incelendiğinde yaklaşık  $2\theta$  da  $5,5^\circ$  civarında keskin XRD pikleri görülmektedir. Bu açı karşılığına gelen pikler (1 0 0) düzlemi olup P3HT'e karşılık gelir. Diğer pikler PEDOT:PSS , ITO ve PCBM'e karşılık gelir (Lee *et al.* 2016). XRD sonuçlarından da görüldüğü üzere klorobenzenle hazırlanan P3HT:PCBM daha fazla kristalleşme özelliğine sahiptir. Şekil 4.34'de klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM ve altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları ile katkılanarak elde edilen filmlerin XRD ölçümleri göre gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları ile katkılı tabaka referans aktif tabakaya göre XRD şiddetini arttırırken, altın nanoparçacıklar XRD şiddetini azaltmıştır. Şekil 4.35'de kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakanın altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları katkılanmasıyla XRD şiddeti referans filme göre artmıştır.

Klorobenzen ve kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan aktif tabakalar altın, gümüş ve altın-gümüş karışımı olan nanoparçacıklar ile katkılanarak oluşan P3HT:PCBM , P3HT:PCBM:Ag , P3HT:PCBM:Au , P3HT:PCBM:Au:Ag filmlerinin SEM görüntüleri alındı. Şekil 4.29(b) ve Şekil 4.30(b)'de aktif tabaka katkılanan gümüş nanoparçacıkları yüzeye hemen hemen homojen dağılmıştır. Şekil 4.29(c) ve Şekil 4.31(c)'de ise altın nanoparçacıkları yüzeyde kısmi kümelenmeler oluşturarak yüzeye homojen olarak dağılmıştır. Şekil 4.30(b) ve Şekil 4.32(b)'de ise hazırlanan aktif tabakaya altın- gümüş karışımı olan nanoparçacıkların katkılanmasıyla elde edilen filmlerde nanoparçacıklar yarım küreye benzer şekillere sahip küçük parçacıklar şeklinde görülmektedir. Benzer sonuçlar Shahin *et al.* 2012 tarafından da gözlenmiştir. Şekil 4.29(a)'da görüldüğü üzere P3HT:PCBM çözeltisiyle hazırlanan aktif tabaka ITO yüzeyine homojen olarak dağılmış ve yüzeyde kısmi çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlakların oluşmasının kloroform çözücüsünün buharlaşma sıcaklığının düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çatlaklar filmin homojenliğini bozmuş ve film yüzeyinde elektron transferini zorlaştırmaya neden olabilir. SEM görüntülerinde bu kümelenmelerin parçacıklar arasındaki mesafeyi azalttığı görülmektedir. Bu durum ise organik güneş pillerinin performansını önemli bir şekilde etkileyebilir. Bu kümelenmelerin ışığı daha fazla yansıtması beklenir.

## 5.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de klorobenzen ve kloroform çözücü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakalarından elde edilen referans ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al organik güneş pillerinin karanlık ve ışık altında akım yoğunluğu - voltaj ( $J$ - $V$ ) grafikleri verilmiştir. Karanlık ve ışık altındaki  $J$ - $V$  ölçümleri - 0,2 V ile +0.6 V aralığında 0,02 Voltluk adımlar ile alındı. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan referans organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 17,06 J(mA/cm<sup>2</sup>), açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,48 V , dolum faktörü ( $FF$ ) %45 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,11 olarak hesaplandı. Bunun yanısıra kloroform çözücüsü ile hazırlanan referans organik güneş pilinin temel parametreleri şu değerlere sahiptir. Kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 14,15 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,34 V, dolum faktörü ( $FF$ ) %43 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %1,56 olarak hesaplandı. Çizelge 4.36’da verildiği gibi klorobenzen çözücüsü ile hazırlanan referans organik güneş pilinin güç dönüşüm verimi, kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, dolum faktörünü ve şönt direnci daha yüksek değerlere sahiptir. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabakadan elde edilen referans organik güneş pilinin seri direnci 396  $\Omega$ , kloroform çözücüsüyle hazırlanan organik güneş pilinki ise 443  $\Omega$  olarak hesaplandı. Bu direnç değişimi P3HT ve PCBM klorobenzen içerisinde iyi çözündüğüne, film yüzeyinde çatlakların oluşmadığına ve film üzerindeki yığılmal direncin azalmasına atfedilmiştir (Ikram *et al.* 2014). Her iki çözücü ile hazırlanan aktif tabakalar %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında altın ve gümüş nanoparçacıklarıyla katkılanan organik güneş pillerinin temel karakterizasyon parametreleri incelendi. Bu iki çözücü ile hazırlanan aktif tabakalara katkılanan nanoparçacıklar optiksel soğurmaya ve yük taşıma özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olur (Gollu *et al.* 2016). Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,5 oranında altın nanoparçacık ile katkılандığında en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilmiştir. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:AuNP /LiF/Al organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 11,11 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü ( $FF$ ) %62 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,11 olarak hesaplanmıştır. Bu çözücüyle hazırlanan aktif tabaka %0,5 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılандığında en yüksek güç dönüşüm verimi elde edilmiştir. Bu

organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 13,19 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %50 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,20 olarak hesaplanmıştır. Klorobenzen çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,2 Au:%0,3Ag oranında altın - gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 15,40 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %51 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,29 olarak hesaplanmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1 oranında altın nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 17,52 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,56 V, dolum faktörü (FF) %59 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,35 olarak hesaplanmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %0,5 oranında gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında pilin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 17,60 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %46 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %3,50 olarak hesaplanmıştır. Kloroform çözücüsüyle hazırlanan aktif tabaka %1,2 Au:%0,3Ag oranında altın-gümüş nanoparçacıkları ile katkılıandığında organik güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) 10,98 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ) 0,52 V, dolum faktörü (FF) %48 ve güç dönüşüm verimi ( $\eta$ ) %2,77 olarak elde edilmiştir. Bu organik güneş pillerinin güç dönüşüm veriminin artması nanoparçacıklardaki iletkenlik elektronlarının yüzey plazmon rezonansı aktif tabakanın soğurmasını geliştirdiğinden dolayı kısa devre akımının gelişmesine atfedilmiştir (Spyropoulos *et al.* 2011). Nanoparçacık katkılı organik güneş pillerinin gelişmesini sağlayan etki gelen ışığın elektromanyetik alanı ve nanoparçacıkları çevreleyen yüzey elektron yoğunluğu arasındaki rezonans etkileşmesine atfedilmiştir (Spyropoulos *et al.* 2011). Bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi yapılan elektriksel ölçümlerden de görüldüğü üzere yüksek oranda nanoparçacık katkı oranı aktif tabakayı bozmaktadır. P3HT:PCBM'e altın , gümüş ve altın - gümüş nanoparçacık katkılanarak organik güneş pilinin verimini arttırabileceği gibi eksiton ayrışmasını ve yük taşınmasını engelleyerek güç dönüşüm verimini azaltma gibi olumsuz bir etki de oluşturabilir. Bu sebeple P3HT:PCBM'e katkılanacak metal nanoparçacıklar bu organik yapı ile uyumlu olmalıdırlar.

Sonuç olarak iki farklı çözücü kullanılarak hazırlanan P3HT:PCBM aktif tabakasından klasik organik güneş pili elde edilmiş ve elektriksel ölçümleri alınarak temel güneş pili parametreleri tayin edilmiştir. Organik P3HT:PCBM aktif tabakası altın, gümüş ve altın-gümüş nanoparçacıkları ile katkılanarak organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi artırılmıştır. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında organik güneş pilleri çeşitli metal veya polimerlerle katkılanarak günümüz enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli katkı sağlayabilir. Bu yaklaşımla metal NP'lar katkılamada optimize edilerek organik güneş pillerinin güç dönüşüm verimi daha da artırılabilir.



