

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KADMIYUM SÜLFÜR (CdS) İNCE FİMLERİN FOTOVOLTAİK
HÜCRE UYGULAMALARINDA KULLANILMASI**

NURSEL YAVUZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERAP GÜNEŞ

İSTANBUL,2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KADMİYUM SÜLFÜR (CdS) İNCE FİLMLEİN FOTOVOLTAİK
HÜCRE UYGULAMALARINDA KULLANILMASI

NURSEL YAVUZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERAP GÜNEŞ

İSTANBUL,2012

T.C
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KADMİYUM SÜLFÜR (CdS) İNCE FİLMLEİN FOTOVOLTAİK
HÜCRE UYGULAMALARINDA KULLANILMASI

Nursel YAVUZ tarafından hazırlanan bu tez 14.08.2012 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

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca her türlü destek ve yardımı gösteren, bu çalışmamın gerçekleştirilmesinde beni yönlendiren, bilimsel katkılarını ve tecrübesini benimle paylaşan, sabrını, hoşgörüsünü ve psikolojik desteğini benden hiçbir zaman esirgememiş olan, öğrencisi olmaktan onur duyduğum çok değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Serap GÜNEŞ'e,

Yüksek lisans tezimin tamamlanmasında maddi ve manevi olarak birçok desteğini gördüğüm, deneysel çalışmalarımı kendisinin vesilesi ile tamamladığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, kendisi ile çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı çok değerli hocam Sayın Arş. Gör. Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL'e,

Değerli yardımlarından dolayı Arş. Gör. Gülbeden LİKOĞLU ÇAKMAK'a

Psikolojik destekleri ile daima yanımda olan, samimi dostlukları ile bana güven veren, laboratuardaki yokluklarını daima hissettiğim canım dostlarım Derya ILICALI ve Mücahit ALTUN'a,

Lisans ve yüksek lisans tezlerimde, yazmış olduğu tezlerden ziyadesiyle faydalandığım, başarılarına son derece imrendiğim çok değerli arkadaşım Arş. Gör. Emel ÇEVİK'e,

Yüksek lisans eğitimim sırasında tanıştığım ve bu eğitim vesile ile dostluğunu kazandığım en değerli insan, çok sevdiğim arkadaşım Fatma ÇEKİRDEKÇİOĞLU'na,

Sabahın ilk ışıklarında okula gelirken bana yol arkadaşlığı yapan, deneylerim geç vakitlere kaldığında laboratuarda bana eşlik eden, arkadaşlığından son derece keyif aldığım çok değerli arkadaşım Emine ALİBAŞOĞLU'na,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bana, olgunlaşmama vesile olduğunu düşündüğüm birçok tecrübe kazandıran Meltem AKÇAY'a ve çok değerli arkadaşım Adem KARSLI'ya,

Psikolojik ve manevi her türlü desteklerinden dolayı; başta canım ablam Rezzan ASLAN olmak üzere, candan dostlarım ve kardeşlerim Aslı ÜGE, Aydan ÇALIŞKAN, Aydan ERDEM, Beyza ÜGE, Dilara KÜÇÜK, Duygu ALTUNBAŞ, Emine KURT, Filiz BAŞTÜZEL, Hamide KURT, Hayriye, Hülya ÇANTA, Lütfiye SÖĞÜTLÜ, Mehtap PALAS, Melek AKKUYU, Mine ÇAKAR, Mutlu GÖÇ, Müge AKYOL, Seda SOLAK, Selma İLKBAHAR, Sevgi, Şeyda HAZIR ve Seval SAĞDIÇ 'a,

Her zaman gösterdiği anlayış ve maddi manevi desteği ile bana güç veren canım babama; tüm eğitim hayatım boyunca çalışmalarında sabır ve şefkatle beni yüreklendiren, tezin her aşamasında yaptığı yardımlar ve gösterdiği özveri ile hep yanımda olan canım anneme; çocukluğumda en iyi arkadaşlarım, şimdi ise babam mesabesinde olan canım ağabeylerime, yengeme ve doğumu ile bizleri çok mutlu eden canım yeğenim Bilge'me

Tüm kalbimle sonsuz şükranlarımı arz ederim...

Ağustos, 2012

Nursel YAVUZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	5
ENERJİ.....	5
2.1 Enerji Kaynakları.....	6
2.1.1 Geleneksel (Yenilenemeyen) Enerji Kaynakları.....	6
2.1.1.1 Petrol.....	6
2.1.1.2 Kömür.....	7
2.1.1.3 Doğal Gaz.....	8
2.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Yönelişin Sebepleri.....	8
2.1.3 Yenilenebilir Enerji.....	12
2.1.3.1 Rüzgar Enerjisi.....	13
2.1.3.2 Dalga Enerjisi.....	14
2.1.3.3 Biyokütle Enerjisi.....	15

2.1.3.4	Jeotermal Enerji.....	16
2.1.3.5	Hidroelektrik Enerji.....	17
2.1.3.6	Hidrojen Enerjisi.....	19
BÖLÜM 3.....		22
GÜNEŞ ENERJİSİ.....		22
3.1	Güneş'in Yapısı.....	22
3.2	Güneş'in Enerjisi.....	24
3.3	Güneş Işınımı.....	25
3.4	Dünya'nın Güneş Enerjisinden Faydalanma Potansiyeli.....	28
3.5	Türkiye'nin Güneş Enerjisinden Faydalanma Potansiyeli.....	29
3.6	Güneş Enerjisinden Yararlanma Yolları.....	30
BÖLÜM 4.....		35
FOTOVOLTAİK HÜCRELER.....		35
4.1	Yarıiletkenler.....	35
4.1.1	Asal Yarıiletkenler.....	37
4.1.2	n-Tipi Yarıiletkenler.....	40
4.1.3	p-Tipi Yarıiletkenler.....	40
4.1.4	p-n Eklem.....	41
4.2	Fotovoltaik Hücrelerin Tarihsel Gelişimi.....	43
4.3	Fotovoltaik Hücrelerin Sınıflandırılması.....	45
4.3.1	Birinci Nesil Fotovoltaik Hücreler.....	46
4.3.2	İkinci Nesil Fotovoltaik Hücreler.....	47
4.3.2.1	İnce Film Üretme Yöntemleri.....	49
4.3.3	Üçüncü Nesil Fotovoltaik Hücreler.....	54
4.3.3.1	Boya Duyarlı Fotovoltaik Hücreler.....	54
4.3.3.2	Hibrit Fotovoltaik Hücreler.....	57
BÖLÜM 5.....		60
ORGANİK FOTOVOLTAİK HÜCRELER.....		60
5.1	Organik Fotovoltaikte Kullanılan Malzemeler.....	62
5.2	Fotovoltaik Hücre Üretiminde Kullanılan Organik ve İnorganik Yarıiletken Malzemeler Arasındaki Farklar.....	65
5.3	Organik Fotovoltaik Malzemelerde Soğurma.....	66
5.4	Konjuge Polimerler.....	68
5.4.1	Konjuge Polimerlerin İletkenliği.....	68
5.5	Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Malzemelerin Kaplandığı Altlıklar.....	74
5.6	Hazırlama Teknikleri.....	75
5.6.1	Islak İşlem Tekniği.....	76
5.6.2	Buharlaştırma Yöntemi.....	77
5.7	Organik Fotovoltaik Hücrelerin Temel Çalışma Prensibi.....	78
5.8	Devre Tipleri.....	82
5.8.1	Tek Tabaka Fotovoltaik Hücreler.....	82
5.8.2	İki Katlı Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler.....	83
5.8.3	Hacim Heteroeklemlili Fotovoltaik Hücreler.....	83

5.9	Verim ve Kritik Parametreler.....	84
5.9.1	Güç Dönüşüm Verimi.....	84
5.9.2	Fotovoltaik Hücrelerin Eşdeğer Devre Diyagramı.....	85
5.9.3	Kısa Devre Akımı (I_{sc}).....	86
5.9.4	Açık Devre Gerilimi (V_{oc}).....	88
5.9.5	Dolgu Faktörü (FF).....	88
5.9.6	Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Organik Malzemelerin Morfolojik Özellikleri.....	89
5.10	Organik Fotovoltaik Hücre Performansının İyileştirilmesi.....	91
BÖLÜM 6		95
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....		95
6.1	Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması.....	96
6.1.1	ITO Camların Hazırlanma ve Temizlenme İşlemi.....	96
6.1.2	CdS İnce Filmlerin Kaplanması.....	96
6.1.2.1	CdS Bileşiminin Özellikleri.....	96
6.1.2.2	CdS Çözeltisinin Hazırlanması.....	97
6.1.2.3	CdS Kaplanması.....	98
6.1.3	P3HT:PCBM Çözeltilerinin Hazırlanması ve Kaplanması.....	99
6.1.4	Metal Buharlaştırması.....	101
6.2	Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu.....	102
6.2.1	Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu İçin Gereken Standart Şartlar.....	102
6.2.2	AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu).....	104
6.2.3	X Işını Kırınımı (XRD) Yöntemi.....	105
6.2.4	IPCE (Akıma Dönüşen Foton Verimi).....	107
6.3	CdS İnce Film Kalınlık Etkisinin İncelenmesi.....	108
6.3.1	Akım-Gerilim Karakterizasyonu ve IPCE Sonuçları.....	108
6.3.2	CdS İnce Filmlerin AFM Görüntüleri.....	112
6.3.3	CdS İnce Filmlerin XRD Desenleri.....	114
6.3.4	CdS İnce Filmlerin Soğurma Eğrileri.....	116
6.4	PEDOT:PSS Etkisinin İncelenmesi.....	117
6.4.1	Akım-Gerilim Karakterizasyonu ve IPCE Sonuçları.....	118
6.5	Metal Kontakt Etkisinin İncelenmesi.....	122
6.5.1	Akım-Gerilim Karakterizasyonu ve IPCE Sonuçları.....	123
BÖLÜM 7.....		128
SONUÇ ve ÖNERİLER.....		128
KAYNAKLAR.....		130
ÖZGEÇMİŞ.....		139

SİMGE LİSTESİ

$^{\circ}\text{C}$	Celcius derece
eV	Elektronvolt
U	Uygulanan voltaj
J _{max}	Maksimum akım yoğunluğu
V _{max}	Maksimum gerilim
λ	Dalga boyu
P _{ışık}	Gelen ışın şiddeti
mV	Milivolt
mA	Miliamper
μ	Mobilite
nm	Nanometre
η	Güç dönüşüm verimi
EM	Elektromanyetik
T	Sıcaklık (Kelvin cinsinden)
S	Siemens
E _{c_n}	N tipli yarıiletkenin iletim bandı enerji seviyesi
E _{F_n}	N tipli yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E _{v_n}	N tipli yarıiletkenin valans bandı enerji seviyesi
E _{c_p}	P tipli yarıiletkenin iletim bandı enerji seviyesi
E _{F_p}	P tipli yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E _{v_p}	P tipli yarıiletkenin valans bandı enerji seviyesi
MWp	Mega Watt
kWh	Kilo Watt Saat
P _{ışık}	Işığın gücü
I _{aydınlık}	Aydınlık akımı
ml	Mililitre
Ω	Ohm
mA	Miliamper
K	Kelvin
E _{yapısal}	Yapısal elektrik alan
λ_{max}	Maksimum dalgaboyu
nm	Nanometre

KISALTMA LİSTESİ

TWh	Terawatt saat
ITO	İndiyum tin oksit
P3HT	Poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil)
PC ₆₁ BM	(1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6, 6]C61)
PFB	(poli (9-9 –dioktilfluoren–co–bis–N–N’-(4-butilfenil)–bis–N–N’-fenil–1, 4 fenilendiamin)
CN-MEH-PPV	(poli-[2-metoksi-5-(2’-etilhekziloksi)-1, 4-(1-siyanovinilen)-fenilen)
F8TB	(poli(9, 9’-dioktilfluoreneko-benzotiadiazol)
HOMO	İşgal edilmiş en yüksek enerji seviyesi
LUMO	İşgal edilmemiş en düşük enerji seviyesi
MIM	Metal-yalıtkan-metal
IPCE	Gelen fotonun elektrik akımına dönüşüm verimi
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AM	Hava kütlesi
RPM	Dakika başına dolanım sayısı
TiO ₂	Titanyum Oksit
PCE	Güç dönüşüm verimi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yenilenebilir enerji kaynakları.....	13
Şekil 2.2 Rüzgar türbinleri.....	14
Şekil 2.3 Dalga enerjisi jeneratörü.....	15
Şekil 2.4 Biyokütle enerji hammaddeleri.....	16
Şekil 2.5 Jeotermal enerji santrali.....	17
Şekil 2.6 Bir hidroelektrik santralinin çalışma süreci.....	18
Şekil 2.7 Hidrojen molekülünün üretimi ve kullanıldığı enerji tüketim sektörleri.....	20
Şekil 3.1 Güneş'in büyüklüğünün Dünya ile karşılaştırılması.....	23
Şekil 3.2 Füzyon reaksiyonu.....	24
Şekil 3.3 Güneş'ten yayılan EM dalga spektrumu.....	25
Şekil 3.4 Yeryüzüne ulaşan Güneş ışınım eğrilerinin siyah cisim ışınım eğrisi ile karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.5 Dünya yüzeyine gelen Güneş ışınları.....	27
Şekil 3.6 Güneş'ten gelen ışınımın, yeryüzüne geçme, atmosferde soğurulma ve uzaya yayılma yüzdeleri.....	28
Şekil 3.7 Kıtalar itibariyle Güneş Enerjisi kurulu güç yüzdeleri.....	29
Şekil 3.8 Türkiye'nin bölgelere göre aldığı yıllık toplam Güneş Enerjisi verileri.....	30
Şekil 3.9 Parabolik Oluk Kollektörler.....	32
Şekil 3.10 Parabolik Çanak Kollektörler.....	33
Şekil 3.11 Merkezi Alıcı Kollektörler.....	33
Şekil 4.1 Yalıtkan, yarıiletken ve iletken hallerin band enerji seviyeleri.....	36
Şekil 4.2 II ve VI A grubu elementlerin Periyodik Tablo'da gösterimi.....	37
Şekil 4.3 T=0 K durumunda asal yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının bandlardaki pozisyonu.....	38
Şekil 4.4 Sıcaklığın 0 K'den itibaren artması durumunda asal yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının hareketi.....	39
Şekil 4.5 Fosfor (P) atomu katkılanmış Si (Silisyum) kristali.....	40
Şekil 4.6 Bor (B) atomu katkılanmış Si (Silisyum) kristali.....	41
Şekil 4.7 (a) p ve n tipi yarıiletkenlerin temas ettirildiği ve termal dengeye ulaştıkları anın şematik gösterimi (b) p-n kavşağında enerji bandı.....	42
Şekil 4.8 Bir p-n eklem fotovoltaiik hücre olarak çalışması.....	43
Şekil 4.9 Elektrolit çözeltisi içerisinde batırılmış elektrotlar üzerine ışık düşürülmesi.....	44

Şekil 4.10	Tek kristal ve Polikristal Silisyum kullanılarak hazırlanan fotovoltaik paneller.....	47
Şekil 4.11	CdS/CdTe ince film fotovoltaik hücrelerin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.12	Kimyasal Püskürtme Tekniği.....	51
Şekil 4.13	Termal buharlaştırma sisteminin şematize edilmiş hali; 1. Vakum odası 2. Altlık tablası 3. Numune tutucu 4. Metal buharı 5. Isıtıcı filaman 6. Buharlaştırılacak metal.....	53
Şekil 4.14	Fotosentez.....	55
Şekil 4.15	Boya Duyarlı Fotovoltaik Hücre.....	56
Şekil 4.16	Hibrit fotovoltaik hücre devre tipi.....	58
Şekil 5.1	Esnek yüzeye hazırlanmış organik fotovoltaik hücre.....	60
Şekil 5.2	Organik yarıiletkenlerin işlenebilme ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılması.....	62
Şekil 5.3	Organik fotovoltaik hücrelerde kullanılan malzemeler.....	63
Şekil 5.4	Konjuge polimerler ve bir C ₆₀ türevi.....	64
Şekil 5.5	Genel olarak kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi (Air Mass/AM) 1.5 doğal güneş spektrumunun kıyaslaması...	67
Şekil 5.6	Poliasetilen zinciri.....	69
Şekil 5.7	C atomu için temel enerji seviyeleri.....	69
Şekil 5.8	sp ² hibritleşmesinin şematik olarak gösterimi.....	70
Şekil 5.9	Etilen (C ₂ H ₄)’de sp ² hibritleşmesi sonucunda oluşan sigma (σ) ve pi (π) bağları.....	71
Şekil 5.10	Konjuge polimerlerin iletkenlik aralığı.....	72
Şekil 5.11	a) Zincir üzerinde yükün taşınması b) Zincirler arasında yükün taşınması c) Partiküller arasında yükün taşınmasının şematik gösterimi.....	73
Şekil 5.12	Konjuge polimerlerde yük taşıyıcılarının transferi.....	74
Şekil 5.13	a) ITO kaplı cam b) esnek altlık.....	74
Şekil 5.14	C ₆₀ ve C ₆₁ ’in moleküler yapısı.....	76
Şekil 5.15	a) Dönel kaplama b) bıçak ağzı ile kaplama sistemleri.....	76
Şekil 5.16	Eldivenli kabin sistemi (Glove Box).....	77
Şekil 5.17	Aktif tabakada elektron-delik çiftinin oluşması ve yüklerin uygun elektrotlara ulaşması.....	78
Şekil 5.18	İki metal elektrot arasına sıkıştırılmış organik yarıiletken tabakaların farklı çalışma prensipleri: a) kısa devre koşulu b) düz bant koşulu c) ters yönde kutuplama ve d) ileri yönde kutuplama.....	81
Şekil 5.19	Bir polimer fotovoltaik hücrenin akım-voltaj grafiği (I-V eğrisi). Kırmızı düz çizgi aydınlatma altında, siyah kesikli çizgi ise karanlıktaki I-V karakteristiğini göstermektedir.....	81
Şekil 5.20	Tek tabaka fotovoltaik hücre yapısı.....	82
Şekil 5.21	İki katlı heteroeklem fotovoltaik hücre yapısı.....	83
Şekil 5.22	Hacim heteroeklemi fotovoltaik hücre yapısı.....	84
Şekil 5.23	Bir fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre diyagramı.....	85
Şekil 5.24	Paralel Rp direnci ve seri Rs direnci eklenmiş fotovoltaik hücre eşdeğer devre diyagramı.....	86
Şekil 5.25	a) Fotovoltaik hücre üzerine paralel direnç etkisi (Rp=∞ durumunda) b) seri direnç etkisi (Rs=0 durumunda).....	89
Şekil 5.26	Yüzeyi AFM ile taranmış MDMO-PPV:PCBM 1:4 (ağırlık olarak) karışımı a) klorobenzende dönel kaplama ile kaplanmış b) toluende dönel kaplama ile kaplanmıştır.....	90

Şekil 5.27	a) Normal devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagram resmi b) Tersine çevrilmiş devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagramı resmi.....	94
Şekil 6.1	Tersine Çevrilmiş Hacim Heteroeklemine Dayalı Fotovoltaik Hücelere Ait Devre Şeması.....	95
Şekil 6.2	Ultrasonik Banyo.....	96
Şekil 6.3	a) $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ ve b) CdCl_2	98
Şekil 6.4	En soldan başlayarak sırasıyla; $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$, CdCl_2 , destile su, üstünde CdS çözeltisi karışan manyetik karıştırıcı ve spray şişesi.....	99
Şekil 6.5	a) Rezistans (soldaki resim) b) CdS kaplanmış ITO cam.....	99
Şekil 6.6	PCBM ve P3HT'nin kimyasal yapısı.....	100
Şekil 6.7	PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı.....	100
Şekil 6.8	Dönel kaplama cihazı (Spin coater).....	101
Şekil 6.9	Termal Buharlaştırma Cihazı.....	102
Şekil 6.10	Hava kütlesi (AM) biriminde, atmosfer içerisinde güneş radyasyonunun yol uzunluğu, zenit noktasından itibaren açı ile artar. 0° , zenit noktası; 48.2° , 1.5 AM; 60.2° ise 2.0 AM'dir. Bunlar zenit noktasından itibaren ölçülen açılardır. Literatürde, fotovoltaik hücre verimi ölçümleri için, 1.5 AM spektrumu standart spektrum olarak tercih edilir.....	103
Şekil 6.11	Solar Simülatör.....	104
Şekil 6.12	Bir kristal düzleminde x ışını kırınımının meydana gelişi.....	105
Şekil 6.13	IPCE Cihazı.....	108
Şekil 6.14	a) 330 nm kalınlıklı CdS ile hazırlanan tersine çevrilmiş hacim heteroeklemlili fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir; b) 1150 nm kalınlıklı CdS ile hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir; c) 2815 nm kalınlıklı CdS ile hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir.....	110
Şekil 6.15	330 nm, 1150 nm ve 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmler kullanılarak hazırlanan fotovoltaik hücrelerin IPCE eğrileri.....	112
Şekil 6.16	a) 330 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin AFM görüntüleri b) 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin AFM görüntüleri c) 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin AFM görüntüleri.....	113
Şekil 6.17	a) 330 nm kalınlıklı CdS ince filmin XRD eğrisi b) 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmin XRD eğrisi c) 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmin XRD eğrisi.....	114
Şekil 6.18	300 nm, 1150 nm ve 2850 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin soğurma eğrileri.....	117
Şekil 6.19	a) ITO/330 nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri PEDOT:PSS kullanılmadan hazırlanan hücredir; b) ITO/1150 nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri PEDOT:PSS kullanılmadan hazırlanan hücredir; c) ITO/2815 nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri PEDOT:PSS kullanılmadan hazırlanan hücredir.....	119
Şekil 6.20	a) ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin ve PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrilerinin	

	karşılaştırması b) ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin ve PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması c) ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin ve PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması.....	121
Şekil 6.21	a) ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir; b) ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri; c) ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri.....	124
Şekil 6.22	a) ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au ve ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması b) ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au ve ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması c) ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au ve ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması.....	126

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Enerji kaynaklarının çevreye etkileri.....21
Çizelge 6.1	Farklı CdS kalınlıkları sonucunda elde edilen değerler..... 109
Çizelge 6.2	PEDOT:PSS'in varlığında ve yokluğunda elde edilen değerler..... 118
Çizelge 6.3	Au ve Ag kontakla oluşturulan aygıtlardan elde edilen sonuçlar.... 123

**KADMİYUM SÜLFÜR (CdS) İNCE FİMLERİN FOTOVOLTAİK
HÜCRE UYGULAMALARINDA KULLANILMASI**

Nursel YAVUZ

Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serap GÜNEŞ

Bu tezde; öncelikle CdS ince filmlerin hazırlanması, hazırlanan filmlerin fiziksel ve optik özelliklerinin belirlenmesi ve CdS ve yarıiletken polimerler kullanılarak tersine çevrilmiş (inverted type) hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücrelerin üretilmesi hedeflenmiştir. Fotovoltaik hücrelerin üretilmesi sağlanarak; CdS ince film kalınlık etkisi, PEDOT:PSS varlığının etkisi, farklı metal kontak etkileriyle beraber morfolojik ve fotofiziksel özellikler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik hücre, organik fotovoltaik hücre, tersine çevrilmiş (inverted) hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücreler

ABSTRACT

USING CADMIUM SULPHUR (CdS) THIN FILMS IN PHOTOVOLTAIC CELL APPLICATIONS

Nursel YAVUZ

Department of Physics
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Serap GÜNEŞ

In this thesis, the aim is to prepare of CdS thin films and to determine the optical and physical properties of these films and also to fabricate inverted type bulk heterojunction solar cells using CdS and semiconducting polymers. Effects of CdS thin film thicknesses, the presence of PEDOT: PSS, different metal contacts and also morphological and photophysical properties have been investigated as well.

Key words: CdS thin films, photovoltaic cells, organic photovoltaic cells, inverted type bulk heterojunction photovoltaic cell

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

1.1 Literatür Özeti

İletken polimerlerin, ışık tarafından üretilen yük taşıyıcılarını uygun elektrotlara iletimindeki fakirliği yük rekombinasyonu ile sonuçlanır. Böyle cihazlara, CdS gibi yüksek elektron ilgisine sahip bir inorganik dahil etmek, foto-uyarılmadan sonra oluşan eksitonların rekombinasyon süresini uzatmaya yardımcı olur [1]. Bu nedenle, p tipi yarıiletken malzeme ile heteroeklem oluşturabilen ve n tipli davranış gösteren CdS filmler fotovoltaiik hücrelerde yaygın olarak kullanılırlar. Li ve arkadaşları tarafından da, aktif polimer tabakası ve Al (alüminyum) elektrot arasına bir CdS katmanı eklenerek bu çalışmaya örnek bir deneme yapılmıştır. Böylece fotovoltaiik hücrenin güç dönüşüm veriminin arttığı gözlemlenmiştir [2]. Böyle çalışmalarda CdS inorganik yarıiletkenin; yüksek elektron ilgisi, iyi kimyasal kararlılığı, kolay üretilmesi, görünür ışığı iyi soğuran geniş bant aralığı, birçok cihaz kullanılarak üretilebilirliği gibi önemli avantajlarından yararlanılır [3].

M. C. Arenas ve arkadaşları tarafından katmanlı P3OT/CdS fotovoltaiik hücreler hazırlanmıştır. Polimer katman, damlatma (drop casting) ve dönel kaplama (spin coating) yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. CdS ince filmi ise ITO cam üzerine kimyasal banyo yöntemi ile kaplanmıştır. Son olarak, Au (altın) kontak P3OT malzemesi üzerine buharlaştırılmıştır. Damlatma ile hazırlanan P3OT/CdS hibrit fotovoltaiik hücrelerde $PCE=0.06$, $FF=0.35$; dönel kaplama ile hazırlanan P3OT/CdS hibrit fotovoltaiik hücrelerde ise $PCE=0.017$ ve $FF=0.45$ olarak belirlenmiştir [4].

Yah Chzeh Ing ve arkadaşları tarafından organik-inorganik p-n eklem, P3HT (p-tipli) ve CdS (n-tipli)'nin birleşiminden oluşturulmuştur. Bu filmler, ITO cam üzerine elektrokaplama yöntemi ile P3HT biriktirildikten sonra aynı yöntemle P3HT üzerine

CdS biriktirilerek hazırlanmıştır. Sonuç olarak, hazırlanan hibrit CdS/P3HT filmlerin, saf P3HT'ye göre fotoakıma daha yüksek tepki verdiği ve ışığı daha geniş bir bölgede soğurduğu görülmüştür [5].

Jian-Xin Tang ve arkadaşları tarafından yapılan diğer çalışmada CdS'nin kullanıldığı diğer çalışmalardan farklı olarak CdS, pencere malzemesi olarak kullanılmıştır. Jian-Xin Tang ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada; P3HT ve PCBM gibi polimer malzemelerin karışımından oluşan, elektron toplayıcı aktif katman olarak görev alan P3HT:PCBM hacim heteroeklemi aktif tabakası ile ITO metal katod arasında ALD ile üretilen CdS ince filmlerden meydana gelen verimli bir tersine çevrilmiş (inverted) fotovoltaiik hücre rapor edilmiştir. 3.5 nm, 10.5 nm, 17.5 nm, 38.5 nm gibi dört farklı kalınlıkta CdS ince film kullanılarak hazırlanan tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücrelerde 17.5 nm CdS film kalınlığının en ideal kalınlık olduğu tespit edilmiştir. Hava kütlesi 1.5 AM ve 100 mW/cm² aydınlatma altında elde edilen sonuçlar; J_{sc}=8.94 mA/cm², V_{oc}=0,61 V, FF=0.611 ve PCE=%3.33 şeklindedir [6].

Can Li ve ekip arkadaşlarının yaptığı, P3HT'nin elektron donör ve CdS nanogözenekli filmlerin elektron akseptör olarak birleşiminden meydana gelen hibrit fotovoltaiik hücrelerin performansı üzerinde, arayüzeysel değişimin etkisi rapor edilmiştir. CdS yüzeyi üzerine N719 boya moleküllerinin aşılması ile cihaz performansı yükseltilebilmektedir. P3HT kalınlığının optimize edilmesi ile CdS/N719/P3HT hibrit fotovoltaiik hücrelerin güç dönüşüm verimi, CdS/P3HT cihaz yapısının %0.06 veriminden %1.06'ya arttırılmıştır. 1.5 AM hava kütlesi ve 100 mW/cm² aydınlatma altında CdS/P3HT hibrit fotovoltaiik hücrelerde sonuçlar; J_{sc}=0.57 mA/cm², V_{oc}=493, FF=0.23 ve PCE=%0.06 ve CdS/N719/P3HT hibrit fotovoltaiik hücrelerde sonuçlar; J_{sc}=5.34 mA/cm², V_{oc}=518 mV, FF=0.38 ve PCE=% 1.06 şeklinde tespit edilmiştir [7].

Stubhan Tobias ve arkadaşlarının inceledikleri çalışmada; katot olarak kullanılan saydam elektrot kaplı camın ve anot olarak kullanılan en üstteki metal katmanın arasına sıkıştırılan P3HT:PCBM aktif tabakasından meydana gelmiştir. Anot ve aktif tabaka arasına ince PEDOT:PSS tabakası kaplanmıştır. ITO cam ve aktif tabaka arasında kullanılan arayüzeysel malzeme ise Al katkılı ZnO'dir. Deney sonuçları; J_{sc}=9.57 mA/cm², V_{oc}=0.57 V, FF=0,477 ve PCE=%2.59 şeklindedir [8].

Jonas Weickert ve ekibi tarafından; 1:10 oranında isopropanolde seyreltilmiş PEDOT:PSS'i, delik iletken elektrotun iş fonksiyonunu iyileştirmek için inverted

ITO/TiO₂/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag fotovoltaiik hücrede kullanmıştır. Burada metal elektrotlar termal buharlaştırma ve püskürtme yöntemiyle kaplanmıştır. PEDOT:PSS'in varlığı verimi olumlu yönde etkilemiştir. PEDOT:PSS kullanılmadan yapılan inverted fotovoltaiik hücrede elde edilen sonuçlar; $J_{sc}=6.29 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}= 0.41 \text{ V}$, $FF=0.341$ ve $PCE=\%0.92$ şeklindedir. PEDOT:PSS kullanıldığında ise $J_{sc}=6.32 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.58 \text{ V}$, $FF=0.517$ ve $PCE=\%1.96$ değerlerinde sonuçlar bulunmuştur [9].

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde küresel ısınma dünyayı tehdit eden en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Meydana gelen çevresel felaketler ve ani iklim değişimleri bunun en önemli kanıtlarındandır. Küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden biri ve tetikleyicisi de enerji üretiminden kaynaklanan kirliliktir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmedikçe, bu sorunla başa çıkılamayacaktır. Yenilenebilir enerji, adından da anlaşılabilir gibi kendisini yenileyebilen kaynaklardan elde edilen veya herhangi bir nedenle tükenmeyen enerji kaynakları demektir. Dünyanın enerji çerçevesi açısından bakıldığında yenilenebilir enerji kaynakları büyük öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında sıralanan Güneş; temiz, çevre dostu ve bedava olduğu göz önüne alındığında, dünya için her zaman en güçlü enerji kaynağı olmuştur.

Güneş ışığı, fotovoltaiik hücreler kullanılarak elektriğe dönüştürülebilir. Fotovoltaiik hücreler; hesap makineleri, güneş lambaları, uzay araçları ve uydularda uygulama alanı bulmuştur. İnorganik malzemeler kullanılarak hazırlanan geleneksel fotovoltaiik hücrelerin üretim süreci, çok pahalı malzemeler ve oldukça pahalı işlem teknikleri gerektirmektedir. Fotovoltaiik hücrelerde silikon kristallerinin kullanılması, fotovoltaiik hücreleri oldukça pahalı hale getirmektedir. Diğer yandan silikon saflaştırılması oldukça güç bir işlem olduğundan çok fazla miktarda silikon israf edilmektedir. Buna ek olarak sıcaklık arttıkça silikon hücrelerin performansı düştüğünden, silikon hücrelerin uzun süreli konsantre çalışması soğutma sistemi gerektirmektedir. Bu sistemin yerine geçecek yeni fabrikasyon teknikleri bulmak için bilim adamları yoğun çaba harcamaktadırlar. Bu bağlamda; ucuzluk, kolay işlenebilirlik, aygıt üretimi için kullanılan aktif tabakaların çözünebilirliği, hafiflik ve esneklik gibi benzersiz özelliklere sahip olan organik fotovoltaiik hücreler son yıllarda oldukça büyük ilgi görmektedir ve derin araştırmalara konu olmuştur. Dünyadaki pek çok araştırma grubu arasındaki

rekabet, organik fotovoltaik hücrelerin verimini birkaç yıl öncesine kadar en gelişmiş teknolojik ürün için verim değeri olarak belirlenen %4'ten, günümüzde %8'lere taşımıştır. Organik fotovoltaik hücrelerin verimindeki bu hızlı ve teknolojik hamle, organik fotovoltaik hücrelerin aslında çok umut verici bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Yeni yapılan teorik hesaplamalar; fotovoltaik gereksinimlere uygun yeni malzemeler geliştirildiği ve cihaz performansını düşürdüğü tespit edilen olumsuz etkiler ortadan kaldırıldığı takdirde verimin %10 ve üzerine çıkmasında herhangi bir teknolojik engel olmadığını ortaya koymaktadır.

Normal devre tipli organik fotovoltaik hücrelerde cihaz performansını olumsuz yönde etkileyen etkenlerden biri, bu tip devrelerde sıklıkla kullanılan Al metal elektrotun hava ile temas etmesi sonucunda kolaylıkla oksitlenmesidir. Son zamanlarda, bu problemi çözebilmek için birçok araştırma grubu, fotovoltaik hücrelerde Al elektrot yerine korozif olmayan elektrot uygulamasını geliştirmiştir. Bu çalışmada da, literatürde “inverted type solar cells” olarak adlandırılan, Al yerine farklı metal kontakların kullanıldığı korozif olmayan elektrot uygulaması üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu amaçla hazırlanan tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerde, ITO kontak ve aktif tabaka arasında kullanılan CdS ince filmlerinden boşluk engelleyici katman olarak yararlanılmıştır. Al elektrot yerine ise Ag (Gümüş) ve Au (Altın) 'dan yararlanılmıştır. Aktif tabaka olarak, literatürde derin araştırmalara konu olmuş ve kolay ulaşılabilen iki kimyasal malzeme P3HT ve PCBM bu tezde kullanılmıştır.

1.3 Hipotez

Yapılacak bu tez çalışmasında; boşluk engelleyici tabaka olarak kullanılan CdS ince filminin kalınlığının artırılması, tersine çevrilmiş fotovoltaik hücre performansını olumsuz yönde etkiler. P3HT ve PCBM malzemelerin karışımından oluşan aktif tabaka, fotovoltaik hücre performansını sadece P3HT polimerinden oluşan aktif tabakaya göre kat ve kat artırır. Fotovoltaik hücrelerde Au (Altın), Ag (Gümüş) metaline göre ince film içerisine daha kolay ve daha çok yayılabildiğinden, Ag'nin metal elektrot olarak kullanılmasının verimi olumlu yönde etkilemesi beklenir.

BÖLÜM 2

ENERJİ

Enerji kavramı fiziksel olarak en basit şekilde bir cisim ya da sistemin iş yapabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir. Fiziksel bir sistemin ne kadar iş ya da ısı alışverişi yapabileceğini belirleyen bir durum fonksiyonudur. Enerji korunumludur. Yani evrende var olan enerji yok olmaz, sadece biçim değiştirebilir.

Enerji doğada mevcuttur ve fiziksel kurallara göre yoktan var edilemez ve var olan enerji yok edilemez; ancak bir şekilden diğer bir şekle dönüştürülebilir. Buna enerjinin korunumu ilkesi denilmektedir ve enerjiyi kullanan tüm sistemlerin ana ilkesi de bu olmaktadır. Enerji bir sisteme ilave edildiğinde veya sistemden alındığında sistemin özelliklerinde bir değişiklik meydana getirir. Bir sisteme verilen enerji, enerjinin korunumu ilkesine göre iş olarak veya diğer bir formda geri alınır. Doğada çeşitli şekillerde bulunan enerji çağdaş ekonomilerdeki konut, sanayi, ulaştırma ve tarım sektörlerinde en önemli girdi haline gelmiş bulunmaktadır.

Enerji ne gösterilebilir ne de tartılabilir. Ancak herkes onun varlığından emindir. Mesela, ısının enerji olduğu bilinir ama bu sadece ısıttığı için değildir. Isı, suyu kaynatır ve oluşan buhar, buhar türbinlerini çevirerek elektrik üretebilir. Buradan ısının enerji olduğu görülür. Metalleri bükme normalde zor bir iştir. Fakat iki araba çarpıştığında her türlü metal parçası birbirine girer, çarpışma hız enerjisidir. Bu enerji arabayı parçalayacak güçtedir. Başka bir enerji türü ise depolanmış enerjidir. Kömür enerji deposudur. Havadaki oksijenle birlikte yanan kömür, suyu kaynatan ve elektrik üreten türbini döndürmeye yarayan ısıyı sağlar. Buradan enerjinin ısı, hız ve depolanmış enerji olmak üzere üç temel biçimi olduğunu bilmekteyiz. Bu enerjilere bağlantılı olarak iki tip enerji daha vardır. Bunlar kimyasal enerji ve elektrik enerjisidir.

Kimyasal enerji, sadece bir kimyasal tepkime sonucu ortaya çıkar.

Elektrik enerjisi ise daha başka türden bir enerjidir. Bazı kimyasal tepkimeler sonucu (örneğin pil bu yolla üretilen elektriğin bir kaynağıdır) açığa çıkan elektronların oluşturduğu elektrik akımı, elektrik enerjisi üretimine sadece bir örnektir [10].

2.1 Enerji Kaynakları

Ekonomik kalkınmanın temel öğelerinden biri olan enerji, insanlığın vazgeçilmez gereksinimlerinden biridir. Günümüzde yaşamın vazgeçilmezi olan enerji, insan yaşam standartlarını yükselten ve hayatı kolaylaştıran en önemli parametredir. Öyle ki bugün artık savaşların sebebini bile enerji gereksinimleri oluşturmaktadır. Bu kadar büyük bir önem arzeden enerjinin kaynakları geleneksel (yenilenemeyen) ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

2.1.1 Geleneksel (Yenilenemeyen) Enerji Kaynakları

Fosil yakıtlar yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Petrol, kömür ve doğalgaz yenilenemeyen enerjiyi oluşturmaktadır. Bu kaynaklar hakkında aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı bilgi verilecektir.

2.1.1.1 Petrol

Petrol; taş anlamına gelen petra ile yağ anlamına gelen oleum sözcüklerinin bileşiminden meydana gelmiştir. Petrolün tam olarak belirli bir yapısı yoktur. Hidrojen ve karbondan oluşan ve içerisinde az miktarda nitrojen, oksijen ve kükürt bulunan çok karmaşık bir bileşimdir. Petrol, sadece yakıt anlamında benzin, gazyağı, dizel, motor yağı ve fuel oil gibi düşünülmemeli; aynı zamanda yeraltından çıkarılan ham petrol olarak da düşünülmelidir. Normal şartlarda gaz, sıvı ve katı halde bulunabilir. Gaz halindeki petrol, imal edilmiş gazdan ayırt etmek için genelde doğal gaz olarak adlandırılır. Ham petrol ve doğal gazın ana bileşenleri hidrojen ve karbon olduğu için bunlar "Hidrokarbon" olarak da isimlendirilirler. Hidrokarbon ise, karbon ve hidrojenin uygun bileşimleriyle meydana gelen metan, etan, propan, bütan, v.b. gibi kimyasal bileşiklerdir. Bu bileşikler de farklı kimyasal yapılara sahip olduğu için farklı tiplerde petrolün oluşmasına yol açmaktadır [11].

Günümüzden milyonlarca yıl önce dünyanın büyük kısmını denizler oluşturuyordu. Denizde yaşayan bitki ve hayvanların ölmesi sonucunda deniz dibinde atıklar birikmiş;

zamanla bu atıkların üzerine çamur, toprak ve yer katmanlarının gelmesiyle bu atıklar yeraltında kalmışlardır. Yeraltında kalan hayvan ve bitki ölüleri bakterilerin yardımıyla çürüyerek fosilleri oluşturmuştur. Dünya üzerindeki katmanların orojenezle birlikte deniz içerisinden yükselmesi ile karalar oluşmuş ve bu karaların içinde sıkışmış haldeki tortul tabakalar içindeki fosillerin yağ ve gazları, ısı ve basıncın etkisiyle ayrılmıştır. Bu ayrılan yağlardan petrol; kabarcıklar halindeki gazlardan ise doğal gaz elde edilmiştir.

1970-1980 döneminde, Dünya'daki petrol arzındaki yetersizlikler nedeniyle enerji krizleri yaşanmış, ülkelerin enerji santrallerinin, ihtiyaçlarını karşılayacak düzeyde olmaması ve çoğunlukla dışa bağımlı olmasından dolayı enerji arz ve talep dengesi bozulmuş, dolayısıyla zorunlu enerji kısıtlamalarına başvurulmuştur.

2.1.1.2 Kömür

Kömürün ilk olarak Çinliler tarafından Milattan Önce bulunduğu sanılmaktadır. Marco Polo Çin'i ziyaretinde kömürü görmüş ve gördüğü en ilginç şey olduğunu söylemiştir. Kömürün varlığını kanıtlayan ilk belgeler 12.yüzyıla aittir. Daha sonra 18.yüzyılın ikinci yarısında kömür yoğun olarak dünyada kullanılmaya başlanmıştır. Kömür hem rezerv ömrü olarak diğer tükenebilir enerji kaynaklarına göre daha uzun ömre sahip olduğundan hem de bulunuş ve yayılış itibarıyla dünyada 100'ü aşkın ülkede çıkarıldığından dolayı Dünya için vazgeçilmez bir enerji kaynağı olmuştur. Ancak kömür ardında bıraktığı yoğun kirlilik; üretim, hazırlama, nakliyat ve tüketim safhalarındaki zorluklar ve kömür tiplerinin yanmasındaki verimsizlikler gibi birçok dezavantaja sahiptir.

Türkiye'de kömürünün tam olarak ilk nerede ve ne zaman bulunduğu kesin olarak bilinmemektedir. Buna karşın 1.Dünya Savaşı esnasında ihtiyaç doğrultusunda Soma ve Anadolu'nun çeşitli yerlerinden linyit kömürü alınmış ve buralarda işletmeler açılmıştır [10].

Linyit, ısıl değeri düşük, barındırdığı kül ve nem miktarı fazla olduğu için genellikle termik santrallerde yakıt olarak kullanılan bir kömür çeşididir. Buna rağmen yer kabuğunda bolca bulunduğu için sıklıkla kullanılan bir enerji hammaddesidir. Taşkömürü ise yüksek kalorili kömürler grubundadır. Yerli kaynak potansiyelimizin 12,4 milyar tonunu linyit; 1,33 milyar tonunu taşkömürü oluşturmaktadır [11].

2.1.1.3 Doğal Gaz

Doğal gaz; havadan hafif, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Yer altında, petrolün yakınında bulunur. Yeryüzüne çıkarılışı petrole aynıdır, daha sonra büyük boru hatları ile taşınır. Günümüzde doğal gaz birçok yönüyle tercih edilen bir enerji kaynağı olmuştur. Diğer fosil enerji kaynaklarına göre nispeten temiz ve verimli bir enerji kaynağı olmasından dolayı birçok sektörde kullanılan doğal gaz özellikle sanayi ve konut sektöründe çok yaygın bir şekilde tüketilmektedir.

Yetmişli yıllarda baş gösteren petrol krizinden sonra enerji ihtiyacını karşılayabilmek için bütün dünya arayış içine girmiş, bunun sonucu olarak da 1973 yılından itibaren doğal gaz petrole alternatif olarak bulunmuş ve kullanılmıştır. Pek çok ülke enerji ihtiyacını petrole karşılayamayınca doğal gaza yönelmiş ve bu yönde ciddi yatırımlar yapılmıştır [11].

Başta doğal gazın elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılmasına tepkiler oluşmuş ve bu sahada kullanılmasına kısıtlamalar getirilmiştir. Çevreye olan etkisinin termik santrallere göre az oluşu, yatırım maliyetlerinin diğer santrallere göre az oluşu ve işletim kolaylıklarından ötürü kısıtlamalar seksenli yıllarda kaldırılmıştır. Kısıtlamaların kaldırılmasıyla bu sahada ilerlemeler ve teknolojik gelişmeler ortaya çıkmıştır.

Türkiye’de doğal gaz kullanımı 1976 yılında başlamıştır. Önceleri Trakya bölgesinde kısıtlı olarak çıkarılan doğal gaz yine bu bölgede yerel enerji ihtiyacını karşılamak için kısmi olarak kullanılmıştır. 1987 yılına kadarki dönemde Türkiye’nin enerji tüketimi içindeki payı ihmal edilebilir düzeyde olan doğal gaz, dünyadaki gelişmeler doğrultusunda bu yıldan sonra gerekli önem verilerek ve politikalar oluşturularak, tüketimi artırılmıştır. Her ne kadar üretimde de yıllara göre artış olsa da hızla artan doğalgaz talebinin yanında arz çok küçük bir seviyede kalmaktadır. Bu yüzden Türkiye doğalgaz bakımından dışa bağımlıdır [10-12].

Fosil yakıtlarda dışa bağımlılık ve bunun yanında birçok olumsuz etki, Güneş gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelmenin daha isabetli olacağı fikrini akıllara getirmektedir. Bir sonraki bölümde ise, bu zararsız alternatif enerji kaynaklarından detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

2.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Yönelişin Sebepleri

Enerji, çağımızda en önemli tüketim maddelerinden biri ve vazgeçilmez bir uygarlık aracıdır. Ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen ölçütlerin başında gelen enerji tüketimi, sürekli artmaktadır ve gelecekte de artmaya devam edecektir. Bugün sahip olduğumuz uygarlık düzeyinin korunması ve rahat yaşamın sürmesi için doğrudan ve dolaylı olarak enerji tüketmek zorundayız. Tüketmek zorunda olduğumuz enerjinin bugün büyük bir çoğunluğu fosil yakıtlardan, geri kalanı ise nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Fosil yakıt kullanımının çevre ve insan sağlığına verdiği küresel ölçekli zararlar, önlem alınmazsa bu zararların telafisi için gelecek nesillerin ödeyeceği bedelin tahmin bile edilemeyecek boyutlara erişeceğini göstermektedir. Enerji üretiminde fosil kaynak kullanımının sürdürülebilirliğini kaybettiği, kabul edilmesi gereken bir gerçektir. Bu durumda, sanayi devrimiyle birlikte kullanımı giderek artan, kalkınma ve sanayileşme yolunda verdiği zararlar hep göz ardı edilen bu kaynakların yerine çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının ağırlıklı olarak kullanılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Hava, su, toprak kirliliğinden bitki örtüsünün ve hayvanların yok olmasına kadar uzanan çevre sorunları, bu sorunlardan etkilenen insanlarda gelecek kaygısı uyandırmış, bu kaygı ile beraber, çevrenin korunmasına karşı hassasiyet de giderek artmaya başlamıştır [13].

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişin nedenleri üzerinde, sürdürülebilir kalkınma için sürdürülebilir enerji ve çevre bağlamına ağırlık verilerek düşünülebilir. Enerji; sürdürülebilir kalkınmanın üç temel bileşeni olan sosyal denge, ekonomik büyüme ve çevresel koruma ile ilgili hedeflerin başarılmasında önemli bir başlangıç noktasıdır. Bu nedenle enerji; sürdürülebilir kalkınma ile ilgili çalışmaların kapsamında yer alan önemli konulardan biri olmuş ve insanlığın ihtiyacı olan enerji tüketiminin ekonomiye ve çevreye zarar verilmeden sağlanması amacı öne çıkmıştır.

Enerji arzının güvenliği ve sürekliliği; yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişin başlıca nedenlerinden biridir. Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımının neden olduğu; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri, küresel ısınma gibi önemli çevre sorunlarının yanısıra dünya gündemini meşgul eden bir diğer olumsuzluk da fosil kaynakların yakın gelecekte tükenerek olmasına ortaya çıkacak enerjide arz güvenliği sorunudur. Hammadde ve enerji kaynakları kapasitelerinin sınırlı olmasına karşın,

hammadde ve enerji gereksiniminin sürekli ve hızlı bir biçimde artış göstermesi, insanlığı geleneksel olmayan yeni kaynaklar bulmaya zorlamaktadır [14].

Enerjide dış kaynaklara bağımlılığın önüne geçilmesi ve herhangi bir kaynaktan ileri gelebilecek bir azalma, tükenme, kesilme, devre dışı kalma gibi aksaklıkların gerçekleşmesine karşı önlemlerin alınması, enerji çeşitlendirmesi ile olanaklı hale gelebilecektir. Genel olarak, enerji güvenliği, enerji yelpazesinin çeşitlendirilmesi ile mümkün olabilir. Bir ülkenin enerji ihtiyacının karşılanmasında tek bir kaynağa ağırlık verilmesi, eğer bir de bu kaynak ithal edilmek suretiyle sağlanıyor ise, bu ülkenin beklenmedik fiyat dalgalanmalarından etkilenme riskini arttıracaktır. Aynı zamanda ithal kaynak bağımlılığı olan bir ülkenin dış müdahalelere karşı direnme gücü, politik esnekliği de azalacaktır [15].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, ithal edilen yakıtlara olan bağımlılığı ve ithal edilen fosil yakıtların fiyat değişimlerine olan duyarlılığı azaltmakta, dolayısıyla bu durum enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Enerji arzında sağlanan güvenlik, enerji girdili diğer sektörleri de olumlu yönde etkileyecek ve yatırımda, üretimde ve tüketimde sağlanan güven ortamı, sosyo-ekonomik istikrarı da artıracaktır. Bu nedenle yerli kaynak aramaları ve var olan kaynakların olanaklar ölçüsünde azami olarak kullanılması sürdürülmeli, öz kaynaklara öncelik verilmelidir.

Bir ülkenin yerli ve yenilenebilir kaynaklarına önem ve öncelik vermesi sadece arz güvenliği için değil, toplumsal maliyetlerin enerji yatırımlarında dikkate alınması, yerli üretim sonucu istihdamın artması yani sosyal ve ekonomik refahın sağlanması için de önemlidir.

