

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

**SOL-GEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ TİTANYUM OKSİT ( $\text{TiO}_x$ ) VE ÇİNKO  
OKSİT ( $\text{ZnO}$ ) KOMPAKT TABAKALARININ TERSİNE ÇEVRİLMİŞ  
FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**ERGÜL MELTEM AKÇAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. SERAP GÜNEŞ**

**İSTANBUL, 2012**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOL-GEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ TİTANYUM OKSİT (TiO<sub>x</sub>) VE ÇİNKO OKSİT (ZnO)  
KOMPAKT TABAKALARININ TERSİNE ÇEVİRİLMİŞ FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN VERİMİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Ergül Meltem AKÇAY tarafından hazırlanan tez çalışması ..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Serap GÜNEŞ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Serap GÜNEŞ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kubilay KUTLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sait Eren SAN  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Tez çalışmam boyunca benden hiçbir desteği esirgemeyen, her zaman yüksek motivasyonu ile beni motive eden, güler yüzlü, sabırlı, yol gösterici ve bilim çevresinde kendine has duruşuyla hayatım boyunca örnek alacağım tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Serap Güneş'e emekleri için sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarım süresince bana her türlü destek sağlayan, hep yanımda olan, bildiklerini ve tecrübelerini benden esirgemeyen sevgili laboratuar arkadaşlarım Derya ILICALI, Adem KARSLI, Nursel YAVUZ, Aren YAZMACIAN ve Furkan KURUOĞLU'na teşekkür ederim.

Son olarak başarılı olabilmem için her türlü zemini hazırlamaya çalışan ve bu bağlamda hiçbir desteği benden esirgemeyen, bana manevi ve maddi destek olup kol kanat geren ahlama, anneme, babama ve Erhan Ballieker'e tüm kalbimle sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Ağustos,2012

Ergül Meltem AKÇAY

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| SİMGE LİSTESİ.....                | xvi  |
| KISALTMA LİSTESİ .....            | x    |
| ŞEKİL LİSTESİ .....               | xi   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....             | xiv  |
| ÖZET .....                        | xv   |
| ABSTRACT .....                    | xvii |
| BÖLÜM 1                           |      |
| GİRİŞ .....                       | 1    |
| 1.1    Literatür Özeti .....      | 1    |
| 1.2    Tezin Amacı .....          | 4    |
| 1.3    Hipotez .....              | 5    |
| BÖLÜM 2                           |      |
| ENERJİ.....                       | 6    |
| 2.1    Fosil Kaynaklar.....       | 7    |
| 2.2    Yeni Enerji .....          | 8    |
| 2.2.1    Nükleer Enerji.....      | 9    |
| 2.2.2    Yakıt Hücreleri .....    | 10   |
| 2.2.3    Hidrojen Enerjisi .....  | 12   |
| 2.3    Yenilenebilir Enerji ..... | 16   |
| 2.3.1    Biyokütle Enerjisi ..... | 17   |
| 2.3.2    Rüzgar Enerjisi .....    | 19   |
| 2.3.3    Dalga Enerjisi .....     | 23   |
| 2.3.4    Jeotermal Enerji .....   | 25   |
| 2.3.5    Hidrolojik Enerji.....   | 28   |
| 2.3.6    Güneş Enerjisi.....      | 31   |

## BÖLÜM 3

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| FOTOVOLTAİK HÜCRELER.....                        | 37 |
| 3.1 Yarı İletkenlerin Fiziği ve Özellikleri..... | 37 |
| 3.2 Enerji Bantları ve Enerji Aralığı.....       | 38 |
| 3.3 Yarı İletkenlerde Katkılama .....            | 40 |
| 3.4 PN Eklemler ve Çalışma Prensipleri.....      | 42 |

## BÖLÜM 4

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN GELİŞİM SÜRECİ ve SINIFLANDIRILMASI ..... | 45 |
| 4.1 Birinci Nesil Fotovoltaik Hücreler.....                      | 47 |
| 4.2 İkinci Nesil Fotovoltaik Hücreler.....                       | 48 |
| 4.3 Üçüncü Nesil Fotovoltaik Hücreler.....                       | 49 |

## BÖLÜM 5

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| ORGANİK FOTOVOLTAİK HÜCRELER .....                                             | 52 |
| 5.1 Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Malzemeler .....                 | 53 |
| 5.2 Organik Yarı İletkenlerin Temel Özellikleri .....                          | 54 |
| 5.2.1 Optik Özellikler .....                                                   | 55 |
| 5.2.2 Yük Taşınması Özellikleri .....                                          | 55 |
| 5.3 Devre Yapısı ve Özellikleri .....                                          | 56 |
| 5.4 Hazırlama Teknikleri.....                                                  | 58 |
| 5.4.1 Dönel Kaplama Yöntemi ile Kaplama .....                                  | 59 |
| 5.4.2 Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Kaplama.....                            | 60 |
| 5.5 Çalışma Prensibi .....                                                     | 60 |
| 5.6 Devre Yapıları .....                                                       | 62 |
| 5.6.1 Tek Tabaka Fotovoltaik Hücreler.....                                     | 62 |
| 5.6.2 İki Katlı Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler .....                         | 62 |
| 5.6.3 Hacim Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler.....                              | 63 |
| 5.7 Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu .....                              | 64 |
| 5.7.1 Fotovoltaik Hücrelerin Eşdeğer Devre Diagramı .....                      | 64 |
| 5.7.2 Fotovoltaik Hücrelerde Güç Dönüşüm Verimi.....                           | 65 |
| 5.7.2.1 Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ ) .....                                    | 66 |
| 5.7.2.2 Açık Devre Gerilimi ( $V_{oc}$ ).....                                  | 66 |
| 5.7.2.3 Dolgu Faktörü (FF) .....                                               | 67 |
| 5.8 Fotovoltaik Hücrelerde Verimi İyileştirmek İçin Kullanılan Yöntemler ..... | 68 |
| 5.9 Tersine Çevrilmiş Fotovoltaik Hücreler .....                               | 69 |

## BÖLÜM 6

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                                     | 71 |
| 6.1 Tersine Çevrilmiş Fotovoltaik Hücrenin Hazırlanması.....                 | 71 |
| 6.2 Deneysel Sonuçlar .....                                                  | 73 |
| 6.2.1 Birinci Yöntem ile Hazırlanan $TiO_2$ için Elden Edilen Sonuçlar ..... | 73 |
| 6.2.1.1 Aktif Tabakaya PCBM Etkisinin İncelenmesi .....                      | 73 |
| 6.2.1.2 Aktif Tabakaya P3HT Etkisinin İncelenmesi .....                      | 74 |
| 6.2.1.3 Aktif Tabakaya Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi .....                  | 75 |
| 6.2.2 İkinci Yöntem ile Hazırlanan $TiO_2$ için Elden Edilen Sonuçlar .....  | 76 |

|         |                                                                                |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.2.1 | Aktif Tabakaya PCBM Etkisinin İncelenmesi .....                                | 76 |
| 6.2.2.2 | Aktif Tabakaya P3HT Etkisinin İncelenmesi .....                                | 77 |
| 6.2.3   | Üçüncü Yöntem ile Hazırlanan TiO <sub>2</sub> için Elden Edilen Sonuçlar ..... | 79 |
| 6.2.4   | Birinci Yöntem ile Hazırlanan ZnO için Elde Edilen Sonuçlar .....              | 80 |
| 6.2.4.1 | ZnO Tabakasına Uygulanan Sıcaklığın Verime Etkisinin İncelenmesi ....          | 80 |
| 6.2.4.2 | ZnO Tabakasının Kalınlığının Verime Etkisinin İncelenmesi .....                | 81 |
| 6.2.4.3 | Aktif Tabakaya Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi .....                            | 82 |
| 6.2.4.4 | Farklı Metal Kontak Etkisinin İncelenmesi .....                                | 83 |
| 6.2.5   | İkinci Yöntem İle Hazırlanan ZnO İçin Elde Edilen Sonuçlar .....               | 84 |
| 6.2.5.1 | Aktif Tabakanın Kalınlığının Verime Etkisinin İncelenmesi .....                | 84 |
| 6.2.5.2 | Aktif tabakaya Sıcaklığın Verime Etkisinin İncelenmesi .....                   | 85 |
| 6.2.4.2 | Farklı metal Kontak Etkisinin İncelenmesi .....                                | 86 |

## BÖLÜM 7

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR ..... | 87 |
|-------------------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| KAYNAKLAR ..... | 93 |
|-----------------|----|

|                |    |
|----------------|----|
| ÖZGEÇMİŞ ..... | 97 |
|----------------|----|

## SİMGE LİSTESİ

---

|                    |                                         |
|--------------------|-----------------------------------------|
| a                  | İdealite Faktörü                        |
| Ag                 | Gümüş                                   |
| Al                 | Alüminyum                               |
| Au                 | Altın                                   |
| B                  | Bor                                     |
| $^{\circ}\text{C}$ | Selcius derece                          |
| C                  | Karbon                                  |
| CdS                | Kadmiyum Sülfüt                         |
| CdTe               | Kadmiyum Tellürit                       |
| $\text{CH}_4$      | Metan                                   |
| $\text{CO}_2$      | Karbondioksit                           |
| CuO                | Bakıroksit                              |
| $\text{CuInSe}_2$  | Bakır İndium di Selenyum                |
| E                  | Elektrik alan                           |
| e                  | Elektron yükü                           |
| $E_c$              | İletkenlik bandı enerji seviyesi        |
| $E_d$              | Donör enerji seviyesi                   |
| $E_g$              | Yasak bant enerji seviyesi              |
| $E_v$              | Değerlik (valans) bandı enerji seviyesi |
| eV                 | Elektron volt                           |
| F                  | Kuvvet                                  |
| Ga                 | Galyum                                  |
| GaAs               | Galyum Arsenit                          |
| Ge                 | Germanyum                               |
| I                  | Akım                                    |
| $I_0$              | Karanlık doyma akımı                    |

|             |                             |
|-------------|-----------------------------|
| $I_d$       | Diyot Akımı                 |
| $I_L$       | Fotoakım                    |
| $I_{sc}$    | Kısa devre akımı            |
| $I_{SH}$    | Kaçak akım                  |
| $I_{MPP}$   | Maksimum akım güç noktası   |
| $InP$       | İndiyum Sülfür              |
| $J_{max}$   | Maksimum akım yoğunluğu     |
| $k_B$       | Boltzman sabiti             |
| $kW$        | kilo watt                   |
| $Li$        | Lityum                      |
| $MW$        | Mega Watt                   |
| $mV$        | Milivolt                    |
| $mA$        | Miliamper                   |
| $\mu$       | Mobilite                    |
| $N$         | Azot                        |
| $n$         | Kalite faktörü              |
| $N_o$       | Etkin durum yoğunluğu       |
| $N_{CS}$    | Modül sayısı                |
| $N_2O$      | Nitrojen dioksit            |
| $n_i$       | Asal taşıyıcı yük yoğunluğu |
| $nm$        | Nanometre                   |
| $\eta$      | Güç dönüşüm verimi          |
| $P$         | Fosfor                      |
| $P_{LIGHT}$ | Gelen ışın şiddeti          |
| $PbS$       | Potasyum Sülfür             |
| $PbSe$      | Kurşun Selenit              |
| $P_{MPP}$   | Maksimum güç çıkışı         |
| $P_{IN}$    | Optik giriş gücü            |
| $q$         | Yük                         |
| $R_s$       | Seri direnç                 |
| $R_{SH}$    | Paralel direnç              |
| $Sb$        | Antimon                     |
| $Si$        | Silisyum                    |
| $Se$        | Selenyum                    |
| $T$         | Sıcaklık                    |

|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| $\text{TiO}_2$   | Titanyumdioksit              |
| $U$              | Uygulanan voltaj             |
| $\Delta U$       | Potansiyel enerji değişimi   |
| $V$              | Gerilim                      |
| $V_{\text{max}}$ | Maksimum gerilim             |
| $V_{\text{oc}}$  | Açık devre voltajı           |
| $V_{\text{MPP}}$ | Maksimum gerimim güç noktası |
| $\lambda$        | Dalga boyu                   |
| $W$              | Watt                         |
| $\text{ZnO}$     | Çinko oksit                  |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|      |                                                 |
|------|-------------------------------------------------|
| AC   | Alternatif akım                                 |
| AM   | Hava kütlesi                                    |
| BM   | Birleşmiş Milletler                             |
| CFC  | Kloroflorokarbon                                |
| DC   | Doğru akım                                      |
| ETL  | Elektron geçiren tabaka                         |
| HBL  | Boşluk engelleyici tabaka                       |
| HOMO | İşgal edilmiş en yüksek enerji seviyesi         |
| IPCE | Gelen fotonun elektrik akımına dönüşüm verimi   |
| ITO  | İndiyum kalay oksit                             |
| LUMO | İşgal edilmemiş en düşük enerji seviyesi        |
| NREL | Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı        |
| MIM  | Metal yalıtkan metal                            |
| OLED | Organik ışık yayan diyot                        |
| PV   | Fotovoltaik                                     |
| P3HT | Poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil)                  |
| PCBM | (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6, 6]C61) |
| RPM  | dakika başına dolanım sayısı                    |
| TWh  | Tera watt saat                                  |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            | Sayfa                                                              |
|------------|--------------------------------------------------------------------|
| Şekil 1    | Tezde kullanılacak olan malzemelerin kimyasal yapıları.....xvi     |
| Şekil 2.1  | Birincil enerji kaynakları.....6                                   |
| Şekil 2.2  | Fosil yakıtlardan petrol, kömür ve doğalgaz.....7                  |
| Şekil 2.3  | Dünyadaki fosil yakıtların dağılımı.....8                          |
| Şekil 2.4  | Şematik olarak bir nükleer santral.....9                           |
| Şekil 2.5  | Yakıt hücresi.....10                                               |
| Şekil 2.6  | Yakıt hücrelerinin genel gösterimi.....11                          |
| Şekil 2.7  | Titanyum ile katkılanmış karbon nanotüp.....13                     |
| Şekil 2.8  | Rüzgar türbininin iç kısmı.....20                                  |
| Şekil 2.9  | Dikey eksenli bir rüzgar türbini ve türbinin iç kısmı.....21       |
| Şekil 2.10 | Dikey eksenli rüzgar türbini.....21                                |
| Şekil 2.11 | Sonlandırıcı sisteme örnek salınlımlı su kolonları.....23          |
| Şekil 2.12 | Nokta absorblayıcı sistem.....24                                   |
| Şekil 2.13 | Dalga ejderinin şekli ve çalışma prensibi.....24                   |
| Şekil 2.14 | Dünya’da jeotermal enerji kullanımı.....27                         |
| Şekil 2.15 | Doğal su döngüsü.....28                                            |
| Şekil 2.16 | Bir hidrogüç santrali.....29                                       |
| Şekil 2.17 | Dünyada hidroelektrik güç kullanımı.....30                         |
| Şekil 2.18 | Sıvı düz plakalı kollektör.....33                                  |
| Şekil 2.19 | İçi boşaltılmış tüp kollektörün şematik gösterimleri.....34        |
| Şekil 2.20 | Güneş Enerjili Hava ısıtıcı.....34                                 |
| Şekil 2.21 | Silindir parabolik yoğunlaştırıcı kollektör.....34                 |
| Şekil 2.22 | Kollektörlerin karşılaştırmalı verimi.....35                       |
| Şekil 3.1  | Yalıtkan, yarı iletken ve metal için enerji bant aralıkları.....39 |
| Şekil 3.2  | Katkılanmış (a) ve katkılanmamış (b) silikon örgüsü.....40         |

|            |                                                                                                                                                 |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.3  | Donorların kesikli enerji seviyeleri (a) ve iyonize olmuş donörler (b).....                                                                     | 40 |
| Şekil 3.4  | İki boyutta boron atomlarıyla katılanmış silikon örgüsü (a), boron atomlarının boşluk oluşturarak iyonlaşması (b).....                          | 41 |
| Şekil 3.5  | Kesikli akseptör enerji seviyeleri (a) ve iyonize olmuş akseptörler (b).....                                                                    | 42 |
| Şekil 3.6  | PN eklem oluşum süreci.....                                                                                                                     | 43 |
| Şekil 3.7  | Termal dengedeki PN eklem. (a) eklem bölgesi (b) elektrik alan dağılımı (c) $\Psi_{bi}$ built-in potansiyeli (d) ise enerji bant diyagramı..... | 44 |
| Şekil 4.1  | NREL 2010 yılı verilerine göre kristal silikon hücrelerinin verimleri.....                                                                      | 47 |
| Şekil 4.2  | Hem birinci nesil hem de ikinci nesil fotovoltaik hücrelerin karşılaştırmalı verimi.....                                                        | 49 |
| Şekil 4.3  | Grätzel tipi hücre.....                                                                                                                         | 50 |
| Şekil 4.4  | Birinci, ikinci ve üçüncü nesil fotovoltaik hücreler için verimler.....                                                                         | 51 |
| Şekil 5.1  | Organik ışık yayan diyot (OLED), organik alan etkili transistör (OFET) ve organik fotovoltaik hücre (OPV).....                                  | 53 |
| Şekil 5.2  | Soldaki şekil eten için konjuge $\pi$ elektron sistemi, sağdaki şekil $\pi$ konjuge molekülün enerji seviyesi.....                              | 54 |
| Şekil 5.3  | Organik fotovoltaik hücrenin devre yapısı ve aktif tabaka olarak kullanılan malzemelerin kimyasal yapıları.....                                 | 57 |
| Şekil 5.4  | Organik fotovoltaik hücrelerde kullanılan birkaç konjuge polimer ve fulleren türevinin kimyasal yapısı.....                                     | 57 |
| Şekil 5.5  | Dönel kaplamanın çalışma prensibi (a); kaplama aşamaları ve film oluşumu (b).....                                                               | 59 |
| Şekil 5.6  | (a) Kaplama süresi arttıkça ve (b) kaplama hızı arttıkça film kalınlığının azaldığını gösteren grafikler.....                                   | 59 |
| Şekil 5.7  | Vakum odasının iç kısmını gösteren ve termal buharlaştırma yöntemi ile nasıl film kaplandığını gösteren şekil.....                              | 60 |
| Şekil 5.8  | Organik fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi ve devre yapısını gösteren Şekil.....                                                           | 61 |
| Şekil 5.9  | İki katlı heteroeklem fotovoltaik hücre.....                                                                                                    | 63 |
| Şekil 5.10 | Hacim heteroeklem fotovoltaik hücre.....                                                                                                        | 63 |
| Şekil 5.11 | Fotovoltaik hücreye ait eş değer devre.....                                                                                                     | 64 |
| Şekil 5.12 | Organik fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlıktaki akım- voltaj eğrisi.....                                                                  | 65 |
| Şekil 5.13 | Hava kütlesini ifade eden şekil.....                                                                                                            | 68 |
| Şekil 5.14 | Normal ve tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerin devre geometrisi.....                                                                        | 70 |
| Şekil 6.1  | Aktif tabakaları sırasıyla 1:1 (a), 1:2 (b) ve 1:3 (c) oranlarında hazırlanmış fotovoltaik hücreler için akım-gerilim eğrileri.....             | 74 |
| Şekil 6.2  | P3HT miktarı 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) oranında arttırılmış fotovoltaik hücreler için akım-gerilim grafikleri.....                            | 75 |

|            |                                                                                                                                                                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 6.3  | Aktif tabakasına sıcaklık uygulanan (a) ve uygulanmayan (b) fotovoltaiik hücreler için akım-gerilim grafikleri.....76                                           |
| Şekil 6.4  | P3HT:PCBM oranları 1:1 (a), 1:2 (b) ve 1:3 (c) oranlarında karıştırılarak hazırlanmış örneklerin aydınlık-karanlık akım-gerilim.....77                          |
| Şekil 6.5  | P3HT:PCBM oranları 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) şeklinde hazırlanmış fotovoltaiik hücrelerin akım-gerilim grafikleri.....78                                      |
| Şekil 6.6  | Üçüncü yöntem ile hazırlanmış numunelerde P3HT:PCBM oranları 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) olan örnekler için akım-gerilim grafikleri.....80                      |
| Şekil 6.7  | ZnO tabakasına sıcaklık uygulanmayan (a) ve uygulanan (b) numuneler için akım-gerilim eğrileri.....81                                                           |
| Şekil 6.8  | Farklı kalınlıkta ZnO tabakalarının akım-gerilim eğrilerini gösteren grafikler. (a) iki kat, (b) üç kat ve (c) dört kat ZnO kaplı numunelerin grafikleri.....82 |
| Şekil 6.9  | Aktif tabakalarına sıcaklık uygulanmamış (a) ve uygulanmış (b) numuneler için akım-gerilim grafikleri.....83                                                    |
| Şekil 6.10 | Au metal kontak için aktif tabakasına sıcaklık uygulanmış (a) ve uygulanmamış (b) numuneler için akım-gerilim eğrileri.....84                                   |
| Şekil 6.11 | (a) iki kat ZnO ile kaplı (b) ise üç katlı ZnO kaplı fotovoltaiik hücrenin karanlık-aydınlık akım-gerilim grafikleri.....85                                     |
| Şekil 6.12 | Aktif tabakasına sıcaklık uygulanan numuneye ait grafik.....85                                                                                                  |
| Şekil 6.13 | Au metal kontağına sahip hücrelerde aktif tabakaya sıcaklık uygulanan (a) ve uygulanmayan (b) hücreler için akım-gerilim grafiğı.....86                         |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|            | Sayfa                                                                                                            |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çizelge 1  | Enerji kaynaklarının eldesi-kullanımı, avantajları ve dezavantajları.....15                                      |
| Çizelge 2  | Enerji kaynaklarının eldesi-kullanımı, avantajları ve dezavantajları .....16                                     |
| Çizelge 3  | Yenilenebilir Enerji ve Kaynakları.....17                                                                        |
| Çizelge 4  | Biyokütle çevrim yöntemleri ve kullanım alanları.....19                                                          |
| Çizelge 5  | Rüzgar türbin çeşitlerinin kıyaslaması.....22                                                                    |
| Çizelge 6  | Güneş enerjisi doğrudan ve doğrudan olmayan kullanım alanları.....32                                             |
| Çizelge 7  | Üçüncü, dördüncü ve beşinci grup elementleri.....37                                                              |
| Çizelge 8  | Elemental ve bileşik yarı iletkenler.....38                                                                      |
| Çizelge 9  | P3HT:PCBM oranları.....72                                                                                        |
| Çizelge 10 | TiO <sub>2</sub> için farklı oranlarda hazırlanmış P3HT:PCBM tabakasının verime etkisi....88                     |
| Çizelge 11 | Farklı kalınlıktaki ZnO tabakalarının verime etkisi.....88                                                       |
| Çizelge 12 | Birinci yöntem ile hazırlanan TiO <sub>2</sub> için farklı P3HT ve PCBM oranları ve parametre değişimleri.....88 |
| Çizelge 13 | Birinci yöntem ile hazırlanmış TiO <sub>2</sub> için aktif tabakaya sıcaklık etkisi.....89                       |
| Çizelge 14 | İkinci yöntem ile hazırlanan TiO <sub>2</sub> için farklı P3HT ve PCBM oranları ve verim parametreleri.....89    |
| Çizelge 15 | Üçüncü yöntem ile hazırlanan TiO <sub>2</sub> için farklı P3HT oranları ve verim parametreleri.....90            |
| Çizelge 16 | İlk yöntem ile hazırlanmış ZnO için kompakt tabakaya sıcaklık etkisi.....90                                      |
| Çizelge 17 | İlk yöntem ile hazırlanmış olan ZnO' nun kalınlığının verime etkisi.....90                                       |
| Çizelge 18 | İlk yöntem ile hazırlanan ZnO için farklı metal kontak etkisi.....91                                             |
| Çizelge 19 | İkinci yöntemle hazırlanan ZnO için kompakt tabaka kalınlığı.....91                                              |
| Çizelge 20 | İkinci yöntemle hazırlanan ZnO için farklı metal kontak etkisi.....91                                            |

## ÖZET

### SOL-GEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ TİTANYUM OKSİT ( $\text{TiO}_x$ ) VE ÇİNKO OKSİT ( $\text{ZnO}$ ) KOMPAKT TABAKALARININ TERSİNE ÇEVİRİLMİŞ FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

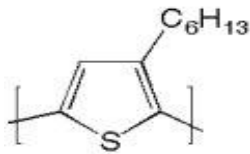
Ergül Meltem AKÇAY

Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Anabilim Dalı

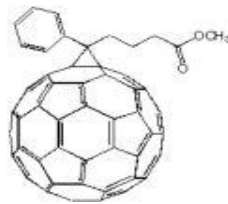
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serap GÜNEŞ

Bu tez çalışmasında, kimyasal yapıları şekil 1’de gösterilen p-tipli (elektron veren) poli(3-hekzil)tiyofen (P3HT) ve n-tipli (elektron alan) 1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6,6] $\text{C}_{61}$  (PCBM) fulleren türevi kullanılarak hazırlanan tersine çevrilmiş fotovoltaik hücreler için farklı sol-gel metotları yardımıyla elde edilen titanyum oksit ( $\text{TiO}_x$ ) ve çinko oksit ( $\text{ZnO}$ ) kompakt tabakaların verime etkisi araştırılmış, optimizasyon için sıcaklığın ve farklı elektrotların fotofiziksel özelliklere etkisi incelenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1. Tezde kullanılan (a) P3HT ve (b) PCBM’in kimyasal yapıları

**Anahtar Kelimeler:** organik fotovoltatik hücre, tersine çevrilmiş fotovoltatik hücre, sol-gel, optimizasyon

## ABSTRACT

### THE EXAMINATION OF THE SOL-GEL PREPARED TITANIUMOXIDE (TiO<sub>x</sub>) AND ZINCOXIDE (ZnO) COMPACT LAYERS ON THE EFFICIENCY OF INVERTED TYPE ORGANIC SOLAR CELLS

Ergül Meltem AKÇAY

Department of Physics

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serap GÜNEŞ

In this thesis, It's aimed to investigate the effects of the TiO<sub>x</sub> (titaniumoxide) and ZnO (zincoxide) compact layers on the efficiency of the inverted type organic solar cells which were prepared by using diffrent sol-gel methods. Organic photovoltaic solar cells are prepared by using (p) type (electron donor) poly(3-hexyl)thiophene (P3HT) and (n) type (electron acceptor) 1-(3-methoxycarbonyl) propil-1-fenil [6,6] C<sub>61</sub> (PCBM) fullerene derivative whose chemical structures are shown in Figure 1.

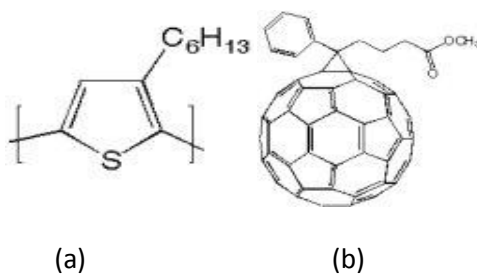


Figure 1. The chemical structure of (a) P3HT and (b) PCBM which are used in the thesis.

**Key words:** organic solar cells, inverted type organic solar cells, sol-gel method, optimization

#### 1.1 Literatür Özeti

Dünyada enerji ihtiyacı hızla artmaktadır. Enerji ihtiyacı bugün büyük oranda fosil yakıtlarla sağlanmaktadır. Petrol, kömür gibi yenilenemeyen enerji kaynakları tükenmeye yüz tutmuştur. Dünyanın artan enerji ihtiyacını karşılamak için bilim insanları yenilenebilen enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Bu kaynaklardan pek çok şekilde faydalanılabilir ancak temiz, ucuz ve devamlı olmasından dolayı güneş enerjisi daha caziptir. Güneş enerjisi havalandırma, aydınlatmada, sıcak su üretimi gibi pek çok değişik alanlarda kullanılır. Ancak en önemlisi fotovoltaik hücreler yardımıyla elektrik üretilmesidir. Fotovoltaik hücreler, üzerine gönderilen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen yarı iletken cihazlardır.

Fotovoltaik etki, ilk olarak 1839'da Fransız fizikçi A. Edmond Bequerel'in sıvıya batırılmış iki ayrı pirinç tabakasının ışık altında devamlı bir akım oluşturduğunu fark etmesiyle bulunmuştur. Bugün Bequerel'in bakır-bakıroksit ince film fotovoltaik hücre yaptığı bilinmektedir. Daha sonra 1870'ler de Willoughby Smith, W.G. Adams ve R.E. Day selenyum da fotovoltaik etkiyi keşfetti. Birkaç yıl sonra da Amerikalı C.E. Fritts amorf silisyumun üzerine şeffaf altın yaprak kaplayarak güneş ışığı altında devamlı, sabit ve yüksek akım elde edilebileceğini gösterdi. O zamanlar kuantum teorisi olmadığı için ışığın elektriğe çevrilebileceği düşünülmemekteydi. Fritts örnekleri Almanya'da bulunan ve devrinin en saygı değer elektrikçilerinden olan Werner Siemens'e gönderdi ve Siemens'de Fritts'in iddialarını doğruladı. Ancak o zaman ki hem amorf silisyum hücrelerin hem de ince film bakır oksit hücrelerinin verimi %1'in altındaydı.

Kuantum mekaniğinin keşfinden 75 yıl sonra, tek-kristal yarı iletkenlerin önemi anlaşıldı ve p-n eklem açıklandı. 1954'de Bell Laboratuvarlarında Chaplin ve arkadaşları tarafından silikon tek-kristal fotovoltaik hücre %6'lık bir verime ulaştı. Takip eden yıllarda bilim insanları silikon fotovoltaik hücrelerin verimini %15'e çıkarttılar. Bugün silikon fotovoltaik hücreler uzay araçlarında kullanılmak

üzere güç dönüşüm sistemlerinde kullanılmaktadır [1]. %20'nin üzerinde elde edilen verim tek kristal silikon fotovoltaik hücrelere aittir ancak silikon fotovoltaik hücrelerin üretim maliyetleri ve fabrika işlemleri sırasında harcanan enerji oldukça fazladır. Bu yüzden ucuz fotovoltaik hücre yapımına ilgi gittikçe artmıştır. Organik fotovoltaik hücreler esnek yüzeyler üzerine kaplanabildikleri, hafif oldukları, düşük maliyetle üretilebildikleri, değişik tipteki aygıtlara kolayca uygulanabildikleri ve özelliklerinin kimyasal sentez yoluyla kolayca değiştirilebilir olduğu için fotovoltaik teknolojisinde yeni bir alternatif olarak addedilebilir [2].

Alan Heeger, Alan McDiarmid ve Hideki Shirakawa'nın yalıtkan olarak bilinen polimerlerin iletken olabildiklerinin keşfiyle polimer güneş pilleri de gelişmeye başlamıştır. Bu keşif onlara 2000 yılında Nobel kimya ödülü kazandırmıştır. Organik güneş pilleri herikisi de organik olan donör (elektron veren) ve akseptör (elektron alan) malzemelerin birleştirilmesiyle oluşur. Organik fotovoltaik hücrelerin yapımında yaygın bir şekilde kullanılan polimerler genellikle kolayca oksitlenebilen p-tipli ve küçük molekül, simetrik küre şeklindeki n-tipli fullerene türevi polimerlerdir.

Organik fotovoltaik hücrelerin yapımında kullanılan malzemeleri vakum işlemine tabii malzemeler ve çözelti bazlı malzemeler olarak iki grupta toplayabiliriz. Vakum işlemine tabii malzemeler yüksek ısı gerektiren malzemelerdir ve küçük organik moleküller bu gruba örnek verilebilir. Çözelti bazlı malzemelere ise konguje polimerler örnek verilebilir. Konguje polimerler ard arda gelen tekli ve çiftli bağlardan oluşan yapılardır ve yüksek sıcaklıklara dayanamazlar çünkü kovalent bağlar ile birbirlerine bağlanırlar ve kovalent bağlar kuvvetli bağlar değildir, sıcaklık altında kolayca koparlar. Böylece polimer parçalanabilir veya bozulabilir. Organik malzemelere kazandırılan yan zincir fonksiyonelliği onların organik çözücülerde çözünmesini kolaylaştırır, bu tür malzemeleri kullanabilmek için kloroform, klorobenzen, toluen gibi organik çözücülerde çözmek gerekmektedir. Böylece çözelti bazlı malzemeler geniş yüzeylere dönel kaplama (spin coating), bıçak ağzı (doctor blading), püskürtmeli baskı (ink jet printing), elek baskı (screen printing) yöntemleriyle kolayca kaplanabilmektedirler. Organik yarı iletkenler ile hazırlanan ince filmler yüksek absorpsiyon katsayısına ( $> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) ve düşük dielektrik katsayısına ( $\epsilon \approx 3$ ) sahip olabilirler<sup>[3]</sup>. Böylece optoelektronik uygulamalar için iyi kromofor özellik gösterirler<sup>[4]</sup>. Literatürde en sık kullanılan çözelti bazlı malzemeler P3HT ve fulleren türevi olan PCBM'dir. Malzemelerle ilgili detaylı bilgi ileriki bölümlerde verilecektir.

Organik fotovoltaik hücrelerde genellikle kullanılan yapı organik ışık yayan diyotların (OLED) yapısına benzerdir. Bu iki yapı da sandviç geometrisinde hazırlanırlar[3ile aynı]. Normal tipte bir güneş pili ışığı geçiren metal alt elektrot (genellikle indiyum-kalay-oksit (ITO), florin katkılı kalay oksit ( $\text{SnO}_2\text{:F}$ )) üzerine polimer/fulleren karışımlarının kaplanması ve bunların da üzerine metal üst elektrotun (genellikle Al) buharlaştırılmasıyla (anot/polimer:fulleren karışımı/katot) hazırlanır. Ancak bu tipte hazırlanan fotovoltaik hücrelerde verim istenilen düzeyde değildir. Verimi arttırmak için çeşitli

geometriler denenmiştir. Bunlardan bir tanesi de geometrinin tersine çevrildiği tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücrelerdir. Tersine çevrilmiş güneş gözelerinde yapı katot/polimer:fulleren karışımı/anot olacak şekilde hazırlanır. Geometrinin tersine döndürölmesi hem verimi arttırmış hem de fotovoltaiik hücrelerin kararlılığını, yaşam ömrünü uzatmıştır. Bu yüzden tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücrelere ilgi artmış ve literatürde çokça araştırma yapılmıştır. Yapıyı tersine çevirmek yani ITO'yu katot haline getirmek için ITO'nun üzerine değişik kompakt tabakalar kaplanmıştır. Yine literatürde en sık rastlanan kompakt tabakalar  $TiO_x$  (titanyum oksit),  $ZnO$  (çinko oksit),  $CdSe$  (kadmiyum selenyum),  $CsCO_3$  (Sezyum Karbonat),  $CuInS_2$  (bakır-indium-kükürt), karbonnanotüplerdir. Bu tez çalışmasında kompakt tabakalardan  $ZnO$  ve  $TiO_2$  farklı sol-gel yöntemleriyle hazırlanmış ve fotovoltaiik hücrelerin verimine etkileri incelenmiştir.

$TiO_x$  için araştırmalar şu şekildedir:

Takayuki Kuwabara, Taketoshi Nakayama, Konosuke Uozumi, Takahiro Yamaguchi ve Kohshin Takahashi'nin yaptığı çalışmalarda; aktif tabaka olarak P3HT: PCBM kullanılmış, sol gel yöntemi ile hazırlanmış  $TiO_x$  ile yapılan tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücrelere kararlılık ölçölmüş ve verim standart koşullar altında % 2.47 olarak bulunmuştur [57].

D.W. Zhao, S.T.Tan, L.Ke, P.Liu, A.K.K.Kyaw, X.W.Sun, G.Q.Lo ve D.L.Kwong'un yaptığı çalışmalarda tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücreler için optimizasyon koşulları incelenmiştir [58].

Yongbing Long'un yaptığı çalışmada metal elektrot ve tabaka kalınlığının tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücre verimine etkisi incelenmiştir [59].

Xiaohong Chen, Jiaxiang Yang, Lim Yi Xuan Candy Haley, Jiong Lu, Furong Zhu ve Kian Ping Loh yayınladıkları makalede modifiye edilmiş  $TiO_2$  kullanarak tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücreler oluşturmuş ve verime etkilerini incelemişlerdir [60].

$ZnO$  için yapılan çalışmalar ise şu şekildedir:

Hye-Jeong Park, Kang-Hyuck Lee, Brijesh Kumar, Kyung-Sik Shin, Soon-Wook Jeong ve Sang-Woo Kim'in yaptığı çalışmada sol-gel metoduyla  $ZnO$  ince filmler hazırlanmış ve tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücreler yapılmıştır.  $ZnO$  için verim incelenmiştir. Aktif tabaka olarak P3HT-PCBM kullanılmıştır [61].

Yanming Sun , Jung Hwa Seo , Christopher J. Takacs , Jason Seiffter ve Alan J. Heeger'ın yayınladığı makalede elektron geçiren tabaka olarak düşük sıcaklıkta tavlanmış sol-gel yöntemiyle hazırlanmış  $ZnO$  filmler kullanılmış ve verimleri incelenmiştir [62].

## 1.2 Tezin Amacı

Enerjiye olan ihtiyaç günden güne artmaktadır ve 2030'da dünyanın yıllık toplam enerji kullanımının %1,8 artacağı ve yaklaşık olarak 18.49 TW olacağı tahmin edilmektedir. Bugün neredeyse bütün enerji ihtiyacı doğalgaz, kömür ve petrol gibi yanan fosillerden karşılanmaktadır. Hidroelektrik, jeotermal, rüzgâr, biyokütle, okyanus ve güneş gibi yenilenebilir enerji teknolojisindeki gelişmeler hızla artmaktadır ve böylece karbon salınımı yapan yenilenemeyen enerji kaynaklarına güçlü bir alternatif olmuşlardır. Her yıl Dünya'nın yüzeyine yaklaşık olarak 89.000 TW gücünde güneş ışığı çarpmaktadır. 2008 yılındaki enerji ihtiyacının 15TW olduğu göz önüne alınırsa sadece güneş enerjisi Dünya'nın enerji ihtiyacını karşılayabilir [5]. Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen fotovoltaiik hücreler güneş enerjisinden yararlanmamızı sağlar. Bu sebepten fotovoltaiik teknolojiye ilgi günden güne artmaktadır. Ancak silikonun pahalı olması ve işleme hazır hale getirirken oldukça pahalı süreçlerden geçmesi araştırmacıları daha ucuz fotovoltaiik malzeme arayışına götürmüştür. Bu da polimer fotovoltaiik hücrelerin büyük ilgi görmesini sağlamıştır. Polimer fotovoltaiik hücreler ucuza mal edilebilir, kolay işlenebilir, hafif ve esneklerdir. Aygıt üretimi için kullanılan aktif tabakalarının çözünürlüğü, sürekli basım teknikleri kullanılarak üretim yapılabilmesi polimer güneş pillerinin benzersiz özelliklerindendir.