## KAYNAKLAR

- Akimov, Y. A., Koh, W. S., Sian, S. Y., and Ren, S., 2010. Nanoparticle-enhanced thin film solar cells. Metallic or dielectric nanoparticles Appl. Phys. Lett., 96(2010) , 73-111.
- Alahmad , A ., 2014 . Preparation and Characterization of Silver Nanoparticles. Int.J. Chem Tech Res, 6 (2014), 450-459.
- Alam, M ., Ray , MB., Khan, M. and Dongaonkar , S ., 2012. The Essence and Efficiency Limits of Bulk-Heterostructure Organic Solar Cells. Mater. Res. Soc. Symp. Proc, 3(2012), 1390 -2012 .
- Alya, S. A., Alaa , A., 2015. Influence of film thickness on optical absorption and energy gap of thermally evaporated CdS 0.1 Se 0.9 thin films . Chalcogenide Letters, 12(2015), 489 - 496.
- Amarasinghe, D., 2008. I. D. W.R. W. Appl. Phys. Lett. 083305/1.
- Beak, W.H., Yoon, T.S., Lee, H.H., Kim, Y.S., 2010. Composition-dependent phase separation of P3HT:PCBM composites for high performance organic solar cells. Organic Electronics, 11 (2010), 933–937.
- Benanti , T.L. and Venkataraman , D., 2006, Organic solar cells: An overview focusing on active layer morphology. Photosynthesis Research, 87 (2006), 73-81.
- Bi, H. and LaPierre, R ., 2009. A GaAs nanowire/P3HT hybrid photovoltaic device. Nanotechnology, 20(2009), 465-205.
- Bliznyuk, V. N., Gasiorowski, J., Ishchenko, A.A., Bulavko, G.V., Rahaman, M., Hingerl, K., Zahn, D.R.T., Sariciftci, N. S., 2016. Photovoltaic cells based on ternary P3HT:PCBM:polymethine dyeactive layer transparent in the visible range of light. Applied Surface Science, 389(2016), 419–427.
- Bo, W ., Xiangyang , W ., Guan , C., Fai Ta , K., Lee Yeow , E.K., Nripan Mathews , H.J.F ., 2004. Uncovering loss mechanisms in silver nanoparticle-blended plasmonic organic solar cells & Tze Chien Sumnature communications , DOI: 10.1038/ncomms 3004.
- Brabec, C.J., Cravino, A., Meissner, D., Sariciftci, N.S., Rispens, M.T., Sanchez, L., Hummelen, J.C., ve Fromherz, T., 2002. The influence of materials work function on the open circuit voltage of plastic solar cell . Thin Solid Films, 368(2002), 403-404.
- Chapin D. M., Fuller , C. S., and Pearson,G. L., 1954. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. American Institute of Physics, 25(1954); doi: 10.1063/1.1721711.
- Coakley, KM., McGehee , MD., 2004. Conjugated polymer photovoltaic cells. Chem Mater, 16(2004), 4533–4542. doi: 10.1021/cm049654n.
- Dengler, S., Kubel , C., Schwenke , A., Ritt, G ., and Eberle , B ., 2012. Near- and off-resonant optical limiting properties of gold–silver alloy nanoparticles for intense nanosecond laser pulses. Journal of Optics, 14 (2012), 75-203.
- Dennler, G., Scharber , C., Brabec, C.J., 2009. Polymer-fullerene bulk-heterojunction solar cells, Adv. Mater , 21(2009), 1323-2338.
- Doğan, S., 2013. Güneş Pillerinde Donor- Akseptör olarak kullanılacak olan bazı iletken polimerlerin sentezi , Fen bilimleri Enstitüsü , yüksek lisans tezi, Isparta.

