

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOKROMİK ORGANİK LİGAND KATKILI FOTOVOLTAİK AYGITLAR
VE GÜNEŞ ENERJİ VERİMLİLİĞİNE UYUMU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
SİBEL SEVEN**

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. İkrım ORAK**

BİNGÖL-2022

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun (TÜBİTAK) 1002 kodlu programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 120F092).

Çalışmalarım sırasında her türlü desteği sağlayan, bilgi ve birikimlerini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. İkrım ORAK'a teşekkürü borç bilir, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu tez çalışmasında yardımlarından dolayı, Doç. Dr. Sinan BAYINDIR'a, Doç. Dr. Osman DAYAN ve Evin YİĞİT'e teşekkür ederim

Bu tez çalışmasında sunulan deneysel sonuçlar Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezide yapılmıştır. Çalışmalar sırasında merkezi laboratuvar çalışanlarının ilgi ve alakalarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmamın hazırlanmasında bana her türlü desteği veren anneme, babama kardeşlerime ve arkadaşlarıma minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Sibel SEVEN

Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1. Yenilenebilir Enerji	5
2.2. Güneş Enerjisi.....	5
2.2.1. Güneş.....	6
2.2.2. Güneş Enerjisi Oluşumu.....	6
2.2.3. Güneş Işınımı.....	7
2.2.4. Güneş Işınımına Dünya Atmosferinin Etkisi.....	7
2.2.5. Güneşlenme Süresi.....	9
2.3. Fotovoltaik Aygıt Teknolojisi.....	10
2.3.1. Tarihsel Süreç.....	10
2.3.2. Fotovoltaik Aygıt Yapısı ve Özellikleri.....	11
2.3.3. Fotovoltaik Sistemin Çalışma Prensibi.....	14
2.4. Yarıiletken Malzeme.....	14
2.4.1. P ve N Tipi Yarıiletken Malzemenin Oluşturulması.....	16
2.5. Organik Fotovoltaik Aygıtlar.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Organik Fotovoltaik Aygıtların Hazırlanması.....	19
3.1.1. P-tipi Si Kristal Parça Temizlenmesi.....	19
3.1.2. Omik Kontak.....	19
3.1.3. Termal Buharlaştırma ve İnce Film Kaplama.....	21

3.1.4. Doğrultucu Kontak.....	21
3.2. Organik Fotovoltaik Aygıtların Elektriksel Karakterizasyon Tespitinde Kullanılan Deneysel Düzenekler.....	22
3.2.1. Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM).....	22
3.2.2. Işık Altında I-V Karakteristiği.....	22
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	23
4.1. Organik Arayüzey Malzeme Sentezi.....	23
4.1.1. 6C Malzemenin Sentezi.....	23
4.1.2. 6E Malzemenin Sentezi.....	25
4.2. Rutenyum Komplekslerinin Sentezi.....	26
4.2.1. 1A Malzemenin Sentezi.....	26
4.2.2. 2A Malzemenin Sentezi.....	26
4.3. UV-Vis Ölçümleri ve Yasak Enerji Aralığı Hesabı.....	27
4.3.1. 1A ve 6E Malzemenin UV-Vis Ölçümleri ve Yasak Enerji Aralıkları.....	29
4.3.2. 2A ve 6C Malzemenin UV-Vis Ölçümleri ve Yasak Enerji Aralıkları.....	30
4.4. Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM).....	31
4.4.1. 1A ve 6E Malzemelerin AFM Ölçümü.....	32
4.4.2. 2A ve 6C Malzemelerin AFM Ölçümü.....	32
4.5. Işık Altında I-V- Karakteristiği.....	33
4.5.1. 1A ve 6E Fotovoltaik Aygıtların Işık Altında I-V Karakteristiği....	35
4.5.2. 2A ve 6C Fotovoltaik Aygıtların Işık Altında I-V Karakteristiği....	39
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Absorbans
A^*	: Richardson sabiti
e^-	: Elektron yükü
h^+	: Boşluk
eV	: Elektron volt
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu (eV)
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu (eV)
Φ_b	: Engel yüksekliği (eV)
k	: Boltzman sabiti
I	: Akım (A)
J	: Akım yoğunluğu (A/cm ²)
J_0	: Ters beslem akım yoğunluğu (A/cm ²)
μ	: Mobilite (cm ² / V.s)
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi (eV)
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi (eV)
E_F	: Fermi enerjisi (eV)
E_g	: Yasak enerji aralığı (eV)
E_s	: Yarıiletkenin dolu bandının vakum seviyesi altındaki derinliği
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
T	: Mutlak sıcaklık (K)
$g_c(E)$: İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
I_0	: Ters doyma akımı (A)
m	: Serbest elektronun kütlesi
m_n^*	: Elektronun etkin kütlesi
n	: İdealite faktörü
K	: Kelvin
P	: Güç (Watt)
FF	: Doldurma faktörü (%)

V_{oc}	: Açık devre voltajı (V)
I_{sc}	: Kısa devre akımı (A)
PV	: Fotovoltaik
TE	: Termiyonik emisyon
I-V	: Akım-voltaj
ITO	: İndium tin oxide
p-Si	:P tipi silisyum
CIGS	: Bakır indiyum galyum deselenid
CdTe	: Kadmiyum tellürid
a-Si	: Amorf-silisyum
NDI	: Naftalen diimid
AFM	:Atomik Kuvvet Mikroskopu
UV-Vis	: Ultraviolet – Visible Spektroskopi
UV	: Ultraviolet Spektroskopi
1A	: Ru(p-simen)(Pry-NDI-Ph)(Cl) ₂
2A	: Ru(p-simen)(Pry-NDI-Ph-PO ₃ H ₂)(Cl) ₂
6E	: Pry-NDI-Ph
6C	: Pry-NDI-Ph-PO ₃ H ₂

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Füzyon tepkimesi.....	6
Şekil 2.2.	Elektromanyetik spektrum ve görünür bölge.....	7
Şekil 2.3.	Güneşten gelen ışınların dağılımı.....	8
Şekil 2.4.	2011-2020 yılları arasında yıllık toplam güneş radyasyonu dağılımı.....	9
Şekil 2.5.	1985-2020 yılları arasında ortalama günlük toplam güneşlenme süresi dağılımı.....	10
Şekil 2.6.	Fotovoltaik aygıt yapısı.....	12
Şekil 2.7.	Fotovoltaik aygıt modül ve dizi tasarımları.....	12
Şekil 2.8.	(a) Tek kristal fotovoltaik aygıt (b) Polikristal fotovoltaik aygıt (c) İnce film fotovoltaik aygıt (d) Nanoteknolojiye dayalı fotovoltaik aygıt (e) Organik fotovoltaik aygıt (f) Boya sensörlü fotovoltaik aygıt.....	14
Şekil 2.9.	Yarıiletken sınıflandırılması.....	15
Şekil 2.10.	Yalıtkan, yarıiletken, iletken enerji bantlar.....	15
Şekil 2.11.	N tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması.....	16
Şekil 2.12.	P tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması.....	17
Şekil 3.1.	(a) Ultrasonik temizleme cihazı (b) Termal buharlaştırma ve ince film kaplama cihazı (c) AFM deney düzeneği (d) Işık altında I-V karakteristiği belirlemede kullanılan cihazlar.....	20
Şekil 3.2.	Termal buharlaştırma işleminde kullanılan kaynaklar.....	20
Şekil 3.3.	Fotovoltaik aygıt yapısı.....	21
Şekil 4.1.	ITO tabanlı fotovoltaik aygıtın şematik diyagramı.....	23
Şekil 4.2.	6C malzemenin sentezi.....	25
Şekil 4.3.	6E malzemenin sentezi.....	26
Şekil 4.4.	Yasak enerji aralığı şematik gösterim.....	28
Şekil 4.5.	1A ve 6E malzemenin UV-Vis ölçüm grafiği.....	29
Şekil 4.6.	1A ve 6E malzemenin yasak enerji aralığı grafiği.....	29
Şekil 4.7.	2A ve 6C malzemenin UV-Vis ölçümü.....	30

Şekil 4.8.	2A ve 6C malzemenin yasak enerji aralığı.....	31
Şekil 4.9.	(a) 1A malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü (b) 6E malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü.....	32
Şekil 4.10.	(a) 2A malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü (b) 6C malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü.....	33
Şekil 4.11.	İleri yönde diyot karakteristiği.....	34
Şekil 4.12.	1A ve 6E fotovoltaik aygıtların farklı ışık şiddeti altında I-V ölçümleri grafiği.....	36
Şekil 4.13.	1A ve 6E fotovoltaik aygıtların logI-logP grafiği.....	37
Şekil 4.14.	1A ve 6E fotovoltaik aygıtların Ion/off ölçümleri grafiği.....	37
Şekil 4.15.	2A ve 6C fotovoltaik aygıtların farklı ışık şiddeti altında I-V ölçümleri grafiği.....	40
Şekil 4.16.	2A ve 6C fotovoltaik aygıtların logI-logP grafiği.....	41
Şekil 4.17.	2A ve 6C fotovoltaik aygıtların Ion/off ölçümleri grafiği.....	41

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	1A ve 6E fotovoltaiik aygıtların farklı ışık şiddetleri altında bazı elektriksel parametreleri.....	38
Tablo 4.2.	Farklı fotovoltaiik aygıtlar için idealite faktörü.....	39
Tablo 4.3.	2A ve 6C fotovoltaiik aygıtların farklı ışık şiddetleri altında bazı elektriksel parametreleri.....	42