Sosyal ve ekonomik nedenler; yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişin bir başka önemli gerekçesidir. Enerji üretmek amacıyla kurulacak her santral tipi için maliyetler hesaplanırken kuruluşundan sökülüp ortadan kaldırılmasına kadar doğabilecek tüm ekonomik maliyetler de değerlendirmeye katılmalıdır (örneğin; işletme, üretim, atıkların yok edilmesi vb. maliyetler) [16]. Tüm bu maliyetler dikkate alındığında yenilenebilir kaynakların ekonomik açıdan da avantajlı olduğu görülmektedir.

Şebekeye bağlanmadan üretildiği yerde tüketilme imkanına sahip yenilenebilir kaynaklar, özellikle iletim ya da dağıtım hatlarının erişiminin zor olduğu ya da küçük ölçekli enerji ihtiyacı nedeniyle hat yapımının ekonomik yönden uygun olmadığı bölgelerdeki enerji üretimi için rahatlıkla kullanılabilir. Örneğin; güneş, evlerin dağıtım

olduğu kırsal bölgeler için çok uygundur. Devletin enerji kablolarının taşıyacağı maliyetler göz önüne alınarak ilk yatırımda bu tip enerji yatırımları teşvik edilmelidir. Güneş gücüne dayalı yatırımlar, büyük ölçekli tesislere ayıracak yeterli mali kaynağı olmayan ülkeler için daha uygundur. Böylelikle güç ithalatı yapmak yerine; güneş, rüzgar ve diğer yenilenebilir enerji türlerinin yaygınlaştırılması, yerel iş alanları da yaratılacağından işsizlik ve göçe de çare olabilecektir.

Enerjide yenilenebilir kaynakların kullanımının artması, gerek doğrudan gerekse dolaylı istihdam da yaratacaktır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretim yapan santrallerin inşasında, kurulmasında, üretiminde, ayrıca bu santrallerin bakım ve onarımlarının yapılmasında işgücü gereksinimi doğacaktır. Böylece yerel işgücü istihdamının artmasıyla o bölgedeki işsizlik oranı da azalmış olacaktır [15].

Üzerinde durulması gereken çok önemli bir konu da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması için toplumsal destek sağlanmasıdır. Konu ile ilgili yapılan ve yapılacak olan reklamlar, propagandalar, eğitici seminerler, konferanslar, gazete, televizyon ve radyo yayınları toplumsal bilincin oluşmasında ve bu bilincin getireceği toplumsal desteğin artmasında etkili olacaktır. Bu toplumsal desteğin artışı sağlayan en önemli etken ise fosil kaynakların çevre ve insan sağlığına verdiği zararlardır. Bu sorun artık belli bir yörenin ya da bölgenin değil, yarattığı küresel ölçekli etkilerle tüm insanlığın sorunu haline gelmiştir.

Çevresel Nedenler; yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme nedenlerinden bir diğeridir. 19. yüzyılın ortalarına kadar doğal bir döngü içinde değişen küresel iklim sistemi, sanayi devrimiyle birlikte insan etkinliklerinin doğrudan etkilediği bir olgu haline gelmiş; iklim değişikliği, başta enerji üretimi olmak üzere çeşitli insan etkinlikleri ile tanımlanır hale gelmiştir. Fosil yakıtların kullanımı ile ortaya çıkan olumsuz sonuçlar gerek bitki ve hayvan yaşamını gerekse insanların sağlıklarını tehdit etmektedir. Bilim adamlarının, ekolojik dengenin bozulmaması için mümkün olduğu kadar fosil yakıtlardan uzaklaşılması gerektiğine işaret etmelerine karşın, halen dünyada her gün 56 milyon ton karbondioksit, 1500 ton ozon tabakasını incelten kloroflorokarbonlar atmosfere verilmekte, 140 bin yeni otomobil, kamyon ve otobüs halen mevcut 500 milyon vasıtaya katılmaktadır [15].

Dünyadaki başta petrol olmak üzere fosil yakıt rezervlerinin azalması, ozon tabakasının incilmesi, canlıların yaşam kaynağı olan havanın kirlenmesi, dünya ısısının giderek

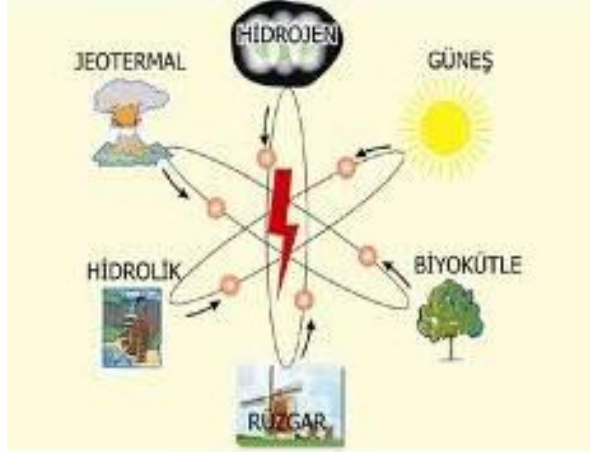
artması, bu artmanın süreklilik kazanması, fosil kaynaklarla enerji elde etmenin küresel ve yerel düzeyde yarattığı çevresel etkiler ile küresel ısınma arasındaki ilişkinin açık olarak görülmesi, çevresel hassasiyetin artmasında etkili olmuş, fosil yakıtların oluşturduğu sera gazı emisyonlarının azaltılması önemli hale gelmiş ve bu nedenlerle yüzlerce yıldır fosil yakıtların tüketimine alışmış olan dünya ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye başlamıştır.

2.1.3 Yenilenebilir Enerji

Bir önceki bölümde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişin nedenleri üzerinde durulmuştu. İlk bölümde de bahsedildiği gibi, günümüzde fosil yakıtların neden olduğu; dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri, sınırlı fosil yakıt rezervleri gibi sorunlara ek olarak 1990'lı yıllarda çevre bilincinin artması ile, öne çıkan çevre sorunları bu yakıtların ekolojik ve çevresel olarak temiz ve sürdürülebilir olmadığını kanıtlamıştır. Fosil yakıtlar yoluyla enerji üretiminin neden olduğu yerel, ulusal ve küresel çevre sorunları ve bunların yok edilmesi amacıyla alınacak önlemlerin maliyetlerinin çok yüksek olması, temiz ve yenilenebilir enerji üretimi arayışlarını gündeme getirmiştir. Bu arayışın sonucu, temel kaynağı güneş olan yenilenebilir enerji kaynaklarının günümüz insanınca yeniden keşfi olmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynakları, yeryüzünde ve doğada çoğunlukla herhangi bir üretim sürecine ihtiyaç duymadan temin edilebilen, fosil kaynaklı (kömür, petrol ve karbon türevi) olmayan, elektrik enerjisi üretilirken CO₂ emisyonu az bir seviyede gerçekleşen, çevreye zararı ve etkisi geleneksel enerji kaynaklarına göre çok daha düşük olan, sürekli bir devinimle yenilenen ve kullanılmaya hazır olarak doğada var olan hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga ve hidrojen gibi enerji kaynaklarını ifade eder [16].

Kısaca, yenilenebilir enerji, sürekli yaratılan enerji kaynağı demektir. Güneş enerjisi, hidroelektrik enerji, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi gibi kaynaklar yenilenebilir ve kullanmakla eksilmeyen enerji kaynaklarıdır. Bir sonraki bölümde, Şekil 2.1'de kaynakları gösterilen enerjilerden bahsedilecektir.



Şekil 2.1 Yenilenebilir enerji kaynakları

2.1.3.1 Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr enerjisi insanlığın ilk keşfettiği enerjilerden biridir. Yüzyıllardan beri rüzgâr enerjisi gemilerde yelkenler vasıtasıyla itme kuvveti olarak kullanılmaktadır.

Rüzgar enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeylerinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu farklı basınç da havanın hareketine neden olur. Güneş ışınları olduğu sürece rüzgar olacaktır. Rüzgar güneş enerjisinin bir dolaylı ürünüdür.

Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık % 2 kadarı rüzgar enerjisine çevrilir. Dünya yüzeyi düzensiz bir şekilde ısınır ve soğur, bunun sonucu atmosferik basınç alanları oluşur, yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına hava akışı yapar. Böylece rüzgar oluşur [17].

Rüzgar enerjisinden faydalanma yeni değildir; 2000 yıl önce su ve rüzgar değirmenleri dünyanın ilk endüstrilerine güç sağlamıştır. Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ilk kez 1891 yılında Danimarka'da gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde, yeni teknoloji ve yeni malzemelerle, rüzgar türbinleri insanların aydınlatma, ısıtma, soğutucular ve diğer ev aletleri için gerek duyduğu en temiz elektriği üretmek için kullanılmaktadır. Şekil 2.2, rüzgar türbinlerini göstermektedir.



Şekil 2.2 Rüzgar türbinleri

Rüzgar enerjisinin kanıtlanmış bir başarısı vardır. Halen dünyada 20.000 'in üzerinde rüzgar türbini elektrik üretmektedir. Bunların birçoğu, rüzgar çiftlikleri denen, belli bir kapasitede elektrik üreten rüzgar türbin grupları olarak çalışmaktadır [16].

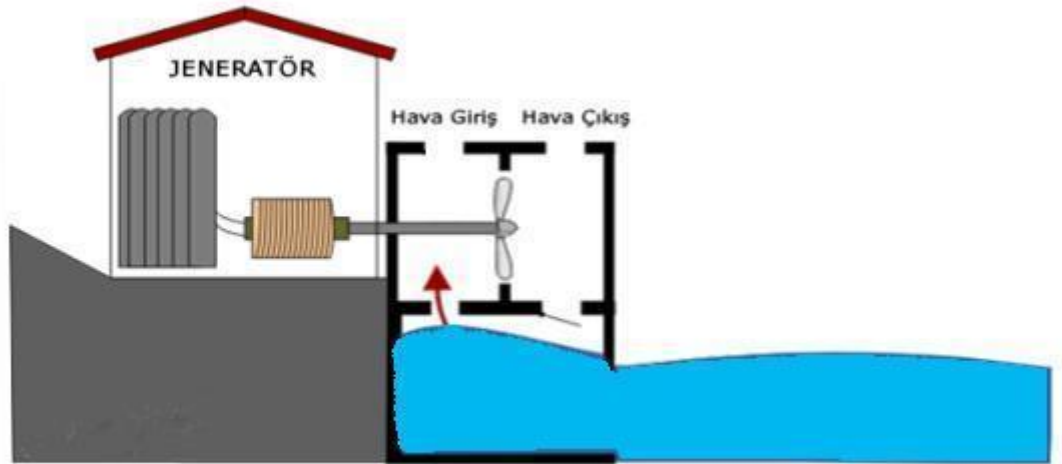
Rüzgar, kirlilik yaratmayan ve çevreye çok az zarar veren yenilenebilir enerji kaynağıdır. Yeryüzünün %95'inde kullanılabilir. Fakat bu avantajlarının yanında kullanımını zorlaştıran birçok dezavantajı da vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Rüzgar tarlalarının geniş alan istemesi
2. Rüzgar santrallerinin görsel ve estetik kirliliği, gürültü yapması, kuş ölümlerine neden olması, kuşların göç yollarını değiştirmelerine neden olması, gerek radyo ve gerekse televizyon alıcılarında parazitler oluşturması (2-3 km.lik alan içinde) gibi olumsuz çevre etkilerinden söz edilebilmektedir
3. Rüzgar türbinleri güvenlik açısından tehlike oluşturabilir. Örneğin, süratle dönen pervaneden kanat kopması ya da kanat parçalanması sonucu etrafa saçılacak parçalar çevre için tehlike yaratabilir
4. Ayrıca rüzgar santralleri kırsal alanlara kurulduğundan arkeolojik açıdan önemli alanlara zarar verme riski taşımaktadır. Bu nedenle, santralin yapılacağı arazi üzerinde ayrıntılı arkeolojik araştırma yapılmadan inşaaata başlanmamalıdır.

2.1.3.2 Dalga Enerjisi

Dalga enerjisi aslında güneş enerjisinin bir başka formudur. Dalgalar güneşin dünyayı ısıtmasıyla ortaya çıkan rüzgârlar tarafından başlatılır. Dünyanın geometrik yapısı

nedeniyle Güneş dünyanın her noktasını aynı şekilde ısıtmaz. Bazı bölgeler ısıyı daha iyi bir açıyla alır ve diğer yerlerden fazla ısınır. Isındıkça havanın yoğunluğu azalır, hafifler ve yukarı çıkar. Isınan havanın terk edip boşalttığı yere daha yoğun ve soğuk olan hava çöker. Bu hava dolaşımı rüzgârı oluşturur. Su yüzeyi boyunca hızla esen rüzgâr sürtünme nedeniyle küçük dalgalanmalara da neden olur. Bu küçük dalgacıklar devam eden rüzgâr boyunca çığ gibi büyüyerek daha büyük dalgaları oluştururlar. Yani temel olarak güneş enerjisi rüzgâra, rüzgâr da dalgaya dönüşmektedir. Böylece dalga enerjisi suyun muazzam kuvvetinden insanın faydalanabilmesini sağlar. Gerçekçi hesaplara göre şu anki teknoloji ile dalga enerjisinden dünyanın elektrik ihtiyacının %10'u karşılanabilir iken, teorik olarak okyanuslarda bulunan dalga enerjisinin sadece %20'si bile tüm dünyanın elektrik ihtiyacını karşılayabilir. Şekil 2.3 ile, aynı mekanizmayı taşıyan gerçek bir dalga enerjisi jeneratörü gösterilmektedir [18].



Şekil 2.3 Dalga enerjisi jeneratörü [18]

2.1.3.3 Biyokütle Enerjisi

Genel olarak biyokütle kolay elde edilen bir enerji kaynağıdır. Odun, odun kömürü, hayvan ve insan dışkı; tarım ürünleri ve orman sektörü organik atıkları, alkol ve metan mayalanması; çeşitli su bitkileri gibi canlı (biyolojik) kaynaklar yolu ile elde edilen enerji türüne biyokütle (biomass) enerjisi denilmektedir [16]. Kısaca organik maddelerden çeşitli yollarla elde edilen enerji, biyokütle enerjisidir. Daha çok ısınma amaçlı kullanılan bu enerjinin en eski bilinen hammaddesi; yakacak odun, odun kömürü ve hayvan gübresidir. Şekil 2.4'de biyokütle enerji hammaddelerine örnek verilmiştir.



Şekil 2.4 Biyokütle enerji hammaddeleri

Klasik yakma işlemi ile elde edilen bu tip biyokütle enerjisinin yanında; enerji tarımı ürünlerinden, kentsel atıklardan, tarımsal endüstri atıklarından yakma işlemi ya da farklı teknikler kullanılarak katı, gaz ve sıvı yakıtlara çevrilerek biyokütle yakıt elde edilmesi, ısı ve elektrik üretilmesi mümkün olmaktadır.

Klasik biyokütle kaynaklar; normal ormanlardan elde edilen yakacak odun ile bitki ve hayvan atıklarından oluşur. Türkiye biyokütle materyal üretimi açısından, güneşlenme ve alan kullanılabilirliği, su kaynakları, iklim koşulları gibi özellikleri uygun olan bir ülkedir. Ancak, ülkenin tüm yetiştiricilik alanlarının yıl boyu yalnızca biyokütle yakıt üretim amacıyla kullanılması olanaklı değildir [16].

2.1.3.4 Jeotermal Enerji

Jeotermal kelimesi; Yunanca geo (yeryüzü) ve therme (ısı) kelimelerinden gelmekte olup yer ısısı ya da yeryüzü ısısı anlamına gelmektedir. Yaklaşık 4 milyar yıl önce yüksek sıcaklıkta bir araya gelmiş toz ve gazlardan kaynaklanan yeryüzünün iç ısısı, bütün yeryüzü kayaları içerisinde bulunan radyoaktif elementlerin bozulması sonucunda sürekli olarak yenilenmektedir.

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerindeki sıcak kaya ve akışkanların ısısının zayıf katmanları geçerek yeryüzüne ulaşmasıyla elde edilen enerjidir. Diğer bir ifade ile jeotermal enerji, jeotermal kaynaklardan doğrudan ya da dolaylı her türlü yararlanmayı kapsamaktadır.

Jeotermal kaynaklardan elde edilen su genellikle aşındırıcı ve kirlilik yaratan mineraller içermektedir. Jeotermal enerji çevre dostu bir kaynak olarak tanınmakla birlikte;

akışkanın paslanmaya, çürümeye, kireçlenmeye (kabuklaşmaya) neden olması; içerdiği bor yüzünden atılacağı yüzey sularını kirletmesi; bünyesinde CO₂, H₂S ve bor gibi maddeler bulunması uygulamada bazı teknolojik önlemlerin alınmasını gerektirir. Kullanılan jeotermal akışkanın çevre sorunu yaratmaması için bu akışkanı yeraltına geri verme (reenjeksiyon) uygulaması geliştirilmiş ve çeşitli ülkelerde yasal olarak zorunlu duruma getirilmiştir. Jeotermal enerjinin üretimi sırasında çıkan su tekrar yeraltına pompalanırsa (reenjeksiyon) yerüstü sularına oranla daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar nedeniyle kirli kabul edilen hali ortadan kalkar; temiz ve yenilenebilir hale gelir [16]. Böylece çevreye karşı olumsuz etkisi de önlenebilir. Şekil 2.5'te bir Jeotermal Enerji Santrali gösterilmektedir.



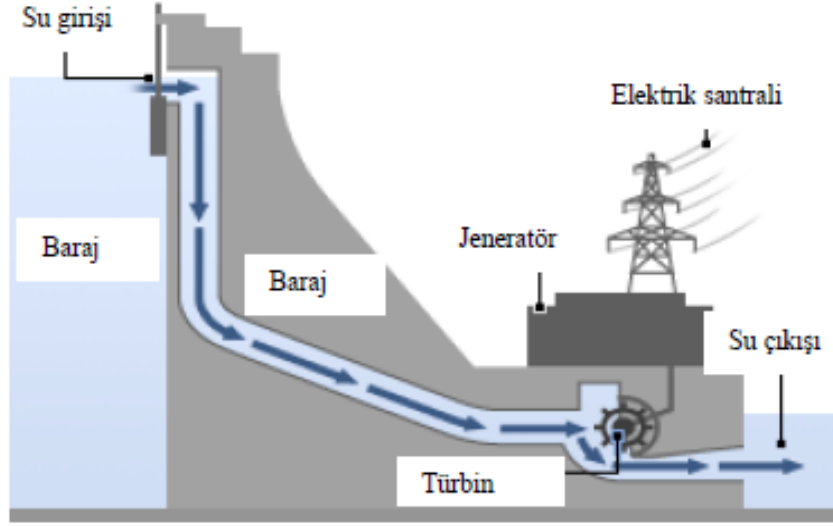
Şekil 2.5 Jeotermal enerji santrali

2.1.3.5 Hidroelektrik Enerji

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerji, yenilenebilir enerji kaynakları içinde teknoloji gelişimi en ileri düzeyde olan enerji kaynağıdır. Kullanılmakta olan en eski enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerjinin kaynağı sudur. Bu nedenle hidroelektrik santraller bir su kaynağı üzerinde olmak zorundadır.

Elektriği uzun mesafelere ileten teknoloji bulunduktan sonra, hidrolik enerji daha da çok kullanılır olmuştur. Hidroelektrik santraller akan suyun gücünü elektriğe dönüştürürler. Akan su içindeki enerji miktarını, suyun akış ya da düşüş hızı belirler. Büyük bir nehirde akan su büyük miktarda enerji taşımaktadır. Ya da su çok yüksek bir noktadan düşürüldüğünde de yine yüksek miktarda enerji elde edilmektedir. Her iki

yolla da kanal ya da borular içine alınan su, türbinlere doğru akar, elektrik üretimi için pervane biçiminde kolları olan türbinlerin dönmesini sağlar. Türbinler jeneratörlere bağlıdır ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Şekil 2.6'da bir Hidroelektrik Santralin çalışma süreci gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Bir Hidroelektrik santralin çalışma süreci [18]

Yakıt kullanmadığı için kirliliğe neden olmaz. Türkiye’de akarsuların eğimi fazla olduğu için akarsular yoluyla erozyon ciddi bir tehlikedir. Hidroelektrik santraller için yapılan barajlar suyun hızını keserek erozyonun durdurulmasında önemli rol oynarlar. Enerji depolama kapasiteleri olduğundan dışa bağımlılığı azaltırlar ve bu bağlamda arz güvenliğinin sağlanmasına da katkıda bulunurlar. Yöre halkına istihdamı, sulu tarım, taşımacılık, su sporları gibi sosyal ve ekonomik faydalar da sağlarlar.

Bununla birlikte, hidroelektrik enerjinin birçok dezavantajı da vardır. Kuruluş maliyetleri yüksek, inşaat süreleri uzundur. Barajlar çevresindeki bölgenin ekolojisini değiştirir. Üretime geçen bir hidroelektrik santralin ise kendisi değil, su toplama kısmı (baraj) çevresel etkiler yaratır. Aslında bu durum küçük hidroelektrik santralden çok, büyük barajlı hidroelektrik santraller için söz konusudur. Hidrolik enerjinin hidrolojik ve biyolojik çevre etkileri vardır. Baraj gölünün geniş yüzey alanı buharlaşmayı artırmakta, tarım arazilerinde tuzlanma ve çoraklaşma olmakta, sudan kaynaklanan paraziter hastalıklar artmakta, rezervuar altında kalacak bitki ve ağaçların kesilip temizlenmemesi ile denge oluşuncaya kadar başlangıçta birkaç yıl su kalitesi negatif yönde etkilenmektedir. Hidrolojik rejimde değişiklik olmakta, zorla göç

yaşanabilmektedir. Sıcaklık-yağış-rüzgar rejimleri değışmekte, yöredeki doğal bitki örtüsü ile su ve kara canlıları yaşam alanında değışiklik olmakta, yaşama adapte olabilen türler varlıklarını sürdürmektedir. Doğal fay hareketlerini etkileyerek deprem oluşum riskini artırmaktadır. Ayrıca, yöredeki tabiat ve tarih varlıklarının korunamaması sonucu, kültürel değerlerin kaybı da söz konusu olabilmektedir. Doğası gereği büyük yerleşim birimlerinden uzakta ve oldukça mahrumiyet sayılabilecek yörelerde tesis edilen hidroelektrik santrallerde kalifiye elemanı istihdam etme ve yetişmiş elemanı tutma sorunları yaşanmaktadır [16].

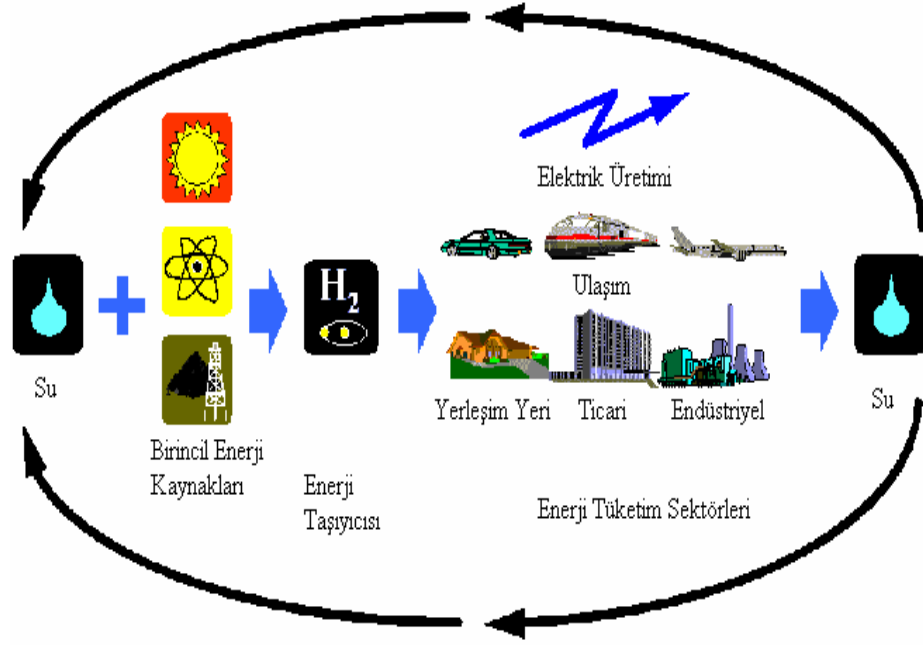
2.1.3.6 Hidrojen Enerjisi

Her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan ürün sadece su ya da su buharı olmaktadır. Hidrojenden enerji elde edilmesi sırasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir.

Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı ve kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine çevrildiği sistemler yakıt hücreleri diye adlandırılır. Yeni geliştirilen bu sistemlerde hidrojen doğrudan ya da hidrojen salan herhangi bir kaynak yardımıyla sisteme verilmekte ve istenilen enerji elde edilmektedir.

Hidrojen evrende en çok bulunan yanıcı bir gazdır. Bilinen bu en hafif element dünyada da çok fazladır. Fakat serbest olarak değil, su molekülü içerisindedir. Hidrojen, yeryüzünde genellikle oksijenle birleşmiş olarak su biçiminde bulunur. Bu nedenle; okyanuslar, göller, nehirler bizim “hidrojen madenlerimiz”dir. Hidrojen enerji kaynağı olarak kullanılacak olursa, özellikle sudan yararlanılacaktır. Bu nedenle yakıt olarak kullanılan hidrojen yeniden su üretecektir.

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değışik hammaddelerden üretilebilen sentetik (yapay) bir yakıttır. Şekil 2.7’de Hidrojenin bu durumu gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Hidrojen molekülünün üretimi ve kullanıldığı enerji tüketim sektörleri [16]

Hidrojen karbon içermediği için fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunları yaratmaz. Ne sera etkisi oluşturan ne de kirli hava ve asit yağmurları oluşturan kimyasal madde çıkarır. Isınmadan elektrik üretimine kadar çeşitli alanların ihtiyacına yanıt verebilecektir. Hidrojenin depolanabilir ve taşınabilir olması kullanım alanının çok geniş olmasına neden olmaktadır. Hidrojen, petrolde olduğu gibi binlerce kilometre öteye boru hatları ile yollanabilir ve depolanabilir. Bu enerji kaynağının bir diğer önemli özelliği, taşıdığı enerjinin kolaylıkla elektrik enerjisine dönüştürülebilmesidir. Ancak, hidrojenin korunması ve kapalı yerlerde uzun süre tutulması, kolay sızabildiği için oldukça zordur. Ayrıca, hidrojen oksijenle kontrolsüz bir ortamda patlayarak birleştiğinden oldukça tehlikelidir. Doğada son derece bol olmasına karşın enerji üretiminde kullanılan hidrojen gazının son derece saf olması gerekir. Sıfırlama işlemi maliyeti artıran en önemli süreçtir. Enerjinin üretildiği yakıt hücreleri ve hidrojenin depolandığı tankların hacmi geniş yer kaplamaktadır. Bunlar da hidrojen enerjisinin dezavantajları olarak görülmektedir [16].

Çizelge 2.1 Enerji kaynaklarının çevreye etkisi

	İklim Değişikliği	Asit Yağmurlar	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü
Petrol	X	X	X	X	X
Kömür	X	X	X	X	X
Doğalgaz	X	X	X	-	X
Hidrolik	X(yerel)	-	X	X	-
Rüzgar	-	-	-	-	X
Güneş	-	-	-	-	-
Jeotermal	-	-	X	X	-

Çizelge 2.1’de, çevresel etkilerin enerji kaynaklarına göre dağılımı gösterilmektedir. Görüldüğü gibi fosil yakıtlar, aynı anda iklim değişikliği, asit yağmurları, su ve toprak kirlilikleri ve gürültü gibi olumsuz çevresel etkiler yaratmakta, buna karşın yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de Güneş, çevreye hemen hemen hiç zarar vermemektedir. Bir sonraki bölümde Güneş Enerjisi ile ilgili ayrıntılı bilgi verilecektir.

GÜNEŞ ENERJİSİ

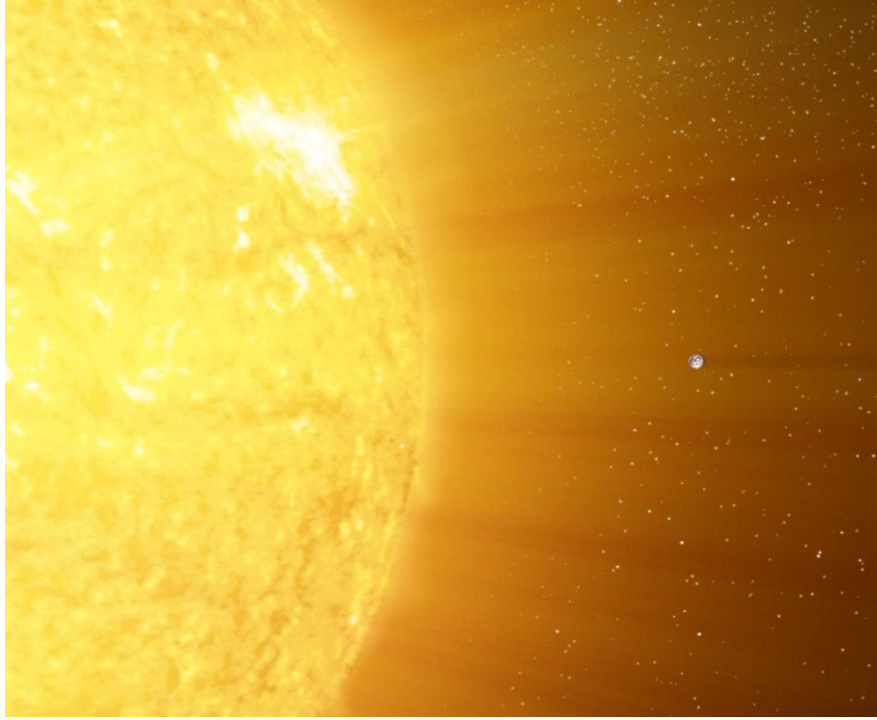
3.1 Güneş'in Yapısı

Güneş çok büyük ve ışıldayan bir gaz topudur. Ama Güneş'in demirden olduğunu yüzeyinin katı olduğunu iddia eden bilim insanları da vardır. Ancak büyük patlamadan hemen sonra oluşan ilk iki elementin hidrojen ve helyum olduğunu ve Güneş sistemlerini oluşturan dönen gaz bulutlarını düşündüğümüzde Güneş'in gazlardan oluştuğu fikri daha cazip gelmektedir. Zaten bilim insanları arasında da Güneş'in gazlardan oluştuğunu öne süren Güneş modeli en çok kabul gören modeldir. Bu modelle Güneş'in yarıçapından yüzey sıcaklığına kadar birçok bilgi de hesaplanabilmektedir. Güneş'in iç katmanlarından yüzeye doğru ilerleyen sismik dalgalar da bu modeli desteklemektedir. Güneş'ten gelen elektromanyetik dalga tayfi incelenerek Güneş yüzeyinde hangi elementlerin olduğu bulunabilmektedir. Veriler, evrende en yaygın bulunan hidrojenin ve helyumun Güneş'te de bol miktarda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Dörtte üçü hidrojen, dörtte birine yakın kısmı ise helyumdan oluşan Güneş'te çok az miktarda da olsa oksijen, neon, karbon, demir gibi daha ağır elementler de vardır. Tabi bu oranlar Güneş çekirdeğinde hidrojenin helyuma çevirimi nedeniyle çok yavaş da olsa değişmektedir [19].

Newton'un hareket yasaları (kütle çekim yasalarıyla birlikte) Güneş'in kütlesini, Güneş'in etrafında dönen herhangi bir gezegenin Güneş'e olan uzaklığı ve periyodu (Güneş'in etrafında bir dönüş süresi) ile ilişkilendirir. Bu ilişkiden Güneş'in kütlesi hesaplanabilmektedir. Buna göre Güneş 2×10^{30} kg'dır. Yani dünyanın kütlesinin 333.000 katıdır. Güneş sisteminin toplam kütlesinin %99'unu barındırdığı için, Güneş sisteminin kütle merkezi Güneş'in hemen yanındadır. Aslında Güneş'in yarıçapının

hemen dışındadır. Bu nedenle Güneş hafif hafif yalpalanmakta ve Güneş sistemindeki Güneş dahil tüm cisimler, kütle merkezi etrafında dönmektedir. Yine de yapılan birçok hesapta Güneş’i sabit, gezegenleri onun etrafında dönüyor kabul etmek ve bu yaklaşımla problemleri çözmek hem işlem kolaylığı sağlamakta hem de doğru sonuca ulaştırmaktadır.

Katı bir yapısı olmadığı, iyonize olmuş gazdan (plazmadan) oluştuğu için, Güneş’in ekvator ve kutuplardaki dönüş hızı dünyanınki gibi aynı değildir. Güneş kendi etrafındaki dönüşünü ekvatorunda 25.4 günde, kutuplarda ise 36 günde tamamlanmaktadır. Yani enlem derecesi arttıkça dönüş hızı azalır. Ancak dönüş hızı, Güneş’in iç kısımlarında farklılık gösterir. Güneş çekirdeği katı bir kütle gibi döner. Güneş yüzeyinin hangi hızda döndüğü, fotosfer tabakasında görülen Güneş lekelerinin gözlenmesiyle hesaplanabilmektedir [19].



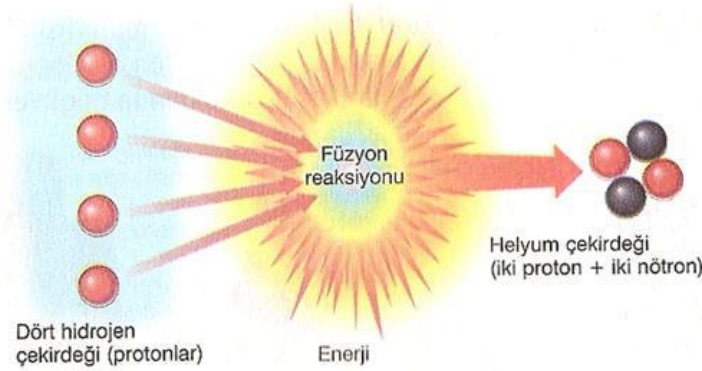
Şekil 3.1 Güneş’in büyüklüğünün Dünya ile karşılaştırılması [20]

Güneş aslında bir yıldızdır. Geceleyin gökyüzünde gördüğümüz bütün yıldızlar da aslında ışıldayan dev gaz toplarıdır, fakat çok uzakta olduklarından ışık noktaları olarak görünürler. Yörüngeleri çember değil elips biçiminde olduğundan, gezegenlerin Güneş’e olan uzaklıkları sürekli olarak değişir. Dünyanın Güneş’e en yakın ve en uzak konumları arasında 5 milyon km fark vardır. Güneş; dünyaya en yakın olduğunda

aralarındaki uzaklık 147 milyon km, en uzak olduğunda ise 152 milyon km'dir. Dünya'nın Güneş'ten ortalama uzaklığı ise 149.60 milyon km'dir. Bu mesafe, bir astronomi birimi (AU) olarak tanımlanır [20]. Eğer dünya bir toplu iğne başı kadar olsaydı (0.2 cm), Güneş bir basketbol topu büyüklüğünde (25 cm) ve aralarındaki uzaklık da yaklaşık bir basketbol sahasının uzun kenarı uzunluğunda (27 m) olurdu [21]. Şekil 3.1'de de Güneş ile Dünya arasındaki bu karşılaştırma gösterilmiştir.

3.2 Güneş'in Enerjisi

Nükleer yakıtlar dışında dünyada kullanılan tüm yakıtların ana kaynağı olan Güneş'in ve tüm yıldızların enerjisi, çekirdeklerinde oluşan füzyon tepkimeleri ile yani hafif parçacıkların birleşerek daha ağır parçacıklar oluşturmasıyla üretilmektedir [21]. Güneşin içinde hidrojen atomları sürekli olarak parçalanır ve bu parçalar farklı biçimlerde yeniden bir araya gelip kaynaşarak helyum oluştururlar. Buna Füzyon Tepkimesi (çekirdeksel kaynaşım tepkimesi) adı verilir (Şekil 3.2) [22]. Bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji çok fazladır. Güneşin bu enerjiye sahip olabilmesi için saniyede 10-38 füzyon reaksiyonuna ihtiyaç duyduğu hesaplanmıştır. Bu da yaklaşık olarak saniyede 657 milyon ton Hidrojenin 653 ton Helyuma dönüşmesi demektir [23].



Şekil 3.2 Füzyon reaksiyonu

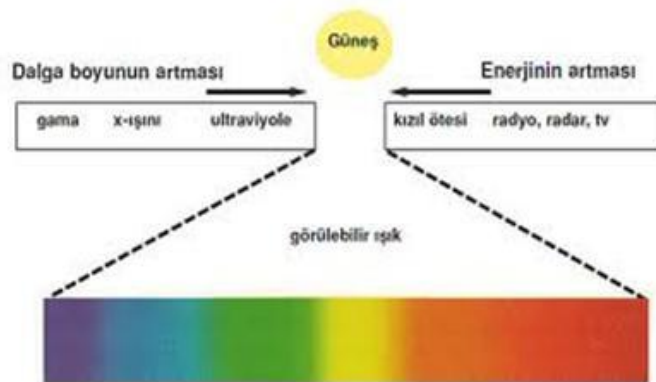
Çekirdeğindeki sıcaklık 15 milyon $^{\circ}\text{C}$ civarında olan Güneş benzeri (kütlesi Güneşinkine yakın) yıldızlarda da iki protonun birleşmesiyle oluşan füzyon tepkimeleri meydana gelmektedir. İki proton, her ikisi de artı yüklü olduğundan birbirlerini coulomb kuvvetiyle iter ve bu kuvvet, parçacıklar birbirine yaklaştıkça hızla artar. Füzyon tepkimesinin gerçekleşebilmesi için, parçacıkların coulomb engelini aşmaları yani birbirlerine doğru çok hızlı hareket ediyor olmaları gerekmektedir. Bunun için de Güneşin çekirdeğindeki gibi milyonlarca derecelik sıcaklıklar gerekir. Ancak bu şekilde

protonlar birbirlerine yeterince yaklaşp nükleer tepkimeye girebilirler. Füzyon tepkimesinin sonunda alfa parçacıkları, yani helyum çekirdekleri ortaya çıkar. Enerji açığa çıkmasının nedeni ise oluşan yeni parçacığın kütesinin, tepkimeye giren parçacıkların toplam kütesinden daha küçük olmasıdır. Einstein'ın meşhur $E=mc^2$ bağıntısının öngördüğü gibi "kaybolan kütle" enerjiye dönüşür [21].

3.3 Güneş Işınımı

Çekirdekte üretilen enerji, bundan sonra daha soğuk ve daha az yoğun olan dış katmanlara taşınır. Enerji önce EM dalgalarla yani fotonlarla taşınır. Çekirdeğin hemen dışındaki bölge hala çok sıcak ve yoğun olduğundan fotonlar atomlarla çok sıcak etkileşime girerler ve bu şekilde yüzeye doğru bir enerji aktarımı gerçekleşir. Gerçekten yüzeye doğru yaptıkları yolculuk sırasında fotonlar sayısız kez ortamdaki atomlar tarafından emilip tekrar yayılır. Bu yolculuk bazı fotonlar için milyonlarca yıl sürebilir [24].

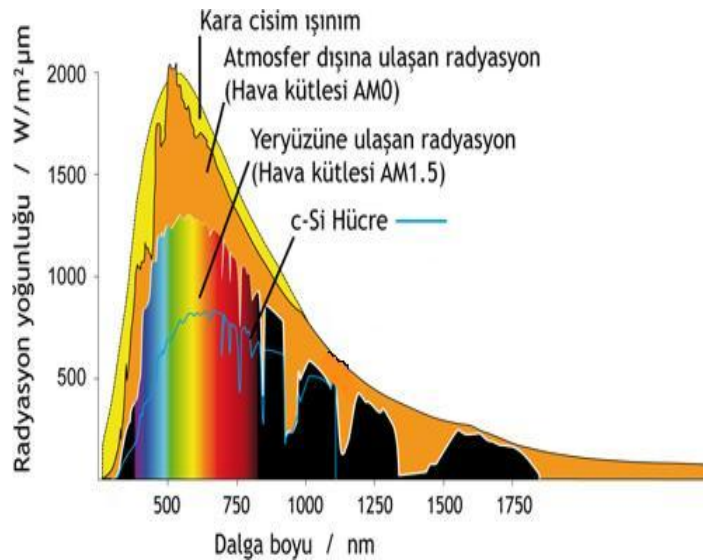
Bize ulaşan fotonların tamamı Güneş'in en dış katmanından yayılır. Her ne kadar bildiğimiz anlamda katı bir yüzeyi olmasa da bu bölge Güneş'in yüzeyi olarak düşünülür ve fotosfer olarak adlandırılır. Yüzeyde sıcaklık 6000 °C'ye kadar düşmektedir. Bu sıcaklıktaki bir cismi, beyaz ışık yayan bir top olarak düşünülebilir. Yani kırmızıdan mora kadar bildiğimiz renkleri içeren görünür ışık, Güneşten bize ulaşan ışınımın büyük kısmını oluşturmaktadır. Görünür ışıktan daha az enerjilik kızılötesi ve daha enerjilik morötesi (ultraviyole) fotonlar nispeten daha az yayılır [24]. Şekil 3.3'te Güneşten yayılan EM dalga spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Güneşten yayılan EM dalga spektrumu

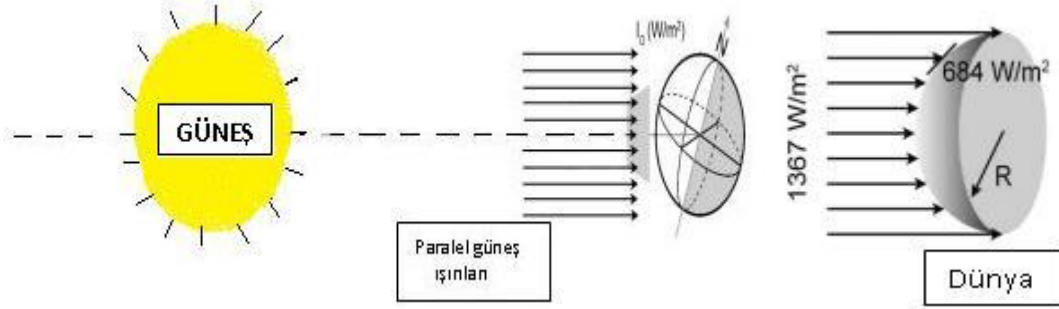
Çekirdekte sıcaklık yaklaşık olarak, termonükleer füzyonun devam etmesi için yeterli olan 15 milyon °C'dir. Bir ışık fotonunun Güneş merkezinden yüzeye olan seyahati yaklaşık 200.000 yıl sürerken, ışığın Güneş yüzeyinden dünyamıza ulaşması sadece 8 dakika alır. Haliyle bize ulaşan ışık aslında yüz binlerce yıl öncesindeki nükleer tepkimelerin bir yan ürünüdür [19].

Güneşin çekirdeğinde yer alan hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanan Güneş enerjisi nedeniyle EM dalga yayılımı gerçekleşir. Güneşten gelen EM dalgaların dalgaboyuna göre dağılımına (ışık tayfına) bakıldığında, Güneş hangi dalgaboyundan ne oranda yayıyor bilgisi elde edilebilir. Aslında Güneş, merkezinde meydana gelen termonükleer tepkimeler sonucu oluşan enerjinin çok da dışarı çıkamadığı, EM dalgaların Güneş maddesiyle çarpışıp yansyarak gerisin geri döndüğü, sonra tekrar tekrar Güneş maddesiyle etkileştiği için içerde hapsedildiği bir cisimdir. Benzer bir durum, her tarafı kapalı siyah bir kutuda da gerçekleşir. Fizikte, siyah cisim olarak adlandırılan böylesi bir cisim, ısıtıldığında sıcaklığına bağlı olarak dışarıya ışınım yayar. Güneşten yayılan EM dalga tayfı, gerçekten de siyah cisim ışınımına benzer (Şekil 3.4). Ancak ısı iletimi ve taşınımı sonucunda, ışık küreye (fotosfer) ulaşan EM dalgaların, belli dalgaboyunda olanları burada bulunan atomlar tarafından soğurulduğu için, ışık tayfı siyah cisim ışınımından ufak farklılıklar gösterir. Soğurulan dalgaboylarına denk gelen yerler yenmiş gibidir [19].



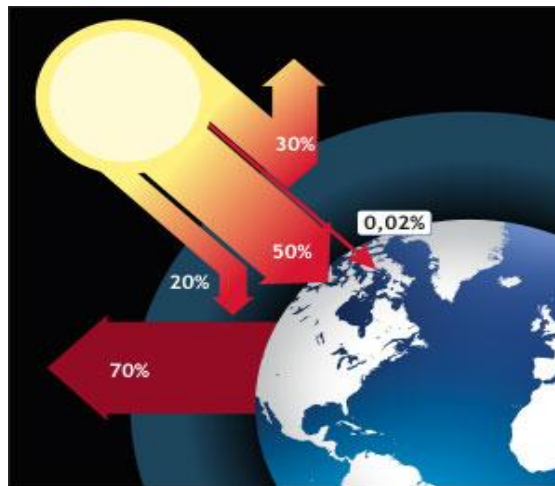
Şekil 3.4 Yeryüzüne ulaşan Güneş ışınım eğrilerinin siyah cisim ışınım eğrisi ile karşılaştırılması [19]

Güneşin yüzeyinde, Güneş ışınım yoğunluğu yaklaşık olarak 63 MW/m^2 ' dir. Güneş ışınları uzaya yayılırken, ışınım (radyasyon) yoğunluğu azalır ve Güneş ışınlarının, dünya atmosferinin sınırına ulaşıncaya kadar birbirlerine paralel hale geldikleri varsayılır. Enerjisi azalarak dünya yüzeyine ulaşan ortalama Güneş ışınım gücü ise yaklaşık olarak 1367 W/m^2 ' dir [25]. Ancak yeryüzünde $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir (Şekil 3.5). Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır.



Şekil 3.5 Dünya yüzeyine gelen Güneş ışınları (I_0); Güneş ışınlarının gelişine dik olan düzlemdeki aydınlanma şiddeti) [25]

Güneş ışınımının tamamı yeryüzeyine ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışınımının %50'si (684 W/m^2) atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Güneşten gelen ışınımın %20'si ise atmosfer ve bulutlarda tutulur. Bu durum Şekil 3.6'da gösterilmiştir [25].



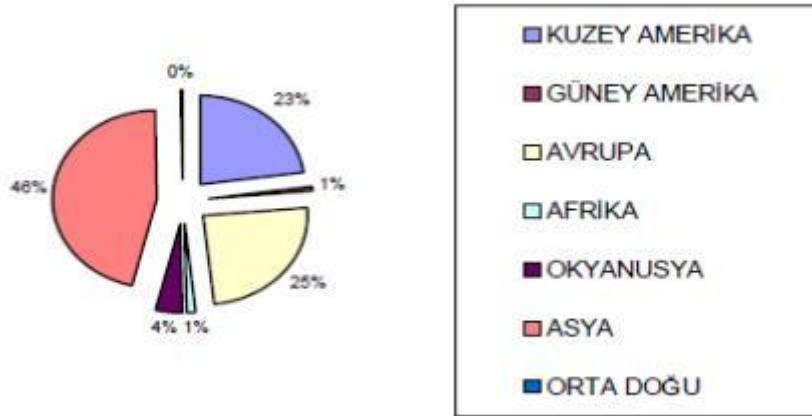
Şekil 3.6 Güneş'ten gelen ışınımın; yeryüzüne geçme, atmosferde soğurulma ve uzaya yayılma yüzdeleri

3.4 Dünya'nın Güneş Enerjisinden Faydalanma Potansiyeli

Güneş, 3.8×10^{23} kW oranında enerji yaymaktadır. Bu oranın yalnızca küçük bir bölümü, yaklaşık olarak 1.8×10^{14} kW 'lık kısmı dünya tarafından yakalanır. Bu miktarın yaklaşık %60'ı veya 1.08×10^{14} kW'ı dünya yüzeyine ulaşır [25].

Güneş, tüm dünyanın enerji talebini karşılayacak kadar çok enerji potansiyeline sahiptir. Dünya'ya güneşten gelen enerji, Dünya'da bir yılda kullanılan enerjinin 20 bin katıdır. Ortalama olarak, varolan teknolojilerin tamamının kullanılması ile dünya topraklarının her metrekaresi yeterli Güneş ışığına maruz bırakılırsa, her yıl 1700 kWh enerji üretilir. Dünya yüzeyine ulaşan toplam Güneş enerjisi, varolan küresel enerji ihtiyacını 10.000 kat fazlasıyla karşılayabilir.

Güneş ışınım yoğunluğu bölgeden bölgeye değişiklik gösterir. Dünyanın bazı bölümleri, yıllık ortalama Güneş ışınım yoğunluğundan daha fazla alırlar. En yüksek yıllık 300 W/m^2 'lik ortalama ışınım Kızıldeniz Bölgesi'nde, yaklaşık 200 W/m^2 Avustralya'da, 185 W/m^2 Amerika Birleşik Devletleri'nde, 105 W/m^2 İngiltere'de bulunabilir [25].