İlk yapılan organik fotovoltaiik hücre iş fonksiyonları farklı iki metal elektrot arasına sandviç edilmiş organik aktif tabaka şeklindedir. Tek tabakalı aygıtların doğrultucu özelliği elektronun ve boşluğun sırasıyla moleküler  $\pi^*$  ve  $\pi$  orbitallerindeki asimetric enjeksiyonu ve p-tipli (boşluk ileten) organik tabaka ile düşük iş fonksiyonlu metal kontak arasındaki Schottky bariyeriyle – bu konu yarı iletkenler konusunda detaylıca anlatılacaktır - ilgilidir. Bu şekilde yapılan organik fotovoltaiik hücrede elde edilen verim %0,7' dir. Fotovoltaiik teknolojiideki bir sonraki gelişme ise iki katlı heteroeklem (bilayer heterojunction) fikrinin ortaya atılmasıyla başlar. İki katlı heteroeklem güneş pillerinde elektron ve boşluk geçirme özellikleri olan organik malzemeler yine iki metal elektrot arasına sandviç edilir. 1986 yılında Ching W. Tang iki organik malzemeyi ( p-tipi yarı iletken olarak phtalocyanine türevini, n-tipi yarı iletken olarak da perylene türevini ) saydam iletken oksit tabaka ve yarısaydam metal elektrot arasına sandviç ederek %1'lik bir verime ulaşmıştır. Hiramoto ve arkadaşları iki heteroeklem devreyle seri bağlı organik fotovoltaiik hücre ( tandem güneş pili ) yapısını geliştiren bir fikre öncülük etmişlerdir [6]. O günden bu güne kadar verimi arttırmak için farklı araştırma grupları arasında sürekli bir rekabet olmuştur. Bu rekabet yeni polimerlerin sentezlenmesine, farklı aygıt tiplerinin dizaynına, verimi arttırmak için yeni konseptlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Birkaç yıl öncesine kadar en yüksek verim %4 iken bugün verim yaklaşık %8'e ulaşmıştır. Bu da polimer güneş pili teknolojisinin ne kadar hızlı ilerlediğini ve umut verici olduğunu göstermektedir. Organik fotovoltaiik hücrelerin verimi arttıkça ticarileşmeye başlamıştır ve ilk olarak çanta ve el fenerlerinde kullanılarak satışa

sunulmuştur. Bugün ise Konarko firması organik güneş pilinden duvar perdesi ve organik gölgelik yaparak bu ürünleri piyasaya sürmüştür. Yakın zamandaki hedefi ise evlerde kullanılabilecek yarı saydam organik fotovoltaiik perde yapmaktır [7]. Polimer güneş pilleri konusunda oldukça başarılı olan Prof. Dr. Christoph Brabec yakın zamanda yayınladığı bir makalede fotovoltaiik hücrelerin ticarileşmesi için üç önemli faktörden bahsetmiştir: verim, yaşam ömrü (life time), birim fiyatı  $W_p$  (watt-peak,  $25^{\circ}C$ 'de  $1m^2$ 'lik güneş panelinin maksimum çıkış gücünü veren güç çıkış birimi) [8]. Bu üç parametre organik fotovoltaiiklerin ticarileşmesini önünde duran engeller olarak düşünülürse daha çok birinci parametre üzerinde durulmuştur yani çalışmalar verimi arttırmaya yönelik olmuştur. Yaşam ömrü, kararlılık üzerine yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Oysa kararlılık, yaşam ömrü oldukça önemli parametrelerdir. Polimer güneş pilleri çoğunlukla inert ortamlarda üretilmekte ve karakterize edilmektedir. Teknolojik uygulamaların çoğu çevresel koşullarda çalışma gerektirmektedir. Oysa organik malzemeler oksijene ve neme anorganik malzemelerden daha az dayanıklıdır. Bu sebepten polimer güneş pillerinin ömrünü uzatmak için üretim sonrası paketleme (enkapsülasyon) işlemi yapılır veya normal güneş pillerinin aygıt yapısı tersine çevrilerek de pilin ömrü uzatılabilir. Bu şekilde hazırlanan fotovoltaiik hücrelere tersine çevrilmiş organik fotovoltaiik hücre (inverted tipi) denilir. Normal tipte güneş pilinin yapısı anot/aktif tabaka/katot iken tersine çevrilmiş güneş pilinin geometrisi katot/aktif tabaka/anot şeklindedir. Böylece normal tipte kullanılan ve hava ortamında oksitlenen kararsız düşük iş fonksiyonlu metal elektrotları, tersine çevrilmiş tipte kullanılan hava ortamında kararlı ve yüksek iş fonksiyonlu metal elektrotla değişmiş olur. Bu da tersine çevrilmiş güneş pillerinin daha kararlı olmasını sağlamıştır. Bu tezin amacı polimer güneş pillerinin ticarileşmesinin önünde duran yaşam ömrü – kararlılık probleminin çözülmesi için günümüzde var olan normal tipteki güneş pillerinin yapısında değişiklik yaparak tersine çevrilmiş güneş pillerinin üretilmesi ve geliştirilmesidir. Bu tezde literatürde yaygın şekilde kullanılan iki kimyasal malzeme P3HT-PCBM kullanılmış ve çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü bünyesinde Doç. Dr. Serap GÜNEŞ tarafından kurulan Organik Elektronik Laboratuvarında tamamlanmıştır.

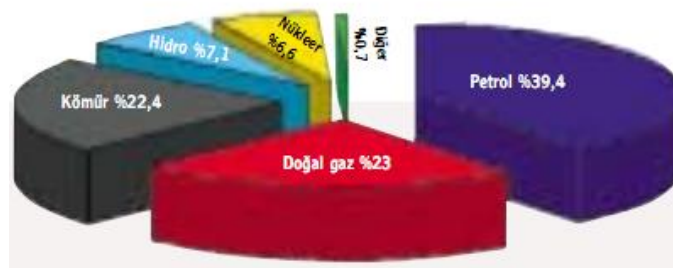
## 1.1 Hipotez

Yapılacak bu tez çalışmasında farklı kompakt tabakalar ( $TiO_2$  ve  $ZnO$ ), bu kompakt tabakaların farklı yöntemlerle hazırlanması, kompakt tabaka sayısı, aktif tabakanın konsantrasyon değişimi, p tipi yarı iletken etkisi, tabakalara sıcaklık uygulanması, metal kontak değişimi gibi parametreler organik fotovoltaiik hücrelerde verimi artırır ve literatürdeki değerlere ulaşabilir. Oluşturulan organik elektronik laboratuvarı koşulları ve hava ortamı göz önüne alındığında yaklaşık olarak %1,5-%2 civarında güç dönüşüm verimi elde edilir.

## BÖLÜM 2

### ENERJİ

Enerji, Eski Yunan dilindeki  $\epsilon\nu = aktif$  ve  $\epsilon\rho\gamma\omega\nu = iş$  kelimelerinden türetilmiştir. Kısaca bir cismin veya bir sistemin 'iş yapabilme yeteneği' olarak tanımlanabilir. Enerji doğrudan ölçülebilen bir değer değildir ve sistemin durumunu değiştirmek için gereken iş yoluyla enerji bulunabilir. Bu bağlamda işe dönüştürülebilen bir olgu olarak ele alınabilir ve sistemin ne kadar iş yapabileceğini belirleyen bir durum fonksiyonudur [9]. Dünyamızda mevcut enerji kaynakları 'birincil-ikincil' şeklinde sınıflandırılabilir. Başka enerji kaynaklarından elde edilen enerjiye ikincil enerji, edilmeyene de birincil enerji denilir. Örneğin fosil kaynaklardan olan kömür birincil enerji, kömürün yakılmasıyla elde edilen elektrik enerjisi ikincil enerjidir [10]. Ama elektrik su gücünden elde edilmişse birincil, fosil yakıtlardan elde edilmişse ikincil enerji sayılır. Özetle birincil enerji kaynakları fosil yakıtlar, hidro ve nükleere ek olarak 'diğer kaynaklar' yani jeotermal, güneş, rüzgâr ve biyokütle oluşturur.



Şekil 2.1 Birincil enerji kaynakları

Enerji kaynakları 'fosil', 'yeni' ve 'yenilenebilir' olarak üç başlık altında da toplanabilir. Fosil enerji kaynakları petrol, kömür ve doğalgazdır. Yakın zamanda gündeme gelmiş olan nükleer enerji, yakıt hücreleri ve hidrojen enerjisi yeni enerji kaynaklarındandır. Biyokütle, rüzgar, dalga, jeotermal, ve güneş enerji kaynakları ise yenilenebilir enerji kaynaklarını oluşturur [11].

## 2.1 Fosil Kaynaklar

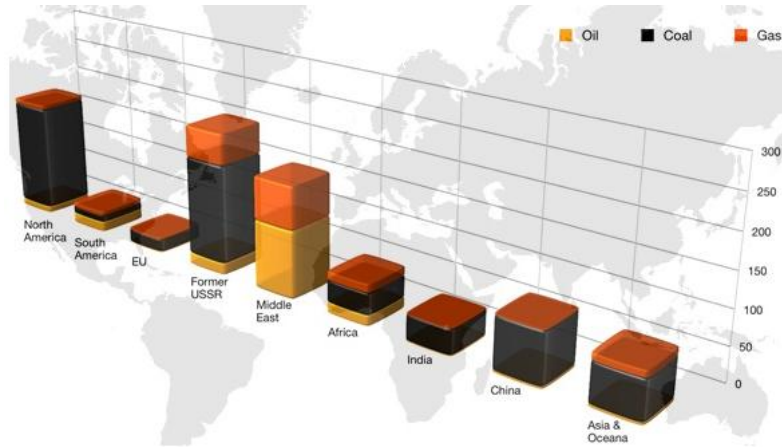
Fosil yakıtlar geri dönüşümü olmayan yani yenilenemeyen ve yakın zamanda tükenecek olan enerji kaynaklarıdır. Fosil yakıtlardan olan petrol Dünya'nın en önemli enerji ve endüstri hammadidesidir ve organik kurama göre, milyonlarca yıl önce yaşamış bitki ve hayvanların denizlerde biriken katmanlar altında ve oksijensiz bir ortamda yüksek basınç ve sıcaklık altında ayrışmasıyla oluşur. Petrol oldukça karmaşık bir hidrokarbondur ve içinde azot, oksijen ve kükürt bileşenlerini barındırır. Petrol katı, sıvı ve gaz halde bulunabilir. Katı veya yarı-katı durumunda bulunan petroler büyük molekül ağırlıklı hidrokarbon içerirler ve asfalt, zift, katran ya da bitüm adını alırlar. Sıvı halde bulunan petrole ham petrol denilir ve ticari açıdan önemli bir yere sahiptir. Ham petroler hafif (yüksek graviteli) ve ağır (düşük graviteli) petroler olarak ikiye ayrılabilir. Yüksek graviteli petroler rafine edildikten sonra çoğunlukla motorin, benzin ve gaz yağı şeklinde hafif ve beyaz ürünler olarak karşımıza çıkarken düşük graviteli ürünler fuel oil ve asfalt gibi ağır ve siyah ürünler olarak karşımıza çıkar. Doğalgaz ise metan ağırlıklı olmak üzere en hafif hidrokarbonları içerir [10].

Fosil yakıtların tüketimi sırasında zehir salınımı meydana gelir. Bu salınım Dünya'nın dengesinin bozulmasına ve ikliminin değişmesine neden olur. Gerçekten de fosil yakıt üretimi ve tüketimi sırasındaki her bir basamağın (sondaj, çekilme, işleme, nakledilme ve tüketim) hem insan hem de ekosistem üzerinde oldukça olumsuz etkileri vardır [12].



Şekil 2.2 Fosil yakıtlardan petrol, kömür ve doğalgaz

Dünyadaki petrol, kömür ve doğalgaz rezervlerinin dağılımları şu şekildedir:



Şekil 2.3 Dünyadaki fosil yakıtların dağılımı [13]

Petrol rezervleri;

%64 orta Doğu, %8 Kuzey Amerika, %8 Güney Amerika, %7 Avrupa, %7 Afrika ve %6 Asya.

Doğalgaz Rezervleri;

%39 Asya ( eski SSCB dahil olmak üzere), %35 Orta Doğu, %7'ser Güney Asya, Pasifik ve Afrika, %5 Kuzey Amerika, %5 Güney Amerika, %3 Avrupa [10].

Kömür Rezervleri;

%77,5 Asya ve Pasifik, %7,5 Afrika, %7,1 Avrupa, %5,4 Latin Amerika ve Karayip, %2,5 Kuzey Amerika [14].

Görüldüğü gibi fosil yakıtlar Dünya genelinde orantılı bir şekilde dağılmamışlardır. Bu da dönem dönem enerji krizlerine yol açmaktadır. Bunun bir sonucu olarak dünyadaki birçok ülke daha güvenilir daha çevre dostu ve kendi kaynakları çerçevesinde olduğu için çevreye duyarlı dost teknolojilere yönelmiştir.

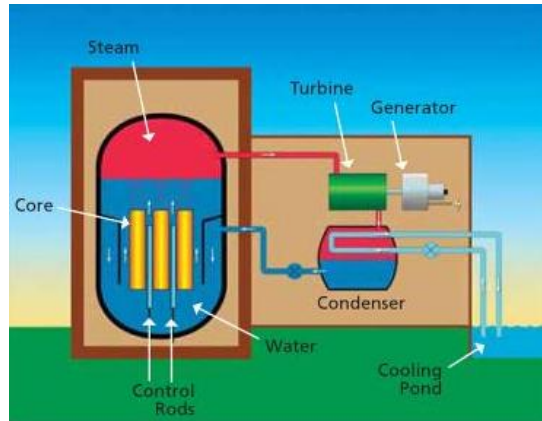
## 2.2 Yeni Kaynaklar

Fosil yakıtların kullanımı sırasında karbondioksit, metan gibi gazlar dünya yüzeyine gelip geri yansıyan güneş ışınların atmosferde tutulmasına neden olur. Dünya, üzerine düşen ışınlardan daha çok yansıyan ışınlarla ısınır. Fosil yakıt kullanımı atmosferdeki zehirli gaz miktarını arttırdığı ve yansıyan güneş ışınlarını tuttukları için dünya yüzeyinde ısınmaya yani sera etkisine sebep olurlar. Sera etkisiyle atmosferin sıcaklığının periyodik olarak artması da küresel ısınma olarak tanımlanır. Cenevre'de 16.02.2001 tarihinde açıklanan BM Çevre Raporu'na göre; bu yüzyılda atmosfer sıcaklığının 1,4 °C - 5,3°C arasında artacağı, buzulların eriyeceği dolayısıyla da deniz seviyesinin artacağı ve erimeye bağlı

olarak kutuplardaki bitki ve hayvan popülasyonunun/türlerinin etkileneceği, bazı bölgelerde yağış miktarının azalacağı, su sıkıntısının çekileceği, tropik kasırgaların artacağı, Kuzey Avrupa’da tarım alanlarının artarken Güney Avrupa’da kuraklığın baş göstereceği, Alp Dağları’ndaki buzulların eriyeceği, Latin Amerika’da kuraklığın artarken Kuzey Amerikanın tarıma elverişli hale geleceği, hastalıkların artacağı ön görülmüştür [15]. Küresel ısınmanın en büyük nedenlerinden biri olan karbondioksit salınımını azaltmak için bilim insanları yeni enerji kaynaklarına yönelmiştir. Yeni enerji kaynakları nükleer enerji, yakıt hücreleri ve hidrojen enerjisidir.

### 2.2.1 Nükleer Enerji

Nükleer enerji, çekirdekte meydana gelen reaksiyonlarla elektriğin üretildiği bir prosestir. İki şekilde reaksiyon meydana gelebilir; ilki iki çekirdeğin birleştirildiği füzyon reaksiyonu diğeri ise büyük bir çekirdeğin parçalanmasıyla meydana gelen fisyon reaksiyonudur. İki tip reaksiyonda da çıkan enerji ısıya dönüştürülebilir. Bu ısı enerjisiyle su buharlaştırılır ve tıpkı termik santrallerde olduğu gibi yüksek basınç altında türbine gönderilir. Türbin dönerken kendisine bağlı elektrik jeneratörünü döndürür ve elektrik üretilmesini sağlar. Bu şekilde nükleer enerji ile elektrik üretilmiş olur [16]. İlk ticari nükleer santral 1956 yılında İngiltere’de açıldı. 2008 yılına gelindiğinde Amerikada 104 nükleer reaktör vardır ve ülkenin elektrik ihtiyacının %20’sini karşılamaktadır.



Şekil 2.4 Şematik olarak bir nükleer santral

Nükleer enerji sera gazı üretmez ve atmosferde gaz kirliliği yapmaz. Fosil yakıtlarla kıyaslandığında nükleer santrallerden çevreye verilen gaz oldukça temizdir. Hatta öyle ki bazı görüşlere göre atmosferdeki sera gazı miktarını azaltmak için daha fazla nükleer santral inşa edilmeli. Ancak nükleer enerjinin küresel ısınmayı tetiklememesi onun tehlikesiz olduğu anlamına gelmez. Olası kazalarda etkileri binlerce yıl sürebilecek radyasyon sızıntılarına sebep olabilmektedir. Nükleer santralin tam merkezinde fisyon reaksiyonunun olduğu yerde reaktör bulunur. Bu reaktörün içinde çekirdek (core) adı verilen uranyum bulunmaktadır. Eğer reaktördeki uranyum kendi başına bırakılırsa zincirleme

reaksiyon kontrolden çıkar. Bu da reaktörün aşırı ısınmasına hatta erimesine neden olur. Böylece tehlikeli olan radyasyon havaya karışır. Bu olaya erime 'meltdown' denilir. Bilim insanları bu tür kazaları önlemek için Şekil 2.4 'de gösterilen kontrol borularını (control rods veya cooling rods) kullanırlar. Bu borularla reaktörün ısınması önlenir dolayısıyla da kontrolsüz zincirleme reaksiyonların önüne geçilmiş olur.

Uranyum nükleer enerji için yakıt görevi görür ancak uranyum da yenilenebilir değildir, gezegenimizde sınırlı miktarda uranyum mevcuttur. Ayrıca, uranyum radyoaktif bir elementtir ve radyasyon ciddi hastalıklara veya ölümlere neden olur. Nükleer reaktörler ufak tefek kazalar sonucu radioaktivite sızdırabilir ve çevresinde sağlık sorunlarına neden olabilir [17]. 1979 yılında ABD'denin Three Mile Island (TMI) nükleer santralindeki ünitelerden birinde soğutucu kaybı sonucu reaktör fazla ısınmış ve çekirdek (core) erimiş, çevreye radyasyon salmıştır. Benzer bir kaza 1986'da Çernobil'de meydana gelmiş bu seferki kaza kontrol altına alınamamıştır. Oluşan radyasyon bulutu ülkemiz dahil Avrupa üzerinde yağmurla birlikte besin zincirine karışmıştı ve bölgede pek çok insan radyasyona maruz kalıp kanser riski altına girmiştir. 2011 yılında Japonya'da mart ayında yaşanan 9.0 büyüklüğündeki deprem ve hemen ardından gelen tsunami Fukushima Daiçi nükleer santralindeki 6 reaktörden 3'üne büyük zarar vermiştir. Sızan radyasyon nedeniyle santralin etrafındaki bölgede yaşayanlar evlerini terk etmek zorunda kalmışlardır.

Bu ve benzeri kazalar nükleer endüstrisine ağır zarar vermiş, kamoyunun nükleer enerjiye karşı güveni sarsılmıştır.

### 2.2.2 Yakıt Hücreleri

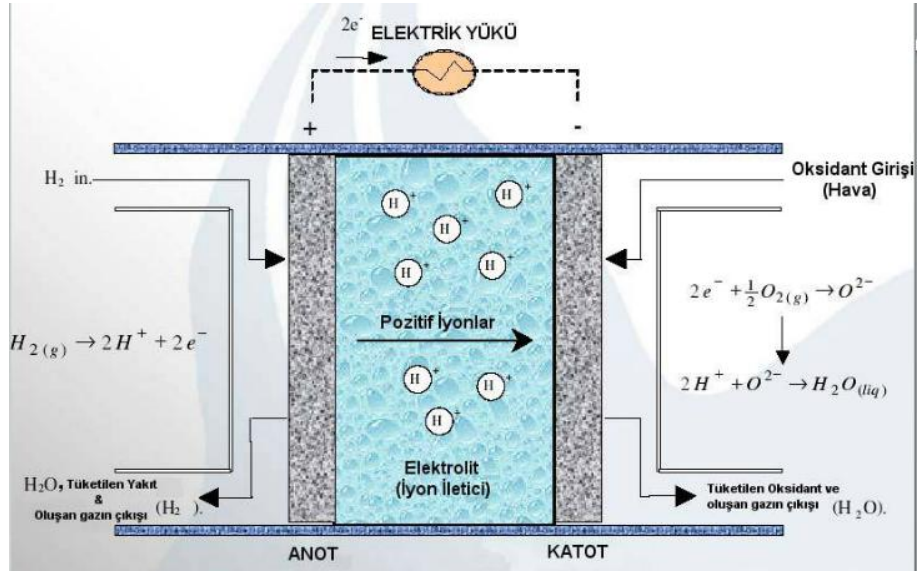
Yakıt hücreleri yanma ve herhangi bir ara eleman olmaksızın giren yakıtın kimyasal enerjisini elektrik ve ısı enerjisine çevirebilen aygıtlardır (Şekil 2.5) . Başka bir deyişle bir yakıtın ( hidrojen zengini gaz karışımından gelen Hidrojen) ve bir oksitleyicinin (havadaki oksijen) kimyasal enerjisini doğrudan doğru akıma (DC) dönüştürebilen bir teknolojidir.



Şekil 2.5 Yakıt hücresi [18]

Yakıt pillerinin yapısı iki ince elektrot ve bunların arasına sıkıştırılmış bir elektrottan oluşur ve elektroliz olayının tam tersi bir şekilde çalışır. Anota gelen yakıt iyonlarına ve elektronlarına ayrılır,

iyonlar elektrolitten geçip katoda ulaşır. Burada oksijenle birleşip su buharı oluşturur. Elektronlar ise bir elektrik devresi üzerinden DC/AC dönüştürücüsüne yada DC motoruna gönderilir. Pil gibi çalışırlar ancak devamlı bir yakıta ihtiyaç vardır bunu da Hidrojen ile karşılarlar [19].



Şekil 2.6 Yakıt hücrelerinin genel gösterimi

Elektrolit çözünmüş gazların ve iyonik yüklerin elektrotlar arasında taşındığı ortamdır ve sıvı, nemli katı polimerler veya eriyikler elektrolit olarak kullanılabilir.

Elektrot olarak gözenekli gaz elektrotlar kullanılır çünkü rekasiyonun hızı yüzey alanıyla orantılıdır ve gözenekli gaz elektrotlarının yüzey alanları büyüktür böylece daha yüksek akım yoğunluğu elde edilir [19].

Çalışma prensibi ise aynı kimyasal pillere benzer. Anottan sisteme giren Hidrojen burada proton (iyonize hidrojen,  $H^+$ ) ve elektron ( $e^-$ ) olarak ayrışır. Elektrolit protonları katoda sürüklerken elektronlar da negatif yüklü anottan pozitif yüklü katoda doğru sürüklenir ve böylece elektrik akımı oluşur. Oksitleyici olarak kullanılan oksijen ise katottan devreye girer. Katotta devrini tamamlayan elektron ve proton ile birleşen oksijen su buharı oluşturur. Eğer yakıt olarak saf hidrojen yerine dizel, metanol veya kimyasal hidritler kullanılırsa katotta su buharı yerine  $CO_2$  oluşur [18]. Genellikle Hidrojen kullanılmasının nedeni uygun katalizör kullanıldığında çok çabuk reaksiyona girmesidir. Oksijenin oksitleyici olarak kullanılmasının nedeni ise ucuz ve havadan elde edilebilir olmasıdır [19].

Diğer kimyasal piller gibi çalışmalarına rağmen onlardan farklılık gösterirler. Bilinen piller enerji depolarlar ve verebilecekleri maksimum enerji depoladıkları kimyasalların miktarı kadardır.

Dolayısıyla kimyasalların reaksiyonu bitince pilin de ömrü bitmektedir. Oysa yakıt pillerinde ise yakıt ve oksitleyici beslendiği sürece pil elektrik üretmeye devam eder.

Yakıt pillerinin oldukça geniş kullanım alanları vardır. Bunlardan bazıları; elektrik santralleri (fabrikalarda yüksek miktarda enerji üretmek için), konutlar, vasıtalar (araba, otobüs, tren, kamyon..), cep telefonu, el feneri, su artıma tesisleri, uçaklar ve uzay araçlarıdır.

Yakıt hücreleri (pilleri) pek çok alanda kullanıma sahip olmasına rağmen geleceğin alternatif enerji kaynağı olarak görülmemelidir. Çünkü yakıt hücreleri yeni bir teknoloji olmakla birlikte yakıt hücrelerinin araştırılması ve üretimi oldukça pahalıdır. Ayrıca bazı yakıt türlerinin (Hidrojen, metanol..gibi) dağıtım alt yapısı mevcut değildir [19]. Kullanılan yakıta göre atık madde olarak CO<sub>2</sub> (karbondioksit) salınımı yapabilir. Ömürleri pili oluşturan bileşenlere bağlıdır, bu da işletim ömrünü sınırlandırır. Yukarıda da bahsedildiği gibi Dünya'nın enerji ihtiyacına alternatif pahalı ve bazı durumlarda atmosfere karbondioksit veren bir enerji kaynağı olamaz. Bu tür dezavantajlar bilim insanlarını yakıt pillerinin yerine kullanılabilecek çevre dostu ve ucuz başka çözümler bulmaya yönlendirmiştir.

### 2.2.3 Hidrojen Enerjisi

Bilindiği en basit atom Hidrojen atomudur. Evrende bulunan atomların yaklaşık %90'ını oluşturan Hidrojen fosil yakıtlarında büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Hidrojenden enerji elde etmek kolaydır çünkü diğer atomlarla özellikle oksijenle elektron alışverişi sonucu kimyasal bağ yapar ve enerji açığa çıkartır. Ancak bunun olabilmesi için hidrojenin serbest halde bulunması lazım ancak hidrojen doğada serbest halde bulunmaz ve hidrojeni saflaştırma işlemi, açığa çıkarttığı enerji miktarından daha fazla enerji gerektirir. Bu bağlamda hidrojen aslında yeni bir enerji türü değildir sadece enerji taşıyıcı olarak görülmelidir.

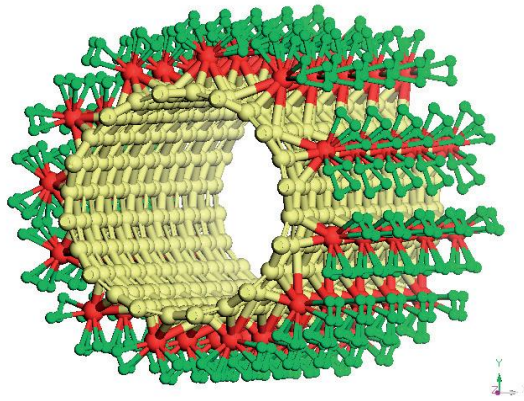
Hidrojenden enerji elde etmek için 3 önemli basamak vardır.

1. *Hidrojeni saflaştırmak*: hidrojen pek çok şekilde saflaştırılabilir. En çok hidrojen üreten mekanizma aslında doğadır. Mesela bitkiler fotosentez yoluyla CO<sub>2</sub> ve suyu hidrojen ve oksijene dönüştürmektedirler. Bitkiler dışında bazı tek hücreli organizmalar ve bakteriler de bazı enzimler vasıtasıyla hidrojen elde etmektedirler. Bunun dışında nanometre boyutunda metal-oksit topraklarının da suyu ayrıştırabilme veya elektron ve protondan hidrojen molekülü oluşturabilme özelliği vardır.

Günümüzde hidrojen doğal gazın işlenmesiyle elde edilmektedir. Ancak bu yöntem hem pahalı hemde dışarıya zehirli gaz salınımı yaparak çevre kirliliğine sebep olan bir yöntemdir. Aynı şekilde kömürden de hidrojen elde edilebilir ama benzer sorunlar mevcuttur.

Daha temiz bir şekilde hidrojen elde etmek için güneş enerjisinden yararlanılabilir. Güneş enerjisi güneş panelleri sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Elde edilen elektrik enerjisi de elektrolizde kullanılabilir. Elektrolizde suyu ayrıştırarak hidrojen ve oksijen molekülleri elde edilebilir. Ancak gerekli olan güneş panelleri oldukça pahalıdır, bu bağlamda düşük maliyetli organik güneş pillerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Sonuçta hidrojen bugünkü teknoloji ile ne maliyet ne de üretim konusunda diğer enerji türleriyle yarışamayacak düzeydedir.

2. *Hidrojeni depolamak ve transfer etmek:* Hidrojen basınçlı tüplerde gaz halinde veya sıvılaştırılarak depolanabilir. Ancak bu tür depolamalar pratik uygulamalar için pek emniyetli değildir. Başka depolama türü ise hidrojenin Li (lityum), C (karbon) veya N (azot) gibi hafif elementlerle birleştirilerek taşınmasıdır. Hidrojen bu elementlerle bağ yaptığında çevrimi yavaşlamaktadır. Hidrojenin yaptığı zayıf bağlar ve yüzeylere soğrulmasıyla hızlı kinetik ve düşük difüzyon mesafesi sağlanır bu da çevrimin hızlı olmasını sağlar. Bu koşulları sağlamak için karbon nano tüp halatları,  $C_{60}$ , grafit, polimerler, atom topakları ve MOF (metal organik karkas) gibi yüzeyin hacme oranının yüksek olduğu yapılar tercih edilmelidir. Bu yapılar katkı atomlarıyla işlevsel hale getirilerek hidrojen tutma kapasiteleri artırılır. Mesela karbon nanotüp üzerine soğrulan her bir V (vanadyum) atomu 5  $H_2$  molekülü tutabilmektedir. V- $H_2$  zayıf bağ oluşturduğundan oda sıcaklığında bağ kırılıp Hidrojeni serbest bırakabilmektedir.



Şekil 2.7 Titanyum ile katkılanmış karbon nanotüp. Her titanyum atomu 4  $H_2$  molekülü tutmaktadır. Sarı,kırmızı ve yeşil renkler sırasıyla karbon,titanyum ve Hidrojen atomlarını temsil etmektedir.

3. *Hidrojenden enerji elde etmek:* Serbest haldeki hidrojen doğrudan yakılarak ısı enerjisi elde edilebilir. Isı enerjisi de tıpkı termik santrallerde olduğu gibi elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bir başka yolda motorlarda yakıt olarak kullanılmaktadır ancak yakıt hücreleri varken hidrojenin kullanılması ekonomik değildir [19].

Hidrojene geleceğin enerjisi gözüyle bakmak bu şartlar altında pek mümkün değildir. Doğada serbest halde bulunmaması enerji kullanımı açısından hidrojenin en büyük dezavantajıdır. Serbest hale getirmek için kullanılan yöntemlerin maliyeti oldukça yüksektir. En ucuz şekilde hidrojen, güneş enerjisinden yararlanarak elde edilebilir. Güneş panelleri yardımıyla ışığın elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu elektrikle de suyun elektroliz olayının gerçekleşmesi gerekmektedir. Böylece hidrojen serbest hale getirilebilir. Panellerin organik güneş pillerinden yapılması maliyeti düşürmektedir. Açık bir şekilde görülmektedir ki organik güneş pillerindeki gelişmeler hidrojen enerjisinin kullanılmasının da önünü açacaktır.

Çizelge 1 Fosil yakıtlar ve yeni enerjilerin nasıl elde edildiği, avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir.

Çizelge 1 Enerji kaynaklarının eldesi-kullanımı, avantajları ve dezavantajları

| <b>Yakıt Adı</b>      | <b>Elde ediliş ve bulunuş şekli</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Avantajları</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>Dezavantajları</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Kömür</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fosil bitkilerden elde edilir ve çeşitli organik ve karbon içerir ayrıca bazı inorganik bileşiklerden elde edilir.</li> <li>Dünya'daki kayaların arasında sıkışmış tabakalarda maden şeklinde bulunur.</li> <li>Isı ve elektrik için yakılır.</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hazır halde bulunur,işleme tabi tutulmaz.</li> <li>Elektriğe çevrilmesi diğer kaynaklara göre ucuzdur.</li> <li>Kömür kaynakları diğer kaynaklara göre daha fazladır.</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kömür yandığı zaman sera etkisi yaratacak gazları atmosfere vererek atmosferin kirlenmesine neden olur.</li> </ul>                                                                                                                                                                       |
| <b>Fosil Yakıtlar</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fosilleşmiş hayvanlardan karbon bazlı sıvı şeklinde elde edilir.</li> <li>Yakıt göletleri de Dünya' daki kayalıkların arasında bulunur.</li> <li>Rezervuara gönderilen boruların pompalanmasıyla yakıt dışarı çıkartılır.</li> <li>Ulaşım ve endüstride oldukça sık kullanılır.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hazır şekilde bulunurlar.</li> <li>Kuyudan çıkartılması ve enerjiye dönüştürülmesi görece daha ucuzdur.</li> </ul>                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Yandığında atmosferde sera etkisi yaratacak gazlar salar ve atmosferin kirlenmesine yol açar.</li> <li>Sınırlı bir kaynaktır daimi değildir.</li> </ul>                                                                                                                                  |
| <b>Doğaz Gaz</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dünya yüzeyinin altındaki kayalarda hapsedilmiş metan ve diğer gazlardan elde edilir.</li> <li>Dünya'nın yüzeyinden içeri doğru boruların gönderilmesiyle gaz dışarı çıkartılır.</li> <li>Isınma ve evde kullanılır.</li> </ul>                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gazda diğer yakıtlar gibi hazır halde bulunur.</li> <li>Enerjiye dönüştürülmesi görece ucuzdur.</li> </ul>                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Doğal gaz da yandığında atmosfer kirliliğine neden olur.</li> <li>Sınırlı bir kaynaktır, tükenebilir.</li> </ul>                                                                                                                                                                         |
| <b>Nükleer Enerji</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Uranyum gibi radyoaktif elementlerden elde edilir.</li> <li>Nükleer reaktörlerde bu tür elementlerin parçalanmasıyla (nükleer fizyon) çıkan enerjiyle elektrik üretilir.</li> </ul>                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Radyoaktif elementlerin çok küçük bir miktarıyla bile çok fazla enerji üretilebilir.</li> <li>Ham madde ucuzdur ve uzun süre kullanılabilir.</li> <li>Atmosferin kirlenmesine neden olmaz.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Nükleer reaktörler pahalıdır.</li> <li>Nükleer atıklar oldukça zehirlidir ve yüzlerce veya binlerce yıl güzevli bir şekilde saklanmaları gerekir ki saklanmaları oldukça pahalıdır.</li> <li>Olası bir nükleer sızıntının insanlar ve çevre üzerinde korkunç etkileri vardır.</li> </ul> |
| <b>Odun Enerjisi</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ağaçtan elde edilir. Yakılarak sıcaklık ve ışık için kullanılır.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Enerjiye dönüşebilen en ucuz kaynaktır.</li> <li>Eğer kesilen ağaçların yerine yeniden ağaçlandırma yapılırsa uzun süreli enerji kaynağı olabilir.</li> </ul>                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Yakılması durumunda atmosferde sera etkisi yapan zehirli gazların salınmasına böylece atmosferin kirlenmesine neden olmaktadır.</li> <li>Yeniden ağaçlandırma yapılmazsa odunda yenilenemeyen kaynaklar arasına girecektir.</li> </ul>                                                   |

Çizelge 2 Fosil yakıtların tahmini kalan kullanım süreleri [22]

| <i><b>Fosil Yakıtlar</b></i> | <i><b>Kalan Süre</b></i> |
|------------------------------|--------------------------|
| Petrol                       | 50 Yıl                   |
| Doğal Gaz                    | 70 Yıl                   |
| Kömür                        | 250 Yıl                  |

### 2.3 Yenilenebilir Kaynaklar

İklim değişikliği son zamanlarda oldukça sık duyulan bir kelimedir. Oysa Dünya varolduğundan beri iklim değişmeye devam etmektedir. Bilim insanlarını alarma geçiren durum iklimin değişmesi değil değişme hızıdır. Dünya hızla ısınmaktadır ve belkide Dünya'yı tehdit eden en önemli olgu iklim değişikliğidir. İklim değişikliği Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) tarafından 'karşılaştırılabilir zaman periyodu içinde doğrudan veya dolaylı olarak insan faaliyetlerinin sonucu olarak global atmosferdeki bileşenlerde meydana gelen değişim' olarak tanımlanmıştır<sup>[20]</sup>. Genel olarak iklim değişikliği atmosferdeki sera gazlarının (GHG, greenhouse gases) konsantrasyonundaki değişimle alakalı bir problemdir, su buharı, karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), nitrojen dioksit (N<sub>2</sub>O) ve kloroflorokarbonlar (CFC) sera gazlarına örnektir ve bu gazlar Dünya'nın yüzeyinden infrared (kızılötesi) radyasyonu tuzaklar ve böylece sera etkisine neden olurlar. Su buharı ve karbon dioksit sera etkisine neden olan en önemli iki gazdır. Metan, azot oksit, ozon, sülfür heksaflorit diğer sera gazlarıdır ancak bu gazlar su buharı ve karbon dioksit kadar sera etkisinde etkili değildir çünkü atmosferdeki oranları düşüktür.

Fosil yakıt tüketimi, ormanların yok edilmesi ve bazı endüstriyel süreçler gibi insan faaliyetleri, CO<sub>2</sub> gazı ( iklim değişikliğine neden olan en önemli gaz) ve diğer sera gazlarının atmosferdeki miktarını arttırmakta bu da hava sıcaklığını yükselmesine, buzulların erimesine dolayısıyla da deniz seviyesinin yükselmesine yol açmaktadır.

1850 yılından beri Dünya'nın sıcaklığı 0,76 °C artmıştır. Tahminler 2100 yılında Dünya'nın yüzey sıcaklığının 1,8-4,0 °C hatta 6,4 °C artacağı yönündedir [21]. İklim değişimindeki bu hızlı ilerleyiş Dünyadaki en önemli çevresel, ekonomik ve sosyal tehdittir. Bu soruna çözüm olarak bilim insanları atmosferdeki sera gazları miktarını arttırmayan, düşük maliyetli ve çevreye zarar vermeyen temiz enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Temiz enerji kaynakları kendi kendine yenilenebilirler bu yüzden bu kaynaklara yenilenebilir enerji kaynakları da denilir ve su, rüzgar, jeotermal, biyokütle, hidrolojik

ve güneş enerjisi başlıca temiz enerji kaynaklarındandır. Aşağıdaki tabloda temiz enerjiler ve kaynakları gösterilmiştir.

Çizelge 3 Yenilenebilir Enerji ve Kaynakları [23]

| <b><i>Yenilenebilir Enerji Kaynakları</i></b> | <b><i>Kaynak veya Yakıtı</i></b> |
|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| Biyokütle Enerjisi                            | Biyolojik Atıklar                |
| Rüzgar Enerjisi                               | Rüzgar                           |
| Dalga Enerji                                  | Okyanus ve Denizler              |
| Jeotermal Enerjisi                            | Yeraltı Suları                   |
| Hidrolojik Enerji                             | Nehirler                         |
| Güneş Enerjisi                                | Güneş                            |

### 2.3.1 Biyokütle Enerjisi

Atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarının artması sonucunda meydana gelen ısınma daha şimdiden Dünya yüzeyindeki donmuş olan herşeyi eritmeye, mevsim ve yağış dağılımlarını değiştirmeye ve deniz seviyelerini yükseltmeye başlamıştır. Şuan var olan ısınma durdurulamaz çünkü ısı, atmosferdeki etkisini göstermeden önce belli bir zaman geçiyor. Diğer bir değişle küresel ısınmayı durduramayız. Yapılması gereken ise bir felaketle karşılaşmadan atmosferdeki sera etkisi yaratacak gazların miktarını daha fazla arttırmadan (en az %50 azaltarak) enerji ihtiyacını daha temiz yollardan elde etmektir [26].

Biyokütle yenilenebilir enerjinin en eski formudur. Hayvan ve bitki gibi organik canlılar bu enerjinin en temel kaynağını oluşturur. Su, karbon dioksit ve güneş enerjisini kullanarak en göze çarpan biyokütle kaynağı bitkilerdir. Bitkiler doğrudan fotosentez yoluyla biyokütle üretebilirler [27]. Fotosentez yoluyla enerji kaynağı olan organik maddeler sentezlenirken tüm canlıların solumu için ihtiyaç duydukları oksijen de atmosfere salınmış olur. Üretilen organik maddelerin yakılması sonucunda ortaya karbon dioksit çıkar.

Biyokütle enerjisini odun ve hayvan atıklarının yakılmasıyla veya ağaç endüstrisi atıklarının yakılmasıyla elde edilen bio-dizel, atanol gibi çeşitli yakıtlardan elde edebiliriz. Fosil yakıtlardan farkı içinde kansorejen veya kükürt gibi zararlı maddeler olmadığı için yakıldığında çevreye fosil yakıtlara

oranla daha az zarar verir. Karbon dioksit, su ve güneş ışığıyla bitkilerin madde sentezlemesine fotosentez denilir. Karbondioksit özümsemesi de denilen bu olay genellikle kloroplastta meydana gelir. Her bir kilogram yeşil yapraktan ortalama 1 saatte 3 litre oksijen üretilmektedir. İklim kuşağındaki bir büyük ağaç yetişkin bir insanın hayatı boyunca kullanabileceği oksijeni ancak karşılamaktadır.

Bir yıl boyunca Dünya yüzeyine düşen güneş ışığı yaklaşık olarak  $1,5 \cdot 10^{18}$  kWh/yıl kadardır. Bu enerjinin ise yaklaşık % 0,1 kadarı fotosentez olayı ile biyokütleyle dönüştürülerek depolanmaktadır.

#### *Biyokütle Elde Edilme Yöntemleri:*

Biyokütleyi enerjiye çevirmek için pek çok yöntem kullanılabilir ancak en yaygın olanları yakma, alkol fermentasyonu, piroliz ve havasız çürüme yöntemleridir.