FOTOKROMİK ORGANİK LİGAND KATKILI FOTOVOLTAİK AYGITLAR VE GÜNEŞ ENERJİ VERİMLİLİĞİNE UYUMU

ÖZET

Bu çalışmada organik ligantlar sentezlenerek bu malzemelerden fotovoltaik aygıt fabrikasyonu yapılmıştır. Çalışmada ilk olarak iki organik molekül sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu iki organik malzeme 6C ve 6E olarak adlandırılmış ve ayrıca iki molekülde metal kompleksin etkisini görmek amacı ile rutenyum kompleksleriyle de sentezlenmiştir. Sentezlenen rutenyum kompleksleri de sırasıyla 2A ve 1A olarak adlandırılmıştır. Sentezlenen moleküllerin ilk olarak Ultraviolet – Visible Spektroskopi (UV- Vis) ölçümleri yapılmıştır. UV-Vis ölçümlerinde elde edilen verilerle yasak enerji aralığı hesaplandı ve grafiksel olarak gösterilmiştir. 6E, 1A, 6C ve 2A malzemelerin UV-Vis ölçümlerinden elde edilen absorpsiyon pik değerleri sırasıyla 365nm, 365nm, 360nm ve 360nm olarak tespit edilmiştir. Yasak enerji aralıkları ise sırasıyla 2,7 eV, 3,12 eV, 2,82 eV ve 3,12 eV olarak hesaplanmıştır. Moleküllerin yüzey morfolojisini inceleme amacıyla termal buharlaştırma yöntemiyle cam yüzeye ince film kaplama yapıldı ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile yüzey morfolojisi incelenmiştir. 6E, 1A, 6C ve 2A malzemelerin AFM ölçümlerinden elde edilen pürüzlülük (rms) değerleri sırasıyla 0,55, 17,8, 1,89 ve 4,65 nm olarak ölçülmüştür. Daha sonra moleküllerin ara yüzey malzeme olarak kullanıldığı fotovoltaik aygıtlar termal buharlaştırma yöntemiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan fotovoltaik aygıtların elektriksel ölçümleri karanlık ve ışık altında alınmıştır. Işık altında alınan akım ve gerilim ölçümlerinin elde edilen verilerle fotovoltaik aygıtların kimyasal yapılarına göre organik ve rutenyum kompleksleri karşılaştırmalı şekilde analiz edilmiştir. Ek olarak I-V ölçümlerinde elde edilen veriler kullanılarak malzemenin idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, şönt direnç, doğrultma oranı ve doyma akımı değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde tüm malzemelerin ışığa duyarlı olduğu ve optoelektronik aygıtların üretiminde kullanılmasının uygun olduğu ancak güneş pili teknolojisinde kullanılmasında verimli olunacağı düşünülmemektedir. Rutenyum kompleksi eklenen fotovoltaik aygıtların sonuçları incelendiğinde rutenyum molekülü ile yapılan aygıtların performansının artırdığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Organik ligand, atomik kuvvet mikroskobu (AFM), ince film kaplama, fotovoltaik aygıt, güneş enerjisi.

PHOTOCHROMIC ORGANIC LIGAND ADDITIVE PHOTOVOLTAIC DEVICES AND ADAPTATION TO SOLAR ENERGY EFFICIENCY

ABSTRACT

In this study, organic ligands were synthesized and a photovoltaic device was fabricated from these materials. Firstly, the synthesis of two organic molecules named 6C and 6E was carried out. In addition, these molecules were also synthesized with ruthenium complexes in order to see the effect of the metal complex. The synthesized ruthenium complexes were also named 2A and 1A, respectively. Primarily, Ultraviolet – Visible Spectroscopy (UV-Vis) measurements of the synthesized molecules were made. With the data obtained from UV-Vis measurements, the forbidden energy range was calculated and presented graphically. The absorbance peak values obtained from UV-Vis measurements of 6E, 1A, 6C and 2A materials were determined as 365nm, 365nm, 360nm and 360nm, respectively. Forbidden energy ranges were calculated as 2.7 eV, 3.12 eV, 2.82 eV and 3.12 eV, respectively. In order to examine the surface morphology of the molecules, a thin film coating was applied to the glass surface by thermal evaporation method and the surface morphology was examined by atomic force microscope (AFM). The roughness (rms) values obtained from AFM measurements of 6E, 1A, 6C and 2A materials were measured as 0.55, 17.8, 1.89 and 4.65 nm respectively. Then, photovoltaic devices, in which molecules are used as interface materials, were prepared by thermal evaporation method. Electrical measurements of the prepared photovoltaic devices were taken under dark and light. Organic and ruthenium complexes were analysed comparatively according to the chemical structures of photovoltaic devices with the data obtained from current and voltage measurements taken under light. In addition, the ideality factor, barrier height, series resistance, shunt resistance, rectification ratio and saturation current values of the material were calculated using the obtained I-V measurement data. When the results obtained with organic molecules are examined, it has been determined that all materials are light sensitive and suitable for use in the production of optoelectronic devices. However, it is considered that its use in solar cell technology will not be efficient. When the results of photovoltaic devices with the addition of ruthenium complex were examined, it was concluded that the performance of the devices increased with this molecule. All results are presented comparatively.

Keyword: Organic ligand, atomic force microscopy (AFM), thin film coating, photovoltaic device, solar energy.

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji, insanların yaşam serüveni devam ettiği sürece enerjiye ihtiyaç olduğu her an doğal kaynaklarda var olan enerji dönüşümünden elde edilen enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynakları kömür, petrol, doğalgaz gibi yenilenemeyen enerjiye bağımlılığı eksiltmede hayati öneme sahiptir (Bayraç, 2010). Yenilenebilir enerji kaynakları insanlığın hayat sürmesindeki gizli kahramanları olan güneş, rüzgâr, su, hidrojen olarak sıralanabilir (Scheuer vd. 2021). Güneş, güneş sisteminde var olan tüm gök cisimleri (gezegenler) için sonsuz büyüklükteki enerji kaynağıdır. Özellikle dünyamız için vazgeçilmez ve emsali olmayan bir kaynaktır.

Güneş ile dünyamız arasındaki yol hesaplamalara göre 150 milyon km dir. Güneşten gelen ışınlar 8 dakikalık zaman içerisinde dünyamıza ulaşabilmektedir. Güneşin yarıçapı 4,3 milyon km dir. Çekirdeğinde ki sıcaklık 15,5 milyon santigrat derecedir. Plazma halinde olan güneş yanan gazlardan oluşur ve çok güçlü bir manyetik alana sahiptir.

Güneşin yaklaşık olarak 90'ını oluşturan hidrojen gazının füzyon tepkimesiyle helyum gazını oluşturmaktadır ve bu oluşum sırasında devasa bir enerji açığa çıkmaktadır. Güneşte ortaya çıkan bu tepkimeler sonucunda meydana gelen bu enerjinin bir kısmı dünyaya ulaşan ışınım enerjisidir. Yeryüzüne düşen ışınım enerjisi, yeryüzünde belirlenmiş olan fosil yakıt haznelerinin takribi 160 katı kadardır. Yeryüzüne ulaşan ışınımın elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemi güneş enerji sistemini açıklamaktadır.

Güneş ışınlarından elektrik enerjisi üretimi çok geniş bir yelpazeye sahiptir. Son zamanlarda ortaya çıkan en önemli organik malzeme ise fotokromik malzemelerdir. Fotokromik, kolormatik camlar veya diğer bir adıyla renk değiştiren camlardır. Işık olmayan yani UV (Ultraviyole) ışınlarına maruz kalmadığında şeffaftır. Işık altında ise UV ışınların şiddetine ve yoğunluğuna göre koyulaşır ve ışık koşullarına hızlı bir adaptasyon sağlayan camlardır (Perincek vd. 2007). Bu özellikleri dikkate alındığında da bu tür malzemelerin kullanımı organik aygıtlarda kullanılma potansiyelini ortaya koymuştur. Fotokromik ligand, merkezi bir metale bağlanan moleküldür. Bağın oluşması genellikle bir

veya birkaç elektron verilmesiyle olur. Fotokromik organik ligand malzeme ile oluşturulan fotovoltaiik aygıtlar, düşük maliyeti ve kararlı yapısı ile geleneksel fotovoltaiik aygıtlara alternatif bir yol olarak kabul edilmektedir(Akkaşoğlu, 2018).

Bu çalışmada fotovoltaiik uygulamalara katkı sayılayacak organik ligantlar sentezlenerek bu malzemelerden aygıt fabrikasyonları gerçekleştirilmiştir. Organik malzeme sentezinde en çok kullanılan organik yapı iyi birer elektron vericisi olarak kullanılan naftalen diimid (NDI) iskeleti kullanılmıştır. Organik fotovoltaiik aygıt yapısında omik kontak katmanı için aliminyum metali, taban malzeme olarak P tipi silisyum (p-Si), ara yüzey malzeme için fotokromik organik ligantlar ve son olarak doğrultucu kontak katmanı için altın metali tercih edilmiştir. Buharlaştırma yöntemi kullanılarak yapılan ince film fotovoltaiik aygıtların yüzeysel, optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Teknolojinin gelişmesiyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerji sistemleri için birçok çözüm üretilmiş durumdadır. Her gün daha fazla olan enerji ihtiyaçları, küresel ve çevresel dönüşümler, canlıların hayatta kalması ve devamlılığı için iki hayati faktördür (Zhang vd. 2020). Fosil yakıttan (kömür ve petrol) enerji üretimi çevreye zararlı emisyonlar oluşturduğundan, doğrudan ve dolaylı olarak insanlığa zararlı bir etkiye sahiptir (Bagher vd. 2015). Fotovoltaik (PV), her iki kritik faktöründe üstesinden gelebilecek en umut verici temiz teknolojilerden biri olarak kabul edilir (Agrawal, 2009; Zhang vd. 2020). Güneş aygıtları ile enerji eldesi gürültüsüz çalışır, CO₂ zararlı emisyonu ve kirletici gazların salınımı yoktur, bakım onarım gerektirmez, kullanılacak enerji kaynağı sonsuz ve bedava olan bir teknolojidir.