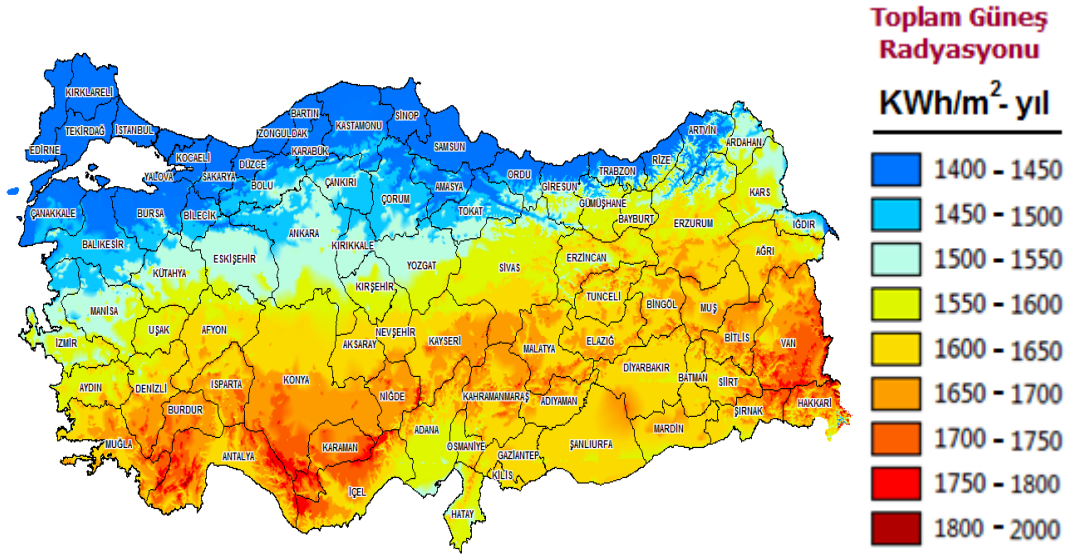


Şekil 3.7 Kıtalar itibarıyla Güneş Enerjisi kurulu güç yüzdeleri [26]

Şekil 3.7'den de görüldüğü gibi, Güneş enerjisini en fazla kullanan kıta Asya'dır. Japonya ve Çin, Güneş enerjisinden yüksek teknolojileri ile beraber faydalanmaktadır. Bu konuda yoğun AR-GE (Araştırma Geliştirme) çalışmaları yapmakta ve sonuçlarını da almaktadır. Örneğin; bir Japon firması olan Toyota, Güneş enerjisiyle çalışan arabalar üretmektedir. Yakında kullanıma süreceği bu ürün ilerleyen yıllarda petrol ürünleriyle çalışan arabaların yerini alacak ve etrafta görüldüğünde yadırganmayacak ürünler haline gelecektir [10].

3.5 Türkiye'nin Güneş Enerjisinden Faydalanma Potansiyeli

Ülkemiz, bulunduğu coğrafi konum nedeniyle Güneşten oldukça yüksek seviyede yararlanacak bir potansiyele sahiptir. Şekil 3.8'de Türkiye'nin bölgelere göre aldığı yıllık toplam Güneş Enerjisi verileri kWh/m²-yıl cinsinden verilmiştir [11]. kWh/m²-yıl; bir yılda metrekareye düşen enerjinin kWh cinsinden değeridir [27].



Şekil 3.8 Türkiye'nin bölgelere göre aldığı yıllık toplam Güneş Enerjisi verileri [11]

Şekil 3.8'den de anlaşıldığı gibi en az ışınım alan bölge Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi'dir. Bu bölgenin hem enlem değeri büyük hem de rutubetli iklimi vardır. Atmosferdeki fazla su buharı, ışınımın perdelenmesine neden olmaktadır. Marmara ve Kuzey Ege Bölgesi, Karadeniz'e göre biraz daha iyi durumdadır. Güney Ege, Batı Akdeniz ve Orta Anadolu Bölgeleri orta derecede ışınım almaktadır. Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleri ışınım değerleri iyi olan bölgelerimizdir. Güney Doğu Bölgesinin sağ en alt ucu ise ışınım değerleri en iyi olan bölgemizdir. Sert ve soğuk iklime sahip bu yer kışın en fazla ışınım alan yerdir. Havadaki su buharı, yağmur ve kar şeklinde yoğunlaşmakta ve atmosfer daha berrak olup ışınım perdelenmesi en az seviyede bulunmaktadır.

3.6 Güneş Enerjisinden Yararlanma Yolları

Günümüzde artık Güneş Enerjisinden yararlanmanın önemi değil, yöntemleri tartışılmaktadır. İnsanoğlu, geçmişte de bugün olduğu gibi, yapılarını ısıtmak için

güneşten yararlanma yoluna gitmiş ve döneminin kendisine sağladığı olanaklar çerçevesinde çeşitli yöntemler geliştirerek Güneş Enerjisini kullanmıştır. Zaman içinde insanoğlunun bu konuda bilinçlenmesine paralel olarak teknolojinin de gelişmesiyle, kullanılmakta olan yöntemler geliştirilmiş, yeni yöntemler bulunmuş ve bugünkü duruma gelinmiştir.

Güneş Enerjisini, bugün enerjinin en temel iki ihtiyaç ve kullanım biçimi olan, ısı ve elektriğe dönüştürmek için yöntemler kullanılmaktadır. Güneş ışınımından daha etkin biçimde yararlanmak için geliştirilen etkin yararlanma sistemleri, özellikle son yıllarda teknolojik gelişmelerle, ısı ve elektrik enerjisi üretilen bunların gerekli yerlerde kullanımını ve yapılar da kolayca uygulanmasını olanaklı hale getirmiştir.

Güneş Enerjisi teknolojileri; yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir:

1. Isı (termal) enerjisine dönüştürerek Güneş Enerjisinden yararlanma
2. Elektrik enerjisine dönüştürerek Güneş Enerjisinden yararlanma

Güneş enerjisini termal enerjiye dönüştürmek için güneş kolektörleri kullanılır. Yüksek sıcaklıklı solar termal kolektörler, dolaylı da olsa, elektrik üretmek için de kullanılabilir [25].

Güneş Enerjisi termal uygulamaları düşük sıcaklık (20-100°C), orta sıcaklık (100-300°C) ve yüksek sıcaklık (>300°C) olmak üzere üç grupta toplanabilir. Düşük sıcaklık uygulamaları, daha çok yoğunlaştırılmamış veya düzlemsel kolektörlerle su ısıtılması, konut ısıtılması-soğutulması ve sera ısıtılması için kullanılmaktadır. Düzlemsel güneş kolektörleri; 100°C veya daha az sıcaklıklar üretebilir. Orta sıcaklık uygulamalarında; güneş ışınımı, odaklı toplayıcılarla toplanarak, sanayi için gerekli sıcak su veya buhar elde etmek için kullanılır. 300 °C sıcaklık değerinin üzerine çıkabilen, geniş bir alana gelen güneş ışınımı ise; bir noktaya odaklanarak Güneş fırınlarını çalıştırabilir [23]. Yukarıda kısaca bahsedilen bu kolektörler daha ayrıntılı bir şekilde şöyle anlatılabilir:

Düzlemsel güneş kolektörleri; düşük sıcaklık sistemleridir. Güneş Enerjisini toplayan ve bir akışkana ısı olarak aktaran çeşitli tür ve biçimlerdeki aygıtlardır. En çok evlerde sıcak su ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Ulaştıkları sıcaklık 70°C civarındadır. Kolektörler, yörenin enlemine bağlı olarak güneşi maksimum alacak şekilde, sabit bir açıyla yerleştirilirler. Güneş kolektörlü sıcak su sistemleri; Güneş Enerjisini toplayan düzlemsel kolektörler, ısınan suyun toplandığı depo ve bu iki kısım arasında bağlantıyı

sağlayan yalıtımlı borular, pompa ve kontrol edici gibi sistemi tamamlayan elemanlardan oluşmaktadır.

Parabolik Oluk Kolektörleri; yüksek sıcaklıklara ulaşmak için doğrusal yoğunlaştırma yapan ve kesiti parabolik olan dizilerden oluşur. Kolektörün iç kısmındaki yansıtıcı yüzeyler, Güneş Enerjisini parabolik kolektörün odağında yer alan ve boydan boya uzanan siyah bir absorban boruya odaklar. Enerjiyi toplamak için absorban boruda bir sıvı dolaştırılır. Daha sonra, ısınan bu sıvıdan kızgın buhar elde edilir. Toplanan ısı, elektrik üretimi için enerji santraline gönderilir. Bu kolektörler, orta derecede sıcaklık isteyen uygulamalarda kullanılır. Fakat yoğunlaştırma yaptıkları için daha yüksek sıcaklıklara da (350°C - 400°C) ulaşabilirler. Şekil 3.9'da parabolik oluk kolektörleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Parabolik oluk kolektörler

Parabolik Çanak Kolektörleri; noktasal yoğunlaştırma yapan kolektörlerdir. İki ekseninde güneşi takip ederek, sürekli olarak güneşi odaklama bölgesine yoğunlaştırırlar. Termal enerji, odaklama bölgesinden uygun bir çalışma sıvısı ile alınır. Akışkanın güneş radyasyonu ile ısıtılarak buharlaştırılması sağlanır. Daha sonra buhar türbinlerinin döndürdüğü jeneratörler ile kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür [18]. Şekil 3.10'da parabolik çanak kolektörleri gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Parabolik çanak kolektörler

Merkezi Alıcı Kolektörler; Güneş ışınları düzlemsel aynalar yardımı ile alıcı denilen ısı eşanjörüne yansıtılır. Alıcıda ısıtılan çalışma sıvısından konvansiyonel yollarla elektrik elde edilir. Şekil 3.11’de merkezi alıcı kolektörler gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Merkezi alıcı kolektörler

Bu bölümde, Güneş Enerjisinden ısı enerjisi şeklinde yararlanma yöntemi olan düzlemsel güneş kolektörleri ve ısı enerjisinin yanında dolaylı da olsa elektrik enerjisi

üretebilen yoğunlaştırıcı kolektör sistemlerinden (solar termal teknoloji) kısaca bahsedildi. Bir sonraki bölümde ise, Güneş Enerjisinden direkt olarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılan “Fotovoltaik Hücreler” konusundan bahsedilecektir.

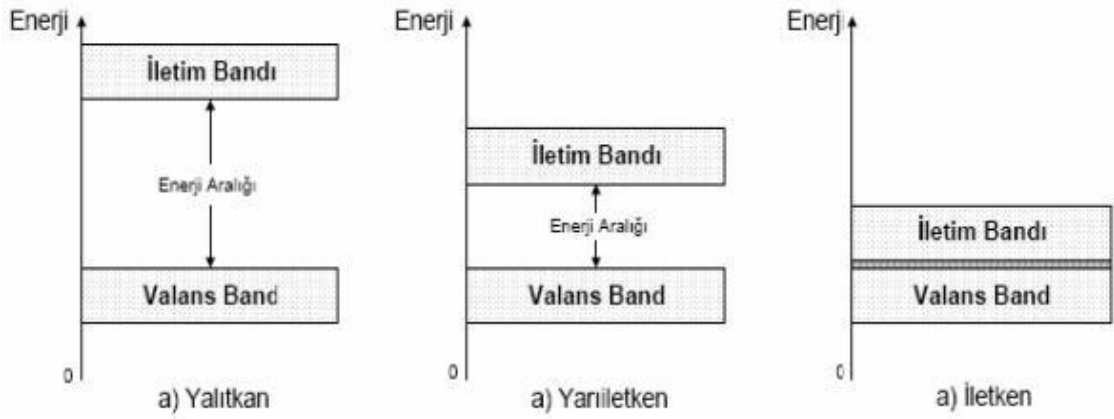
FOTOVOLTAİK HÜCRELER

Fotovoltaikler; temiz, sessiz ve sürekli bir şekilde elektrik üretebilmek için tercih edilen sistemlerdir. Fotovoltaik sistemler, ışığı direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlar olan fotovoltaik hücrelerden oluşur. Kullanılan ışık, çoğunlukla Güneş Enerjisinden sağlandığı için, bu sistemler genellikle “fotovoltaik hücre” olarak adlandırılırlar. Fotovoltaik kelimesi; İngilizce’de ışık anlamına gelen “photo” ve elektrik üretimine gönderme yapan “voltaic” kelimelerinin birleşiminden gelmektedir.

Fotovoltaik hücrenin oluşumunda yarıiletken malzemeler kullanılır. Bir sonraki bölümde, fotovoltaik hücreyi anlamak için öncelikle yarıiletkenlerden bahsedilmiştir.

4.1 Yarıiletkenler

Katılar elektriksel özelliklerine göre; iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç grupta toplanır. Yarıiletkenler oda sıcaklığında $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 'den $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 'ye kadar, sıcaklıkla hızlı değişen elektrik öz dirençleriyle sınıflandırılabilirken band aralıklarına göre de birbirlerinden ayrılırlar. Yarıiletkenlerin bant aralıkları metallerinkine göre büyük, yalıtkanların bant aralıklarından ise küçüktür. Bu kıyaslama, Şekil 4.1’de daha açık bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Yalıtkan, yarıiletken ve iletken hallerin band enerji seviyeleri

$T=0$ K'de saf yarıiletkenlerin çoğu yalıtkandır. Fakat yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki ısı etkileşme ile elektriksel iletkenlik gösterirler. Bu tür materyaller yarıiletkenler olarak bilinir. Sıcaklık arttığında elektriksel öz direncin düşmesi yarıiletkenleri metallere ayıran önemli bir özelliktir [28].

Periyodik tablonun IV. grup elementleri olan Ge (Germanyum) ve Si (Silisyum) en fazla bilinen yarıiletkenlerdir. IV. grup elementleri kovalent kristallerdir ve kovalent bağ ile atomlar birbirlerine bağlanırlar. Periyodik tablonun III. grup elementleri ile V. grup elementlerinden oluşan III-V bileşiklerinde de atomlar kovalent bağ ile bir arada tutulurlar. III-V bileşiklerine örnek olarak; GaAs (Galyum Arsenit), GaP (Galyum Fosfor), InSb (İndiyum Antimonit) ve InAs (İndiyum Arsenit) verilebilir. Yarıiletkenlerin diğer önemli bir sınıfını da II-VI bileşikleri oluşturur. III-V grubu bileşikleri yanında, II-VI grubu bileşikleri, IV. grup element türü yarıiletkenlere alternatif bir çalışma konusu olarak sunulmuştur. II-VI yarıiletken bileşikleri periyodik tablonun II B grubu elementlerinden Cd, Zn ve Hg ile VI A grubu elementleri (O, S, Te, Se, Te, Po) 12 tane bileşik oluştururlar. CdS de bu bileşik yarıiletkenlerden biridir.

1950'li yılların başlarında yarıiletken teknolojisindeki büyüme, silisyum ve germanyumun sınırlı kullanım alanlarını ortaya çıkarmıştır. Bu sınırlama, daha çok bu element türü yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının değerleri ve karakteri açısından sahip olduğu dezavantajlardan kaynaklanıyordu. Yasak enerji aralığının genişletilmesi ile ilgili ilk çalışmalar III-V grubu bileşiklerinde yapılmıştır. Bunlar arasında InSb ve GaAs, sırasıyla küçük ve büyük enerji aralığına karşılık gelen, yarıiletken bileşikler olarak gösterilebilirler. III-V grubu bileşiklerindeki bu gelişmelere paralel olarak II-VI

grubu bileşiklerinde de sistematik çalışmalar yapılmıştır [29]. Bu çalışmaların sonuçları, daha çok II-VI bileşiklerinin genel doğası ve oda sıcaklığında geniş yasak enerji aralığına sahip malzemelerin kimyasal kararlılığı hakkında bilgiler vermiştir. Direkt enerji aralığının, II-VI bileşiklerinin genel bir karakteri olduğu anlaşılmıştır. CdS ve CdSe'in yüksek fotoiletkenlik ve ZnS'in ise güçlü bir lüminesans özellik göstermeleri, II-VI grubu bileşiklerinin çeşitli alanlarda yararlı olabileceklerini göstermiştir [30].

II-VI yarıiletken bileşiklerinin enerji bant aralığı 1,8-4 eV arasında değişmektedir. Bunun yanında 0,25 ve 1,47 eV değerlerinde enerji bant aralığına sahip bileşikler de bulunmaktadır. CdTe (Kadmiyum Tellür), buna bir örnektir [31]. II-VI bileşiklerinde bağlanma tipi iyonik ve kovalenttir. Bu gruba örnek olarak yukarıda da bahsedilen CdS, ZnS ve CdSe verilebilir [32]. En çok bilinen yarıiletkenlerin periyodik tablodaki yerleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

							VIII A					
		III A		IV A		V A		VI A		VII A		He
		5	6	7	8	9	10					
		B	C	N	O	F	Ne					
		13	14	15	16	17	18					
		Al	Si	P	S	Cl	Ar					
IB		IIB										
29	30	31	32	33	34	35	36					
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
47	48	49	50	51	52	53	54					
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
79	80	81	82	83	84	85	86					
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					

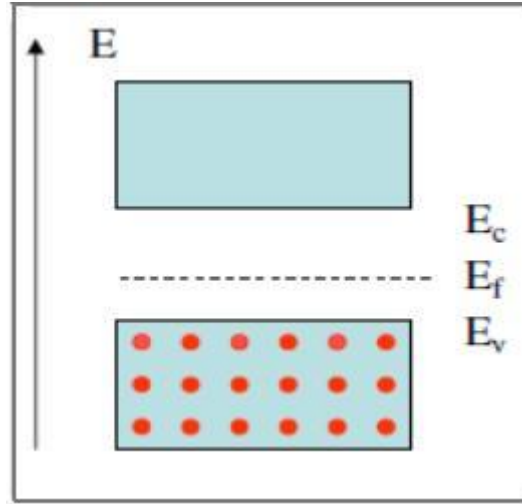
Şekil 4.2 II ve VI A grubu elementlerin Periyodik Tablo'da gösterimi

Bileşik oluşturularak kullanılmalarının dışında yarıiletkenlerin kullanışlı olmasını sağlayan özelliklerinden birisi, kristal örgülerinin içerisine uygun safsızlık atomlarının uygun oranlarda eklenmesiyle iletkenliklerinin kolaylıkla değiştirilebiliyor olmasıdır. Buna bağlı olarak sonraki bölümlerde de iletkenlikleri katkılarla değişebilen asal yarıiletken ve katkı yarıiletkenlerden bahsedilecektir.

4.1.1 Asal Yarıiletkenler

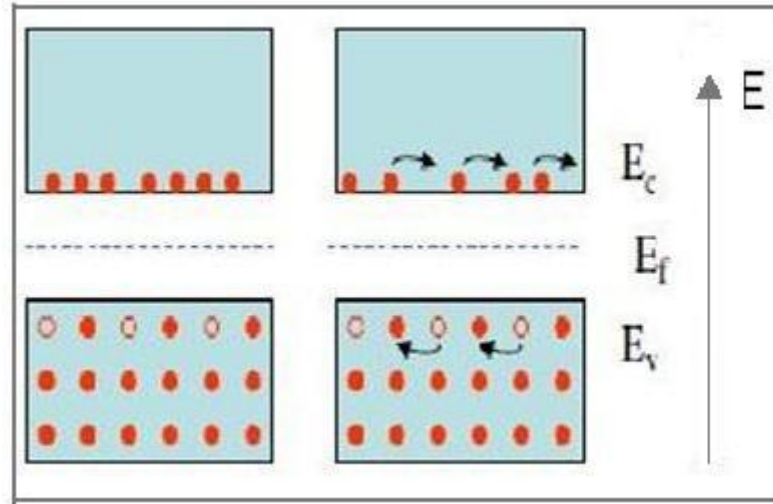
Hiçbir safsızlık veya örgü kusuru içermeyen mükemmel bir yarıiletken, asal yarıiletken olarak adlandırılır. Asal yarıiletkenlerde mutlak sıfırda (0 K) kovalent bağlarda hiçbir

elektron eksikliği söz konusu değildir. Ve mutlak sıfırda, asal yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır. Yani değerlik (valans) bandı elektronlarla tam olarak doldurulmuştur ve iletim bandında serbest elektronlar bulunmamaktadır. İletim bandı tamamen boştur (Şekil 4.3). Bu sıcaklıkta yarıiletken, bir yalıtkan gibi davranır. $T=0$ K'de bütün elektronlar değerlik bandında bulunduğu için herhangi bir elektriksel iletim gözlenmez [33].



Şekil 4.3 $T=0$ K durumunda asal yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının bandlardaki pozisyonu (E_c : iletim bandı enerji seviyesi; E_f : fermi enerji seviyesi; E_v : valans bandı enerji seviyesi)

Ancak yarıiletkene dışarıdan bir ısı verildiği takdirde, sıcaklığın $T=0$ K' den itibaren artması ile birlikte (Şekil 4.4), ısısal enerjinin etkisiyle bazı kovalent bağlarda kopma meydana gelebilir. Yani yasak enerji aralığı kadar bir enerjiyi ortamdan temin eden bir kısım elektronlar koparak serbest kalır. Değerlik bandından iletim bandına geçen bu elektronlar, geldiği yerde boşluklar bırakacaktır. Bu durumda iletim bandında ve değerlik bandında iletim gözlenmeye başlar. Doğal olarak iletme katkısı, iletim bandındaki elektronlardan ve değerlik bandındaki boşluklara geçen elektronlardan gelecektir. Sıcaklıktaki artışın devam etmesi halinde elektronların ve deliklerin sayısı da hızla artar ve bu yarıiletkenlerde iletkenliğin, sıcaklıkla birlikte büyümesi özelliğini açıklar [33].



Şekil 4.4 Sıcaklığın 0 K'den itibaren artması durumunda asal yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının hareketi

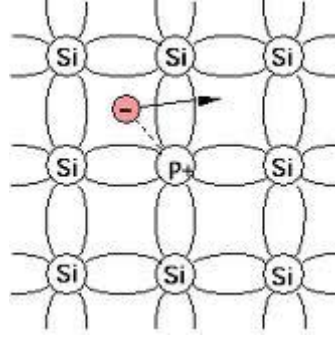
Değerlik bandındaki bir boşluğa geçen bir elektron, geldiği yerde bir boşluk bırakacaktır. Tekrar bir başka boşluğa giderse bu sefer en son olduğu yerde boşluk bırakmış olacaktır. Bu olay, elektronla boşluğun yer değiştirmesi gibi görülebilir. Yani boşluk (hole) hareket ediyormuş gibi olur. Bu bize elektron hareketine zıt yönde hareket eden ve kütlesi elektron kütlesi gibi olan bir parçacığın tanımlanması imkanı verir. Genel olarak bu boşluklar “delik” veya “hole” olarak adlandırılırlar.

Saf bir yarıiletkende elektronların ve deliklerin sayısı birbirine eşittir. Çünkü değerlik bandındaki bir delik, sadece bir elektronun iletim bandına çıkmasıyla oluşturulabilir [32]. Sonuç olarak, örneğin Si (silisyum) gibi asal bir yarıiletkende ısının etkisiyle elektron-delik çifti oluşur. İletim ve değerlik bandındaki bu taşıyıcı yoğunlukları birbirine eşittir. Böyle yarıiletkenlere **asal yarıiletkenler** denir.

Yarıiletkenler üzerine yapılan bilimsel çalışmalarda birçok uygulamada taşıyıcılardan sadece birinin baskın olduğu örnekler ihtiyaç duyulur. Yarıiletkenlere uygun katkı atomları enjekte edilerek sadece elektron veya delikleri içinde barındıran yarıiletkenler elde edilebilir. Yani bu yarıiletken malzemelerin fotovoltajik hücre olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkıları gerekir. Yarıiletken malzemenin içerisine, çok az miktarda uygun olarak seçilmiş yabancı atom katılması ile yarıiletkenin iletkenliği önemli ölçüde değiştirilebilir. Asal yarıiletkenin yapısal özelliklerini bozmayacak miktarda ve denetimli bir biçimde yarıiletken kristale yerleştirilen yabancı atomlara **safsızlık atomları**, bu işleme **katkılama**, iletkenliği katkılarıyla belirlenen yarıiletkenlere ise **katkılı yarıiletkenler** adı verilir.

4.1.2 n-Tipi Yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenleri açıklamak için silisyum (Si) kristalini inceleyebiliriz. Saf silisyum kristalinde her atom 14 elektrona sahip olmakla birlikte, en dış yörüngedeki dört elektron, komşu atomlarla olan ilişkileri belirler. Değerlik elektronları adı verilen bu dört elektronun her biri, en yakınındaki dört silisyum atomu ile bağ yaparak silisyum kristalindeki ana yapı taşını oluşturur.



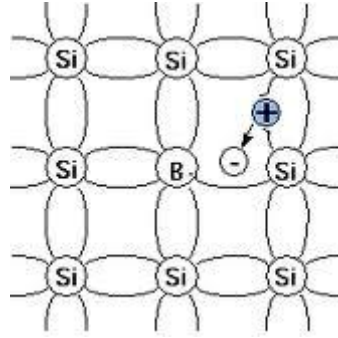
Şekil 4.5 Fosfor (P) atomu katkılanmış Si (Silisyum) kristali

Şekil 4.5’de gösterildiği gibi, fosfor (P) gibi 5 değerlik elektrona sahip bir atom, silisyum kristalindeki normal atomların yerleştiği örgü noktasına yerleşirse, bu yabancı atom en yakın komşuları ile 4 kovalent bağ oluşturduktan sonra geriye 1 değerlik elektronu artar. Fosfor atomuna çok zayıf olarak bağlı olan bu elektron çok küçük bir enerji ile Fosfor atomundan ayrılarak silisyum kristalinin iletim bandına çıkacaktır. Yani 5. elektron bağa giremez ve iletim elektronu olarak kristal içinde serbest hareket edebilir hale gelir. Bir elektron verebilen safsızlık atomuna **donor (verici)** denir. İletkenliği donor katkısı ile belirlenen yarıiletkenlere ise **n-tipi yarıiletken** denir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, iletim elektronlarının delik (boşluk) oluşturmadan ortaya çıkmasıdır.

4.1.3 p-Tipi Yarıiletkenler

Safsızlık atomunun uygun seçimi ile yarıiletkenlerde elektron yerine delik (boşluk) fazlalığı yaratılabilir. Şekil 4.6’daki gibi Saf silisyum kristali içerisine değerlik elektron sayısı üç olan Bor (B) atomu katkılanırsa, bu atom, ana yarıiletkendeki atomların örgü noktalarına yerleşir. Silisyum atomunun yerini alan Bor atomu, silisyum kristalindeki üç atomla bağ yaparken dördüncü atomla paylaşacağı elektronu olmadığı için, bir eksik bağ ortaya çıkacaktır. Bu eksiklik ise başka bağdan ayrılan elektron tarafından

doldurulur. Böylece elektronun ayrıldığı yerde bir delik (boşluk) oluşur ve oluşan boşluk kristal içerisinde serbestçe hareket edebilir. Değerlik bandının kıyı enerjisine yakın bulunan bu enerji düzeyleri, çok küçük enerjilerle bile değerlik bandından gelebilen elektronlarla doldurularak değerlik bandında boşluklar (delik) oluşacaktır.

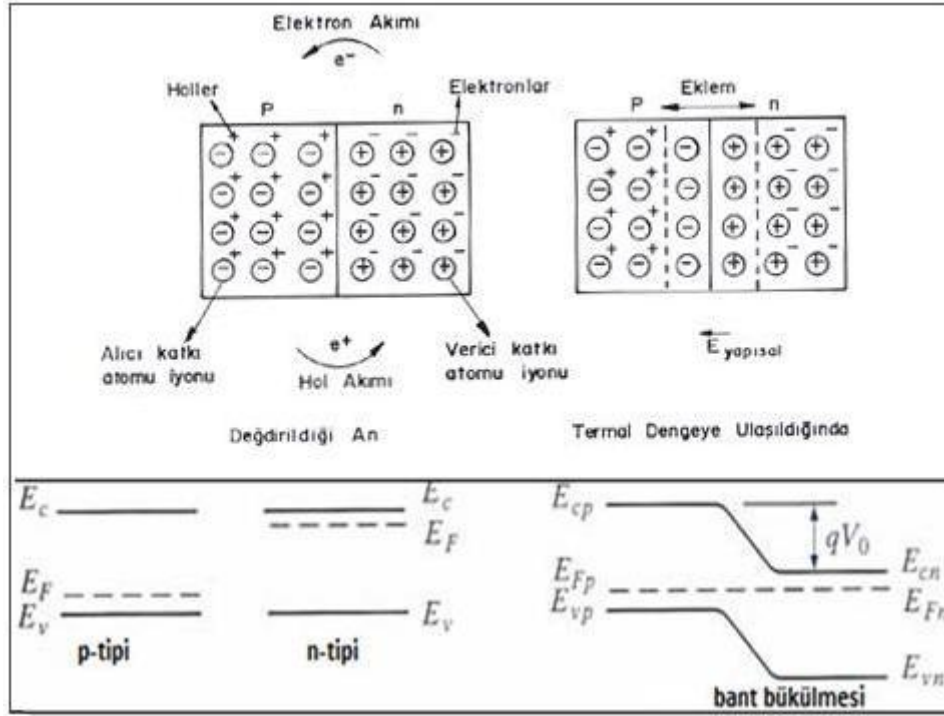


Şekil 4.6 Bor (B) atomu katkılanmış Si (Silisyum) kristali

Bu şekilde katkılanmış yarıiletkenlerde değerlik bandındaki deliklerin sayısı iletim bandındaki serbest elektron sayısından daha çok olduğundan, çoğunluk yük taşıyıcıları, pozitif yükler gibi düşünülen deliklerdir. Deliklerin çoğunluk yük taşıyıcısı olduğu bu tür malzemelere **p-tipi yarıiletken** adı verilir. Silisyum kristalinde çoğunluk yük taşıyıcısı olarak boşluklar (delik) oluşturan katkı atomuna ise **akseptör** denir [42].

4.1.4 p-n Eklem

P-tipi ve n-tipi yarıiletkenler bir araya gelip eklem oluşturmadan önce elektriksel bakımdan nötrdür. Şekil 4.7(a)'da gösterildiği gibi p-n eklem oluştuğunda, n-tipi yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar p-tipi yarıiletkene doğru, p-tipi yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcısı olan delikler de n-tipi yarıiletkene doğru akar. Bu geçişler, yalnızca p-n ekleme yakın yerlerdeki çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından gerçekleşir. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi sağlandığında son bulur. Böylece p-n eklemde ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesi **geçiş bölgesi** veya **yükten arındırılmış bölge** adını alır. Bu bölgede oluşan elektrik alan ise **yapısal elektrik alan** olarak adlandırılır. Zaten p-n eklemde en önemli özelliği de kendi içlerinde böyle bir elektrik alanının mevcut olmasıdır (Şekil 4.7(a)).



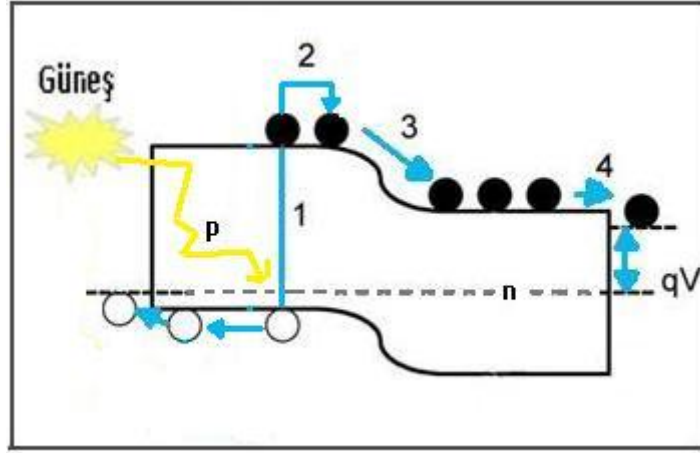
Şekil 4.7 (a) p ve n tipi yarıiletkenlerin temas ettirildiği ve termal dengeye ulaştıkları anın şematik gösterimi (b) p-n kavşağında enerji bandı

En basit yapıda bir tek kristal silisyum fotovoltaik hücre, p-n ekleminden başka bir şey değildir. Oluşan p-n eklem fotovoltaik hücre olarak çalışabilmesi için ise eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün gerçekleştirilmesi gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada meydana gelir:

Birinci aşamada, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-delik çiftleri oluşturulur. Yasak enerji aralığına eşit ya da ondan daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini değerlik bandındaki bir elektrona vererek, elektronun iletim bandına çıkmasını sağlar. Böylece elektron-delik çifti oluşmuş olur.

İkinci aşamada ise; oluşturulan elektron-delik çiftleri, eklem boyunca uzanan yapısal elektrik alan sayesinde, elektronlar yüksek potansiyelden alçak potansiyele ve delikler alçak potansiyelden yüksek potansiyele doğru olmak üzere, birbirlerinden ayrılırlar. Elektron-delik çiftlerinin birbirlerinden ayrılmaları için yaşam süreleri içerisinde, yani elektron ve delik tekrar birleşmeden önce, yapısal elektrik alanın var olduğu ara yüzeye ulaşmaları gerekir. Bu nedenle fotovoltaik olaya katkı, ara yüzeye yakın yerlerde oluşan ve ayrılan elektron-delik çiftlerinden sağlanır. Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-delik çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat yaşam süreleri içerisinde yapısal elektrik alanın var olduğu bölgeye ulaşamadıkları için tekrar

birleşerek kaybolmaktadırlar. Böylece fotovoltaik dönüşüme hiçbir katkıda bulunmazlar.

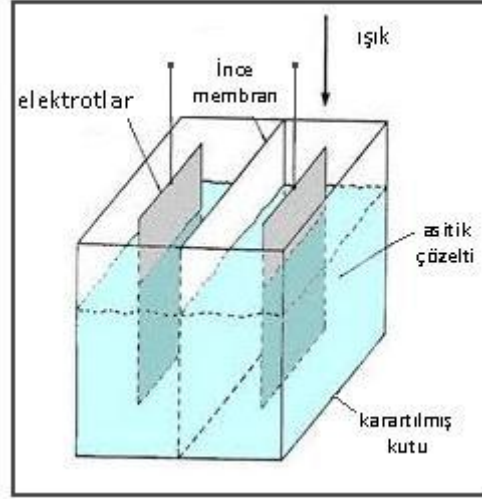


Şekil 4.8 Bir p-n eklemnin fotovoltaik hücre olarak çalışması (1) güneş ışığı tarafından uyarılan elektronların iletim bandına geçmesi ve yerinde boşluk bırakması 2) elektronların yapısal elektrik alanın var olduğu bölgeye doğru hareketi 3) yapısal elektrik alan vasıtası ile elektron ve deliklerin ayrılması 4) elektronların uygun elektrotlara taşınması)

Şekil 4.8’de gösterildiği gibi elektron-delik çifti p-tipi bölgede oluşursa, yani foton p-tipi bölge tarafından soğurulursa, azınlık yük taşıyıcısı olan elektronlar eklemeye doğru hareket eder ve yapısal elektrik alan sayesinde n-tipi bölgeye geçerler. Birbirlerinden ayrılan bu elektron-delik çiftleri kendi elektrotlarına doğru gitme ihtiyacı duyarlar. Böylece fotovoltaik hücre uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluşur. Bu süreç, bir fotonun yeniden hücre yüzeyinde soğurulmasıyla aynı şekilde devam eder.

4.2 Fotovoltaik Hücrelerin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik hücrenin çalışma ilkesi fotovoltaik olaya dayanır. Fotovoltaik olay ilk olarak 1839 yılında Fransız bilim adamı Henri Becquerél tarafından gözlenmiştir. Becquerél, elektrolit çözeltisi içerisine batırılmış gümüş çubuklar üzerine ışık düşmesiyle elektrik akımı gözlemlemiş ve bunu rapor etmiştir (Şekil 4.9) [34].



Şekil 4.9 Elektrolit çözeltisi içerisine batırılmış elektrotlar üzerine ışık düşürülmesi [43]

Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Onlar, selenyum elektrodu ışığa tutarak akım üreten foto-voltaj gözlemlemişlerdir [35].

Çok önceleri fotovoltajik hücreler, metal-yarıiletken ara yüzeyinden meydana gelmekteydiler. Bunların verimleri çok düşüktü. Sonraları, yarıiletken-yarıiletken ara yüzeylerinin daha iyi verim verdiği gözlemlendi. P-N eklemine sahip bu hücreler ilk olarak 1941 yılında Russel Shoemaker Ohl tarafından silisyum kullanılarak rapor edildi [36]. Bu buluşla yaptığı fotovoltajik hücrede %1'lik bir verim bularak patent almıştır [37].

Germenyum (Ge) kristali üzerindeki fotovoltajik etki, 1946 yılında Benzer tarafından ve 1952 yılında Pantchechnikoff tarafından rapor edildi. Fakat 1954'lere kadar fotovoltajik hücreler fazla bir ilgi ile karşılaşmadı [38].

Bu durum, 1954 yılında Darly Chapin ve arkadaşları tarafından güneş enerjisini %6 verimlilikle direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren tek kristal silisyum fotovoltajik hücrelerin ilk kez icat edilmesi [39] ve ardından fotovoltajik etkiyi Reynolds ile arkadaşlarının CdS üzerinde keşfetmesi [40] ile değişmiştir. Fotovoltajik hücrelere olan ilgi giderek artmıştır. Chapin ve arkadaşlarının buluşu, bugünkü inorganik silisyum fotovoltajik hücrelerin müjdecisidir. Fotovoltajik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır [23]. Uzay çalışmalarında kullanımı fotovoltajik hücre teknolojisini çok hızlı gelişmesini sağlamıştır. Henüz daha

1960'ların başlarında verimleri %15'i bulmuştur [41]. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir. 1970'li yılların başlarına kadar, fotovoltaik hücre uygulamaları ile sınırlı kalmıştır. Fotovoltaik hücrelerin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına rağmen, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. petrol bunalımı"nı izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır [23].

Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silisyum kristaline dayalı fotovoltaik hücre verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarıiletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretilebilecek ince film fotovoltaik hücreler üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir [23].

1974 yılında, Alan Heeger, Alan Mcdiarmid ve Hideki Shirkawa'nın yarıiletken polimerleri keşfiyle fotovoltaik hücre araştırmaları yeni bir boyut kazanmıştır. Bu alandaki ilk buluş 1979 yılında Tang isimli bilim adamının iki katlı organik fotovoltaik hücreyi oluşturmasıyla gerçekleşmiştir. Bu buluş 1986 yılında yayınlanmıştır. Bu süreçten sonra organik fotovoltaik hücrelerdeki araştırma ve geliştirme hız kazanarak devam etmiştir [42].

Fotovoltaik hücre; birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil olmak üzere 3 kuşak olarak sınıflandırılmaktadır. Kristal silisyum fotovoltaik hücre, birinci nesil; ince film fotovoltaik hücre, ikinci nesil; organik fotovoltaik hücreler ise üçüncü nesil fotovoltaik hücreleri oluşturmaktadır. Bir sonraki konuda bunlar ayrıntılı olarak incelenecektir.

4.3 Fotovoltaik Hücrelerin Sınıflandırılması

Fotovoltaik hücreleri; üretiminde kullanılan malzemeler ve üretiminde kullanılan süreçler gibi parametreler nedeniyle nesillere ayırmak mümkündür. Böylece fotovoltaik hücreler; birinci nesil fotovoltaik hücreler, ikinci nesil fotovoltaik hücreler ve üçüncü nesil fotovoltaik hücreler olmak üzere 3 grupta toplanabilir. Birinci nesil fotovoltaik hücreler, kristal silisyum fotovoltaik hücrelerden; ikinci nesil fotovoltaik hücreler, ince film fotovoltaik hücrelerden ve üçüncü nesil fotovoltaik hücreler ise organik fotovoltaik hücrelerden oluşmaktadır. Boya duyarlı fotovoltaik hücreler, polimer fotovoltaik hücreler ve hibrit fotovoltaik hücreler; "organik fotovoltaik hücreler" genel başlığı

altında toplanmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde bu konulardan ayrıntılı bir şekilde bahsedilecektir.

4.3.1 Birinci Nesil Fotovoltaik Hücreler

Kristal silisyum fotovoltaik hücre, birinci nesil fotovoltaik hücredir. 1954 yılında ilk fotovoltaik hücre yapımında siliyum kullanılmıştır. Fotovoltaik hücre yapımında kullanılan silisyum, yer kabuğunda oksijenden sonra [43] en çok bulunan ikinci elementtir. Yer kabuğunun %27'sini oluşturan ve kum olarak da bildiğimiz silisyumdioksit (SiO_2) madeninden elde edilir. SiO_2 'in yüksek sıcaklık fırınlarında (1900°C) karbon ile girdiği tepkimeler sonucunda %98 saflıkta silisyum (Si), yan ürünler olarak da karbondioksit (CO_2) ve karbonmonoksit (CO) elde edilir. Daha sonra çeşitli saflaştırma işlemlerinden geçirilen silisyum %99.99'un üzerinde saflığa ulaşarak silisyum pul yapımı için hazır hale gelir. Saflaştırmanın ardından 1400°C sıcaklığa çıkarılıp eriyik hale getirilen silisyumdan, farklı yöntemlerle kontrollü bir biçimde soğutularak, çoklu kristal veya tek kristal katı kütükler elde edilir. Oluşturulan bu kütükler, tel testerele yardımcı ile dilimlenir. Bu dilimlerin yüzeyi bazik bir solüsyon içinde zımparalanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilir.

Fotovoltaik etkinin gözlenebilmesi için, fotovoltaik hücre içinde kendiliğinden oluşmuş, sabit bir elektrik alan oluşması gerekir. Fotovoltaik hücrenin kalbi olarak da düşünebileceğimiz bu elektrik alanının oluşturulması için, silisyum pullar üzerinde katkılama işlemleri yapılır. Katkılama esnasında Bor ile katkılanmış olan (p-tipi) silisyum pul, $850-900^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, fosfor içerikli bir gaz altında fırınlanır ve böylece pulun ön yüzeyi, fosfor katkılanmış (n-tipi) hale dönüşür. Katkılama sonucunda silisyum pullarda p-n eklemi yani diyot yapısı sağlanmış olur.

Diyot özelliği kazanan ve yansıma engelleyici işlemlerden geçen fotovoltaik hücre artık ışık altında, ön ve arka yüzeyi arasında bir potansiyele fark oluşturabilecek hale ulaştırılmış durumdadır [19].

Kristal silisyum, bugün piyasanın %80'ini temsil eden en yaygın teknolojidir. Hücreler, güneş ışığının %14-%22'sini elektriğe dönüştürürler [43]. Rapor edilen en iyi verimi %22'lerden daha yüksek değerlere ulaşmıştır [44].

Kristal silisyum fotovoltaik hücre çeşidi, hangi kristal kütüklerden dilimlendiğine bağlıdır. Buna göre en çok bilinen kristal silisyum fotovoltaik hücre çeşitleri; tek kristal

ve çok kristal silisyum fotovoltaik hücredir. Tek kristal dilimler mükemmel bir şekilde dizilmiş düzgün bir kristal yapıya sahipken, çok kristal dilimler ise düzgün bir kristal yapısına sahip değildir. Şekil 4.10'da da Tek kristal ve Polikristal Silisyum kullanılarak hazırlanan fotovoltaik paneller gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Tek kristal ve Polikristal Silisyum kullanılarak hazırlanan Fotovoltaik Paneller

4.3.2 İkinci Nesil Fotovoltaik Hücreler

İnce film fotovoltaik hücre, ikinci nesil fotovoltaik hücrelerdir. İnce film fotovoltaik hücreler ticari olarak 1980'li yıllarda ortaya çıkmış, bugün artık kristal tabanlı fotovoltaik hücre ile yarışır duruma gelmiştir [19]. Bu teknikte, soğurucu özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta fotovoltaik hücre yapılır. İnce film fotovoltaik hücre üretimine başlanmasındaki en büyük sebep, daha düşük üretim maliyetleridir [41]. Düşük maliyetli bir altlık üzerine aşırı derecede ince fotoduyarlı katmanların biriktirmesiyle oluşturulmaktadır. Bu da maliyetlerde önemli derecede bir azalış sunmaktadır. Aktif yarıiletken katmanların biriktirilmesi için kullanılan altlıklar; cam, plastik, seramik, metal gibi malzemeler olabilir.

İnce film fotovoltaik hücrelerin en temel avantajı düşük maliyetli olmasıdır. Çünkü diğerlerine göre düşük maliyetli malzeme kullanılır ve malzemeler düşük maliyetli işletim sürecine tabi tutulurlar. İnce film fotovoltaik hücre, verim açısından kristal tabanlı silisyum hücreleri yakalayamamış olsa da çok daha ucuza üretilebilen bir teknolojidir. Bu teknoloji ile üretilen hücrelerde 100 kat daha az malzeme kullanılır, üretilmeleri kolaydır. Cam üstüne ya da çelik, plastik gibi esnek yüzeylerin üzerine uygulanabilir. Büyük güneş enerjisi tarlaları yapılabileceği gibi, bina dış cephelerinde ve çatı kaplamalarında, kumaş üzerinde de kullanılabilir. Bu özellikleri ile ince film fotovoltaik hücre çalışmaları son 15 yılda büyük hız kazanmıştır [19].

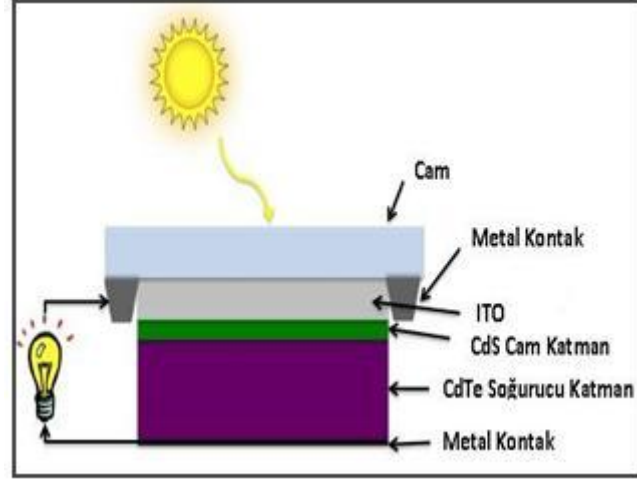
Ayrıca, direkt bant aralıklı yarıiletken malzemelerde olduğu gibi, ince film yarıiletken malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. Bu nedenle de 1 µm kalınlığında bir yarıiletken filmi yeterli olmaktadır. Silisyum fotovoltaik hücrelerde ise bunun 100–1000 katı daha kalın bir filme ihtiyaç vardır. Bu açıdan, pahalı yarıiletken malzeme kullanımını azaltılmış olmaktadır [41].

En temel dezavantajları ise düşük verimli ve uzun vadede kararsız olmalarıdır. Verimin az oluşu, kısmen altlıklar üzerinde düşük kaliteli yarıiletken malzemelerin büyütülmesine bağlıdır. Bir diğer problem kararlılığın az oluşudur. Bunun sebebi, yarıiletken malzemenin ortam ile kimyasal reaksiyon yapmasıdır [44].

En eski ve en bilinen ince film fotovoltaik hücreler olan amorf silisyum ince film fotovoltaik hücreler, kristal yapı özelliği göstermezler. Kristal silisyum fotovoltaik hücrelerden farklı olarak amorf silisyum fotovoltaik hücrelerde p ve n tabakalarının (yaklaşık 20-30 nm) arasında, bu iki tabakadan çok daha kalın olan i tabakası (yaklaşık 250-400 nm) bulunur. Burada i bölgesi ışığın asıl soğurulduğu bölgedir, kalın olmasının sebebi budur. Cam üzerine uygulanabilmektedirler. Verimleri %5-8 arasındadır. Ancak bu hücreler, kısa zamanda bozunuma uğrayarak verimleri azalır. Amorf silisyum fotovoltaik hücreler günümüzde daha çok, küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılırlar [19].

Amorf silisyum fotovoltaik hücreler, ince film fotovoltaik hücreler için hayli çalışılan bir malzemedir. Kristal ve amorf silisyum arasındaki fark oldukça önemlidir. Kristal silisyum, 1.1 eV'lik indirekt bir bant aralığına sahiptir. Hidrojene tabi tutulmuş amorf silisyum (a-Si) ise 1.6 eV'lik direkt bant aralıklı, bir kristal için beklenen optik soğurma karakteristiğine sahiptir. Yani soğurma katsayısı kristal silisyum fotovoltaik hücrenin katsayısından daha fazladır [44].

Diğer bir ince film fotovoltaik hücre kadmiyum sülfür/kadmiyum tellür (CdS/CdTe) ince film fotovoltaik hücrelerdir. CdTe, elektronik yapısı güneş ışığı tayfına en uygun yarıiletkenlerden biridir. CdTe malzemesinin en duyarlı olduğu bölge, güneş ışığı tayfinin en güçlü olduğu dalga boylarına karşılık gelir. Elektronik yapısı ışığın çok güçlü biçimde soğurulmasını sağlar. Ayrıca CdTe üretimi oldukça kolaydır. Genellikle CdS (kadmiyum sülfür) ile birlikte kullanılır. CdS ışığı kolay geçirdiğinden pencere görevi görür. Ayrıca CdS/CdTe eklemi akım oluşması için gerekli elektrik potansiyelini sağlar [19]. Şekil 4.11'de böyle bir ince film fotovoltaik hücre gösterilmiştir.



Şekil 4.11 CdS/CdTe ince film fotovoltaik hücrelerin şematik gösterimi [45]

Bu tür güneş panellerinde verim değerleri %11'e ulaşmıştır. Panel maliyeti dünyadaki tüm teknolojiler arasında en düşük düzeye inmiştir. CdS/CdTe ile ilgili en büyük endişe, Cd elementinin zehirli olmasıdır.

4.3.2.1 İnce Film Üretim Yöntemleri

Yarıiletken ince filmler; taban olarak kullanılan bir materyal üzerine başka bir malzemenin çok ince katmanlar halinde çöktürülmesi ile elde edilen, kalınlıkları 100Å ile birkaç µm arasında değişen malzemelerdir. Teknolojik ve bilimsel olarak önemi gittikçe artan yarıiletken ince filmleri elde etmek için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

İnce film üretmek için birçok yöntem vardır. Temel olarak biriktirme yöntemleri iki grupta toplanabilir. Bunlar fiziksel ve kimyasal biriktirme yöntemleridir.

- Kimyasal biriktirme yöntemleri:
 - Kimyasal buhar biriktirme (CVD)
 - Damlatma (drop casting) yöntemi ile kaplama
 - Dönel kaplama (spin coating) yöntemi ile kaplama
 - Kimyasal püskürtme tekniği (spray proziz) ile kaplama
- Fiziksel biriktirme yöntemleri:
 - Termal buharlaştırma

- Elektron demeti (E-beam)
- Saçtırma (Sputtering)

gibi biriktirme yöntemleridir. Bunlar kimyasal ve fiziksel biriktirme yöntemlerinin sadece birkaçıdır.

Kimyasal buhar biriktirme (CVD); yüksek saflıkta katı ince filmlerin oluşturulmasında kullanılır. Bu süreçte altlık (substrat), uçucu gazlara maruz bırakılan bir reaktörün içerisine yerleştirilir. Uçucu gazlar ve altlık arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda bir katı ürün, altlığın üzerinde şekillenir. Bu teknikler ile tek kristal, polikristal ve amorf ince filmler yüksek saflıkta üretilebilir. CVD'nin en büyük özelliği, düşük sıcaklıkta ve arzu edilen saflıkta hem tek hem de kompleks malzemelerin sentezine uygun olmasıdır. Biriktirilen malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri; sıcaklık, basınç, gaz akış oranı ve gaz konsantrasyonu gibi biriktirme ve reaksiyon koşullarının kontrol edilebiliyor olmasıyla tanımlanabilir [46].