- Facchetti, A., 2011.  $\pi$ - Conjugated Polymers for Organic Electronics and Photovoltaic Cell Applications. *Chemistry of Materials*, 4(2011), 733–758.
- Farchioni, R., 2001. Conjugated Polymers and Low Molecular Weight Organic Solids. *Organic Electronic Materials*, Berlin.
- Frosch, C. J. and Drrick, L., 1957. Surface Protection and Selective Masking during Diffusion in Silicon. *J. Electrochem. Soc.*, 104(1957), 547-552.
- Goetzberger, A., and Hoffmann, V. U., 2005. Photovoltaic solar energy generation : Springer Verlag, 2005.
- Gollu, S. R., Sharma, R., Srinivas, G., Kundu, S., Gupta, D., 2016. Incorporation of silver and gold nanostructures for performance improvement in P3HT:PCBM inverted solar cell with rGO/ZnO nanocomposite as an electron transport layer. *Organic Electronics* 29 (2016) 79-87.
- Gonzalez, D. M., Körstgens, V., Yao, Y., Song, L., Santoro, G., Roth, S. V., and Müller-Buschbaum, P., 2015. Improved Power Conversion Efficiency of P3HT:PCBM Organic Solar Cells by Strong Spin–Orbit Coupling-Induced Delayed Fluorescence. *Advanced Energy Materials*. *Adv. Energy Mater.*, 5(2015), 140-1770.
- Gregg, B.A., Hanna, M.C., 2003. Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics*, 93(2003), 3605-3614.
- Gültekin, A., 2014. Effect of Au Nanoparticles Doping on The Properties of TiO<sub>2</sub> Thin Films ISSN 1392–1320 *Materials Science (Medžiagotyra)*, 20(2014), 1.
- Günes, S., Neugebauer, H., and Sariciiftçi, N.S., 2007. Conjugated polymer-based organic solar cells. *Chemical Reviews*, 107 (2007), 1324-1338.
- Hamdan, K.S., Abdullah, S.M., Sulaiman, K., Zakaria, R. Effects of silver nanoparticles towards the efficiency of organic solar cells. *Appl. Phys .A* DOI 10.1007/s00339-013-8004-9.
- Hiramoto, M., Site, G. and Contacts, H., 2005. Organic Solar Cells Incorporating p–i–n Junction and p–n Homojunction.
- Hsu, F.H., Wang, N.F., Tsai, Y.Z., Wu, C.Y., Cheng, Y.S., Chien, M.H., Houn, M.P., 2014. Enhanced carrier collection in p-Ni<sub>1-x</sub>O:Li/n-Si heterojunction solar cells using LiF/Al electrodes. *Thin Solid Films* 573 (2014) 159–163.
- Ikram, M., Murray, R., Hussain, A., Ali, S., Shah, I.S., 2014. Hybrid organic solar cells using both ZnO and PCBM as electron acceptor materials. *Materials Science and Engineering B* 189 (2014) 64–69.
- Jouane, Y., Colis, S., Schmerber, G., Leuvrey, C., Dinia, A., Lévêque, P., Heiser, T., and Chapuis, Y.A., 2012. Annealing treatment for restoring and controlling the interface morphology of organic photovoltaic cells with interfacial sputtered ZnO films on P3HT:PCBM active layers. *J. Mater. Chem.*, 22 (2012), 1606-1612.
- Kadem, Burak., Mohammed K.Al-hashimib, Y., Hassana, A. K., 2014. The effect of solution processing on the power conversion efficiency of P3HT-based organic solar cells. *Energy Procedia* 50 (2014) 237 – 245.
- Kambayashi, M., Zhang, J., and Oyama, M., 2005. Crystal growth of gold nanoparticles on indium tin oxides in the absence and presence of 3-mercaptopropyl-trimethoxysilane. *Crystal growth & design* 5(2005), 81-84.