İlk organik güneş pili 1986 yılında ABD’de bulunan Kodak firmasında üretilmiştir (Tang, 1998). Organik malzeme kullanılarak yapılan çalışmalar verimi düşük diye tercih edilmemiştir. İlk çalışmalarda verimin düşük çıkmasının nedeni; tek kristal yarıiletken taban malzeme kullanılması olarak atfedilmiştir (Çelik, 2017). Tek kristal yarıiletken taban malzeme yerine, monokristal yapılı ITO filmler kullanılarak fotovoltaik aygıtlarda verimin artırılması yoluna gidilmiştir. Bir elektrolit içerisine daldırılmış organik ligand ile duyarlaştırılmış ITO (İndiyum katkılı kalay oksit) elektrottan enerji dönüşümü konusunda son zamanların en çok konuşulan konusudur (Sönmez, 2018). 1995 yıllarında Yu ve ekip arkadaşları ITO üzerine hazırladıkları ince filmleri poly (2-methoxy-5-(2’ethyl-hexyloxy)-1,4 phenylene vinylene) malzemesi ile organik güneş pillerini üretmişlerdir. Yu ve arkadaşlarının ürettikleri organik güneş pilinin verimi yaklaşık olarak %2,9 dur. Organik fotovoltaik aygıtları son yıllarda ilgi odağı olan bir fotovoltaik aygıt türüdür. Organik fotovoltaik aygıtlarının inorganik fotovoltaik aygıtlarına göre avantajları vardır. Bunlar kolaylıkla değiştirilebilmeleri, piyasa değerinin ucuz olması, kolay üretim teknikleriyle var edilebilmeleri ve hafif olmaları olarak sıralanabilir. Bu sıralanan avantajların yanı sıra geniş kullanım alanına sahip olması son yıllarda bu aygıt tipi üzerinde araştırmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur (Güneş vd. 2007). Boya duyarlı güneş pili (DSSC), en umut verici fotovoltaik teknolojilerden biridir ve düşük maliyetli enerji üretimi potansiyeli

ve taşınabilir bir enerji kaynağı olma potansiyeli nedeniyle büyük ilgi görmüştür (O'Regan ve Gratzel, 1991; Hagfeldt vd. 2010). 1972 yılında boya duyarlı güneş pilleriyle elektrik dönüşüm deneyleri gösterilmiş ve bilim adamları çevresinde tartışmalar başlamıştır. Boya duyarlı güneş piller 5 bileşenden oluşur; yarıiletken(TiO_2), duyarlaştırıcı (dye), redox aracısı, elektrot, ve mekanik destektir (Akman, 2020). Boya duyarlı güneş pillerinin birçok avantajı vardır çok basit kompozisyon, düşük maliyetler, düşük güneş ışınımı ile çalıştırılabilme, iki taraflı çalışma (iki yüzeyli), nadir toprak elementleri içermez, boyalar biyolojik olarak parçalanabilir ve toksin değildir (Mathew, 2014). Biyomolekül etiketleme ve floresans görüntüleme için yaygın olarak kullanılan fotokromik organik ligantların floroforları oldukça faydalı olma vaat etmektedir (Sola-Llano ve Banuelos, 2018). Fotokromik organik ligantlar boyar maddeleri yüksek eksitasyon katsayısına sahiptir ($70\,000 - 80\,000\ \text{M}^{-1}\ \text{cm}^{-1}$) ve kolayca fonksiyonlandırma işlemleri yapılabilmektedir. Boyar maddenin absorpsiyon piki maddenin absorplama özelliğini bozmadan özel modifikasyonlarla daha uzun dalga boylarına kaydırılabilmektedir. Fotokromik organik ligantların sentezi ve saflaştırılması basittir. Fotofiziksel ve fotokimyasal özellikleri sayesinde organik ligandların duyarlaştırıcı olması uygundur (Geng vd. 2013).

Ucuz, hafif, esnek ve kolay üretilmeleri gibi avantajlara sahip organik güneş aygıtları için akademik çevrelerde rutenyum kimyasalı dahil edilmiş organik aygıtlara ilgi artmaktadır. Benzersiz yetenekleri olan rutenyum kimyasalı fotofiziksel ve fotokimyasal özelliklerinden kaynaklı olarak güneş pili uygulamaları, organik ışık yayan diyotlarda, optoelektronik aygıt üretiminde vb. alanlarda genellikle kullanılmaktadır (Seddon ve Seddon, 1982; Lan vd. 2011; Nazeeruddin vd. 1997). Güneş enerjisi dönüşümü alanında Rutenyum komplekslerinin foto duyarlılaştırıcı olarak hareket etmesi ilk 1990'lı yıllarında ilgi çekici olmuştur. İlk çalışma O'Regan ve Gratzel tarafından akademik literatüre eklenmiştir (O'Regan ve Grätzel, 1991).

1970'li yıllarındaki petrol krizi fotovoltajların geliştirilmesini hızlandırmış ve bu alanda çalışmalar çoğaltılmıştır. Çok daha az yarıiletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretilebilecek organik fotovoltaj hücre çalışmaları hız kazandı (Würfel, 2005). Alman şirketi olan Heliatek, iki katmanlı soğurucu tabaka kullanarak, organik fotovoltaj hücre veriminde %12'lere ulaşmıştır (Çalış, 2016). Ancak inorganik fotovoltaj hücrelerde verim %24'lere ulaşıldığından bugün fotovoltaj piyasasının büyük bir yüzdesi inorganik

malzemelerle yapılan fotovoltaik hücrelerden oluşmaktadır. Organik fotovoltaik hücreler fotovoltaik piyasasında hala yetersiz kalsa da, bilim insanları farklı organik malzemeler kullanarak verim artışı çalışmalarını sürdürmekte ve yeni polimerler üretmektedirler (Ballıpınar, 2012).

Yukarıdaki çalışmalara ek olarak yarıiletken tabanlı organik arayüzeyle çalışmalar son zamanlarda oldukça sık çalışılmaya başlanmıştır. Arayüzeyle kaplanan malzemelerin aygıt performansında ve ışıktan etkilenme durumlarına göre bazı fiziksel özellikleri olumlu yönde geliştirdiği tespit edilmiştir (Imer vd. 2020; Sevgili vd. 2021). Bu çalışmada iki farklı molekül üzerinden yapılan sentez çalışmalarına ek olarak metal komplekslerinin aygıt üzerindeki fiziksel değişimleri araştırılmıştır.

2.1. Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji doğal kaynaklardan var edilen mütemadiyen devam eden enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil kaynaklara göre çevre dostu olmalarının yanında devamlı kendilerini yeniler. Bu kaynaklar güneş enerjisi başta olmak üzere rüzgâr, hidrolik, jeotermal, ve okyanus (dalga ve gel-git) enerjisi olarak sıralanabilir. Bu tür bir enerji günümüzde fosil enerji kaynaklarına karşı olan tiryakiliğin azaltılmasında önemli rol üstlenmektedir. Son 15 yıl zaman dilimi içerisinde ülkemizde yenilenebilir enerji sektöründe kayda değer gelişmeler yaşanmıştır. Yenilenebilir kaynaklarından temin edilen elektrik enerjisi 2002 yılı toplam 34 milyar kWh iken, 2017 yılında toplam 69,4 milyar kWh tir. (Koç vd. 2018; Yıldız, 2012). Yenilenebilir enerji türlerinden biri olan güneş enerjisi ülkemizde güneşlenme gün sayısının fazla olması ve güneş enerjisine erişimin zor olamaması nedeniyle diğer yenilenebilir enerji kaynakları içinde ön plana çıkmaktadır.

2.2. Güneş Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları çeşitlerine bakıldığında güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla performans açısından daha güçlü bir enerjidir. (Kocakuşak, 2018). Özgür bir enerji kaynağı olması enerji kaynaklarının her geçen gün azalıyor olması ve bir yandan da dünya nüfusunda ki hızlı artışın yaşanması, güneş enerjisinin kullanılmasını önemli ölçüde hızlandırmıştır (Koç, 2021).

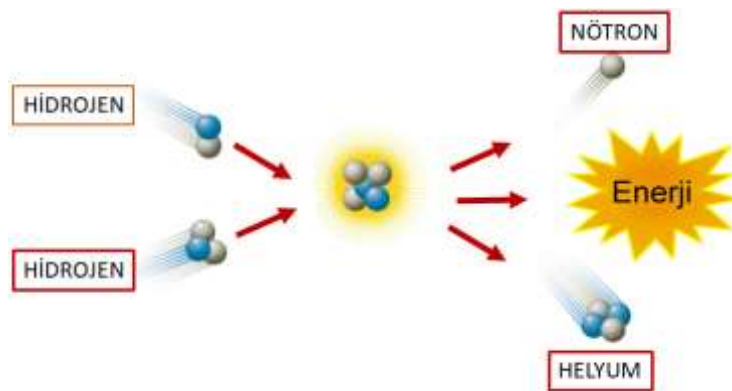
2.2.1. Güneş

Evrendeki 200 milyar yıldızlardan yalnızca bir tanesi olan Güneş dünyamızın ana yaşam kaynağıdır. Takriben 14,5 milyar yıl önce meydana gelmiş Büyük Patlama (Big Bang) sonrasında 10 milyar yıl süren bir kısım gaz ve toz bulutlarının çökmesiyle Güneş meydana gelmiştir (Celal vd. 2013). Güneşin Dünya'ya olan uzaklığı yaklaşık 150 milyon km iken yarıçapı 696000 km olarak ölçülmüştür (Strobel, 2020).

2.2.2. Güneş Enerjisi Oluşumu

Güneş enerjisi temiz ve zararlı gaz salınımının olmadığı, doğrudan güneş ışığından elde edilen çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Şekil 2.1'de şematik gösterildiği gibi güneşin enerji kaynağı kendi yapısında bulunan 4 hidrojen atomunun bir füzyon tepkimesine girerek 1 helyum atomuna dönüşmesinde gizlidir. Hidrojenlerin birleşerek helyuma dönüşmesi sırasında kütle kaybı karşılığı olan enerji ünlü fizikçi Albert Einstein'ın enerji formülüyle ($E = m \times c^2$) hesaplanmaktadır (Küçükkaya, 2016). Füzyon tepkimesi sonucunda güneşin yüzeyinin sıcaklığı 5800 Kelvin (K) olur ve bu enerji uzaya her yönde ışımaya yaparak yayılır (Aydoğan, 2017).