##### *Yakma Yöntemi;*

Biyokütlenin doğrudan yakılarak enerji elde edildiği bu yöntem en basit yöntemdir. Ateşle yakıldığında biyokütle etrafına ısı verir. Bu da elektrik üreten türbinlerin dönmesine dolayısıyla da elektrik üretilmesini sağlar. Ancak biyokütlenin bu şekilde yanması ciddi ölçüde çevre kirliliğine neden olmaktadır. Atmosfere salınan karbondioksit gazı ise sera etkisi denilen etkisi yaratır ki bu da küresel ısınmayı hızlandıran bir süreçtir.

##### *Alkol Fermentasyon Yöntemi;*

Alkol fermentasyon yönteminde organik maddedeki nişasta sıcaklık yardımıyla şekere çevrilir. Bu şeker mayayla fermente olur. Etil alkol veya tahıl alkolü olarak da bilinen ethanol oluşur ve damıtılır daha sonra da diğer yakıtlarla birleştirilir. Son ürün olarak gazohol denilen alkollü benzindir. Biyokütleyi enerjiye çeviren bu yöntem fosil yakıt kullanımını gerektirdiği için verimsizdir.

##### *Havasız Çürüme Yöntemi;*

Havasız çürme yöntemi oksijensiz ortamda yaşayabilen bakteriler tarafından gerçekleştirilebilen bir yöntemdir. Havasız ortamda bakteriler doğalgazı oluşturan ana bileşik olan metan gazı, karbon dioksit ve hidrojen üretirler.

Bu yöntemde genellikle hayvan, tarım ve bazı bitki atıkları kullanılır. Havasız çürümeyle elde edilen ürün biyogaz olarak bilinen %55-75 metan gazı ile %25-45 karbon dioksit gazından oluşan gazdır. Atıkların enerjiye dönüştürülmesi anlamında %60- %70 verimlilikle çalışan bir yöntemdir ancak pahalıdır.

##### *Piroliz Yöntemi;*

Piroliz biyokütleden gaz elde etmek için kullanına en eski yöntemlerden biridir. Oksijensiz ortamda odunun 1000 °F'a kadar ısıtılması sonucu ısıl değerleri yüksek olan hidrojen ve metan gazları, katran, organik bileşikler (petrolde olduğu gibi bu organik maddelere de petro-kimyasal adı verilir), su ve odun kömürü gibi maddeler elde edilir. Bu yöntemin en önemli avantajı proses sonucunda karbondioksit oluşmamasıyken dezavantajı yüksek sıcaklığa çıkılırken çok miktarda enerji harcanmasıdır.

Yukarıda anlatılan yöntemler en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Bunların dışında da yöntemler mevcuttur. Aşağıdaki tabloda bu yöntemler, açığa çıkan gazlar ve kullanım alanları özet halinde verilmiştir [29].

Çizelge 4 Biyokütle çevrim yöntemleri ve kullanım alanları

| <b>kütle</b>  | <b>im Yöntemi</b> | <b>tlar</b> | <b>ılama Alanları</b> |
|---------------|-------------------|-------------|-----------------------|
| an Artıkları  | sız Çürüme        | gaz         | rik Üretimi           |
| n Artıkları   | iz                | ol          | na                    |
| ji Bitkileri  | na                | ojen        | ıtma                  |
| ansal Atıklar | Fermantasyon      | an          | nobiller              |
| nik Çöpler    | aştırma           | anol        | lar                   |
| r             | oliz              | etik Yağ    | tlar                  |
| ji Ormanları  | fotoliz           |             | Kurutma               |

Yukarıda özetlendiği gibi biyokütleden enerji elde etmek pahalı ve çevreye zararlıdır. Bu sebepten biyokütle ucuz ve çevre dostu yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülemez.

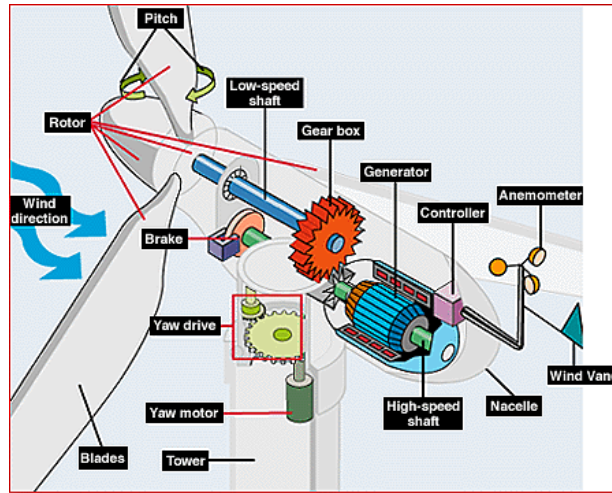
### 2.3.2 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar, atmosferdeki havanın Dünya yüzeyine yakın, yatay hareketidir [24]. Hava hareketi Dünya ikliminin önemli bir özelliğidir ve Güneş'den kaynaklanan ısı enerjisinin bir sonucudur. Güneş Dünya'nın her yerini aynı oranda ısıtmaz bu da dünyamızı çevreleyen havayı etkiler. Soğuk hava ağır ve alt kısımda bulunurken sıcak hava hafif ve üstte bulunur. Sıcak hava yukarı doğru çıkarken soğuk

havaýı aşıyağıya iter bu harekette rüzgarı oluşturur [31]. Rüzgar enerjisiyle hedeflenen atmosferdeki ısınma farklılıklarının yol açtığı hava hareketlerindeki kinetik enerjiyi rüzgar türbinleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürmektir.

Rüzgar türbinleri çalışırken çevreye diğer enerji kaynakları gibi gaz emisyonuna neden olmazlar için iklim değişikliğine sebep olmazlar. Diğer güç santrallerinin aksine, yakıt maliyetleri ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerinin eleyen her zaman kullanılabilecek olan yerli bir enerji kaynağıdır. Ancak rüzgar türbinlerinin büyük alanlar işgal etmesi ve üretilen elektriğin kalite sorunu rüzgar enerjisinin önemli dezavantajlarından [32].

Rüzgar enerjisi yada rüzgar gücü, rüzgar ile üretilen mekanik güce yada elektriğe göre adlandırılır. Rüzgar türbinleri rüzgardaki kinetik enerjiyi mekanik güce dönüştürürler. Bu mekanik güç tahlıl öğütme, su pompalamak gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir yada bir jeneratör yardımıyla elektriğe dönüştürülebilir [33].

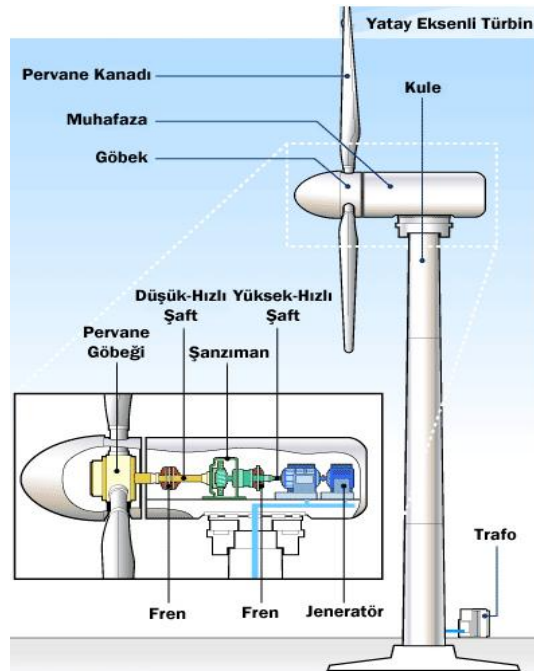


Şekil 2.8 Rüzgar türbinin içi kısmı

Yukarıda ki tabloda bir rüzgardan elektrik üreten bir rüzgar türbinin içi kısmı gösterilmiştir.

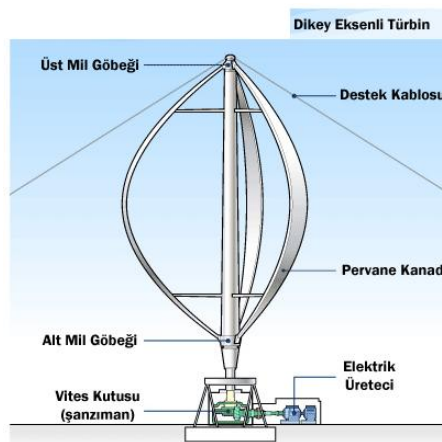
Rüzgar Türbini Çeşitleri

1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri; Bu türbinler pervanesinin dönme eksenini rüzgar yönüne paralel ve kanatlar rüzgar yönüne diktir. Kanat sayısı azaldıkça pervane daha hızlı döner. Yaklaşık %45 verime sahiptirler. Ortalama olarak yerden 20-30 m yükseklikte inşa edilirler.



Şekil 2.9 Dikey eksenli bir rüzgar türbini ve türbinin iç kısmı gösterilmiştir [33].

2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri; Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey ve kanatlar rüzgar yönüne düşeydir. Her yönden esen rüzgar ile pervaneler dönebilir. Verim yaklaşık %35 civarındadır. Bu sistemlerde üreteç ve vites kutusu yere yakın kurulduğundan kuleye ihtiyaç yoktur. Elde edilen enerji miktarı az olduğundan su pompalamada kullanılırlar. Kanat sayısı azdır, artırılması durumunda ise ağırlık artacağından çalışma verimini düşürür.



Şekil 2.10 Dikey eksenli rüzgar türbini gösterilmiştir [33].

3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri; Kanat ile dönme eksenleri arasında açı bulunan rüzgar türbinleridir.

Aşağıdaki tabloda rüzgar türbinleri kıyaslanarak gösterilmiştir.

Çizelge 5 Rüzgar türbin çeşitlerinin kıyaslaması

|                    | <b>Yatay Eksenli Rüzgar Türbini</b> |         |         |         | <b>Eğik Eksenli Rüzgar Türbini</b> |
|--------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|------------------------------------|
|                    | Kanatlı                             | Kanatlı | Kanatlı | Kanatlı |                                    |
| Yatay              | Ek                                  | Ek      | Ek      | Ek      | Ek                                 |
| İltü               | Ek                                  | Ek      | Ek      |         |                                    |
| İnma Hızı          | Ek                                  | Ek      | Ek      | Ek      | Ek                                 |
| İnım Amacı         | Ek                                  | Ek      | Ek      | Ek      | Ek                                 |
| İnımızda Kullanımı |                                     |         |         |         |                                    |

Rüzgarın kinetik enerjisi bu türbinler ile elektriğe çevrilmektedir. Türbin, klasik bir fanın tam tersi bir şekilde işleyiş gösterir. Fanlar elektrik ile rüzgar üretirken türbinler rüzgar ile elektrik üretimi yaparlar. Rüzgar pervaneleri döndürür. Pervane döndükçe jeneratöre bağlı olan döner mil döner. Jeneratör de elektrik üretir.

Rüzgar türbinin boyuna bağlı olarak elde edilen enerji miktarı değişmektedir. Büyük rüzgar türbinlerinde 50 kW ile 2 MW arasında elektrik elde edilebilir. Büyük türbinli rüzgar çiftliklerinden elde edilen enerji elektrik şebekesine dağıtılır. Genellikle endüstriyel kullanım amaçlı inşa edilirler. Küçük rüzgar türbinlerinde ise elde edilen enerji 50 W- 20 kW arasındadır. Burdan elde edilen enerji ise çiftlik evlerine, telekomünikasyon alıcılarına, radyo kulelerine, seralara veya su pompalarına dağıtılır [32].

Rüzgar enerjisi yenilenemeyen enerji kaynaklarına alternatif olarak düşünülebilir. Rüzgardan enerji elde edilmesi çevre kirliliğine neden olmaz, türbinler çalışırken yakıtı ihtiyaç duymaz. Dolayısıyla küresel ısınmayı asla katkı sağlamaz. Bu sebepten yenilenebilir kaynaklar arasında geleceğin enerji kaynağı olarak görülebilir. Ancak rüzgar enerjisi verimi yüksek bir enerji kaynağı değildir. Düşük maliyetli ve yüksek verimli enerji arayışına tam anlamıyla cevap olamaz çünkü rüzgar türbin ve

çiftliklerinin inşası oldukça pahalıdır. Ayrıca rüzgar enerjisinden verimli bir şekilde yararlanmak için rüzgarın aynı hızda ve devamlı esmesi gerekmektedir, bu ise her zaman mümkün değildir. Son olarak da her ülke için bu kaynak ana enerji kaynağı olamaz [32].

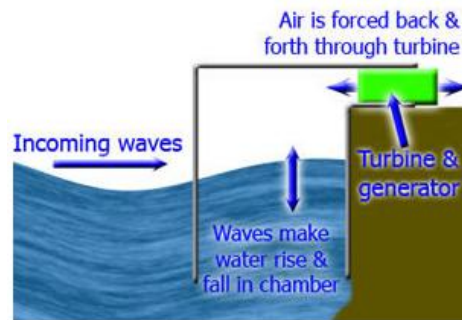
### 2.3.3 Dalga Enerjisi

1970'lerde ki fosil yakıtların tükenmeye yüz tutmasının fark edilmesiyle başlayan enerji krizinden sonra yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişin sonucunda farkına varılmış olan enerji kaynaklarından biri de dalgalarda saklanan enerjidir. Ulusal Enerji Ajansı'nın (International Energy Agency) yaptığı tahmine göre Dünya'nın şuan ihtiyaç duyduğu enerjinin yaklaşık %10'u dalga enerjisiyle karşılanabilir.

Dalgalar aslında rüzgarın bir sonucu oluşur. Rüzgarın su yüzeyinden eserken meydana getirdiği sürtünme kartopu etkisi yaratır ve dalga oluşmasını sağlar. Dalganın gücü esen rüzgarın hızına, esme süresine ve kat ettiği yola ile orantılıdır. Deniz dalgalarındaki güç dalga yüksekliği, dalga hareketi, dalga boyu ve su yoğunluğu ile belirlenir. Rüzgarın hızı, esme zamanı, suya olan mesafesi ve suyun derinliği dalga yüksekliğine doğrudan etki eder ve dalga ne kadar büyük olursa taşıdığı enerji de aynı oranda çok olur.

Dalgalardaki enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilen sistemler denizin yüzeyine yakın veya deniz yüzeyinde inşa edilirler. Bu sistemler denize paralel veya dik şekilde konumlandırılır.

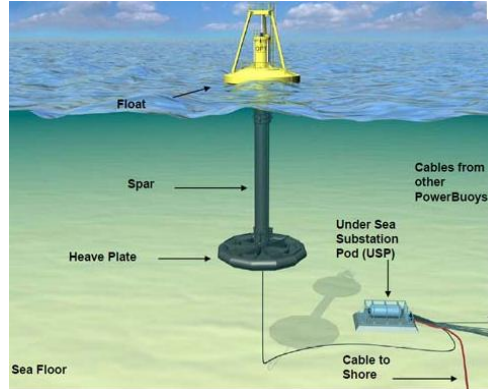
1. Sonlandırıcı Sistemler: Dalganın geliş yönünde dik olarak kurulur. Su, içinde hava dolu olan bir bölmeye dolar. Dalganın gelip gitmesiyle içerideki hava harekete geçer ve kolona bağlı olan tübin çalışır. Türbinin çalışmasıyla jeneratör elektrik üretir. Aşağıdaki şekilde sonlandırıcı sistemlere örnek olarak verilebilecek salınlı su kolonunun çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2.11 Sonlandırıcı sisteme örnek salınlı su kolonları

2. Nokta Absorblayıcı Sistemler: Bu sistemler de denize dik olarak konumlandırılırlar. Sabit bir silindir içinde dalga hareketiyle hareket eden şamadır, sistemin içindeki elektromekanik

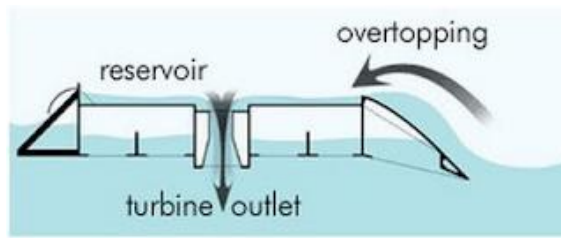
yada hidrolik enerji dönüştürücülerini çalıştırır. Bu yöntem ile dalgalardan 40 kW'lık bir güç elde edilebilir. Aşağıdaki şekil nokta absorblayıcı sistemi göstermektedir.



Şekil 2.12 Nokta absorblayıcı sistem

Bu sistemler de dalganın geliş yönüne paralel olarak dalganın gücünü zayıflatıcı mekanizmalar kullanılır. Böylece dalga ile cihazın bağlantı yerinde meydana gelen eğilip bükülmeler makinedeki yağı basınçlandırır, hidrolik motoru çalıştıran hidrolik çekiç çalışır hale gelir [34] .

3. Havuz Sistemleri: Diğer sistemlerden farklı olarak dalgadaki enerji potansiyel enerjiye çevrilerek deniz seviyesinin üzerine çıkar ve normal bir türbinden çıkar. Uygun türbinden çıkan su kütlesiyle de elektrik elde edilmiş olur [35]. Dalga ejderi (wave dragon) bu sistemlerin en tipik olanıdır. 2009 yılında Danimarka'da kurulan bu sistemden megawatt mertebesinde enerji elde edilmiştir. Bu sistemin en büyük dezavantajı türbinin doğrudan suyun içinde olması ve değişken hızlarla yavaş dönmesidir. Aşağıdaki şekilde dalga ejderinin bir resmi gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Dalga ejderinin şekli ve çalışma prensibi

Dalga enerjisi Dünya çapında yaygın kullanılan bir yenilenebilir enerji kaynağı değildir. Çünkü dalgaların yüksek enerji taşımalarına karşın farklı yönlerde ve farklı hızlarda hareket etmeleri, sistemlerin tuzlu suya ve fırtınalara karşı dayanıklı yapılabilmeleri oldukça yüksek maliyet gerekir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından dalga enerjisi eski bir enerji türü olmasına rağmen gelişmesi için yeni teknolojilere ihtiyaç duyan bir enerji formudur. Deniz ve okyanuslardaki kaynakları yenilenebilir

enerji teknolojilerine büyük katkı sağlayabilecek potansiyeli vardır. Ancak teknolojik olarak gelişime açık olmasına rağmen ticarileşmesi zamana ihtiyacı vardır [34]. Ayrıca her ülkenin denize kıyısı olmaması, olan ülkelerin ise pahalı teknolojilerle dalga enerjisinden elektrik elde etmesi bu enerjinin yaygınlaşmasını engellemektedir. İhtiyaç duyulan enerji ucuz ve herkes tarafından rahatlıkla kullanılabilir bir enerji formu olmalıdır. Dalga enerjisi ise yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı bu özellikleri taşımamaktadır .

#### **2.3.4 Jeotermal Enerjisi**

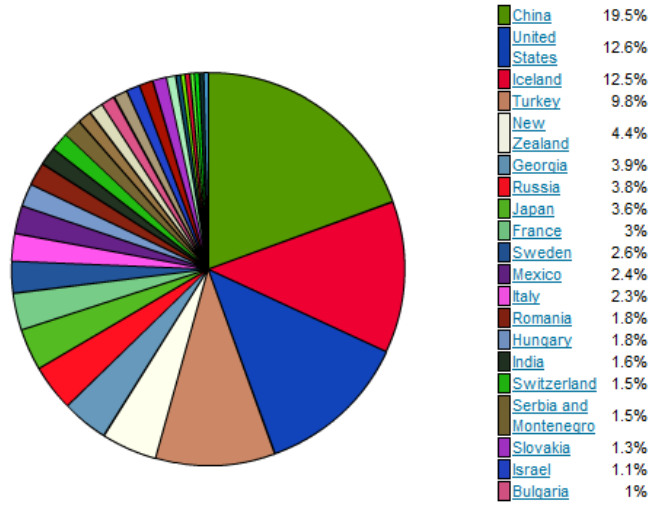
Diğer bir yenilenebilir enerji kaynağı jeotermal enerjidir. Son bir kaç yıldır jeotermal enerji hem endüstride hemde evsel enerji ihtiyacını karşılamada kullanılmaya başlanmıştır. Jeotermal enerji Dünya'nın içindeki varolan ısıyı kullanır. Yerkabuğunun içinde bulunan ve yeryüzündeki sularla birikmiş ısının meydana getirdiği içinde erimiş mineral tuzlar ve gazlar içeren su ve buhardan oluşan hidrotermal kütlenin enerjisine jeotermal enerji denilmektedir. Jeotermal enerji için mutlaka su veya buhara ihtiyaç duyulmamaktadır, yer altındaki bazı granitler ve sert kayalardan da jeotermal enerji elde edilmektedir. Sıvı akışkan içermemesine rağmen bazı tekniklerle ısılarından yararlanılmaktadır. Daha geniş bir tanımla jeotermal enerjiyi oluşturan yerkabuğunda depolanan ısı enerjidir [36].

Tektonik levhaların hareketiyle oluşan depremlerin ve volkanik faaliyetlerin sık rastlanıldığı bölgeler yerkabuğunda kırıklar olduğundan bu bölgeler jeotermal enerji bakımından zengin bölgelerdir. Jeotermal enerjiden elektrik üretmek için çeşitli santraller kurulmuştur. En yaygın kullanılan santral tipleri ise şunlardır;

1. Kuru Buharlı Jeotermal Santraller; Bu santraller Kalifornia Geyser (ABD), Larderello ve Monte Amita (İtalya) ve Matsukuwa (Japonya) gibi doymuş ve kızgın jeotermal sıvı bulunan alanlarda kurulur. Santral kurulumu basittir ancak doymuş ve kızgın jeotermal alan Dünya'da kısıtlı yerde mevcuttur.
2. Buhar Ayırmalı (Tek Faz Dönüşümlü) Santraller; Kendiliğinden yeryüzüne ulaşan jeotermal sıvılar buhar ve sıvı fazdadırlar çünkü jeotermal sıvı kuyu çıkışında basınç farkından dolayı buhara dönüşür. Oluşan buhar ile buhar türbinleri döndürülür. Sıvı ise çıktığı kuyuya geri gönderilir. Türkiye'deki Kızıldere Jeotermal santralinde sıvı kuyulara geri basılmamaktadır. Kuru buharlı santrallere göre verim daha düşüktür.
3. Buhar Ayırmalı ve Su Buharlaştırmalı (Çift Faz Dönüşümlü) Santraller; Tek faz dönüşümlü santralden farkı jeotermal sıvının basıncı düşürülerek düşük basınçlı buhar elde edilir. Elde edilen ek buharla da ek bir türbin döndürülür. Verim tek faz dönüşümlü santrallere göre biraz daha yüksektir.

4. Buhar Ayırmalı ve Çok Kademeli Su Buharlaştırılmalı (Çok Faz Dönüşümlü) Santraller; Bu santrallerde ise üç veya daha fazla basınç düşümü ve faz ayrımı olur. Faz dönüşüm sayısı arttıkça verimde artmaktadır ancak beraberinde yüksek maliyeti de beraberinde getirir. Bu tür santraller ekonomik açıdan pek cazip değildir.
5. Kuyudan Pompayla Jeotermal Sıvı Çekilen Sıvı Buharlaştırılmalı (Tek Faz Dönüşümlü) Santraller; Jeotermal sıvının çıktığı kuyuya pompa yerleştirilmediyse jeotermal sıvı kuyudan direkt basınçlı sıvı olarak çekilir ve ilk basınç düşüşü yer altında gerçekleşir. Kuyu çıkışına faz dönüşümü işlemi yapılır. Oluşan buharla türbin döndürülür.
6. İkinci Bir termodinamik Çevrim Sıvısı Kullanan Santraller; Bu santrallerde jeotermal sıvının enerjisi başka bir sıvıya (genelde freonlara veya hidrokarbonlara ) aktarılır. Sıvılar arası ısı aktarımı ısı eşanjörü tarafından gerçekleştirilir. Eşanjörde jeotermal sıvı ve jeotermal sıvıyla karışmayan sıvı ters akışlı olarak aynı reaktöre gönderilir. Buharlaşan ikincil sıvı türbini döndürerek elektrik elde edilmesini sağlar.
7. Hibrit Fosil/Jeotermal Santraller; Bu santraller fosil enerji santralleriyle hibrit olarak kullanılmaktadırlar çünkü jeotermal sıvının ısı yeterince yüksek değildir dolayısıyla alınan gücün azdır. Hem maliyeti azaltmak hemde fosil yakıtlarla birlikte daha yüksek verim elde etmek için tasarlanan bu santrallerin en büyük dezavantajı fosil yakıt yatakları ile jeotermal kaynaklarının aynı bölgede bulunma olasılıklarının düşük olmasıdır.

Dünya’da Jeotermal Enerji; Jeotermal enerji kullanımı ülkelere göre değişmektedir çünkü jeotermal sıvı tektonik hareketlerin veya volkanik faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde yer kabuğunun üstüne çıkar. Her ülke bu enerjiden aynı oranda yararlanamamaktadır. Jeotermal enerjinin en yoğun olduğu ülkeler başka Çin olmak üzere ABD ve İzlanda’dır. Aşağıdaki daire grafiğinde jeotermal gücün ülkelere göre kullanım dağılımları verilmiştir.



Şekil 2.14 Dünya’da jeotermal enerji kullanımı [38]

*Türkiyede Jeotermal Enerji;* Türkiye tektonik ve volkanik özellikleri nedeniyle jeotermal enerji açısından oldukça zengin bir ülkedir. Türkiye’de bilinen jeotermal enerji kaynaklarının %95’i ısınma amaçlı kullanılmaktadır çünkü jeotermal enerji kaynaklarımız orta ve düşük entalpilidir. Dolayısıyla elektrik üretimine pek elverişli değildir. Diğer kullanım alanları ise termal turizm, az miktarda elektrik üretimi ve kimyasal madde üretimi olarak sıralanabilir.

Yapılan araştırmalara göre Türkiye’de jeotermal enerjiden elde edilebilecek elektrik güç miktarı 4500 MW iken jeotermal ısınma potansiyeli 31500 MW’dır. Jeotermal enerjiden doğrudan yararlanılabilmesine rağmen Türkiye’de mevcut potansiyelin ancak % 3.2’si kullanılabilmektedir. Jeotermal enerjinin elektrik üretiminde kullanılması ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Bunun için gerekli ön araştırma ve tesis masraflarının pahalı olmasına rağmen kurulduktan sonra düşük maliyetli olarak çalışır. Türbin boyutlarının küçük olması diğer enerji kaynaklarına göre kurulum maliyetini düşürür ve türbin genişmesinin kuru bölgede olması türbinin ömrünü uzatır. Diğer bir avantajları ise yüksek basınçta çalışabilmesi, doğrudan kullanılabilmesi, çevreye fosil yakıtlar gibi zarar vermemesi ve hava sızması gibi problemlerin olmaması olarak sıralanabilir.

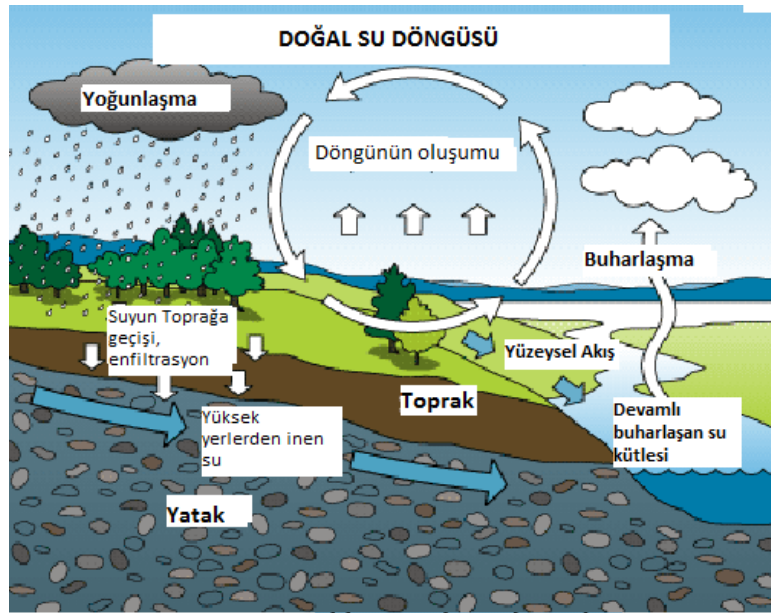
Bu avantajlarına rağmen jeotermal enerji de aranılan uniform ve ucuz enerji kriterlerine uygun değildir. Bu enerji kaynağı her ülkede eşit şekilde bulunamaz. Sadece tektonik levha hareketlerinin ve volkanik faaliyetlerin çok görülüşü kısıtlı sayıda ülkelerde bulunur. Ayrıca jeotermal kuyudan her zaman enerji alınamayabilir. Üzerine tesis kurulduktan sonra kuyuda jeotermal sıvı akışı kesilebilir. Bu da büyük bütçeler ayırarak tesis kuran yatırımcı şirketleri büyük zararlara uğratabilir. Son olarak Jeotermal kuyulardan enerjisinden yararlanılacak termal sıvıyla birlikte Dünya' zehirli gaz çıkışında olur [39].

### 2.3.5 Hidrolojik Enerjisi

Hidrolojik enerji, suyun hareketinden kaynaklanan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Suyun havada yükselmesi ve hareket etmesi su döngüsünün bir parçasıdır.

*Su döngüsü*; Güneş’den gelen ışınların enerjisi Dünya’daki okyanusların, denizlerin ve nehirlerin yüzeyindeki suyun buharlaşarak havaya karışmasına neden olur. Buharlaşan su atmosferde soğuk havayla karşılaşınca yoğunlaşır ve bulutumsu form alır. Bu yoğun madde yer yüzüne yağış veya kar olarak geri döner ve okyanus ve nehirlerin üzerine geri düşer. Yerçekimi su zerreciklerini yer yüzünden atmosfere atmosferden de yeryüzüne geri gelmesini sağlar. Hareket eden suyun bu kuvveti oldukça etkili olabilir.

Hidrolojik enerji yenilenebilir enerji olarak adlandırılır çünkü bu döngü her daim yağışla birlikte devam eder ve su döngüsü devam ettiği sürece biz de hidrolojik enerjiden faydalanmaya devam edebileceğiz. Aşağıdaki şekil doğada kendiliğinden meydana gelen doğal su döngüsünün nasıl meydana geldiğini görsel olarak ifade etmektedir.



Şekil 2.15 Doğal su döngüsü

Suyun hareketinden yararlanarak elektrik enerjisi üretimi 19. yüzyılda başladı ve 1940’lardan sonra barajlar inşa edilmemesiyle popülerlik kazandı. Daha sonrasında ise ucuz olan fosil yakıtlar devreye girdi. Pahalı santraller kurarak enerji elde etmekten ziyade ucuz yoldan fosil yakıtlardan enerji elde etmenin cazibesi hidroelektrik gücün ikinci plana atılmasına neden oldu. Ancak 1970’ler de fosil yakıtların olumsuz etkileri görülmeye başlandığında hidroelektrik güç santralleri tekrar eski popüleritesine kavuştu.

**Hidro Barajlar;** Doğal şelalerin olduğu yerlere hidroelektrik güç santralleri kurulur. Bu yüzden ilk santral Niagara Şelalesine kurulmuştur. Eğer doğal şelale yoksa barajlarla yapay şelaleler oluşturulur ve bu şekilde elektrik ihtiyacı karşılanmaya çalışılır.

Barajlar , barajın üzerinde rezervuar denilen yapay göl oluşturabilecek nehirlerin üzerine kurulur. İnşa edilen barajların çoğu sel kontrolü veya sulama amaçlı yapılmaktadır. Elektrik enerjisi üretimi amacıyla baraj inşası pek yapılmamaktadır.

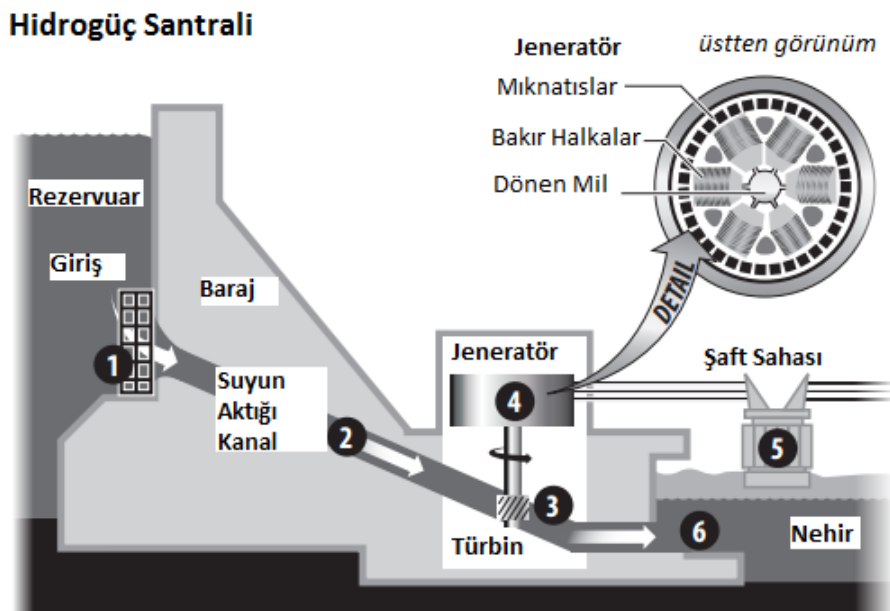
Hidro güç Santralleri; Suyun güce çevrilebilir büyük oranda kinetik enerjisi vardır. Hidroelektrik güç santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için termal (kömür, fosil ve nükleer) güç santrallerinde olduğu gibi modern türbinler kullanılır. Ancak hidro güç elektrik santrallerinde türbini döndürmek için diğer santrallerde olduğu gibi ısıya ihtiyaç yoktur.

Tipik bir santral üç ana kısımdan oluşur;

- Elektriğin üretildiği güç santrali kısmı
- Açılıp kapanabilen kapaklarla suyu kontrol edebilen baraj kısmı
- Suyun depo edildiği rezervuar (yapay göl) kısmı

Elektrik üretmek için baraj kapakları açılır, rezervuardaki su büyük su kanalları (penstock) boyunca ilerler. Kanalin sonunda hızlanan su türbinin pervanelerini döndürür. Türbinler elektrik üretmek için jeneratörle bağlıdır. Son olarak da üretilen elektrik büyük şanzımanlarla şehir şebekesine gönderilir.

Aşağıdaki şekilde hidro güç santrali resmedilmiştir.



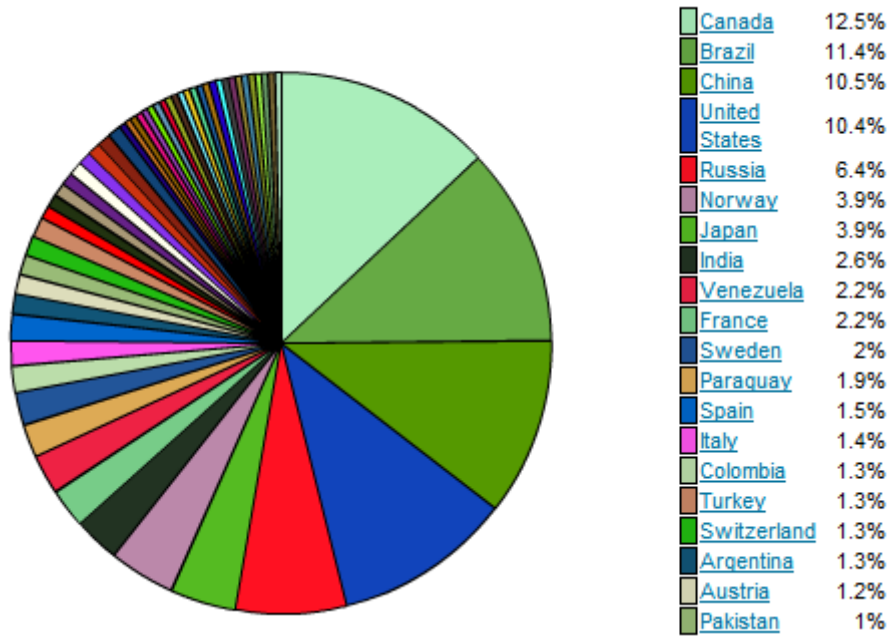
Şekil 2.16 Bir hidro güç santrali [40]

Bir barajdan elde edilecek olan elektrik miktarı iki faktöre bağlıdır; suyun en yüksek seviyesi ile suyun kanala girmesini sağlayan giriş arasındaki mesafe ve sistem boyunca hareket eden su miktarı. Rezervuardaki suyun yüksekliği ne kadar fazlaysa sistemde o kadar fazla su hareket eder ve orantılı olarak fazla elektrik elde edilir.

Hidrogüç santrallerinin en önemli avantajı enerjiyi depolayabilmesidir. Rezervuardaki su aslında depolanmış enerjidir. Rezervuarlar suyu hapsederek suyun dolayısıyla da enerjinin depolanmasını sağlar. Su ise istenildiği zaman elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

Artan elektrik ihtiyacına karşı daha fazla su miktarıyla daha fazla elektrik enerjisi üretilebilir. Ayrıca depolama ile kışın yağın yağışla yaz aylarında elektrik üretimi de sağlanabilir. Bazı hidroelektrik güç santralleri pompalı depo sistemi kullanırlar. Pompalı depo sisteminde kullanılan su tekrar ve tekrar kullanılır.

Aşağıdaki grafikte ülkeler içinde hidrogüç kullanım oranları verilmiştir [40].



Şekil 2.17 Dünya’da hidroelektrik güç kullanımı [38]

### Türkiye’de Hidroelektrik Enerji;

Türkiye’nin jeolojik konumu, üç tarafının denizlerle çevrili olması, hidrogüç üretimi için Türkiye’yi ideal ülkelerden biri haline getirir. Türkiye Dünya hidroelektrik potansiyelinin %1’ine sahiptir.

Türkiye’nin sahip olduğu hidroelektrik potansiyeli yılda 128 milyon kWh kadardır. Bu hidrogüç potansiyelinin %35’i elektrik üretiminde kullanılabilir. Ancak Türkiye sahip olduğu bu hidrogüç potansiyelinin ancak %36 kadarını kullanmaktadır.

Özellikle nehirler bakımından zengin olan Karadeniz Bölgesi hidrogüç santralleri için oldukça elverişlidir. Ancak Karadeniz Bölgesi'nin dağlık yapıda olması buraya kurulacak barajların maliyetini yükseltmektedir [41].

Hidroelektrik güç en temiz ve çevre dostu enerji kaynağı olarak adlandırılmasına rağmen kurulan santrallerle çevresine zarar veren bir kaynaktır. Hidroelektrik gücün en önemli problemi kullanılan suyun kalitesinin değişmesidir. Çünkü hidroelektrik sistemlerde, su sıklıkla yüksek sıcaklıklara çıkar, çıkarken oksijen kaybeder ve fosfor ve nitrojen kazanır. Diğer bir problem ise barajın inşa edildiği nehirdeki su hayatına dokunulması ve olumsuz etkilenmesidir [31].

Son olarak hidroelektrik santrallerden elde edilen elektrik miktarı ülkenin o yıl aldığı yağış miktarına bağlıdır. Bu bağlamda yağış almayan kurak ülkeler için tercih edilmeyen bir enerji kaynağıdır. Kullanımı sırasında daha fazla enerji için pompalı depo sistemli santrallerin kullanılması enerji üretirken enerji harcanmasına neden olmaktadır ve üzerine kurulan nehirdeki doğal hayatı etkilemektedir. Avantajlarına rağmen bu dezavantajlar hidroelektrik güç santrallerini yenilenebilir enerji kaynağı yapmaktan uzak tutar.