CVD yöntemi ile kaplama sonucunda yüzeyde fazla boşluk bulunmaz. Örneğin; saçtırma gibi fiziksel kaplama yöntemlerinde hedeften küçük parçalar koparılarak pulun yüzeyine kaplanırlar. Bu parçaların şekilleri rastgele olduğundan birbirleriyle uyumlu değildir ve kaplama sırasında aralarında boşluklar kalır. Bu hücreler ise filmin kalitesini düşürürler. CVD'de ise kaplama yüzeyde ve kimyasal reaksiyon aracılığıyla gerçekleşir. Bu sebeple fazla boşluk oluşmaz ve film kalitesi artar.

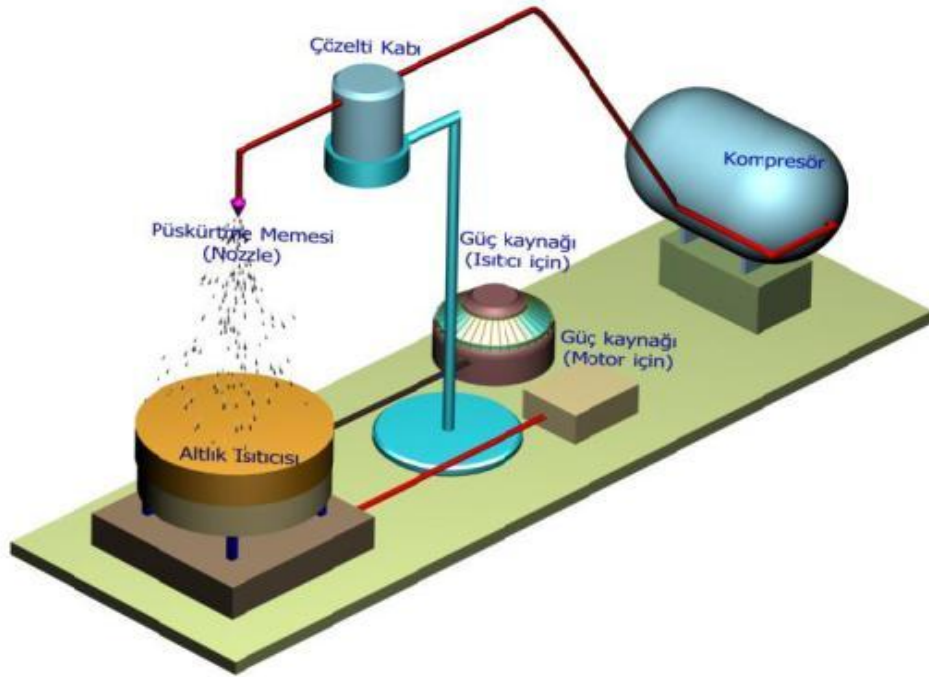
Damlatma yöntemi ile kaplama (Drop Casting); ince film kaplanacak yüzeye, malzemenin damlatılması ve sonrasında kurummasının beklenmesi ile gerçekleşen basit bir kaplama yöntemidir. Çözelti israfı olmadan kolay ve ucuz bir kaplama yöntemidir.

Dönel kaplama yöntemi ile kaplama (Spin Coating); dönel kaplama cihazının üzerinde bulunan ince film kaplanacak yüzeye, malzemenin damlatılması ile oluşan bir kaplama çeşitidir. Çözelti damlatılan altlık, vakumla çekilen bir dönel tablanın üzerine konularak hızlı bir şekilde döndürülür. Böylece altlık ince film kaplanmış olur. Bu yöntemin kolay olması bir avantaj olmasına rağmen çok fazla çözelti israfına sebep olmaktadır.

Kimyasal püskürtme tekniği (Spray Proliz); Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, elde edilecek ince film için belirli molaritelerde hazırlanan çözeltiler belirli hacimlerde karıştırılır. Bu çözeltiler, basınçlı azot veya hava gazı yardımıyla belirli bir süre ısıtılan altlıklar üzerine püskürtülür. Sonuç olarak yarıiletken filmler üretilir. Bu yöntem böyle

bir kimyasal çöktürme yöntemidir. Bu teknikle; CdS, ZnS, ZnSe, CdSe gibi ikili veya üçlü bileşikler elde edilmektedir [47].

Kimyasal püskürtme yöntemi, ince film elde etme yöntemleri arasında en kolay ve ucuz olan yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri değişik parametrelere bağlıdır. Bunlar; altlık sıcaklığı, püskürtme hızı, altlık ile püskürtme başlığı (nozzle) arasındaki mesafe, çözeltinin bileşim oranları, püskürtme zamanı ve püskürtülen çözelti miktarıdır.



Şekil 4.12 Kimyasal püskürtme tekniği [30]

Kimyasal püskürtme tekniğinde önemli parametlerden biri de püskürtme hızıdır. Püskürtme hızı; sisteme gönderilen toplam çözelti miktarının, püskürtme zamanına bölünmesiyle hesaplanabilir. Püskürtme hızının fazla olması taban sıcaklığının kontrolünü zorlaştırmakta, film yüzeylerinde tortu oluşturmaktadır. Bu durum üretilen filmlerin fiziksel özelliklerini değiştirmektedir.

Kimyasal püskürtme tekniğinde altlık sıcaklığının çok iyi kontrol edilmesi gerekir. Yüksek veya düşük altlık sıcaklıkları, filmlerin kalınlıklarını ve taban yüzeylerine tutunmasını etkilemektedir.

Kimyasal Püskürtme tekniğinde, taban ile püskürtme başlığı arasındaki mesafe elde edilen filmlerin fiziksel özelliklerini etkileyen bir başka parametredir. Bu uzaklık

genellikle 30-40 cm arasında değişim göstermektedir. Bu mesafenin daha kısa tutulması kalın filmlerin ve taban yüzeyinde tortuların oluşmasına neden olur. Yüksek sıcaklıklarda ise erken buharlaşmadan dolayı tabana ulaşan damlacıkların sayısı ve tabana tutunma azalacaktır. Bu yüzden yüksek taban sıcaklıklarında bu mesafenin azaltılması gerekmektedir.

Spray proliz cihazının bir diğer elemanı olan püskürtme başlığı, gelen çözeltiyi atomize etmek için belirli basınçlarda azot gazı veya hava taşıyıcı gaz olarak kullanılır.

Kısaca kimyasal püskürtme tekniği; karmaşık aletler içermeyen, kısa zamanda daha geniş yüzeyli (cm² mertebesinde) ince filmlerin elde edilmesini sağlayan ekonomik ve basit bir tekniktir [47].

Termal buharlaştırma; ise fiziksel biriktirme yöntemidir. Bu teknikte kaynak malzeme, bir vakum tüpünde buharlaştırılır. Buharlaştırılan parçacıklar, katı bir film oluşturmak üzere altlık üzerine yoğunlaştırılır.

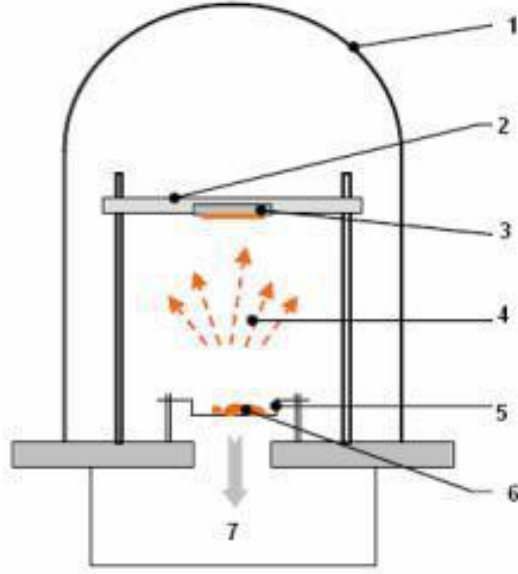
Vakum ortamında rezistif ısıtıcı ile yapılan termal buharlaştırma tekniği, yarıiletken yüzeylerine ince metal filmleri kaplamak için en yaygın şekilde kullanılan tekniklerden biridir. Kaplanacak olan malzemeler; ısıya dayanıklı, erime noktası çok yüksek olan metallere imal edilmiş potaların içinde veya direkt olarak ısıtılmış rezistans üzerinden buharlaştırılır.

Bu yöntem diğer tekniklere göre daha ucuzdur ancak bazı dezavantajları vardır. Geometrik faktörler sebebiyle büyük çaplı üretimler çok zordur veya mümkün değildir. Düşük erime sıcaklığına sahip malzemeler (<1500 °C) için kullanılabilir. Bazı durumlarda, pota da sıcaklıktan etkilenerek buharlaşır ve kaplama bozulabilir [46].

İnce filmlerin vakumda altlık yüzeyine kaplanması şu üç süreçten oluşur:

1. Kaplanan malzeme atomlarının üretimi ve altlığa doğru akışın yönlendirilmesi
2. Atomların vakum ortamında altlığa kadar geçişi
3. Atomların altlık yüzeyine çökmesi ve ince film tabakasını oluşturması.

Şekil 4.13'de, vakumda buharlaştırma yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Termal buharlaştırma sisteminin şematize edilmiş hali; 1.Vakum odası 2. Altlık tablası 3. Numune tutucu 4. Metal buharı 5. Isıtıcı filaman 6. Buharlaştırılacak metal [30]

Buharlaştırılacak olan malzeme ısıtılarak atom ve moleküllerden oluşmuş gaz haline getirilir. Gaz halindeki malzeme altlık yüzeyine çökerek ince film halinde kaplanır. Vakum ortamında hazırlanan filmlerin büyüme hızı, vakum şartlarına sıkı bağlıdır. Orta ve düşük vakumda, kaynaktan kopan atom ve moleküller, ortamdaki hava molekülleri ile sık sık çarpışırlar. Bunun sonucu olarak film büyüme hızı azalır. Bundan başka, fanusun içinde kalan hava molekülleri, büyütülen film ile kimyasal tepkimeye girebilir ve neticede filmin özelliklerinde istenmeyen değişimler meydana gelebilir [48].

Elektron demeti (E-beam); yönteminde erime noktaları yüksek metallere, düşük buhar basıncına sahip metallere ve alaşımlara gibi çok farklı malzemelerin rahatlıkla buharlaştırılabileceği bir metoddur. Elektron demeti (E-beam) ile buharlaştırma metodunda, büyük miktarda ısının küçük bir alanda yoğunlaşmasından dolayı yüksek hızlı biriktirme yapmak mümkün olduğu gibi biriktirme hızı rahatça ayarlanabilmektedir. İşlem 10^{-5} Torr basınç altında gerçekleştirilir. Elektron tabancası içerisindeki tungsten filaman ısıtılır. Elektron tabancası, buharlaştırılan maddeden kaynaklanacak kirlilikten dolayı buharlaştırma bölgesinin dışındadır. Tungsten filaman yeteri kadar ısındığında elektron yaymaya başlar. Bu elektronlar manyetik ve elektrik alanlar vasıtasıyla saptırılır, hızlandırılır ve buharlaştırılacak malzeme üzerine demet halinde odaklanır. Elektron demeti hedef yüzeye çarptırıldığında, elektronların kinetik enerjisi termal enerjiye dönüşür. Unutulmamalıdır ki sadece bir elektron tarafından

verilen enerji oldukça düşüktür ve ısıtma işlemi çok sayıda elektronun yüzeye çarpması ile gerçekleşir. Bu, hedefi buharlaştıran enerjidir. Elektron demeti tarafından oluşturulan ısı yoğunluğu nedeniyle, hedef buharlaşır.

Saçtırma (sputtering); tekniğinde ise dışarıya atılan yüzey atomları olarak tarif edilen hedef kaynağın buharı, düz bir doğrultuda hareket eder ve altlık yüzeyi üzerinde ince film oluşturacak bir etki meydana getirir. Bu teknik, yüksek erime sıcaklıklı malzemelerin buharlaştırılmasını kolaylaştırdığı için önemlidir [46].

4.3.3 Üçüncü Nesil Fotovoltaik Hücreler

Üçüncü nesil fotovoltaik hücreler, organik fotovoltaik hücrelerdir. Organik fotovoltaik hücreler ise; boya duyarlı fotovoltaik hücreler, hibrit fotovoltaik hücreler ve polimer fotovoltaik hücreler olmak üzere 3'e ayrılır. Aşağıdaki bölümlerde boya duyarlı ve hibrit fotovoltaik hücrelerden kısaca bahsedilmiştir. Polimer fotovoltaik hücrelerden ise, Bölüm 5'te geniş bir yer verilen "Organik Fotovoltaik Hücreler" konusu içerisinde ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

4.3.3.1 Boya Duyarlı Fotovoltaik Hücreler

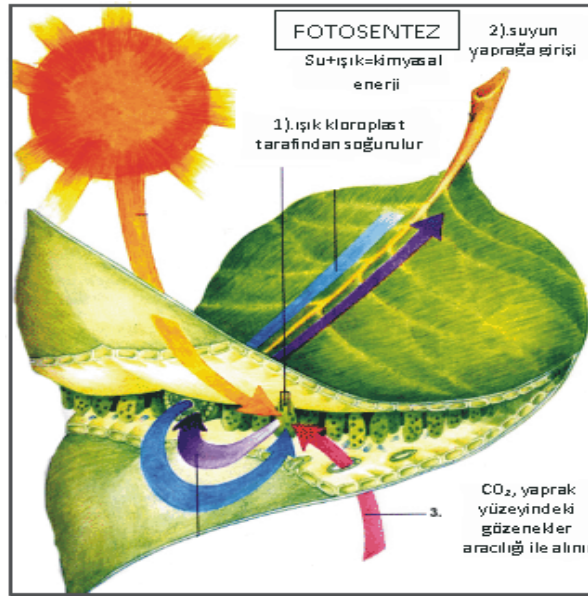
Boya ile duyarlı hale getirilmiş fotovoltaik hücreler, üçüncü nesil hücreler olarak adlandırılan ve bilindik fotovoltaik hücrelere alternatif olarak ortaya çıkan fotovoltaik hücreler grubuna dahildir. Mucidi Michael Gratzel'in anısına "Gratzel Hücreler"i olarak anılmaktadır. Bu tür fotovoltaik hücreler fotoelektrokimyasal piller olarak da adlandırılır.

İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü'nden Prof. Gratzel ve arkadaşları, 1970'lerin başından beri bitkilerin güneş ışığını elektron akışına dönüştürme yeteneğini taklit etmenin yollarını arıyordu. İlk çalışmalar hayal kırıklığı yarattı. Çünkü hücreler güneş enerjisini ancak % 0.01'lik bir verimle elektriğe dönüştürebiliyordu. Ama Graetzel ve arkadaşları, 1980'lerin sonlarına doğru klorofili daha etkili bir boyayla, yeni titanyum oksit biçimleriyle bir araya getirdi. Böylece dönüşüm verimi 100 kat arttı. Geleneksel silisyum hücre, artık sektörün tek hakimi değildi [49].

Böylece, 1991 yılında Michael Graetzel tarafından geliştirilmiş, günümüze kadar meydana gelen gelişmelerle %10 laboratuvar verimliliğine ulaşılmıştır. Mevcut silisyum esaslı p-n eklem tipi fotovoltaik hücrelerden farklı olarak, bitkilerde gözlenen

fotoelektrokimyasal mekanizmalarla çalışan boya duyarlı fotovoltaiik hücrelerin bu özelliği **yapay fotosentez** olarak adlandırılmaktadır [19]. Bu da güneş ışığından yararlanmak için doğanın taklit edildiğini göstermektedir. Hücre tasarımcıları, canlı organizmalara milyarlarca yıldır her tür hava koşullarında hizmet veren fotosentezi yenilenebilir enerjiye uyarlamaya çalışmaktadır.

Fotosentezin doğadaki birincil görevi, karbondioksit (CO_2) ve suyu (H_2O) karbohidratlara dönüştürmektir. Ama bitkiler bu dönüşümü gerçekleştirirken güneş ışığının enerjisini su moleküllerinden elektron koparmak için de kullanmaktadır. Böyle olunca elektronlar hareket etmekte ve hareket eden elektronlardan elektrik akımı ölçülebilmektedir [49].



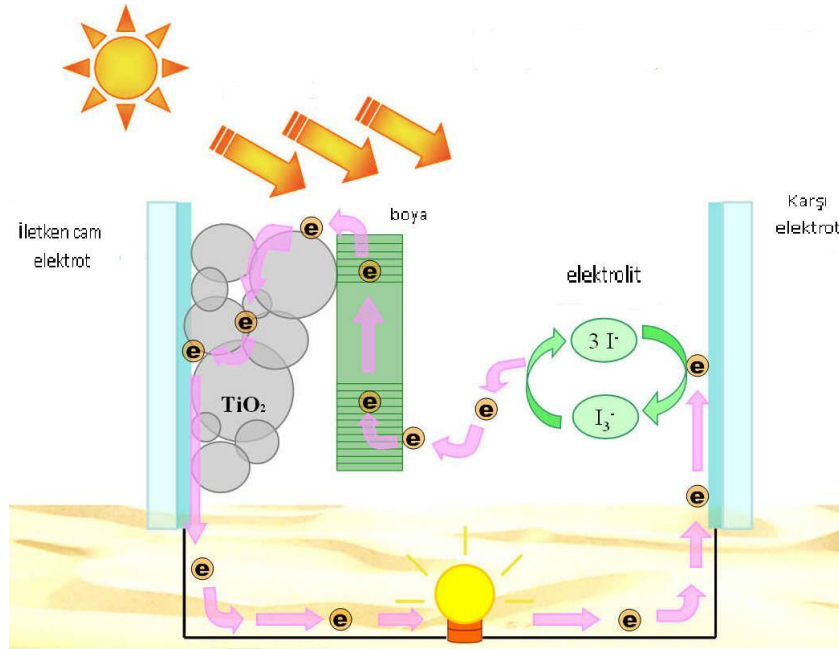
Şekil 4.14 Fotosentez [49]

Şekil 4.14'te bitkilerdeki fotosentez olayından bahsedilmektedir. Bitkilerdeki fotosentez olayı daha açık bir şekilde ifade edilecek olunursa; güneş ışığından gelen enerji, kloroplast içindeki klorofil tarafından emilir. Bu enerji hem su moleküllerinden elektron koparmak hem de onları karbondioksitle birleştirerek karbohidrat oluşturmak için kullanılır. Kök aracılığı ile yaprağa ulaşan su, fotosentezde gerçekleşecek kimyasal tepkimelere elektron sağlar. Atmosferdeki karbondioksit yaprak yüzeyindeki gözenekler aracılığı ile alınır. Yaprığın soğurduğu karbondioksitten sentezlenen karbohidratlar bitkinin geri kalanına aktarılır. Bitkiler, fotosentezi sadece serbest elektron yaratmak için değil, elektronları karbondioksitle birleştirip karbohidrat oluşturmak için de kullanırlar. Serbest elektron üretimi, fotovoltaiik hücre tasarımında da hayati önem

taşımaktadır. Bilim insanları yıllarca güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için fotosentezin bu kilit özelliğinden yararlanmaya çalışmıştır. Nihayet başarıya yaklaştıkları bugünlerde, ticari olarak anlamlı miktarlarda elektrik üretilebilecek ilk örneklerini tamamlamaya çalışmaktadırlar [49].

Şekil 4.15’de şematik olarak gösterilen boya duyarlı fotovoltaiik hücrenin çalışma prensibi dört aşamada açıklanabilir:

1. Güneş ışığından kaynaklanan fotonlar, geçirgen bir cam yardımı ile fotoaktivitesi yüksek boya moleküllerine çarparak onları uyarırlar. Uyarılan boya molekülleri; n tipi, nanoparçacıklı metal oksit katman (örneğin; TiO_2) tarafından çekilir.
2. Boya molekülleri bu tepkime sonucunda pozitif yüklü duruma geçer.
3. Elektrolit, pozitif yüklü duruma geçen boya moleküllerini tekrar nötr hallerine çevirir. Böylece boya molekülleri doğal hallerine geri dönerken elektrolit yükseltgenmiş olur.
4. Elektrolit tekrar katot yüzeyinde, elektronik devresinde kullanılan elektronlar ile indirgenir, böylece elektrik çevrimi tamamlanmış olur [19].



Şekil 4.15 Boya duyarlı fotovoltaiik hücre [50]

Tıpkı bitki yaprağı gibi, boyayla hassaslaştırılmış fotovoltaiik hücreler de güneş ışığını emer. Bu enerjiyi serbest elektronlar oluşturmak için kullanır. Elektronlar su yerine

yarıiletken TiO_2 katmandan elde edilir. Bu katmanın, farklı dalgaboylarında güneş ışınlarını soğurabilmesi için boyayla “hassaslaştırılmış” nanoparçacıklardan oluşması gerekir. TiO_2 'in soğurma aralığı UV bölgesinde olduğu için boya, TiO_2 'nin soğurma aralığını görünür bölgeye kaydırmaktadır. Böyle bir sistem üzerine ışık düşürüldüğünde boya uyarıldığında, bir elektron TiO_2 'nin iletim bandına geçer. Boyanın rejenerasyonu sıvı elektrolit tarafından sağlanmaktadır. Boyalı hassas yarıiletken TiO_2 katmandaki nanoparçacıklar güneş ışığına maruz kalınca elektron kaynağı haline gelir [49].

Her ne kadar bu tür fotovoltaik hücrelerin verimi %11'lere ulaşmışsa da elektrolit aşırı yıpratıcıdır, çabuk buharlaşabilir. Cam kırılabilir. Diğer elektrot olarak kullanılan platinyum oldukça pahalıdır. Sıvı elektrolitin yerine yarıiletken polimerler kullanılarak katıhal boya duyarlı fotovoltaik hücreler elde edilebilir. Yarıiletken polimerlerin, elektrolit gibi kolaylıkla TiO_2 gözeneklerine nüfuz edememesi ve polimerlerin yüksek molekül ağırlığına sahip olması dolayısıyla bunların da verimleri kısıtlıdır.

4.3.3.2 Hibrit Fotovoltaik Hücreler

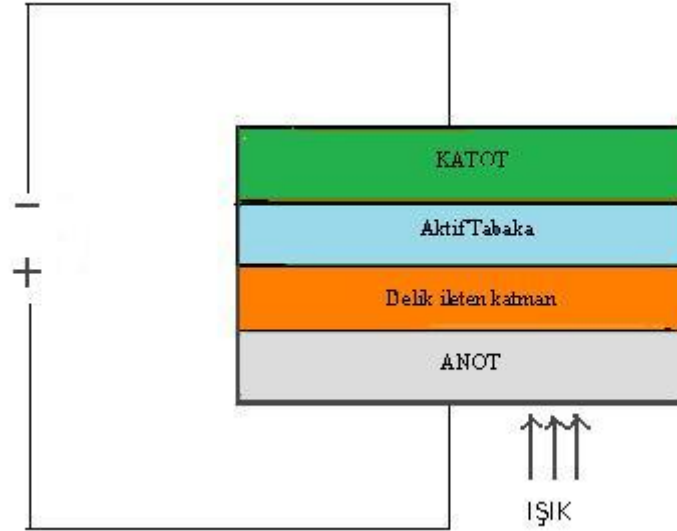
Fotovoltaik hücre teknolojileri sürekli olarak gelişmektedir. Boya duyarlı, polimer/fulleren hacim heteroeklemleri, ince filmler ve organik/inorganik hibrit fotovoltaik hücreler bu gelişmelerden birkaçıdır. Hibrit fotovoltaik hücreler, biri donör diğeri akseptör organik ve inorganik yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşur. Bir p-tipi polimer yarıiletken ve bir inorganik n-tipi malzemedan meydana gelirler.

Son yıllarda, n-tipi polimer veya fulleren ile kombine edilmiş p-tipi konjuge polimerler kullanılarak, çözelti işlemine dayanan hacim heteroeklemi birçok fotovoltaik hücre rapor edilmiştir. Alternatif olarak, konjuge polimerler n-tipi inorganik yarıiletken nanoparçacıklar ile kombine edilmiştir. Bu hibrit polimer/inorganik nanoparçacık hacim heteroeklemlerde, her iki tip malzemenin önemli özelliklerinden yararlanılabilir. Örneğin; polimer yarıiletken malzemenin çözelti işlemine tabi olması ve inorganik yarıiletken malzemenin de yüksek elektron mobilitesine sahip olması gibi özelliklerinden faydalanılabilir.

Şimdiye kadar; CdSe nanoparçacıklar, TiO_2 ve ZnO gibi malzemeler kullanılarak birçok hibrit polimer fotovoltaik hücre rapor edilmiştir. Yüksek akım ve dolgu faktörlü (FF) hibrit polimer fotovoltaik hücreler elde etmek için, hem elektron mobilitesi hem de delik mobilitesi optimize olmalı ve her şeyden önemlisi dengeli olmalıdır. Bu cihazların

verimlerindeki iyileşme, inorganik bileşen vasıtası ile elektron iletimindeki iyileşmede aranmalıdır.

Hacim heteroeklemine dayalı hibrit fotovoltaik hücrelerde donör ve akseptör, tek bir katmanda karıştırılır. Işık, donör malzemeden akseptör malzemeye doğru elektron transferine neden olur. Donör ve akseptör temasının olduğu her yerde aktif tabaka boyunca yük ayrımı meydana gelebilir.



Şekil 4.16 Hibrit fotovoltaik hücre devre tipi

Şekil 4.16'da, hibrit bir fotovoltaik hücre gösterilmiştir. Hibrit bir fotovoltaik hücre genel olarak ışığın geçişine izin veren saydam bir anota sahiptir. Geleneksel fotovoltaik hücreler, iletken malzemeden oluşan anottan gelen ışığın aktif tabakaya geçişine izin verir. Hibrit fotovoltaik hücreler, genellikle cam olan altlık hariç, en azından dört belli katmandan oluşur. Altlığın en üstünde anot tabakası serilidir. ITO, saydamlığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan anodik bir malzemedir. Ayrıca ITO kaplı cam altlıklar ticari olarak da uygundur. İletken polimer karışımı olan PEDOT:PSS katmanı, anot ve aktif tabaka arasına uygulanabilir. PEDOT:PSS tabakasının üzerinde, ışığın soğurulmasından ve yük ayrımından sorumlu tutulan aktif tabaka biriktirilir. Aktif katman, donör ve akseptör olarak adlandırılan iki malzemenin birleşimidir. Polimerler sıradan bir donör; inorganik nanoparçacıklar ise sıradan bir akseptör gibi davranır. Aktif tabakanın üstüne kaplanan Al (Alüminyum), Ca (Kalsiyum), Ag (Gümüş) ve Au (Altın) malzemeler, genellikle kullanılan katot katmanlardır [51].

Bugüne kadar literatürde hibrit fotovoltaik hücreler üzerine yapılan çalışmalar, genellikle inorganik nanoparçacıklarla, yarıiletken polimerlerin hacim heteroeklemi prensibi kullanılarak bir araya getirilmesini içermektedir. İnorganik yarıiletkenler, kimyasal sentez yöntemleriyle nanoparçacıklar şeklinde üretilebilmektedir. Nanoparçacıkların boyutlarının istenilen ölçüde ayarlanabilmesi, soğurma aralıklarının da istenildiği gibi ayarlanabilmesi kolaylığını sağlar. Bu durumda, hibrit fotovoltaik hücrelerde, inorganik nanoparçacıkların boyutlarının ayarlanabilirliği avantajı ile yarıiletken polimerlerin film oluşturma özelliklerinin avantajları bir araya getirilmiş olunur [52].

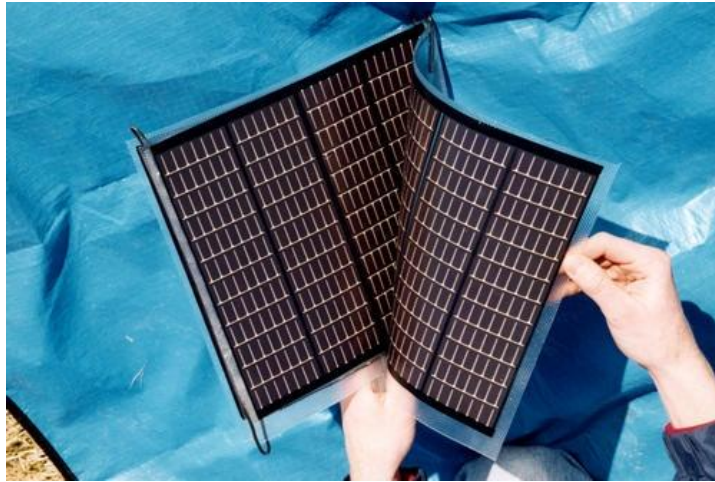
Hibrit fotovoltaik hücreler ile ilgili rapor edilen birçok çalışma göstermektedir ki; hibrit fotovoltaik hücrelerde donör olarak rol alan P3HT, P3OT, MDMO-PPV, MEH-PPV v.b. gibi polimer malzemeler arasında P3HT, en iyi donör malzeme olduğunu kanıtlamıştır. Akseptör olarak rol alan TiO_2 , ZnO, ZnS, CdS, Si nanoparçacıklar v.b. gibi inorganik malzemeler arasında ise TiO_2 , ZnS ve Si, en iyi akseptör malzemelerdir. En çok kullanılan katot malzemesi ise Al metalidir. Hibrit fotovoltaik hücrelerin verimi, polimer fotovoltaik hücrelere kıyasla daha düşüktür [51].

Üçüncü nesil fotovoltaik hücrelerin “organik fotovoltaik hücreler” genel başlığı altında toplandığından, Bölüm 4.3.3’de bahsedilmiştir. Bölüm 4’te ise üçüncü nesil fotovoltaik hücrelere dahil olan “boya duyarlı fotovoltaik hücreler” ve “hibrit fotovoltaik hücreler” den kısaca bahsedilmiştir. Üçüncü nesil fotovoltaik hücrelerin bir diğer üyesi olan ve bu tez çalışması için büyük bir önem teşkil eden “polimer fotovoltaik hücreler” konusundan ise “Organik Fotovoltaik Hücreler” genel başlıklı 5. Bölüm’de ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

ORGANİK FOTOVOLTAİK HÜCRELER

Güneş Enerjisi gezegenimizde en çok bulunan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bilinen en temiz ve sürekli enerji olması ve zararlı yan ürünler bırakmadan enerji üretimine olanak sağlamasına rağmen günümüzde kullanılan enerjinin sadece %0.04 'ü Güneş Enerjisinden elde edilmektedir. Çünkü şu an inorganik malzemelerle yapılan fotovoltaik hücreler kullanılarak elde edilen enerji, fosil yakıt kullanılarak elde edilen enerjiden çok daha pahalıdır. Ayrıca inorganik malzemelerle yapılan fotovoltaik hücreler esnek olmadığı için uygulama alanları da dardır.

İletken ve yüksek molekül ağırlığına sahip organik moleküller istenen özelliğe göre kolaylıkla değiştirilebilmeleri, pahalı olmamaları ve çözünürlükleri sayesinde, ayrıca birçok yüzeye uygulanabilmeleri gibi avantajları da olması nedeniyle verimli cihazların yapımında kullanılmaya en uygun adaylardır.



Şekil 5.1 Esnek yüzeye hazırlanmış organik fotovoltaik hücre

Yarıiletken polimerlerin kullanıldığı organik fotovoltaiik hücreler; Heeger, MacDiarmid ve Shirakawa'nın iletken polimerleri keşfinden ve geliştirmesinden sonra önemli bir araştırma konusu olmuştur. Güneş panellerinde inorganik malzemeler yerine organik malzemeler kullanılmasının sağladığı önemli üstünlükler, organik malzemelerin daha ucuz olması ve işlenebilirlikleri sayesinde çok farklı yüzeylerde kullanılabilmesidir. Ancak verimleri ve kararlılıkları inorganik malzemelerden daha azdır. İnorganik benzerlerinin çeşitliliği sınırlı iken organik moleküllerin sayısının milyonlar seviyesinde olması, bu malzemelerden elde edilecek verimin ve kararlılığın artırılmasına imkan verir. Bu nedenle organik malzemeler bu tip çalışmalar için çok ayrıntılı bir şekilde araştırılmaya başlanmıştır [19].

30 seneden fazla bir süredir organik fotovoltaiiklerin performansını arttırmak için çok büyük bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar küçük organik moleküllerin (pigmentler) kullanılmasıyla başlamıştır [53]. İlk organik fotovoltaiik hücre; Tang ve çalışma arkadaşları tarafından Kodak firmasında üretilmiştir. İki katmanlı, %1.1 verime sahip bu hücrede güneşten gelen enerji ile oluşan elektron-delik çiftinin ayrımı sadece katmanların arayüzeyinde gerçekleştiği için verimi düşük olmuştur [19]. Bu çalışmaları yarıiletken polimerlerin organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılması izledi. Konjuge polimer/fulleren fotovoltaiik hücre, çözünebilir poli (para-phenylenevinylene) (PPV) türevi olan MEH-PPV ve C₆₀ (buckminsterfulleren) arasında ışıkla uyarılmış elektron transferi varlığının keşfi ile doğdu. İlk iki katlı devreler güneş enerji dönüşüm prensiplerinin göstergesi olmuştur [54].

Yarıiletken polimerlerin kullanılması organik fotovoltaiik hücrelerde dikkate değer bir ilerleme olmasını sağladı. Avrupa'da ilk defa Johannes Kepler Üniversitesi Organik Fotovoltaiik Hücre Enstitüsü'nde (LIOS) Prof. Dr. N. Serdar Sarıçiftçi tarafından ITO/PEDOT:PSS/MDMO-PPV:PCBM(1:4)/LiF/Al sistemi ile %2,5 verim rapor edildi. Bu verim daha sonra %3,5'e kadar yükseltilmiştir [55].

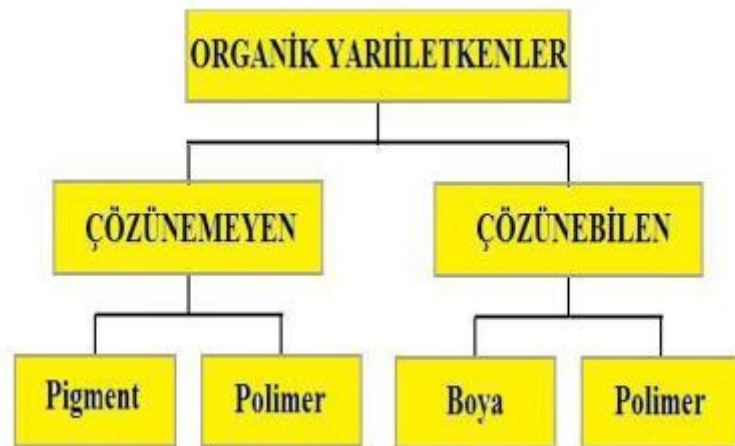
Genelde organik fotovoltaiik hücrelerde yaşam süresi uzun olan eksitonlar, fotoakımın oluşmasına katkıda bulunur. Bu problemi aşip ışığın aktif yüzeyde soğurulmasını arttırabilmek için 1990'ların başında "Hacim Heteroeklemi" adı verilen yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Hacim heteroeklemlili yapıların girişiyile birlikte organik fotovoltaiik hücrelerin kuantum verimi büyük bir oranda arttı. Bu sistemde, elektron verici ve elektron alıcı iki farklı malzeme, uygun bir çözücü sayesinde karışım halinde bulunmaktadır. Bu yöntem sayesinde gerekli olan yük ayrımı en yüksek seviyeye

çıkarılmıştır [19]. Son zamanlarda organik fotovoltaik hücrelerde literatürde kaydedilen en yüksek verim By Yongye Liang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (laboratuvar ortamında) %7.4 olarak ölçülmüştür [56].

Hala yetersiz kalsalar da farklı organik malzemeler kullanılarak üretilmiş, güç dönüşüm verimi %8 civarında olan hücrelerin üretildiği bilinmektedir. Ve iyileştirme çalışmaları da hız kesmeden devam etmektedir. Çünkü verim seviyesinin %10 'a kadar çıkmasının aslında hayal olmadığı ve sentezlenebilecek yeni elektron verici ve elektron alıcı malzemelerle Güneş Enerjisinden daha fazla ve çok daha ucuza faydalanılabileceği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle dünyanın ileri gelen araştırma grupları pek çok farklı polimerle verim artışı çalışmalarını sürdürmekte ve yeni polimerler üretmektedir [19].

5.1 Organik Fotovoltaikte Kullanılan Malzemeler

Organik fotovoltaik hücreler her ikisi de organik olan biri donör (elektron veren) diğeri akseptör (elektron alan) malzemelerin birleşiminden oluşmaktadır. Organik yarıiletken malzemelerin optik ve elektronik özellikleri konjuge sisteme bağlanacak fonksiyonel gruplar ile istenilen doğrultuda değiştirilebilmektedir. Bu özellikler, fotovoltaik hücre sistemlerinin çalışması için çok önemlidir. Organik fotovoltaik hücre ile ilgili mevcut çalışmalarda kullanılan malzemeler; iletken polimerler, boyalar, pigmentler ve sıvı kristalleri içermektedir [57].

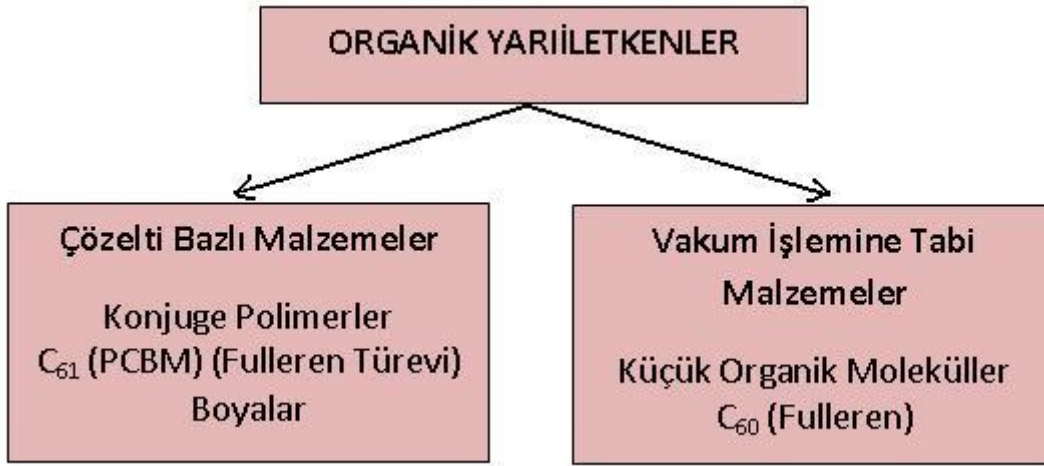


Şekil 5.2 Organik yarıiletkenlerin işlenebilme ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılması

Şekil 5.2’de organik yarıiletkenlerin işlenebilme ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılması gösterilmektedir. Ayrıca organik yarıiletkenler, birkaç tane tekrarlanan birim içeren (oligomer) veya hiç içermeyen moleküller (monomer) ve tekrarlanan birim

sayısı 10'dan fazla olan moleküller (polimer) olarak birbirlerinden ayrılırlar. Oligomerler ve monomerler ışığı soğuruyorlar ise kromofor olarak adlandırılırlar ve bunlara çözüner ise “boya”, çözümezler ise “pigment” denir [58].

Organik fotovoltaiik hücrelerde genellikle elektron verici malzeme olarak konjuge polimerler, elektron alıcı malzeme olarak ise fullerenler veya küçük organik moleküller kullanılır. Konjuge polimerler ve fullerenler üzerine yapılan fotofizik çalışmaları, konjuge polimerlerden fullerenlere ultra hızlı (femtosaniye mertebesinde) yük transferi olduğunu göstermektedir. İki malzeme türü (polimerler-küçük organik moleküller) arasındaki en önemli fark, ince film oluşturmak üzere geçirdikleri işlemlere bağıdır. Bu yüzden, organik fotovoltaiik malzemeler; çözeltili bazlı malzemeler ve vakum işleme tabi malzemeler olmak üzere ikiye ayrılırlar [52].

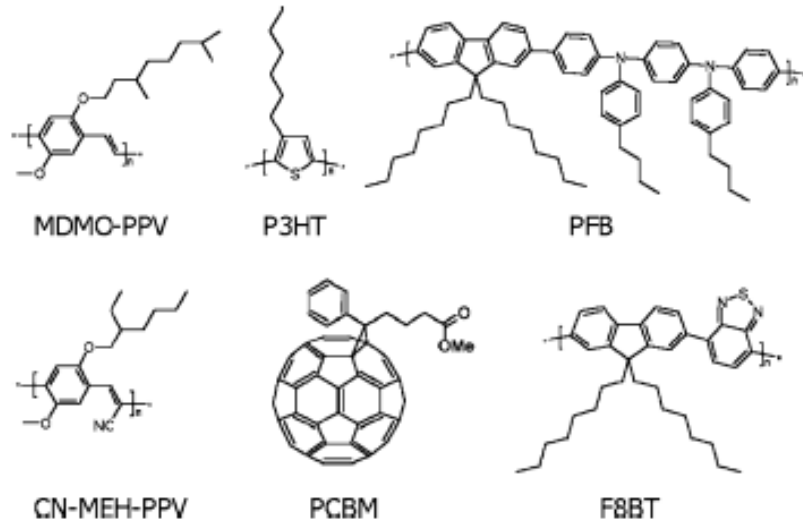


Şekil 5.3 Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan malzemeler

Şekil 5.3'te de bahsedildiği gibi organik elektronikte kullanılan malzemeler, işlem süreçlerine göre iki grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar; ıslak işleme tabi olanlar ve vakum işleme tabi olan organik yarıiletken malzemelerdir. Polimerler oldukça uzun zincirli makromoleküller olduğundan, onları buharlaştırmak mümkün değildir. Yüksek sıcaklık, ana zincirdeki bağların kırılarak polimerlerin bozulmasına sebep olabilir. Bu yüzden polimerler genellikle 1. gruba aittir. Yani ıslak işleme tabi malzemelerdendir. Bir organik molekülün ıslak işleme tabi olabilmesi için genel organik çözücülerde (klorobenzen, toluen, kloroform) çözünebiliyor olması gereklidir. Bu, her malzemenin çözünebilir olacağı anlamına gelmez. Bazı polimer malzemeler, organik çözücülerde çözünebilirken diğerleri çözünemeyebilir. Bir organik malzemenin çözünebilme özelliği daha sentez aşamasında ana zincire, uygun çözücülerle etkileşimi sağlayabilecek yan

zincirlerin eklenmesiyle kazandırılabilir [59]. Yan zincirler moleküle çözünürlük kazandırmak için veya molekülün çözünürlüğünü arttırmak için bağlanırlar. Yan zincirler molekülün çözünürlüğünü arttırmakla birlikte moleküllerin kümelenmesini de önlemektedirler. Dallanmış yan zincirler veya gruplar moleküllerin birbirleri ile etkileşimlerini önleyerek çözgen moleküllerinin, molekülü daha rahat sarmasını ve çözünmesini sağlamaktadırlar [60].

Şekil 5.4'te, organik fotovoltaiik hücrelerde sık sık kullanılan ve yan zincir çözünebilirliklerinden dolayı çözelti bazlı olan donör tipli polimerlerin en önemli üç temsilcisi gösterilmiştir. Bunlar; MDMO-PPV (poli[2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilviniylen), 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. Donör tipli bu polimerler, yine yan zincir çözünebilirliklerinden dolayı çözelti bazlı olan; CN-MEH-PPV (poli-[2-metoksi-5-(2'- etilhekziloksi)-1,4-(1-siyanovinilen)-fenilen) ve F8BT (poli(9,9'-dioktilfluorenekobenzotiadiazol) gibi akseptör polimerlerle ve PCBM (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6,6]C₆₁) olarak adlandırılan çözünebilir C₆₀ türevi ile birlikte Şekil 5.4'te gösterilmişlerdir [61].



Şekil 5.4 Konjuge polimerler ve bir C₆₀ türevi [62]

Vakum işlemine tabi tutulan küçük organik moleküller arasında Ftalosiyanın (phthalocyanine) ve Perilen (perylene), ince film organik fotovoltaiik hücrelerde önemli

uygulama alanları bulmuştur [63]. Ftalosiyanın, p-tipli yani elektron verici (donor) olarak çalışan delik ileten malzemelerdendir. Perilen ve onun türevleri ise n-tipli yani elektron alıcı (akseptör) olarak çalışan elektron ileten malzemelerdendir [64].

5.2 Fotovoltaik Hücre Üretiminde Kullanılan Organik ve İnorganik Yarıiletken Malzemeler Arasındaki Farklar

Konjuge polimerlerdeki yük iletim mekanizması inorganik yarıiletkenlerin yük iletim mekanizmasından daha komplekstir. Organik yarıiletkenler aşağıdaki önemli yönlerden inorganik yarıiletkenlerden ayrılırlar:

1. Organik fotovoltaik hücrelerde üretilmiş eksitonlar birbirine coulomb kuvveti ile bağlıdır ve kendiliğinden birbirinden ayrılmış yük haline gelmezler. Onları ayırıp serbest yük taşıyıcıları haline getirmek için genellikle güçlü elektrik alanlar gerekir. Bunun sebebi organik yarıiletkenlerin eksiton bağlanma enerjilerinin, inorganiklere kıyasla çok yüksek olmasıdır [65].
2. İnorganik yarıiletkenlerin eksitonları, amorf ya da düzensiz organik malzemelere nazaran büyük difüzyon uzunluğuna sahiptir [66].
3. Yük taşınması band içi taşınmadan ziyade düşük mobiliteye sebep olan, sıçrama (hopping) ile gerçekleşir. Bu nedenle inorganik yarıiletkenlere nazaran daha düşük yük taşıma mobilitelerine sahiptirler. Bu özellikleri, organik fotovoltaik hücre devre dizaynında ve verimlerini etkilemede büyük rol oynamıştır [67].
4. Organik yarıiletkenlerde soğurma aralıkları yüksektir. Her malzemenin, kimyasal yapılarına bağlı olarak soğurma aralıkları farklıdır. Yüksek soğurma katsayısına sahip olan bu malzemelerin soğurma katsayısı genellikle $>10^5 \text{cm}^{-1}$ 'dir. Soğurma katsayısının yüksek olması 100 nm'lik film kalınlıklarında bile organik yarıiletkenlerin yüksek soğurma göstermesini sağlamaktadır. Bu da düşük mobiliteden kaynaklanan dezavantajı dengeler.
5. Silisyum (1.1 eV) gibi bir inorganik yarıiletkenin enerji aralığı, pek hatta hiç değiştirilememektedir. Fakat organik yarıiletkenlerde ana zincir aynı kalmak üzere yan zinciri değiştirilerek bant aralığı, dolayısıyla soğurma aralığı değiştirilmiş olunur. Kullanılan organik moleküllerin soğurma aralığı 300 nm - 650 nm arasında değişmektedir. Sadece yan grup değiştirilerek soğurma maksimumu kayabilir ve

böylece fotovoltaik hücrelerde önemli olan güneş spektrumu ile malzemenin spektrumunu çakıştırma şartı sağlanmış olur [52].

6. Kimyasal sentez aracılığı ile üzerlerinde farklı modifikasyonlara gitmek oldukça kolaydır. Bu kimyasal esneklikleri; düşük maliyet, hafiflik ve esneklik, büyük alanlarda uygulama kolaylığı ile birleşince bu alanda akademik ve endüstriyel alanda çalışmalar yapılması çok cazip hale gelmiştir. Bu özellikler organik fotovoltaik hücrelerin özellikle taşınabilir malzeme yapımında faydalı olmasını sağlar. Örneğin, cep telefonları, taşınabilir bilgisayarlar, radyolar, taşınabilir lambalar, oyuncaklar için pil şarjlarında kullanılabilirler [68].

5.3 Organik Fotovoltaik Malzemelerde Soğurma

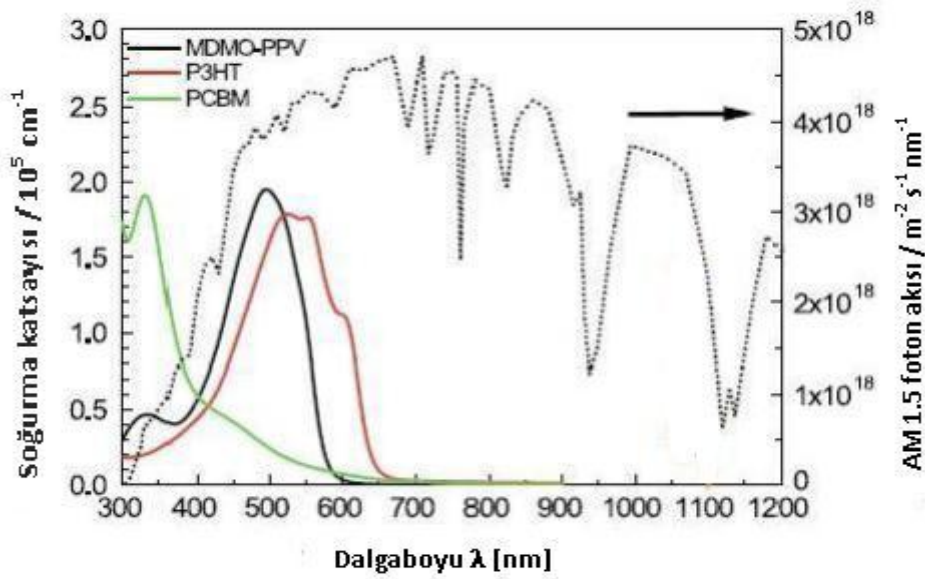
Güneş enerjisinden elektrik elde etmenin ilk adımı fotovoltaik hücreler tarafından fotonun soğurulmasıdır. Organik fotovoltaik hücreler, doğadaki fotosentezin taklidinden başka bir şey değildir. Bitkiler ışık enerjisini kimyasal enerjiye çevirmek için doğal bir işlem olan fotosentez yapmaktadırlar. Işığın ilk olarak, bitkilerdeki klorofil pigmenti tarafından soğurulmasıyla fotosentez işleminin ilk basamağı gerçekleştirilmiş olur. Fotovoltaik hücrelerde de buna benzer olarak ilk adım, ışığın fotovoltaik hücredeki aktif tabaka tarafından soğurulmasıdır [69].