Dünyamıza Güneşten yayılan enerjinin yalnızca 2,2 milyarda biri gelmektedir. 149 milyon km yol kat ederek gelen enerji, dünyada bir yılda kullandığımız enerjinin yaklaşık 15 bin katıdır (Aydoğan, 2016). Bir başka deyişle 13 milyar ton kömürün sağladığı enerjiyi güneş yeryüzüne bir saatlik kısa bir sürede göndermektedir (Celal vd. 2013).

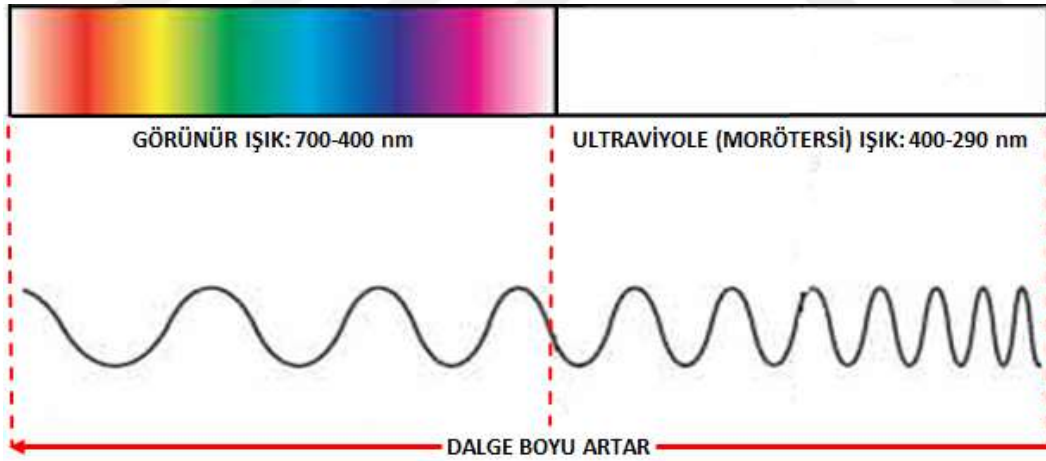


Şekil 2.1. Füzyon tepkimesi

2.2.3. Güneş Işınımı

Güneşte füzyon tepkimesi sonucu oluşan enerji ışına yaparak yayılır. Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşması takribi 524 saniyedir (Ajder, 2011). Güneş ışını, Dünya'ya geldiği vakit, bir miktar emilir, bir miktar saçılır ve bir miktar etkilenmeden atmosferdeki moleküllerin içinden geçer ve nesnelere tarafından soğurulur veya yansıtılır (Aydoğan, 2017).

Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik dalgaları enerjilerine göre sınıflandırır ve sadece 400 ile 700 nm aralığındaki bölgesi görünür ışımadır. Elektromanyetik spektrum ve görünür bölgenin dalga boyuna göre sınıflandırılması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Tarihsel sürecini özetlemek belki 2 satırdan ibaret olsa da ortaya konulması için hatırı sayılır bir zaman geçmiştir. İngiliz fizikçi Isaac Newton, karanlık bir odada, prizmada kırılıp duvara yansıyan ışığın elektromanyetik spektrum olduğunu bilincinde değildi. Yaklaşık 200 yıl geçmesi ve İskoç fizikçi James Clerk Maxwell'in ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunu açıklaması gerekecekti (Özkarayel, 2013).

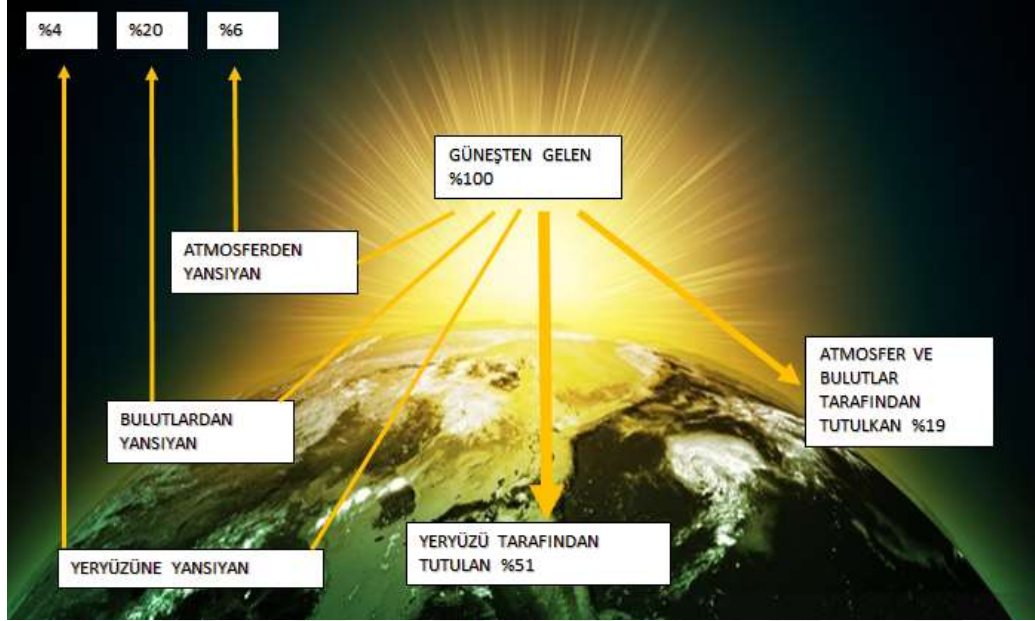


Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum ve görünür bölge

2.2.4. Güneş Işınımına Dünya Atmosferinin Etkisi

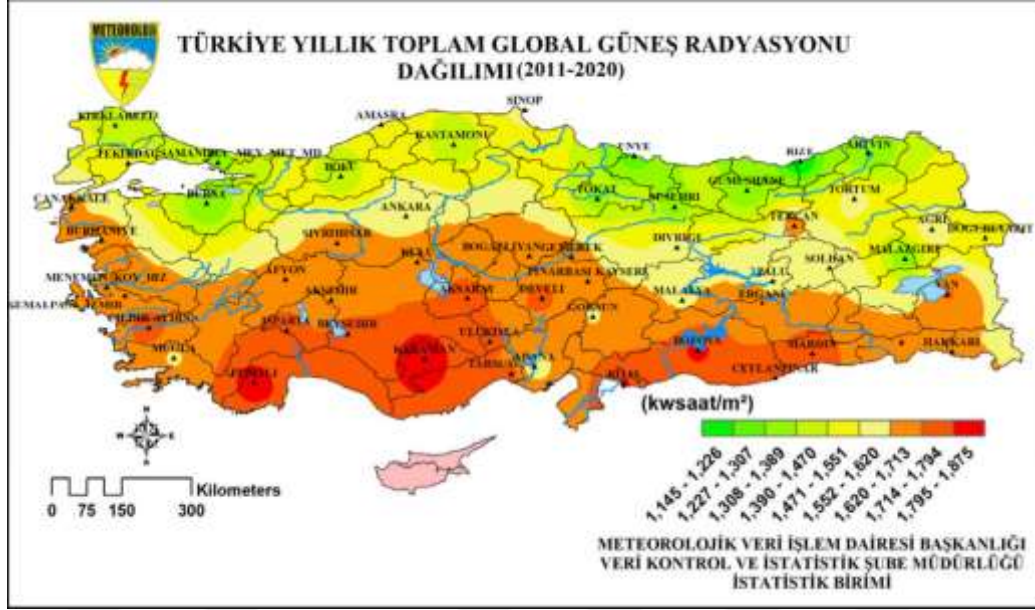
Güneş enerjisi çalışmalarında ihmal edilen mühim noktalarından biri bölgenin coğrafi ve atmosferik nedenlerinin göz ardı edilmesidir. Böylece yapılan ölçümler eksik kalmaktadır. Ölçümlerde güneş enerjisi potansiyelinin yanına güneşlenme süreside dikkate alınmalıdır.

İşte tam olarak burada yani güneşlenme süresi ölçümlerinde atmosferin koşulları çok önemlidir. Güneşli bir günde güneş ışınımının büyük bir bölümü, doğrudan ışınlardan oluşur. Bulutlu bir günde ise güneş ışınımının büyük bir kısmı saçılmış ışınlardan oluşur. Bunun nedeni atmosferde bulunan parçacıklardan kaynaklanmaktadır (Ajder, 2011).



Şekil 2.3. Güneşten gelen ışınların dağılımı

Güneşten gelen ışınların dağılımı Şekil 2.3'te verilmiştir. Güneşten gelen radyasyonun takribi %51'i yeryüzüne doğrudan ulaşır. Yeryüzüne ulaşan radyasyon, buharlaşmayı ve bitkilerin fotosentez olayının gerçekleştirilmesini sağlar. Kalan %49'un, %4'ü yer yüzeyinden yansır, %26'sı bulutlar ve atmosfer tarafından yansıtılır, %19'u ise atmosferik gazlar, partiküller ve bulutlar tarafından emilir (Meteorolojiye Giriş - Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2021). 2011-2020 yılları arası Türkiye'deki yıllık Güneş radyasyonu miktarı 1560,4 kWsaat/m² olarak ölçülmüştür (Taştan, 2020). Şekil 2.4'te 2011-2020 yılları arası Türkiye'deki Güneş radyasyonu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. 2011-2020 yılları arasında yıllık toplam güneş radyasyonu dağılımı (Taştan, 2020).