### **2.3.6 Güneş Enerjisi**

Yaklaşık 35 yıl önce meydana gelen enerji krizi kullanılan enerji kaynaklarının bir gün tükenebileceğinin farkına varılmasını sağladı. Çalışmalar yeni enerji kaynağı aramaya doğru yöneldi. Tükenmeyen ve kendini sürekli yenileyen enerji kaynaklarının kullanılması gündeme geldi. Ancak günümüzde halen çoğunlukla kullanımda olan enerji kaynağı yenilenemeyen kaynaklar (kömür, fosil) olarak karşımıza çıkmaktadır çünkü, yenilenebilir enerji teknolojisi pahalıdır. Mevcut arayış kaynağın yenilenebilir olmasının yanında ucuz olmasının da getirmektedir. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakların pahalı teknolojiler gerektirmesi onların yaygın bir şekilde kullanılmasını engellemektedir. Hem ucuz hemde yenilenebilir enerji kaynağı olarak en iyi enerji kaynağı güneş enerjisidir. Güneş ışınlarından hem doğrudan hemde doğrudan olmayan yollar ile enerji elde etmek mümkündür. Güneş ışığı doğrudan kullanarak çeşitli termal uygulamalarda kullanılabilir (su veya hava ısınmasında, kurutmada, distilasyonda, pişirmede..vb). Isıtma ise buzdolaplarında soğutma veya güç jeneratörleri uygulamalarında da kullanılabilir. Güneş ışığının direkt kullanıldığı diğer bir uygulama ise ışığı doğrudan elektriğe çeviren fotovoltaik uygulamalardır. Doğrudan olmayan yolla enerji elde edilmesi ise güneşin sebep olduğu rüzgarla, beslediği tahıllarla ve ya bitkilerle, yağmur yağmasıyla ve okyanusun yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleriyle meydana gelir. Ticari amaçlı olsun veya olmasın güneş enerjisi doğrudan kullanılmasıyla ideal bir enerji kaynağıdır.

Güneş enerjisi geniş alana yayılan ve tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Dünyaya gelen güneş ışığının enerjisi yaklaşık olarak  $1,8 \cdot 10^{11}$  MW'dır. Bu miktar ise Dünya üzerinde harcanan tüm enerji kaynaklarından daha fazla miktarda enerji demektir. Böylece güneş enerjisinin hem günümüzün hemde geleceğin enerji kaynağı olarak düşünmek yanlış olmaz. Bu da güneş enerjisini diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha üstün kılar.

Bunların yanında güneş enerjisi iki yönüyle daha ön plana çıkmaktadır. Birincisi, diğer yenilenemeyen enerji kaynaklarının aksine çevreye zararı yoktur, atmosfere zararlı gaz salınımı yapmaz. İkincisi ise bu enerjinin bedava ve Dünya'da insanların yaşadığı her tarafa eşit şekilde dağılmasıdır.

Bunların yanında güneş enerjisinin uygulamalarıyla ilgili problemler vardır. Dünyanın en sıcak bölgelerinde bile solar radyasyon akısı nadiren  $1 \text{ kW/m}^2$  aşmaktadır ve gün boyunca toplam akı  $7 \text{ kW/m}^2$  civarında olmaktadır. Bu değerler teknolojik uygulamalar için düşük değerlerdir ve beraberinde yüksek fiyatı getirmektedir.

Diğer bir sorun ise, güneş enerjisi teknolojisinin günün belli zamanında kullanılmasıdır. Dünya'nın Güneş etrafındaki dönüşünden kaynaklanan gece-gündüz döngüsü bu enerjinin gece diliminde kullanılmamasına neden olmaktadır. Bu soruna çözüm güneşli havalarda elde edilen enerjinin depolanmasıyla sağlanmıştır. Oysa depolama işlemi pahalı olan teknolojinin fiyatını daha da arttırmıştır. Yapılan çalışmalar ucuz olan enerji kaynağını daha ucuza mal etmeye odaklanmıştır. Geliştirilen teknolojilerin düşük maliyetli hale getirilmesi bu konuda devam eden çalışma alanlarından [42].

Çizelge 6 Güneş enerjisi doğrudan ve doğrudan olmayan kullanım alanları

| Direkt Metotlar       | Direkt Olmayan Metotlar                                                  |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Termal<br>Fotovoltaik | Termal Enerjisi<br>Fotovoltaik Enerjisi<br>Biyokütle<br>Biyolojik Enerji |

#### Termal Uygulamalar;

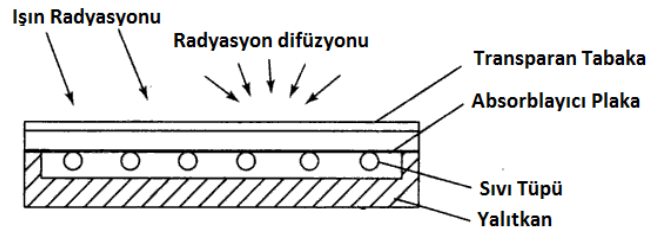
Güneş enerjisi bugünün ve geleceğin alternatif enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağından doğrudan ve dolaylı olarak yararlanabiliriz. Doğrudan iki şekilde yararlanılabilir. İlki termal uygulamalarda güneş ışığının hiçbir işleme tabii tutulmadan enerjisinden yararlanılmaktadır.

### Termal uygulamalarda kullanılan Toplama (Kollektör) ve Depolama Cihazları;

Herhangi bir toplama devresinde genellikle siyah yüzeye güneş ışığı gönderilir ve güneş radyasyonunun absorblanması sağlanır. Absorblanan radyasyonun bir kısmı hava veya su gibi bir ortama iletilir. Herhangi bir optik işlem olmadan ışığı toplayan plakalara düz plakalı kollektör (flat plate collector, FPC) denir. Güneş kollektörleri arasında en önemli olanı düzplakalı kollektörlerdir çünkü en basit dizayna sahiptirler ve kullanıldıkları değişik uygulamalara göre 40 °C'den 100 °C' ye kadar değişik sıcaklıklarda çalışmalarına rağmen fazla bakıma ihtiyaç duymazlar.

#### Bazı Kollektör ve Çalışma Prensipleri;

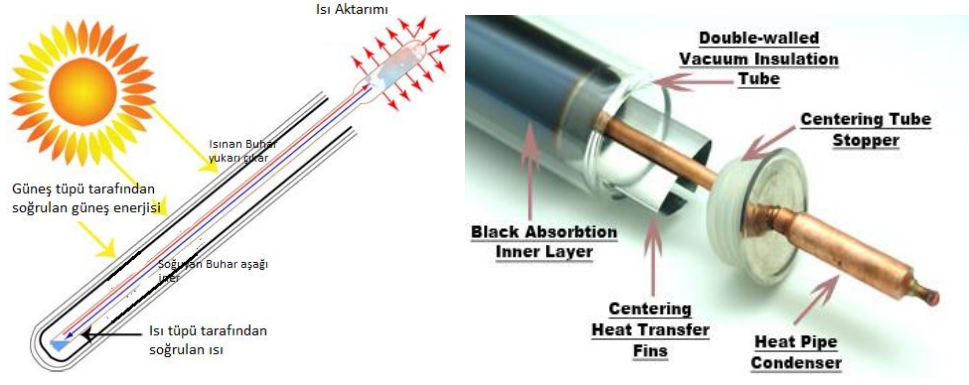
**Sıvı Düz Plakalı Kollektörler;** Işın genellikle cam olan geçirken bir tabakadan geçer. Soğrulan radyasyonun bir kısmı soğurucu tabakaya sabitlenmiş olan sıvı akım tüpüne aktarılır. Soğurucu plakadaki absorblanan radyasyonun geri kalan kısmı konveksiyon (ısı aktarımı), plaka yüzeyinin etrafında geri ışıyarak veya alt ve kenarlardaki ısı yayılımı ile kaybolur. Transparan tabaka aslında bu konveksiyon ve geri ışımayı önlerken termal yalıtıkanda alt ve kenarlardaki ısı yayılımı miktarını azaltmak için kullanılır. Çoğunlukla kullanılan sıvı sudur. Aşağıdaki şekilde sıvı düz plakalı kollektör ve kısımlarını belirten şekil verilmiştir.



Şekil 2.18 Sıvı düz plakalı kollektör

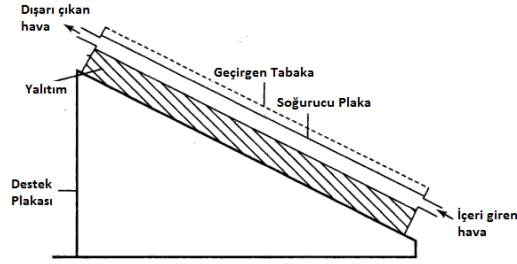
Düz plakalı kollektörün üst yüzeyinde meydana gelen geri yansımayı azaltmak için genellikle plakanın üzerine seçici kaplama yapılır. Bu seçici kaplamanın absorpsiyon kat sayısı gelen ışığın absorpsiyon kat sayısından yüksek, emisyon kat sayısı ise geri dönen ışığın emisyon kat sayısından daha düşüktür. Böylece toplama verimi artırılmış olur.

**İçi Boşaltılmış Tüp Kollektörler (ETC);** Aşağıdaki şekilde içi boşaltılmış tüp kollektörlerden biri şematik olarak gösterilmiştir. İki eş merkezli camdan oluşan bu yapıda camlar arasındaki hava boşaltılmıştır. Dış tarafı kaplayan cam seçili kaplamalıdır. Gelen güneş ışığı bu yüzeyden soğrulur ve bir kısmı tüp dvarlarından içeri verilir. İçteki tüp suyla doludur. Isı termosfon (thermosyphon) devrimiyle suya aktarılır. Bu kollektörlerde iki cam arasındaki vakumdan dolayı konveksiyon nedeniyle meydana gelen ısı kaybı önlenmiş olur. Sonuçta kollektörün verimi artmış olur.



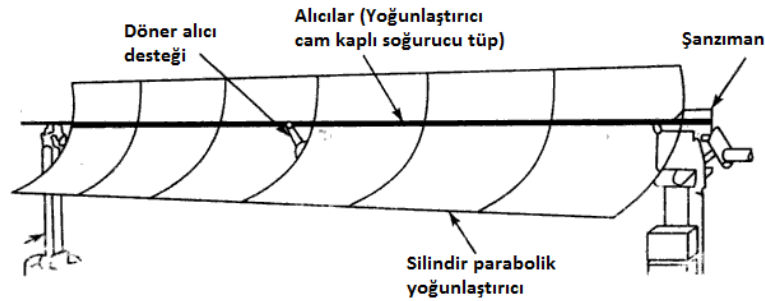
Şekil 2.19 İçi boşaltılmış Tüp Kollektörün şematik gösterimleri

**Güneş Enerjili Hava Isıtıcı;** Yapısal olarak sıvı düz plakalı kollektöre benzer bir yapıya sahiptir. Farklı olarak hava akışı meydana gelmektedir. Havanın ilerlediği yol kollektörün karşındaki basıncın düşmesi için uzun olmalıdır. Aşağıda gösterilen şekildeki kollektörde hava basit paralel tüp boyunca ilerlemektedir.



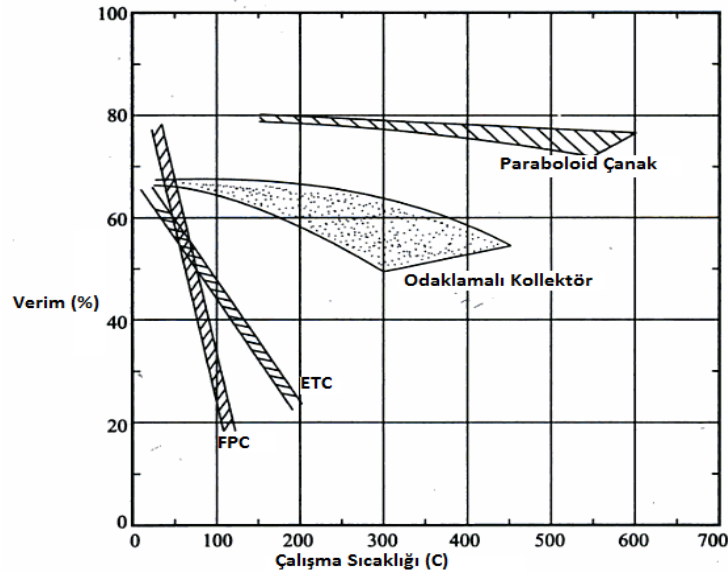
Şekil 2.20 Güneş Enerjili Hava Isıtıcı

**Odaklamalı yada Yoğunlaştırmalı Kollektörler;** Yüksek sıcaklıklara ulaşmak için gelen ışığın odaklanması ve sıcaklığının yükseltilmesi gerekir. Bu amaçla odaklamalı yada yoğunlaştırmalı kollektörler kullanılır. Aşağıdaki şekilde silindir parabolik odaklamalı kollektörün şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.21 Silindir parabolik yoğunlaştırıcı kollektör

Bu tür kollektörlerde iki ana öge vardır, yoğunlaştırıcı ve alıcı. Yoğunlaştırıcı olarak silindirik parabol şeklinde yansıtıcı ayna kullanılır. Bu ayna gelen ışığı soğurucu tüp üzerindeki eksen üzerinde bir noktaya odaklar ve ısının suya aktarılmasını sağlar. Soğurucu tüpün etrafının tamamen yoğunlaştırıcı cam ile kaplı olması konvektif ve ışıma kayıplarını azaltır. Gelen güneş ışınlarının soğurucu tüp üzerine sürekli odaklanması için yoğunlaştırıcının güneş ışığının geliş açısına göre dönmesi gerekmektedir. Bu harekete 'takip' denir. Silindirik parabol kollektörlerde dönme tek ekseninde olur ve bu sistemlerde suyun sıcaklığı 400 °C' ye kadar çıkar. Bir tane odak noktası olan paraboloid yansıtıcılar kullanılarak daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilir. Bu kollektörlerde iki tane takip eksenini vardır böylece Güneş ışığı her zaman odak noktası ve paraboloidin tepe noktasında kalır.



Şekil 2.22 Kollektörlerin karşılaştırmalı verimi

Yukarıda düz plakalı kollektörler (FPC), içi boşaltılmış tüp kollektörleri (ETC), odaklamalı kollektörler ve paraboloid çanak kollektörlerin karşılaştırmalı olarak sıcaklığa bağlı verim grafiği verilmiştir. Beklenildiği üzere sıcaklık arttıkça elde edilen verim de artmaktadır.

Güneş enerjisinin en büyük dezavantajı değişebilirliğidir. Bu yüzden güneş enerjisi uygulamalarında enerjinin depolanmasına gerekmektedir. Enerjinin depolanmasıyla güneşli olmayan günlerde de güneş enerjisinden yararlanılması sağlanır. Enerji termal, elektrik, mekanik yada kimyasal olmak üzere değişik şekillerde depolanabilir [42].

**Fotovoltaik Uygulamalar;** Fotovoltaikler yarı iletkenin üzerine ışık düşmesiyle Watt (W) yada kilowatt (kW) mertebesinde elektrik gücü üretebilen teknolojidir. Fotovoltaikler (PV) üzerlerine ışık düştüğü sürece elektrik enerjisi üretmeye devam ederler. Işık kesildiğinde de elektrik üretimi durur. Güneş gözeleri yada fotovoltaikler diğer kimyasal piller gibi asla şarj edilemezler.

Fotovoltaiklerin temelinde yatan fizik yarı iletken adı verilen malzemelerde değerklik (valans) bandı adı verilen bantlarda zayıf bağı elektronların hareketiyle ilgilidir. Kısaca bu olay; bant aralığı enerjisi olarak adlandırılan belli bir eşik değeriine sahip enerji valans bandına uygulandığında bağların kırılmasına ve elektronların serbest kalıp iletkenlik bandı adı verilen bölüme geçerek elektriğin iletilmesi olarak tanımlanabilir.

Bir sonraki bölümde güneş enerjisini doğrudan kullanan fotovoltaik hücrelerin temelinde yatan yarı iletkenlere giriş, yarıilekenlerin özellikleri ve elektronik devrelerdeki uygulamaları anlatılacaktır.

## BÖLÜM 3

### FOTOVOLTAİK HÜCRELER

Fotonik devreler fotonun hareketini temel alan devrelerdir. Fotonik devreler üç grup altında toplanabilir; (1) *ışık enerjisiyle ışık üreten cihazlar* – LED (ışık saçan diyotlar) ve diyot lazerler, (2) *optik sinyal algılayıcılar*- fotodedektörler ve (3) *ışığı elektrik enerjisine dönüştürebilen devreler*-fotovoltaikler veya güneş gözeleri <sup>[43]</sup>. Fotovoltaikler günümüzde pek çok yerde karşımıza çıkmaktadır. Endüstride, yerleşim merkezlerinde hatta uydu ve uzay istasyonlarına kadar geniş alanlarda uygulamaları mevcuttur. Fotovoltaik hücreler yarı iletkenlerden yapılırlar. Bu yüzden güneş gözelerindeki gelişim yarı iletken teknolojisindeki gelişimle paralellik gösterir. Dolayısıyla bir sonraki bölümde yarı iletkenler anlatılmıştır [44].

#### 3.1 Yarı İletkenlerin Fiziği ve Özellikleri

Yarı iletkenler iletkenlikleri metal ile yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Periyodik tablonun 4. grubunda bulunan yarı iletkenler elemental yarı iletkenlerken 3 ve 5. grubun bileşimiyle de bileşik yarı iletkenler oluşturulmaktadır [44].

Çizelge 7 Üçüncü, dördüncü ve beşinci grup elementleri

| <i>Grup Yarı iletkenleri</i> | <i>Grup Yarı iletkenleri</i> | <i>Grup Yarı iletkenleri</i> |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| B                            | C                            |                              |
| Al                           | Si                           | P                            |
| Ga                           | Ge                           | In                           |
| In                           |                              | Sb                           |

Çizelge 8 Elemental ve bileşik yarı iletkenler [44]

| <i>Elemental Yarı İletkenler</i> | <i>Bileşik Yarı İletkenler</i>                    |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| Silikon                          | Aliminyum fosfat<br>Aliminyum arsenit             |
| Germanyum                        | Galyum fosfat<br>Galyum Arsenit<br>İndiyum fosfat |

Galyum arsenit veya galyum fosfat gibi iki elementin bileşimiyle oluşmuş bileşik yarı iletkenler (veya ikili bileşikler), elementlerden biri III grubu diğeri V grubu olacak şekilde birleştirilerek elde edilirler. Galyum arsenit en yaygın kullanılan yarı iletken bileşiklerdir. Optik cihazlarda genellikle galyum arsenit kullanılır çünkü iyi optik özelliklere sahiptir. Özellikle yüksek hız gerektiren optik uygulamalarda tercih edilir.

İkili bileşikler oluşturulabildiği gibi üç elementin birleşimiyle üçlü alaşım yarı iletken de oluşturulabilir. Mesela  $Al_xGa_{1-x}As$  ; burada x, Al miktarının Ga içindeki miktarını göstermektedir. Alaşım yarı iletkenlerde örgü sabiti dikkate alındığı taktirde istenilen bant aralığında yarı iletken elde etmek mümkündür [44].

### 3.2 Enerji Bantları ve Enerji Aralığı

Katılarda atomlar ve moleküller birbirine çok yakındır ve atomik seviyeler yerine sürekli bantlara sahip gibi dururlar. Bu bantlar birbirine çok yakın enerji seviyelerinden oluşmuştur. Bazı yerlerde bu bantlar birbirinden ayrık durur. Ayrı kaldığı bu mesafeye yasak bant aralığı denir. Yasak bant aralığının büyüklüğüne göre de katı cisimler metal, yarı iletken ve yalıtkan olarak ayrılırlar [44].

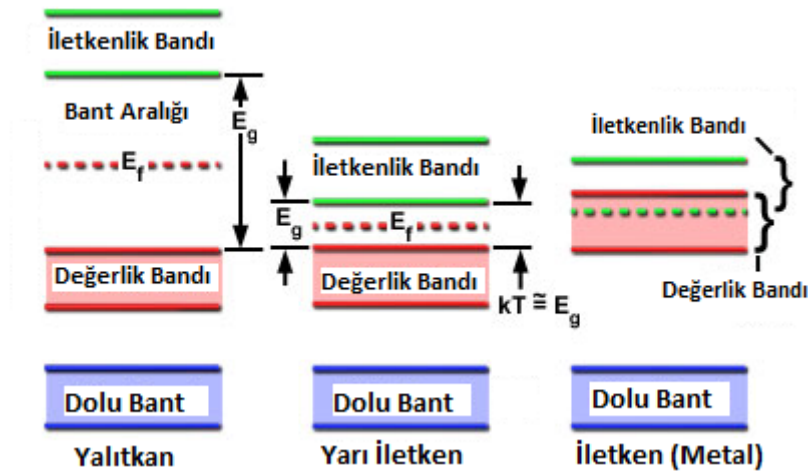
N tane atom içeren bir sistemde bir enerji bandı N farklı enerji seviyesi içerir. Pauli dışarlama ilkesinden dolayı herbir seviye iki elektron barındırır. Bu durumda her bir bant 2N sayıda elektron içerir ve üç durum söz konusu olabilir [44].

- Herbir atom tek sayıda elektrona sahipse ( $2k+1$  olsun), sistemin sahip olduğu elektron sayısı  $(2k+1)N$  olur. Bu durumda tam dolu ( $2N$ ) ve yarı dolu ( $N$ ) enerji bantlarına sahip olacaktır. Tam dolu banta *değerlik (valans) bandı* ( $E_v$ ) denilir. Sistemde valans bandı tamamen doludur

ve boş durumların bulunduğu bant olan *iletkenlik bandına* ( $E_c$ ) elektron geçişi gözlenir. Geçişin kolay oluşu yani valans bandıyla iletkenlik bandının arasındaki *yasak bandın* ( $E_g$ ) kısa olduğu katılara iletken veya metal adı verilir. En ufak bir dış etki ile bile elektronlar iletkenlik bandına geçiş gösterirler.

- Eğer herbir atom çift sayıda valans elektronuna sahipse bantlar doludur. Dolu banttan boş banda elektron transferi için enerji gerekir. Yasak bant aralığı büyük olan katılarda elektron geçişi için oldukça büyük enerjiler gerekir. Bu katılarda iletim zordur. Bunlara da yalıtkan malzemeler denilir.
- Yasak bant aralığı çok büyük değilse dolu banda herhangi bir uyarıyla geçiş gözlenebilir. Bu malzemelere de yarı iletken malzemeler denilir [44].

Aşağıdaki şekilde sırasıyla yalıtkan- yarı iletken- iletken için bant aralıkları gösterilmiştir.



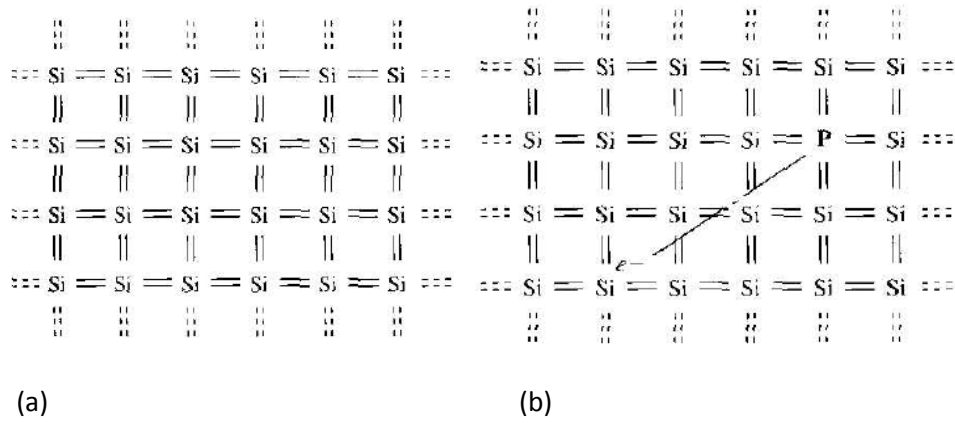
Şekil 3.1 Yalıtkan, yarı iletken ve metal için enerji bant aralıkları

Yarı iletkenler de yasak bant aralığı 0,1 eV- 5 eV arasında değişmektedir. Ayrıca yasak bant aralığı sıcaklıkla değişmektedir çünkü sıcaklık arttıkça kristaldeki atomların ısısal titreşim genlikleri artar böylece atomlar titreşim sırasında birbirine daha çok yaklaşır, arasındaki mesafe azalır. Böylece elektron geçişi kolaylaşır ve iletim artar. Terside doğrudur yani sıcaklık azaldıkça yasak bant aralığı artar ve iletim azalır. Herhangi bir uyarıyla iletim bandına çıkan bir elektron arkasında boşluk (hole) bırakır. Bu boşluk elektronlarla işgal edilmeye uygun bir yer gibidir ve yarı iletkenlerde pozitif yüklü tanecik gibi davranır. Elektronla zıt hareket eder ve elektronun aksine pozitif yüklüdür. Elektronun hareketiyle oluşan elektron-boşluk çifti oluşur. Elektron boşluk çifti oluştuğunda iletim bandında serbest elektron valans bandında da serbest boşluk meydana gelir. Bu olayın tersinin de gerçekleşmesi söz konusudur. Yani iletim bandındaki bir elektron ile valans bandında ki bir boşluk birleşebilir buna rekombinasyon (birleşme) denilir [26].

Yarı iletkenlerde iletkenlik uyarıyla değişebildiği gibi katkıyla da değişebilir. Bu tür yarı iletkenlere katkılı yarı iletkenler denilir [44].

### 3.3 Yarı İletkenlerde Katkılama

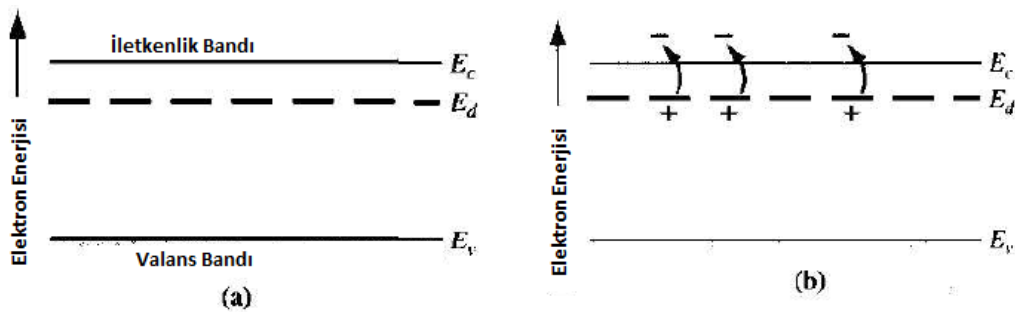
Son yörüngesinde dört tane valans elektronu olan IV. Grup elementi silikonun içerisine yine son yörüngesinde beş valans elektronu olan V. grup elementi fosfor katkılândığında fosforun dört valans elektronu silikonun dört valans elektronuyla kovalent bağ yapar. Böylece fosforun bir elektronu zayıf bağ ile açıkta kalır. Zayıf olan bağ herhangi bir dış uyarıyla kopartılıp serbest hale getirilebilir. Bu serbest elektron iletimi artırır. Yarı iletkenler de bu şekilde elektron veren katkı atomuna donör denir [44].



Şekil (a) Katkılanmamış silikon örgüsü      Şekil (b) Fosfor ile katkılanmış silikon örgüsü

Şekil 3.2 Katkılanmış (a) ve katkılanmamış (b) silikon örgüsü

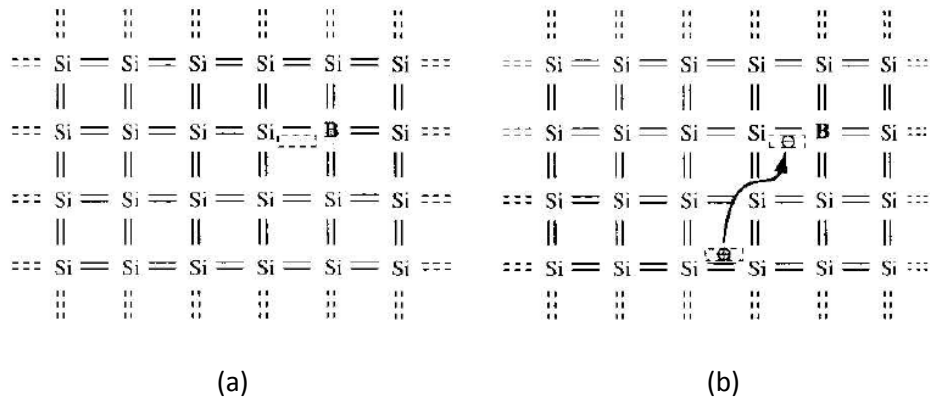
Donör elektronları yokken fosfor atomları pozitif yüklüdür. Çok düşük sıcaklıklarda donör elektronları fosfor atomlarına bağlıdır. Ancak, donör elektronlarını iletkenlik bandına göndermek için gerekli olan enerji donör elektronlarını bağlayan kovalent bağlardan daha azdır. Aşağıdaki şekilde enerji bant diyagramı gösterilmiştir.  $E_d$  donörün enerjisini ifade etmektedir [44].



Şekil 3.3 Donörlerin kesikli enerji seviyeleri (a) ve iyonize olmuş donörler (b) gösterilmiştir.

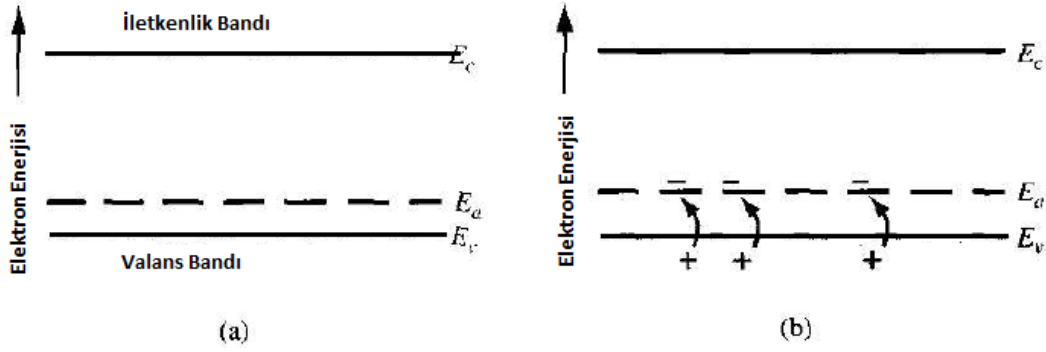
Donor elektronlarına verilen küçük miktar bir enerji, ilektenlik bandına çıkmalarını ve arkalarında pozitif fosfor iyonları bırakmalarını sağlar. iletkenlik bandına gelen elektron kristal içinde hareket ederek akım üretirken pozitif yüklü iyonlar kristalde sabit şekilde durur. Bu çeşit katkı atomları iletkenlik bandına fazladan elektron verilmesini sağlar. Bu yüzden fosfor gibi atomu katkılaman atomlara donor katkı atomları denir. Donor katkı atomları valans bandında boşluk oluşturmaksızın ilektenlik bandına elektron katkısı sağlar. Bu şekilde katkılanan yarı iletkenlere n tipi yarı iletken adı verilir.

Boron gibi son yörüngesinde üç tane valans elektronu olan bir element silikona katkılanırsa silikonun dört valans elektronu boronun üç valans elektronuyla kovalent bağ yapar. Üçüncü grup elementinin bir bağı açıkta kalır. Bu durum III. grup elementine zayıf bağlı pozitif yük yani boşluk gibi düşünülür [44].



Şekil 3.4 (a)' da iki boyutta boron atomlarıyla katkılanmış silikon örgüsü (b)' de ise boron atomlarının boşluk oluşturarak iyonlaşması gösterilmiştir.

Yukarıdaki Şekil 3.4 (a) şeklindeki kovalent bağ boşluğunu bir elektron doldurması için enerjisinin diğer valans elektronlarının enerjisinden daha büyük olması beklenir. Ayrıca boron atomlarının net yükü de negatif olmuş olur. Ancak, açıkta kalan bağın boşluğunu dolduracak olan elektron iletkenlik bandına çıkacak kadar enerjiye sahip değildir. Bu yüzden enerji bandı iletkenlik bandından biraz aşağıdadır. Aşağıdaki şekilde valans elektronlarının enerji kazanıp kristal içinde hareketi sonucu meydana gelen işaret dağılımı gösterilmiştir [44].



Şekil 3.5 (a)'da kesikli akseptör enerji seviyeleri (b)'de ise iyonize olmuş akseptörler gösterilmiştir

Borondaki boşluk elektronlar ile dolduğunda hareket eden elektronlar valans bandında yeni boşluklar oluştururlar. Yarı iletken içinde her elektron hareket ettiğinde boşluklar da hareket eder. Boşluk kristal içinde hareket ederken akım oluşturur. III. grup atomları valans bandından elektron alırlar ve alıcı katkı atomları olarak adlandırılır. Akseptör atomları iletkenlik bandında elektron üretmeksizin sadece valans bandında boşluklar üretirler. Bu çeşit malzemeler p tipi malzemeler olarak adlandırılırlar.

Saf tek kristal yarı iletken malzemenin etki olmaksızın iletimi düşüktür, yalıtkan gibi davranır. Hem donör hemde akseptör katkısıyla iletkenliği artırılmış olur. İletkenliği katkıyla kontrol edilebilen malzemelere katkılı yarı iletkenler denir [44].

P ve N tipli yarı iletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşan yapıya PN eklemi denir.

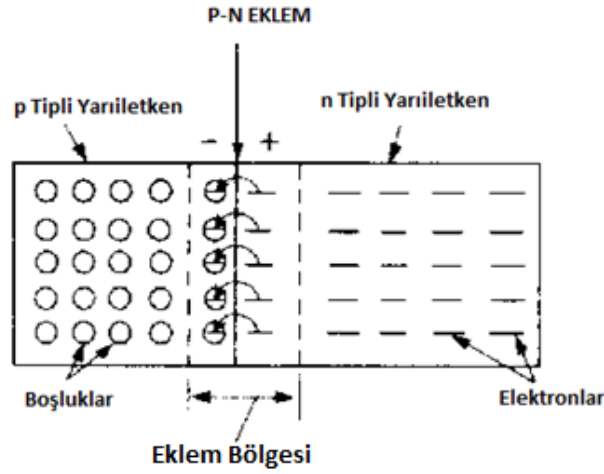
### 3.4 PN Eklemler ve Çalışma Prensipleri

P-N eklemler hem modern elektronik uygulamalar hem de yarı iletken devreler için büyük öneme sahiptir. P-N eklem teorisi yarı iletken devrelerin fiziğinin temelini oluşturur. PN eklem akım voltaj karakteristiği ilk olarak Shockley tarafından bulundu. Daha sonra bu teori Sah, Noyce, Shockley ve Moll tarafından geliştirildi.

Bir p-n eklem iki kapılı devre gibidir. Katkılamaya, devre geometrisine ve polarlanma koşullarına bağlı olarak değişik fonksiyonlar sergileyebilir [43]. Günümüzde pn eklemler elektrik sinyallerinin lineer olmayan dönüşümü (doğrultucu modülasyon, jenerasyon vb.), ışının elektrik enerjisine dönüşümü için (fotovoltaik hücreler), miktoelektronikte ve başka pek çok alanda geniş olarak kullanılmaktadırlar.

N ve p tipli olmak üzere iki farklı tipteki yarı iletken bir araya getirildiğinde konsantrasyon granyanına bağlı olarak difüzyon gözlenir. N tipi yarı iletkeninde çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar, azınlık durumda oldukları p tipli yarı iletkenine doğru arkalarında pozitif yüklü donör atomlarını bırakarak difüze

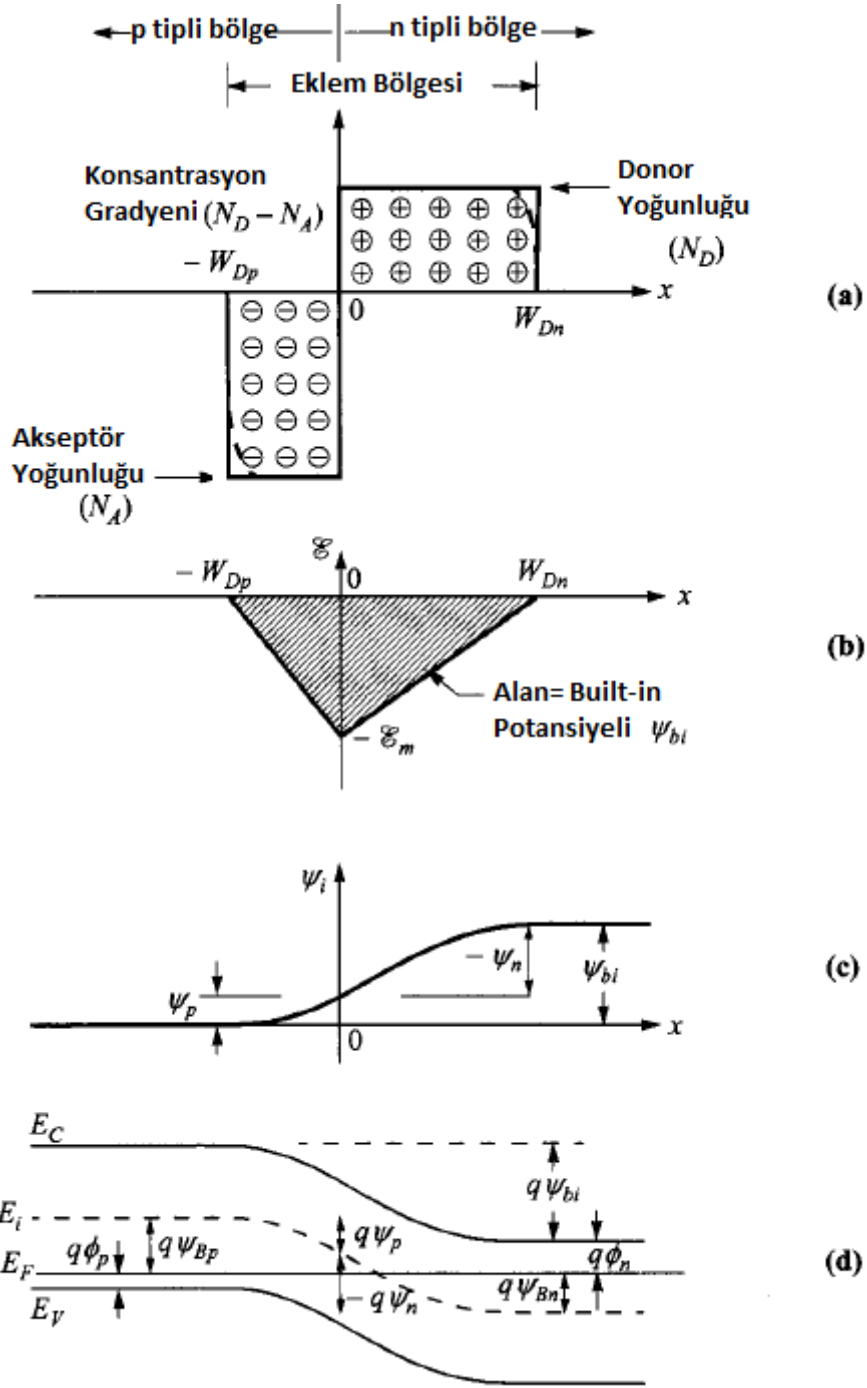
olurlarken p tipli yarı iletkende çoğunluk taşıyıcı olan boşluklar da arkalarında negatif yüklü akseptör atomlarını bırakarak azınlık taşıyıcı oldukları n tipli bölgeye doğru difüze olurlar.



Şekil 3.6 P-N eklem oluşum süreci

Yayılan bu elektron ve boşluklar rekombine olurlar. Bu durumda geride yalnızca pozitif ve negatif yüklü iyonize olmuş katkı atomları kalır. Elektron ve boşlukların difüzyon uzunlukları rekombine olmadan önce aldıkları yoldur ve genelde bu rekombinasyon her iki yarı iletkenin eklem bölgesi civarında gerçekleşir.

Yayıma sürecinde eklem bölge civarının n tipi yarı iletken kısmında pozitif yüklü donör iyonlarının oluşturduğu pozitif bölge, p tipi yarı iletken kısmında ise negatif yüklü akseptör iyonlarının oluşturduğu negatif bir bölge oluşur. Bu nedenle, pozitif bölgeden negatif bölgeye doğru güçlü bir iç elektrik alan oluşur. İç elektrik alan azınlık taşıyıcıları eklem bir tarafından diğer tarafına sürükler, böylece p tipi yarı iletken n tipi yarı iletken doğru elektronların, n tipi yarı iletken p tipi yarı iletken doğru da boşlukların sürüklenme akımı oluşur. Difüzyon süreci çoğunluk taşıyıcılar etki ederken, iç elektrik alan azınlık taşıyıcılara etki etmektedir. Dolayısıyla sürüklenme akımlarıyla difüzyon akımları eşit ve birbirine zıt doğrultuda olduğundan termodinamik dengeye ulaşıldığında, eklem net akım sıfır olur. Termodinamik dengeye ulaşıldığında, p ve n bölgeleri boyunca Fermi seviyesi aynı hizaya gelir. Aşağıdaki şekilde pn eklem oluşumu basamaklarıyla gösterilmiştir [43].