Bir enerji dönüşüm cihazında verimlilik çok önemlidir. Her şeyden önce uyarımlar oluşturmakta kullanılan fotonları, aktif tabakanın mümkün olduğu kadar yutması gerekmektedir. Dünyaya gelen güneş ışığının %77' sinin soğurulabilmesi için 1.1 eV bant aralığı gereklidir. Konjuge polimerlerin ise büyük bir kısmının bant aralığı 1.9 eV ve üzeridir. Dolayısıyla yalnızca 650 nm'den daha az dalgaboyuna sahip fotonları soğururlar. Bu nedenle güneş ışığının sadece %30'u soğurulabilir [70]. Bu durumda elde edilen fotovoltaik hücreler verimli olmayacağından dolayı, güneş ışığı kullanımından daha iyi yararlanabilmek için bazı yollar denenmiştir. Örneğin; gelen güneş ışığının sadece küçük bir kısmının P3HT:PCBM filmi tarafından soğurulması sorununu halletmek için yaklaşık 100 nm kalınlığındaki filmin kalınlığı arttırılmıştır. Bu yol soğurulan foton miktarının artmasını sağlamış fakat yük taşıyıcı mobilitesini azaltmış ve hücrenin seri direncini arttırmıştır. Bu yüzden bu çözüm, pek de cazip bir çözüm değildir [53].

O halde, güneş ışığının kullanımından yararlanmayı daha iyi bir düzeye getirmek için düşük bant aralıklarına sahip malzemeleri geliştirmeye ihtiyaç vardır. Daha verimli

fotovoltaik hücre elde edebilmek için, 600-800 nm dalgaboyuna sahip güneş ışığını soğurabilen malzemeler geliştirmek caziptir [71].

Bu konuda asıl umut vaat eden araştırmalar, gelen ışığın daha yüksek bir oranının hücre içerisine girebildiği ve aynı zamanda içeride daha çok kalabileceği malzeme ve yöntemler üzerinde yapılmaktadır. Bu yüzden güneş spektrumuyla daha fazla çakışma sağlayabilen, düşük bant aralığına sahip polimerlerin kullanıldığı organik fotovoltaik hücreler, son yıllarda dikkatleri üstünde toplamıştır. Şekil 5.5’de fotovoltaik hücrelerde kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi 1.5 AM olan doğal güneş spektrumunun kıyaslaması gösterilmiştir [72].



Şekil 5.5 Genel olarak kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi (Air Mass/AM) 1.5 doğal güneş spektrumunun kıyaslaması [72]

Şekil 5.5’de, donör tipli ve akseptör tipli malzemelerde enerji dönüşümüne katılan güneş ışığı kesrini gösterebilmek için bazı malzemelerin soğurma katsayıları, hava kütlesi (AM) 1.5 standart güneş spektrumuna kıyasla gösterilmiştir.

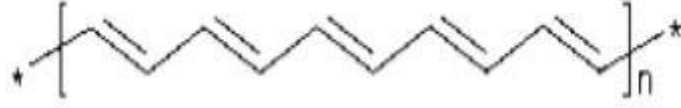
Organik malzemenin soğurma spektrumu, fotovoltaik hücrenin ışığa hangi spektral aralıkta karşılık vereceğinin bir ölçüsüdür. Bu da polimerin ya da molekülün kimyasal yapısına bağlıdır. Birçok boya ve molekül kuvvetli soğurucudur. Eğer malzemenin bant aralığı içerisindeyse, sadece birkaç yüz nanometre film, ışığın önemli bir kısmını soğurmaya yeterlidir. Soğurma verimliliği malzemenin soğurma spektrumuna, kalınlığına ve devre tipine bağlıdır [52].

5.4 Konjuge Polimerler

Yıllarca polimerler, metallere zıddı olarak bilindi. Onların yalıtkan olduğu ve bu sebepten dolayı da elektrik iletmediklerine inanıldı. Elektrik telleri, canlıları korumak için çok iyi derecede yalıtkan olduğu bilinen polimerlerle kaplandı. Polimerlerin yalıtkan olma özellikleri elektronik teknolojisinde çok yaygın olarak kullanıldı. Fakat Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid ve Hideki Shirakawa 1977'de polimerlere bakışı, yaptıkları büyük keşifle değiştirdiler. Onların keşfine göre yine bir polimer olan poliasetilen neredeyse bir metal kadar iletken hale getirilmiştir. Bu bilim adamları devrim niteliğindeki bu buluşları ve polimerlerle ilgili sonraki çalışmalarından dolayı Nobel 2000 kimya ödülüne layık görülmüşlerdir [53]. Poliasetilen; Shirakawa ve arkadaşları tarafından 1974'te asetilenden gümüş renkli, parlak görünümlü bir film hazırlayana kadar siyah bir toz olarak bilinirdi. Fakat o metalik görünümüne rağmen henüz bir iletken değildi. Bununla birlikte, 1977'de, Shirakawa, MacDiarmid ve Heeger; klor (Cl), brom (Br) veya iyot (I) buharı ile yükseltgenme yaptırdıkları polimer filmlerinin, orjinal hallerinden, 10^9 kez daha iletken olduklarını buldular [73]. Yükseltgenen Poliasetilen filmlerin iletkenliğinin 10^6 S/m düzeyine çıktığı gözlemlendi. Bu değer yalıtkan karakterli teflonun iletkenlik değerinden (10^{-18} S/m) çok yüksektir ve gümüş, bakır gibi metallere iletkenlik değerine (10^6 S/m) yakındır [59].

5.4.1 Konjuge Polimerlerin İletkenliği

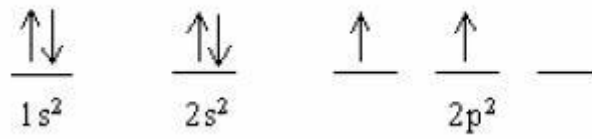
İletken polimer kavramı, elektriği kendi örgüsü içerisindeki elektronlar üzerinden (elektronik iletkenlik) yeterli düzeyde iletebilen polimerler için kullanılır. Polimerlerin kendilerinin elektronik iletkenlik gösterebilmesi için polimer örgüsünde elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerler bulunmalıdır. Bu koşulu ana zincirinde konjuge bağlar bulunan polimerler sağlayabilir. Bu nedenle, konjuge bağ yapısı polimerlerde elektriksel iletkenlik için aranan ilk koşuldur [74]. Konjuge polimerler, birbirlerine, ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, tekrarlanan gruptan oluşmuş uzun zincirli yapılardır. Yani konjugasyon, karbon atomlarının özel diziliminden kaynaklanır ve en basit örneği Poliasetilen'dir (Şekil 5.6). Basit yapısı nedeniyle, iletken polimerlerin band yapısını anlamak için basit bir malzeme olan poliasetilen göz önünde bulundurulur. Poliasetilen, sp^2 hibritizasyonuna uğramış C atomlarının basit bir zinciridir.



Şekil 5.6 Poliasetilen zinciri

Konjuge çift bağ, karbon atomunun ardışık tek ve çift bağları ile birbirlerine bağlandığı bir yapıdır. Konjuge yapıdaki tek bağlar sigma (σ) bağlarıdır, sağlam olan bu bağlarda elektronlar lokalize olmuştur. Yani zincir boyunca hareket yetenekleri yoktur ve yerleri bellidir. Çift bağlar ise bir sigma (σ) ve bir pi (π) bağından oluşur. π bağında elektron lokalizasyonu σ bağına göre daha zayıftır, ancak bu zayıflık polimeri yeterince iletken yapmaya yetmez. Konjuge yapıdaki polimerler, belli düzeyde iletkenlik gösterebilirler de, iletkenlik değerleri metallerdeki iletkenlik düzeyinden çok uzaktır. Yüksek elektriksel iletkenlik için konjugasyonun yanı sıra, polimer zinciri üzerinde serbest şekilde hareket edebilen yük taşıyıcıları da oluşturulması gerekir [53].

Polimerler, yüksek molekül ağırlıklı ve ana zinciri karbon atomlarından oluşmuş organik bileşiklerdir. Konjuge polimerlerin iletkenliğini daha iyi anlamak için, polimerin ana zincirini oluşturan C (Karbon) atomunun bağ yapma mekanizmasının incelenmesi gerekmektedir. Şekil 5.7'de elektronik konfigürasyonu verilmiş C atomunun 6 elektrona sahip olduğu görülmektedir. Değerlik elektron sayısı ise 4'tür (2 tane 2s ve 2 tane 2p elektronları).

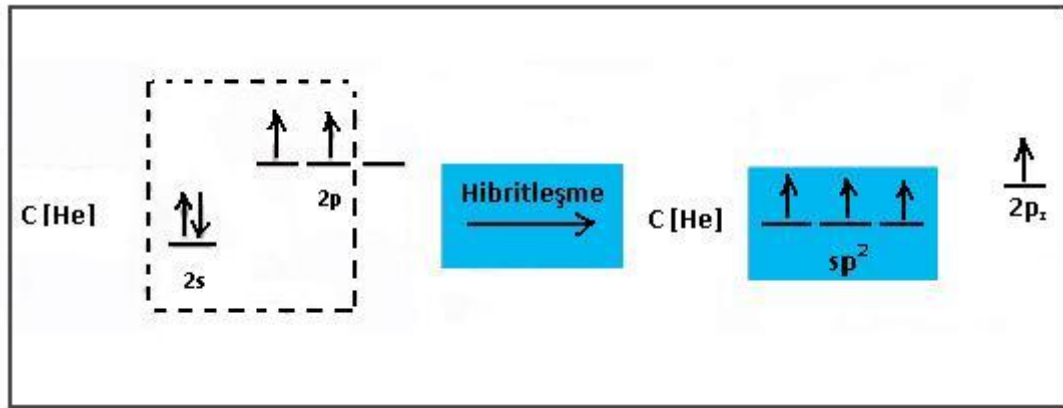


Şekil 5.7 C atomu için temel enerji seviyeleri

Bir atomun bağ yapabilmesi, en dış kabuğundaki elektronlarla yani değerlik elektronlar ile ilgilidir. Burada 1s orbitali çekirdeğe yakın olan iç kısımda kaldığından, bu orbitaldeki elektronlar bağ oluşumunda yer almazlar. 2p orbitalindeki elektronlar çiftlenmemiş (yarı dolu) durumdadır. C atomunun 2 bağ yapabileceği görülür. Bağ yaparken atomlar daha kararlı hale geçtiğine göre C atomu da ikiden daha fazla bağ yapmak için 2s orbitallerindeki elektronlarını 2p'deki boş enerji seviyelerine geçirerek kullanabilir. Bu da çeşitli konfigürasyonlarda bağlanma orbitallerinin oluşmasına sebep

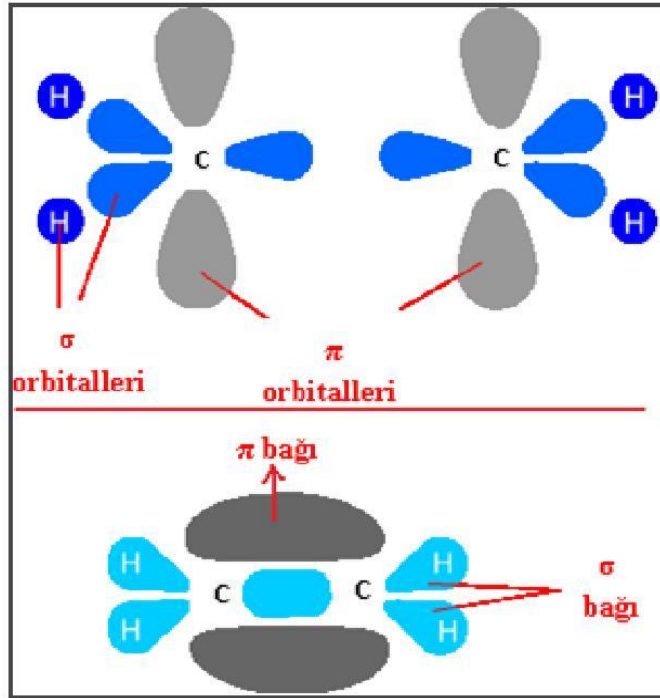
olur. Sonuçta kovalent bağlar meydana gelir. Orbitalerin bir araya gelmesiyle ise hibritleşme meydana gelir. Bir elektronun başka bir orbitale geçerek enerjileri birbiriyle aynı olan elektronlar haline gelmelerine **hibritleşme** denir. Bunun sonucu oluşan yeni enerji orbitallerine de hibrit orbitalleri denir. C atomları sp^3 , sp^2 ve sp hibritleşmeleri yaparlar. Eğer bir s elektronu p orbitaline geçer ve 4 tane eş enerjili elektron haline gelirlerse bu hibritleşme sp^3 hibritleşmesi olur. Eğer elektronların birisi p orbitalinde sabit kalıyor ve diğer üçü eşit enerji seviyeli yeni bir orbitale yerleşiyorsa bu da sp^2 hibritleşmesi olur. Sadece iki elektron eşit enerjili orbitale yerleşirse sp hibritleşmesi olur.

Organik yarıiletken malzemelerin elektrik akımını taşımaları ve güneş spektrumunun UV-görünür bölgesinde ışık soğurma potansiyeli, karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesi yapmasından ileri gelir. Konjuge polimerler sp^2 hibritizasyonuna sahiptir [75]. Şekil 5.8'de, C atomunun sp^2 hibritleşmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8 sp^2 hibritleşmesinin şematik olarak gösterimi [58]

Daha önce de bahsedildiği gibi, C-C çift bağı iki kısımdan meydana gelmiştir. Bunlar; her bir karbon atomundaki sp^2 orbitallerinin kafa-kafaya örtüşmesi ile oluşan polimer omurgasındaki **sigma** (σ) bağı ve her bir karbon atomundaki p orbitallerinin yan yana örtüşmesi ile oluşan **pi** (π) bağıdır. Yani hibritleşme sonucu oluşan bağ σ bağıdır. Hibritleşmeye uğramayan p_z orbitalindeki elektronlar ise komşu p_z elektronları ile π bağı kurarlar. Bu da zincir boyunca geniş π sistemine sebep olur. Bu durum, konjuge polimerlere has bir özelliktir. [75]. Şekil 5.9'da σ ve π bağlarının oluşumu gösterilmektedir.



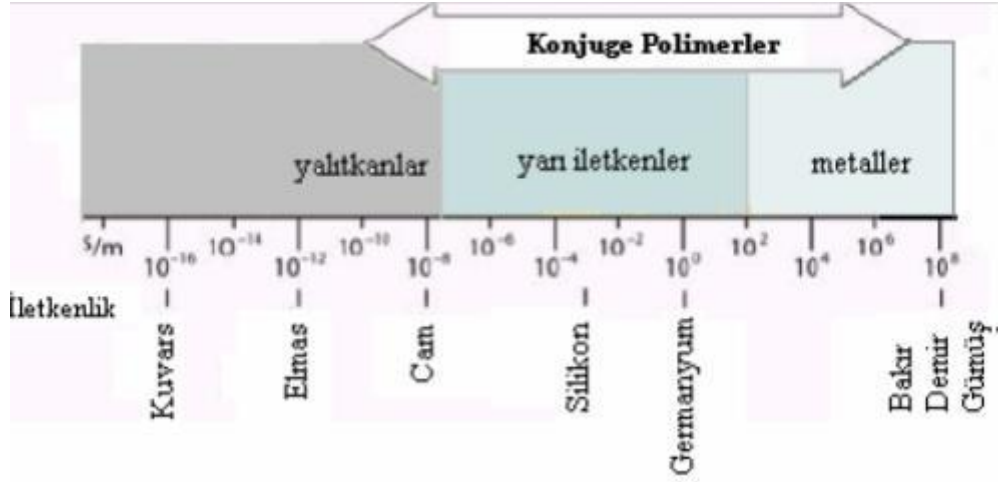
Şekil 5.9 Etilen (C₂H₄)’de sp² hibritleşmesi sonucunda oluşan σ ve π bağları

Doğadaki her şey iç enerjilerini minimum yapacak şekilde düzenlenir. Sp² hibritleşmesi yapmış karbon atomlarının lineer zincirdeki elektronları da temel seviye enerjisini azaltmaya çalışır. Bunun sonucunda π orbitali ikiye ayrılarak π-π* orbitallerini oluşturur. Dolu π orbitali HOMO (değerlik bandı) ve boş π* orbitali LUMO (iletim bandı) olarak adlandırılır. Başka bir deyişle; HOMO, vericinin (donor) en yüksek işgal edilen moleküler orbital seviyesidir. LUMO, alıcının (akseptör) işgal edilmemiş en düşük moleküler orbital seviyesidir. Arada bir bant aralığı vardır. Bu yapı, inorganik yarıiletkenlerinkine benzer bir yapı göstermektedir [50]. Tüm uyarılmalar, π-π* arasında gerçekleşir.

Yukarıda anlatılanlar özetlenecek olursa; iletken polimer kavramı, elektriği kendi örgüsü içerisindeki elektronlar üzerinden yeterli düzeyde iletebilen polimerler için kullanılır. Polimerlerin kendilerinin elektronik iletkenlik gösterebilmesi için, polimer örgüsünde elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerler bulunmalıdır. Bu koşulu ana zincirinde konjuge bağlar bulunan polimerler sağlayabilir. Bu nedenle, konjuge bağ yapısı polimerlerde elektriksel iletkenlik için aranan ilk koşuldur [74].

Konjuge yapıdaki polimerler, belli düzeyde iletkenlik gösterebilirler de, iletkenlik değerleri metallerdeki iletkenlik düzeyinden çok uzaktır. Polimerlerin elektriksel iletkenliği için ikinci aranan koşul olan katkılama ile bir konjuge polimerin elektriksel iletkenliği,

yalıtkan veya yarıiletkenlik değerlerinden (10^{-8} - 10^{-3} S/m), metalik iletkenlik değerlerine (10^2 - 10^6 S/m) kadar arttırılabilir (Şekil 5.10) [53].



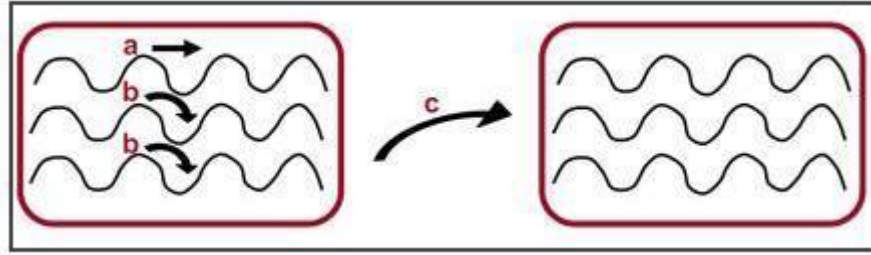
Şekil 5.10 Konjuge polimerlerin iletkenlik aralığı [53]

Birçok organik malzemenin optik bant genişliği 2 eV civarında olduğundan, asal yük taşıyıcı konsantrasyonları oldukça düşüktür. Optik bant genişliğinin büyük olması, yüksek düzeyde iletkenliğe engel olmaktadır. Yük taşıyıcı mobiliteleri de oldukça düşüktür. Yüksek elektriksel iletkenlik için konjugasyonun yanı sıra, polimer zinciri üzerinde serbest şekilde hareket edebilen yük taşıyıcıları da oluşturulması gerekir. Katkılama işlemi, genellikle polimer zincirinin kimyasal yapısını değiştirmeyen bir işlemdir.

Yük taşıyıcıları iki yöntemle oluşturulur. Yöntemlerden biri, polimerden elektron alarak polimeri yükseltmek, diğeri ise polimere elektron vererek polimeri indirgemektir. Her iki yaklaşım da **katkılandırma (doplama)** adı ile bilinir. Yani konjuge polimerler uygun katkılandırma (doplama) ile p-tipi polimer ve n-tipi polimer olmak üzere daha iletken hale getirilebilmektedirler. Fakat buradaki katkılandırma, inorganik yarıiletkenlerdeki katkılamadan oldukça farklıdır. Donor tipli malzemeler oksijene veya iyodin gibi diğer katkı etkilerine maruz kaldıkları zaman katkılama etkisi gösterirler. N tipli katkılamaya örnek ise, perilenin hidrojene maruz bırakılarak katkılanmasıdır [76]. Katkılama etkilerinden dolayı önceden oldukça yalıtkan olan malzemeler serbest yük taşıyıcılarına sahip olabilirler. P-tipi malzeme elektronu alınmış ve π orbitallerinde pozitif boşluk bırakılmış malzemedir. Bu boşluk, komşu molekülden zıplayan π elektronları ile doldurulabilmektedir [60]. Bu işlemler ard arda zincir boyunca yinelenerek elektron taşınır ve elektrik iletilir. İletkenlik, sadece zincir boyunca yük

taşımasının bir sonucu değildir. Şekil 5.11’de de gösterildiği gibi, polimer zincirinde elektronik yükün hareketi üç şekilde olmaktadır:

- Kristal bir yapıda zincir üzerinde
- Kristal bir yapıda zincirden zincire
- Amorf bir bölgede zincirden zincire

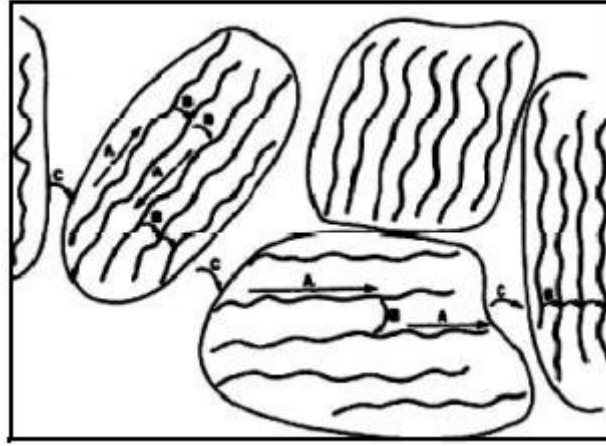


Şekil 5.11 a) Zincir üzerinde yükün taşınması b) zincirler arasında yükün taşınması c) partiküller arasında yükün taşınmasının gösterimi [58]

Elektronlar, aynı zincir boyunca taşınarak hareket ettikleri gibi, bir zincirden diğerine ise sıçrama yolu ile de hareket ederler. Yani polimer zincirleri arasındaki iletim bir zincirdeki elektronun, bir başka zincirdeki artı yük boşluğuna atlaması veya sıçraması (hopping) ile sağlanır. Polimerler genellikle amorf yapıya malzemelerdir ve bant yapısından dolayı burada **sıçrama (hopping)** vardır. Bu yüzden mobiliteler diğer malzemelere göre biraz düşer. Mobilite, yük taşınımını karakterize eden anahtar nicelikdir. Birim elektrik alanda sürüklenme hızı olarak tanımlanır. En iyi durumda bile organik yarıiletkenlerin mobiliteleri inorganik fotovoltaiik malzemelerin yük taşıyıcı mobilitelerinden 10-20 kat daha düşüktür [74].

Organik malzemelerde iletme tekrar dönülecek olunursa daha açık bir şekilde şöyle açıklanabilir: Yük taşıma mekanizmasını açıklayan çeşitli modellemeler mevcuttur. Bu modeller arasında bant tipi taşıma ve sıçrama (hopping) mekanizması önemlidir. Organik yarıiletkenler gibi pek çok sistem için hangi tip taşıma olduğunu belirlemek kolay değildir. Çok yüksek olmayan sıcaklıklarda oldukça saf moleküler kristallerde, bant tipi taşıma mevcuttur. Organik kristallerde; düşük sıcaklıklarda bant taşımasının baskın olduğu, oda sıcaklığında ise sıçrama mekanizmasının baskın olduğu gösterilmiştir [77]. Bant tipi taşımanın karakteristik bir özelliği olarak sıcaklık bağımlılığı, düşük sıcaklıklara indikçe etkisini gösterir. Biraz sıcaklıkla beraber amorf yapılar arasına sıkışmış kristal yapılar oluşur. Ama tam kristal oluşmaz [78]. Amorf

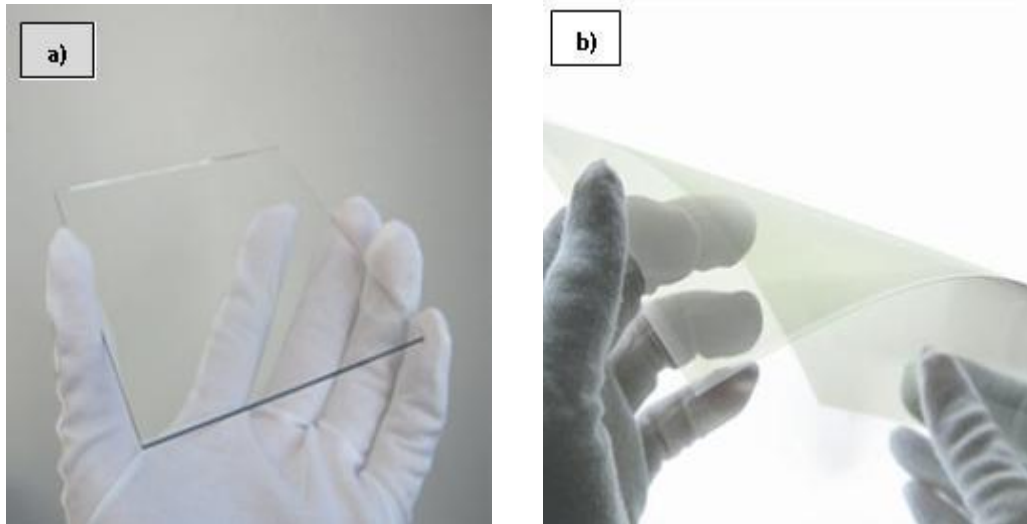
organik katılarda sıçrama tipli taşıma daha ağır basar. Şekil 5.12’de konjuge polimerlerde yük taşıyıcılarının transferi görülmektedir.



Şekil 5.12 Konjuge polimerlerde yük taşıyıcılarının transferi [142]

5.5 Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Malzemelerin Kaplandığı Altlıklar

Organik fotovoltaikte kullanılan tüm malzemeler, uygun kaplama teknikleri kullanılarak uygun altlıklar üzerine kaplanırlar. Organik elektronikte iki tür altlık ya da taşıyıcı malzeme kullanılmaktadır. Bunlardan birisi cam, diğeri ise esnek altlıklardır. Esnek altlıklar; polietilen tereftalat (PET) ya da polietilen naftalat (PEN) malzemelerden üretilmektedir.



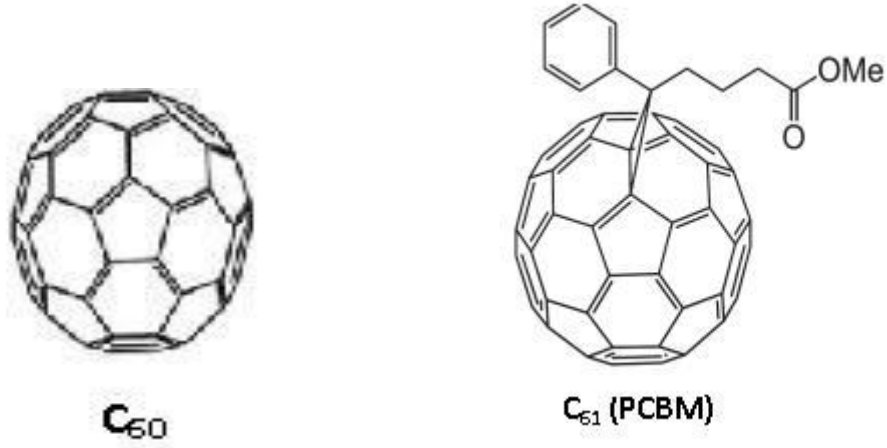
Şekil 5.13 a) ITO kaplı cam b) esnek altlık

Elektronik endüstrisinde kullanılabilmeleri için bu altlıklar üzerine, organik aktif tabakayı oluşturan malzemeler dışında, indiyum kalay oksit (ITO) veya florin katkılı kalay oksit (FTO) kaplanmaktadır. Bu iki malzemenin tercih edilme sebebi, saydam ve iletken olması ile az rastlanan nadir metallere oluşmasındandır. Bu saydam elektrotlar, ışığın geçmesine izin verir. ITO, bilinen en saydam ve metalik iletkenidir. Direnci $12\Omega/\text{cm}^2$ - $18\Omega/\text{cm}^2$ 'dir. Sıcaklıkla direnci artar. Bu da fotovoltaik hücreler için bir dezavantajdır. Bu yüzden yüksek sıcaklık uygulamalarında ITO'nun yerine FTO kullanılması daha uygun olacaktır.

ITO altlıklar aşındırma işlemi (etching) kullanılarak yapılandırılabilir. Etching yapılma nedeni; aradaki filmin kalınlığı yeterli olmadığı için ITO ve kontak teması sonucu oluşacak kısa devreye mani olmaya çalışmaktır. Aşındırma işleminden sonra ITO kaplı altlık üzerine polistren sulfonik asit (PSS) kaplanmış polietilen dioksitiyofen (PEDOT:PSS) kaplanır. PEDOT:PSS, ITO yüzeyinin yüzey kalitesini artırır ve aynı zamanda delik enjeksiyonunu kolaylaştırır. Bundan sonraki aşamalarda organik yarıiletkenler uygun çözücüler içerisinde çözülerek PEDOT:PSS üzerine kaplanabilir. En son aşama ise diğer metal kontakın buharlaştırma işlemidir [42].

5.6 Hazırlama Teknikleri

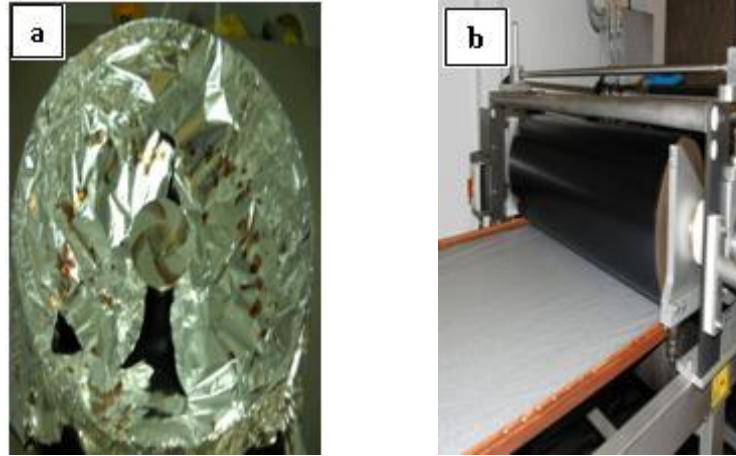
Organik malzemelerden ince film üretimi için en çok başvurulan iki metod olan buharlaştırma ve çözelti işlemi teknikleri ince film üretiminde kullanılan malzemenin tamamlayıcısı niteliğindedir. Yani ince film üretimi için başvurulacak işlemler, kullanılan malzemenin özelliğine göre değişir. Buharlaştırma tekniğini kullanabilmek için maddenin termal kararlılığı gerekiyken, çözelti işlemi uygulayabilmek için malzemenin çözünebilir olması gerekir. Küçük moleküller, termal olarak polimerlerden daha karardır, fakat küçük moleküllerin konjuge polimerlere göre çözünürlükleri daha azdır. Polimerlerin çözünebilir olması da yan zincir çözünebilirliğine bağlıdır. Polimerler çok yüksek sıcaklıklar altında ayrıştıkları için ve çok büyük molar kütleye sahip oldukları için, bunlar üzerine buharlaştırma tekniği uygulamak doğru bir yöntem değildir. Bu nedenle, küçük moleküller için buharlaştırma en iyi seçimken, yarıiletken polimerler genellikle çözelti işlemi görmektedir. Bununla birlikte, C_{60} gibi çözünemeyen moleküller çözünürlüğü yüksek gruplar yardımıyla çözünebilir hale getirilebilirken (PCBM v.b.) (Şekil 5.14), kısa polimerler ve oligomerler de buharlaştırılabilirler [79].



Şekil 5.14 C₆₀ ve C₆₁'in moleküler yapısı

5.6.1 Islak İşlem Tekniği

Tüm ıslak işlem tekniklerinin ortak noktası; uygun çözücüler içerisinde organik maddelerin çözünmesidir. Dönel kaplama (spin coating), bıçak ağzı ile kaplama (doctor blading), püskürtmeli kaplama (inkjet printing), daldırma (deep coating) ve daha birçok ıslak işlem tekniği, organik fotovoltaik hücre teknolojisinde sıkça kullanılan tekniklerdir.



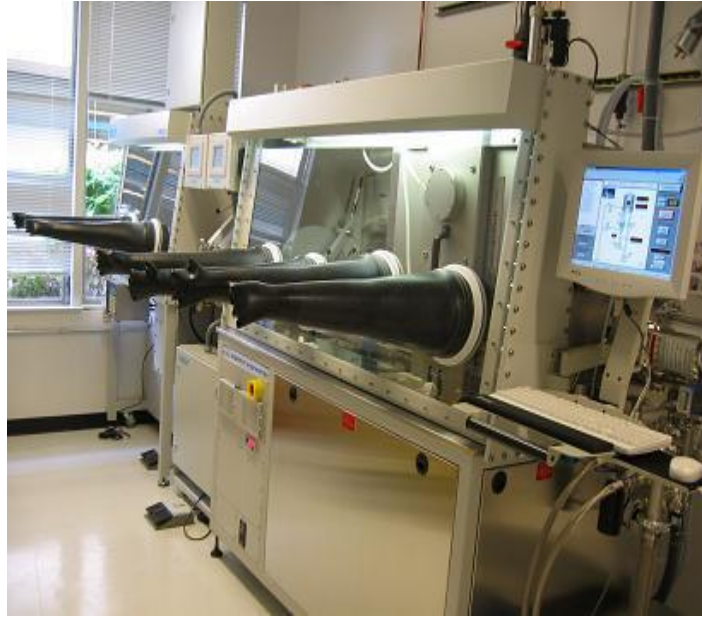
Şekil 5.15 a) Dönel kaplama b) bıçak ağzı ile kaplama sistemleri

Şekil 5.15'de gösterilen ıslak işlem teknikleri, polimer/polimer veya polimer/molekül karışımlarının çözücülerden doğrudan işlenmesinde kullanılan genel tekniklerin birkaçıdır. Dönel kaplama tekniği için kullanılan makine “spin coater” olarak adlandırılır. Bu teknik, küçük yüzeyleri kaplamak için uygun bir yöntemdir. Altlık (substrat), üzeri ince film kaplanmak üzere spin coater içerisinde düz bir tabla üzerine konulur. Üzerine, kaplanması istenen sıvı malzeme damlatılır. Bu tabla, merkezci kuvvet etkisi altında

hızla döner. Altlık bu dönme sırasında, altından uygulanan vakum sayesinde tabladan fırlamaz. Böylece ince film kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur.

5.6.2 Buharlaştırma Yöntemi

Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan ve çözünemeyen küçük organik moleküller ise vakum işlemine tabi malzemelerdir. Genellikle buharlaştırma tekniği kullanılarak film oluştururlar. İnce film üretimi için çok kullanılan iki metot olan buharlaştırma ya da çözelti işlemi tekniklerinden hangisinin seçileceği kullanılacak malzemenin özelliğine göre değişir. Örneğin, buharlaştırma yöntemi için maddenin termal kararlılık göstermesi gerekliyken, çözelti işlemi için kullanılacak maddenin de çözünabilir olması gerekmektedir. Küçük moleküller termal olarak polimerlerden daha kararlı olmasına rağmen, daha az çözünürlüğe sahiptir. Polimerler çok yüksek sıcaklık altında ayrışır ve buharlaşma için çok büyük molar kütleyle sahiptirler. Bu nedenle, küçük moleküller için buharlaştırma en iyi seçimken, yarıiletken polimerler genel olarak çözültiden işlem görmektedir.



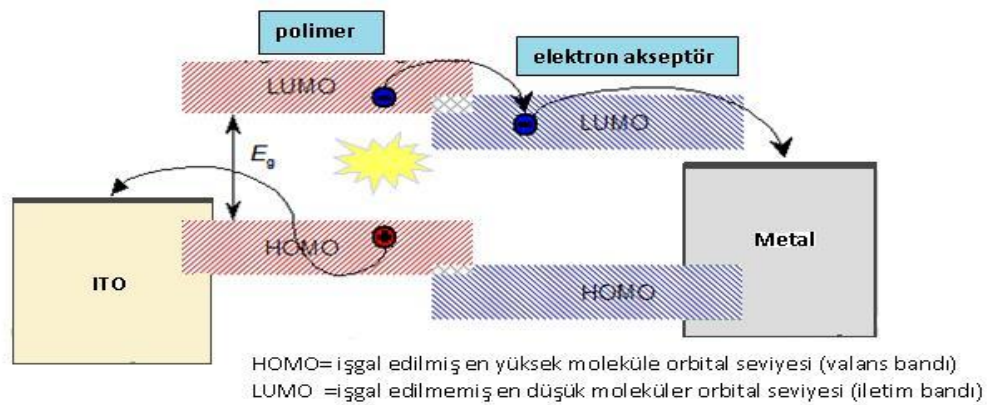
Şekil 5.16 Eldivenli kabin sistemi (Glove Box) [53]

Termal buharlaştırma yöntemi ile film elde edebilmek için genellikle 10^{-5} mbar'dan daha düşük vakum uygulanır. Bunun yanı sıra, oksijen ve su gibi atık maddeler, 10^{-9} mbar'dan daha düşük ek ultra yüksek vakum sayesinde veya eldivenli kabin sistemi (Şekil 5.16) içinde buharlaştırılarak azaltılabilir [79].

5.7 Organik Fotovoltaik Hücrelerin Temel Çalışma Prensipleri

Organik fotovoltaik hücrelerin nasıl çalıştığını anlamak için konjuge polimerde oluşan fotovoltaik etkiden yararlanmak işimizi kolaylaştıracaktır. Konjuge polimerlerde elektronik iletkenliğin mekanizması kesin aydınlatılamamıştır. Fakat iletken polimerlerin elektronik özelliklerinin inorganik yarıiletkenlerin özelliklerine benzer olması gibi bir durum söz konusudur. Bu nedenle, konjuge polimerlerin elektronik özelliklerini açıklamaya yönelik kabul edilen yaklaşımların önde geleni band teoremidir. Buna göre; bir elektronlu iki atomdan oluşmuş en basit bir molekülde bile bağ oluşumu sırasında yeni iki enerji düzeyi ya da orbitali ortaya çıkar. Daha önce bahsedilen konularda iletken polimerlerde, elektronların bulunduğu bağ yapıcı enerji düzeyi (bonding) π orbitali olarak adlandırılırken, boş olan anti bağ yapıcı (antibonding) enerji düzeyinin ise π^* orbitali olarak adlandırıldığından bahsedilmiştir. Yapıya katılan her bir atoma göre molekülün elektronik yapısına yeni bir bağ ve anti bağ enerji düzeyleri eklenecektir. Ancak molekül büyüklüğü arttıkça, bağ orbitallerinin de sayısı artarak aralarındaki enerji farkı azaldığından enerji düzeyleri yerine bir enerji bandı oluşur ki buna HOMO (valans bandı) denilir. Buna benzer şekilde sayıları sonsuza yaklaşan anti bağ orbitalleri de bir karşı enerji bandı oluşturur. Oluşan bu enerji bandına LUMO (iletkenlik bandı) denir [60]. Daha öncede bahsedildiği gibi iki band sınırları arasındaki yasak enerji aralığı, konjuge polimerin optik özelliklerini belirleyen bant aralığını oluşturur.

Organik fotovoltaik hücrelerde fotovoltaik dönüşümün gerçekleşmesi, temel olarak dört adımdan meydana gelir:



Şekil 5.17 Aktif tabakada elektron-delik çiftinin oluşması ve yüklerin uygun elektrotlara ulaşması [80]

1. Güneşten gelen ışığın fotovoltaiik hücre tarafından soğurulması ve bunun sonucunda eksitonun (elektron-delik çifti) oluşması
2. Eksitonun, donör-akseptör ara yüzeyine (elektron-delik çiftinin ayrılacağı bölgeye) geçişi (eksiton difüzyonu)
3. Elektronlar akseptör malzemeye, delikler ise donör malzemeye olmak üzere eksiton ayrılması
4. Son olarak ise yüklerin uygun elektrotlarda toplanması (elektronlar katoda, delikler anoda) şeklindedir [58].

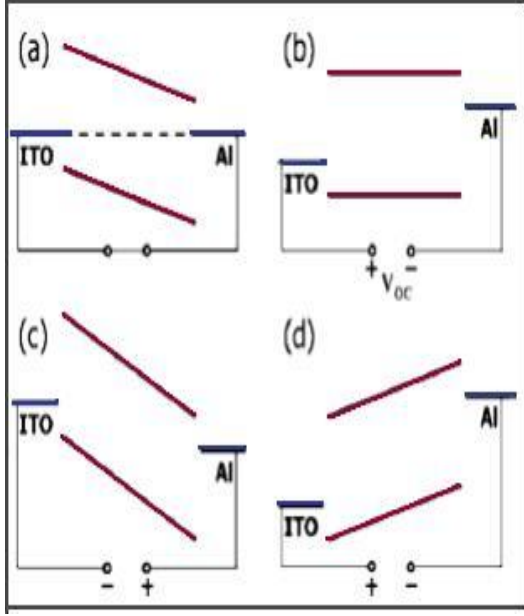
Fotodönüşümde ilk önemli adım soğurmadır. π - π^* enerji bant aralığına eşit veya daha büyük enerjide ışığın soğurulması ile π^* orbitallerinde elektron ve π orbitallerinde boşluk (delik) meydana gelir. π bağında elektronlar zayıf bağlıdır ve elektronlar π enerji seviyesinden π^* enerji seviyesine geçiş yaparlar. Bu durumun enerji bantları arasındaki geçişler şeklinde açıklanması daha yerinde olabilir. Molekül büyüklüğünün artması ile bağ orbitallerinin sayısı arttığından ve dolayısı ile enerji bantları oluştuğundan ve bu bantlara HOMO (değerlik bandı)–LUMO (iletim bandı) isimleri verildiğinden bahsedilmiştir. Fotovoltaiik hücre tarafından, bu enerji seviyeleri aralığına eşit veya daha büyük enerjide ışığın soğurulması ile iletim bandında elektronlar ve bunun sonucunda vdeğerlik bandında boşluklar oluşur. Birbirlerine coulomb etkileşmesi ile bağlı elektron-delik çifti, eklemenden uzaklarda oluştu ise birleşirler (rekombine olurlar) ve ısı ya da ışık olarak enerji açığa çıkarırlar.

Gelen fotonun enerjisi yasak enerji aralığından küçük olursa, bu dalgaboyundaki fotonun soğurulması yük taşıyıcısı üretmez. Yani serbest elektron ve delik üretmez. Eğer gelen fotonun enerjisi yasak enerji aralığına eşit ise her bir foton bir elektron-delik çifti oluşturur. Gelen fotonun enerjisi yasak enerji aralığından büyük ise, ozaman da elektron-delik çifti üretilir ve fazla enerji malzeme içerisinde ısıya dönüşür. Oluşan bu elektron-delik çifti arasında inorganik yarıiletkenlerdekinin tersine, zayıf ve birbirine coulomb kuvveti ile bağlı bir bağ mevcuttur. Bu elektron-delik çiftine **eksiton** adı verilir ve organik yarıiletken malzeme içerisinde tek bir tür gibi hareket etmektedir. Soğurma verimliliği malzemenin soğurma spektrumuna, kalınlığına ve devre tipine bağlıdır [53].

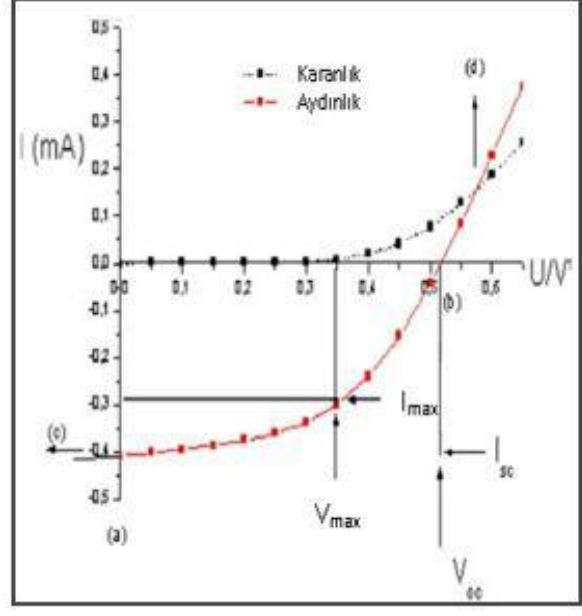
İkinci adımda; oluşan elektron-delik çiftlerinin (eksitonlar) ayrışması gerekmektedir. Eksitonun ayrışması, donör-akseptör ara yüzeyinde gerçekleşir. Bu ara yüzeyde yapısal elektrik alan mevcuttur. Eksitonlar yaratılmalarından itibaren 5-15 nm uzunluğa kadar beraber hareket edebilirler veya yayılabilirler [60]. Bunun için geçen süre eksitonların yaşam süresidir. Eksitonlar bu yaşam süresi içerisinde bu ara yüzeye ulaşarak ayrılmalıdırlar. Eğer eksitonlar yaşam süreleri içerisinde, yapısal elektrik alanın var olduğu donör-akseptör ara yüzeyine ulaşamazlar ise rekombine olurlar, yani yeniden birleşirler. Eksiton yayılma verimliliği, eksiton difüzyon (yayılma) uzunluğu ve donör-akseptör ara yüzeyindeki morfoloji ile belirlenir.

Üçüncü adımda; yaşam süreleri içerisinde yapısal elektrik alanın mevcut olduğu ara yüzeye kadar birlikte hareket eden eksitonlar birbirlerinden ayrışırlar. Fotovoltaik amaçlar için eksitonlar, yaşam süreleri içerisinde birbirlerinden ayrılmalıdırlar. Eksitonların verimli bir şekilde ayrılabilmesi için güçlü elektrik alanlar değerlendirilebilir. Bir ara yüzeyde, ani potansiyel enerji değişimlerinden dolayı güçlü yapısal elektrik alanlar oluşması mümkündür ($E = -\text{grad } U$) [60]. Elektron ve deliklerin kimyasal potansiyel gradyentleri donör-akseptör kesişim noktalarınca belirlenir. Bu gradyent, donörün HOMO'su ile akseptörün LUMO'su arasındaki farka göre belirlenir. Böylece yaşam süreleri içerisinde bu yapısal elektrik alan bölgesine ulaşan eksitonlar birbirlerinden ayrılırlar.

Son olarak; birbirlerinden ayrılan elektronlar, yüksek elektron ilgisi olan malzemeye (akseptör) ve delikler, düşük iyonlaşma potansiyeline sahip malzemeye (donör) olmak üzere birbirlerinden ayrılır ayrılmaz uygun elektrotlara hareket ederler. Böylece fotovoltaik hücre devresi tamamlanmış olur. Yüksek yük toplama verimliliği için organik yarıiletken malzeme ile metal elektrot arasında enerji bariyeri olmaması gerekmektedir. Bazı durumlarda iki malzeme arasındaki enerji bariyerini gidermek için ilave bir malzeme daha kullanılması yük toplama verimliliğini arttırmaktadır [55].



Şekil 5.18



Şekil 5.19

Şekil 5.18 İki metal elektrot arasında sıkıştırılmış organik yarıiletken tabakaların farklı çalışma prensipleri: a) kısa devre koşulu b) düz bant koşulu c) ters yönde kutuplama ve d) ileri yönde kutuplama [81]

Şekil 5.19 Bir polimer fotovoltaik hücrenin akım-voltaj grafiği (I-V eğrisi). Kırmızı düz çizgi aydınlatma altında, siyah kesikli çizgi ise karanlıktaki I-V karakteristiğini göstermektedir [81]

Fotovoltaik aygıtların farklı çalışma prensipleri, Şekil 5.18 ile temsil edilmektedir. Bu durum ile akım-gerilim diyagramı (Şekil 5.19) arasında bir ilişki vardır. Şekil 5.18'de gösterildiği gibi; a)'da kısa devre koşulları altında yaratılan maksimum fotoakım akar, b)'de fotoetkili akım 0'a dengelenmiştir (düz bant koşulları). a) ve b) arasında 4.bölgede devre güç (akım x voltaj) üretir. Maksimum güç noktası (MPP) ile gösterilen belli bir noktada, akım ve gerilimin çarpımı ve dolayısıyla güç çıkışı en büyüktür. Şekil 5.19'da ise, bir fotovoltaik hücrenin karanlıkta ve aydınlatma altındaki I-V karakteristiği gösterilmiştir. Siyah çizgiler karanlıkta, kırmızı çizgi ise aydınlıktaki karakteristiği göstermektedir. Karakteristiklerin x eksenini ile kesiştikleri noktalar açık devre voltajını (V_{oc}) göstermektedir. Yani akımın sıfır olduğu b noktası, düz bant koşulları altında açık devre gerilimini temsil etmektedir. y eksenini ile kesiştikleri noktalar ise kısa devre akımını (I_{sc}) göstermektedir. Yani kısa devre akımı, voltajın sıfır olduğu a noktasıdır [82]. I-V eğrisi üzerinde maksimum güç noktası (MPP) olarak belirtilen nokta, akım ve voltaj üretiminin maksimum olduğu noktaya karşılık gelir. $V_{mpp} \times I_{mpp}$ ve $V_{oc} \times I_{sc}$ oranı dolgu faktörü (FF) olarak adlandırılır. Bu yüzden

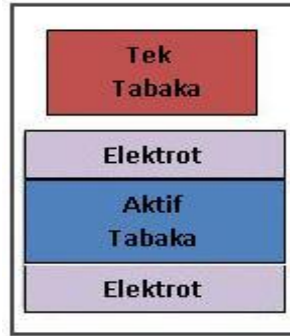
maksimum güç çıkışı $P_{\text{mak}} = V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}} \times \text{FF}$ şeklinde yazılabilir [81]. Bir fotovoltaik hücrenin verimini belirlemek için bu çıkış gücü ile gelen ışık gücü kıyaslanmalıdır.

5.8 Devre Tipleri

Organik yarıiletkenlerde foto-uyarılma ile oluşan eksitonların bağlanma enerjisi inorganiklere kıyasla yüksektir (0.1-1 eV) [83]. Bu yüzden bağlı elektron-delik çiftlerini ayırmaya yönelik yeni bir yöntem ortaya çıkarılmalıdır. Bu ise donör-akseptör ve yarıiletken-metal ara yüzeylerinde keskin potansiyel düşüşü ile mümkündür. Aşağıda en çok kullanılan aygıt yapıları açıklanmıştır. Bunlar arasındaki asıl fark, eksiton ayrılması ya da fotoaktif tabakada farklı bölgelerde oluşan yük ayrılması işlemindedir. Diğer ikinci bir olay da elektrotlara yük taşınmasıdır.