- Khan, N., Kausar, A., and Rahman, A. U., 2015. Modern Drifts in Conjugated Polymers and Nanocomposites for Organic Solar Cells: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 54 (2015), 140-154.
- Kietzke, T., 2007. Recent Advances in Organic Solar Cells. *Advan. In Opto Electron.*, 12(2007), 1-15.
- Kolachure, V., 2007. DNA Based Thin Film as Hole Transport Layer in Bulk HJ
- Köhler, J. M. and Fritzsche, W., 2007. *Nanotechnology: an introduction to nanostructuring techniques*: Vch Verlagsgesellschaft MbH, 2007.
- Kroon, J.M., Veenstra, S.C., Sloof, L.H., Verhees, W.J.H., Koetse, M.M., Sweelssen, J., Schoo, H.F.M., Beek, W.J. E., Wienk, M.M., Janssen, R.A.J., Yang, X., Loos, J., Mihailescu, V.D., Blom, P.W.M., Knol, J., Hummelen, J.C., 2007. Nanocrystalline dye-sensitized solar cells having maximum performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15, 1-8.
- Küpeli, A.Ö., 2005. Güneş Pilleri ve Verimleri. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, Eskişehir.
- Lee, E.J., Choi, M.H., and Moon, D.K., 2016. Enhanced Photovoltaic Properties of Bulk Heterojunction Organic Photovoltaic Devices by an Addition of a Low Band Gap Conjugated Polymer. *Materials*, 9(2016), 12- 996.
- Li, L., Chen, W., Zheng, J., Wang, L., Chen, Y., 2016. Characterization of Silver Nanoparticles Thin Films with Various Thicknesses by AFM. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4 (2016), 34-39.
- Li, Gang., Shrotriya, V., Huang, J., Yao, Y., Moriarty, T., Emery, K., and Yang, Y., 2005. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends. *Nature materials*, 4(2005), 203-155.
- Liu, L., Shi, Y. ve Yang, Y., 2001. Solvation Induced Morphology Effects on The Performance of Polymer Based Photovoltaic Devices. *Adv. Funct. Mater*, 11(2001), 420-420.
- Marumoto, K., Kosuga, A., Liu, D., Takeuchi, O., and Shigekawa, H., 2017. Dependence of the Device Performance of Polymer Solar Cells on the Insertion of Metal Nanoparticle Layers at the Electron-collecting Electrodes. *Electrochemistry*. 85(2017), 272–275.
- Materials Research*, 19, 1924-1945.
- Moons, E., 2002. Conjugated polymer blends : linking film morphology to performance of light emitting diodes and photodiodes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(2002), 12235-12260.
- Nardes, A.M., Kemerink, M., Janssen, R.A.J., Bastiaansen, J.A.M., Kigger, N.M.M., Langeveld, B. M. W., van Breemen, A.J.J.M. and de Kok, M.M., 2008, Microscopic Understanding of the Anisotropic Conductivity of PEDOT:PSS Thin Films *Advanced Materials*, 19 (2008), 1196-1200.
- Neamen, D. A., *Semiconductor Physics and Device*, McGraw-Hill, New York, 2003.
- Nickel, F., Puetz, A., Reinhard, M., Do, H., Kayser, C., Colmann, A., Lemmer, U., 2009. Cathodes comprising highly conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) for semi-transparent polymer solar cells, *Organic Electronics*, 11(2009), 535-538.
- Norrman, K., Larsen, N.B., and Krebs, F.C., 2006. Lifetimes of organic photovoltaics: combining chemical and physical characterization techniques to study

- degradation mechanisms . *Solar Energy Materials Solar Cells*, 90(2006), 2793–2814.
- Notarianni, M., Vernon, K., Chou , A ., Aljada , M., Liu , J., Motta , J., 2014. Plasmonic effect of gold nanoparticles in organic solar cells. *Solar Energy*, 106 (2014) 23–37.
- Öztürk, H., 2013. Yenilenebilir Enerji Kaynakları, 1. baskı. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2013. Polymer Solar Cells. Degree of Master of Science in Material Science and Engineering, University of Texas at Arlington, USA.
- Rao, A., Schoenenberger, M., Gnecco, E., Glatzel, Th., Meyer, E., 2007. Characterization of nanoparticles using Atomic Force Microscopy. *Journal of Physics: Conference Series* 61 (2007) 971–976.
- Sahare, S., Veldurthi, N., Datar ,S., and Bhawe, T., 2015. Photon assisted conducting atomic force microscopy study of nanostructured additives in P3HT:PCBM. *RSC Advances*, 5(2015), 102-795.
- Sajjad, Saeedullah., 2013 . Organik Tabanlı Güneş Pili Üretimi ve Karakterizasyonu , Fen Bilimleri Enstitüsü, yüksek lisans tezi ,İstanbul .
- Schilinsky, P., Waldauf, C., Brabec, C.J., 2002. Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors. *Applied Physics Letters*, 81(2002), 3885-3887.
- Sharma, B.L. and Purohit, R.K. 1974. *Semiconductor Heterojunctions*. Pergamon, 216 p., Oxford, New York.
- Spanggaard, H., Krebs, F.C., 2004. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83(2004), 125-146.
- Spyropoulos, G.D., Stylianakis , M., Stratakis, M., Kymakis, E., 2011. Plasmonic organic photovoltaics doped with metal nanoparticles. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 9 (2011) 184–189.
- Stratakis, E., and Kymakis, E., 2013. Nanoparticle-based plasmonic organic photovoltaic devices. *Materials*, 16 (2013), 4-8.
- Supriyanto, A., Maya , Rosa , E. S., Iriani , Y., Ramelan , A. H F., Nurosyid.,2016. Influences mass concentration of P3HT and PCBM to application of organic solar cells. *Journal of Physics: Conference Series* 776 (2016) 12-112.
- Sze, S. M., 2002. *Semiconductor Devices Physics and Technolog* , John Wiley & Sons, Newyork, 8(2002) , 85-127 .
- Sze, S. M.,1985. *Semiconductor Devices Physics and Technology*, Wiley, New York, 1985.
- Tang, C.W., 1986. Layer organic photovoltaic cell. *Appl. Phys. Lett*, 48(1986), 183-185.
- Uechi, I. and Yamada, S., 2008 . Photochemical and analytical applications of gold nanoparticles and nanorods utilizing surface plasmon resonance. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 391(2008), 2411-2421.
- Vacca, P., Petrosino, M., Miscioscia, R., Nenna, G., Minarini, C., Sala, D.D., Rubino, A., 2008, Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(4-styrenesulfonate) physical and hole injection properties in organic light emitting diodes. *Thin Solid Films*, 516 (2008), 4232-4237.