Şekil 3.7 Termal dengedeki p-n eklemi. Şekilde (a) eklem bölgesini (b) elektrik alan dağılımını (c)  $\psi_{bi}$  built-in potansiyelini göstermek üzere potansiyel dağılımını (d) ise enerji bant diyagramını göstermektedir [43].

Yarı iletkenler de katkı konsantrasyonu arttıkça eklem bölgesinin kalınlığı azalmaktadır. Bu bölgede serbest taşıyıcı sayısı az olduğu için direnci büyüktür. Bir sonraki bölümde fotovoltaik hücrelerde pn eklem anlatılmıştır.

### FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN GELİŞİM SÜRECİ VE SINIFLANDIRILMASI

Fotovoltaiklerin tarihi 19.cu yüzyıla kadar gider. Fotovoltaik hücrelerin temelinde fotovoltaik etki yatar. Elektot ve elektrolit arasında bulunan bir ekleme ışık düştüğünde voltaj üretilmesine fotovoltaik etki denilir. Bu etki ilk olarak 1839 yılında Bequerel tarafından bulundu. Adından değişik katıhal devrelerde benzer etkiler bildirilmeye başlandı. İlk fotovoltaik devre Fritts tarafından 1883'de ince metal alttaşa eritilmiş Se 'un kaplanması ve üzerine de Au metal kontak yapılmasıyla hazırlandı. Modern fotovoltaik endüstrisi ise 1954'de Amerikadaki Bell Laboravuarlarında oda ışığının pn eklem üzerine düşünce voltaj elde edildiğinin keşfedilmesiyle hız kazandı. Bir yıl içerisinde Si pn eklem güneş gözesinin verimini %6'ya kadar çıkartabildiler. Aynı yıl, yine Amerikada bulunan Wright Patterson Air Force Base'den bir grup  $Cu_2S/CdS$  ince film heteroeklem güneş gözelerinde %6'lık verim elde ettiler. Bir yıl sonrasında ise RCA Lab'ı (ABD) GaAs pn eklem güneş gözelerinde %6'lık verimi rapor etti. 1960 larda Prince, Loferski, Rappaport ve Wysoski, Shockley (Nobel ödüllü) ve Queisser pn eklemlerin temeli, verime etki eden bant aralığı, gelen ışığın spektrumu, sıcaklığı ve termodinamiği ile ilgili pek çok makale yayınladı. CdTe ince film güneş gözelerinde de %6'lık verim elde edildi. Bu arada Amerika uzay ile ilgili çalışmalarında Si fotovoltaik hücreleri kullanmaya başladı. Uzay, radyasyon etkisiyle ilgili çalışmalar ve radyasyona daha dayanıklı Li katkılı Si bazlı devreler fotovoltaiklerin öncelikli çalışma alanlarındandı. 1970'de SSCB'deki Ioffe Enstitüsünden Alferov (Nobel ödüllü) GaAlAs/GaAs güneş gözesi ile yeni bir devre yapısı ortaya koydu. GaAs güneş gözeleri yüksek verimleri ve uzaydaki radyasyona karşı dirençli olması nedeniyle ilgi odağı olmuştur. 1973 yılı fotovoltaik hücreler için hem teknik yapı olarak hem de nanoteknik alanlarda dönüm noktası olmuştur. En etkileyici gelişme ise 1973'de kısa dalga boyunda %30 verimle çalışan "viyole hücre" nin geliştirilmesidi. Bu sıralarda GaAs heretoeklem hücreler de IBM %13 verime ulaşıldı. Asıl dönüm noktası 1973'de Cherry Hill Konferansında (New Jersey, ABD) gerçekleşti. Devlet adamları ve bilim insanlarının buluşmasıyla fotovoltaiklerin sahip oldukları potansiyeller, yenilenebilir enerjiye katkıları konuşuldu. Ardından pek

çok endüstri kuruluşu ve devlet yenilenebilir enerjiye özellikle de güneş enerjisine yoğunlaştı. Bazı bilim insanlarına göre bu fotovoltaiklerin altın çağının başlangıcı sayıldı. 1974’de Alan Heeger, Alan Mcdiarmid ve Hideki Shirkawa yarı iletken polimerleri keşfetti ve 1979’da Tang isimli bilim adamının iki katlı organik fotovoltaik hücreleri oluşturmasıyla organik güneş gözeleri de fotovoltaik piyasasına girmiş oldu.

1980’lere gelindiğinde fotovoltaik endüstrisi hareketlenmeye başladı. Si dilim pn eklem fotovoltaikler ABD, Japonya ve Avrupada üretilmeye başlandı. Üniversitelerde veya endüstri laboratuarlarında yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve bazı pilot bölgelerde geliştirilen fotovoltaik hücrelerin ilk denemeleri kullanılmaya başlandı. Şirketler  $1\text{cm}^2$ ’lik alanlarda a-Si ve  $\text{CuInSe}_2$  gibi ince film fotovoltaik hücrelerde verimi %10’un üzerine çıkartmayı başardılar. Ancak alan arttıkça verim aynı oranda artmadı.

1990’larda Amerika-Japonya iş birliğiyle roll-to-roll üçlü pn eklem a-Si gözesi yapıldı. 1994’lerde artık pahalı Si dilimler yerine Si şeritler kullanılmaya başlandı. Akabinde Japonya PV endüstrisinde yaptığı c-Si modüller ve ince film fotovoltaikler üzerinde yapılan çalışmalarla yeni devre tasarımları, geliştirilen yeni malzemeler fotovoltaik hücrelerin pazarında yeni boyutlar kazandırdı [45].

Bugün ise fotovoltaik hücreler ile ilgili çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu konuyla ilgili araştırma konularının amacı aşağıdaki listede verilmiştir.

- Daha ince güneş gözeleri yaparak daha az yarı iletken kullanmak
- Daha az saf ve daha ucuz yarı iletken kullanmak.
- Verimi yükseltmek
- Fotovoltaik hücre üreten fabrikalardaki atıkları azaltmak ve aynı oranda kullanılan malzemeyide azaltmak
- Fiyatı arttırmadan güneş hücrelerindeki güneş hücresi akısını arttırmak yada optik kayıpları azaltmak. Böylece daha az yarı iletken malzeme kullanmak
- Güneş ışığı kullanımını arttırabilmek
- Güneş gözesi yapım aşamalarını daha da basitleştirmek (bu fabrikasyon fiyatını düşürürken kazancı arttıracaktır) ve kullanılan cihazların fiyatını düşürmek

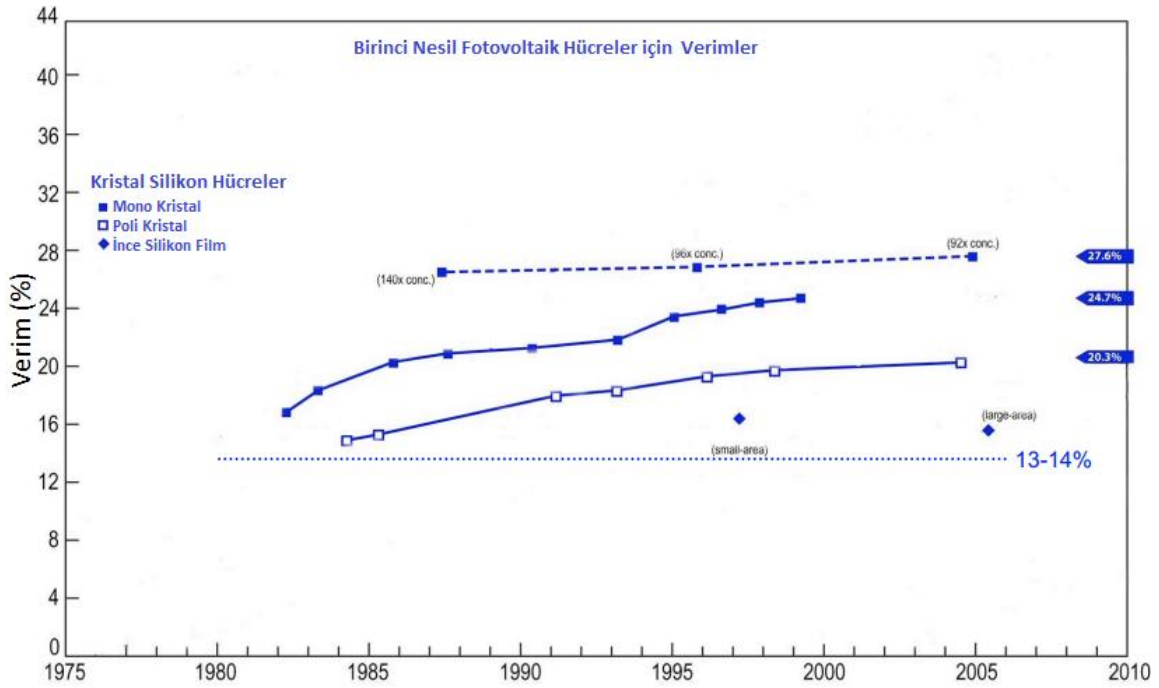
Fotovoltaiklerle ilgili yapılan çalışmaların temelinde maliyeti düşürmek veya verimi arttırmak üzere iki ana hedef vardır [45].

Gelişim süreçlerine göre fotovoltaik hücreler 3 sınıfa ayrılabilir.

#### 4.1 Birinci Nesil Fotovoltaik Hücreler

Kristal silisyum hücreler bu sınıfa dahildir. Geniş yüzeylere kaplanabildikleri için güneş gözesi piyasasında en yaygın olarak kullanılan hücrelerdir. Fotovoltaik hücre sektörünün %86'sı birinci nesil fotovoltaik hücreler oluşturmaktadır.

Bu hücreler kristal silikon kullanılarak tek katmanlı p-n eklem olarak hazırlanırlar. Bell Laboratuvarında yapılan ilk fotovoltaik hücre de silikon kullanılarak yapılmıştır. Silikon fotovoltaik hücrelerde verim yüksektir çünkü geniş bir bölgede güneş ışığını absorblar ve mobilitesi yüksektir. Bu nedenle yarı iletken teknolojisinde silikonun önemi oldukça büyüktür. Ancak silikonu kullanıma hazır hale getirmek pahalı süreçler gerektirmektedir. Bu da yeni arayışları beraberinde getirmektedir.



Şekil 4.1 NREL (National Renewable Energy Labrotory) 2010 yılı verilerine göre kristal silikon hücrelerinin verimleri gösterilmiştir.

Özetle yüksek verime, yüksek mobiliteye ve geniş güneş spektrumuna sahip olması avantajları arasındayken pahalı teknolojilere ihtiyaç duyulması, yüksek enerjili fotonların enerjisinin büyük bir bölümünün ısı olarak harcanıp kaybolması dezavantajları arasındadır.

## 4.2 İkinci Nesil Fotovoltaik Hücreler

İnce film fotovoltaik hücreler bu sınıfa dahildir. Bu güneş gözeleri yarı iletkenin ince film olarak kaplanmasıyla hazırlanır. İnce film kullanarak hücre yapımında ihtiyaç duyulan yarı iletken malzeme miktarı azaltılarak fotovoltaiklerin fiyatı düşürülmesi sağlandı. İlk ince film fotovoltaik hücreler yüksek verim elde etmek için çok katlı eklem fotovoltaik hücreler olarak yapıldı. Bugün hala hem fiyatı düşürebilecek hem de verimi yükseltebilecek pek çok teknoloji ve yarı iletken malzeme araştırılmaya devam etmektedir.

Aşağıda bazı ikinci nesil fotovoltaik hücreler ve özellikleri sıralanmıştır.

- Amorf Silikon Fotovoltaik Hücreler;

Metal üzerine hazırlanırlar.

Geniş alanlara kaplanabilir.

Kristal silikona benzer şekilde p tipi veya n tipi şeklinde katkılanabilir.

Bant aralığı yaklaşık olarak 1.7 eV'dur.

- Poli-Kristal Silikon Hücreler

Amorf silikon hücrelerden en önemli farkı mobilitelerinin yüksek olmasıdır.

Bu malzemeler elektrik alandan ve ışıktan zarar görüp bozulmazlar.

Bant aralıkları yaklaşık olarak 1.1 eV'dur.

Bu hücreler de ilk olarak yüksek verim elde etmek amacıyla tasarlanmışlardır.

- Kadmiyum Tellür (CdTe) Fotovoltaik Hücreler

Cam üzerine hazırlanırlar.

Kadmiyum - tellür kristalinin çinko zincir ile birleşiminden oluşan kristal yapıdır.

Genellikle p-n eklem oluşturmak için kadmiyum sülfür (CdS) ile birlikte kullanılır.

Silikondan daha ucuzdur ancak verimi daha düşüktür.

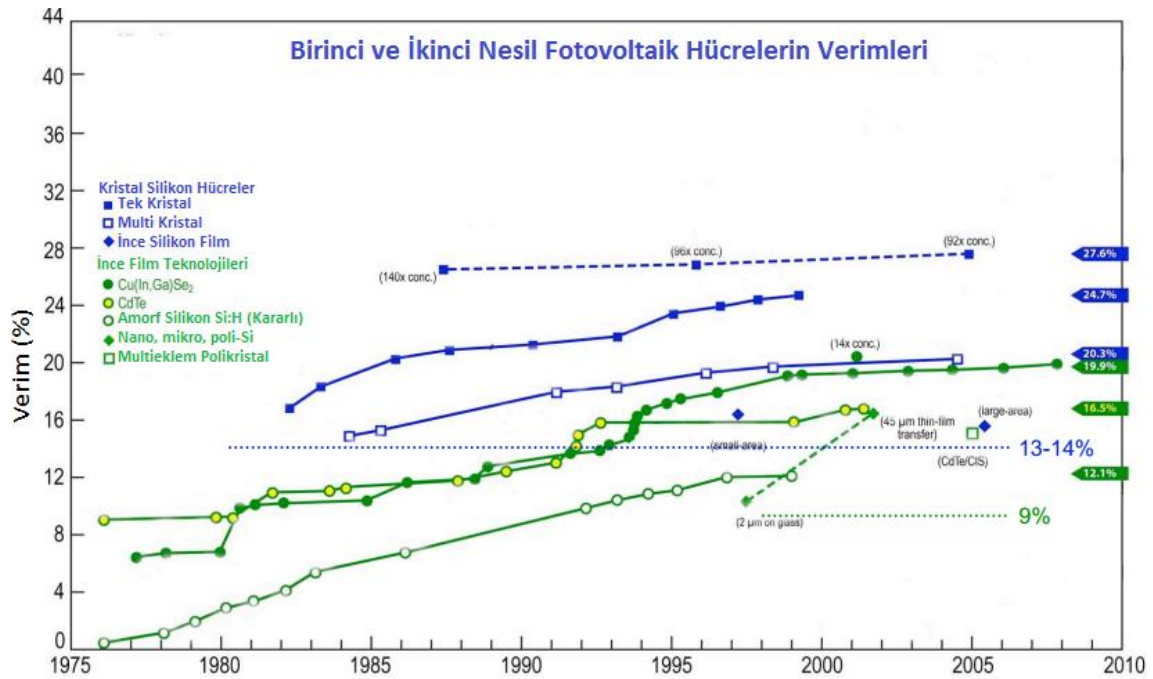
Bant aralığı yaklaşık olarak 1.58 eV'dur.

- Bakır İndium Galyum Diselenit (CIGS) Alaşım Fotovoltaik Hücreler

Hem cam üzerine hem de metal üzerine hazırlanabilirler.

Heteroeklemden daha karmaşık bir yapıya sahiptirler.

Bant aralığı yaklaşık olarak 1.38 eV'dur.



Şekil 4.2 Hem birinci nesil hem de ikinci nesil fotovoltaik hücrelerin birlikte karşılaştırılarak verim grafikleri verilmiştir.

Özetle daha az malzeme kullanılması, fiyatlarının düşük olması, esnek altlıklar üzerine hazırlanabilmesi ve yeni teknolojilere açık olması avantajları arasındayken silikon fotovoltaiik hücrelere göre veriminin düşük olması, amorf silikonun kararlı olmaması ve zehirli atık çıkartması dezavantajları arasındadır.

### 4.3 Üçüncü Nesil Fotovoltaik Hücreler

Bu tip hücreler diğer yarı iletkenlere göre daha farklı hücrelerdir. Diğer hücrelerdeki gibi p-n ekleme gerek duyulmamaktadır. Aşağıda bazı üçüncü nesil fotovoltaik hücreler ve özellikleri sıralanmıştır.

- Nano Kristal Fotovoltaik Hücreler

Nano kristal kaplı silikon alttaşlar üzerine hazırlanırlar. Bu silikon alttaşlar üzerinde nanokristaller veya kuantum noktalar (dot) mevcuttur. Kuantum noktalar da iletkenlik bandında elektronların, valans bandında boşlukların hapsedildiği yarı iletken yapısına sahiptirler.

İlk olarak kurşun selenit (PbSe) yarı iletkenler ardından da kadmiyum tellürit (CdTe) yarı iletkenler kullanılmıştır.

Nanokristaller ince film şeklinde dönel kaplama (spin coating) yöntemiyle kaplanırlar. Bu da dönme sırasında bir miktar malzemenin harcanmasına neden olmaktadır.

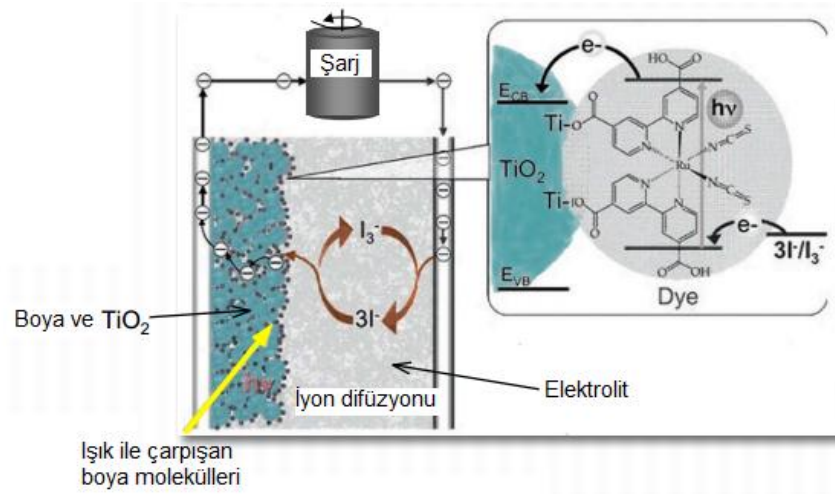
Diğer hücelere göre daha yüksek akım potansiyeline sahiptir.

- Fotokimyasal Fotovoltaik Hücreler

Yarı iletken fotoanot ve elektrolit içerisine daldırılmış metal katot arasında elektron-boşluk çiftinin oluşmasıyla elektrik elde edilir.

Yük ayrımı sadece yarı iletkende değil elektrolit içinde de meydana gelir [47].

Grätzel Hücreleri boya duyarlı hücrelerdir, nano gözenekli  $\text{TiO}_2$  elektrotlar, organik ve inorganik boyalar, inorganik tuzlar ve metalik katalizörlerden oluşur. Aşağıdaki şekilde Grätzel tipi bir hücreye ait çalışma prensibi verilmiştir.



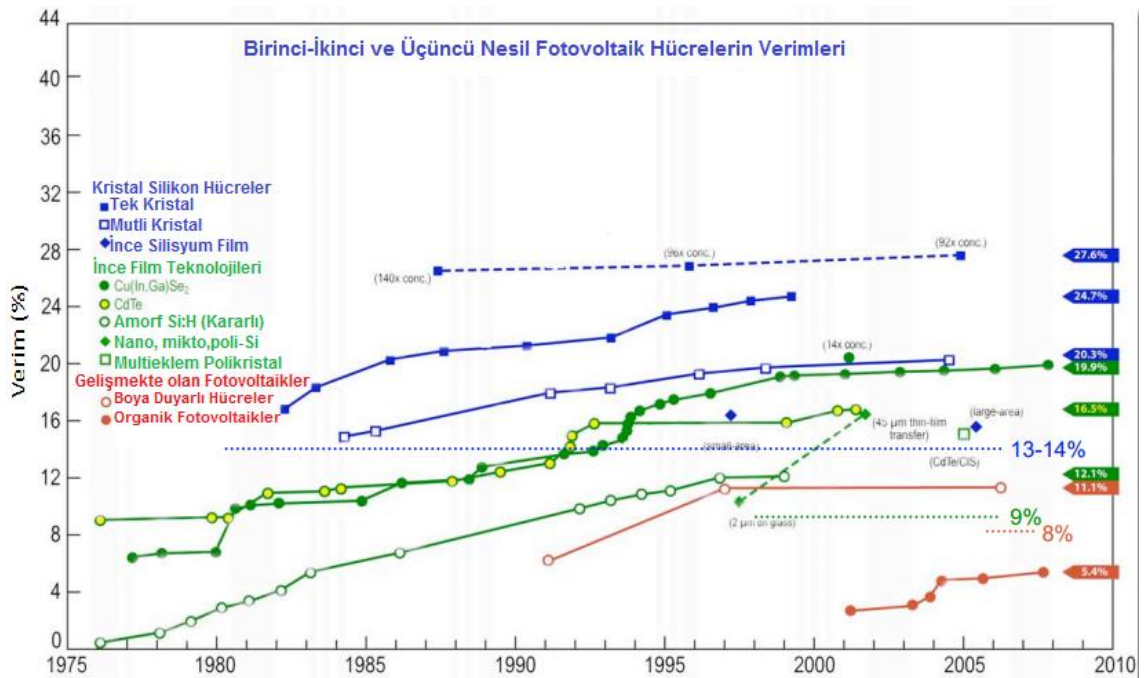
Şekil 4.3 Grätzel tipi hücre

Bir foton soğrulduktan sonra boya molekülündeki uyarılmış bir elektron  $\text{TiO}_2$ 'in iletkenlik bandına geçer ve  $\text{TiO}_2$  ağı üzerinden kontağa yayılır. Yükseltgen boya molekülü sıvı elektrolit redoks çiftinden bir elektron sağlanmasıyla indirgenir. Bu fotovoltajik dönüşüm sistemi geniş bant aralıklı bir yarı iletkenin yüzeyine tutunmuş moleküler soğurucu (boya) ile gelen fotonların değerlendirilmesine dayanır. Düz bir düzlem üzerindeki tek tabaka boya gelen ışığın sadece çok küçük kısmını soğurabilir, pürüzlü yüzeylerde soğurma daha fazla olur. Bu durumda oksit yüzey ile boya arasındaki ara yüzeyi genişletmek gerekir. Bu ise nanoyapılı ve gözenekli bir elektot yapımı ile mümkün olur. Böylelikle fotoaktif yüzey arttırılmış olur. Boya ile duyarlaştırma geniş bant aralıklı gözenekli  $\text{TiO}_2$  iç yüzeyinin gelen ışığı soğuracak özel boya molekülleri ile kaplanmasıyla elde edilir. İdeal bir boya gelen ışığı soğurabilmeli ve uyarılmış elektronları oksit yarı iletkenin iletkenlik bandına geçirebilmelidir. Bu prensipte çalışan fotovoltajik hücreler laboratuvar ortamında % 11, modüllerde % 5 -7 verime sahiptirler [48].

- Katıhal Boya Duyarlı Hibrit Fotovoltaik Hücreler;

Bu tür güneş gözelerinde sıvı elektrolit yerine p tipli bir yarı iletken yada organik boşluk ileten malzemeler kullanılmaktadır. Böylece sıvı elektrolitin sızması veya buharlaşması sorunu ortadan kaldırılmış olur. Organik boşluk ileten malzeme boyadan boşlukları iletebilecek durumda olmalıdır. Görünür bölgede ışığı soğurmamalı yada soğuracaksa boyanın elektronu  $TiO_2$  elektrodunun iletkenlik bandına iletebilecek kadar hızlı olmalıdır [48].

- Polimer Fotovoltaik Hücreler; Organik fotovoltaik hücreler olarak da adlandırılırlar. Işıktan elektrik elde edilmesi elektron akseptör olarak davranan organik molekül ve organik polimer arasındaki hacim heteroekleminde meydana gelir. Bu fotovoltaik hücreler bir sonraki bölümde anlatılacaktır.



Şekil 4.4 Birinci, ikinci ve üçüncü nesil fotovoltaik hücreler için verimleri kıyaslayarak göstermektedir.

Özetle; polimer fotovoltaiklerin çözelti bazlı olması, fiyatlarının diğer malzemelere göre oldukça düşük olması, Grätzel hücrelerinin düşük aydınlanma şartları altında bile çalışması, esnek altlıklar üzerine hazırlanabilmeleri, çevre dostu olmaları ve yeni teknolojilere açık olmaları üçüncü nesil fotovoltaik hücrelerinin avantajlarındandır. Bunun yanı sıra silikon hücrelere göre verimlerinin düşük olması, polimer fotovoltaiklerin zamanla çevresel etkilerden etkilenip bozulması, dolayısıyla silikon hücrelere göre çok uzun ömürlü olması üçüncü nesil fotovoltaik hücrelerin dezavantajlarındandır [47].

### ORGANİK FOTOVOLTAİK HÜCRELER

Geçen yüzyılın ortalarında transistörün bulunmasıyla, Si yada Ge gibi inorganik yarı iletkenler metallere daha fazla elektronikte kullanılmaya başlandı. Aynı zamanda, 20. yüzyılın sonlarında vakum tüplü elektronik devrelerin geliştirilmesi bugün kullandığımız yarı iletken mikroelektronik temellerini attı. 21. yüzyılın başlarında ise mikroelektronik devreler yerlerini yeni bir malzeme sınıfı olan ve yaygın olarak 'organik yarı iletkenler' olarak bilinen malzemenin kullanımıyla hazırlanan organik elektronik devrelere bırakmaya başladı. Günümüzde organik elektronikle esnek yüzeylere, plastik yüzeylere, daha ucuza mal olan devreler entegre etmek mümkündür.

Aslında organik elektronik sanıldığı kadar yeni bir alan değildir. Antresen kristallerinin fotoiletkenliğiyle ilgili ilk çalışmalar 20. yüzyılın başlarına kadar gitmektedir. Takibinde 1960'larda elektrolüminesansın bulunmasıyla moleküler kristallerdeki çalışmalar hız kazanmıştır. Elektrolüminesans moleküler kristallerdeki optik uyarıma ve yük taşıyıcı transferine ışık tutmuştur.

1974 yılında Alan Heeger, Alan McDiarmid ve Hideki Shirakawa'nın konjuge polimerlerde kontrollü katkılamayla yarı iletken polimerleri keşfetmesi organik yarı iletkenlere yeni bir boyut kazandırdı ve bu çalışmalarından ötürü 2000 yılında Nobel Kimya ödülünü aldılar.

Katkılanmamış organik yarı iletkenlere ilgi 1980'lerde artmaya devam etti çünkü transistör gibi elektronikte yaygın kullanılan devreler p ve n tipli malzemelerin birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Yaklaşık olarak 15 yıldır hem akademik hemde endüstrideki araştırma laboratuvarlarındaki çalışmalar organik yarı iletkenler ile yapılan OLED (organik ışık yayan diyot), OPV (organik fotovoltaik hücre), OFET (organik alan etkili transistör)'ler üzerine yoğunlaşmıştır.



Şekil 5.1 Sırasıyla organik ışık yayan diyot(OLED), organik alan etkili transistör (OFET) ve organik fotovoltaiik hücre (OPV) gösterilmiştir.

Organik malzemelerin kimyasal özellikleri kolayca değiştirilebilir. Bu şekilde malzemelerin soğurma aralığının güneş spektrumuna daha uygun hale getirilerek daha fazla foton enerjisi soğurabilmesi sağlanmaktadır.

İnorganik fotovoltaiik hücrelerde verim organik hücrelere oranla yüksektir. Buna rağmen organik malzemeler ile hazırlanan organik fotovoltaiiklerin esnek altlıklar üzerine kaplanabilmesinden dolayı geniş alanlarda kullanılması, hafif ve ucuz olmaları, kolayca üretilip kimyasal özelliklerinin kolayca değiştirilebilir olması onları fotovoltaiik hücre piyasasında cazip kılmaktadır [49].

Bir sonraki bölümde organik fotovoltaiik hücrelere dair sırasıyla kullanılan organik malzemeler ve özellikleri, devre tipleri ve çalışma prensipleri anlatılmıştır.

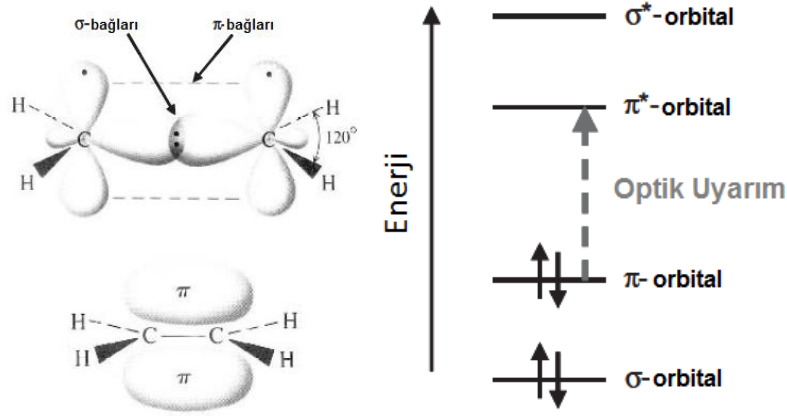
### 5.1 Organik Fotovoltaiik Hücrelerde Kullanılan Malzemeler

Organik yarı iletkenler iki sınıfa ayrılabilir: Islak işleme tabii ve vakum işleme tabii malzemeler. Vakum işleme tabii malzemeler  $C_{60}$  fulleren gibi küçük organik moleküllerdir. Çözelti bazlı malzemeler ise sıvı kristaller, boyalar ve polimerlerdir [26]. Polimerler genelde toz halinde bulunan maddelerdir. Uzun makro molekül zincirlerden oluşurlar. En çok kullanıldığı üretim teknolojisi çözelti bazlı işlemlerdir.

İki tür polimer vardır: konjuge ve konjuge olmayan polimerler. Konjuge polimerler ard arda gelen tekli ve çiftli bağlardan oluşurken konjuge olmayan polimerlerde bağlarda bu sıra bulunmaz. Konjuge polimerler iletken polimerlerdir ve konjuge polimerler de iki tür bağ vardır:  $\sigma$  (sigma) ve  $\pi$  (pi) bağları.

Bağ oluşması için atomik orbitallerin çakışması gerekmektedir. Yarı iletkenler arasında görülen bağ kovalent bağdır ve kovalent bağın oluşması için en dış yörüngede dayanıklı bir orbital bulunmalıdır. Bu orbitallerde spinleri zıt elektronlar bulunması gerekmektedir. Bağ iki elektron bulutunun çakışmasıyla oluşmaktadır.

Atomik orbitallerden iki tane S orbitalinin  $\sigma$  bağlanmasıyla  $\sigma$  bağı oluşur ve  $\sigma$  bağı küreseldir. P orbitalleri ise eksene göre simetrik olan orbitallerdir. P orbitalleri ise küresel değildirler ve birbirinin aynısı olan ve lineer kombinasyonu ile elde edilen  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  orbitalleri vardır. İki P orbitalinin  $\pi$  bağlanmasıyla da  $\pi$  bağı oluşur [26].



Şekil 5.2 Soldaki şekil en basit eten için konjuge  $\pi$  elektron sistemini sağdaki şekil ise  $\pi$  konjuge molekülün enerji seviyesini göstermektedir. Geçişler  $\pi$  ve  $\pi^*$  orbitalleri arasında gerçekleşmektedir.

Sigma bağları ile kıyaslandığında pi bağları zayıf bağlardır. Bu yüzden konjuge moleküllerin  $\pi$  ve  $\pi^*$  orbitalleri arasındaki geçiş için en küçük elektronik uyarım yaklaşık olarak 1.5-3 eV arasındadır.

Polimerler ile küçük moleküllerin farkı polimerler büyük moleküller oldukları için buharlaştırılmazlar. Küçük moleküller genellikle bir yüzeye kaplanırken süblimasyonla gaz fazda yada buharlaştırma yöntemleriyle kaplanırlar. Konjuge polimerler ise bir çözelti içerisinde çözünüp dönele kaplama (spin coating) yada baskı (printing) teknikleri ile ince film halinde kaplanırlar [49].

## 5.2 Organik Yarı İletkenlerin Temel Özellikleri

Organik yarı iletkenlerde inorganik yarı iletkenlere göre bağ farklılık göstermektedir. Organik moleküller kristaller van der Waals bağlı katılardır, Si veya GaAs gibi kovalent bağlı inorganik moleküllere göre van der Waals bağları daha zayıf bağlardır. Organik ve inorganik moleküllerdeki sertlik gibi mekanik veya erime noktası gibi termodinamik özelliklerinin farklılık göstermesinin sebebi bağların farklı olmasıdır. Organik moleküllerde komşu moleküller arasındaki elektronik dalga fonksiyonunun zayıftır, dolayısıyla bu optik özellikleri ve yük taşınmasını etkilemektedir [49].

### 5.2.1 Optik Özellikler

Elektronik delokalizasyonun zayıf olmasının sonucu olarak herhangi bir dış uyartım sonucu oluşan eksiton (elektron- boşluk) çifti genellikle bir molekül üzerinde lokalize olur. Bu yüzden de eksiton çifti birbirlerine yaklaşık olarak 0.5-1 eV'luk bir enerjiyle bağlıdır. Fotovoltaik uygulamalarda pozitif ve negatif yük taşıyıcı elde etmek için yani elektron ile boşluğu birbirinden ayırmak için bağlanma enerjisi kadar enerji gerekmektedir [49].

### 5.2.2 Yük Taşınması Özellikleri

Organik yarı iletkenlerde yük iletimi için çeşitli modeller vardır bunlardan en önemli ikisi: bant taşıma ve sıçrama (hopping) mekanizmalarıdır. Bant taşıma sistemi tipik olarak yüksek olmayan sıcaklıkta, yüksek saflıktaki moleküler kristallerde görülür. Ancak, elektronun delokalizasyonu düşük olduğu için bant aralığı inorganik yarı iletkenlere göre daha küçüktür ( oda sıcaklığında birkaç kT). Bu yüzden oda sıcaklığında moleküler kristallerin mobiliteleri 1-10 cm<sup>2</sup>/Vs kadardır. Bant tipi taşıma sıcaklığa aşağıdaki gibi bağlıdır [49].

$$\mu \propto T^{-n} (n = 1,2..) \quad (1)$$

Bant tipi taşıma düşük sıcaklıklara inildikçe etkisini gösterir sıcaklık yükseldikçe etkisini azaltır. Ayrıca tuzakların olduğu durumlarda bu davranıştan sapmalar görülebilir.

Amorf organik katılarda sıçrama tipi taşıma mekanizması ağır basar. Sıçrama tipi taşımada mobilite daha düşüktür (en iyi ihtimalle 10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/Vs). Mobilite taşıma tipinde olduğu gibi sadece sıcaklığa değil hem sıcaklığa hem de uygulanan elektrik alanına bağlıdır [49].

$$\mu (F, T) \propto \exp \left( -\frac{\Delta E}{kT} \right) \cdot \exp \left( \beta \sqrt{F} / kT \right) \quad (2)$$

Organik fotovoltaik hücre malzemeleri üzerinde yapılan taşıma ve mobilite araştırmaları organik malzemelerin düzensizliği konusunda hemfikirler. Örgüye düzensizlik sokmak ve kristal simetrisini bozmak dalga fonksiyonlarının lokalize olmasına ve yasak enerji aralığında enerji durumlarının oluşmasına yol açar. Yük taşınımını karakterize eden en önemli parametre mobilitedir. En iyi durumda bile organik yarı iletkenlerin mobiliteleri inorganik fotovoltaik malzemelerin yük taşıyıcı mobilitelerinden daha düşüktür. Düşük mobilitenin sebebi, elektronik durumların bağımsız bir molekülün veya molekülün bir bölümü üzerinde lokalize olmasıdır [49].

Makroskopik ölçüde bir malzemenin içinden geçen akım yoğunluğu, n taşıyıcı yük yoğunluğu, u sürüklenme hızı,  $\mu$  mobilite ve F elektrik alan olmak üzere;

$$j = evn = en\mu F \quad (3)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus metallerde tam tersi olarak  $j$  ile  $F$  arasındaki ve yük taşıyıcı yoğunluğu ve mobilité birbirine lineer olarak bağılı değildir. Bu formüle göre elektrik alan dışında  $n$  ve  $\mu$  akımın büyüklüğüne etki eder. Bu da organik malzemelerin inorganik malzemelerden farkı özellikler sergilediğini gösterir.

Organik malzemelerde mobilité önemli derecede saflık derecesine bağılıdır. Bu yüzden malzemelerin hazırlanması veya büyütülmesi titizlikle yapılmalıdır [49].

İkinci parametre yük taşıyıcı yoğunluğudur.  $E_g$  bant aralığına ve  $N_0$  etkin durum yoğunluğuna sahip bir yarı iletkenin asal taşıyıcı yoğunluğu;

$$n_i = N_0 \cdot \exp(-E_g/2kT) \quad (4)$$

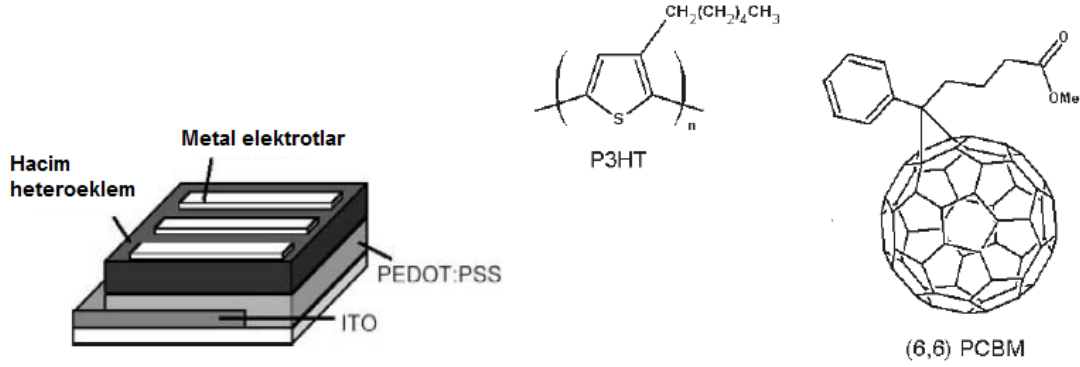
Organik bir yarı iletkenin oda sıcaklığında ortalama değerler için ( $E_g = 2.5$  eV,  $N_0 = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ) için  $n_i = 1 \text{ cm}^{-3}$  kadardır. Silisyumda ise ( $E_g = 1.12$  eV,  $N_0 = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  kadardır. Organik yarı iletkenlerin yeterince saf olsalar bile iletkenliklerinin düşük olduğu açıkça görülmektedir. Ancak organik yarı iletkenlerde iletkenliği arttırmanın pek çok yolu vardır. Bunlardan bazıları;

- Elektro-kimyasal katkılama
- Kontak ile yük ilave edilmesi
- Yüklerin foto-üretimi ve
- Alan etkili katkılama [49]

### 5.3 Devre Yapısı ve Özellikleri

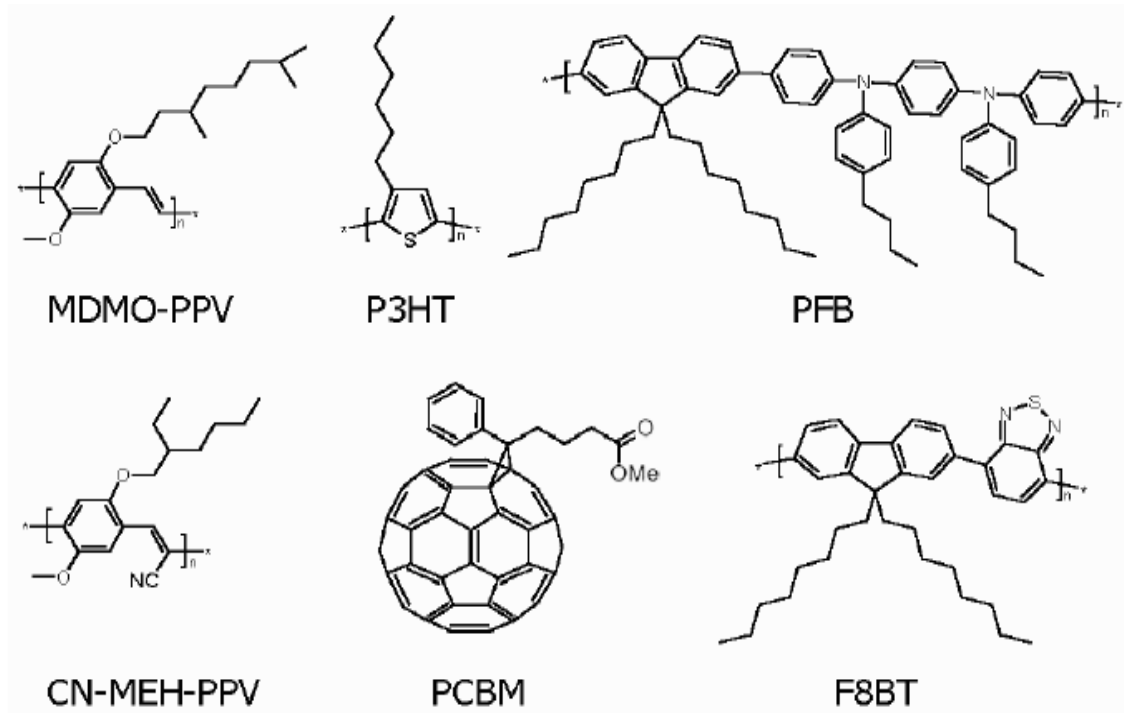
Organik fotovoltaiik hücreler iş fonksiyonları farklı iki metal elektrot arasına, biri donör (elektron veren) diğeri akseptör (elektron alan) iki malzemenin sandviç edilmesiyle oluşur. Alt taban olarak saydam, iletken elektrotlar kullanılmaktadır (indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam ya da plastik altlıklar). ITO elektrotlar saydam ve iletkendir. ITO elektrot, kimyasal dağlama (etching) yöntemi kullanılarak yapılandırılabilir. Saydam, iletken alt taban üzerine polistren sulfonik asit (PSS) katkılanmış poli (etilen-dioksitiyofen) sulu çözeltiden kaplanır. Bu PEDOT:PSS tabakası, ITO elektrotun yüzey kalitesini iyileştirir ve de delik enjeksiyon veya ekstraksiyonuna yardımcı olur. Aynı zamanda bu elektrotun iş fonksiyonu, PEDOT tabakasının kimyasal/elektrokimyasal redoks reaksiyonlarıyla

değiştirilebilir. Aktif tabakalara (genellikle polimer-fulleren) ıslak işlem veya vakum kaplama tekniği uygulanır [26].