5.8.1 Tek Tabaka Fotovoltaik Hücreler

İlk tip fotovoltaik hücre, Şekil 5.20’de de gösterildiği gibi, farklı iş fonksiyonlarına sahip iki metal elektrot arasına sıkıştırılmış yarıiletken polimerlerden oluşmaktadır. Bir elektrot ITO olmak üzere, diğer elektrot Al (alüminyum), altın (Au), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) olabilir.



Şekil 5.20 Tek tabaka fotovoltaik hücre yapısı

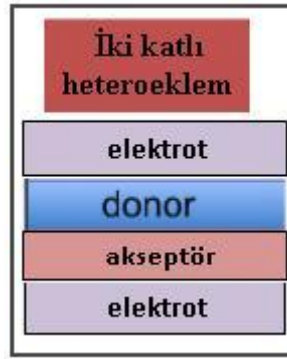
Güneşten gelen fotonlar fotovoltaik hücreye saydam ITO elektrot üzerinden giriş yapar. Fotovoltaik gereksinimlere göre organik yarıiletkenlerde oluşan eksitonlar serbest yük taşıyıcılarına dönüşmelidir. Tek başına polimer içeren aygıtlarda eksitonları ayırmanın en önemli yolu elektrik alanları değerlendirmektir.

Organik yarıiletkenlerde oluşan elektron-delik çifti arasındaki bağlanma enerjisinin inorganik yarıiletkenlerinkine göre kat kat fazla olduğundan bahsedilmiştir. Bu bağlanma enerjisi o kadar kuvvetlidir ki; yapısal elektrik alan, yaşam süreleri içerisinde

beraber hareket eden elektron-delik çiftini ayırmaya yeterli olmayabilir. Çünkü bu tür aygıtlarda sadece kısıtlı bir bölge fotoakım yaratılmasına katkıda bulunur. Bu tür fotovoltaik hücrelerin verimi oldukça kısıtlıdır. Bu yüzden bağlı elektron-delik çiftlerini ayırmaya yönelik yeni bir yöntem olarak iki katlı heteroeklem fotovoltaik hücreler keşfedilmiştir.

5.8.2 İki Katlı Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler

Tek tabakalarda karşılaşılan temel kayıpların nedenleri; kısa eksiton difüzyon uzunluğu ve bunun sonucunda, uyarılmış yük taşıyıcılarının tekrar birleşmesi (rekombinasyon) durumudur. Tek tabakalarda ortaya çıkan bu serbest yük taşıyıcısı yaratılma kısıtlılığını ortadan kaldırmak için donör-akseptör yaklaşımı önerilmiştir. İki katlı bir devre, Şekil 5.21’de gösterildiği gibi, HOMO ve LUMO seviyeleri uyuşan bir donör ve bir de akseptör malzemenin düzlemsel bir ara yüzeyde üst üste istif edilmesi sonucu oluşturulur [84].



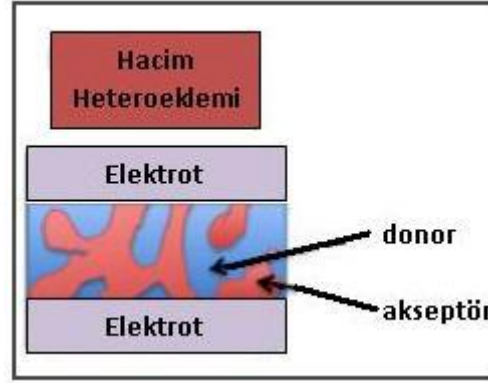
Şekil 5.21 İki katlı heteroeklem fotovoltaik hücre yapısı

Donör ve akseptör arasındaki etkileşim ikisinin birbirine temas ettiği geometrik ara yüzeyde sağlanacaktır. Fakat iki katlı heteroeklem devresi de eksiton difüzyon uzunluğunun sınırladığı aktif ara yüzey sebebi ile istenilen verime ulaşamamaktadır. Verim, eksitonların sadece güçlü elektrik alanların bulunduğu arayüzeylerde ayrılması sebebi ile kısıtlıdır. Bunun sonucu olarak elektron-delik çiftlerini ayırmaya yönelik yeni bir yöntem olan hacim heteroeklemi devre tipi keşfedilmiştir.

5.8.3 Hacim Heteroeklemlili Fotovoltaik Hücreler

Bu aygıt tipinde donör ve akseptör bileşenleri, nanometre ölçeğinde iç içe nüfuz eden ağ oluşturmak üzere karıştırılırlar. Bu yöntemde, donör ve akseptör arasındaki kontak

alanının maksimum olması hedeflenir. Böylece, eksitonlar donör-akseptör ara yüzeyine ulaşmak için uzun mesafeler almaya gerek duymayacaklardır. Ve elektron-delik çifti ayrımı fotoaktif tabakanın içerisinde her yerde gerçekleşebilecektir. Şekil 5.22’de, hacim heteroeklemi devre tipli fotovoltaiik hücre yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.22 Hacim heteroeklemi fotovoltaiik hücre yapısı

Genel olarak hacim heteroeklemleri, donör ve akseptör pigmentlerinin birlikte buharlaştırılması ile ya da polimer/polimer, polimer/molekül, molekül/molekül donör-akseptör karışımlarından çözelti bazlı kaplama yapılarak elde edilirler. Donör ve akseptör, birbirleriyle her zaman tam olarak karışmadıklarından faz ayrımı oluşabilir. Faz ayrımı iyi çözünmeye veya çözünememeye bağlıdır. Fakat organik fotovoltaiik hücrelerde faz ayrımı istenmez. Yüksek verim elde edebilmek için, donör-akseptör arasındaki faz ayrımı ortadan kaldırılarak veya azaltılarak donör ve akseptör arasında iç içe nüfuz eden ağlar oluşturulur ve böylece verim arttırılabilir. Literatürde bugüne kadar, hacim heteroeklemi devre tipli en verimli fotovoltaiik hücre P3HT ve PCBM karışımı kullanılarak elde edilmiştir [53].

5.9 Verim ve Kritik Parametreler

5.9.1 Güç Dönüşüm Verimi (η)

Bir fotovoltaiik hücrenin verimi, onun kalitesinin bir göstergesi olarak çok önemlidir. Bir fotovoltaiik hücrenin verimi ne kadar yüksek olursa, hücre o derece kaliteli olur. Verimi belirlemek için maksimum güç, gelen ışık şiddetiyle kıyaslanmalıdır. Bir fotovoltaiik hücreden sağlanan maksimum gücün, hücre üzerine gelen maksimum güce oranına güç dönüşüm verimi denir ve η simgesiyle gösterilir. Maksimum güç çıkışının tanımından

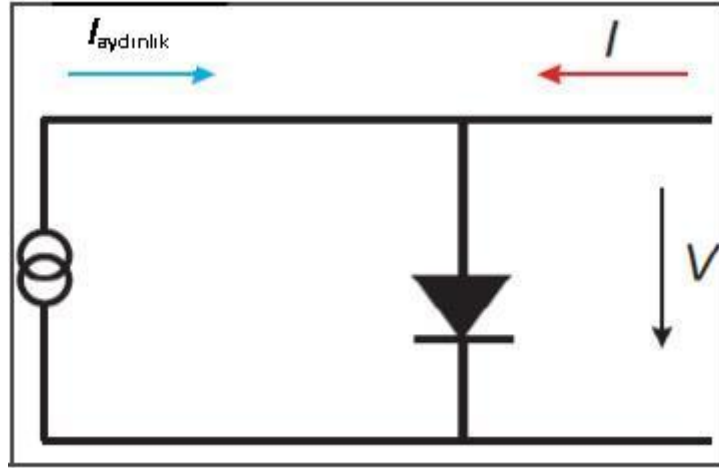
Şekil 5.19 üzerinde açıklama yaparken bahsedilmiştir. Buna göre güç dönüşüm verimi (η);

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{ışık}}} = \frac{J_{\text{mpp}} \times V_{\text{mpp}}}{P_{\text{ışık}}} = \frac{FF \times J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}}}{P_{\text{ışık}}} \quad (5.1)$$

eşitliği ile gösterilir. Burada FF, dolgu faktörü; J_{sc} , akım yoğunluğu ve V_{oc} , açık devre gerilimidir.

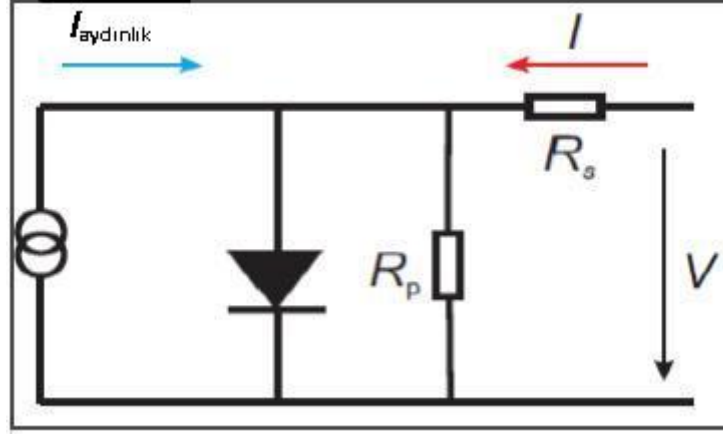
5.9.2 Fotovoltaik Hücrelerin Eşdeğer Devre Diyagramı

Fotovoltaik hücrenin elektrik üretimi, bir akım kaynağı olarak sembolize edilir. Hücre üzerine düşen ışınımlar arttıkça elektrik akımı da artmaktadır. Fotovoltaik hücrenin gövdesi, yarıiletken malzemelerden oluştuğundan diyot ile modellenmiştir (Şekil 5.23).



Şekil 5.23 Bir fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre diyagramı

Şekil 5.23'te, ideal bir fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi gösterilmektedir. Bu devre ideal bir diyottan ve paralel bağlı bir akım kaynağından oluşur. Gerçek bir fotovoltaik hücrede ise eklemde üretilen enerjinin kutuplara iletilmesi sırasında oluşan kayıplar, seri ve paralel direnç ile karakterize edilir. Şekil 5.23'teki ideal eşdeğer devreye, kayıplarını temsil eden R_s ve R_p dirençleri eklenmelidir.



Şekil 5.24 Paralel R_p direnci ve seri R_s direnci eklenmiş fotovoltaiik hücre eşdeğer devre diyagramı

Seri R_s direnci ile paralel R_p direninin eklenmesiyle gerçek bir fotovoltaiik hücrenin eşdeğer devresi Şekil 5.24'deki gibi olacaktır. R_s ön ve arka kontaktardaki ohmik kayıpları temsil eder. R_p direnci ise donör ve akseptör arayüzeyindeki kayıpları temsil eder [85].

Genellikle, bir fotovoltaiik devrenin I-V karakteristiği (5.2) eşitliği ile tanımlanabilir;

$$I = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{e}{nkT} (U - I R_s) \right) - 1 \right\} + \frac{U - I R_s}{R_p} - I_{\text{ışık}} \quad (5.2)$$

I_0 , karanlık akımı; e , temel yük birimi; n , diyot idealite faktörü; U , uygulanan voltaj; R_s , seri direnç; R_p , paralel direnç ve $I_{\text{ışık}}$ ($I_{\text{aydınlık}}$), fotoakımdır. Yüksek dolgu faktörü elde etmek için; paralel direnci oldukça yüksek, seri direnç ise oldukça düşük olmalıdır [82].

5.9.3 Kısa Devre Akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı, hücre üzerine uygulanan gerilim 0 Volt iken ölçülen akımdır. Kısa devre akımı, I_{sc} sembolü ile gösterilir. Kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ise kısa devre akımının, aktif yüzey alanına bölümüdür. Kısa devre akımının; aydınlatma dışında hiçbir şey yapılmadan fotovoltaiik hücre tarafından üretilen akım gibi tarifi de vardır. Şekil 5.19'da grafiğin y eksenini kestiği nokta I_{sc} değerini göstermektedir.

Bu durumda (5.2) eşitliği;

$$\boxed{I_{sc} = I_{\text{aydınlık}}} \quad (5.3)$$

şeklinde basitleşmektedir. Görüldüğü gibi I_{sc} , soğurulan fotonlardan kaynaklanan aydınlık akımına eşittir [85].

İdealde kısa devre akımı, (5.4) eşitliğinde gösterildiği gibi organik yarıiletkenlerdeki uyarılmış yük taşıyıcı yoğunluğu ve yük taşıyıcı mobilitesinin çarpımıyla doğru orantılıdır. Burada n yük taşıyıcı yoğunluğu; e temel yük; μ mobilite ve E elektrik alanıdır.

$$I_{sc} = ne\mu E$$

(5.4)

Hacim heteroeklemi karışımında fotoetkili yük oluşum verimi %100 farzedilirse; n , buradaki birim hacim başına soğurulan foton sayısıdır. Hacim heteroeklemlili fotovoltaiik hücrelerde hacim içindeki her yerde verimli eksiton ayrılmasından dolayı tüm fotoaktif tabakadaki soğurma fotoakıma katkıda bulunur [82].

Kısa devre akımı aynı zamanda yük taşıyıcı mobilitesine de bağlıdır. Organik yarıiletkenler genellikle düşük mobilitelere sahiptirler. Bu doğrudan organik fotovoltaiik devrenin aktif tabakasının kalınlığını sınırlar. Belli bir kalınlığın ötesinde, rekombine olmadan önce yük taşıyıcıları elektrotlara ulaşamayacaktır. Dolayısıyla, yüksek mobiliteli/düşük band aralıklı malzemeler, kısa devre akımının iyileştirilmesi için genel bir yoldur [82].

Bir foton fotovoltaiik hücre tarafından soğurulduğu zaman elektron-delik çifti üretir ve bunlar uygun şartlar oluşursa birbirlerinden ayrılarak devreyi tamamlarlar. Eğer bu devre, eksiton rekombinasyonu olmaksızın tamamlanırsa o zaman soğurulan foton tamamı ile akıma katkıda bulunur. Maksimum kısa devre akımı için, malzeme içerisinde rekombinasyon olmadığı farz edilir. Yani, soğurulan her foton, bir elektron akımına katkıda bulunacaktır. Bu yüzden, kısa devre akımının maksimum mümkün değerini tespit etmek için foton sayısı ve foton enerjisine bakmak gerekir.

Bir fotonun soğurulabilmesi için, malzemenin bant genişliğine eşit ya da daha büyük enerjiye sahip olması gerekir. Bu da, kısa devre akımının malzemenin bant genişliğine bağlı olacağını göstermektedir. Bant aralığının düşürülmesi, foton emilimini arttırdığı için, maksimum teorik kısa devre akımını arttırır. Yüksek bant aralığına sahip bir malzeme, düşük bant aralığına sahip bir malzemeye göre daha az sayıda foton soğurur [86]. Yani genel olarak kısa devre akımı, cihazın morfolojisine, yük taşıyıcı ömrüne ve yük taşıyıcı mobilitesine önemli ölçüde bağlıdır.

5.9.4 Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

Açık devre gerilimi (V_{oc}) fotovoltaik aygıtların anahtar parametrelerinden biridir. Fotovoltaik hücre devresi üzerinden hiç akım geçmiyor iken ölçülen gerilim açık devre gerilimi (V_{oc}) adını alır. Şekil 5.19'da grafiğin x eksenini kestiği nokta V_{oc} değerini vermektedir. Genel olarak açık devre gerilimi; metal-yalıtkan-metal (MIM) modeline göre, iki metal kontakın iş fonksiyonlarının farkına göre belirlenir [66]. Hücrenin devresi açıkken aydınlatılırsa elektronlar ve boşluklar ayrılır ve sırasıyla düşük ve yüksek iş fonksiyonlarına doğru akarlar. V_{oc} 'nin ulaşacağı maksimum değer iki elektrotun iş fonksiyonu arasındaki farka bağlıdır [87]. Fakat son zamanlarda yapılan çalışmalarda birkaç heteroeklem hücrede V_{oc} 'nin elektrot malzemenin çok alıcı malzemeye bağlı olduğu gösterilmiştir.

Kısa devre akımı gibi açık devre gerilimi de bant aralığına bağımlılık gösterir. Organik fotovoltaik hücrelerde açık devre gerilimi, p-tipi yarıiletkenin HOMO seviyesi ve n-tipi yarıiletkenin LUMO seviyesi arasındaki farka lineer olarak bağımlıdır [88]. Eğer fotovoltaik hücre malzemesi, bant aralığına eşit ya da ondan daha büyük enerjili bir foton soğursa, bir elektron değerlik bandından iletim bandına uyarılır. Eğer fotovoltaik hücrede potansiyel kaybı yok ise elektriksel potansiyel, hücreden elde edilen maksimum mümkün gerilim olmalıdır. Böylece, açık devre geriliminin üst sınırına, malzemenin bant genişliği enerji aralığı tarafından karar verilir. Örneğin; inorganik bir malzeme olan silisyum yarıiletkeninin bant genişliği 1.1 eV' dir. Bu nedenle, maksimum mümkün açık devre gerilimi 1.1 Volttur [86].

Görüldüğü gibi, açık devre gerilimi, fotovoltaik hücre olarak kullanılan malzemelerin enerji seviyelerine bağlı önemli bir parametredir. Sonuç olarak açık devre gerilimi, kullanılan metallerin enerji seviyelerine ve onların ara yüzeylerine ait hassas bir fonksiyondur [89].

5.9.5 Dolgu Faktörü (FF)

Dolgu faktörü, hücrenin bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür. Maksimum gücün, açık devre geriliminin ve kısa devre akımının çarpımına oranıdır. Dolgu faktörü (FF);

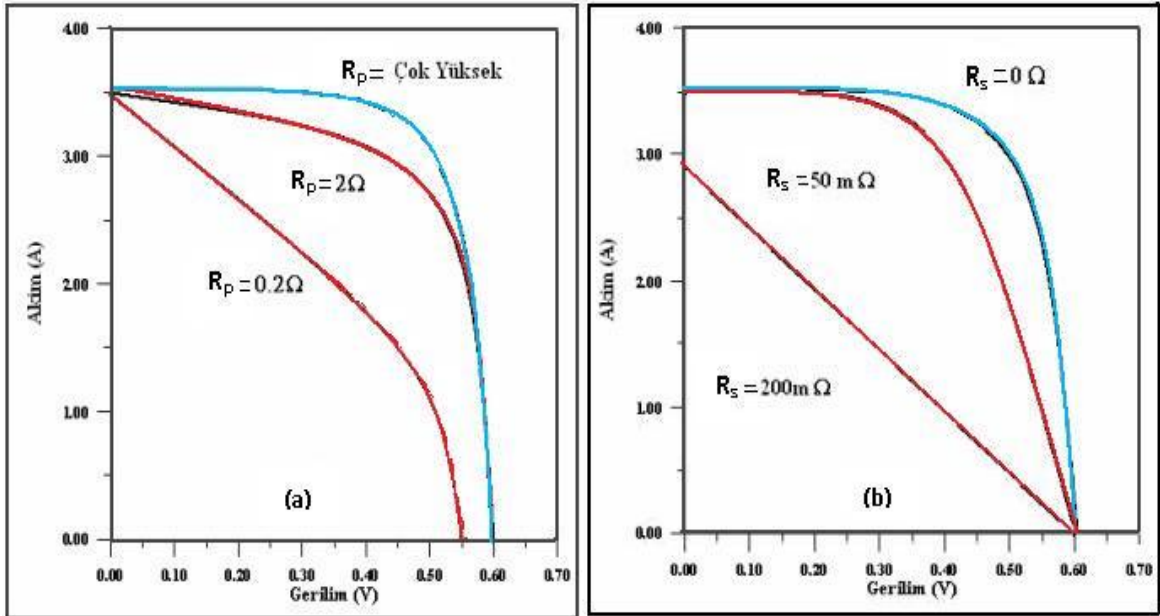
$$FF = \frac{J_{mpp} \times V_{mpp}}{J_{sc} \times V_{oc}}$$

(5.5)

eşitliği ile ifade edilir.

Dolgu faktörünün alabileceği maksimum değer ise 1'e eşittir.

Dolgu faktörünün değeri, hem seri hem de paralel dirençler tarafından doğrudan etkilenmektedir. Fotovoltaik hücrede seri direncinin azar azar artmasıyla dolgu faktörü ve I_{sc} hızla azalır. Kullanılan malzemelerin ve kontakların direncinden kaynaklanan seri direnç mümkün olduğu kadar küçük olmalı ve paralel direnç mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Paralel direncin artırılması ve seri direncin düşürülmesi dolgu faktörünü ve dolayısıyla hücrenin verimini artırır [60]. Sonuç olarak, verimi etkileyen faktörler arasında bir bağıllık bulunmaktadır ve birlikte çözümleri sağlanmalıdır. Şekil 5.25 a) ve b), fotovoltaik hücrede dolgu faktörüne ve dolayısıyla hücre verimine seri direnç ve paralel direnç etkilerini göstermektedir.



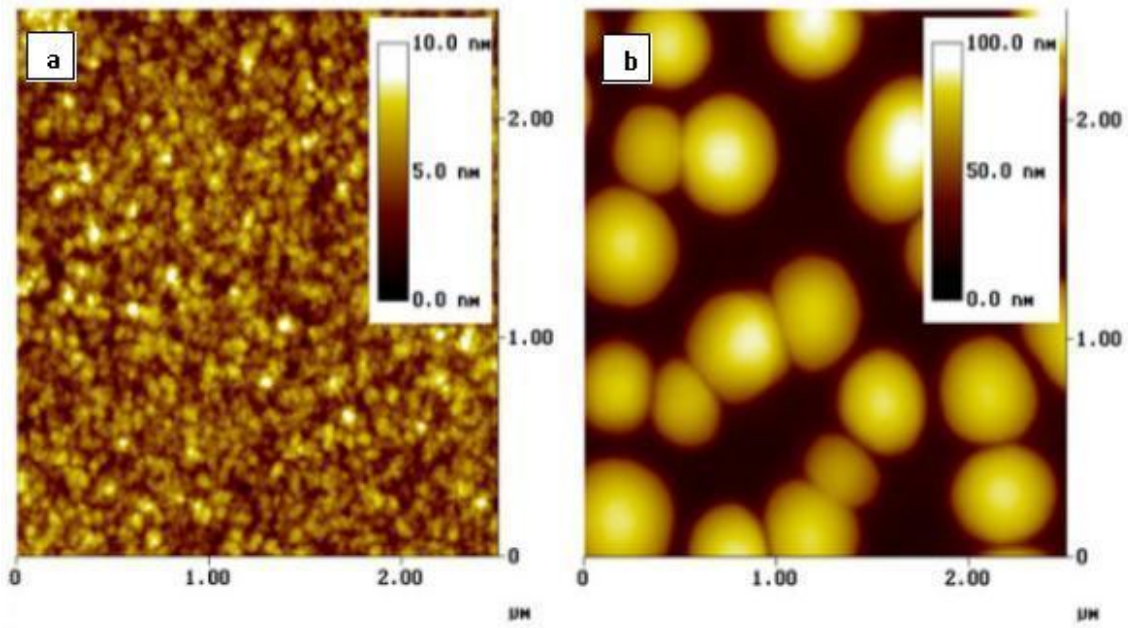
Şekil 5.25 a) Fotovoltaik hücre üzerine paralel direnç etkisi ($R_p = \infty$ durumunda), b) seri direnç etkisi ($R_s = 0$ durumunda) [90]

5.9.6 Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Organik Malzemelerin Morfolojik Özellikleri

Hacim heteroeklemi yöntemi, biri donör (genellikle konjuge polimer), diğeri akseptör olan iki organik malzemedir oluşur. Donör ve akseptör malzemeler arasında ideal bir

elektronik ilişki olmalıdır. Donor ve akseptör malzemeler ideal elektronik ilişkiye sahip olsa bile (enerji seviyeleri birbirine uysa bile) hacim heteroeklemlili fotovoltaiik hücrelerin performansı donor ve akseptör bileşenlerinin fiziksel etkileşimine de bağıdır. Bunu da morfoloji belirler. Aktif tabakanın morfolojisi, polimer ve fulleren özelliklerine bağıdır. Morfoloji; iki bileşenin karışabilirliğine, çözücü türüne, polimer fulleren konsantrasyonuna, kaplama tekniğine ve termal tavlamağa bağıdır [91].

Konjuge polimerler ve fulleren türevleri içeren organik fotovoltaiik hücrede güç dönüşüm verimi moleküler morfolojiden etkilenir. Uygun çözücü seçiminin, verimi önemli ölçüde arttırdığı literatürde gösterilmiştir. Polimer zincirlerinin konformasyonu; organik çözücünün seçimi ve polimer çözücünün konsantrasyonuna bağıdır. Sonuçta oluşan morfoloji hem malzeme hem de devre karakteristiklerini önemli ölçüde etkiler. Şekil 5.26'da çözücünün morfolojiye olan etkisine bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 5.26 Yüzeği AFM ile taranmış MDMO-PPV:PCBM karışımı olarak hazırlanan filmler a) klorobenzende dönel kaplama ile kaplanmış, b) toluende dönel kaplama ile kaplanmışır. Tarama boyutu her iki film için de 2.5 μm'dir. Toluene'li film klorobenzene kıyasla 10 kat fazla yüksekliğe sahiptir [92]

Sıcaklık işlemleri uygulanması da morfolojiyi değıştirebilir. Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan polimerler içerisinde PPV'den başka kullanılan en önemli polimerlerden bir tanesi P3HT (poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil)'dir. Bu malzeme kullanılarak oluşturulan fotovoltaiik hücrede yüksek verim elde etmenin bir yolu hücreleri hazırlandıktan sonra sıcaklık işlemleri uygulanmasıdır. Sıcaklık işleminin sonucu

olarak organik tabakaların morfolojik yapısı değişebilir. Bu da, çözücü buharlaşması sırasında ara yüzeydeki kusur yoğunluğunun azalması ve zincirlerarası etkileşimin güçlendirilmesi ile sağlanır [53].

5.10 Organik Fotovoltaik Hücre Performansının İyileştirilmesi

Organik fotovoltaik hücrelerin verimini kısıtlayan birçok parametre mevcuttur. Bu parametrelerin iyileştirilmesi yönündeki çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu çalışmalar oldukça önemlidir. Çünkü ancak bu yolla organik fotovoltaik hücre performansı iyileştirilebilir. Organik fotovoltaik hücrelerin verimini kısıtlayan parametrelerden birkaçı ve iyileştirilme çabaları aşağıdaki gibidir:

Saydam iletken elektrot olarak kullanılan ITO; yaratılan yükleri toplamak için kullanılan çok popüler bir anot elektrottur. Bunun yanında; ITO'nun çok pahalı olması, direncinin yüksek olması ve direncinin sıcaklıkla artması gibi olumsuz özellikleri var olduğundan, organik fotovoltaik hücre verimini kısıtlayan bu faktör için alternatifler araştırılmaktadır. Karbon nanotüpler, saydam elektrot olarak kullanılan bir alternatiftir. Organik elektronik cihazlar için, çözültiden hazırlanarak saydam elektrot olarak kullanılabilirler [93]. Karbon nanotüpler, tersine çevrilmiş cihazlarda kullanılıp ITO olmadan da verim kaybı olmaksızın elektrot görevini yerine getirmişlerdir [94].

Organik yarıiletken malzemenin morfolojisi; organik fotovoltaik hücrelerin verimini doğrudan etkileyen parametrelerden bir tanesidir. Daha önce de bahsedildiği gibi yük taşıma verimi aktif tabakanın morfolojisinden çok fazla etkilenir. Uygun morfoloji, eksiton ayrılması için yeterli arayüzeyi sağlamakla kalmaz. Aynı zamanda iç içe geçmiş ağlarla elektronların ve deliklerin verimli bir şekilde taşınmasına da olanak verir. Optimize edilmiş bir morfolojinin ön koşulu, malzemelerin iyi bir şekilde karışabilmesidir [95]. Sıcaklık uygulamak morfolojiyi olumlu etkileyen bir diğer yöntemdir.

Polimer fotovoltaik hücrelerin kararlılığı; organik fotovoltaik hücrelerin verimini etkileyen parametrelerdendir. Organik fotovoltaik hücrelerin verimi adım adım arttırılırken, ticari yönü bilim insanlarını organik fotovoltaik hücrelerin dayanıklılığına da odaklanmaya itmiştir. Diğer organik cihazlar gibi fotovoltaik hücrelerin de kapsüle edilmeden, birkaç dakikadan birkaç güne kadar değişen aralıkta olabilecek çok kısa bir yaşam ömrüne sahip olurlar [96]. Termoklıvaj malzemeler havaya dayanıklı fotovoltaik hücreleri üretmek için kullanılmaktadır. Aktif tabaka, termoklıvaj yan zincirlerine sahip

malzemeler tarafından şekillendirilir. Sıcaklık uygulamak bu çözünebilir malzemeleri çözünemeyen katı filmlere dönüştürür. Bu termoklívaj malzemelerle şekillenen filmlerin diğer yaygın polimerlerden daha dayanıklı olduğuna inanılmıştır. Kreps ve arkadaşları, termoklívaj malzemelerle yapılan hacim heteroeklemlí polimer fotovoltatik hücreleri rapor etmiştir [97-98].

Organik yariletken malzemenin soğurma kapasitesi; verimi etkileyen bir diğer faktördür. Polimer fotovoltatik hücreleri kısıtlayan parametrelerden bir tanesi soğurma bölgesidir. Geniş bant aralıklı malzemeler dünya üzerindeki güneş spektrumuyla uyumsuzluğa sahiptir. Örneğin; poli(p-phenylene vinylenes) (PPV)'ler ve politiyofenlerin bant aralığı 1.85 eV ve 2.2 eV aralığındadır. 1.85 eV bant aralığı, 670 nm sınırında soğurur. Bu gelen fotonların %46'sına karşılık gelir. 1.1 eV bant aralığına sahip olan Si, gelen fotonların %77'sini soğurabilmektedir [99]. Düşük bant aralıklı polimerlerin yapısını anlama üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu polimerleri sentezlemek için gereken strateji, yüksek iyonizasyon potansiyeline sahip donör ile yüksek elektron ilgisine sahip akseptör kullanmaktır. Ayrıca soğurmayı arttırmak için kullanılabilir diğer bir yöntem, geniş soğurma aralığına sahip akseptörlerin üretilebilmesidir. PC₇₁BM ve PC₈₅BM'in görünür dalgaboyunda daha iyi soğurma yaptığı rapor edilmiştir. Fakat bunlar donör polimerlerle çok iyi karışım yapmamaktadır. Soğurma aralığını genişletmek için, fullerenden daha iyi soğurmaya ve mobiliteye sahip inorganik nanomalzemeler de kullanılabilir [100].

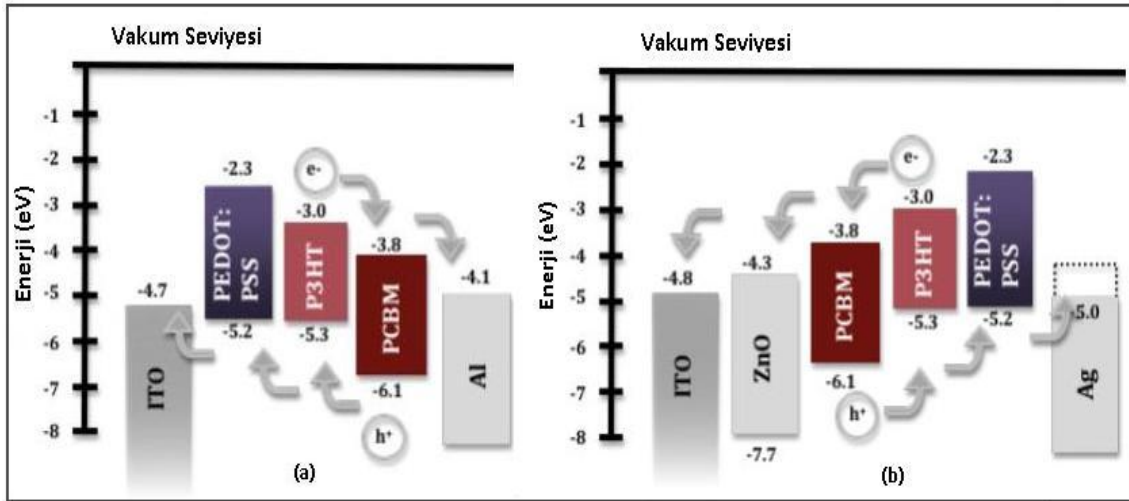
Devre tipi; son olarak bahsedeeğimiz verimi etkileyen faktörlerdendir. Günümüzde verimli fotovoltatik hücre elde etmek için araştırılan farklı devre tipleri olarak; tandem fotovoltatik hücreler ve tersine çevrilmiş (inverted) hacim heteroeklemi devre konseptleri örnek olarak verilebilir.

Organik molekül ve polimerlerin sınırlı soğurma aralığından dolayı işığın sadece küçük bir kısmı tekli hacim heteroeklemi fotovoltatik hücrelerde soğurulmaktadır. Birçok organik malzemenin düşük yük taşıyıcı mobilitesine sahip olması aktif tabakanın kalınlığını kısıtlamaktadır. Herbiri farklı bant aralığına sahip çoklu tabakadan oluşan tandem veya çok eklemlí fotovoltatik hücreler bu sorunu ortadan kaldıracaktır. Hadipour ve arkadaşları, bu konuda yapılan çalışmaları 2008 yılında yayınlanan bir derleme makalesinde anlatmıştır.

Organik fotovoltatik hücrelerde alternatif devre modelleri uygulamalarından biri de

“Tersine Çevrilmiş Hacim Heteroeklemine Dayalı Fotovoltaik Hücreler” (Inverted Bulk-Heterojunction Solar Cells)’dir. Şekil 5.27(a)’da gösterilen normal devre tipli organik fotovoltaik hücrelerde genellikle Al, metal anot elektrot olarak kullanılmaktadır. Fakat burada zamana karşı dayanıklılık ile ilgili bir problem vardır. Çünkü Alüminyum (Al) yüzeyi, hava ortamında kolaylıkla oksidize olup yalıtkan olan Al_2O_3 ’e dönüşmektedir. Son zamanlarda, bu problemi çözebilmek için birçok grup, fotovoltaik hücrelerde Al elektrot yerine korozif olmayan elektrot uygulamasını geliştirmiştir. Yani normal devre tipine göre tersine çevrilmiş tipte bir devre modeli yer almaktadır. Bu yüzden literatürde “inverted type solar cells” olarak adlandırılmaktadırlar [101]. Çünkü aktif tabaka içinde meydana gelen elektron-delik çiftleri, elektrik alan ile serbest hale geldikten sonra normal devre tipinin tam tersi olacak şekilde uygun kontaklara doğru hareket etmektedirler [102]. Birçok optoelektronik devrede, ön kontak saydam iletken, ITO gibi yüksek iş fonksiyonuna sahip pozitif elektrot olarak görev alan metalden oluşmaktadır. Arka elektrot ise güçlü yapısal elektrik alanlar elde etmek için düşük iş fonksiyonuna sahip negatif elektrot olarak yer alan metallere meydana gelmelidir. Tipik polimer-fulleren karışımli hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücrelerde meydana gelen elektronlar, arka elektrot tarafından delikler ise ön kontak tarafından toplanmaktadır. Fakat Şekil 5.27 (b)’de de gösterildiği gibi aktif tabaka ile ITO arasına eklenen bir boşluk engelleyici tabaka ile devre tersine çevrilebilir. Bahsedilen ara tabaka TiO_2 [1103] ve ZnO [104] gibi malzemelerden meydana gelmektedir. Böylece foto-uyarılma ile meydana gelen elektronlar, ara tabaka olarak kullanılan malzemenin iletkenlik bandını basamak olarak kullanıp ITO’ya ulaşabilmektedirler. Burada arka elektrot delikleri toplayan pozitif elektrot olarak görev almaktadır [102].

Bu tez çalışmasında kullanılan CdS tabakası, güneş ışığının geçmesine izin veren pencere katman (window layer) olarak kullanılmasının yanında, sistemde fotovoltaik hücrenin kısa devre olmasını önleyen “boşluk engelleyici tabaka (hole blocking layer)” olarak da görev yapmaktadır. Bu tabakanın düzgün kaplanmış ve güneş ışığının geçmesine izin verebilecek şekilde mümkün mertebe ince olması gerekmektedir.



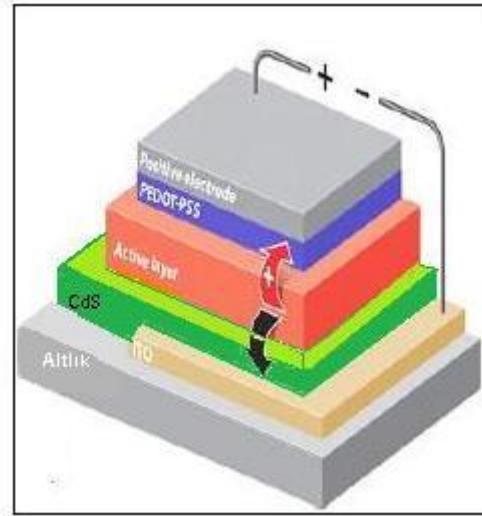
Şekil 5.27 a) Normal devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagram resmi b) tersine çevrilmiş devre modelinde serbest yük taşıyıcılarının enerji seviyelerine göre hareketini gösteren enerji diyagram resmi [105]

Tersine çevrilmiş devre modelinde; elektron-delik çiftlerinin serbest yük taşıyıcıları haline geldikten sonra, enerji seviyelerine uygun olacak şekilde ilgili kontaklara doğru hareketini gösterebilmek için, literatürde daha önce çalışılmış olan P3HT ve PCBM polimerleri kullanılarak hazırlanan fotovoltaik hücrenin enerji diyagramından yararlanılmıştır [120]. Bu diyagram Şekil 5.27’de gösterilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücrelerdeki CdS ince film kalınlığının, PEDOT:PSS varlığının ve farklı metal kontaktların fotovoltaik hücre performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı bir fotovoltaik hücreye ait devre şeması Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücrelere ait devre şeması

Bu çalışmada, ticari olarak satın alınan indium tin oksit (ITO) kaplı camlar kullanılmıştır. Altlık olarak kullanılan ITO kaplı camların boyutu $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ ’dir. Bu çalışmada, daha çok, ışığı geçiren pencere katman (windows layer) olması ile tanınan kadmiyum sülfür (CdS) ince filmi, boşluk engelleyici tabaka olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda P3HT ve fulleren türevi PCBM malzemeler, birbirleri ile karıştırılarak aktif tabaka olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada; saydam bir iletken

polimer olan PEDOT:PSS'in, aktif tabaka ve metal kontak arasında yük taşıyıcılarının daha iyi iletilmesi hususunda nasıl bir rol oynadığı da incelenmiştir. Metal kontak olarak ise Ag (gümüş) ve Au (altın) malzemelerden yararlanılmıştır.

6.1 Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması

6.1.1 ITO Camların Hazırlanma ve Temizlenme İşlemi

Bu çalışmada ticari olarak satın alınan indium kalay oksit (ITO) kaplı camlar, altlık olarak kullanılmıştır. Camlar, 1.5 cm² olacak şekilde kesildi. ITO kaplı cam yüzeyinin bir kısmı, asit çözeltisinde 30 dakika bekletilerek aşındırma (etching) işlemine tabi tutuldu. Aşındırma işleminden sonra ITO kaplı camlar sırasıyla; destile su, aseton ve isopropanol kullanılarak ultrasonik banyoda (Şekil 6.2) temizlendi ve CdS kaplamaya hazır hale getirildi.



Şekil 6.2 Ultrasonik banyo

6.1.2 CdS İnce Filmlerin Kaplanması

6.1.2.1 CdS Bileşiğinin Özellikleri

Yarıiletken CdS bileşiği periyodik tablonun II. grup elementlerinden Cd (Kadmiyum) ile VI. grup elementlerinden S (Kükürt)'den oluşan sarı-turuncu renkte bir II-VI grubu bileşiktir. Cd; periyodik cetvelin II B gurubu elementi olup atom numarası 48, atom ağırlığı ise 112.411 g/mol'dür. Mavi-beyaz renkte, yumuşak bir metaldir. Cd ve tüm bileşikleri zehirlidir, bu yüzden çıplak elle temasından kaçınılmalıdır. S; VI A grubu

elementi olup, atom numarası 16, atom ağırlığı ise 32 g/mol'dür. CdS'ün erime noktası 1750 °C, yoğunluğu ise 4.83 g/cm³'tür. Düşük özdirence sahip CdS ince filmlerinin ucuz tekniklerle elde edilmesi fotovoltaik uygulamalar için çok önemlidir. CdS yarıiletken filmi, oda sıcaklığında geniş bir yasak enerji aralığına ve direk bant geçişine sahip n tipi bir fotoiletken yarıiletken malzemedir. CdS filminin yasak enerji aralık değeri 2,42-2,5 eV arasında değişmektedir. Geniş yasak enerji aralığına sahip olması nedeni ile fotovoltaik hücre uygulamalarında pencere malzemesi olarak geniş yer bulmaktadır [28]. Bu özelliklerinden dolayı CdS heteroeklem fotovoltaik hücrelerde, gelen ışınları toplayıp iletme sokan pencere malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Pencere malzemeleri, düşük özdirenç ve yüksek geçirgenlik gibi iki özelliğe sahip olmalıdır. CdS ince filmleri hangi teknikle elde edilirse edilsin yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletme sahip olmaları istenir [52].

CdS filmlerinin elde edilmesinde; termal buharlaştırma, kimyasal banyo ve kimyasal püskürtme (spray proliz) gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu teknikler arasında kimyasal püskürtme yöntemi karmaşık aletler ve vakum gerektirmeyen, daha geniş yüzeyli filmlerin elde edilmesini sağlayan basit, ekonomik, aynı zamanda farklı elementlerin katkılanmasına da imkan veren uygun bir yöntemdir [106].

CdS filmi ilk olarak 1966'da Skarman ve Chamberlin tarafından püskürtme yöntemiyle elde edilmiştir. CdS yarıiletken filmlerin elde edilmesinde CdCl₂ (kadmiyum klorür) ve (NH₂)₂CS (tiyoüre) kullanılır. Çözeltiler belirli oranda karıştırılıp ısıtılan altlık üzerine püskürtüldüğünde, açığa çıkan Cd ve S atomları sıcak altlık üzerinde birleşerek CdS filmini oluştururlar [107]. Isıtılan altlık üzerine püskürtülen CdCl₂ ve (NH₂)₂CS karışım çözeltisinin kimyasal reaksiyonu (6.1) eşitliğinde de gösterildiği gibi:

$$\text{CdCl}_2 + (\text{NH}_2)_2\text{CS} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CdS} \downarrow + 2\text{NH}_4\text{Cl}_2 \uparrow + \text{CO}_2 \uparrow$$
 şeklindedir [108].

6.1.2.2 CdS Çözeltisinin Hazırlanması

Bu çalışmada, kaplanan CdS ince filmini hazırlamak için, Sülfür (S) kaynağı olarak tiyoüre [(NH₂)₂CS], kadmiyum (Cd) kaynağı olarak ise kadmiyum klorür (CdCl₂) bileşiği kullanılmıştır. CdCl₂ ve (NH₂)₂CS, suda kolay çözünen bileşiklerdir.



Şekil 6.3 a) $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ ve b) CdCl_2

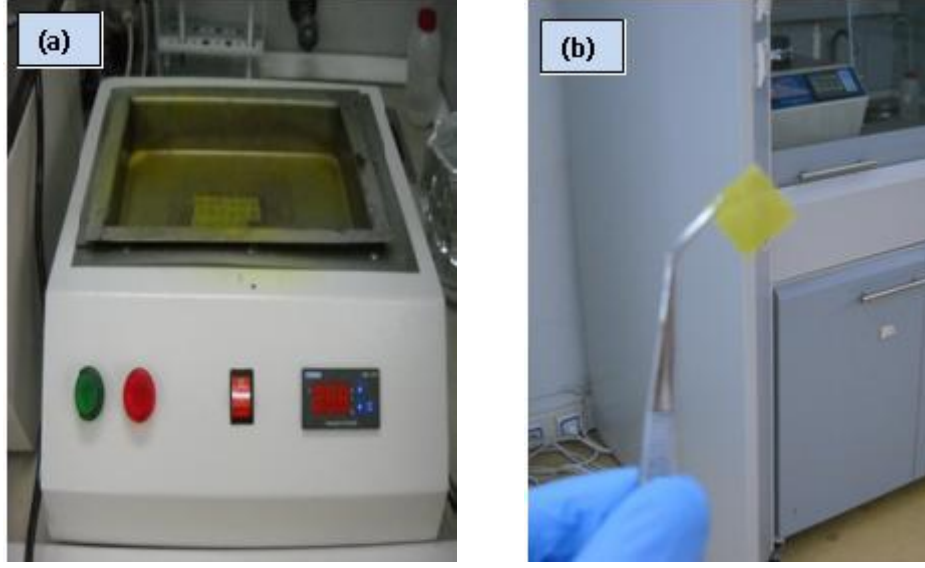
Bu çalışmada, CdCl_2 ve $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ malzemeler saf su içerisinde 0.05:0.05 molar oranında hazırlanmıştır. 3 farklı hacimde çözelti hazırlanarak kaplanan CdS ince filmler ile kalınlık etkisi incelenmiştir.



Şekil 6.4 En soldan başlayarak sırasıyla; $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$, CdCl_2 , destile su, üzerinde CdS çözeltisi karışan manyetik karıştırıcı ve spray şişesi

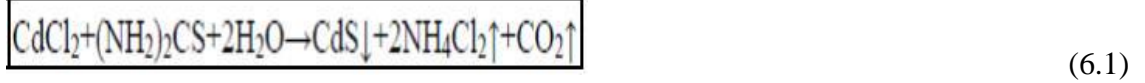
6.1.2.3 CdS Kaplanması

ITO kaplı camlar, 265°C altlık sıcaklığında tutuldu ve farklı hacimde $[(\text{NH}_2)_2\text{CS}] : \text{CdCl}_2 : \text{H}_2\text{O}$ çözeltileri spray başlıktan püskürtülerek kaplandı. Kaplama sürecinde altlık sıcaklığı ve spray başlığın ITO camlara olan uzaklığı (~ 35 cm) sabit tutuldu.



Şekil 6.5 a) Rezistans b) CdS kaplanmış ITO cam

Spray şişesi ile püskürtülen CdCl_2 ve $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ karışım çözeltisinin kimyasal reaksiyonu;

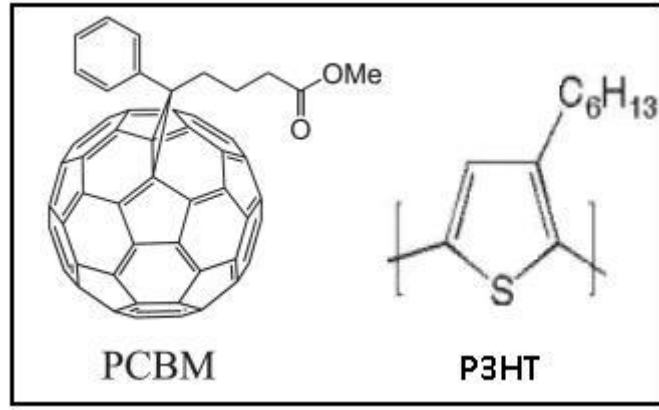


şeklindedir [109]. Kimyasal reaksiyondan da anlaşıldığı gibi, altlık sıcaklığının etkisi ile karbondioksit (CO_2) ve amonyum klorür (NH_4Cl_2) bileşikleri buharlaşır. Böylece buharlaşmadan kalan kadmium (Cd) ve sülfür (S), aralarında bağ oluşturarak ITO cam üzerinde CdS ince filmi oluşturmaktadır.

6.1.3 P3HT:PCBM Çözeltilerinin Hazırlanması ve Kaplanması

P3HT (poli(3- heksiltiyofen-2, 5-dil), iletken polimerlerin bir çeşidi olan bir politiyofen türevidir. Politiyofen türevi polimerler, güneş ışığını iyi soğuran polimerlerdir. Ayrıca P3HT, 1.9 eV ile 2.0 eV arasında bir bant aralığına sahiptir ki, bu durum en güçlü güneş ışığına oldukça uygun bir yapıdır.

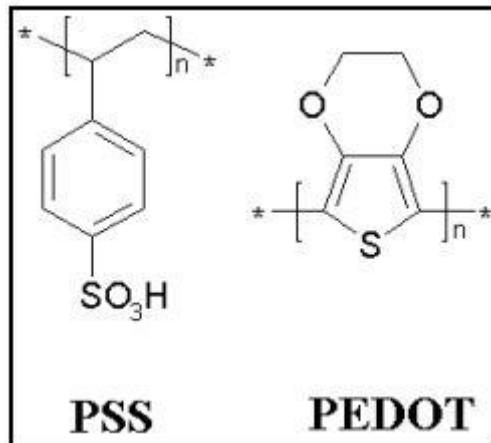
PCBM (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6, 6] C_{61}), organik çözücülerde çok iyi çözünen n-tipli bir malzemedir. Fulleren türevidir. Yüksek delik mobilitesi sayesinde, birçok organik fotovoltaik hücrelerde elektron akseptör olarak rol oynar. PCBM ve P3HT'in kimyasal yapısı Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 PCBM ve P3HT'nin kimyasal yapısı [64]

Bu çalışmada aktif tabaka olarak yukarıda özelliklerinden bahsedilen P3HT ve PCBM malzemeler kullanıldı. Daha önce laboratuvarımızda yapılan denemeler sonucu en iyi verimi veren P3HT:PCBM oranı olan 1:0.55 oranı kullanılarak P3HT:PCBM çözeltisi hazırlandı. Bu çözeltiler, tamamen karışmaları için manyetik karıştırıcıda bekletildi. Hazırlanan P3HT:PCBM:CB çözeltisi, CdS kaplı ITO camlar üzerine damlatma (drop casting) yöntemi kullanılarak kaplandı. Böylece örnekler, PEDOT:PSS çözeltisi kaplamaya hazır hale getirildi.

PEDOT:PSS; polistren sulfonik asit (PSS) kaplanmış polietilen dioksitiyofen (Pedot) olarak bilinen saydam bir iletken polimerdir. Su bazlı ve metalik bir malzemedir. Şekil 6.7'de kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 6.7 PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı

PEDOT:PSS, ITO yüzeyinin yüzey kalitesini artırır, pürüzlü bir yapıya sahip olan ITO malzemenin yüzey pürüzlülüğünü azaltır, delik enjeksiyonunu kolaylaştırır ve ayrıca deliklerin elektrotlara taşınmasında enerji açısından bir basamak görevi görür.