- Wang, D. H., 2011. Enhancement of Donor–Acceptor Polymer Bulk Heterojunction Solar Cell Power Conversion Efficiencies by Addition of Au Nanoparticles. *Angewandte Chemie*, 123(2011), 5633-5637.
- Wei, S. K., 2009. R. W. *Applied Physics Letters*, 041111/1.
- Wiesner, M. R. and Bottero, J.Y., 2007. *Environmental nanotechnology*: Mc Graw-Hill Professional, 2007.
- Xie, F., Choy, W., Sha, W.E.I., Zhang, D., Zhang, S., Li, X., Leung, C., and Hou, J., 2013. Enhanced charge extraction in organic solar cells through electron accumulation effects induced by metal nanoparticles. *Energy Environ. Sci*, 6(2013), 3372–3379.
- Yagci, Ö., Yesilkaya, S. S., Yüksel, S. A., Ongüla, F., Varal, N. M., Kus, M., Günes, S., Icellia, O., 2016. Effect of boric acid doped PEDOT:PSS layer on the performance of P3HT: PCBM based organic solar cells. *Synthetic Metals*, 212 (2016) 12–18.
- Yu, Y. Y., Chan, S. H., 2013. Metallic nanoparticles in active layer for hybrid photovoltaic device applications. *Thin Solid Films*, 544 (2013), 175–181.
- Zafer, C., 2006. *Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi*. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Zhou, Y., Eck, M., and Krüger, M., 2010. Bulk-heterojunction hybrid solar cells based on colloidal nanocrystals and conjugated polymers. *Energy Environ. Sci.*, 3(2010), 1851-

## ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Erzurum'un Çat ilçesinde doğdu. 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Kara Bekir Eğitim Fakültesi Fizik bölümüne yerleşti. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım KaraBekir Eğitim Fakültesi Fizik bölümünden mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliğini yerleşti ve 2. sınıfta kayıt dondurdu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Astro Fizik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisansı yerleşti ve bıraktı. 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisansı yerleşti. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora programına yerleşti.

### Proje:

Farklı Yarıiletkenlerle Yapılan Arayüzeyli Doğrultucu Kontakların Optik ve Numune Sıcaklığına Bağlı Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniv. BAP, 2014-2016 (Proje No: 2013/312).

X-Işını Radyasyonunun ve Numune Sıcaklığının Organik Arayüzeyli Metal/Organik/Yarıiletken Doğrultucu Kontakların Elektriksel ve Optiksel Karakteristikleri Üzerine Etkisi, Atatürk Üniv. BAP, 2014-2016 (Proje No: 2014/181).

Verimli Organik ve İnorganik Fotovoltaiklerin Fabrikasyonu, Karakterizasyonu ve Verimi Arttırmaya Yönelik İnverted Solar Cell Yapıların İncelenmesi, Atatürk Üniv. BAP, 2015-2017 (Proje No: 2015/120).

**Makaleler:**

**Kaçuş, H.**, Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Aydoğan,Ş., Yesildag A., Ekinci, D.,2013. The analysis of the current voltage characteristics of the high barrier Au/Anthracene/n-Si MIS devices at low temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 143 (2014),545-551.