Şekil 5.3 Yukarıdaki şekilde organik fotovoltaiik hücrenin devre yapısı ve aktif tabaka olarak kullanılan malzemelerin kimyasal yapıları gösterilmiştir.

Aktif tabaka olarak kullanılan malzemelerden en iyi sonuç veren malzemelerden ikisi P3HT ve PCBM'dir. Fulleren türevi olarak bilinen PCBM bilinen en iyi N tipi malzemelerden biridir. Fotovoltaiik hücre sistemlerinde akseptör olarak görev yapar ve optik soğurması görünür bölgen altındadır. P3HT ise PCBM'e iyi uyum sağlayan, donör olarak görev yapan bir malzemedir. Aşağıdaki şekilde organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan bir takım polimerlerin kimyasal yapıları verilmiştir.



Şekil 5.4 Organik fotovoltaiik hücrelerinde kullanılan birkaç konjuge polimer ve fulleren türevinin kimyasal yapısı [26]

Delik ileten donör tipli polimerlerden en önemli üçü; MDMOPPV (poli[2-metoksi-5-(3, 7-dimetiloktiloksi)]-1, 4-fenilvinilen), P3HT (poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil) ve PFB (poli (9-9'-dioktilfluoren-co-bis-N-N'-(4-butilfenil)-bis-N-N'-fenil-1, 4-fenilendiamin)dir. Bunlar, CN-MEH-PPV (poli-[2-metoksi-5-(2'-etilhekziloksi)-1, 4-(1-siyanovinilen)-fenilen) ve F8TB (poli(9, 9'-dioktilfluoreneko-benzotiadiazol) gibi elektron ileten akseptör polimerlerle ve PCBM (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6, 6] C61) olarak adlandırılan çözünebilen C60 türeyle birlikte gösterilmişlerdir. Yan zincir çözünebilirliklerinden dolayı bu malzemeler çözelti bazlıdır ve polimerler de foto ve elektroluminesans özelliği göstermektedirler [26].

#### 5.4 Hazırlama Teknikleri

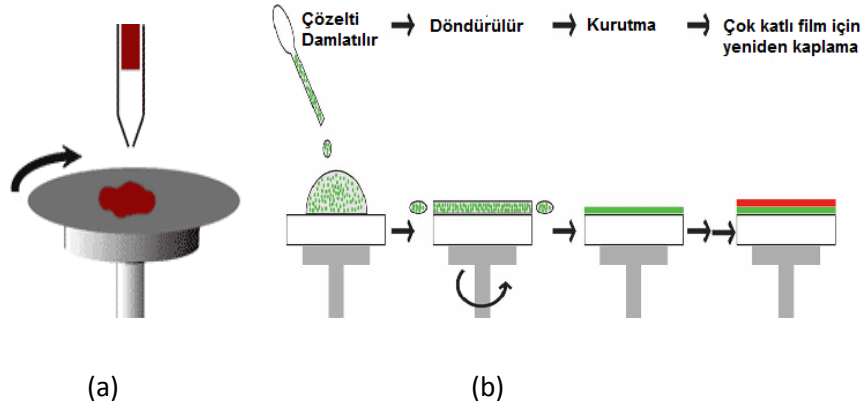
Organik fotovoltaiik hücreler için film hazırlanırken en yaygın olarak kullanılan metot vakum buharlaştırma ve çözelti bazlı metotlardır. Polimerler büyük moleküller olduğu için vakumda buharlaşmazlar, parçalanması yada süblimasyona uğraması için yüksek sıcaklık gerekmektedir. Bu yüzden pekçok polimer bazlı fotovoltaiik hücrelerde polimerler düşük sıcaklıklarda çözelti şeklinde hazırlanırlar. Konjuge yarı iletken polimerler için baskı yada kaplama yöntemleri kullanılır. Literatürde en sık kullanılan çözelti kaplama tekniklerinden bazıları (i) dönel kaplama (spin coater), (ii) bıçak ağzı ile kaplama (doctor blading), (iii) elek baskı (screen printing) ve (vi) püskürtmeli baskı (inkjet printing)'dir.

Dönel kaplama, bıçak ağzı ile kaplama ve elek baskı yöntemleri geniş yüzeylerde kaplama yapabilen tekniklerdir. Aynı zamanda bu yöntemler ucuz yöntemlerdir ve aranılan ucuz enerji için organik fotovoltaiik hücreleri diğer hücrelerden üstün kılar. Vakum buharlaştırma/süblimasyon yöntemi ile temiz bir şekilde küçük moleküller ile ince film kaplama yapılabilmektedir [50].

Aşağıda deney aşamasında laboratuvarında kullanılan dönel kaplama ve termal buharlaştırma yöntemi anlatılmıştır.

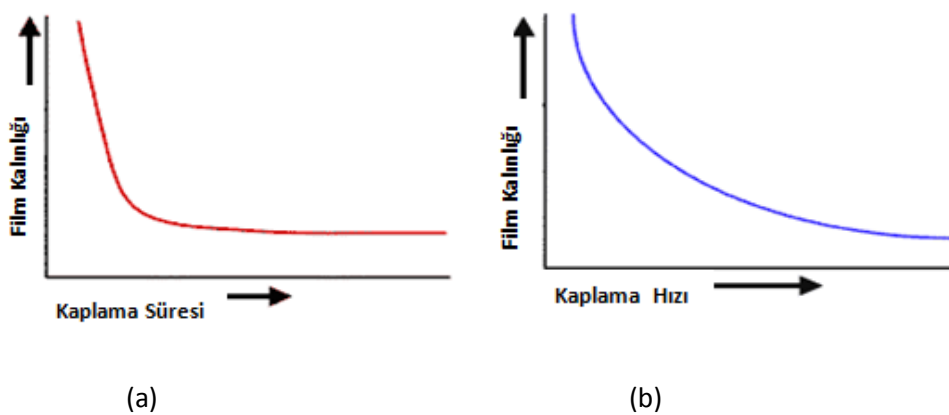
### 5.4.1 Dönel Kaplama Yöntemi İle Kaplama

Dönel kaplama yöntemi plaka üzerinde homojen film elde edilmesini sağlayan ince film yöntemlerinden birisidir. Tipik olarak çalışma prensibi bir çözelti damlasının bir altlığın merkezine damlatılması ve sonrasında altlığın yüksek hızda döndürülmesi esasına dayanır. İstenilen kalınlığa gelinceye kadar döndürülmeye devam edilir.



Şekil 5.5 (a) Dönemli kaplamanın çalışma prensibi ve (b) kaplama aşamaları ve film oluşumu verilmiştir.

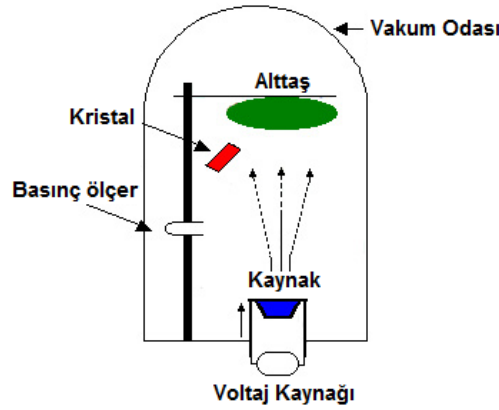
Çözeltinin damlatılmasında dinamik ve statik olmak üzere iki yöntem vardır. Statik damlatma çözelti dönel kaplamaya başlamadan önce alttaşın üzerine damlatılması, dinamik damlatmada ise alttaş dönerken çözeltinin üzerine damlatılmasıdır. Kaplamanın yapıldığı süre ve kaplama hızı yapılan filmin kalınlığını etkiler. Aşağıdaki grafiklerde kaplama hızı- süresi ile film kalınlığı arasındaki ilişki verilmiştir [51].



Şekil 5.6 (a) Kaplama süresi arttıkça ve (b) kaplama hızı arttıkça film kalınlığının azaldığını gösteren grafikler verilmiştir.

### 5.4.2 Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Kaplama

Bu yöntemde malzeme vakum altında termal bir ısı kaynağı ile buhar haline getirilir. Buhar haline gelen kaynak malzeme yukarıda bulunan alttaş üzerine yapışır. Kristal sayesinde kaplanan filmin kalınlığı okunur. İstenilen değere gelindiğinde ısıtıcı kapatılır, buharlaşma kesilir ve film kapması bitmiş olur. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha ucuzdur ancak geometrik kısıtlamalar nedeniyle büyük alanlara kaplama yapılamamaktadır. Kaynağın konulduğu potanın erime sıcaklığının yüksek ve eritilecek malzemenin de erime sıcaklığının düşük olması gerekir. Vakum altında kaplama yapıldığı için daha saf bir film elde edilir [52].

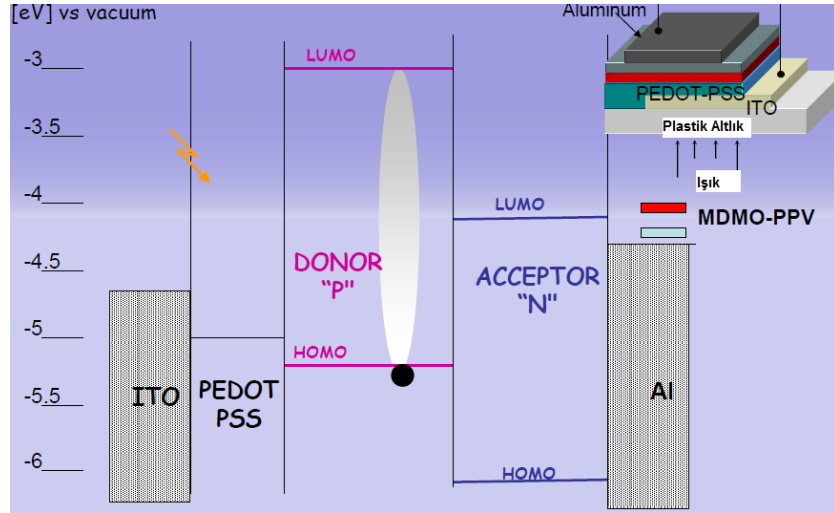


Şekil 5.7 Vakum odasının iç kısmını gösteren ve termal buharlaştırma yöntemi ile nasıl film kaplandığını gösteren şekil verilmiştir.

### 5.5 Çalışma Prensibi

Organik fotovoltaiik hücrelerin çalışma prensibi henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Ancak inorganik hücrelerdeki p-n eklem temel alınarak çalışma prensibine açıklık getirilir [26]. Organik fotovoltaiik hücrelerde ışığın elektriğe dönüşmesi dört basamakta gerçekleşir.

1. Eksiton (elektron- boşluk çifti) üretimi için fotonun soğrulması
2. Donör akseptör ara yüzeyinde eksiton difüzyonu
3. Eksitonların ayrılması
4. Ayrılan yüklerin uygun elektrotlarda toplanması



Şekil 5.8 organik fotovoltaiik hücrelerin çalışma prensibi ve devre yapısını gösteren şekil verilmiştir.

Organik malzemenin soğurma spektrumu fotovoltaiik hücrenin ışığa hangi aralıkta karşılık vereceğinin bir ölçüsüdür. Bu da polimerin ya da molekülün kimyasal yapısına bağlıdır. Birçok boya ve molekül kuvvetli soğurucudur. Eğer malzemenin bant aralığı içindeyse sadece birkaç yüz nanometre film, ışığın önemli bir kısmını soğurmaya yeterlidir.

Foto dönüşümde ilk önemli adım soğurmadır. Organik fotovoltaiik hücrelere ışık düştüğünde doğrudan serbest yük oluşumu gerçekleşmez ama eksiton adı verilen birbirine bağlı elektron-boşluk çifti oluşur. Konjuge polimerlerde yaklaşık olarak gelen ışığın %10 kadarlık bir kısmı ile serbest yük oluşur. Soğurma verimliliği malzemenin soğurma spektrumuna, kalınlığına ve aygıt tipine bağlıdır. Bağlı elektron-boşluk çiftini ayırmak için güçlü elektrik alana ihtiyaç duyulur. Ara yüzeyde potansiyel enerjideki ani değişimle güçlü elektrik alan oluşur ( $E = -\text{grad } U$ ). Oluşan elektrik alan ile eksiton çiftleri birbirinden ayrılır. Ayrıca dışarıdan uygulanan elektrik alan ile de eksitonları ayırmak mümkündür. Işıkla uyarılmış yük transferi, eksitonların yaşam süresi içinde ara yüzeye ulaşmasıyla gerçekleşir. Eksiton yayılma (difüzyon) verimliliği, eksiton difüzyon uzunluğu ve donör-akseptör ara yüzeyindeki morfolojiyle belirlenir. Eksiton difüzyon uzunluğu kalınlığa da bağlıdır. Eksiton difüzyon uzunluğu donör akseptör faz ayırım uzunluğu mertebesinde olmalıdır. Aksi halde eksitonlar ara yüzeye ulaşmadan ışımalı yada ışımasız olarak birleşebilirler. Eksiton difüzyon uzunluğu polimer ve inorganik yarı iletkenlerde genellikle 10-20 nm arasındadır.

Konjuge polimerler fulleren gibi elektron akseptörlerle birleştirilerek bağlı eksitonların serbest yük taşıyıcılarına dönüştürülmesi sağlanır. Ayrılan bu serbest yüklerin uygun elektrotlara ulaşması gerekmektedir. Uygun elektrotlara taşınma için kuvvete ihtiyaç vardır. Donör- akseptör eklemede elektron ve boşlukların kimyasal potansiyelinin gradyeni oluşur. Bu gradyen donörün doldurulmuş en yüksek moleküler seviyesi (HOMO) ve akseptörün doldurulmamış en düşük moleküler seviyesi

(LUMO) arasındaki farkla belirlenir. Gradyenin yarattığı iç elektrik alan maksimum açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) ile ilişkilidir ve yüklerin sürüklenerek taşınmasında etkilidir. Ayrıca, yük taşınması iş fonksiyonları farklı metallerin kullanılması ile yaratılan iç elektrik alanla da gerçekleşmektedir [50].

Organik yarı iletken ile metal elektrot arasında enerji bariyerinin olmaması yüksek yük toplama verimliliği sağlar. Eğer bu iki malzeme arasında enerji bariyeri oluştursa bunu engellemek için ilave bir malzeme daha kullanılır [26].

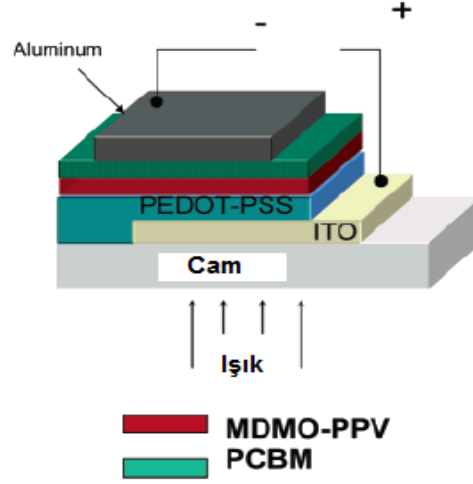
## **5.6 Devre yapıları**

### **5.6.1 Tek Tabaka Fotovoltaik Hücreler**

Tek tabaka heteroeklem devreler, p tipli ve n tipli yarı iletkenlerin sırasıyla birbirinin üstüne kaplanmasıyla elde edilir. Kaplama iş fonksiyonları farklı iki metal elektrot arasına yapılır. Elektrotlardan biri genellikle İTO (indiyum kalay oksit) iken diğeri devre geometrisine göre Au, Al veya Ag olabilir. Fotovoltaik devrelerde yaratılan eksiton çiftlerinin serbest yük taşıyıcılarına dönmesi gerekmektedir. Tek başına polimer içeren fotovoltaiklerde eksitonları ayırmanın tek yolu elektrik alandır. Basit metal-yalıtkan-metal (MIM) modeline göre devrede var olan yük taşıyıcılarının sayısı fazla değildir. Diğer taraftan eğer yarı iletken katkılanırsa bant bükülmesi oluşarak metal elektrotla yarı iletken ara yüzeyinde Schottky kontağı oluşacaktır. Bu durumda tüm devre boyunca elektrik alan sabit kalacaktır. Meydana gelen elektrik alan eksitonları ayırmaya yeterli olduğundan tek konjuge polimerli devrelerde Schottky devresi yük yaratılmasını arttıracaktır. Bu tip devrelerde eksitonlar sadece heteroeklemin ara yüzeyinin 10-20 nm kadarlık bir mesafesi içinde oluşturulurlar. Bu da arayüzeyden uzakta soğrulan fotonların kaybolmasına dolayısıyla da kuantum veriminin düşük olmasına neden olmaktadır. Filmlerin daha kalın kaplanması soğrulan fotonların arayüze gelmeden kaybolmasına dolayısıyla da düşük fotoakıma neden olmaktadır. Bu tip devrelerin verimi oldukça düşüktür.

### **5.6.2 İki Katlı Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler**

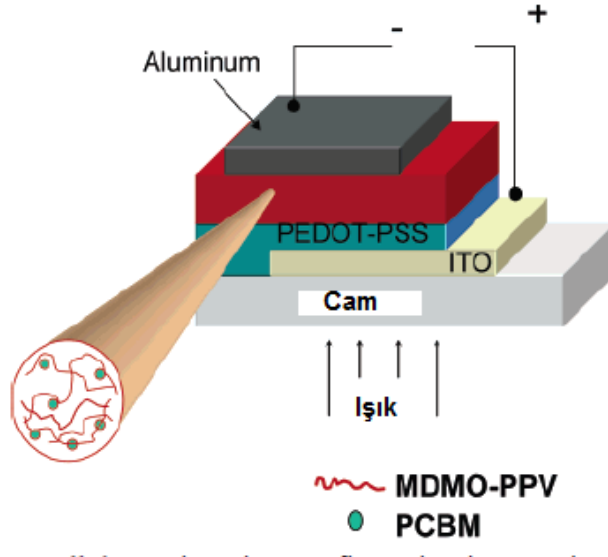
Tek tabaka fotovoltaik hücrelerde ortaya çıkan serbest yük yaratılması kısıtlılığını ortadan kaldırmak için donör-akseptör yaklaşımı üretilmiştir. İki katlı bir devrede, donör ve akseptör malzemenin üst üste sıkıştırılmasıyla elde edilir. Donör- akseptör arasındaki etkin etkileşim geometrik ara yüzeyde gerçekleşir. Konjuge polimer ve fulleren üzerine yapılan fotofizik çalışmaları konjuge polimerlerden fullerenlere ultra hızlı elektron transferi gerçekleştirdiğini göstermiştir. Bu tür devrelerde sadece güçlü elektrik alan olan yerlerdeki eksitonlar birbirinden ayrıldığı için verim düşüktür.



Şekil 5.9 İki katlı Heteroeklem fotovoltaik hücre [4]

### 5.6.3 Hacim Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler

Hacim heteroeklem fotovoltaik hücrelerde donör-akseptör malzemeler nanometre ölçeğinde iç içe nüfus eden bir ağ oluşturmak üzere karıştırılırlar. Bu yöntem ile p-n eklemi tüm hacme yayılarak temas alanı artırılır. Donör ve akseptör arasındaki faz ayrımı dolayısıyla morfolojiyi kontrol ederek iç içe nüfuz eden ağ oluşturması sağlanırsa hacimsel malzemenin içinde yüksek ara yüzeysel bölge elde edilir. Hacim heteroeklemlı aygıtlarda morfoloji kontrolünün kritik bir nokta olduğu açıktır. Faz ayrımının derecesi çözücü seçimine, buharlaşma hızına, çözünürlüğe, donör ve akseptör malzemelerin karışabilirliğine vs bağlıdır [53].

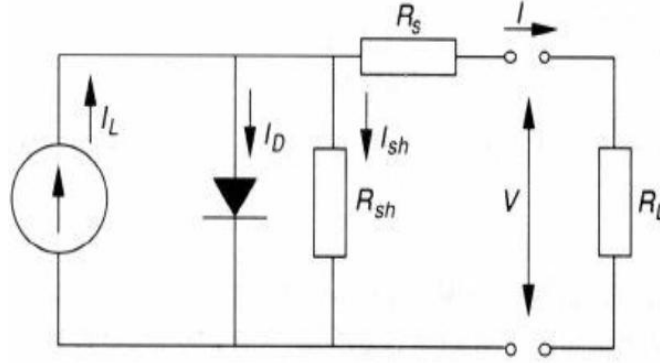


Şekil 5.10 Hacim heteroeklem fotovoltaik hücre [4]

## 5.7 Fotovoltaik Hücre Karakterizasyonu

### 5.7.1 Fotovoltaik Hücrelerin Eşdeğer Devre Diagramı

Herhangi bir fotovoltaik hücre fotonlar tarafından meydana getirilen akımı geçirecek durumda olan bir diyot üzerine paralel bağlı, sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Bir fotovoltaik hücrenin eş değer devre diyagramı aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.11 Fotovoltaik hücreye ait eş değer devre [53]

Burada  $I_L$  ışık altında meydana gelen akımı (foto akım),  $I_0$  karanlık doyma akımını,  $R_s$  seri direnci,  $R_{sh}$  paralel direnci,  $I_D$  diyot akımını,  $I_{sh}$  kaçak akımı ifade etmektedir. Devreden geçen akım, a düzeltilmiş idealite faktörü olmak üzere,  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  ve  $a$ 'ya bağlıdır. Düzeltilmiş idealite faktörü:  $N_{cs}$  seri bağlı güneş gözesi veya modül sayısı,  $n$  diyot idealite veya kalite faktörü,  $k_B$  Boltzmann sabiti,  $q$  elektron yükü,  $T_c$  Kelvin olarak etkin güneş gözesi sıcaklığı olmak üzere  $a = N_{cs} n k_B T_c / q$  olarak hesaplanmaktadır. Kirchhoff'un akım kuralına göre seçilen herhangi bir noktada devreden geçen akım için;  $I_L$  güneş gözesinde ışıqla üreyen akımı;  $V$  sürülen  $R_L$  yükü üzerine düşen gerilimi,  $I_D$  diyot akımını,  $I_{sh}$  kaçak akım olmak üzere devreden geçen akım;

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (5)$$

yazılabilir.  $I_D$  diyot akımı ve paralel direnç üzerinden geçen  $I_{sh}$  kaçak akım yukarıdaki denklemde yerine konulursa devreden geçen akım;

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{V + I R_s}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

olarak elde edilir. Karanlık akımı  $I_0$ , fotovoltaik hücrelerin yapıldığı malzemelerin bant yapısına ve sıcaklığa bağlıdır. Işık altında herhangi bir besleme olmaksızın ve ideal durumda devreden geçen akım  $I_{sc}$  olarak gösterilip kısa devre akımı olarak ifade edilir.  $I_{sc}$  yakşalık olarak  $I_L$  değerine eşittir ve gelen

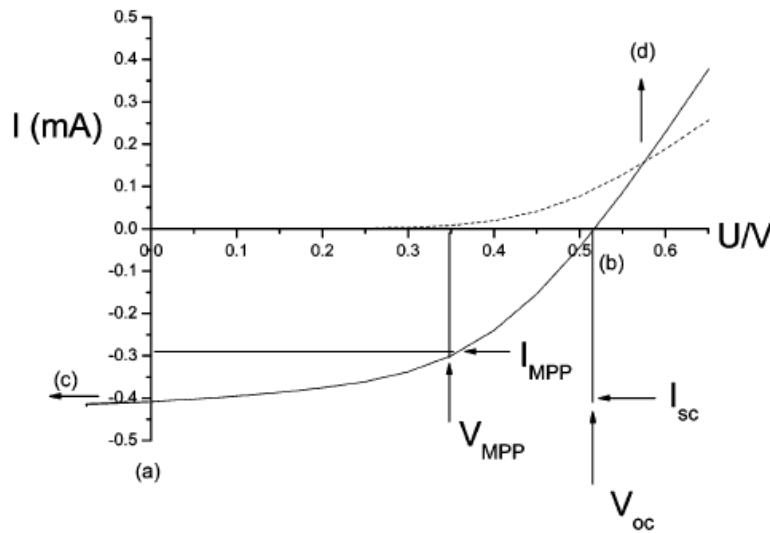
ışığın karakteristiği ile orantılıdır. İdeal bir fotovoltaik hücrede seri direnç sıfır, paralel direnç sonsuz olmalıdır. Oysa seri direnç sıfırdan büyük paralel dirençde sonsuzdan küçük olduğu için fotovoltaik hücrelerde güç kaybı meydana gelmektedir [53] .

### 5.7.2 Fotovoltaik Hücrelerde Güç Dönüşüm Verimi

Foton ile uyarıldıktan sonra oluşan fotoakımı karakterize etmenin en iyi yolu akım-voltaj eğrilerine bakmaktır. Aşağıdaki grafikte tipik bir fotovoltaik hücrenin akım yoğunluğu voltaj grafiği lineer ölçekte gösterilmiştir. Bu grafikte;  $I_{MPP}$  ve  $V_{MPP}$  sırasıyla akım ve gerilim için maksimum güç noktalarını göstermektedir. Bu noktalar ile verimin hesaplanmasında kullanılan dolgu faktörü hesaplanabilir. Verim fotovoltaik hücreden elde edilen maksimum gücün fotovoltaik hücre üzerine düşen maksimum güce oranı olarak tanımlanır. Fotovoltaik hücrenin verimi  $\eta$  simgesi ile gösterilir. Buna göre bir fotovoltaik hücrenin verimi  $P_{MPP}$  (maksimum güç çıkışı) ve  $P_{in}$  (optik giriş gücü) olmak üzere;

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} * I_{SC} * FF}{P_{in}} \quad (7)$$

olarak tanımlanır. Denklemden görüldüğü üzere verim üç önemli parametreye bağlıdır. Bunlar açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ), kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ) ve dolgu faktörü FF'dir. Bu üç kritik parametre ne kadar büyükse devrenin veriminin de o kadar büyük olacağı söylenebilir [53].



Şekil 5.12 Organik fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlıktaki akım- voltaj eğrisi . Ordinat ve apsisin kesişim noktaları sırasıyla kısa devre akımı  $I_{sc}$  (c) ve açık devre voltajı  $V_{oc}$  (b)'yi verir. Maksimum çıkış gücü ( $P_{max}$ ) voltaj ve akımın maksimum olduğu nokta ile belirlenir.  $P_{max}$ 'ın  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$ 'ye oranı dolgu faktörünü verir [4].

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

İdealde, kısa devre akımı  $I_{sc}$ , fotonla üretilen yük taşıyıcı yoğunluğuna ve organik yarı iletkendeki yük taşıyıcı mobilitisini bağlıdır. Yük taşıyıcı mobilitesi;

$$I_{sc} = ne\mu E \quad (8)$$

İle ifade edilir. Burada  $n$  taşıyıcı yüklerin yoğunluğu,  $e$  elektron yükü,  $\mu$  mobilite ve  $E$ 'de elektrik alandır. Foton ile yük üretim veriminin %100 olduğu bir hacim heteroeklem karışımında,  $n$  hacim başına soğrulan foton sayısını ifade eder. Mobilite organik yarı iletken ince filmlerin yüzey morfolojisine bağlıdır. Hazırlanan bir filmde nanomorfoloji ise çözücü tipi, çözücünün buharlaşma (kristalizasyon) zamanına, alttaş sıcaklığına bağlıdır [4].

Kısa devre akımı ışık altında açık devre geriliminin sıfır olduğu durumda devredeki akımı ifade eder ve  $I_{sc}$  ile gösterilir [53]. Kısa devre akımı malzemenin soğurma aralığı ile güneşten gelen ışığın soğurma spektrumlarının çakışmasıyla orantılıdır. Çakışma ne kadar büyükse devreden geçen akımın o kadar çok olması beklenir [26].

İç kuantum verimi (IPCE), kısa devre koşulları altında toplanan elektron sayısının gelen foton sayısına oranı olarak ifade edilir. IPCE aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$IPCE = \frac{1240 * I_{sc}}{\lambda * P_{in}} \quad (9)$$

Burada  $\lambda$  [nm] gelen ışığın dalga boyunu,  $I_{sc}$  [mA/cm<sup>2</sup>] devrenin fotoakımı ve  $P_{in}$  [W/m<sup>2</sup>] gelen ışığın gücünü ifade etmektedir [4].

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

Genel olarak metal-yalıtkan-metal devrelerde açık devre voltajı iki metal kontak arasındaki iş fonksiyonu farkı olarak tanımlanır[4]. Ancak p-n eklemde elde edilebilecek en yüksek voltajı sırasıyla  $n$  katkılı yarı iletken ile  $p$  katkılı yarı iletkenin fermi seviyeleri arasındaki fark olarak tanımlanır. Organik fotovoltatik hücrelerde açık devre voltajı  $p$  tipli yarı iletkenin HOMO seviyesi ile  $n$  tipli yarıiletkenin LUMO seviyesi arasındaki farka bağlıdır [4].

Açık devre voltajı akımın sıfır olduğu anda devredeki voltajı ifade eder ve  $V_{oc}$  ile gösterilir. İdeal bir fotovoltatik de  $I_{sc} \gg I_o$  olduğundan  $V_{oc}$  aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir.

$$V_{oc} = a \ln \left( \frac{I_{sc} + I_o}{I_o} \right) \approx a \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_o} \right) \quad (10)$$

Denklemda a ile gösterilen ifade düzeltilmiş idealite faktörüdür ve

$$a = N_{CS}nk_BT_C/q \quad (11)$$

İfade edilir [53].

### 5.7.2.3 Dolgu Faktörü (FF)

Dolgu faktörü, fotovoltaik hücrenin bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür ve maksimum gücün, açık devre gerilimi ile kısa devre akımı çarpımına oranına eşittir.

$$FF = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{I_{SC} * V_{OC}} \quad (12)$$

Dolgu faktörünün değeri seri ve paralel dirençlere bağlıdır. Kullanılan malzemelerden ve elektrotlarla kontakların direncinden kaynaklanan iç direncin mümkün olduğu kadar küçük, paralel direncin ise mümkün olduğu kadar yüksek olması beklenmektedir [53].

#### **Standart Şartlar;**

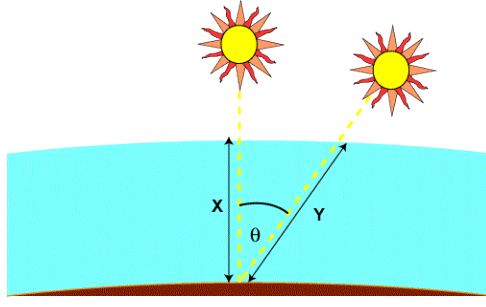
Organik fotovoltaik hücrelerle ilgili yapılan deneylerde tutarlı sonuçlar elde etmek amacıyla bazı standartlar getirilmiştir. Bir fotovoltaik hücrenin verimi bu standartlar altına hesaplanmalıdır. Verim oda sıcaklığında (25 °C'de), fotovoltaik hücrenin üzerine gönderilen ışığın gücünün 1000 W/m<sup>2</sup> ve ışığın spektral dağılımının 1,5 AM olduğu şartlar altında hesaplanmalıdır.

#### **Hava Kütlesi (Air Mass, AM);**

Hava kütlesi ışığın atmosferde izlediği yol olarak ifade edilir. Hava kütlesi ışığın atmosferden geçerken ve hava veya tozlar tarafından soğrulduğunda gücünde meydana gelen azalmayı ölçer ve aşağıdaki ifade ile verilir:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (13)$$

Burada  $\theta$  dikey (zenit açısı) ile açıdır. Mesela güneş tam tepeden geldiğinde hava kütlesi 1'e eşittir. Aşağıdaki şekilde hava kütlesi göstermektedir [54].



Şekil 5.13 hava kütlesini ifade eden şekil [54]

Standartta belirtilen 1,5 AM hava kütlesi spektral dağılımı güneş ışınları  $\theta=48.2^\circ$  açıyla gelirken sahip oldukları spektral güç dağılımıdır.

## 5.8 Fotovoltaik Hücrelerde Verimi İyileştirmek İçin Kullanılan Yöntemler

İlk organik fotovoltak hücreler, farklı iş fonksiyonlarına sahip iki metal elektrot arasına sıkıştırılmış organik aktif tabakalardan oluşmaktaydı. Daha sonra iki organik tabakanın iki metal elektrot arasına arka arkaya kaplanmasıyla oluşturulan iki katlı heteroeklem prensibi organik fotovoltak hücrelerin verimini önemli ölçüde arttırmıştır. Ardından geliştirilen hacim heteroeklem prensibine dayalı polimer güneş pilleri verimi önemli ölçüde iyileştirmiş ve yaklaşık 5 kat arttırmıştır. Bugün hala devam eden süreçte verimi arttırmak için pek çok çalışma grubu değişik yollar denemektedir. Bu çalışmalar, farklı özgün polimerlerin sentezlerinin yapılmasına, farklı aygıt tiplerinin dizaynına ve verimi oluşturmak üzere yeni konseptlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Dünyadaki pek çok araştırma grubu çalışmalarıyla polimer güneş pillerinin verimini birkaç yıl öncesine kadar en gelişmiş teknolojik ürün için verim değeri olarak belirlenen %4'den %8'lere taşımıştır [55]. Yapılan çalışmalar şöyle özetlenebilir:

Polimer/fulleren organik fotovoltak hücrelerde verimi kısıtlayan parametrelerden bir tanesi düşük akım yoğunluğudur. Düşük akım yoğunluğu ise foto aktif tabakanın soğurmasıyla güneş emisyonunun az oranda çakışmasından kaynaklanmaktadır. Bir çok konjuge polimer, 1.9 eV'dan daha büyük bant aralığına sahiptir ve sonuç olarak 650 nm'nin altındaki dalgalıboylarında ışığı soğurur.  $C_{60}$ /fulleren türevleri UV bölgesinin dışında çok düşük soğurma katsayısına sahiptir. Güneş ışığını değerlendirebilmek için düşük bant aralıklı malzemelere ihtiyaç vardır [53]. Düşük bant aralıklı malzemeler ile soğurma aralığının genişletilmesi daha fazla foton soğrulmasına neden olacağından akım yoğunluğunu arttıracaktır. Böylece veriminde arttırılması hedeflenmiş olacaktır.

Diğer bir yöntem ise tandem fotovoltak hücrelerdir. Organik molekül ve polimerlerin sınırlı soğurma aralığından dolayı ışığın sadece küçük bir kısmı tekli hacim heteroeklemi güneş gözelerinde soğurulmaktadır. Bir çok organik malzemenin düşük yük taşıyıcı mobilitesine sahip olması aktif

tabakanın kalınlığını kısıtlamaktadır. Her biri özel soğurma aralığına sahip çoklu tabakadan oluşan tandem veya çok eklemli fotovoltaik hücreler bu sorunu ortadan kaldırabilir.

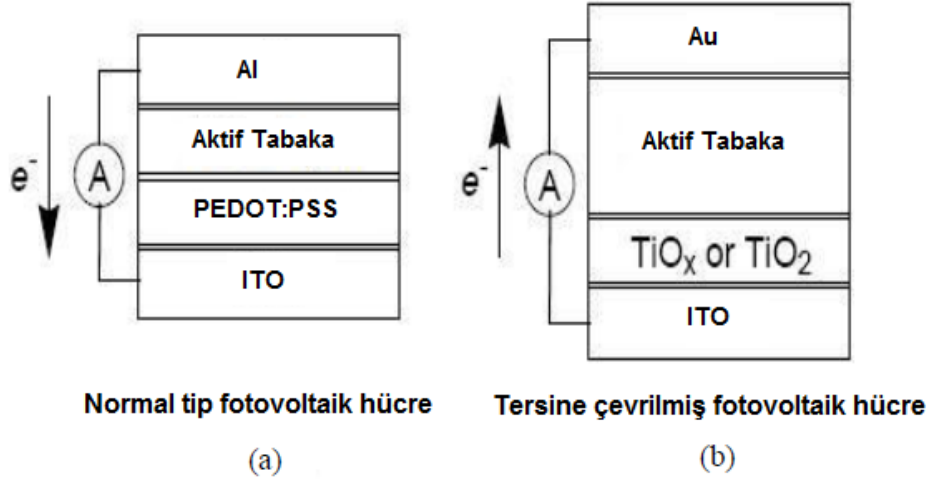
Diğer bir ilginç yöntem ise hibrit fotovoltaik hücre konseptidir. Bir hibrit fotovoltaik hücre biri donör diğeri akseptör organik ve inorganik malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşurlar. İlk tip hibrit fotovoltaik hücre inorganik nanoparçacıklarla yarı iletken polimerleri karıştırarak hazırlanmıştır. Nanoparçacıkların boyutlarını değiştirerek bant aralıkları ayarlanabilir. Dolayısıyla soğurma aralıkları düzenlenebilir. Bu konuda pek çok çalışma yapılmasına rağmen morfoloji kontrolü ve ligand (yüzey aktif madde) değişimi hala hibrit fotovoltaik hücrelerde kısıtlayıcı faktördür.

Nanoyapısal iyileştirme için kullanılan yöntemlerden bir tanesi de tersine çevrilmiş hacim heteroeklemi devre konseptidir [53]. Normal polimer fotovoltaik hücrelerde var olan anot/aktif tabaka/katot yapısı, tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerde katot/aktif tabaka/anot halini alır.

## 5.9 Tersine Çevrilmiş Fotovoltaik Hücreler

Aygıt yapısının tersine çevrilmesi fotovoltaik hücrelerde verimi artırma yöntemlerinden biridir. Geometrisi tersine çevrilmiş hücrelere ' Tersine Çevrilmiş Fotovoltaik Hücreler (Inverted Type Solar Cells)' denilmektedir. Bir fotovoltaik hücrede verimle birlikte kararlılık ve yaşam ömründe önemli parametlerdir ve devre geometrisinin tersine çevrildiği hücrelerde verimle birlikte kararlılık-yaşam ömründe de iyileşme görülmektedir. Yapının tersine çevrilmesi, normal güneş pillerinde kullanılan hava ortamında çok daha kararsız olan düşük iş fonksiyonlu metal elektrotları, tersine çevrilmiş polimer güneş gözelerinde hava ortamında oldukça kararlı olan yüksek iş fonksiyonlu metal elektrotlarla değiştirmeye olanak sağlamıştır. Böylece tersine çevrilmiş fotovoltaik hücreler normal fotovoltaik hücrelere oranla daha kararlı hale gelmektedir [55].