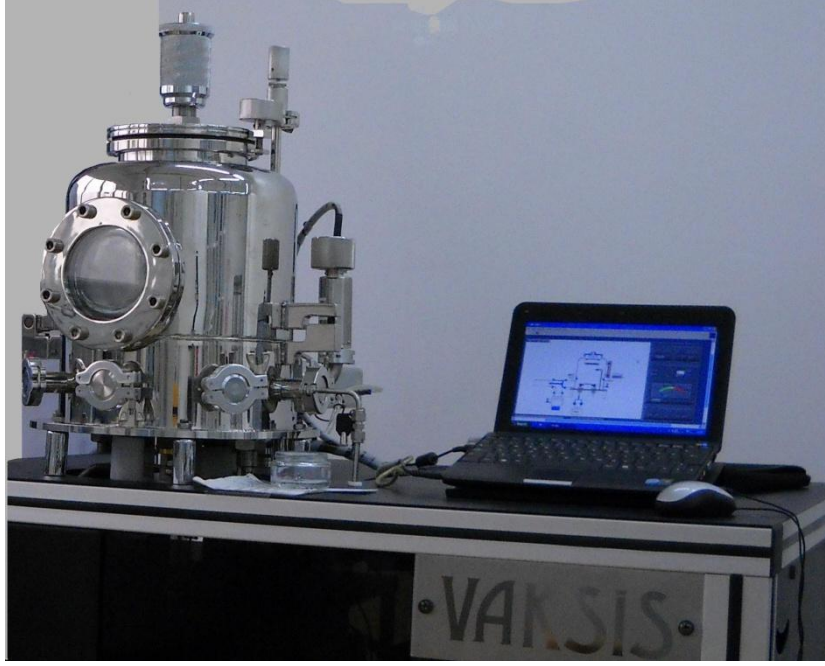
Bu çalışmada; PEDOT:PSS'in pillerin verimine etkisinin incelenebilmesi için, PEDOT:PSS tabakası aktif tabaka üzerine dönel kaplama yöntemi ile kaplandı.



Şekil 6.8 Dönel kaplama cihazı (Spin Coater)

6.1.4 Metal Buharlaştırması

Bu çalışmanın en son aşamasında; elde ettiğimiz örneklerin en üst katmanına, ITO'dan sonra bir diğer elektrodu oluşturacak olan Ag (gümüş) ve Au (altın) elementleri, 10^{-5} mbar basınç altında 100 nm kalınlığında buharlaştırıldı. Metalleri buharlaştırmak için Vaksis firmasından alınan metal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Termal metal buharlaştırma cihazının fotoğrafı Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



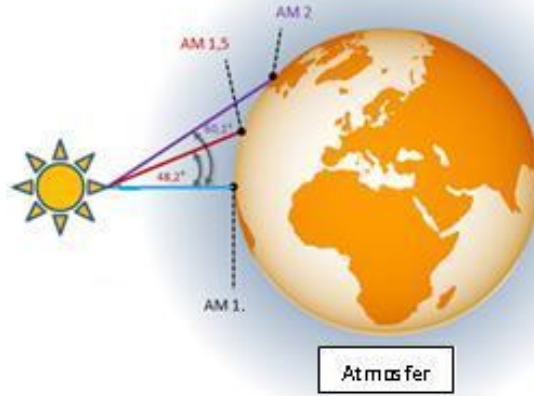
Şekil 6.9 Termal buharlaştırma cihazı

6.2 Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu

Hazırlanan fotovoltaik hücreleri karakterize etmek için birkaç farklı yöntem kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemlerin özellikleri ile ilgili bilinmesi gereken temel bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

6.2.1 Fotovoltaik Hücrelerin Karakterizasyonu İçin Gereken Standart Şartlar

Dünyanın farklı yerlerindeki laboratuvarlarda üretilen ve karakterize edilen fotovoltaik hücrelerin karşılaştırılabilmesi için, ölçümlerin tamamı standart test şartlarında yapılmalıdır. Bu şartlara göre ölçümü yapılan fotovoltaik hücrelerin sıcaklığı 25°C, ölçüm alınan ışınımın şiddeti 1000 W/m² ve spektral dağılımı 1.5 AM olmalıdır.



Şekil 6.10 Hava kütlesi (AM) biriminde, atmosfer içerisinde güneş radyasyonunun yol uzunluğu, zenit noktasından itibaren açı ile artar. 0° , zenit noktası; 48.2° , 1.5 AM; 60.2° ise 2.0 AM'dir. Bunlar zenit noktasından itibaren ölçülen açılardır. Literatürde, fotovoltaik hücre verimi ölçümleri için, 1.5 AM spektrumu standart spektrum olarak tercih edilir

Hava Kütlesi (AM); Güneş, Zenith noktasına θ° konumunda iken güneş ışınlarının atmosferde aldığı yolun; Güneş, Zenith konumunda iken güneş ışınlarının atmosferde aldığı yola oranıdır. Bu durum (6.2) eşitliği ile gösterilmektedir.

$$AM \approx \frac{1}{\cos\theta}$$

(6.2)

Yapımı tamamlanan fotovoltaik hücreler, bu standart şartlardaki solar simülator yardımıyla karakterize edildi. Karakterize edilmeden önce, literatürde kullanılan 1.5 AM hava kütlesine kalibre etmek için Si fotovoltaik hücre ile cihazın 1 SUN'a ayarlanması gerekmektedir. 1 SUN'ın yaklaşık 1.5 AM hava kütlesine denk geldiği kabul edilmiştir. Elde edilen fotovoltaik hücrelerin, Solar Simülator altında (Şekil 6.11) ve bilgisayar kontrolünde, Keithly 2400 SMU kullanılarak I-V karakteristiği ölçüldü. Bu ölçümü almak için ışık altında ve karanlık ortamda gerilimin akım ile değişimi incelendi.



Şekil 6.11 Solar Simülatör

6.2.2 AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu)

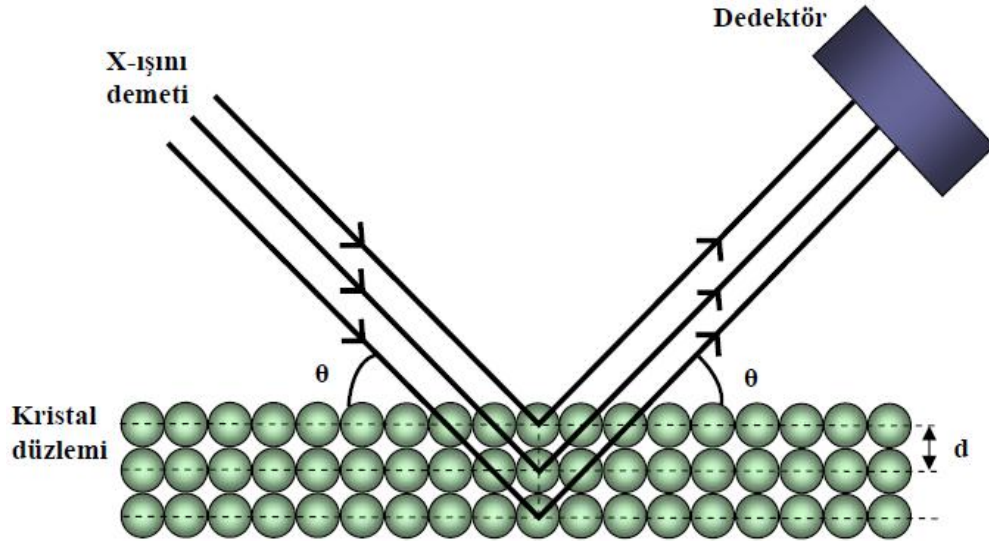
Yüzey; maddenin, çevresi ile arasında bulunan arabirim olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir katı yüzeyi atomsal olarak düz bir yüzeye sahiptir. Ancak gerçekte böyle bir ideal yapı bulunmamaktadır. Tüm gerçek katı yüzeyleri değişik boyutlarda yüzey pürüzlülüklerine sahiptir [110]. Malzemelerin yüzey pürüzlülüğü ve kimyası; malzeme üretim koşulları ve yüzeye uygulanan çeşitli yüzey işlemleri yardımı ile değiştirilebilir. Malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntem, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntü analizidir [107].

1980' lerde geliştirilen AFM, taramalı uç mikroskoplar serisinin bir üyesidir. AFM, sıvı ya da katı örneklerin yüzey topografisini nanometre seviyesinde görüntüleyebilen ve moleküller arası kuvvetleri ölçebilen bir sistemdir. Alete mikroskop denilse de çalışmasında ışığın doğrudan bir rolü yoktur. Aletin çalışma ilkesi, gerçekte dokunmaya dayanmaktadır. Neredeyse bir atoma kadar sivriltilmiş ucu ile bir yüzeydeki atomlara dokunulduğunda oluşan kuvvetlere dayanarak yüzeyin şeklini bulmak, yalnızca atomik kuvvet mikroskobu ile sağlanabilmektedir. AFM'nin en önemli özelliği, alışılmış elektron mikroskopisi tekniklerinde kaçınılmaz olan; özel örnek hazırlanması, vakum v.b. şartlara ihtiyaç duyulmadan, incelenen örnek yüzeyinin moleküler veya atomik seviyede üç boyutlu görüntüsünü verebilmesidir [107].

Bu çalışmada; 3 farklı kalınlıkta üretilen CdS filmlerin yüzey morfolojisini ve özelliklerini incelemek için de PARK XE-100E Complete markalı AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) cihazı kullanılmıştır.

6.2.3 X-Işını Kırınımı (XRD) Yöntemi

Kristal atomlarının geometrik düzeni ve aralarındaki mesafe hakkındaki çoğu bilgi XRD yöntemi ile elde edilebilir. X-ışını kırınımı, basit bir ifade ile bir kristal düzlemine gönderilen x-ışınlarının, kristalin atom düzlemlerine çarparak yansması olayıdır. Ancak buradaki yansıma ışığın bir ayna düzleminden yansması olayından çok farklıdır. Kırınım olayında, gelen x-ışınları kristal yüzeyinin altındaki atom düzlemlerine ulaşır, yani kırınım yüzeysel bir olay değildir. Düzensiz yapıda (amorft) bir kristal düzlemine gelen x-ışını demeti kristal düzlemlerine herhangi bir açıyla çarparsa, kırınım gerçekleşmez. Çünkü kristal düzlemlerinden yansıyan x ışınlarının aldıkları yolların uzunlukları farklı olduğundan, söz konusu ışınlar arasında faz farkı oluşur ve bu ışınlar birbirlerini iptal ederler. Bunun sonucu olarak herhangi bir kırınım (difraksiyon) piki gözlenmez.



Şekil 6.12 Bir kristal düzleminde x ışını kırınımının meydana gelişi [107]

X-ışını demetinin atom düzlemlerine Bragg açısı olarak bilinen belirli bir açı ile çarpması durumunda ise yansıyan ışınlar tarafından alınan yol, x ışınlarının dalgaboyunun (λ) tam katlarına eşit olacağından, ışınlar aynı faza sahip olur. Atom düzlemlerinden yansıyan x-ışınlarının aynı fazda olması durumunda kırınım deseni

oluşur. Şekil 6.12’de böyle bir kırınımın meydana gelişi gösterilmektedir. Kırınım deseni elde edebilmek için; x ışınlarının atom düzlemlerine çarpma açısı (θ), atom düzlemleri arasındaki uzaklık (d) ve gelen x ışınlarının dalga boyu (λ) arasında belirli bir bağıntının bulunması gerekir.

$$2d \sin\theta = n \lambda \quad (6.3)$$

(6.3) eşitliğinde gösterilen ve Bragg kanunu olarak bilinen bu bağıntı, x ışını kırınımı için gerekli koşulu ifade eder. Bir x ışını demetinin birbirine paralel atom düzlemlerine θ açısı altında çarpması durumunda kırınım meydana gelir. Yani kristal düzlemi, düzenli tek kristal yapısında ise, x ışınları kristal düzleminden aynı fazda saçılır. Farklı kristal düzlemlerinden yansıyan bu ışınlar dedektöre geldiğinde aynı fazda olduğu için kırınım deseni gözlenir [107].

Bu çalışmanın ölçümlerindeki yapısal analizde, literatürde verilen piklerin açıları kullanılarak, örgü parametreleri (6.4) eşitliği ile bulunmuştur. Düzlemlere ait (h,k,l) miller indisleri belirlendikten sonra yapıya ait örgü parametresinin belirlenmesinde (6.4) eşitliği kullanıldı. Bu denklemde a, örgü sabiti ve d_{hkl} , örgü düzlemleri arasındaki mesafedir. Hegzagonal bir kristal için;

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (6.4)$$

olarak verilir.

Tanecik büyüklüğü ise Debye-Scherrer;

$$D = \frac{0,9\lambda}{d \cos(\theta)} \quad (6.5)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir.

Burada λ ; x-ışınının dalga boyu, d; ilgilenilen yapıya ait XRD pikinin yarı yüksekliğinin tam açısal genişliğinin radyan cinsinden ifadesidir. θ ; ilgilenilen pikin Bragg yansıma açısıdır ve D; taneciklerin ortalama çapını vermektedir [111].

Kimyasal püskürtme yöntemiyle kaplanan farklı kalınlıklı filmlerin bu teknik ile karakterizasyonunda, $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ dalgaboyuna sahip Cu- K_{α} kaynaklı Panalytical Difraktometre XRD cihazı kullanıldı.

6.2.4 IPCE (Akıma DönüŖen Foton Verimi)

Işığın absorbe edilmesiyle oluŖan eksitonlar, donör-akseptör arayüzeyine yakın mesafede oluŖurlarsa yayılabilirler veya uygun elektrotlara sürüklenebilen serbest yük taşıyıcılarına ayrılabilirler. Fakat difüzyon uzunluğundan daha büyük bir mesafede oluŖurlarsa yeniden birleŖirler. İŖte bu ayrılma veya yeniden birleŖme olaylarının olduğu sürecin toplam verimliliği, elektrona dönüŖen foton verimi (IPCE) ile tanımlanır [85]. Daha açık bir ifade ile IPCE; belirli bir dalga boyunda (λ) fotovoltaiik hücrelerin aktif yüzeyi üzerine gelen foton sayısına ($n_{\text{foton}}(\lambda)$) karŖılıık oluŖan elektron-delik çifti sayısı ($n_{\text{elektron}}(\lambda)$) oranı olarak tanımlanmaktadır. Monokromatik ışınım altında foto-akım ölçümüyle, gelen fotonun elektrik akımına dönüŖüm verimi (IPCE) hesaplanabilmektedir (6.6).

$$IPCE = \frac{n_{\text{elektron}}(\lambda)}{n_{\text{foton}}(\lambda)} = \frac{\frac{J(\lambda)}{e}}{\frac{P_{\text{ışık}}(\lambda)}{h \cdot \nu}} = \frac{J(\lambda)}{\lambda \cdot P_{\text{ışık}}(\lambda)} \cdot \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \cdot J_{sc}}{P_{\text{ışık}} \cdot \lambda_{\text{gelen}}} \quad (6.6)$$

$J(\lambda)$; fotovoltaiik hücrelerin, λ dalga boyundaki ışık altında vermiŖ olduğu akım, $P_{\text{ışık}}(\lambda)$ ise; λ dalga boyunda elde edilen güçtür. Akıma dönüŖen foton verimi, fotovoltaiik hücrelerden dıŖarı çıkan uyarılmıŖ yük sayısının foton sayısına oranı olarak tanımlanır. Akıma dönüŖen foton verimi, soğurulan fotonlardan yüke dönüŖenlerin sayısını belirten iç kuantum veriminden küçüktür. Bunun nedeni yansıma, saçılma ve yeniden birleŖmenin neden olduğu kayıplardır. İç kuantum veriminin aksine dıŖ kuantum verimi doğrudan kısa devre akımı I_{sc} ve ışık yoğunluğu J_0 (mW/cm^2) ile belirlenebilir [85]. Ŗekil 6.13'de IPCE cihazı gösterilmiŖtir.



Şekil 6.13 IPCE Cihazı

6.3 CdS İnce Film Kalınlık Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada $\text{CdCl}_2 : (\text{NH}_2)_2\text{CS} : \text{H}_2\text{O}$ çözeltisi kullanılarak kimyasal püskürtme (spray proliz) yöntemi ile kaplanan CdS filmlerin kalınlıkları Dektak Profilometer cihazı ile; 330 nm, 1150 nm ve 2815 nm olarak ölçüldü. Böylece farklı CdS ince film kalınlıklarının performansa etkisi incelendi.

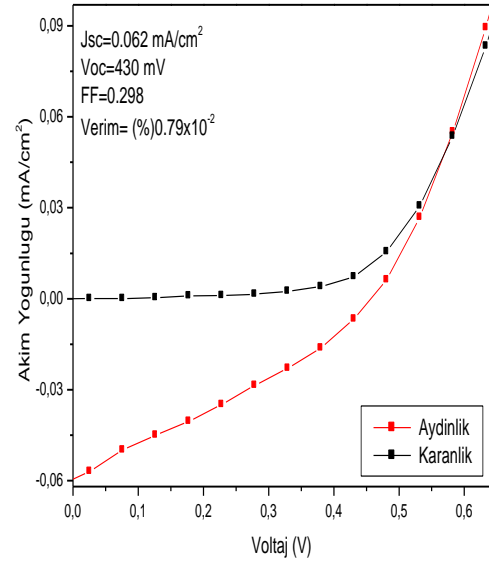
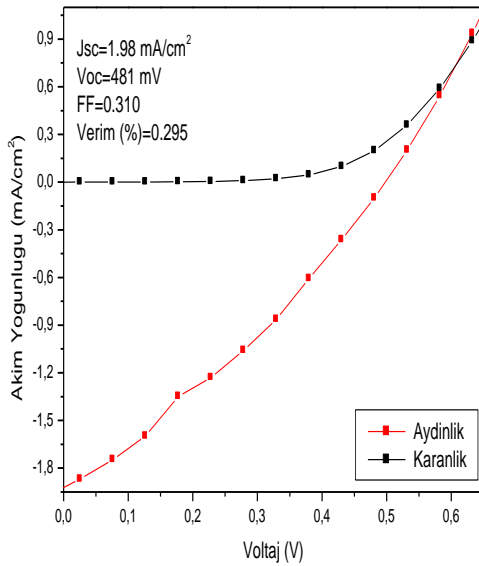
6.3.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu ve IPCE Sonuçları

Fotovoltaik hücrelerin fotovoltaik özellikleri güneş ışığını simüle eden solar simülatör altında hava kütlesi 1.5 AM, 100 mW/cm^2 şiddet değerinde, güneş ışığı ITO yüzey tarafından gelecek şekilde karakterize edilmiştir. Fotovoltaik hücreler, ITO/CdS/P3HT:PCBM/Ag konfigürasyonuna göre hazırlanmıştır. Buna referans (REF) olarak ITO/CdS/P3HT/Ag konfigürasyonunda örnekler hazırlanmıştır. Şekil 6.14 (a), 330 nm kalınlığında CdS kaplanarak hazırlanmış fotovoltaik hücrelerin I-V eğrilerini göstermektedir. Bu tür aygıtlarda $J_{sc}=1.98 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,310$ ve $\eta=\%0,295$ olarak hesaplanmıştır. 1150 nm kalınlığında CdS kaplanarak hazırlanmış fotovoltaik hücrelerin I-V eğrileri ise Şekil 6.14 (b)'de gösterilmektedir. Bu aygıtlarda $J_{sc}=0.98 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,275$ ve $\eta=\%0,130$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.14 (c) ise, 2815 nm kalınlığında CdS

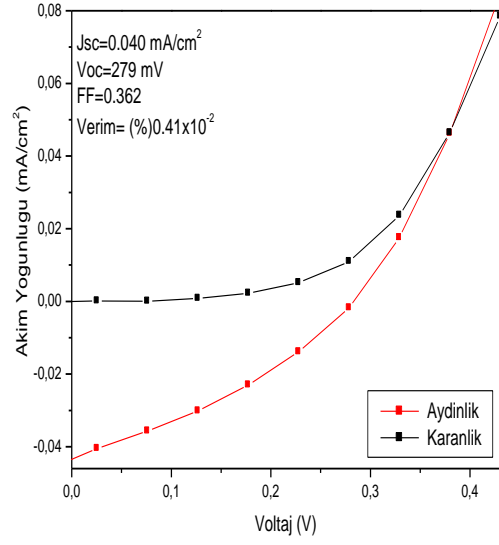
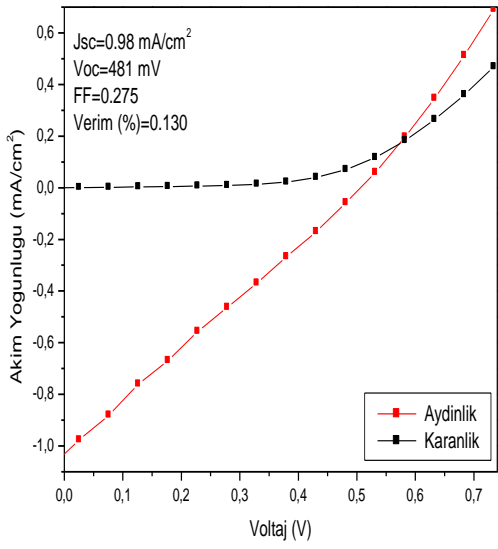
kaplanarak hazırlanmış fotovoltaiik hücrelerin I-V eğrilerini göstermektedir. Bu aygıtlarda ise $J_{sc}=0.43 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=431 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,179$ ve $\eta=\%0,033$ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.1’de bu sonuçlara, referans değerleri ile birlikte, yer verilmiştir.

Çizelge 6.1 Farklı CdS kalınlıkları sonucunda elde edilen değerler

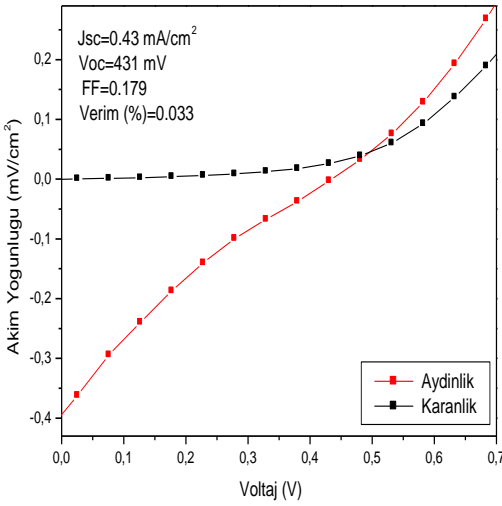
CdS Kalınlığı (nm)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
330	1.98	481	0.310	0.295
330(REF)	0.062	430	0.298	0.79×10^{-2}
1150	0.98	481	0.275	0.130
1150(REF)	0.040	279	0.362	0.41×10^{-2}
2815	0.43	431	0.179	0.033
2815(REF)	0.032	329	0.324	0.34×10^{-2}



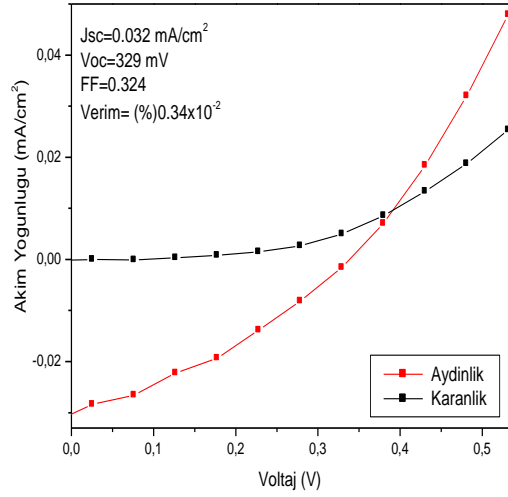
(a)



(b)



(c)

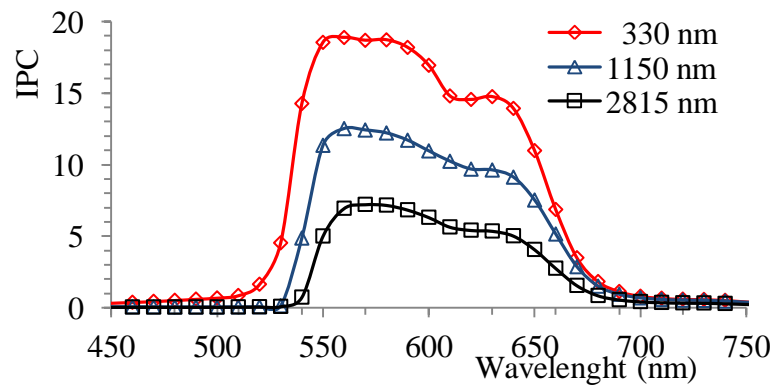


Şekil 6.14 a) 330 nm kalınlıklı CdS ile hazırlanan tersine çevrilmiş hacim heteroeklemlı fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir; b) 1150 nm kalınlıklı CdS ile hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir; c) 2815 nm kalınlıklı CdS ile hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir

İki katlı heteroeklem fotovoltaik hücrelerde güneş ışığının büyük bir kesrinin aktif tabaka tarafından soğurulabilmesi için, ilk katmanın ince olması gerekir. Bu çalışmada hazırlanan fotovoltaik hücrelerde de, hem boşluk engelleyici katman hem de pencere

tabakası olarak görev alan CdS tabakası, ışığın aktif tabakaya geçerken karşılaştığı ilk katmandır. Dolayısıyla CdS kalınlığı arttıkça, fotovoltaik hücre performansında azalma gözlenmesi öngörülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da bu öngörüü doğrulamaktadır. Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi CdS film kalınlığı arttıkça, fotovoltaik hücre kalitesini gösteren FF’de azalma meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak verimde de yüksek oranda düşüş gözlenmiştir. Buna göre en yüksek verim, diğerlerine nazaran en ince kalınlığa (330 nm) sahip CdS katmanı ile hazırlanan aygıtta %0.295 olarak gözlenmiştir. %0.033 değerindeki en düşük verim ise, 2815 nm kalınlıklı CdS katmanı ile hazırlanan aygıtta ölçülmüştür. Bu sonuçlar, referans fotovoltaik hücrelerin performansları ile kıyaslandığında, P3HT:PCBM karışımının aktif tabaka olarak kullanılması halinde verimde ciddi artışların olduğunu göstermiştir.

Fotovoltaik hücreler ile ilgili IPCE (incident photon to current efficiency) ölçümleri de yapılmıştır. Gelen fotonun ne kadarının elektrona dönüştüğünün ölçütü olan IPCE özellikle organik fotovoltaik sistemlerde çok sık ölçülen ve sistemin çalışması hakkında çok önemli bilgiler veren bir tekniktir. IPCE, soğurulan farklı enerjideki fotonların yüzde kaçının elektrotlara ulaşarak yük yaratılmasına katkı sağladığını gösterir. Ayrıca, aygıt yapısında kullanılan malzemelerin soğurma spektrumları IPCE ile kıyaslandığında kullanılan malzemelerin hangilerinin yük yaratılma mekanizmasına katkıda bulunduğu belirlenebilir. Şekil 6.15’de, üç farklı kalınlıklı (330 nm, 1150 nm ve 2815 nm) CdS ince filmlerle hazırlanan tersine çevrilmiş hacim heteroeklemlerli fotovoltaik hücrelerin IPCE eğrileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

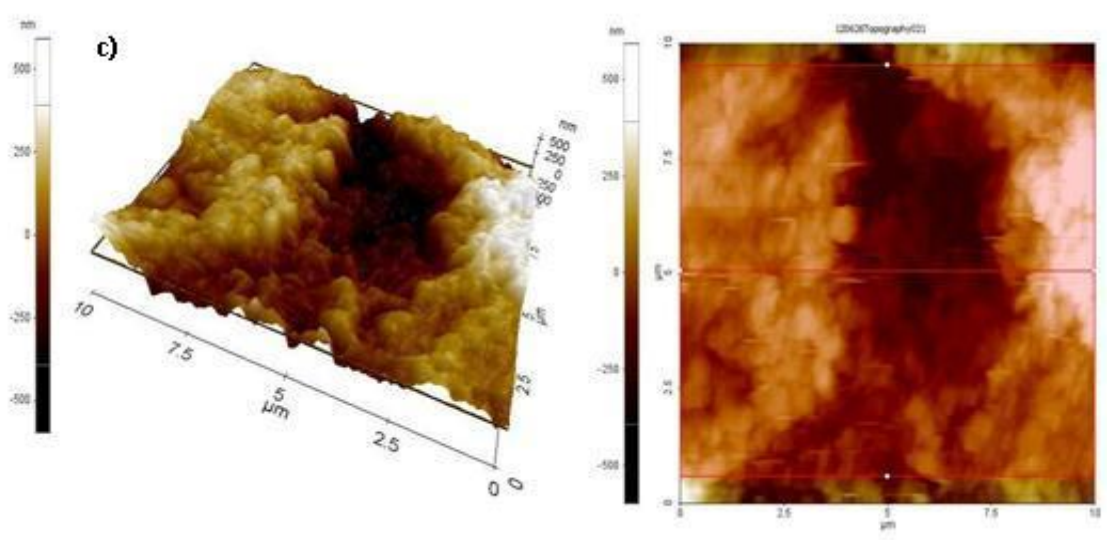
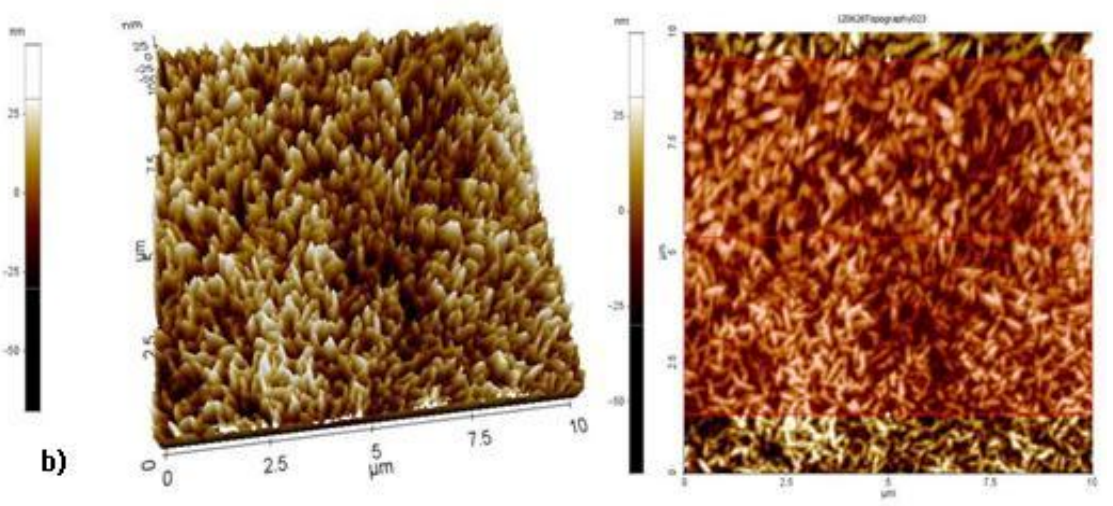
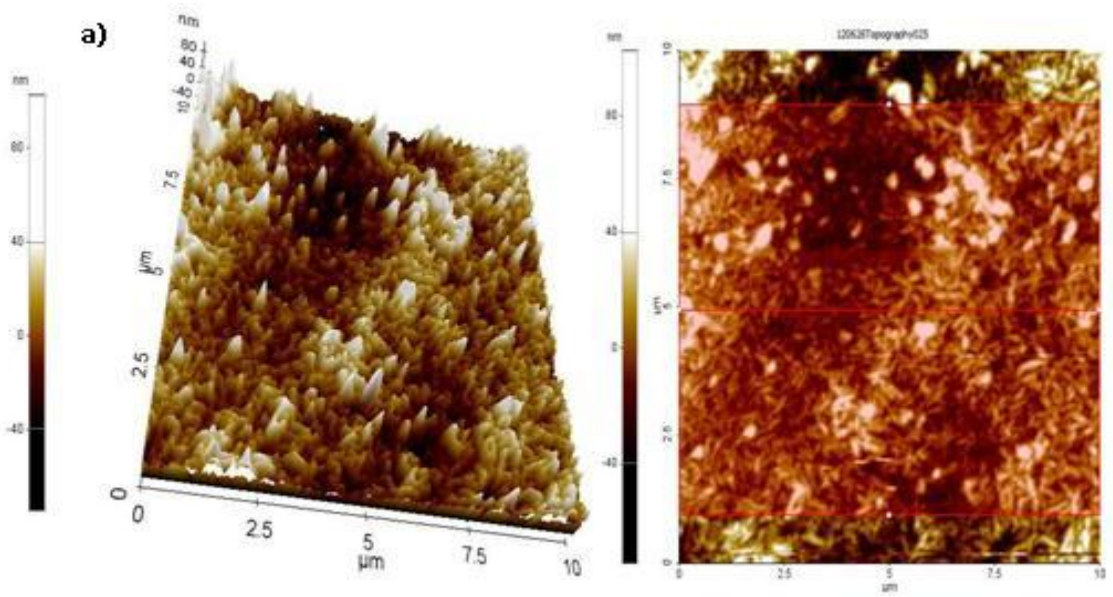


Şekil 6.15 330 nm, 1150 nm ve 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmler kullanılarak hazırlanan fotovoltaik hücrelerin IPCE eğrileri

330 nm, 1150 nm ve 2815 nm gibi 3 farklı kalınlıkta CdS ince filmleri kullanılarak hazırlanan ITO/CdS/P3HT:PCBM/Ag konfigürasyonunda tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerin %IPCE değerleri 570 nm'de pik yapmıştır. %IPCE'ler sırasıyla %19, %13 ve %8 civarında ölçülmüştür. Soğurma spektrumu ise 450 nm ile 750 nm arasında değişiklik göstermiştir.

6.3.2 CdS İnce Filmlerin AFM Görüntüleri

Fotovoltaik performansın CdS ince filmlerin morfolojisi ile olan bağlantısını inceleyebilmek için AFM (atomik kuvvet mikroskobu) görüntüleri alınmıştır. AFM görüntülerindeki yüzey pürüzlülüğü hücre performansını etkilemektedir. Resimlerde gösterilen skala yükseklik skalasıdır. Yükseklik skalası olarak adlandırılan veriye yüzey pürüzlülüğünün ölçüsünü gösteren bir parametre olarak bakılabilir. Elde edilen AFM resimleri 10 µm x 10 µm boyutlarında çekilmiştir. 330 nm, 1150 nm ve 2815 nm kalınlığında CdS ince filmlerin AFM resimleri Şekil 6.16'da gösterilmiştir.

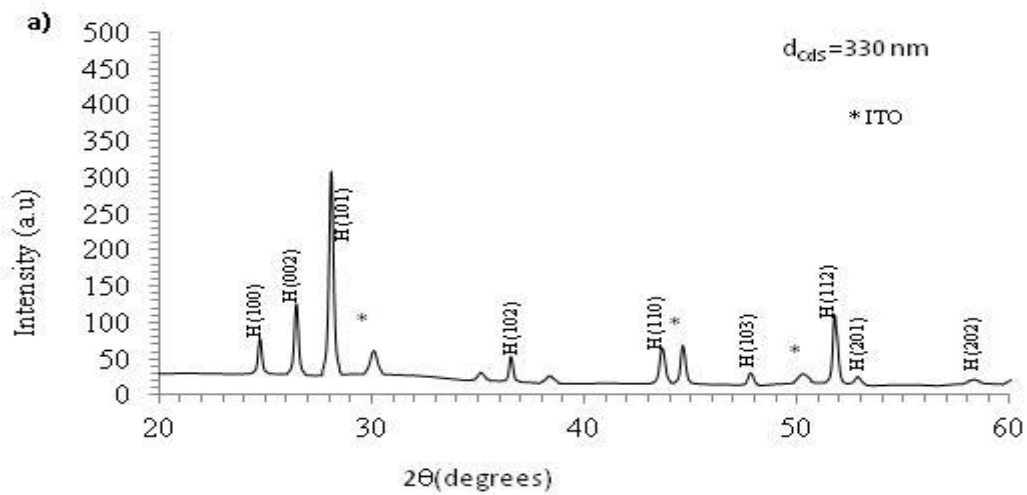


Şekil 6.16 a) 330 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin AFM görüntüleri b) 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin AFM görüntüleri c) 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin AFM görüntüleri

Şekil 6.16’da görüldüğü gibi, yükseklik skalası değerinden okunan büyüklüklere göre, CdS ince filmlerin arasında en pürüzlü yüzeye sahip olanı 2815 nm kalınlığında hazırlanan filmidir. 1150 nm kalınlığında CdS ince filminin yükseklik skalasının 330 nm kalınlıklı CdS ince filminin yükseklik skalasından az olduğu görülmektedir. Fakat bu yükseklikler, 330 nm kalınlıklı filmde seyrek iken 1150 nm kalınlıklı filmde hemen hemen her yerde mevcuttur. Dolayısıyla, güneş ışığının 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmi ile hazırlanan fotovoltaiik hücrelere nüfuz etmesi, 330 nm kalınlıklı CdS ince filmi ile hazırlanan fotovoltaiik hücrelere göre daha zordur. Hücrelerin performansı da bu tespiti doğrulamaktadır. Deney sonuçları yüzey görüntüleriyle uyumlu olup 330 nm kalınlıklı CdS ince filminin kullanıldığı hücre en yüksek güç dönüşüm verimine sahiptir.

6.3.3 CdS İnce Filmlerin XRD Desenleri

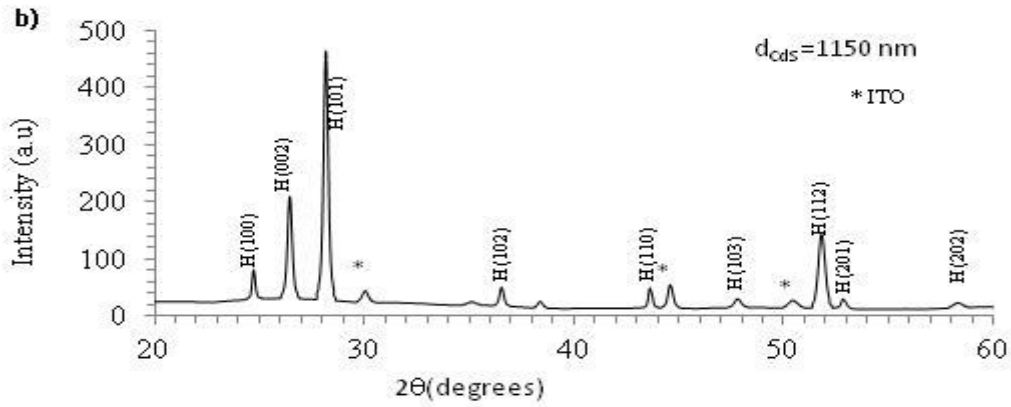
Kimyasal püskürtme yöntemiyle kaplanan farklı kalınlıklı filmlerin bu teknik ile karakterizasyonunda, $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ dalgaboyuna sahip Cu-K α kaynaklı Panalytical Difraktometre XRD cihazı kullanılmıştır. Şekil 6.17 (a)’da, 330 nm kalınlıklı CdS ince filminin X-ışını kırınım deseni gösterilmektedir.



Şekil 6.17 (a) 330 nm kalınlıklı CdS ince filmin XRD eğrisi

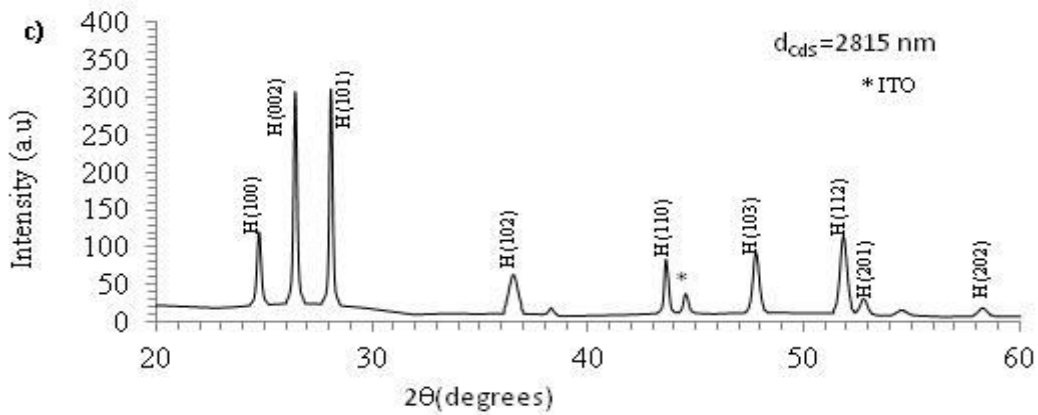
Bu kırınım deseni üzerinde, şiddetleri ve genişlikleri birbirinden farklı olan pikler gözlenmektedir. Gözlenen piklerin hekzagonal CdS yapısına ait olduğu ve bu piklerin H(100), H(002), H(101), H(102), H(110), H(103), H(112), H(201) ve H(202) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Burada, $2\theta=28.2^\circ$ 'deki pik, diğer piklere göre daha şiddetlidir.

Şekil 6.17 (b)'de, 1150 nm kalınlıklı CdS ince filminin X-ışını kırınım deseni gösterilmektedir.



Şekil 6.17 (b) 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmin XRD eğrisi

Şekil 6.17 (b)'de, şiddetleri ve genişlikleri birbirinden farklı olan pikler gözlenmektedir. Gözlenen piklerin hekzagonal CdS yapısına ait olduğu ve bu piklerin H(100), H(002), H(101), H(102), H(110), H(103), H(112), H(201) ve H(202) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Burada, $2\theta=28.2^\circ$ 'deki pik, diğer piklere göre ve 330 nm kalınlıklı CdS ince filminden bu açıda elde edilen pike göre daha şiddetlidir.



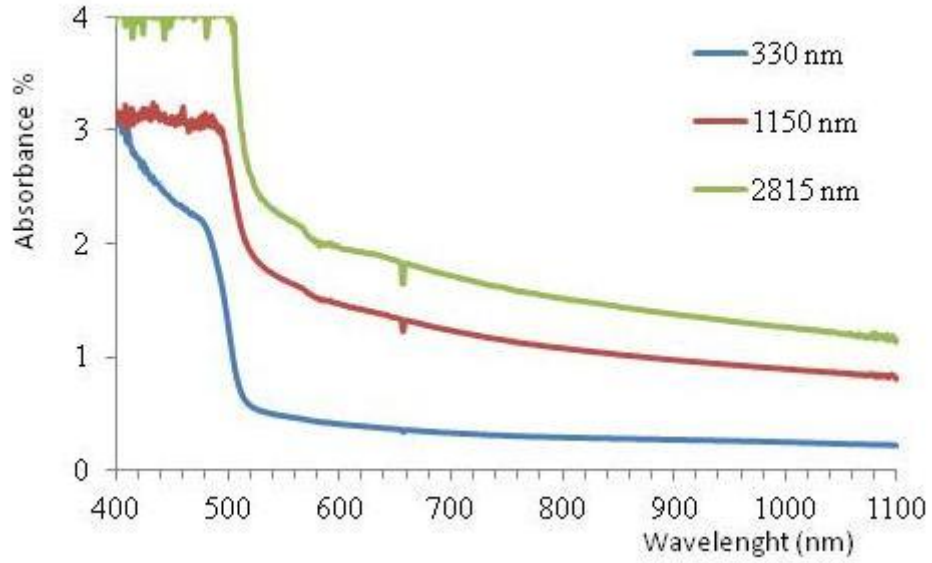
Şekil 6.17 (c) 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmin XRD eğrisi

Şekil 6.17 (c)'de, şiddetleri ve genişlikleri birbirinden farklı olan pikler gözlenmektedir. Gözlenen piklerin hegzagonal CdS yapısına ait olduğu ve bu piklerin H(100), H(002), H(101), H(102), H(110), H(103), H(112), H(201) ve H(202) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Burada, $2\theta=26.6^\circ$ ve $2\theta=28.2^\circ$ 'deki pikler, diğer piklere göre daha şiddetlidir. 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmlerine ait pik şiddetleri, 330 nm ve 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmlerinin piklerinden daha şiddetlidir.

6.3.4 CdS İnce Filmlerin Soğurma Eğrileri

Bir yarıiletken üzerine foton gönderildiğinde; atomların elektronları ile fotonların etkileşmesi sonucu soğurma (absorpsiyon), geçirgenlik, yansıma ve kırılma gibi bazı optik olaylar meydana gelir. Bir fotonun soğurulması veya geçirilmesi, fotonun enerjisine ve yarıiletkenin yasak enerji aralığına bağlıdır. Soğurma (absorpsiyon), bir malzemenin içerisindeki elektriksel yüklerin malzeme üzerine düşürülen elektromanyetik dalgalarla etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan enerji kaybı olarak tanımlanmaktadır [112]. Soğurma olayında, yarıiletken malzeme üzerine gelen bir fotonun enerjisi, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya ondan daha büyük olduğunda, yarıiletkenin değerlik bandındaki bir elektron bu fotonu soğurur ve değerlik bandından iletim bandına geçer. Malzeme üzerine gönderilen fotonlar, bir elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine uyarmak için yeterli enerjiye sahip değillerse, soğurulma yerine geçirilirler ve malzeme saydam olarak davranır. Yani fotonlar, bir elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarmak için yeterli enerjiye sahip olmadıklarında soğurma olayı gerçekleşmez. Bu durumda yarıiletken, saydam yani geçirgen davranış gösterir. Bu yüzden yarıiletkenler kısa dalgaboylu fotonlar için soğurucu, uzun dalgaboylu fotonlar için ise saydamdırlar [113].

Bu çalışmada kullanılan 3 farklı kalınlıklı CdS ince filmlerin absorbans değerlerinin dalgaboyuna göre değişim grafikleri Agilent 8453 markalı UV-Vis cihazı ile elde edilmiş ve Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.18 300 nm, 1150 nm ve 2850 nm kalınlıklı CdS ince filmlerin soğurma eğrileri Şekil 6.18’de CdS filminin soğurma spektrumu gösterilmektedir. Absorbans değerleri; 330 nm, 1150 nm ve 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmleri için sırasıyla, yaklaşık 500 nm, 505 nm ve 510 nm dalgaboyu civarında yüksek olup malzemeler bu dalgaboyları için güçlü bir soğurucu özellik göstermiştir. Yine kalınlıklara bağlı olarak absorbans değerleri sırasıyla, yaklaşık 505 nm, 510 nm ve 515 nm dalgaboylarına doğru hızla düşmüştür. Örnekler, bu dalgaboylarından sonra daha büyük dalgaboyları için iyi bir geçirgen özelliği göstermişlerdir.

6.4 PEDOT:PSS Etkisinin İncelenmesi

Bir önceki bölümde bahsedilen 330 nm, 1150 nm ve 2815 nm kalınlığında CdS ince film kaplama ve ardından aktif tabaka kaplama işlemleri gerçekleştirildikten sonra isopropanol ile seyreltilmiş PEDOT:PSS çözeltisi dönele kaplama yöntemi ile 1500 RPM’de aktif tabaka üzerine kaplandı. İkinci elektrot olarak Ag metali örnek üzerine buharlaştırıldı.