2.2.5. Güneşlenme Süresi

Dünya Meteoroloji Örgütü'nün tanımlamasına istinaden güneşlenme süresi, belirli bir zamanda birim alana düşen doğrudan güneş radyasyonunun 120 W/m^2 yi geçtiği sürelerin tamamıdır, birimi saattir (Zateroğlu ve Kandırmaz, 2018). Literatürde araştırmacılar güneşlenme süresinin yıllık ve mevsimsel değişkenliklerini çözümlene yapmışlardır (Matzarakis ve Katsoulis, 2006; Dolinar, 2006). Yapılan çalışmalar bulutluluk, nem, yağış, basınç, rüzgâr hızı, sıcaklık gibi iklim parametreleri güneşlenme süresini etkilediği görülmektedir. Ülkemizin iklimi yer şekilleri, deniz-kara dağılımı, yükseklik vb. gibi nedenlerden dolayı çok farklılık göstermektedir. 1985-2020 yılları arasında ülkemizde günlük ortalama toplam güneşlenme süresi 6,7 saattir. Dağılımı Şekil 2.5'te verilmiştir (Taştan, 2020).



Şekil 2.5. 1985-2020 yılları arasında ortalama günlük toplam güneşlenme süresi dağılımı (Taştan, 2020).

2.3. Fotovoltaik Aygıt Teknolojisi

2.3.1. Tarihsel Süreç

Güneş pilleri fotovoltaik aygıtlar olarak adlandırılan, soğrulan ışık (foton) enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklerdir (Küpeli, 2005). Fotovoltaik Yunanca, ışık anlamının karşılığı olan foto ve gerilim anlamına gelen volt kelimelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. 1839 yılında Güneş ışınlarının bir metal yüzeye çarptığında, elektrik oluşturduğunu keşfeden ve fotovoltaik olayı bulan bilim adamı genç fizikçi Alexandre Edmond Becquerel'dir (Davidson, 2011). İlk fotovoltaik aygıt William Adams ve Richard Day tarafından 1876 yılında ısıtılmış iki basit platin kontağın selenyuma temas ettirilmesi ile selenyumdan fotoakım üretildi. Çalışmanın amacı yalnızca ışığın hareketi ile selenyumda bir akımın oluşup oluşmadığını tespit etmektir (Adams ve Day, 1877). İlk fotovoltaik aygıtta yarıiletken ve metal kontak arasında doğrultma özelliği gösteren kademeli bir kesitin olabileceği tespit edildi (Aydoğan, 2017).

1914 yılında fotovoltaik aygıt verimliliği %1 değerine ulaşmış olsa da 1954 yılında Chaplin ve Fuller tarafından ilk kez fotovoltaik aygıt silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiş ve aygıt verimliliği %6 olmuştur (Oktik, 2001; Chapin vd. 1954). İnorganik fotovoltaik aygıtlar

silisyum, germanyum, galyum arsenik gibi inorganik yarıiletken malzemelerden yapılır (Günday, 2010).

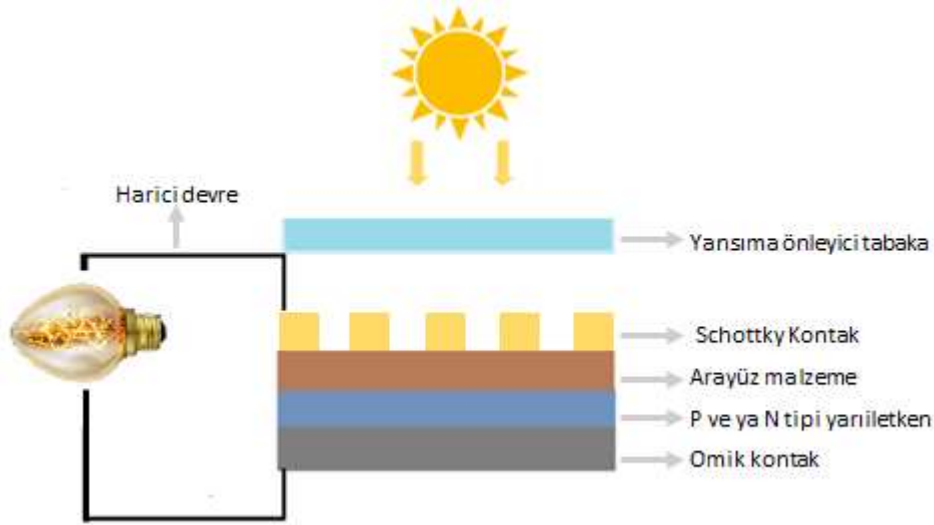
1970'lerde baş gösteren enerji krizi sebebiyle çevre duyarlılığıyla ilgili çalışmalar hızlanmıştır. Silisyum kristali üzerindeki çalışmalar yoğunlaşmıştır. Silisyum kristali üzerindeki ilginin nedeni fotovoltaik aygıtların veriminin artırma çabalarının yanı sıra daha ucuza üretebilmektir. Ek olarak alternatif bir seçenek olması açısından daha az yarıiletken malzemeye ihtiyaç duyulan film güneş pilleri konusunda çalışmalara önem verilmiştir (Kaçuş, 2018).

2.3.2. Fotovoltaik Aygıt Yapısı ve Özellikleri

Fotovoltaik aygıtlar ayrı iki tür yarıiletken yapının birleştirilmesi ile bir elektriksel alan meydana getirilmesi esasına dayalı bir yapıdır. Fotovoltaik aygıtlar, üzerlerine düşen fotonun taşıdığı enerjinin iki katman arasındaki elektron hareketliliği ile güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren, hareketli parçası olmayan, bakımı kolay ve ömürleri uzun olan enerji dönüşüm araçlarıdır (Çelik ve Koç, 2020; Öztürk, 2004).

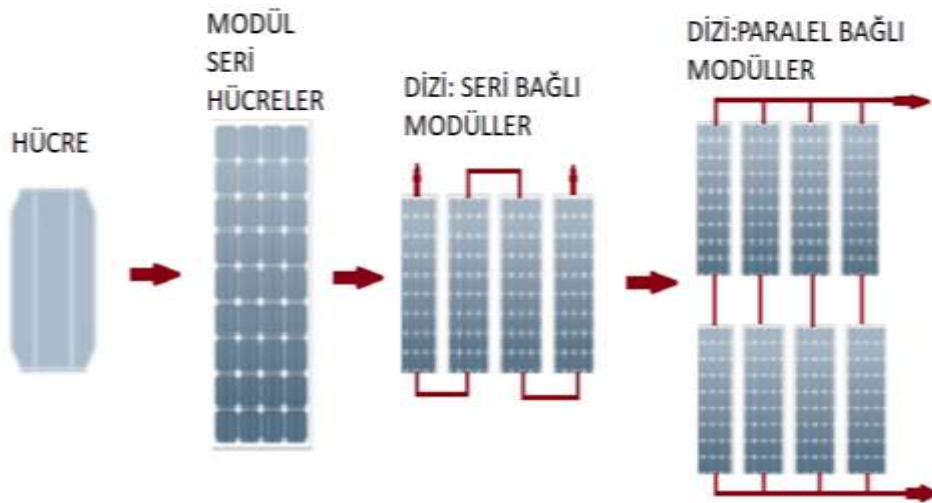
Fotovoltaik aygıtlar yapılarına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle güneş enerjisini elektriğe dönüştürülebilir (Öztürk, 2004). Fotovoltaik aygıtların yüzeyleri genellikle kare, dikdörtgen veya daire biçiminde şekillendirilen Fotovoltaik aygıtların alanları 60-100-156-243 cm^2 civarında değişmekte olup, ortalama 100 cm^2 'dir. Kalınlıkları ise 0,2–0,4 mm civarındadır (Köker, 2020).

Fotovoltaik aygıtın yapısı, bir tosta benzer. Güneş ışığı, aygıtın üst katmanında bulunan yarıiletkene ulaştığında elektronlar hareketlenir ve alt katmana doğru hareket eder. Fotovoltaik aygıt yapısının şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Fotovoltaik aygıt yapısı

Fotovoltaik aygıtın güç çıkışını yükseltmek amacıyla çok fazla aygıt birbirine paralel veya seri bağlı şekilde yüzey üzerine monte edilir. Genellikle paralel bağlanarak oluşturulan sistemler seri bağlanarak oluşturulan sistemlere göre daha az gerilim oluşturur. Paralel bağlantı pratikte çok işe yaramaz, bu yüzden daha fazla gerilim elde etmek için aygıtlar çoğunlukla seri bağlanarak fotovoltaik sistemler oluşturulur. Bu yapıya fotovoltaik modül adı verilir. Fotovoltaik aygıt modül ve dizi tasarımı şematik olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Fotovoltaik aygıt modül ve dizi tasarımları (Öztürk, 2004)

Fotovoltaik aygıt tiplerini yapımında kullanılan malzeme türleri 3 genel kısım altında toplanabilir (Aydoğan, 2016).

1) Birinci Nesil

Tek kristal silisyum fotovoltaik aygıtlar: Güneş pillerinde en çok tercih edilen malzemedir. Bu pillerin verimi yaklaşık % 25 ile sınırlıdır. Şekil 2.8 (a)'da gösterilmiştir.

Polikristal silisyum fotovoltaik aygıtlar: Tek kristale göre daha ucuzdur. Ancak verimleri yaklaşık % 15 tir. Şekil 2.8 (b)'de gösterilmiştir.