Tipik bir polimer fotovoltaik hücrede, elektron sızıntısını önlemek için ITO kaplı alt tabanlar üzerine delik ileten tabaka PEDOT:PSS kaplanır. Aktif tabaka ITO/PEDOT:PSS anot ve düşük iş fonksiyonlu metal katot arasına sıkıştırılmıştır (ITO/PEDOT:PSS/Aktif Tabaka/Metal). Fakat, PEDOT:PSS asidik yapısından dolayı ITO ve aktif tabakaya zarar vermektedir. Geleneksel polimer güneş gözelerinde üst (arka) kontak kalsiyum, baryum yada alüminyum gibi malzemelerden seçilmektedir. Bu tür malzemeler kolaylıkla oksitlenmektedir dolayısıyla hücrenin yaşam ömrü kısalmaktadır. Anot/PEDOT:PSS/Aktif Tabaka/Katot şeklinde üretilen polimer fotovoltaik hücrelerin yapısı tersine çevrilerek Katot/ N-tipli yarı iletken/Aktif Tabaka/Anot şekline getirilerek tersine çevrilmiş fotovoltaik hücre elde edilir. Normal ve tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerin aygıt yapıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Normal ve tersine çevrilmiş fotovoltatik hücrelerin devre geometrisi [56]

Şekilde de görüldüğü gibi tersine çevrilmiş hücrelerde normal hücrelerin aksine, foto etkiyle üretilmiş elektronlar dış devre boyunca ITO'dan yüksek iş fonksiyonlu metale (Au yada Ag) doğru akmaktadır. Geometriyi tersine çevirmek için ITO tabakasından sonra elektron ileten tabaka (elektron transport layer, ETL) veya boşluk engelleyen tabaka (hole block layer, HBL) kaplanmaktadır. Literatürde en sık kullanılan ETL (veya HBL)  $\text{TiO}_2$  (titanyumdioksit) ve  $\text{ZnO}$  (çinkooksit)'dir. Bu tabakalar çevresel koşullar altında kararlılığı arttırmak için kullanılmaktadır. Bu geometride, korozyona ve oksitlenmeye daha az duyarlı metalleri üst (arka) kontak olarak kullanmak mümkündür. Böylece normal tipte karşılaşılan üst kontağın oksitlenmesi problemi ortadan kaldırılmış olur. Bu durumda fotovoltatik hücreler hava ortamında üretilip rahatlıkla karakterizasyonu yapılabilir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda donör olarak P3HT ve akseptör olarak fulleren türevi PCBM kullanılmıştır.

Tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücrelerde farklı sol-jel yöntemleri ile  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{ZnO}$  tabakaları hazırlanmış, hazırlanan bu tabakalar için değişik parametreler incelenmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Yaygın olan bu alanda çalışılmasının nedeni, bu yapıya dair bir protokol oluşturmaktır. Ayrıca yapılan çalışmaların literatürün neresinde olduğunu bilmek ve bu standartları yakalayıp sonrasında geliştirmek de hedefler arasındadır.

#### 6.1 Tersine Çevrilmiş Fotovoltaiik Hücrelerin Hazırlanması

Bu çalışmada cam alttaş üzerine kaplı olan indium tin oksit (ITO) camlar kullanılmıştır. ITO kaplı camlar dışarıdan ticari olarak satın alınmıştır. Altlık olarak kullanılan ITO kaplı camların boyutları  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$  ve direnç değerleri yaklaşık olarak  $< 15 \Omega\text{cm}^{-2}$  civarındadır. Camların 1/3'lük kısmı sistemin kısa devre olmaması için ITO kaplı kısımları ıslak sitle aşındırma (etching) işlemi ile kaldırıldı. Aşındırma işlemi için camların 2/3'lük kısmı maske ile kapatıldıktan sonra kalan kısım  $\text{HCl}_{\text{konz}}:\text{HNO}_3_{\text{konz}}:\text{H}_2\text{O}$  (4.6:0.4:5) şeklinde ifade edilen oranlarda hazırlanan çözelti ile yaklaşık ~ 40 dk. bekletildi. Aşındırma işleminden sonra ITO kaplı camlar sırasıyla destile su, aseton ve isoproponal ile yaklaşık 15 dk ultrasonik banyoda yıkanıp temizlendikten sonra azot tabancası yardımıyla kurutulmuştur.

Daha sonra literatürden farklı sol-jel yöntemleri araştırılmış ve yine literatürdeki basamaklara uygun olarak aynı başlatıcılar kullanılarak üç farklı şekilde  $\text{TiO}_2$  ve iki farklı şekilde  $\text{ZnO}$  hazırlanmıştır.  $\text{TiO}_2$  için hazırlanan birinci yöntem Kavan ve M. Graetzel'in 1995'de yayınladıkları makale, ikinci yöntem Shengli Lu, Robert Koeppe, Serap Güneş ve Niyazi Serdar Sarıci'ti'nin 2007'de yayınladıkları makale ve üçüncü yöntem ise Shinuk Cho, Kwanghee Lee ve Alan J. Heeger'in 2009 yılında yayınladıkları

makale takip edilerek yapılmıştır. Her üç yöntemde de başlatıcı olarak titanyum tetra isopropoksit (TTIP) kullanılmıştır. Çinko oksitler de benzer şekilde birinci yöntem Steven K. Hau, Hin-Lap Yip, nam Seob Baek, Jingyu Zou, Kevin O'malley ve Alex K.-Y. Jen tarafından 2008'de yayınlanan makale, ikinci yöntem ise S. Bandyopadhyay, G.K. Paul ve S.K. Sen'in 2001 yılında yayınladıkları makale baz alınarak hazırlanmıştır. ZnO için başlatıcılar ise ZnAc dehydrate'dır.

Farklı sol-jel yöntemleriyle hazırlanan kompakt (gözeneksiz) tabakalar dönel kaplama metodu ile 8000 rpm'de kaplanmış ve TiO<sub>2</sub>'ler 450 °C'de 30 dk, ZnO ise 300 °C'de sırasıyla 5dk ve 1 saat sıcaklık işlemi uygulanmıştır.

Aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM karışımları ticari olarak satın alınmıştır. Aktif tabaka hazırlanırken aynı oranda P3HT ve PCBM malzemeleri farklı yoğunluklarda 1mL klorobenzen çözeltisinde çözünmeleri sağlanmıştır. Çalışmalarda kullanılan aktif tabaka bileşenleri ve çözücü oranları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 9 P3HT:PCBM oranları

| orobenzen Miktarı | PCBM Miktarı | P3HT Miktarı |
|-------------------|--------------|--------------|
| 1 mL              | 2 mg         | 2 mg         |
| 1 mL              | 5 mg         | 5 mg         |

Hazırlanan çözeltiler kompakt tabakayla kaplanmış numunelerin üzerine 50 µL'lik pipetler yardımıyla damlatılmış ve 800 rpm'de dönel kaplama ile kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra bazı numunelerin aktif tabakalarına 120 °C'de 4 dk sıcaklık işlemi uygulanarak aktif tabakaya sıcaklık etkisi incelenmiştir. Tabakalar kaplandıktan sonra termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak 100'er nm Au ve Ag metalleri buharlaştırılmıştır. Böylece farklı metal kontak etkisi incelenmiştir. Fotovoltaik özellikleri incelenen güneş gözelerinin devre yapısı sırasıyla ITO/TiO<sub>2</sub>/Aktif Tabaka/Au ve ITO/ZnO/Aktif Tabaka/Au (veya Ag) şeklindedir. Aşağıdaki grafiklerde mavi çizgiler aydınlık siyah çizgiler karanlık altındaki akım ve gerilimi temsil etmektedir.

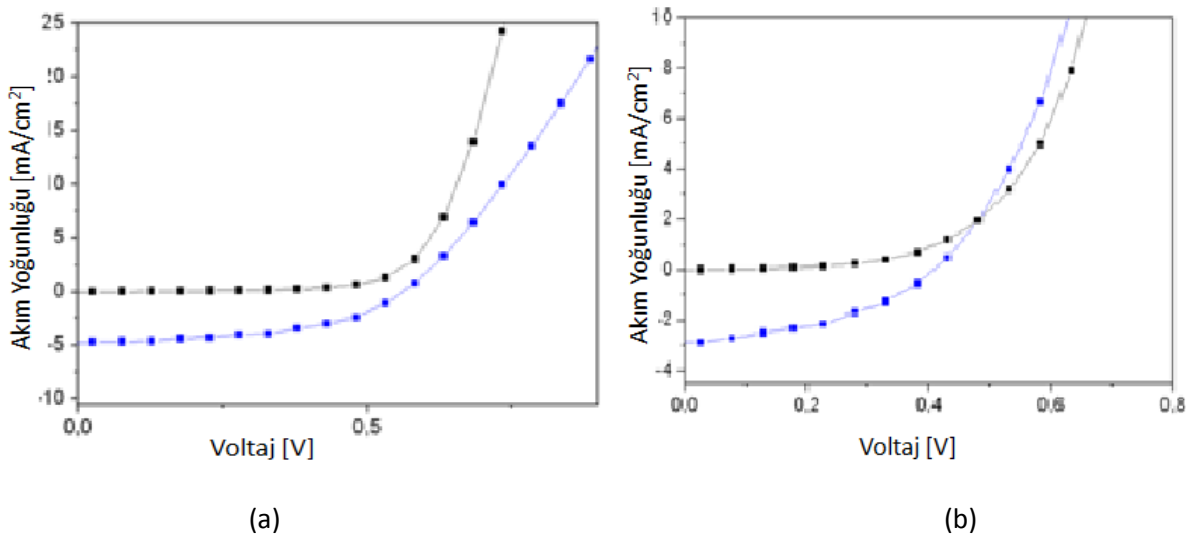
## 6.2 Deneyisel Sonuçlar

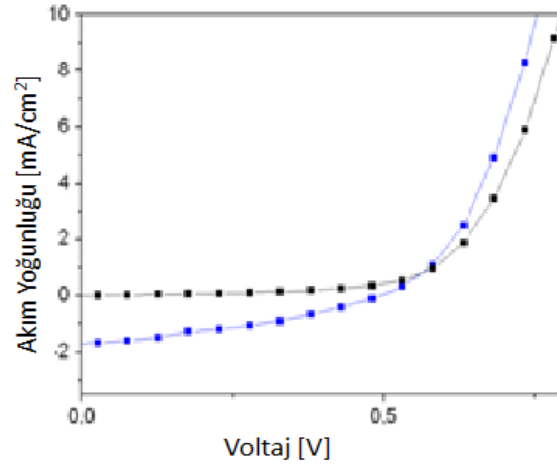
### 6.2.1 Birinci Yöntem İle Hazırlanmış $\text{TiO}_2$ İçin Elde Edilen Sonuçlar

Kavan ve M. Graetzel'in hazırladıkları şekilde hazırlanan  $\text{TiO}_2$  ile kaplanan camlar  $450^\circ\text{C}$ 'de 30 dk sinterlendikten sonra aktif tabakaları farklı oranlarda hazırlanan çözeltiler kaplanmıştır.

#### 6.2.1.1 Aktif Tabakaya PCBM Etkisinin İncelenmesi

Aktif tabakayı oluşturan P3HT:PCBM karışımı sırasıyla 1:1, 1:2 ve 1:3 oranlarında klorobenzen içinde karıştırılarak hazırlanmış ve  $120^\circ\text{C}$ 'de 4 dk tavnalmıştır. Üzerine 100 nm Ag buharlaştırılmıştır. Hazırlanan numunelerin aydınlık ve karanlık akım-gerilim eğrileri Şekil 6.1'de verilmiştir. P3HT:PCBM oranı 1:1 olan örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.19 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.481$  ve verim  $\eta=\% 1.32$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.1 (a)). Aktif tabaka oranı 1:2 olan numuneler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=2.88 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=430 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.388$  ve verim  $\eta=\% 0.48$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.1 (b)). Aktif tabaka oranı 1:3 olan numuneler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=1.72 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=480 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.286$  ve verim  $\eta=\% 0.236$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.1 (c)).



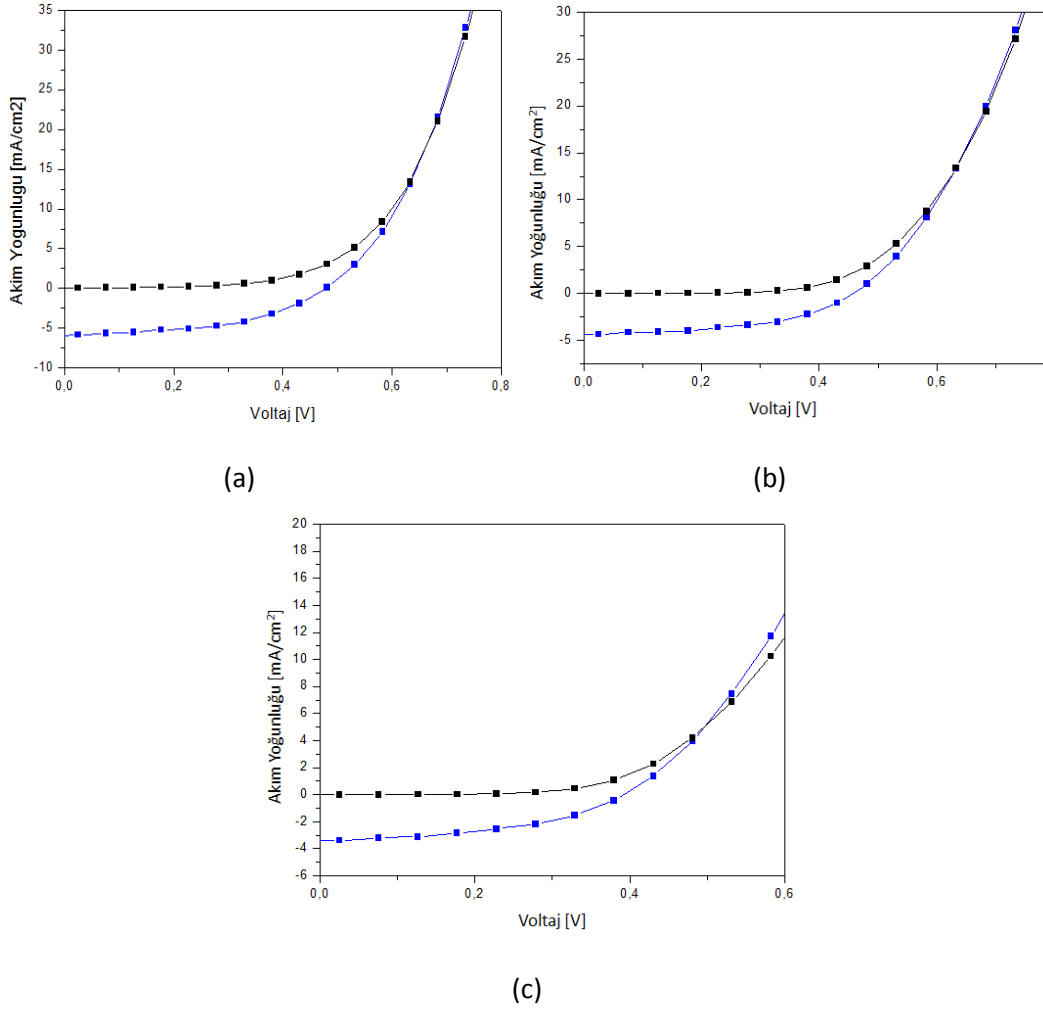


(c)

Şekil 6.1 Aktif tabakaları sırasıyla 1:1 (a), 1:2 (b) ve 1:3 (c) oranlarında hazırlanmış fotovoltaiik hücreler için akım-gerilim eğrileri

#### 6.2.1.2 Aktif Tabakaya P3HT Etkisinin İncelenmesi

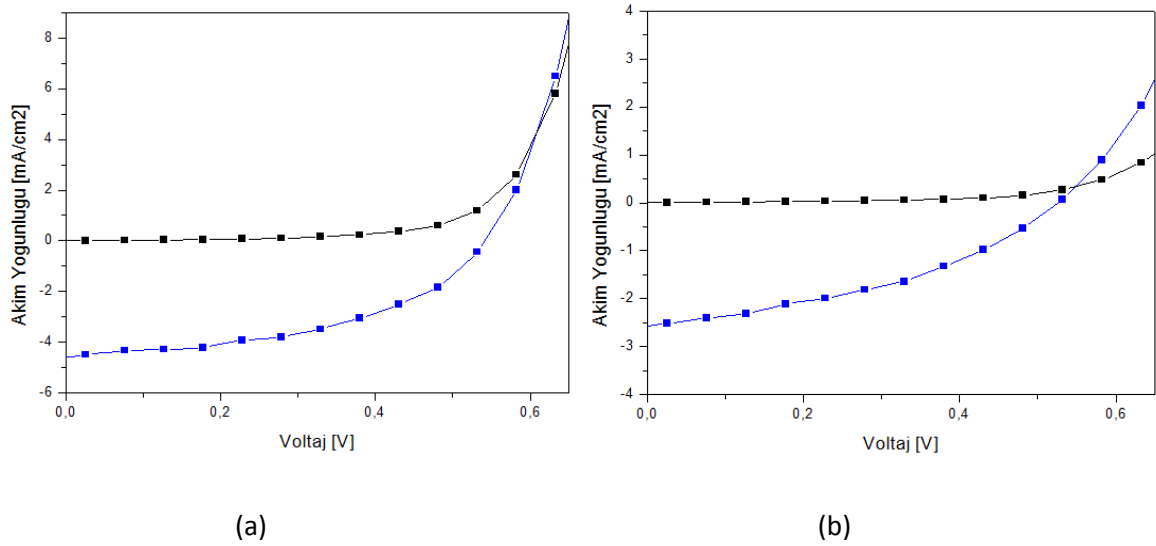
Aktif tabaka olarak P3HT:PCBM kullanılmış ve çözelti içindeki P3HT miktarı sırasıyla 1:1, 2:1 ve 3:1 oranlarında arttırılmıştır. Aktif tabakalar kaplandıktan sonra 120°C'de 4 dk ısıtma işlemi tabii tutulmuştur. Numunelere üst kontak olarak 100 nm Ag buharlaştırılmıştır. Şekil 6.2'de sırasıyla 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) oranları için aydınlık-karanlık akım-voltaj grafikleri verilmiştir. 1:1 oranındandaki aktif tabakaya sahip hücre için akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.85\text{mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=481\text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.497$  ve verim  $\eta=\% 1.39$  olarak elde edilmiştir (Şekil 6.2(a)). Şekil 6.2 (b)'de 2:1 oranında hazırlanmış örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=4.41\text{mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=481\text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.43$  ve verim  $\eta=\% 0.91$  olarak bulunmuştur. Şekil 6.2 (c)'de ise 3:1 oranında hazırlanmış örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=3.46\text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=379\text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.463$  ve verim  $\eta=\% 0.607$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.2 P3HT miktarı 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) oranlarında arttırılmış fotovoltailer için akım-gerilim grafiği

### 6.2.1.3 Aktif Tabakaya Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

Birinci yöntem ile hazırlanmış  $\text{TiO}_2$ 'ler klorobenzende çözülmüş 1:1 oranında hazırlanan P3HT:PCBM ile kaplanmıştır. Aktif tabakaya sıcaklığın etkisinin incelenmesi için bazı numunelerin aktif tabakası kaplandıktan sonra  $120^\circ\text{C}$ 'de 4 dk tavlınmış bazısının ise tavlınmamıştır. Aktif tabakaların üzerine PEDOT:PSS tabakası kaplandıktan sonra üzerlerine 100 nm Au buharlaştırılmıştır. Elde edilen en iyi sonuçlar şu şekildedir: aktif tabakaya sıcaklık uygulanan numuneler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=4.86 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.47$  ve verim  $\eta=\% 1.167$  olarak elde edilirken (Şekil 6.3 (a)) aktif tabakasına ısı işlem uygulanmamış örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=2.62 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.38$  ve verim  $\eta=\% 0.528$  olarak elde edilmiştir (Şekil 6.3 (b)). Numunelere ait akım-gerilim garfikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



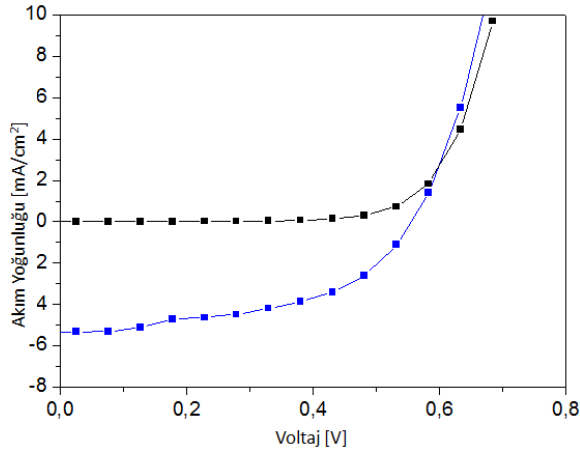
Şekil 6.3 Aktif tabakasına sıcaklık uygulanan (a) ve uygulanmayan (b) fotovoltaiik hücreler için akım-gerilim grafikleri

## 6.2.2 İkinci Yöntem ile Hazırlanmış $\text{TiO}_2$ için Elde Edilen Sonuçlar

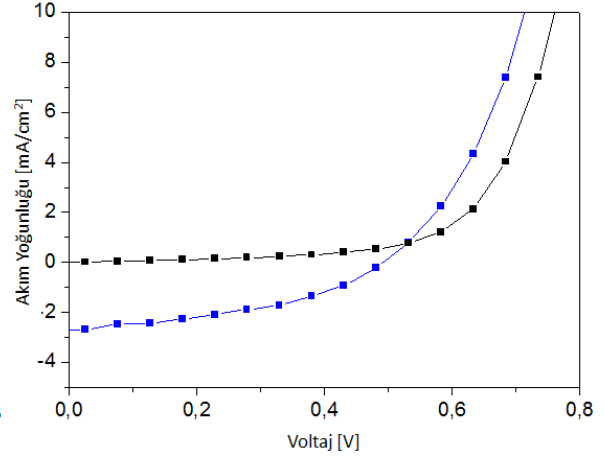
İkinci yöntem Shengli Lu, Robert Koeppe, Serap Güneş ve Niyazi Serdar Sarıçiftci'nin 2007'de yayınladıkları makale doğrultusunda hazırlanmıştır. Bütün numuneler için  $\text{TiO}_2$  kaplamaları yapıldıktan sonra  $450^\circ\text{C}$ 'de 30 dk sıcaklık işlemi uygulanmıştır. Bu yöntemde klorobenzende hazırlanmış farklı oranlardaki P3HT:PCBM aktif tabakaların, aktif tabakalara sıcaklığın etkisi ve bu etkilerin verimi ne doğrultuda değiştirdiği incelenmiştir.

### 6.2.2.1 Aktif Tabakaya PCBM Etkisinin İncelenmesi

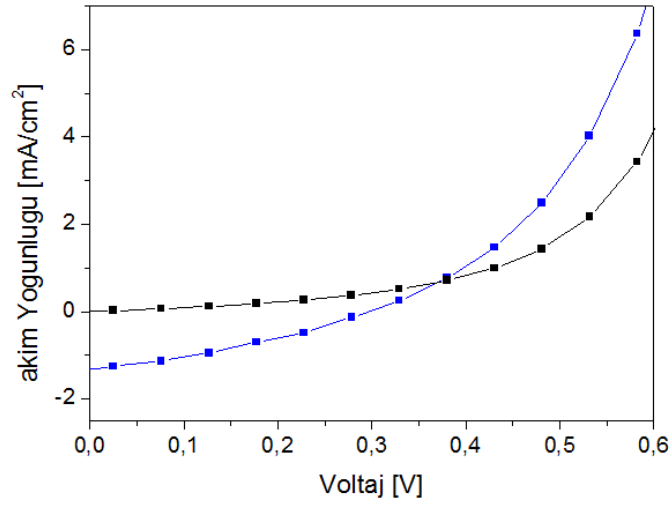
1 mL klorobenzende 1:1, 1:2 ve 1:3 oranında karıştırılarak aktif tabakalar hazırlanmıştır. Hazırlanan polimer:fulleren çözeltileri dönel kaplama yöntemiyle kaplandıktan sonra  $120^\circ\text{C}$ 'de 4 dk sıcaklık işlemine tutulmuştur. Örneklerin üzerine 100 nm 'de termal buharlaştırma ile Au metali buharlaştırılmıştır. Hazırlanan numunelerin aydınlık ve karanlık akım-gerilim eğrileri Şekil 6.4'de verilmiştir. Sırasıyla P3HT:PCBM oranı 1:1 olan numune için en iyi değerler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.40 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.51$  ve verim  $\eta=\% 1.46$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.4 (a)). P3HT:PCBM oranı 1:2 olan örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=2.75 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=481 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.41$  ve verim  $\eta=\% 0.54$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.4 (b)). Son olarak 1:3 oranında karışmış aktif tabakaya sahip hücreler için değerler akım yoğunluğu  $J_{sc}=1.39 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=278 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.32$  ve verim  $\eta=\% 0.12$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.4 (c)).



(a)



(b)



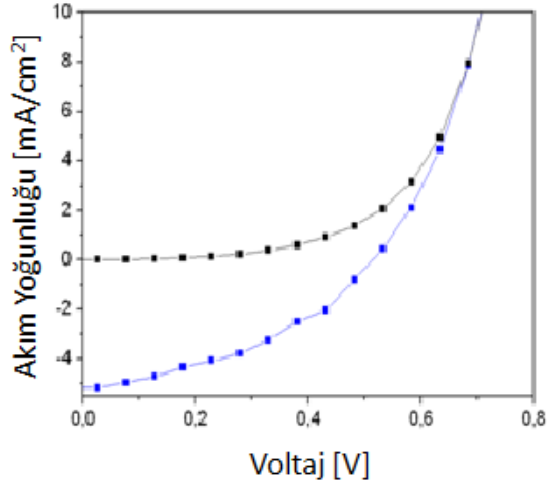
(c)

Şekil 6.4 P3HT:PCBM oranları 1:1 (a), 1:2 (b) ve 1:3 (c) oranlarında karıştırılarak hazırlanmış örneklerin aydınlık-karanlık akım-gerilim grafikleri

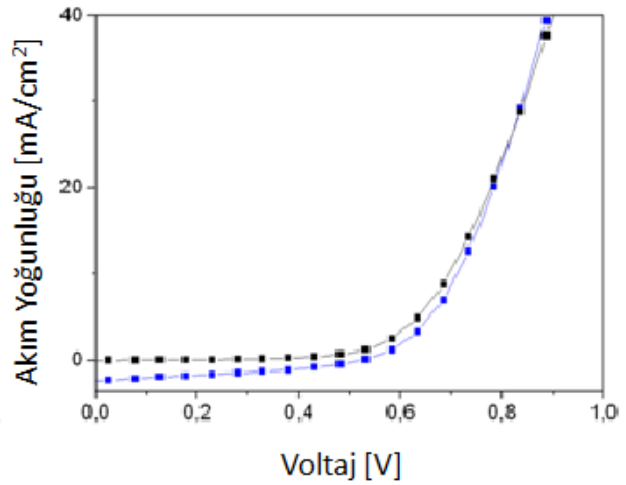
#### 6.2.2.2 Aktif Tabakaya P3HT Etkisinin İncelenmesi

P3HT etkisinin incelenmesi için hazırlanan aktif tabaka çözeltisinde PCBM miktarı sabit tutulup P3HT miktarı sırasıyla P3HT:PCBM için 1:1, 2:1 ve 3:1 oranlarında arttırılmıştır. Çözelti klorbenzen içinde hazırlanmıştır. İkinci yöntem ile kaplanan örnekler üzerine 800 rpm'de kaplanarak 120 °C'de 4 dk tavnama işlemine tabii tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin üzerine 100 nm Au metali buharlaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise; P3HT:PCBM oranı 1:1 olan numune için akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.20 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.383$  ve verim  $\eta=\% 1.057$  olarak

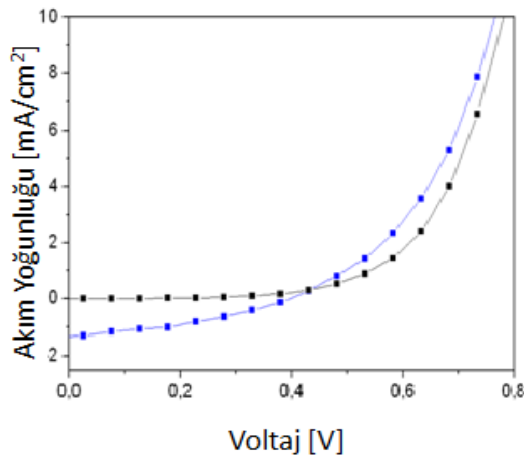
bulunmuştur (Şekil 6.5 (a)). P3HT:PCBM oranı 2:1 olan örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=2.34 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.344$  ve verim  $\eta=\% 0.42$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.5 (b)). Son olarak 3:1 oranında karışmış aktif tabakalı hücreler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=1.34 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=379 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.37$  ve verim  $\eta=\% 0.18$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.5 (c)).



(a)



(b)

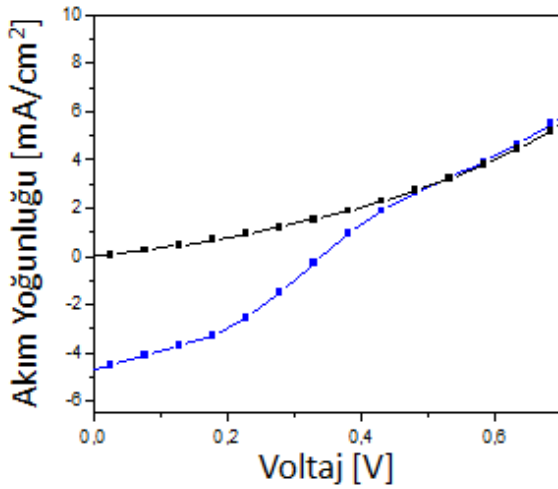


(c)

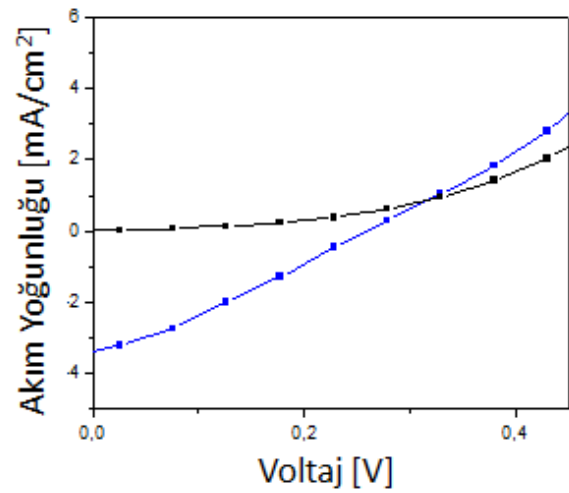
Şekil 6.5 P3HT:PCBM oranları 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) şeklinde hazırlanmış fotovoltaiik hücrelerin akım-gerilim grafikleri

### 6.2.3 Üçüncü Yöntem ile Hazırlanmış TiO<sub>2</sub> için Elde Edilen Sonuçlar

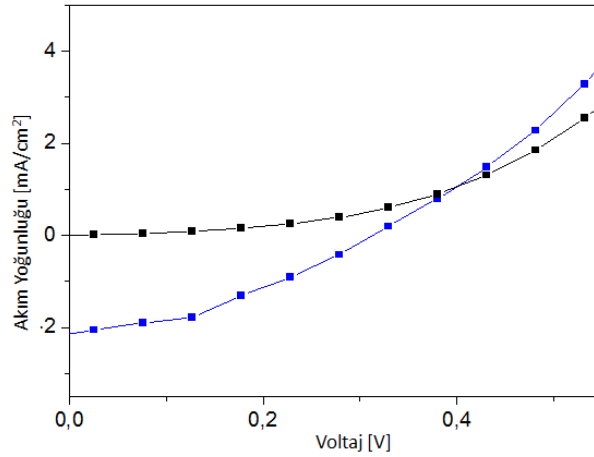
Üçüncü yöntem literatürde yer alan Shinuk Cho, Kwanghee Lee ve Alan J. Heeger'in 2009 yılında yayınladıkları makale baz alınarak hazırlanmıştır. TiO<sub>2</sub> hazırlandıktan sonra ITO kaplı camların üzerine 8000 rpm'de kaplanıp 450 °C'de 30 dk sıcaklık uygulanmıştır. Bu yöntem ile hazırlanan numunelerde aktif tabaka P3HT:PCBM oranı sırasıyla 1:1, 2:1 ve 3:1 oranında olacak şekilde çözeltideki P3HT miktarı arttırılmıştır. Tüm çözeltiler klorobenzende çözünmüştür ve 800 rpm'de kaplanıp aktif abakalarına 120 °C'de 4 dk sıcaklık uygulanmıştır. Termal buharlaştırma ile üzerine 100 nm Au kaplanarak fotovoltaik hücrede akım-gerilim değerleri ölçülmüştür. 1:1 oranında karıştırılmış aktif tabakalı hücre için 1:1 olan numune için akım yoğunluğu  $J_{sc}=4.82 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=329 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.37$  ve verim  $\eta=\% 0.58$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.6 (a)). P3HT:PCBM oranı 2:1 olan örnekler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=3.19 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=278 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.28$  ve verim  $\eta=\% 0.24$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.6 (b)). Son olarak 3:1 oranında karışmış aktif tabakalı hücreler için akım yoğunluğu  $J_{sc}=2.20 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=329 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.32$  ve verim  $\eta=\% 0.23$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.6 (c)). Numunelere ait akım-gerilim grafikleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.6 Üçüncü yöntem ile hazırlanmış numunelerde P3HT:PCBM oranları 1:1 (a), 2:1 (b) ve 3:1 (c) olan örnekler için akım-gerilim eğrileri

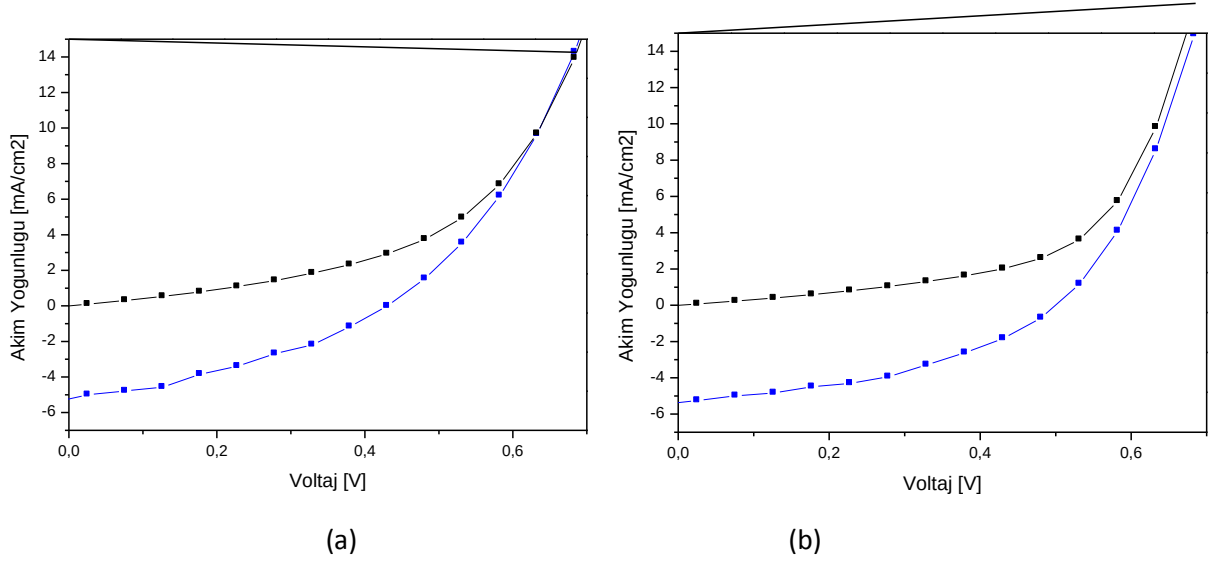
#### 6.2.4 Birinci Yöntem ile Hazırlanmış ZnO için Elde Edilen Sonuçlar

Literatürde boşluk engelleyici tabaka olarak en sık kullanılan madde Zn:Ac olarak bilinen çinko oksit asetattır. Çalışmalar sırasında ZnO (çinkooksit) aynı başlatıcıya sahip (Zn:Ac) iki farklı sol-jel metodu kullanılarak hazırlanmıştır. Birinci yöntem ile hazırlanan ZnO kompakt tabakası Steven K. Hau, Hin-Lap Yip, Nam Seob Baek, Jingyu Zou, Kevin O'malley ve Alex K.-Y. Jen tarafından 2008'de yayınlanan makale doğrultusunda hazırlanmıştır. ZnO tabakası ITO üzerine 8000 rpm'de kaplanmış ve 400 °C'de 5 dk tavlansmıştır. Polimer:fulleren olarak P3HT:PCBM kullanılmıştır. Aktif tabaka 800 rpm'de kaplanıp 120 °C'de 4 dk tavlansmıştır. Bazı numuneler için metal kontak Au kaplanırken bazısında ise Ag kaplanmıştır. Böylece farklı metal kontak etkisinde incelenmiştir.

##### 6.2.4.1 ZnO Tabakasına Uygulanan Sıcaklığın Verime Etkisinin İncelenmesi

ZnO tabakası asitle aşındırılmış ITO camlar üzerine 8000 rpm'de kaplanmıştır. ZnO gözenekli yapıya sahip olduğu için ITO üzerine iki kat kaplanmıştır. Katlar arasında bazı numunelerde 400 °C'de 5 dk tavlama yapılırken bazısında sıcaklık işlemi uygulanmamıştır. Aktif tabaka P3HT:PCBM %5'lik oranda 1mL klorobenzende hazırlanmıştır ve 800 rpm'de kaplanıp 120 °C'de 4 dk tavlansmıştır. Metal kontak olarak Ag metali kullanılmıştır. Şekil 6.7 (a) ZnO kompakt tabakasına sıcaklık uygulanmayan numuneler akım-gerilim eğrilerini göstermektedir. Bu numune için elde edilen değerler; akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.00 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=430 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.36$  ve verim  $\eta=\% 0.776$ 'dır. Şekil 6.7 (b) ise ZnO tabakasına sıcaklık işlemi uygulanan örnekler için akım-gerilim grafiğini

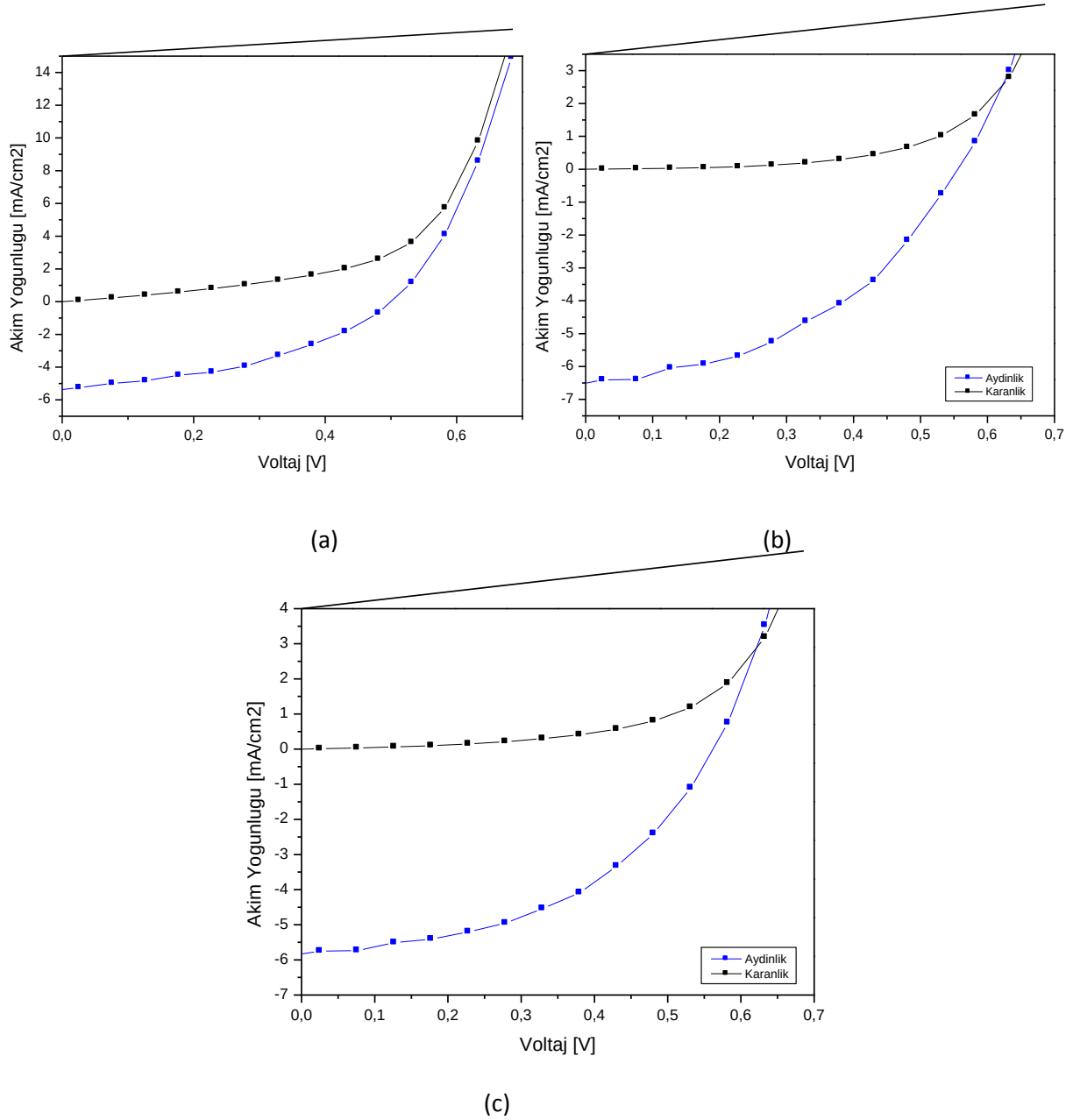
göstermektedir ve değerler; akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.25 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=480 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.47$  ve verim  $\eta=\% 1.184'$  dür.