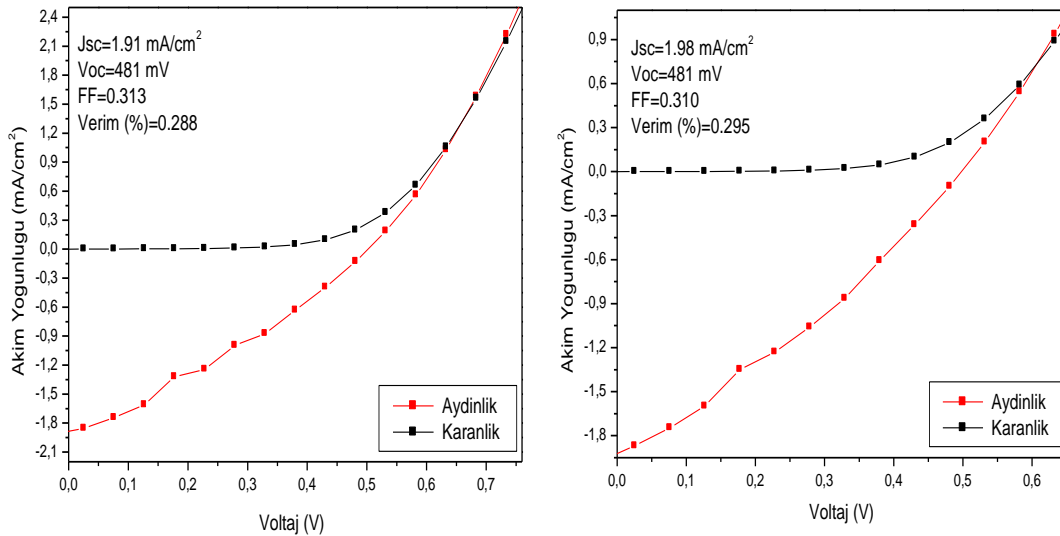
6.4.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu ve IPCE Sonuçları

Fotovoltaik hücreler, ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonuna göre hazırlanmıştır. 330 nm kalınlığında CdS ile hazırlanmış PEDOT:PSS’li aygıtlarda $J_{sc}=1.91 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,313$ ve $\eta=\%0,288$ olarak hesaplanmıştır. 1150 nm kalınlığında CdS kaplanarak hazırlanmış PEDOT:PSS’li fotovoltaik hücrelerde $J_{sc}=1.54 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,255$

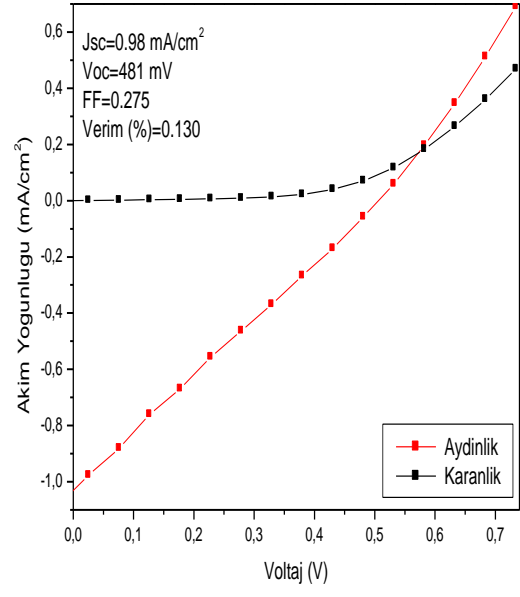
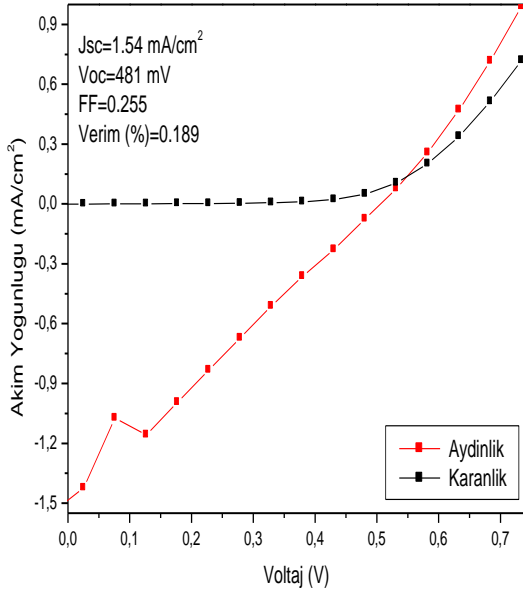
ve $\eta=0,189$ olarak hesaplanmıştır. 2815 nm kalınlığında CdS kaplanarak hazırlanmış PEDOT:PSS'li fotovoltaik hücrelerde ise $J_{sc}=1.39 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,250$ ve $\eta=0,167$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Çizelge 6.2'de PEDOT:PSS'in yokluğundaki değerler ile karşılaştırmalı olarak verilmiş ve Şekil 6.19'da ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag fotovoltaik hücrelerin I-V eğrileri gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 PEDOT:PSS'in varlığında ve yokluğunda elde edilen değerler

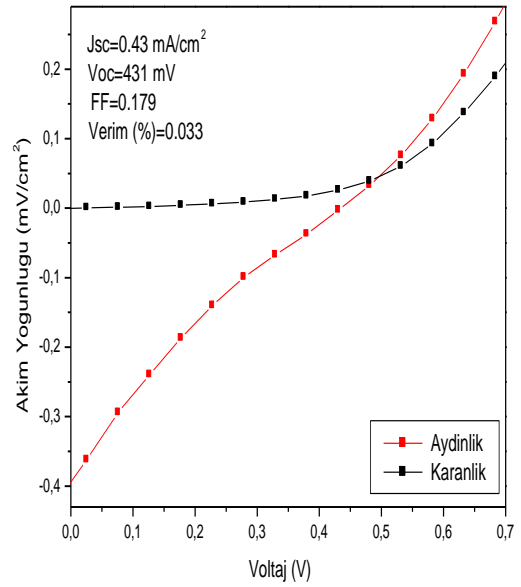
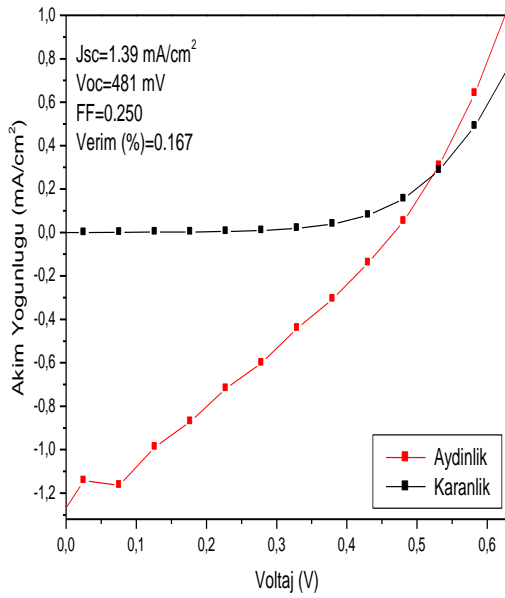
CdS Kalınlığı (nm)	PEDOT:PSS	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
330	Var	1.91	481	0.313	0.288
	Yok	1.98	481	0.310	0.295
1150	Var	1.54	481	0.255	0.189
	Yok	0.98	481	0.275	0.130
2815	Var	1.39	481	0.250	0.167
	Yok	0.43	431	0.179	0.033



(a)



(b)

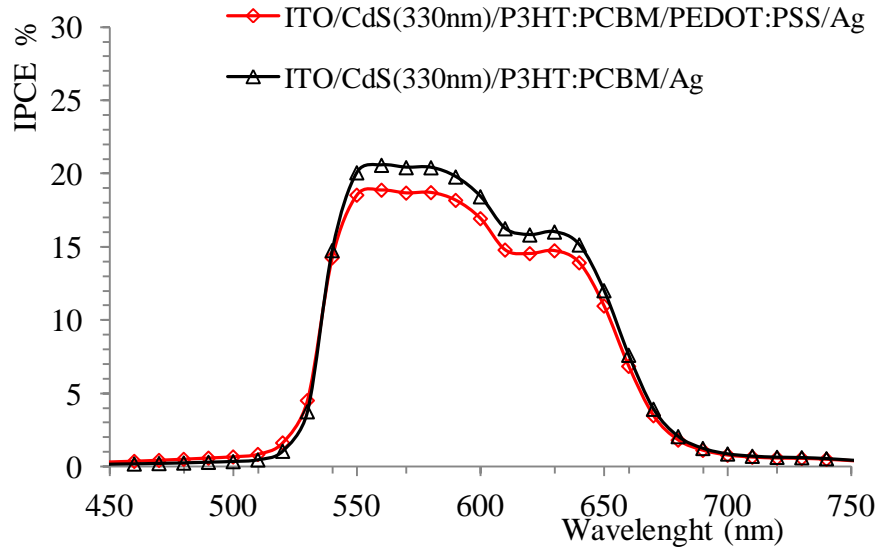


(c)

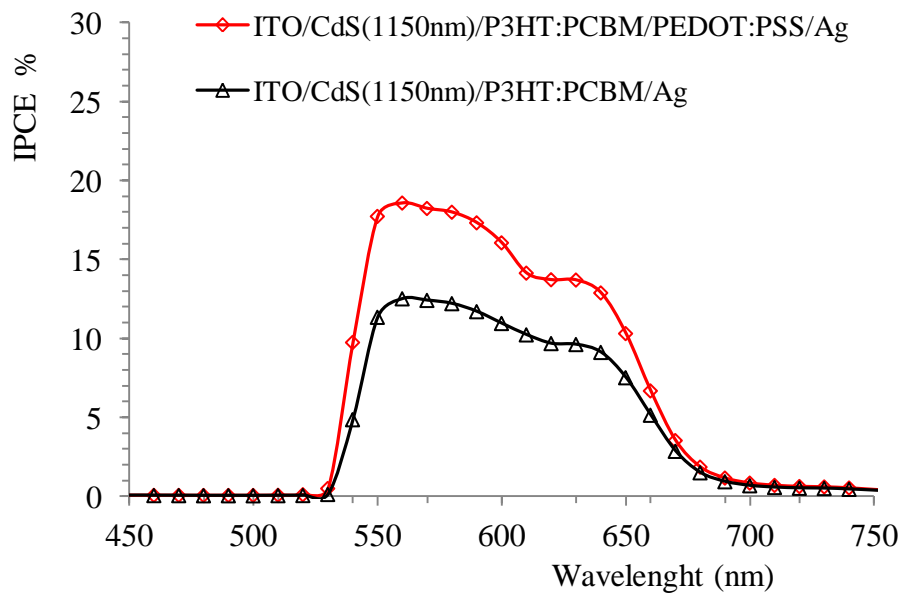
Şekil 6.19 a) ITO/330 nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri PEDOT:PSS kullanılmadan hazırlanan hücredir; b) ITO/1150 nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri PEDOT:PSS kullanılmadan hazırlanan hücredir; c) ITO/2815 nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri PEDOT:PSS kullanılmadan hazırlanan hücredir

Bu çalışmada; saydam bir iletken polimer olan PEDOT:PSS'in, aktif tabaka ve metal kontak arasında yük taşıyıcılarının daha iyi iletilmesi hususunda nasıl bir rol oynadığı da incelenmiştir. Buna göre en yüksek verim, diğerlerine nazaran en ince kalınlığa (330 nm) sahip CdS katmanı ile hazırlanan PEDOT:PSS'in kullanıldığı hücrede %0.288 olarak gözlenmiştir. %0.167 değerindeki en düşük verim ise, 2815 nm kalınlıklı CdS katmanı ile hazırlanan PEDOT:PSS'in kullanıldığı hücrede ölçülmüştür. PEDOT:PSS'in varlığının, 330 nm kalınlıklı CdS ince filmi ile hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin verimini azalttığı, 1150 ve 2815 nm CdS ince filmi ile hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin verimlerini de arttırdığı görülmüştür. Buna bağlı olarak PEDOT:PSS katmanının fotovoltaiik hücre performansı üzerinde net bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Fakat farklı kalınlıklı CdS ince filmi kullanılarak yapılan her fotovoltaiik hücrede bu etki denenmelidir.

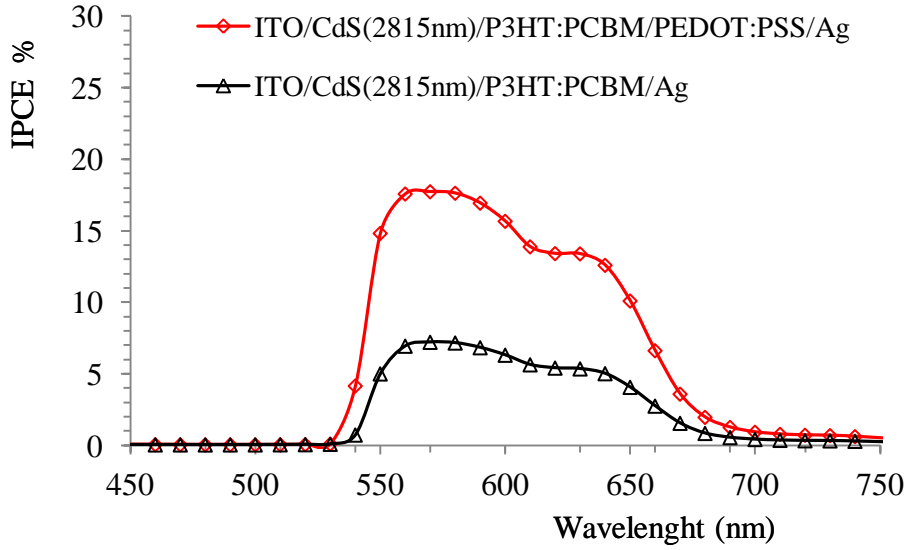
Fotovoltaiik hücreler ile ilgili IPCE ölçümleri de yapılmıştır. Şekil 6.20'de, üç farklı kalınlıklı (330 nm, 1150 nm ve 2815 nm) CdS ince filmlerle hazırlanan ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki fotovoltaiik hücrelerin IPCE eğrileri, PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrileri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.20 a) ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin ve PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması b) ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin ve PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması c) ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin ve PEDOT:PSS'in kullanılmadığı hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 6.20'deki hücrelerin tümünün %IPCE değerleri 570 nm'de pik yapmıştır. PEDOT:PSS kullanılmayan hücrelerin %IPCE'leri sırasıyla %19, %13 ve %8 civarında iken PEDOT:PSS'li hücrelerin %IPCE'leri sırasıyla %21, %19 ve %17 civarında ölçülmüştür. Soğurma spektrumu ise 450 nm ile 750 nm arasında değişiklik göstermiştir.

6.5 Metal Kontak Etkisinin İncelenmesi

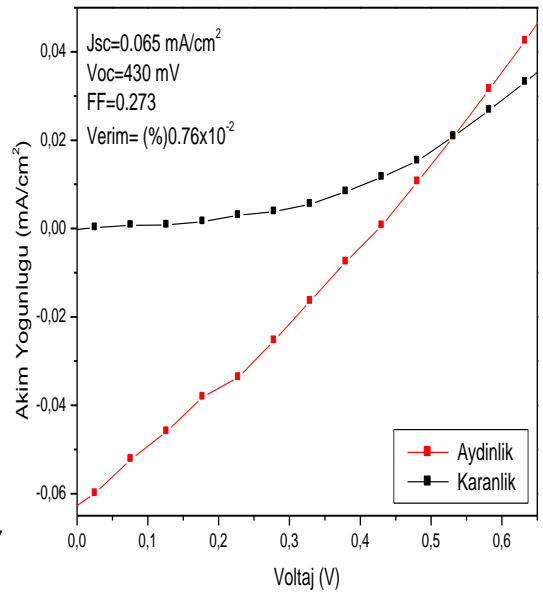
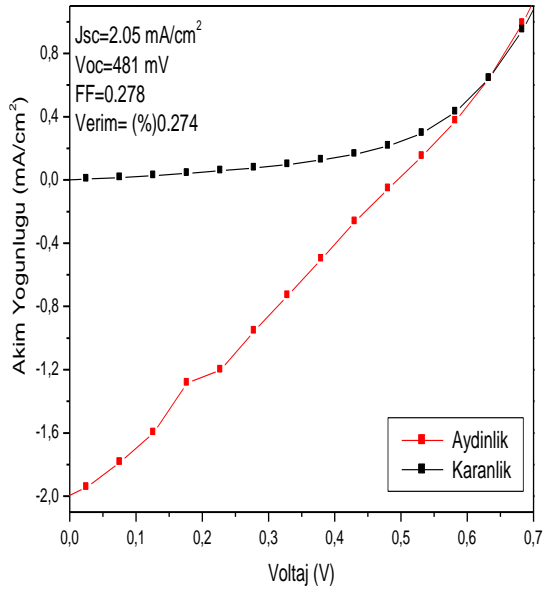
Önceki bölümlerde bahsedilen 330 nm, 1150 nm ve 2815 nm kalınlığında CdS ince film kaplama, ardından aktif tabaka kaplama ve bunun ardından da PEDOT:PSS kaplama işlemleri gerçekleştirildikten sonra ikinci elektrot olarak Au (Altın) metali örnek üzerine buharlaştırıldı. Böylece ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Metal kontak konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücre performansına, Ag ve Au elektrotlardan hangisinin daha olumlu etkide bulunduğu öğrenilmesi amaçlandı.

6.5.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu ve IPCE Sonuçları

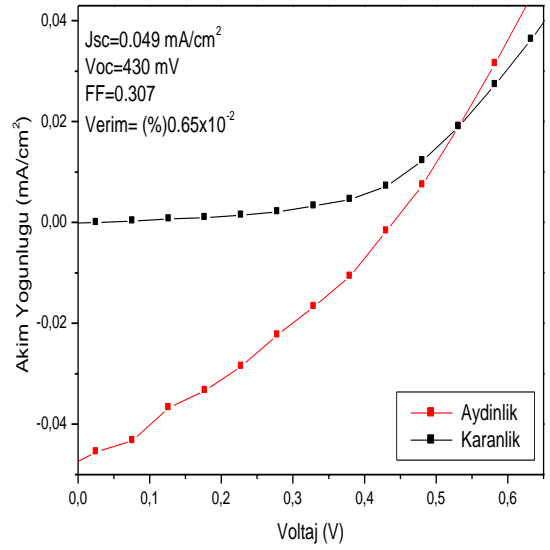
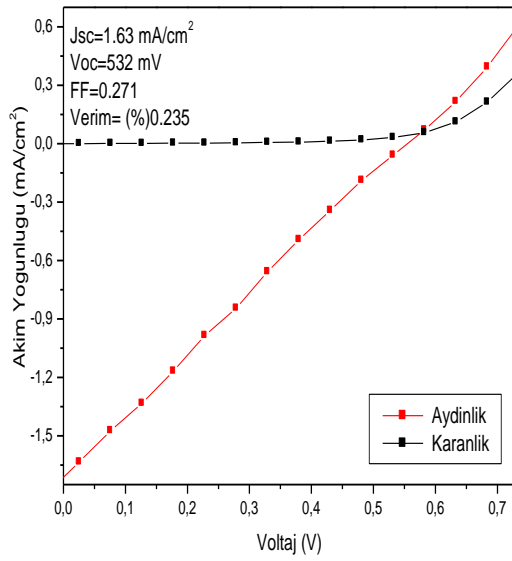
330 nm kalınlığında CdS ile hazırlanmış Au kontaklı aygıtlarda $J_{sc}=2.05 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,278$ ve $\eta=\%0,274$ olarak hesaplanmıştır. 1150 nm kalınlığında CdS kaplanarak hazırlanmış Au kontaklı fotovoltaik hücrelerde $J_{sc}=1.63 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=532 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,271$ ve $\eta=\%0,235$ olarak hesaplanmıştır. 2815 nm kalınlığında CdS kaplanarak hazırlanmış Au kontaklı fotovoltaik hücrelerde ise $J_{sc}=0.80 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,170$ ve $\eta=\%0,059$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Çizelge 6.3'de Ag ve Au kontaklı olmak üzere karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı çizelgede, ITO/CdS/P3HT/Au konfigürasyonundaki referans örneklerden elde edilen sonuçlara da yer verilmiştir. Şekil 6.21'de ise ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au fotovoltaik hücrelerin I-V eğrileri, referans eğrileri ile birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Au ve Ag kontakla oluşturulan aygıtlardan elde edilen sonuçlar

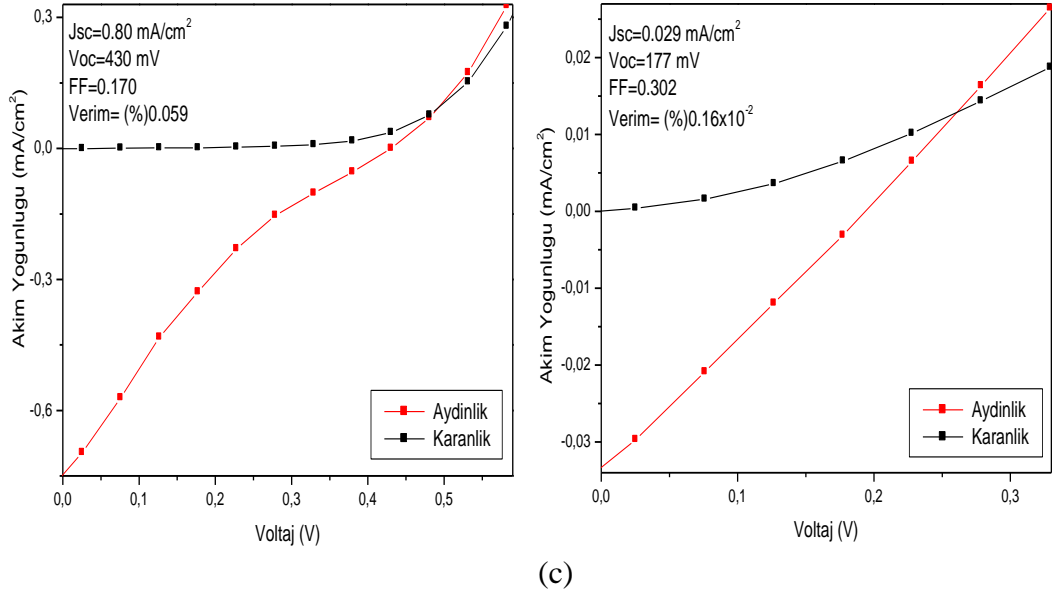
CdS Kalınlığı (nm)	İkinci Elektrot	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
330	Ag	1.91	481	0.313	0.288
	Au	2.05	481	0.278	0.274
	Au(REF)	0.065	430	0.273	0.76×10^{-2}
1150	Ag	1.54	481	0.255	0.189
	Au	1.63	532	0.271	0.235
	Au(REF)	0.049	430	0.307	0.65×10^{-2}
2815	Ag	1.39	481	0.250	0.167
	Au	0.80	430	0.170	0.059
	Au(REF)	0.029	177	0.302	0.16×10^{-2}



(a)



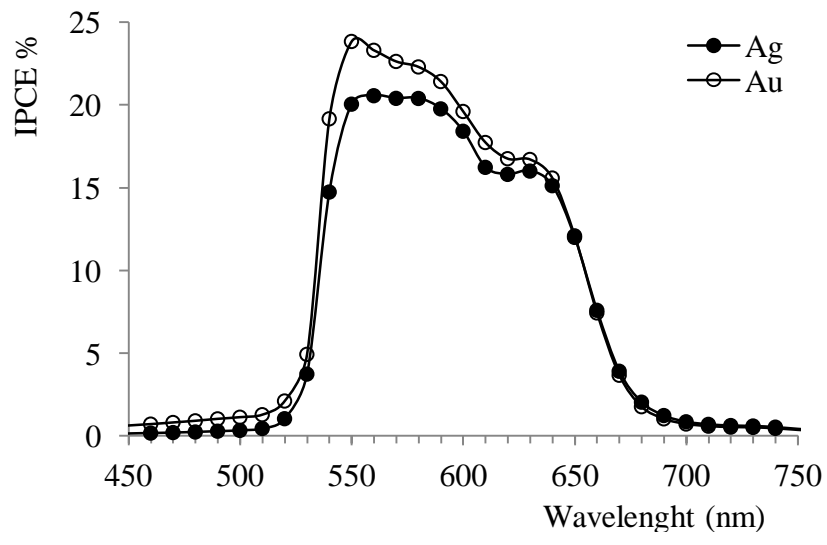
(b)



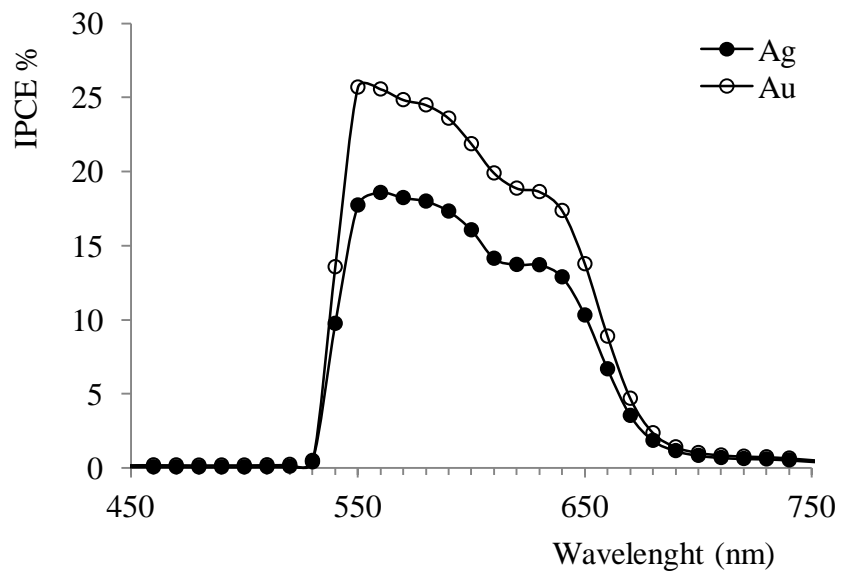
Şekil 6.21 a) ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri, sağdaki eğri referans eğrisidir; b) ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri; c) ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonunda hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin I-V karakteristikleri

Bu çalışmada; Ag ve Au metal kontaklardan hangisinin fotovoltaiik hücre performansı üzerinde daha etkin bir rol oynadığı hususunda inceleme yapılmıştır. Au metalinin, 330 nm ve 2815 nm kalınlıklı CdS ince filmleri ile hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin verimlerini kötüleştirdiği, 1150 nm kalınlıklı CdS ince filmi ile hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin verimini ise iyileştirdiği görülmüştür. Yani fotovoltaiik hücre performansı üzerinde metal kontak etkisinin olmadığı görülmüştür.

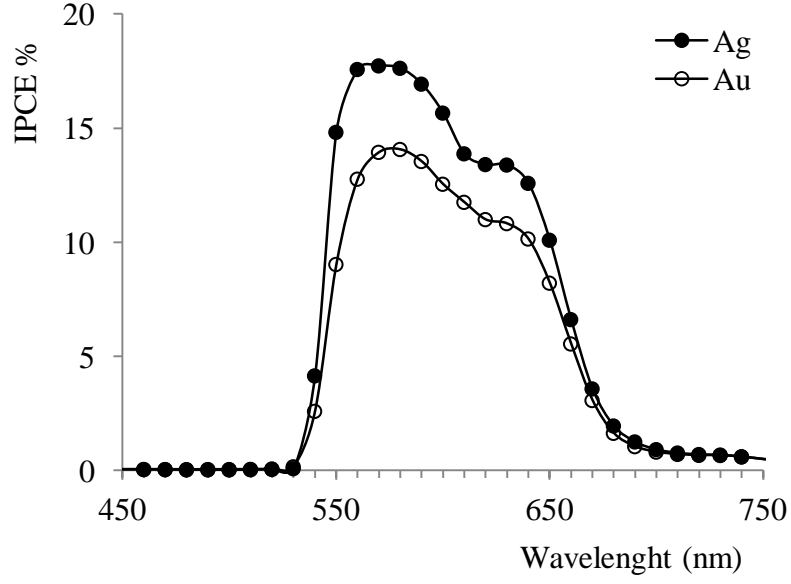
Fotovoltaiik hücreler ile ilgili IPCE (incident photon to current efficiency) ölçümleri de yapılmıştır. Şekil 6.22’de, üç farklı kalınlıklı (330 nm, 1150 nm ve 2815 nm) CdS ince filmlerle hazırlanan tersine çevrilmiş hacim heteroeklemlili fotovoltaiik hücrelerin IPCE eğrileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.22 a) ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au ve ITO/330nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması b) ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au ve ITO/1150nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması c) ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au ve ITO/2815nmCdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag konfigürasyonundaki hücrelerin IPCE eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 6.22'deki Au kullanılarak hazırlanan fotovoltmik hücrelerin %IPCE değeri sırasıyla; yaklaşık 550 nm, 575 nm ve 575 nm'de pik yapmıştır ve sırasıyla %24, %26 ve %14 civarında ölçülmüştür. Ag kullanılarak hazırlanan fotovoltmik hücrelerin %IPCE'leri ise sırasıyla %21, %19 ve %17 civarındadır. Soğurma spektrumu ise 450 nm ile 750 nm arasında değişiklik göstermiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, P3HT:PCBM içeren organik fotovoltaiik hücrelerin kararlılığını arttırmak üzere normal devre tiplerine göre anot ve katodun yeri değiştirilerek tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücreler hazırlandı. Bu aygıt yapısında klasik organik fotovoltaiik cihazlarda kullanılan ve kolayca oksitlenebilen alüminyum katot yerine Au (altın) ve (Ag) gümüş metalleri katot olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada; P3HT, PCBM ve boşluk engelleyici ince film tabakası CdS kullanılarak hazırlanan tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı organik fotovoltaiik hücrelerde sırasıyla; CdS ince filminin kalınlık etkisi, PEDOT:PSS varlığının etkisi ve farklı metal kontakların (Ag ve Au), hazırlanan fotovoltaiik hücre performansına etkileri incelenmiştir.

Bu aygıtlarda P3HT donör, PCBM ise akseptör olarak kullanılmıştır. Tersine çevrilmiş bu aygıtlar; Cam/ITO/CdS/P3HT:PCBM/Ag, Cam/ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag ve Cam/ITO/CdS/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au konfigürasyonlarında hazırlanmıştır.

CdS ince filminin kalınlık etkisi ile ilgili çalışmalarda, ITO kaplı cam altlıklar üzerine 330 nm kalınlığında CdS biriktirilerek hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin %0.295'lik verim ile en iyi performansı gösterdiği ve 2815 nm kalınlığında CdS biriktirilerek hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin %0.033'lük verim ile en kötü performansı gösterdiği saptanmıştır.

Tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaiik hücre performansına PEDOT:PSS tabakasının etkilerinin incelenmesi sonucunda, hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin performansına PEDOT:PSS'in net bir etkisinin olmadığı saptanmıştır.

Farklı metal kontakların (Ag ve Au) tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı organik fotovoltaik hücre performansına etkilerinin incelenmesi sonucunda ise metal kontakların net bir etkisi olduğu gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, hava ortamında çalışılan, laboratuvar şartlarına göre elde edilen sonuçlar şu şekilde bulunmuştur: boşluk engelleyici pencere malzemesi olan CdS tabakasının kalınlığı mümkün olduğu kadar ince olmalıdır, aktif tabaka olarak sadece P3HT değil P3HT ve PCBM malzemelerinin karıştırılması ile oluşturulan hacim heteroeklemine dayalı aktif tabaka kullanılmalıdır, aktif tabaka ve üst metal elektrot arasına malzeme israfını önlemek için fotovoltaik hücre performansına net bir etkisi olduğu görülmeyen PEDOT:PSS kaplanmamalıdır. Ag ve Au metal elektrotların kullanıldığı fotovoltaik hücrelerin performansında net bir fark gözlenmediği için, pahalı olan Au metali yerine Ag metalini kullanmak maliyeti düşüreceğinden daha avantajlıdır.

Boşluk engelleyici pencere malzemesi olarak CdS gibi üretilmesi zor ve pahalı işlem süreçleri gerektirmeyen bir malzemenin kullanıldığı tersine çevrilmiş hacim heteroeklemine dayalı organik fotovoltaik hücrelerin, kararlılık sorununun iyileşmesi açısından umut vaat edici olduğu bu çalışmayla gösterilmiştir. Bu çalışmada boşluk engelleyici pencere malzemesi olarak kullanılan CdS, P3HT:PCBM karışımının aktif tabaka olarak kullanıldığı literatür çalışmalarında, tersine çevrilmiş devre modelinde sadece birkaç kez kullanılmıştır. Bulunan sonuçların literatür sonuçlarına göre daha düşük olma sebeplerinin; hava ortamında çalışılmasından ve CdS kaplama yönteminin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, CdS ince filmleri için daha ince kalınlıklar denenerek fotovoltaik hücre performansı kat ve kat arttırılabilir. Bu kaplamalar esnasında çözeltiyi daha atomik boyutlarda püskürtebilen püskürtme başlığı kullanılarak CdS ince film yüzey kalitesi arttırılabilir. Böylece hazırlanan fotovoltaik hücrelerde daha yüksek verimlere ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Santos, M. J., Ferreira, J., Radovanovid, E., Romano, R., Alves, O. L., Giroto ve E. M., (2009). *Thin Solid Films*, 517:5523.
- [2] Li, Y., Hou, Y., Wang, Y., Qin, L., Feng, Z., Feng, B. ve Teng, F., (2007). *Synthetic Metals*, 157:956.
- [3] Karami, H. ve Kaboli, A., (2010). *Int. J. Electrochem. Sci*, 5:706.
- [4] Arenas, M., Mendoza, N., Cortina, H., Nicho, M.ve Hu, H., (2009). “Influence of poly3-octylthiophene (P3OT) Film Thickness and Preparation Method on Photovoltaic Performance of Hybrid ITO/CdS/P3OT/Au Solar Cells”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94:29-33.
- [5] Ing, Y., Zainal, Z., Kassim, A.ve Yunus, W., (2011). “Electrochemical Preparation of Bilayer P-N Junction of n-CdS/p-P3HT”, *International Journal of Electrochemical Science*, 6:2898-2904.
- [6] Tang, J., Zehu, J., Xu, Z., Fan, G., Lee, S. ve Li, Y., (2011). “Inverted Polymer Solar Cells With Atomic Layer Deposited CdS Film As An Electron Collection Layer”, *Organic Electronics*, 15: 1228-1238.
- [7] Zhong, M., Yang, D., Zhang, J., Shi, J., Wang, X.ve Li, C., (2011). “Improving the performance of CdS/P3HT hybrid inverted solar cells by interfacial modification”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 96:160-165.
- [8] Oh, H., Krantz, J., Litzov, I., Stubhan, T., Pinna, L. ve Brabec, C., (2011). “Comparison of various sol-gel derived metal oxide layers for inverted organic solar cells”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95:2194-2199.
- [9] Weickert, J., Sun, H., , C., Christian Hesse, H. ve Schmidt-Mende, L., (2010). “Spray-deposited PEDOT:PSS for inverted organic solar cells”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94:2371-2374.

- [10] Yıldız, M., (2006), Dünyada ve Türkiye’de Alternatif ve Fosil Enerji Kaynaklarının Geleceğe Yönelik Etüdü, Yüksek Lisans Tezi Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [11] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmi internet sitesi, <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=gunes&bn=233&hn=&nm=384&id=40695>, 2 Haziran 2012.
- [12] Taflan, H. S., (2003), Dünya ve Türkiye’deki Mevcut ve Alternatif Enerji Kaynakları ve Politikaları, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gebze.
- [13] Çağlar, M. ve Altuntaşoğlu, Z. T., “Sürdürülebilir Kalkınma ve Yenilenebilir Enerji”, a.g.k., 156.
- [14] Saraçoğlu, N., “Enerji Ormanlar”, Türk Mühendisler ve Mimarlar Odaları Birliği Yayını, Kasım 1996, 62.
- [15] Ataman , A. R., (2007), Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [16] “İklim Değişikliği ve Sürdürülebilir Kalkınma”, a.g.k., Kasım 2006, 15.
- [17] Umut, İ., (2008), Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisine Dönüştürmede Kullanılan Yöntemler ve Örnek Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [18] Grozdev, M., (2010), “Alternatif Enerji Kaynakları: Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri” Yüksek Lisans Tezi İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Bilim Teknik Dergisi, “Türkiye’nin ve Dünyanın Enerji Sorununa Nihai Çözüm” Haziran 2011, sayı: 523.
- [20] Solar System Exploration, Nasa resmi internet sitesi, <http://www.solarsystem.nasa.gov>, 15 Mayıs 2012.
- [21] Bilim Teknik Dergisi, “Güneş’in Enerjisi Nereden Geliyor?” Kasım 2009, sayı: 504.
- [22] Atkinson, S., (2003), Astronomi, (Çeviri Alev, Murat), Tübitak Popüler Bilim Kitapları, 22. Basım.
- [23] Karamanav, M., (2010), Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri, Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Golub, L., Pasachoff, J. M., “Nearest Star: The Surprising Science of Our Sun”, Harvard University Press, 2001.

- [25] Itaca Cooperation Solar Photovoltaic internet sitesi, <http://www.itacenet.org/itaca/sections/energy/solar-photovoltaics/>, 20 Mayıs 2012.
- [26] World Energy Council For Sustainable Energy, “2010 Survey of Energy Resources: Solar Energy”, 2010.
- [27] Altaş, M., “2002 Enerji İstatistikleri”, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, İstanbul, 2003.
- [28] Alaçakır, B., (1997), “Güneş Pilleri”, Çevre ve Enerji Kongresi, Ankara, Haziran.
- [29] Kittel, C., (1996), Katıhal Fizikine Giriş, (Çev. B. Karaoğlu), Bilgi Tek Yayınları, İstanbul.
- [30] Ray, B., (1969), II-VI Compounds, Printed in Great Britain by Neil & Co., Ltd. of Edinburg.
- [31] Tomakin, M., (2008), CdS İnce Film Örneklerinin Soğuk Altlık Üzerinde Üretilmesi, Yapısal ve Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [32] Bhattacharyya, D., ve Carter, M. J., (1996), “Effect of Substrat on The Structural and Optical Properties of Chemical-Bath Deposited CdS Films”, Thin Solid Films, s:176-181.
- [33] Omar, M. A., (1975), Elementary Solid State Physics Principles and Applications, Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- [34] McKelvey, J. P., (1966), Solid State and Semiconductor Physics, Harper&Row Ltd., London, 512p.
- [35] Becquerel, E., “Electric Effects Under the Influence of Solar Radiation”, Compt. Rend., 9, 561 (1839).
- [36] Adams, W. G., ve Day, R. E., “On the Action of Light on Selenium”, Proceedings of the Royal Society of London, 1876, 25, s:113-117.
- [37] Ohl, R. S., “Light-Sensitive Electric Device”, (1941), U.S. Patent No. 2, 402, 662.
- [38] American Physical Society Resmi İnternet Sitesi, <http://www.aps.org/publications/apnews/200904/physicshistory.cfm>, 14 Mayıs 2012.
- [39] Pantchechnikoff, J. I., “A Large Area Germanium Phtocell”, Rev. Sci. Instr., 23, 135 (1952).

- [40] Chapin, D. M., Fuller, C. S., ve Pearson, G. L., “A New Silicon p-n Junction Photocell For Converting Solar Radiation into Electrical Power”, J. Appl. Phys., 25, 135, (1954).
- [41] Reynolds, D. C., Leies, G., Antes, L. L., ve Marburgen, R. E., “Photovoltaic Effect in Cadmium Sulfide”, Phy. Rev., 96, 533, (1954)
- [42] Zafer, C., (2006), Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi, Doktora Tezi Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [43] Karşlı, A., (2011), Politiyofen ve Fulleren İçeren Organik Fotovoltaik Hücrelerin Optimum Çalışma Şartlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [44] Solar Generation VI Conference, “Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World”, 2011.
- [45] Sze, S. M. ve Kwok, K., (1999), Physics of Semiconductor Devices, Wiley Interscience Publication, United States of America, 2007, 3th Edition.
- [46] Reddy, P. J., Science and Technology of Photovoltaic, CRC Press, 2th edition, Leiden (2010).
- [47] M. Sc. Thesis by Tezel, T., “Synthesis and Characterization of Semiconductor Thin Films For Photovoltaic Applications”, Middle East Technical University, Ankara, September 2009.
- [48] Afify, H.H., Nasser, S.A. ve Demian, S.E., 1991, Influence of Substrate Temperature on the Structural, Optical and Electrical Properties of ZnO Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2, 152-156.
- [49] Bouchenaki, C., Ullrich, B., ve Zielenger, J. P., (1991), “Preparation Characterization and Bistable Photoconductivity Properties of Thin CdS Layers”, J. Opt. Soc. Am., B8, 691-700.
- [50] Matthews, R., “Sonsuz Enerji”, BBC Focus NTVBLM Dergisi, Nisan 2011, sayı: 26.
- [51] Özenbaş, A. M. ve Yavuz, H. İ., “Boya Duyarlı Güneş Gözeleri Yeni ve Daha Ucuz Teknolojiler”, Haziran 2011, Bilim Teknik Dergisi, sayı: 523.
- [52] Chandrasekaran, J., Nithyaprakash, D., Ajjan, K. B., Maruthamuthu, S., Manoharan, D. ve Kumar, S., (2010). “Hybrid solar cell based on blending of organic and inorganic materials—An overview”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15:1228-1238.

- [53] Çörekçi, S., (2005). Grup III-V Bileşik Yarıiletkenlerde AFM Yüzey Karakterizasyonu, Doktora Tezi Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [54] Çevik, E., (2010), Tiyofen ve Antrasen İçeren Konjuge Polimerlerle Hazırlanan Hacim Heteroeklemlili Organik Güneş Güzeleri, Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [55] Sarıçiftçi, N. S., Braun, D., Zhang, C., Srdanov, V., I., Heeger, A. J., Stucky, G. ve Wudl, F., (1993), "Semiconducting Polymer-Buckminsterfullerene Heterojunctions: Diodes, Photodiodes, and Photovoltaic Cells", Appl. Phys. Lett., 62:585-587.
- [56] Brabec, C. J., Sarıçiftçi, N.S., ve Hummelen, J. C., (2001a), "Plastic Solar Cells", Adv. Funct. Mater., 11:15.
- [57] Liang, Y., Xu, Z., Xia, J., S.T., Tsai, S.T., Wu, Y., Li, G., Ray, C. ve Yu,L., (2010), "For the Bright Future-Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells with Power Conversion Efficiency of 7.4%", Adv. Mater., 22:135-138.
- [58] Wallace G.G., et al., 2000, Conjugated Polymers: New Materials For Photovoltaics, Chemical Innovation, 30, 1, 14-22.
- [59] Batır, G. G., (2009), 3-[(2,5-Dimetil-4Brom)Fenil] Tiyofenin Elektrokimyasal Polimerizasyonu, Karakterizasyonu ve Glikoz Biyosensörü Olarak Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [60] Günday, G., (2009), Polifenilenvinilen (PPV) Bazlı Konjuge Polimerlerle Hazırlanan Organik Fotovoltaik Hücreler, Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [61] Hiee, J., Dedova, T., Valdna, V. ve Muska, K., Comparative Study of Nano-Structured CdS Thin Films Prepared by CBD and Spray Pyrolysis: Annealing Effect, Thin Solid Films, 511-512, 443-447.
- [62] Organic Light-Emitting Devices: A Survey; Edited by J. Shinar (Springer, New York, 2004).
- [63] J.H. Burroughes, D.D.C. Bradley, A.R. Brown, R.N. Marks, K. Mackay, R.H. Friend, P.L. Burns, ve A.B. Holmes: Lightemitting diodes based on conjugated polymers. Nature 347, 539 (1990).
- [64] Tang, C.W., Appl. Phys. Lett., Vol. 48, 183, 1986.
- [65] Hoppe, H. ve Sarıçiftçi N., S., (2004), Organic Solar Cells J. Mater. Res., Vol. 19, No. 1944 7, Jul 2004].

- [66] Gregg, B. A. ve Hanna, M.C., (2003), "Comparing Organic to İnorganic Photovoltaic Cells: Theory, Experiment, and Simulation", J. Appl. Phys., 93:3605-3615.
- [67] Peumans, P., Yakimov, A. ve Forrest, S.R., (2003), "Small Molecular Weight Organic Thin Film Photodetectors and Solar Cells", J. Appl. Phys., 93:3693-3724.
- [68] Dimitrakopoulos, C. D. ve Mascaro, D.J., (2001), "Organic Thin-Film Transistors: A review of Recent Advances", IBM J. Res. Dev., 45:11-27.
- [69] Nelson, J., (2002), Curr. Opin., In Solid State Mat. Sci., 6, 87.
- [70] Prof.Dr. İçli, S., "Organik Güneş Pili Yaptık", Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Müdürü , Bilim ve Teknik Dergisi, Ekim 2005.
- [71] Dipl. Ing. Petritsch, K., "Organic Solar Cells Architectures", PhD Thesis, July 2000, Cambridge and Graz.
- [72] Güneş, S. ve Sarıçiftçi, N. S., "An Overview Of Organic Solar Cells" , Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sayı 1, Cilt 25.
- [73] Hoppe, H. ve Sarıçiftci, N., (2005), In Organic Photovoltaics, Taylor & Francis, p. 217. London.
- [74] Shirakawa H., Louis, E. J., MacDiarmid, A. G., Chiang, C. K. ve Heeger, A. J., (1977), J Chem Soc Chem Comm, 579.
- [75] Saçak, M., "İletken Polimerler", Bilim Teknik Dergisi, Şubat (2010), s:507
- [76] Tüzün, C., (2005), Organik Kimya, Palme Yayıncılık, (1-2), Ankara.
- [77] M. Hiramoto, Y. Kishigami, ve M. Yokoyama: Doping Effect on The Two-Layer Organic Solar Cell. Chem. Lett. 19, 119 (1990).
- [78] Ortmann, F., Bechstedt, F. ve Karsten, H., (2010), "Charge Transport in Organic Crystals: Interplay of band transport, Hopping and Electron-Phonon Scattering", New Journal of Physics 12:023011, doi: 10. 1088/1367-2630/12/2/023011.
- [79] Brütting, W., (2005), Introduction to the Physics of Organic Semiconductors, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany.
- [80] Koyuncu, S., (2008),Günes Pillerinde Elektrolit Olarak Görev Yapacak İletken Polimerlerin Sentezi, Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.
- [81] W. Geens, T. Aernouts, J. Poortmans, ve G. Hadziioannou: Organic Coevaporated Films of a PPV-pentamer and C₆₀: Model Systems For Donor/Acceptor Polymer Blends. Thin Solid Films 403, 438 (2002).

- [82] Chaure, NB., Bordas, S., Samantilleke, AP., Chaure, SN., Haigh, J. ve Dharmadasa, IM., 2003, Investigation of Electronic Quality of Chemical Bath Deposited CdS Layers Used in Thin Film Photovoltaic Solar Cells, *Thin Solid Films*, 437, 10-17.
- [83] Hoppe, H. ve Sarıçiftçi N., S., *Polymer Solar Cells*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [84] Hoppe, H. ve Sarıçiftçi N., S., (2004), *Organic Solar Cells J. Mater. Res.*, Vol. 19, No. 1944 7, Jul 2004.
- [85] Sarıçiftçi, N. S., (1997), “Primary Photoexcitations in Conjugated Polymers: Molecular Exciton Versus Semiconductor Band Model”, World Scientific.
- [86] Rostalski, J. ve Meissner, D., (2000), “Photocurrent Spectroscopy For the Investigation of Charge Carrier Generation and Transport Mechanisms in Organic p/n-Junction Solar Cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 63:37-47.
- [87] Yağcı, Ö., (2011), *Organik Tabanlı Güneş Pillerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [88] Solanki,C.S., *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*, Published by Ghosh, A. K.
- [89] R.N. Marks, J.J.M. Halls, D.D.C. Bradley, R.H. Friend ve A.B. Holmes.; *J. Phys.:* “*Condens. Matter* ”6 (1994) 1379.
- [90] C.J. Brabec, A. Cravino, D. Meissner, N.S. Sariciftci, M.T. Rispens, L. Sanchez, J.C. Hummelen ve T. Fromherz, “*Thin Solid Films*” 403 (2002), 368.
- [91] Gunes, S., Neugebauer, N. ve Sariciftci, N.S., (2007), “Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells”, *Chem. Rev.*, 107:1324-1338.
- [92] Jenna deBoisblanc, 2010,*Synthesis and Characterization of P3HT:PCBM Organic Solar Cells Senior Thesis* May 4, 2010..
- [93] Barrau, S., Andersson, V. ve Zhang, F., (2009), “Nanomorphology of Bulk Heterojunction Organic Solar Cells in 2D and 3D Correlated to Photovoltaic Performance”, *Macromolecules*, 42:4646-4650.
- [94] Liu, J., Shi, Y. ve Yang, Y., (2001), “Solvation Induced Morphology Effects on the Performance of Polymer-Based Photovoltaic Devices”, *Adv Func Mat*, 11:420-424.
- [95] Wu, Z., Chen, Z., Du, X., Lgan, M., Sippel, J., Nikolou, M., Kamaras, K., Reynolds, J. R., Tanner, D. B., Hebard, A. F ve Rinzler, A. G., (2004), “Transparent Conductive Carbon Nanotube Films”, *Science*, 305:1273–1276.

- [96] Zimmermann, B., Glatthaar, M., Niggemann, M., Riede, M. K., Hinsch, A. ve Gombert, A., (2007), "ITO-Free Wrap Through Organic Solar cells a Module Concept For Cost-Efficient Reel-to-Reel Production", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 913:74-378.
- [97] Peet, J., Kim, J. Y., Coates, N. E., Ma, W. L., Moses, D., Heeger, A. J. ve Bazan, G. C., (2007), "Efficiency Enhancement in Low-Bandgap Polymer Solar Cells by Processing With Alkane Dithiols", *Nat. Mater.*, 6:497-500.
- [98] Krebs, F. C. ve Spanggaard, H., (2005), "Significant Improvement of Polymer Solar Cell Stability", *Chem. Mater.*, 17:5235-5237.
- [99] Krebs, F. C., (2008b) "Air Stable Polymer Photovoltaic Based on a Process Free From Vacuum Steps and Fullerenes", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 92:715-726.
- [100] Krebs, F. C., Thomann, Y., Thomann, R. ve Andreasen, J. W., (2008a), "A simple Nano Structured Polymer/ZnO Hybrid Solar Cell—Preparation and Operation in Air", *Nanotechnology*, 19:424013-424025.
- [101] Scharber, M. C., Muhlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A. J. ve Brabec, C. J., (2006), "Design Rules for Donors in Bulk-Heterojunction Solar Cells—Towards 10% Energy-Conversion Efficiency", *Adv. Mater.*, 18:789-794.
- [102] Saunders, R., M. ve Turner, L., (2008), "Nanoparticle-Polymer Photovoltaic Cells", *Adv. Colloid Interface*, 138:1-23.
- [103] 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.
- [104] Shaheen, S. E., Radspinner, R., Peyghambarian ve N., Jabbour, Fabrication of Bulk Heterojunction Plastic Solar Cells by Screen Printing, *Appl. Phys. Lett.* 79, 2001.
- [105] Waldauf, C., Morana, M., Denk, P., Schilinsky, P., Coakley, K., Choulis ve S.A., Brabec, C.J., (2006), "Highly Efficient Inverted Organic Photovoltaics Using Solution Based Titanium Oxide As Electron Selective Contact", *Appl. Phys. Lett.*, 89: 233517-1-3.
- [106] Takanezawa, K., Hirota, K., Wei, Q.S., Tajima, K. ve Hashimoto, K., (2007), "Efficient Charge Collection With ZnO Nanorod Array in Hybrid Photovoltaic Devices", *J. Phys. Chem. C*, 111: 7218-7223.
- [107] Krebs, F. C., *Polymeric Solar Cells: Materials, Design, Manufacture*. DEStech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania, 2010.

- [108] Ahmad-Bitar, RN., 2000, Effect of Doping and Heat Treatment on the Photoluminescence of CdS Films Deposited by Spray Pyrolysis, Renewable Energy, 19, 579-586.
- [109] Özer, T., (2010), Ultrasonik Kimyasal Püskürtme Tekniği ile Elde Edilen $Cd_{1-x}Sn_xS$ Filmlerinin Bazı Fiziksel, Yapısal ve Yüzeysel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [110] Krishnakumar, R., Subramanian, V., Ramprakash, Y., ve Lakshmanan, A.S., 1987, Thin Film Preparation by Spray-Pyrolysis for Solar Cells, Materials Chemistry and Physics, 15, 385-395.
- [111] Ramaiah, K.S., Raja, V.S. ve Sharon, M., 1998, Optical and Structural Investigations on Spray Deposited CdS Films, J.Mater. Sci.: Mater. İn Elec., 9, 261-265.
- [112] Erbil, H.Y., 2006, Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces, Blackwell Publishing, India, 352.
- [113] Cullity, B.D., 1966, X-ışınlarının difraksiyonu (Cev. Sumer A., Prof.Dr.), ĐTU Yayınları, No.679, 546.
- [114] Omar, M.A., 1975, Elementary Solid State Physics, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Menlo Park, California.
- [115] Smith, W.F., 2003, Principles of Materials Science and Engineering, McGraww-Hill, A.B.D.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Nursel YAVUZ

Doğum Tarihi ve Yeri: 20.05.1988

Yabancı Dili: İngilizce

E-posta: nrsl_yvz88@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul	Mezuniyet Yılı
Y.Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Esenler İbrahim Turhan Lisesi	2005