2) İkinci Nesil

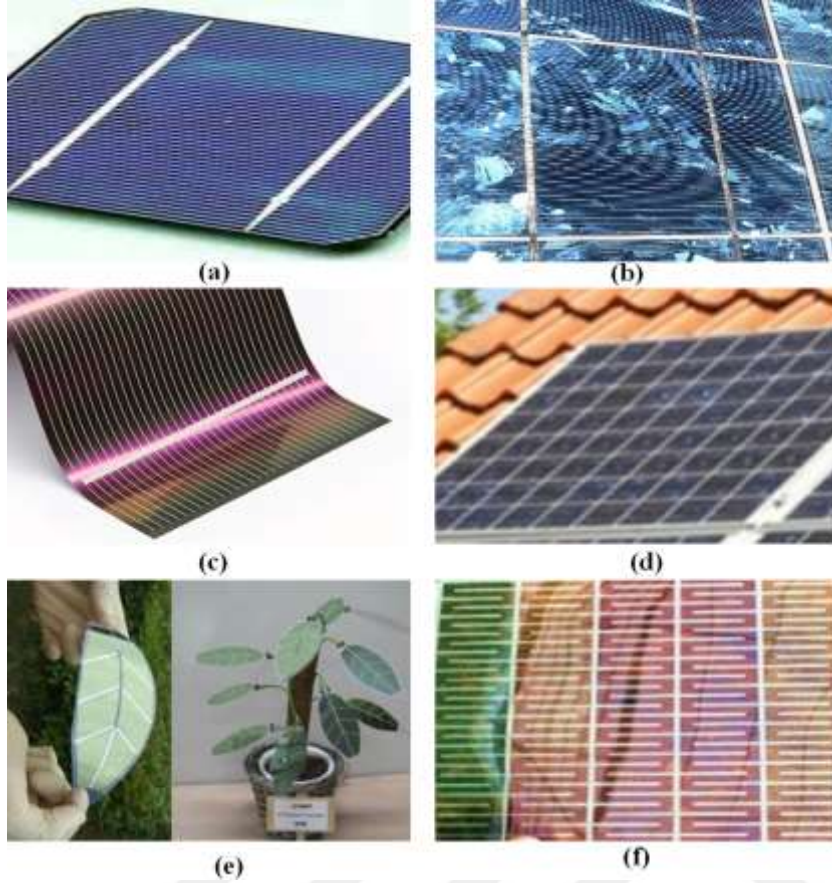
İnce film fotovoltaik aygıtlar: İnce filmlili silikon güneş pilleri zayıf ışık altında kristalin performansına göre daha iyidir. Verimleri ortalama % 18 civarındadır. Şekil 2.8 (c)'de gösterilmiştir.

3) Üçüncü Nesil

Nanoteknolojiye dayalı fotovoltaik aygıtlar: Nanoteknolojiden iki şekilde yararlanır; Fotovoltaik panel üzerinin nanomalzeme ile kaplanması veya fotovoltaik aygıtların nano boyutlarda üretilmesi (Çelen, 2020). Şekil 2.8 (d)'de gösterilmiştir.

Organik fotovoltaik aygıtlar: İnorganik fotovoltaik aygıtlarından farkı geniş yüzeylere uygulanabilmesi, finansal olarak maliyetinin düşük olması ve en önemlisi kolay üretilebilmesinin bu aygıtların avantajlarından (Görkey, 2013). Heliatek teknoloji şirketi 2012 yılında organik fotovoltaik aygıt üretiminde %12 verimliliğe ulaşmıştır (Çalış, 2016). Şekil 2.8 (e)'de gösterilmiştir.

Boya duyarlı fotovoltaik aygıtlar: Michael Gratzel ve O'Regan gibi bilim adamlarının yapmış oldukları çalışmalarla geliştirilmiş ve % 10 laboratuvar verimliliğine ulaşmıştır (Görkey 2013). Şekil 2.8 (f)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. (a) Tek kristal fotovoltaik aygıt (b) Polikristal fotovoltaik aygıt (c) İnce film fotovoltaik aygıt (d) Nanoteknolojiye dayalı fotovoltaik aygıt (e) Organik fotovoltaik aygıt (f) Boya sensörlü fotovoltaik aygıt

2.3.3. Fotovoltaik Sistemin Çalışma Prensibi

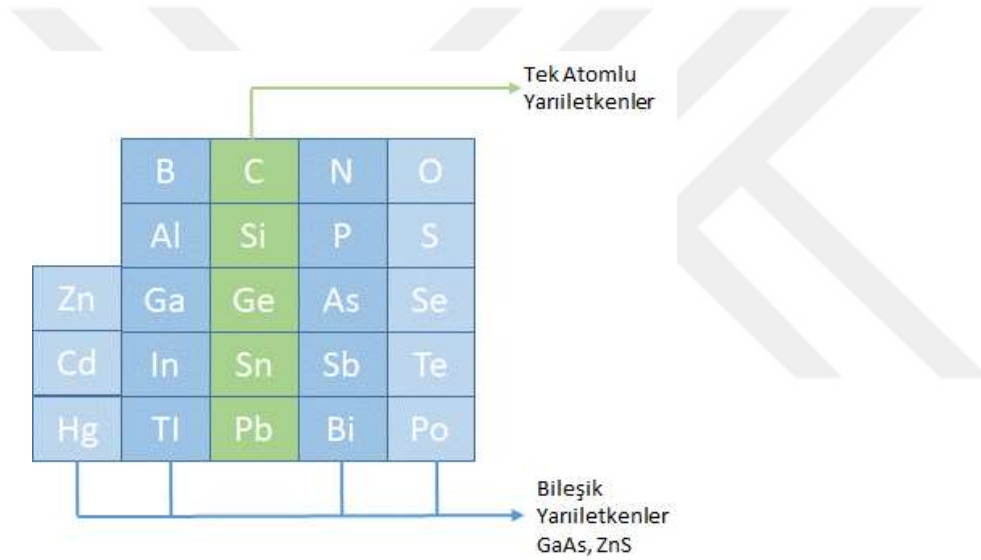
Güneş ışınlarından düşen fotonlar sayesinde elektron fazlalığı olan N tipi yarıiletken bölgede elektron eksikliği bulunan P tipi yarıiletken bölgeye yönelerek hareket ederler, bu hareket elektron-hol çiftlerini meydana getirir. P ve N bölgelerinin elektron fazlalığı ve azlığı elektrik alan oluşmasına neden olur. Elektrik alan sebebiyle birbirinden ayrılan elektron hol çiftleri fotovoltaik panelin iletken uçları arasında bir güç çıkışı meydana getirir (Öztürk, 2004).

2.4. Yarıiletken Malzemeler

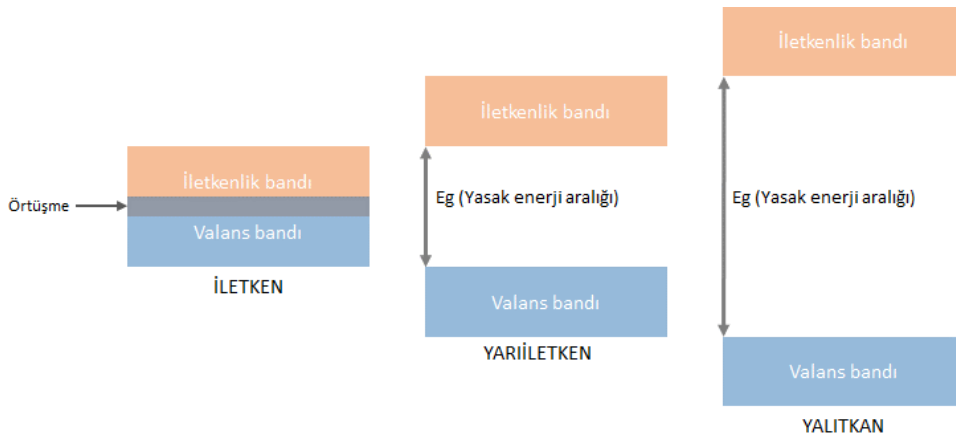
İletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alır. Yarıiletkenlerin valans bandı ile iletkenlik bandı arasında Şekil 2.10'da görüldüğü gibi yasak enerji aralığı vardır. Yarıiletken iletken hale getirmek isteniyorsa valans elektronlarına yasak enerji aralığında fazla enerji verilmelidir.

Yarıiletkenler;

- Oda sıcaklığında yalıtıcıdır.
- Isı, ışık, manyetik etki veya gerilime maruz bırakıldığında iletkenlik özelliği kazanır yani valans elektronu (dış yörüngedeki elektron) serbest hale geçer. Bu iletkenlik özelliği uygulanan etkinin kalkmasıyla tekrar yarıiletken durumuna geçer.
- Doğada basit element halindedir. Laboratuvarlarda birleşik halde elde edilir. Şekil 2.9'da yarıiletken elementler verilmiştir.
- Kristal yapıdadırlar. En önemli yarıiletkenler silisyum ve germanyum elementleridir.



Şekil 2.9. Yarıiletken Sınıflandırılması



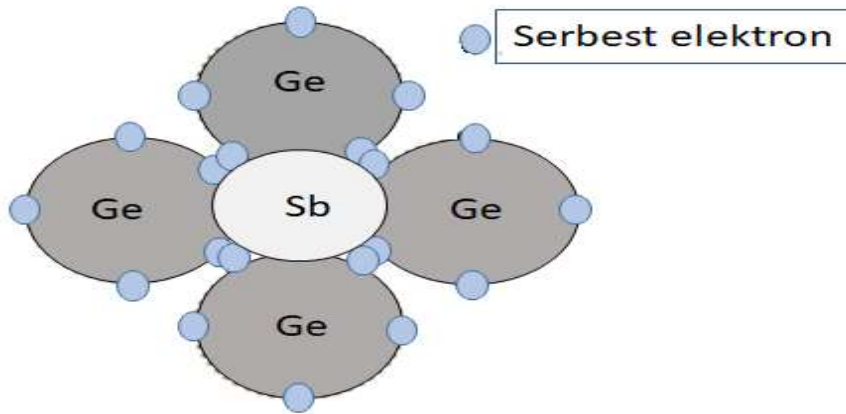
Şekil 2.10. Yalıtkan, yarıiletken, iletken enerji bantlar.

2.4.1. P ve N Tipi Yarıiletken Malzemenin Oluşturulması

Saf yarıiletkenlerin yalıtkanlıklarını düşürmek için farklı katkı malzemeleri kullanılır. Bu olaya “katkılama” denilmektedir. Elektron veya boşluk sayısının yükseltilmesi malzemenin iletkenliğini, düşürülmesi ise malzemenin direncini artırır. Katkılama olayları sonucunda n-tipi yarıiletken veya p-tipi yarıiletken meydana gelir.

N tipi yarıiletken elektron vermek ister böylece N tipi yarıiletkende elektron fazlalığını var demektir. P tipi yarıiletken ise elektron almak ister. Bu da P tipi yarıiletkende serbest oyuk (elektron eksikliği) fazlalığı var demektir.