**Kaçuş, H.**, Aydoğan , Ş., Ekinci, D., Kurudirek,S.V.,Türüt, A., 2015. Optical absorption of the anthracene and temperature-dependent capacitance–voltage characteristics of the Au/anthracene/n-Si heterojunction in metal–organic–semiconductor configuration. *Physica E* 74 (2015) 505–509.

Aydoğan , Ş., Grilli, Maria Luisa ., Yilmaz , M., Çaldıran , Z., **Kaçuş, H.**, 2017. A facile growth of spray based ZnO films and device performance investigation for Schottky diodes: Determination of interface state density distribution. *Journal of Alloys and Compounds* Volume 708, 25 June 2017, Pages 55-66 .

**Bildiri:**

**H. Kaçuş** , A. Baltakesmez , Z. Çaldıran, Ş. Aydoğan, M. Yılmaz, M. Sevim., 2018. Improving the Device Performance of the Organic Solar Cells Using %1 ration gold and silver nanoparticles. *International Congress on Semiconductor Materials & Devices(ICSMD)*,2018 Ardahan / TURKEY.

Y. Nuhoğlu, Z. Çaldıran, **H. Kaçuş** and B. Çakmak., 2018. Investigation of the optical, morphological and structural properties of p3ht: pcbm based inverted organic solar cells. *International Congress on Semiconductor Materials & Devices(ICSMD)*,2018 Ardahan / TURKEY.

L.B. Taşyürek, Z. Çaldıran, **H. Kaçuş**, M. S. Yılmaz, O.Metin and Ş. Aydoğan, 2018. The Electrical Characterization of Ni/SrTiO<sub>3</sub>/n-Si/Al Heterojunction Device.

International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD-2018)  
August 2018, Ardahan/ TURKEY.

**Poster :**

**H. Kaçuş**, Ş. Aydoğan , Z. Çaldıran, M. Biber, 2017. The Effect of DMSO- doped PEDOT:PSS on Organic solar cells at the different concentrations. International Conference on Advanced Engineering Technologies(ICADET), 2017 Bayburt/ TURKEY.

**H. Kaçuş**, Ş. Aydoğan , Ö. Metin, Z. Çaldıran , M. Biber, 2017. Metal Nanoparticles Doped Organic Photovoltaic Device. International Conference on Advanced Engineering Technologies(ICADET), 2017 Bayburt/ TURKEY.

İ. Gümüş, **H. Kaçuş**, Z. Çaldıran, M. Sevim, Ö. Metin and Ş. Aydoğan, 2017. Rectifier Contact Application Of Graphene Oxide-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites. International Conference on Advanced Engineering Technologies(ICADET), 2017 Bayburt/ TURKEY.

**H. Kaçuş**, Ş. Aydoğan, Ö. Metin, Z. Çaldıran, M. Biber, 2017. Effect of Plasmonic Nanoparticles in Organic Solar Cells based on P3HT:PCBM. International Congress on Semiconductor Materials & Devices(ICSMD), 2017 Konya/ TURKEY.

**H. Kaçuş**, Ş. Aydoğan , Z. Çaldıran, Ü. İncekara, M. Biber, 2017. The Electrical Characterization of the Methylene blue/n-si Heterojunction device. International Congress on Semiconductor Materials & Devices(ICSMD), 2017 Konya/ TURKEY.

**H. Kaçuş**, Z. Çaldıran, Ş. Aydoğan A.R. Deniz, D. Ekinici, 2016. The Effect of Series Resistance on Au/Anthracene/n-si/Al Heterojunction at Low Temperatures.

International Physics Conference at the Anatolian Peak (IPCAP 2016), February 2016-Erzurum/TURKEY.

**H. Kaçuş**, Z. Çaldıran, Ş. Aydoğan A.R. Deniz, D. Ekinici, 2016. Au / Anthracene / n-Si / Al Heterojunction of the Barrier Height Determining with Different Methods. International Physics Conference at the Anatolian Peak (IPCAP 2016), February 2016-Erzurum/TURKEY.

Z. Çaldıran, A.R. Deniz, M. Yılmaz, **H. Kaçuş**, M. Biber and Ş. Aydoğan, 2015. Optical and Electrical Characterization of n-ZnO/p-Si Heterojunction. International Semiconductor Science and Technology Conference (ISSTC), 2015-Kuşadası/Aydın/TURKEY.