Şekil 6.7 ZnO tabakasına sıcaklık uygulanmayan (a) ve uygulanan (b) numuneler için akım-gerilim eğrileri

#### 6.2.4.2 ZnO Tabakasının Kalınlığının Verime Etkisinin İncelenmesi

ZnO kompakt tabakasının kalınlığının verime etkisinin incelenmesi için ZnO tabakası ITO cam üzerine iki, üç ve dört kat olarak kaplanmıştır. Her kat arasına  $400^\circ\text{C}$ 'de 5 dk kül fırında sıcaklık uygulanmıştır. Aktif tabaka %5'lik klorobenzende P3HT:PCBM çözeltisi 1:1 oranında hazırlanarak 800 rpm'de kaplanmış aktif tabakaya sıcaklık uygulanmıştır. Metal kontak olarak Ag buharlaştırılmıştır. Sırasıyla iki kat kaplanan ZnO için akım-gerilim grafiği Şekil 6.8 (a)'da gösterilmiş ve değerler; akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.25 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=480 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.47$  ve verim  $\eta=\% 1.184$ , üç kat kaplanan ZnO için grafik Şekil 6.8 (b)'de gösterilmiş ve değerleri ; akım yoğunluğu  $J_{sc}=6.60 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.446$  ve verim  $\eta=\% 1.563$  ve dört katı ZnO için grafik Şekil 6.8 (c)' de ve değerler; akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.75 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=582 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.461$  ve verim  $\eta=\% 1.542$  olara elde edilmiştir.

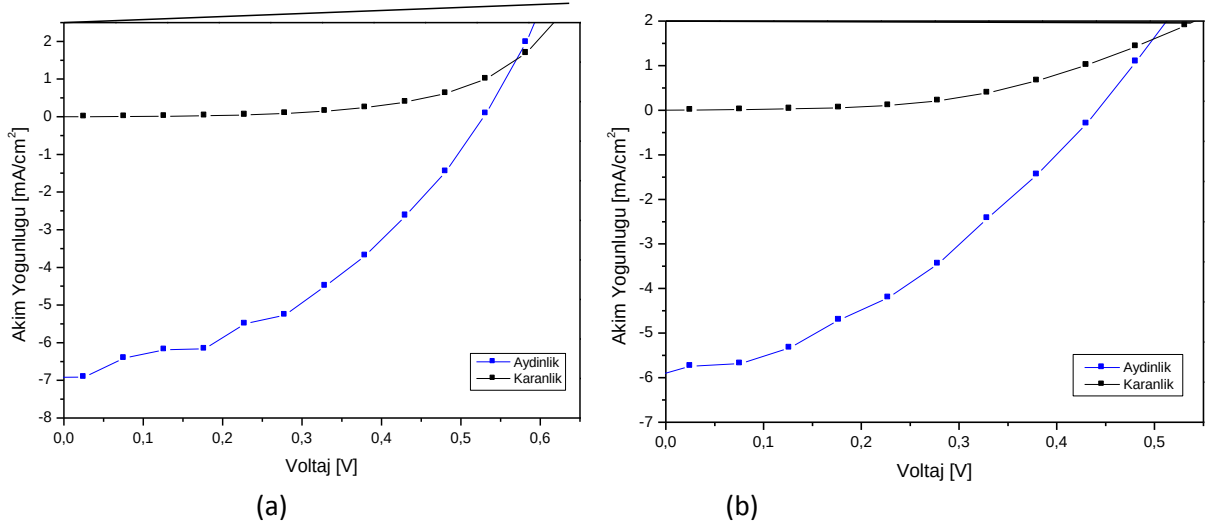


Şekil 6.8 Farklı kalınlıkta ZnO tabakalarının akım-gerilim eğrilerini gösteren grafikler. (a) iki kat, (b) üç kat ve (c) dört kat ZnO kaplı numunelerin grafiklerini göstermektedir.

#### 6.2.4.3 Aktif Tabakaya Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

Birinci yöntem ile hazırlanmış ZnO tabakasının üzerine %5'lik klorobenzende hazırlanmış 1:1 oranında P3HT:PCBM kaplanmıştır. Aktif tabakaya sıcaklık etkisinin incelenebilmesi için bazı numunelere 120 °C'de 4 dk sıcaklık uygulanırken bazısına hiç sıcaklık uygulanmamıştır. Üst kontak olarak Ag (100 nm) buharlaştırılmıştır. Şekil 6.9 (a) aktif tabakasına tavlama yapılmış hücrenin akım- voltaj grafiğini göstermekte ve değerleri; akım yoğunluğu  $J_{sc}=6.91 \text{ mA/cm}^2$  , açık devre gerilimi  $V_{oc}=531 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.40$  ve verim  $\eta=\% 1.467$  olarak ve tavlama yapılmamış hücrenin grafiği Şekil 6.9 (b)' de ve

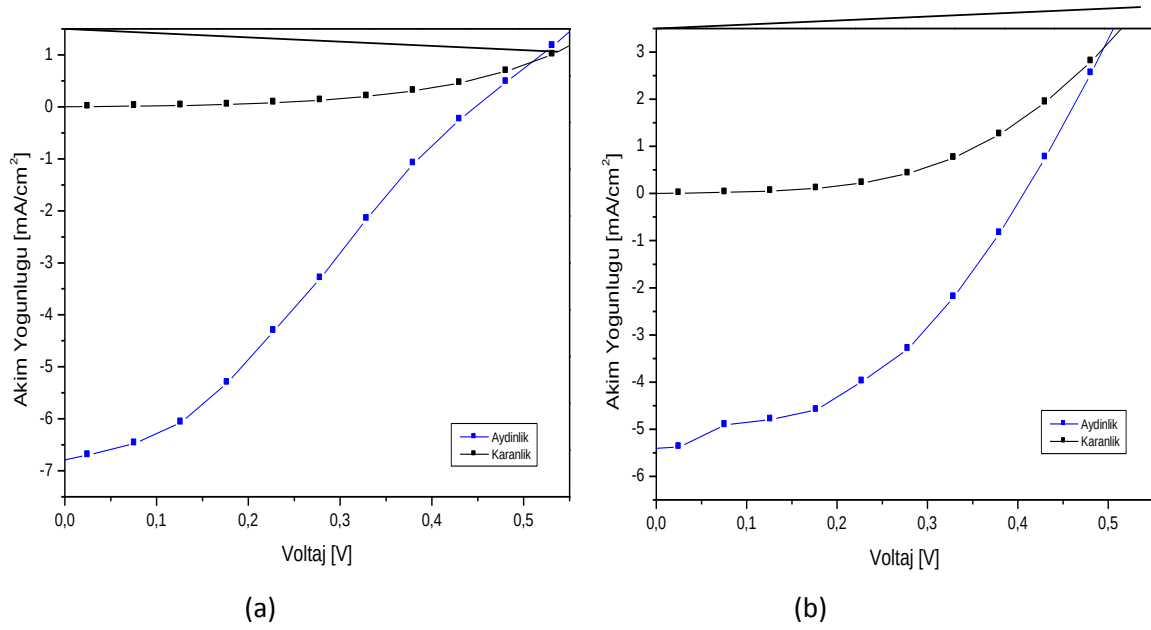
değerleri; akım yoğunluğu  $J_{sc}=6.05 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=430 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.372$  ve verim  $\eta=\% 0.967$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.9 Aktif tabakalarına sıcaklık uygulanmamış (a) ve uygulanmış (b) numuneler için akım-gerilim grafikleri

#### 6.2.4.4 Farklı Metal Kontak Etkisinin İncelenmesi

Birinci yöntem ile hazırlanmış çinko oksit tabakası için farklı metal etkisi incelenmiştir. Kontak etkisinin incelenmesi için Ag ile yapılan deney bu sefer Au ile denenmiştir. Aktif tabaka P3HT:PCBM %5'lik polimer ve fulleren ile klorobenzende hazırlanmış ve aktif tabakaya bazı numunelerde sıcaklık uygulanmış bazısında uygulanmamıştır. Metal kontak olarak 100 nm Au (altın) termal buharlaştırma ile kaplanmıştır. Au kontak için aktif tabakasına sıcaklık uygulanan numunenin değerleri akım yoğunluğu  $J_{sc}=6.68 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=430 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.34$  ve verim  $\eta=\% 0.977$  olarak bulunmuş ve akım-voltaj grafiği Şekil 6.10 (a)' da belirtilmiştir. Aktif tabakasına sıcaklık uygulanmayan örnek için ise akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.42 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=430 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.395$  ve verim  $\eta=\% 0.922$  olarak bulunmuş ve grafiği Şekil 6.10 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 6.10 Au metal kontak için aktif tabakasına sıcaklık uygulanmış (a) ve uygulanmamış (b) numuneler için akım-gerilim eğrileri

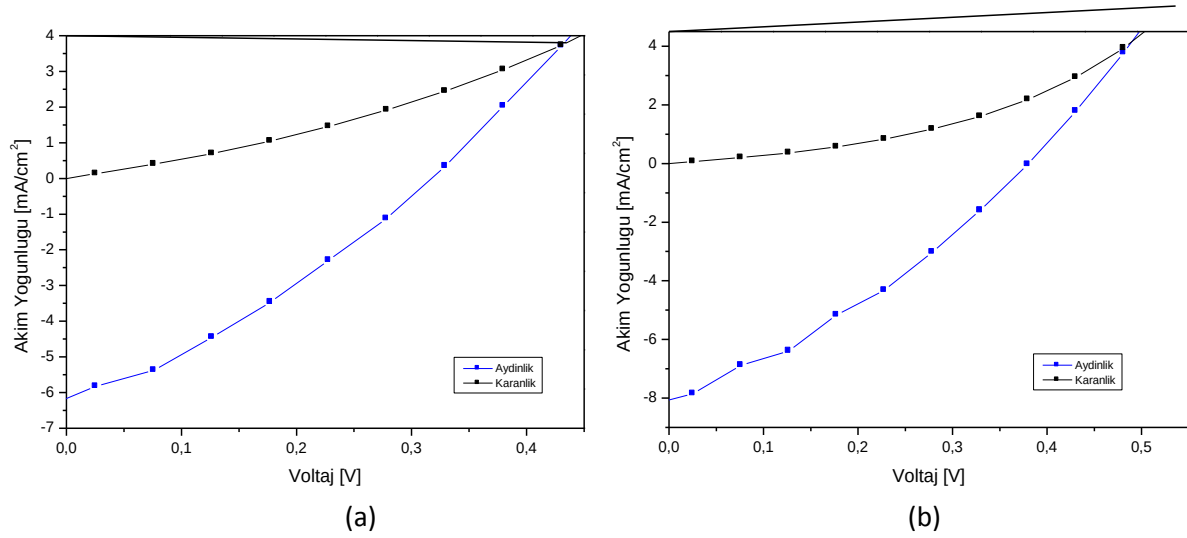
## 6.2.5 İkinci Yöntem ile Hazırlanmış ZnO İçin Elde Edilen Sonuçlar

İkinci yöntem olarak çinko oksitler S. Bandyopadhyay, G.K. Paul ve S.K. Sen'in 2001 yılında yayınladıkları makalede bahsedilen sol-jel yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Diğer yöntemde olduğu gibi bu yöntem içinde ZnO tabakasının kalınlığının, aktif tabakaya sıcaklığın ve farklı metal kontağın verime etkisi incelenmiştir. ZnO tabakası sol-jel yöntemiyle hazırlandıktan sonra üzerine klorobenzen de %5'lik P3HT:PCBM 1:1 oranında karıştırılarak hazırlanmış aktif tabaka 800 rpm'de kaplandı. Aktif tabakaya sıcaklık olarak 120 °C'de 4 dk kül fırında tavlama yapıldı. Üzerine ise 100 nm Ag (gümüş) buharlaştırıldı.

### 6.2.5.1 Aktif Tabaka Kalınlığının Verime Etkisinin İncelenmesi

ZnO tabakası ITO kaplı camın üzerine farklı katlarda kaplanarak kalınlığı değiştirilmiştir. Her kat arasına 150 °C'de 5 dk tavlama yapılmıştır. En son kattan sonra alttaşa 300 °C'de 30 dk sıcaklık uygulanmıştır. Aktif tabaka olarak P3HT:PCBM kullanılmış ve bu tabakada sıcaklık işlemine tabii tutulmuştur. En son olarak metal kontak olarak Ag (100 nm) buharlaştırılmıştır. İki kat ZnO ile kaplanan örneğe ait akım-gerilim grafiği Şekil 6.11 (a)' da verilmiştir. Elde edilen değerler; akım yoğunluğu  $J_{sc}=6.5 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=329 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.287$  ve verim  $\eta=\%0.614$  olarak üç kat ZnO ile kaplı numuneye ait değerler ise akım yoğunluğu  $J_{sc}=8.27 \text{ mA/cm}^2$ , açık

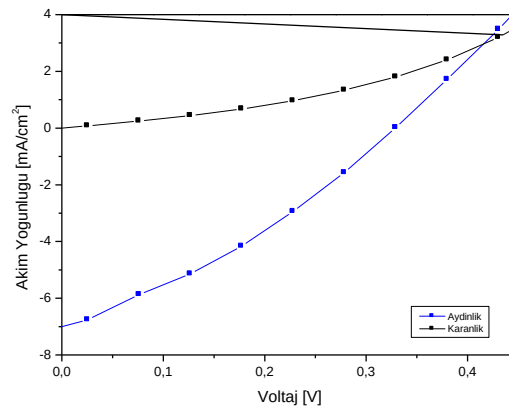
devre gerilimi  $V_{oc}=379$  mV, dolgu faktörü  $FF=0.31$  ve verim  $\eta=\% 0.971$  olarak bulunmuştur (Şekil 6.11 (b)).



Şekil 6.11 (a) iki kat ZnO ile kaplı (b) ise üç katlı ZnO kaplı fotovoltaiik hücrenin karanlık-aydınlık akım-gerilim grafiklerini göstermektedir.

### 6.2.5.2 Aktif Tabakaya Sıcaklığın Verime Etkisinin İncelenmesi

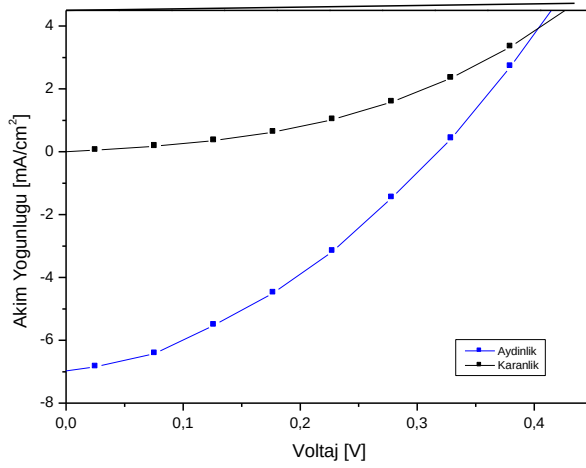
Aktif tabakanın sıcaklığa etkisinin incelenmesi için ZnO kaplı camların üzerine kaplanan polimer:fullerene türevine kaplama işleminden sonra bazı numunelere  $120^{\circ}\text{C}$ 'de sıcaklık uygulanmış bazısına ise uygulanmamıştır. Şekil 6.12 polimer:fullerene tabakasına sıcaklık uygulanan numunenin akım-voltaj grafiğini göstermektedir. Bulunan akım yoğunluğu  $J_{sc}=6.75$  mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi  $V_{oc}=329$  mV, dolgu faktörü  $FF=0.33$  ve verim  $\eta=\% 0.737$  şeklindedir. Aktif tabakaya sıcaklık uygulanmayan numunelerde akım gözlenememiştir.



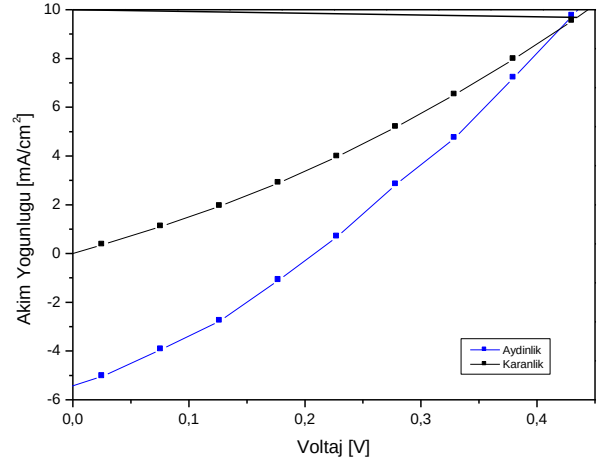
Şekil 6.12 Aktif tabakasına sıcaklık uygulanan numuneye ait grafik

### 6.2.5.3 Farklı Metal Kontak Etkisinin İncelenmesi

İkinci yöntem ile hazırlanan ZnO ile kaplı örneklerde metal etkisinin incelenebilmesi için Ag yerine Au metali kullanılarak aktif tabakaya sıcaklık etkisi tekrardan denenmiştir. Au kaplı numunelerde aktif tabakaya sıcaklık uygulandığında elde edilen akım yoğunluğu  $J_{sc}=7.1 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=329 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.342$  ve verim  $\eta=\% 0.798$  şeklindedir. Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim grafiği Şekil 6.13 (a)'da gösterilmiştir. Sıcaklık uygulanmadığında ise akım yoğunluğu  $J_{sc}=5.81 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=227 \text{ mV}$ , dolgu faktörü  $FF=0.26$  ve verim  $\eta=\% 0.349$  şeklinde olup akım- voltaj grafiği Şekil 6.13 (b)' de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.13 Au metal kontağına sahip hücrelerde aktif tabakaya sıcaklık uygulanan (a) ve uygulanmayan (b) hücreler için akım-gerilim grafiği verilmiştir.

### SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücreler verimi arttırmak için normal tipte fotovoltaiik hücrelere alternatif olarak geliştirilmiştir. Tersine çevrilmiş hücreler sadece verimi iyileştirmekle kalmayıp fotovoltaiik hücrenin yaşam süresini ve kararlılığını arttırmaktadır. Literatürde en yaygın olarak kullanılan polimer:fulleren tipi olarak P3HT:PCBM kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürde en sık kullanılan boşluk engelleyici tabakalardan  $\text{TiO}_2$  ve ZnO kullanılmıştır. Bu tabakalar farklı sol-jel yöntemleri kullanılarak hazırlanmış ve verime etkileri incelenmiştir. Herbir yöntemin verime etkileri incelenmesi için çeşitli parametreler değiştirilmiştir. Bu değişiklikler aktif tabakaya uygulanan sıcaklığın ve aktif tabakasının konsantrasyonunun değiştirilmesi, kompakt tabaka kalınlığı, üst metallerin değiştirilmesi şeklindedir. Yapılan çalışmalarda  $\text{TiO}_2$  için en iyi sonuç birinci yöntem ile hazırlanan kompakt tabakayla elde edilmiş ve verim  $\eta = 1.167\%$  olarak bulunmuştur. ZnO için  $\eta = 1.563\%$  lük en yüksek verim ilk yöntem ile hazırlanan kompakt tabakayla elde edilmiştir. Çalışmaların sonuçlarından görüldüğü gibi alınan en iyi verim  $\text{TiO}_2$  için aktif tabaka oranı 1:1 iken ve aktif tabakaya sıcaklık uygulandığında elde edilmiştir. Aktif tabaka 1 mL klorobenzen içinde 2' şer mg P3HT:PCBM' in karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Üst kontak olarak 100 nm Au (altın) kullanılmıştır. Her üç yöntem içinde kendi içinde en yük verimi veren aktif tabaka oranı 1:1 olarak bulunmuştur (Çizelge 10). ZnO için en iyi verim olan  $\eta = 1.563\%$ , ZnO tabakasının üç kat kaplanmasıyla elde edilmiştir. Aktif tabaka 1 mL klorobenzende 5 mg P3HT:PCBM'in karıştırılmasıyla hazırlanmış ve kaplamadan sonra sıcaklık uygulanmıştır. Üst kontak olarak Au yerine Ag kullanılmıştır. Her iki yöntem içinde en iyi sonuçlar üç katlı ZnO tabakası için elde edilmiştir (Çizelge 11). Aşağıdaki çizelgelerde yöntemlere elde edilen verimler gösterilmiştir.

Çizelge 10 TiO<sub>2</sub> için farklı oranlarda hazırlanmış P3HT:PCBM tabakasının verime etkisi

| P3HT:PCBM oranı | 1. Yöntem | 2.Yöntem | 3.Yöntem |
|-----------------|-----------|----------|----------|
| 1:1             | % 1.390   | % 1.057  | % 0.58   |
| 2:1             | % 0.910   | % 0.420  | % 0.24   |
| 3:1             | % 0.607   | % 0.180  | % 0.23   |

Çizelge 11 Farklı kalınlıktaki ZnO tabakalarının verime etkisi

| ZnO Katman Sayısı | 1.Yöntem | 2.Yöntem |
|-------------------|----------|----------|
| İki kat           | % 1.184  | % 0.614  |
| Üç kat            | %1.563   | % 0.971  |

Herbir yöntem için yapılan çalışmalar ve elde edilen akım yoğunluğu, açık devre voltajı, dolgu faktörü ve verim değerleri aşağıdaki çizelgelerde özetlenmiştir.

Çizelge 12 Birinci yöntem ile hazırlanan TiO<sub>2</sub> için farklı P3HT ve PCBM oranları ve parametre değişimleri

| P3HT:PCBM oranı | Akım Yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (mV) | FF    | Verim (%) |
|-----------------|--------------------------------------|----------|-------|-----------|
| 1:1             | 5.85                                 | 481      | 0.497 | 1.39      |
| 1:2             | 2.88                                 | 430      | 0.388 | 0.48      |
| 1:3             | 1.72                                 | 480      | 0.286 | 0.236     |
| 2:1             | 4.41                                 | 481      | 0.430 | 0.91      |
| 3:1             | 3.46                                 | 379      | 0.463 | 0.607     |

Çizelge 12 de görüldüğü üzere aktif tabaka çözeltisindeki polimer veya fulleren miktarının artması veya azalması verimi düşürmektedir.

Çizelge 13 Birinci yöntem ile hazırlanmış  $\text{TiO}_2$  için aktif tabakaya sıcaklık etkisi

| Aktif Tabakaya Sıcaklık | Akım Yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | Voc (mV) | FF   | Verim (%) |
|-------------------------|--------------------------------------------|----------|------|-----------|
| Uygulandığında          | 4.86                                       | 531      | 0.47 | 1.167     |
| Uygulanmadığında        | 2.62                                       | 531      | 0.38 | 0.528     |

Aktif tabakaya sıcaklık uygulandığında çözeltideki safsızlık atomları buharlaşmaktadır. Aynı zamanda sıcaklık difüzyonu arttırmaktadır. Böylece devreden geçen akımda artış görülmektedir. Verimi doğrudan etkileyen parametre akım olduğu için sıcaklık verimi iyileştirmektedir (Çizelge 13).

Çizelge 14 İkinci yöntem ile hazırlanan  $\text{TiO}_2$  için farklı P3HT ve PCBM oranları ve verim parametreleri

| P3HT:PCBM oranı | Akım Yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | Voc (mV) | FF   | Verim (%) |
|-----------------|--------------------------------------------|----------|------|-----------|
| 1:1             | 5.40                                       | 531      | 0.51 | 1.46      |
| 1:2             | 2.75                                       | 481      | 0.41 | 0.54      |
| 1:3             | 1.39                                       | 278      | 0.32 | 0.12      |
| 2:1             | 2.34                                       | 531      | 0.34 | 0.42      |
| 3:1             | 1.34                                       | 379      | 0.37 | 0.18      |

Çizelge 15 Üçüncü yöntem ile hazırlanan TiO<sub>2</sub> için farklı P3HT oranları ve verim parametreleri

| P3HT:PCBM<br>oranı | Akım<br>Yoğunluğu<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (mV) | FF   | Verim (%) |
|--------------------|--------------------------------------------|----------|------|-----------|
| 1:1                | 4.82                                       | 329      | 0.37 | 0.58      |
| 2:1                | 3.19                                       | 278      | 0.28 | 0.24      |
| 3:1                | 2.20                                       | 329      | 0.32 | 0.23      |

Çizelge 16 İlk yöntem ile hazırlanmış ZnO için kompakt tabakaya sıcaklık etkisi

| ZnO tabakasına<br>sıcaklık | Akım<br>Yoğunluğu<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (mV) | FF   | Verim (%) |
|----------------------------|--------------------------------------------|----------|------|-----------|
| Uygulandığında             | 5.00                                       | 430      | 0.36 | 0.776     |
| Uygulanmadığında           | 5.25                                       | 480      | 0.47 | 1.184     |

Çizelge 17 İlk yöntem ile hazırlanmış olan ZnO' nun kalınlığının verime etkisi

| ZnO katman<br>sayısı | Akım<br>Yoğunluğu<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (mV) | FF    | Verim (%) |
|----------------------|--------------------------------------------|----------|-------|-----------|
| İki                  | 5.25                                       | 480      | 0.470 | 1.184     |
| Üç                   | 6.60                                       | 531      | 0.446 | 1.563     |
| Dört                 | 5.75                                       | 582      | 0.461 | 1.542     |

Çizelge 18 İlk yöntem ile hazırlanan ZnO için farklı metal kontak etkisi

| Metal Kontak | Aktif tabakaya sıcaklık uygulandığında verim (%) | Aktif tabakaya sıcaklık uygulanmadığında verim |
|--------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Ag           | 1.467                                            | 0.967                                          |
| Au           | 0.977                                            | 0.922                                          |

Tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücrelerde genellikle yüksek iş fonksiyonlu metaller kullanılır. Au veya Ag en sık kullanılanıdır. Ag’ de daha yüksek verim elde edilmesinin sebebi Ag oksijenle temasa girdiğinde oksitlenir ve oksitlenme gümüşün iş fonksiyonunu yükseltir. Bu sebepten Ag ile hazırlanan fotovoltaiiklerde verim daha iyidir (Çizelge 18).

Çizelge 19 İkinci yöntemle hazırlanan ZnO için kompakt tabaka kalınlığı

| ZnO katman sayısı | Akım Yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (mV) | FF    | Verim (%) |
|-------------------|--------------------------------------|----------|-------|-----------|
| İki               | 6.5                                  | 329      | 0.287 | 0.614     |
| Üç                | 8.27                                 | 379      | 0.31  | 0.971     |

Yüksek verim elde etmek için kullanılan boşluk engelleyici tabakanın deliksiz olması gerekmektedir. ZnO tabakasının üst üste kaplanması film yüzeyinde oluşabilecek delik miktarını azaltmaktadır. Kat sayısının artması aynı zamanda ITO’nun pürüzlülüğünüde engellemektedir. Böylelikle elektronların geçişi kolaylaştırılmış olur ve devreden geçen akım miktarı artar (Çizelge 19).

Çizelge 20 İkinci yöntemle hazırlanan ZnO için farklı metal kontak etkisi

| Metal Kontak | Aktif tabakaya sıcaklık uygulandığında verim (%) | Aktif tabakaya sıcaklık uygulanmadığında verim |
|--------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Ag           | 0.737                                            | Akım gözlenememiştir                           |
| Au           | 0.798                                            | 0.349                                          |

Literatürde yeralan çalışmalardan daha düşük verim elde edilmesinin sebebi deneylerin tamamının hava ortamında gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bulunan en iyi sonuç P3HT:PCBM oranının 1:1 olduğu ve aktif tabakaya sıcaklığın uygulandığı deneylerde elde edilmiştir. Yöntemlerin farklılaşması verimi değiştirmektedir. Bu yüzden yeni yöntemler bulundukça verime etkilerinin incelenmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Altın, M., (Fotovoltaik Malzeme İle) Elektrik üreten cepheler ve Çatılar, [http://www.catider.org.tr/pdf/sempozyum/bildiri\\_013.pdf](http://www.catider.org.tr/pdf/sempozyum/bildiri_013.pdf), 9 Ocak 2012.
- [2] Gunes, S., Marjanovic, N., Nedeljkovic, J.M. ve Sarıçiftci, N.S., (2008). "Photovoltaic characterization of hybrid solar cells using surface modified TiO<sub>2</sub> nanoparticles and poly(3-hexyl)thiophene", Nanotechnology, 19: 424009 (5).
- [3] Stubhan, T., Hyunchul, O., Pinna, L., Krantz, J., Litzov, I. ve Brabec, C.J., (2011). "Inverted organic solar cells using a solution processed aluminum-doped zinc oxide buffer layer", Organic Electronics 12: 1539-1543.
- [4] Gunes, S., Neugebauer, H. ve Sarıçiftci, N.S., (2007). "Conjugated Polymer- Based Organic Solar Cells", Chem. Rev., 107:1324-1338.
- [5] Yam, V.W.W., (2010). WOLEDs and Organic Photovoltaics Recent Advances and Applications, Springer, Germany.
- [6] Hoppe, H., Sarıçiftci, N.S., (2004). " Organic Solar Cells: An Overview", J. Mater. Res., 19: 1925-1945.
- [7] Konarka Power Plastic, About Power Plastic, [www.konarka.com](http://www.konarka.com).
- [8] Brabec, C.J., Hauch, J.A., Schilinsky, P. ve Waldauf, C., (2005). " Production Aspects of Organic Photovoltaics and Their Impact on The Commercialization of Devices", Mrs Bulletin, 30: 50-52.
- [10] Altın, V., (2007), Enerji Dosyamız, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/enerjidosyamiz.pdf>, 9 Ocak 2007.
- [11] Altın, V., (2002), Enerji, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/enerji.pdf>, 17 Ocak 2002.
- [12] Jaccard, M., (2005). Sustainable Fossil Fuels The Unusual Suspect in the Quest for Clean and Enduring Energy, First Edition, Cambridge University Press, New York.

- [13] World Coal Association, Coal and Energy Security, [www.worldcoal.org/coal-society/coal-energy-security/](http://www.worldcoal.org/coal-society/coal-energy-security/), 19 Mart 2012.
- [14] Starfish, Ecology The Ocean, [www.starfish.ch/reef/ocean.html](http://www.starfish.ch/reef/ocean.html), 06 Nisan 2012.
- [16] Altın, V., (2004), Nükleer Enerji, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/nukleer.pdf>, 03 Ağustos 2004.
- [17] Ollhoff, J., (2010). Nuclear Energy Future Energy, First Edition, ABDO Publishing Company, Minnesota.
- [18] Çıracı, S., Özensoy, E., Durgun, E., (2006), Hidrojenli Gelecek, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/hgelecek.pdf>, 18 Ekim 2011.
- [19] Çavuşoğlu, A., (2006). Yakıt Pilleri ve Kullanım Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [20] United Nations Framework Convention on Climate Change, Full Text of the Convention, [http://unfccc.int/essential\\_background/convention/background/items/2536](http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2536), 21 Aralık 2011.
- [21] Frass- Ehrfeld, C., (2009). Renewable Energy Sources A Chance to Combat Climate Change, First Edition, Wolters Kluwer, The Netherlands.
- [22] BBC, Renewable and Non-renewable Energy Resources, [http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/energy\\_resources/energy\\_rev1.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/energy_resources/energy_rev1.shtml), 09 Haziran 2012.
- [23] Bilgi Ustam, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Nelerdir?, <http://www.bilgiustam.com/yenilenebilir-enerji-ve-kaynaklari-nelerdir/>, 11 Mayıs 2012.
- [25] Morris, N., (1946). Energy Resources Facts-Issues-The Future Wind Power, First Edition, Smart Apple Media, China.
- [26] Karslı, A., (2011). Politiyofen ve Fulleren İçeren Organik Fotovoltaik Hücrelerin Optimum Çalışma Şartlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] Clean Green Energy, All About Biomass, <http://cleangreenenergyzone.com/all-about-biomass/>, 12 Mart 2012.
- [29] Habitat Kalkınma ve Yönetişim Derneği, Temiz Enerji Yayınları Biyokütle Enerjisi, <http://habitaticingenclik.org.tr/dl/yayinlar/enerji/BiyoKutle.pdf>, 01 Aralık 2011.
- [31] Oracle Education Foundation, Energy Matters Biomass, <http://library.thinkquest.org/20331/types/biomass/advant.html#>, 13 Ocak 2012.
- [32] TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle karşılaştırılması, [http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf), 13 Ocak 2012.
- [33] U.S. Department of Energy, How Wind Turbines Work?, [http://www1.eere.energy.gov/wind/wind\\_how.html#types](http://www1.eere.energy.gov/wind/wind_how.html#types), 18 Kasım 2011.

- [34] Gülsaç, I.I., (2009), Okyanuslardan Gelen Enerji Dalga Enerjisi, [http://www.vizyon21yy.com/documan/Genel\\_Konular/Enerji/Dalga\\_Enerjisi/Dalga\\_Enerjisi.pdf](http://www.vizyon21yy.com/documan/Genel_Konular/Enerji/Dalga_Enerjisi/Dalga_Enerjisi.pdf), 18 Mayıs 2011.
- [35] Power of Waves, Wave Power Wave Dragon, <http://powerofwaves.blogspot.com/2010/03/wave-dragon.html>, 29 Mart 2011.
- [36] Külekçi, Ö.C., (2009), Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi, <http://dergiler.ankara.edu.tr/dergiler/47/1155/13594.pdf>, 04 Nisan 2012.
- [37] Harran Üniversitesi, Jeotermal Enerji, [http://eng.harran.edu.tr/~ccetiner/jeotermal\\_enerji\\_5.pdf](http://eng.harran.edu.tr/~ccetiner/jeotermal_enerji_5.pdf), 27 Şubat 2012
- [38] Nation Master, Energy Statistics, [http://www.nationmaster.com/red/pie/ene\\_geo\\_pow\\_use-energy-geothermal-power-use](http://www.nationmaster.com/red/pie/ene_geo_pow_use-energy-geothermal-power-use), 07 Temmuz 2011.
- [39] Conserve Energy Future, Advantages of geothermal Energy, [http://www.conserve-energy-future.com/Advantages\\_Disadvantages\\_GeothermalEnergy.php](http://www.conserve-energy-future.com/Advantages_Disadvantages_GeothermalEnergy.php), 17 Ekim 2011.
- [40] National Energy Education, Hyropower, 2011.
- [41] Turkey Electricity, Hyroelectric in Turkey, <http://www.turkey-electricity.com/page11.html>, 17 Ekim 2011.
- [42] Sukhatme, S.P. ve Nayak, J.K., (2008). Solar Energy Principles of Thermal Collection and Storage, First Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company, New Delhi.
- [43] Sze, S.M., ve Kwok, K.G., (2006). Physics of Semiconductor Devices, Third Edition, A John Wiley and Sons Inc., New Jersey.
- [44] Neamen, D.A., (2003). Semiconductor Physics and Devices Basic Principles, Third Edition, McGraw- Hill Book Co., New York.
- [45] Luque, A., ve Hegedus, S., (2002). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, First Edition, John Wiley and Sons Inc., New Jersey.
- [46] Wise Geek, What is a Solar Cell?, <http://www.wisegeek.com/what-is-a-solar-cell.htm>, 13 Ocak 2012.
- [47] University of Jordan Faculty of Engineering and Technology, Solar Cell Technology, <http://fetweb.ju.edu.jo/staff/EE/khedher/SolarCellsTechnology2.pdf>, 18 Mart 2011.
- [49] Brütting, W., (2005). Physics of Organic Semiconductors, First Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KgaA, Mörlenbach.
- [50] Gunes, S., Neugebauer H. ve Sariciftçi N.S., (2007). "Conjugated Polymer- Based Organic Solar Cells", Chem. Rev., 107: 1324-1338.

- [51] Brewer Science, Spin Coater Theory, <http://www.brewerscience.com/research/processing-theory/spin-coater-theory/> , 06 Şubat 2011.
- [52] Evcin, A., Kaplama Teknikleri Ders Notları, <http://www.kimmuh.com/evcin/coating/coating10.pdf>, 26 Temmuz 2012.
- [53] Ilıcalı, D., (2010). Tersine Çevrilmiş Hacim Heteroeklemine Dayalı Güneş Gözeleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [54] PV Education, Air Mass, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>, 12 Ekim 2011.
- [56] Kuwabara, T., Sugiyama, H., Yamaguchi, T. ve Takahashi K., (2009). “Inverted Type Bulk-Heterojunction Organic Solar Cell Using Electrodeposited Titanium Oxide Thin Films as Electron Collector Electrode”, Thin Solid Films, 517:3766-3769.
- [57] Kuwabara, T., Nakayama T., Konosuke, U., Yamaguchi, T. ve Takahashi., K., (2008). “ Highly durable inverted-type organic solar cell using amorphous titanium oxide as electron collection electrode inserted between ITO and organic layer “,Solar Energy and Materials and Solar Cells, 92: 1476-1482.
- [58] Zhao, D.W., Tan, S.T., Ke,L., Liu, P., Kyaw, A.K.K.K, Sun., X.W., Lo, G.Q. ve Kwong, D.L., (2010). “ Optimization of An Inverted Type Solar Cell”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94: 985-991.
- [59] Long, Y., (2010). “Effects of metal electrode reflection and layer thicknesses on the performance of inverted organic solar cells”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94: 744-749.
- [60] Chen, X., Yang, J., Haley, L.Y.X.C, Lu, J., Zhu, F. ve Loh, K.P.L. (2010). “Towards high efficiency solution processable inverted bulk heterojunction polymer solar cells using modified indium tin oxide cathode”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 11: 1942-1946.
- [61] Park, H.J., Lee, K.H., Kumar, B., Shin, K.S., Jeong, S.W. ve Kim, S.W., (2010). “Inverted Organic Solar Cells with ZnO Thin Films Prepared by Sol–Gel Method”, Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 5: 1-4.
- [62] Sun, Y., Seo, J.H., Takacs, J.C., Seifert, J. ve Heeger, A.J., (2011). “Inverted Polymer Solar Cells Integrated with a Low-Temperature-Annealed Sol-Gel-Derived ZnO Film as an Electron Transport Layer”, Advanced Materials, 23:1679-1683.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Ergül Meltem AKÇAY

**Doğum Tarihi ve Yeri:** 18.10.1985

**Yabancı Dili:** İngilizce

**E-posta:** akcaymeltem@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece   | Alan          | Okul                       | Mezuniyet Yılı |
|----------|---------------|----------------------------|----------------|
| Y.Lisans | Fizik         | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2011           |
| Lisans   | Fizik         | İstanbul Üniversitesi      | 2009           |
| Lise     | Fen Bilimleri | Bursa Atatürk Lisesi       | 2003           |