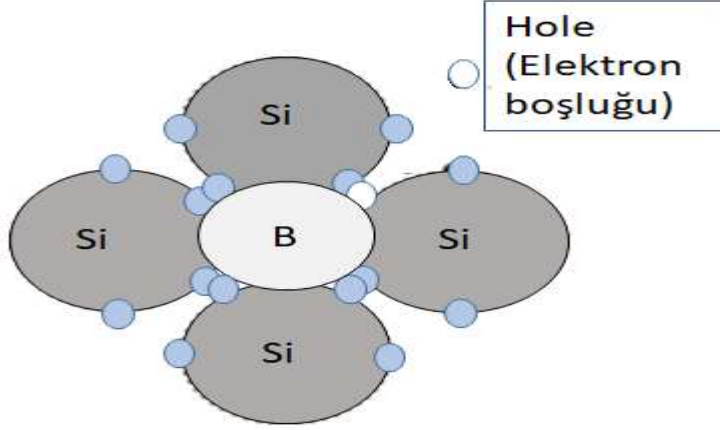
Örneğin; Şekil 2.11’de gösterildiği gibi germanyuma 5 valans elektrona sahip fosfor, arsenik, bizmut veya antimon gibi katkı maddesi belli bir oranda eklendiğinde, germanyumun 4 valans elektronu ile etkileşim kurarak kovalent bağ oluşturur (Kovalent bağ kısaca bir atomun valans elektronlarındaki elektronların birbirleri ile etkileşime girmesi sonucunda meydana gelir). Katkı atomlarının valans bandındaki 1 elektron açıkta kalır açıkta kalan elektron iletkenliği artırır ve valans bandında bir boşluk oluşturmaz (Solmaz, 2019). Sonuç olarak bir N tipi yarıiletken malzeme meydana gelir.



Şekil 2.11. N tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması

P tipi yarıiletken malzeme için durum biraz farklıdır. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi katkı maddesi olarak 3 valans elektrona sahip alüminyum, bor veya galyum belli bir oranda eklendiğinde silisyumun 3 valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur. Silisyumun valans

bandında 1 elektron bağ oluşturmaz ve valans bandında bir elektron boşluğu oluşur, buna boşluk, delik veya hole denir. Sonuç olarak bir P tipi yarıiletken meydana gelir.



Şekil 2.12. P tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması

Silisyum veya germanyum katkı maddeleri eklenerek, P tipi yarıiletken ve N tipi yarıiletken malzeme oluşturulmuştur. Silisyum ve germanyum maddeleri saf halde elektriksel anlamda işlevsizdirler. P ve N tipi malzemenin birlikte kullanılmasına PN birleşimi veya PN eklemi denir (Gezeroğlu, 2019).

2.5. Organik Fotovoltaik Aygıtlar

Organik fotovoltaik aygıt güneş enerjisini organik tabaka tarafından absorbe eden ve doğrudan elektrik enerjisine çeviren bir cihaz olarak tanımlanabilir. Tabakada kullanılan organik malzemenin inorganik malzemeden farklı yönleri şu şekilde sıralanabilir. Geniş yüzey kaplama olanağı, finansal olarak düşük maliyetli ve en önemlisi kolay üretilebilmesidir. Ek olarak daha farklı özellikler kazandırılabilir olması organik malzemenin olumlu yönlerindedir (Waldauf vd. 2004). Ancak organik fotovoltaik aygıtların verimlerinde önemli ilerlemeler olmasına rağmen verimleri inorganik fotovoltaik aygıtlara kıyasla küçüktür (Padinger vd. 2003; Brabec vd. 2002; Kroon vd. 2002).

İlk organik güneş pili (Layer organic photovoltaic cell) 1986 yılında üretilmiştir.(Tang, 1998). İlk üretilen güneş pilinden %1 verim elde edilmiş iki katmanlı bu güneş pili

araştırmacıların organik güneş pili üzerine çalışmalar yapmasını hızlandırmıştır. Güneş enerjisini organik tabaka tarafından tutularak enerjiye dönüştüren pillere 1995 yılında Yu ve arkadaşları ITO üzerine hazırladıkları ince filmleri poly(2-methoxy-5-(2'ethyl-hexyloxy)-1,4 phenylene vinylene) malzemesini kullanarak %2,9 verim elde etmişlerdir (Yu vd. 1995). 2000'li yıllara geldiğimizde Takahashi ve arkadaşları çalışmalarında farklı organik malzemeler denenmiş ve verimi %3,51 değerine ulaşmıştır (Takahashi vd. 2000). Organik güneş pilleri gelişmeleri arasında diğer önemli bir gelişme ise Alan McDiarmid, Alan Heeger ve Hideki Shirakawa adlı bilim adamlarının yapmış olduğu iletken polimerleri keşfinin ardından yariletken konjuge polimerlerin tercih edildiği organik güneş pili araştırmaları enerji dünyasının bu konuyla ilgili araştırmaları artmıştır (Shirakawa vd.1977). Organik fotovoltaik pillerin veriminde etkili olan en önemli faktör aktif tabakada kullanılacak olan malzemenin optik ve elektronik özellikleridir (Ürper ve Osman, 2015).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Organik Fotovoltaik Aygıtların Hazırlanması

Bu bölümde sentezlenen moleküllerin aygıt haline getirildiği aşamaları ve kullanılan cihazlar anlatılacaktır.

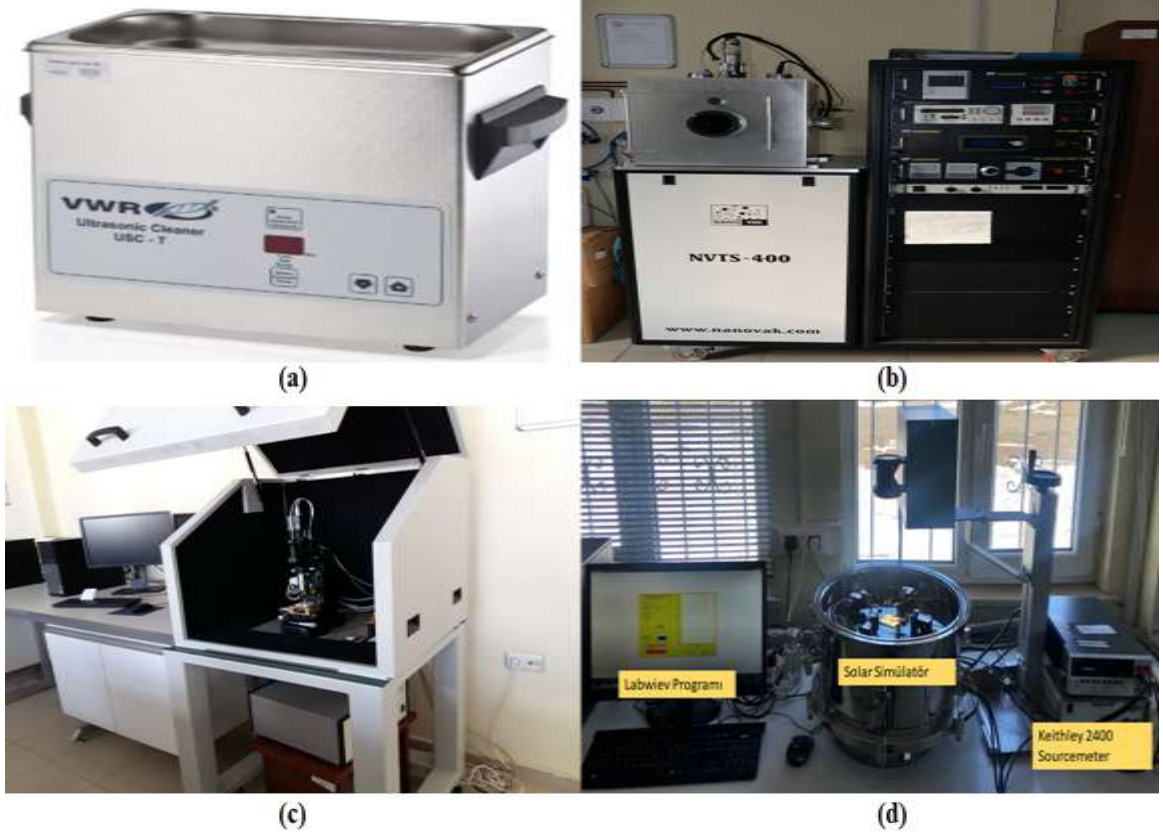
3.1.1. p-tipi Si Kristal Parça Temizlemesi

Deneysel olarak karakteristiklerini belirlemeye çalıştığımız organik fotovoltaik aygıtlarda 1-10 Ω -cm öz direçli p-Si taban malzeme olarak kullanılmıştır. Malzemenin kirliliklerinin temizlenmesi ve var olan oksit tabakasının yok edilmesi amacıyla kimyasal temizlik işlemi uygulanmıştır. Kimyasal temizleme işlemi için, p-Si kristal parçaları, ilk olarak oda sıcaklığında ultrasonik temizleme cihazı ile asetonda on dakika yıkandı. Hemen sonra saf su ile durulandı. Tekrar ultrasonik temizleme cihazında izopropanol alkolde on dakika yıkandı. Hemen sonra tekrar saf su ile durulandı. Ardında kuru azot ile kristal parça kurutuldu. Temizleme işleminde kullanılan ultrasonik temizleme cihazı cihaz Şekil 3.1 (a)'da gösterilmiştir.

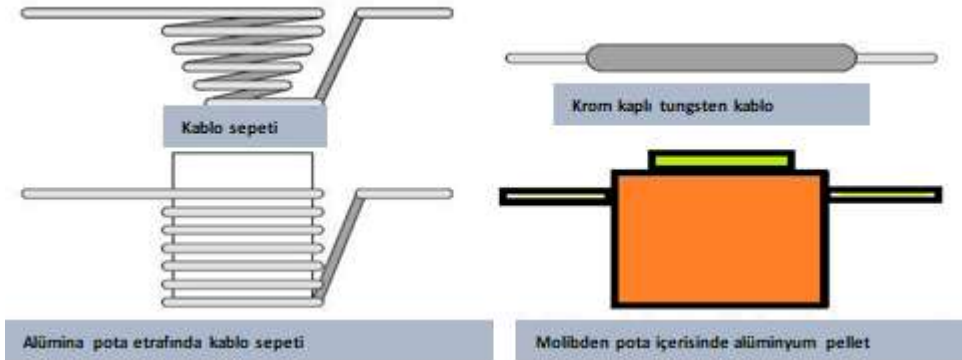
3.1.2. Omik Kontak

Yalıtkan ve yarıiletken kristal parçanın iletkenlik özelliklerinin anlaşılabilmesinin için kristale uygun kontak yapılır. Termal buharlaştırma ile kaplanacak malzeme vakumlu ortam içerisinde ısı etkisi ile buharlaştırılır. Kaplanmak istenen malzemenin üzerine buharlaşan atomlar giderek yoğunlaşır. İşlem 10^{-5} - 10^{-6} torr basınçlı vakum ortamında yapılmıştır. Kontakın ideal olması kristal parçanın temiz ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Omik Kontak yapımında kullanılan cihaz Şekil 3.1 (b)'de gösterilmiştir. Temizleme işlemi yapılan p-Si kristal parçanın mat yüzeyine alüminyum kontak yapıldı. Bu işlem için termal buharlaştırma potası temizlendi. Kristal parçayı termal buharlaştırma cihazındaki yerine mat kısmı yukarıda kalacak şekilde yerleştirildi. Deneysel çalışmamızda kullanılan termal buharlaştırma işlemi molibden pota içerisinde alüminyum pellet

kullanılmış ve şematik gösterimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Yarıiletken malzeme 6×10^{-6} torr basınçta termal buharlaştırma yapılarak omik kontak yapılmıştır.



Şekil 3.1. (a) Ultrasonik temizleme cihazı (b) Termal buharlaştırma ve ince film kaplama cihazı (c) AFM deney düzeneği (d) Işık altında I-V karakteristiği belirlemede kullanılan cihazlar



Şekil 3.2. Termal buharlaştırma işleminde kullanılan buharlaştırma kaynakları

3.1.3. Termal Buharlaştırma ve İnce Film Kaplama

Omik kontak aşamasından sonra organik malzemeyi kaplama aşamasına gelindi. Burada da omik kontak için kullandığımız termal buharlaştırma ve ince film kaplama cihazı kullanıldı. Termal buharlaştırma ile kaplanacak malzeme vakumlu ortam içerisinde ısı etkisi ile buharlaştırılır kaplanmak istenen malzemenin üzerine buharlaşan atomlar giderek yoğunlaşır. İşlem 10^{-5} - 10^{-6} torr basınçlı vakum ortamında yapılmıştır. Omik kontak yapılan Al/p-Si kristal parçanın ön parlak yüzeyi yukarıda kalacak şekilde cihazdaki yere yerleştirdikten sonra potaya sentezlenen organik malzeme Ru(p-simen)(Pry-NDI-Ph)(Cl)₂ (1A), Pry-NDI-Ph (6E), [Ru(p-simen)(Pry-NDI-Ph-PO₃H₂)(Cl)₂] (2A) ve Pry-NDI-Ph-PO₃H₂ (6C) konulduktan sonra uygun basınç altında buharlaştırma işlemi gerçekleştirildi. Bu işlem 4 farklı organik malzeme için ayrı ayrı p-Si kristal parça üzerine yapılmıştır.

3.1.4. Doğrultucu Kontak

Bu aşama içinde termal buharlaştırma ince film kaplama cihazı kullanıldı. Termal buharlaştırma ile kaplanacak malzeme vakumlu ortam içerisinde ısı etkisi ile buharlaştırılır kaplanmak istenen malzemenin üzerine buharlaşan atomlar giderek yoğunlaşır. Cihazın pota kısmına Au konulduktan sonra kristal parçanın organik arayüzey tarafına 1mm çaplı metal dairesel maske yerleştirildi. Maske tarafı yukarıda kalacak şekilde termal buharlaştırma cihazındaki yerine yerleştirildi. Doğrultucu kontak yapımında kullanılan cihaz Şekil 3.1 (b)'de gösterilmiştir. Doğrultucu kontak işleminin ardından 4 ayrı organik malzemeli fotovoltaik aygıt elde edilmiştir. Oluşturulan fotovoltaik aygıt Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Fotovoltaik aygıt yapısı

3.2. Organik Fotovoltaik Aygıtların Elektriksel Karakterizasyon Tespitinde Kullanılan Deneysel Düzenekler

Bu bölümde üretilen 6E, 6C, 1A ve 2A fotovoltaik aygıtların karakteristiğinde kullanılan deneysel düzeneklerden kısaca bahsedilecektir.

3.2.1. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Diğer adı taramalı kuvvet mikroskopu nano ölçekli incelemelerde görüntü almak için tartışmasız çok yönlü ve güçlü mikroskopi teknolojisidir. Nano boyutta görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme konusunda doğruluğu kesin ve hassas bir tarama araçlardan biri olan AFM teknolojisiyle aygıtın yüzey morfolojisini, faz farklılıklarını, elektriksel iletkenlik farklılıklarını ve manyetik alan yönü farklılıklarını incelememizi sağlar. Kullanılan deneysel düzenek Şekil 3.1 (c)'de gösterilmiştir.

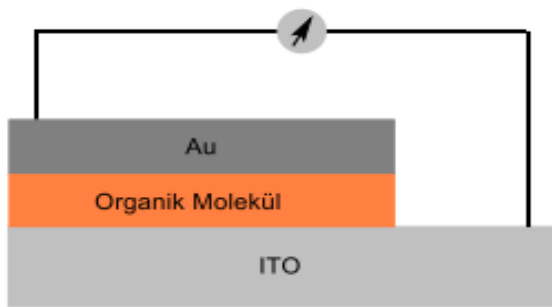
Çalışma prensibi yüzeyi hissetme, algılama yöntemi ve görüntüleme adımları altında açıklanabilir (Binnig vd. 1986). Yüzeri hissetme adımı sivri uca sahip sensör görüntülenecek yüzeye hassas bir biçimde yaklaştırılır. Algılanmak istenen kuvvet seviyesi belirlenen seviyeye geldiğinde yakınlaştırma eylemi durdurulur. Algılama adımı ise lazer ışını yardımıyla, yüzeye doğru veya tam tersi yöne doğru olan sensör sapmaları ile tespit edilir. Lazer ışınındaki sensördeki sapmalar yardımıyla, yüzeydeki konum bilgileri hafızaya alınır ve son olarak görüntüleme adımında hafızaya alınan bilgilerle yüzeyin haritası çıkartılır. Sonuç olarak nano-yüzeyin topografik görüntüsüne ulaşılmış oluruz.

3.2.2. Işık Altında I-V Karakteristiği

Farklı kimyada ürettiğimiz organik fotovoltaik aygıtların I-V karakteristiklerini Keithley 2400 (Sourceter) Güç Cihazı ile -2 ile +2 volt gerilimde ölçüm yapılmıştır. Solar simülatör farklı ışık şiddetleri (30-40-60-80-100 mW/cm²) ayarlanarak alınan I-V ölçümleri yanı sıra karanlık ortamda da ölçüm alınmış ve aygıtın ışık ortamındaki davranışıyla karanlık ortamdaki davranışı Labview programıyla tek grafikte karşılaştırmalı olarak görüntülenmiştir. Deneysel düzenek ise Şekil 3.1 (d)'de gösterilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde 6C, 6E ve Rutenyum kompleksleri olan 2A, 1A malzemelerin sentezlerinden bahsedildi. Sentezlenen malzemelerle hazırlanan fotovoltaik aygıtların elektriksel karakteristikleri karşılaştırılmalı grafiklerle analiz edilmiştir. Ayrıca donör-akseptör verimliliğini görmek maksadı ile ilk önce ITO üzerine büyütme yapılarak saf halde malzemenin fotovoltaik performansı incelenmek istenmiştir. ITO ile oluşturulan yapının şematik diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Ancak ITO tabanlı aygıtlardan elde edilen ölçümlerde, özellikle yasak enerji aralığı yüksek olan malzemelerde farklı bir absorban tabakası ve elektron-hole rekombinasyon ve jenerasyonu etkileyecek malzemeler kullanılmadığı için bu geometrideki aygıtlardan istenilen bir elektriksel ölçüm alınamamıştır.



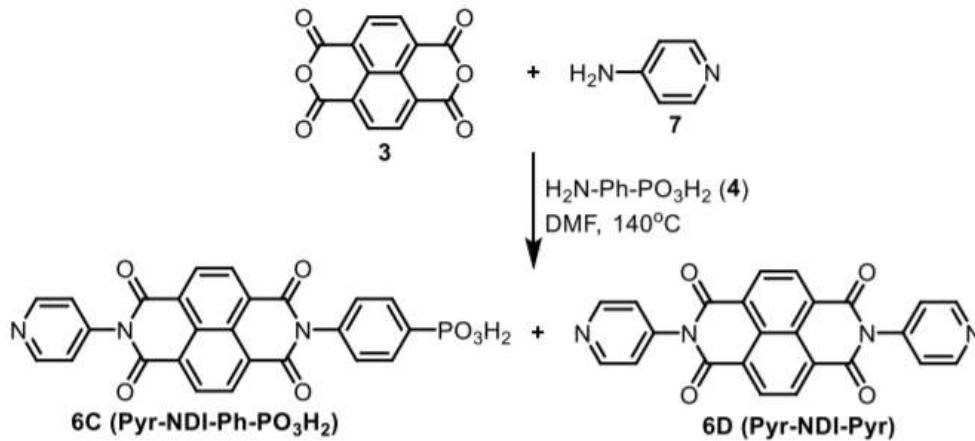
Şekil 4.1. ITO tabanlı fotovoltaik aygıtın şematik diyagramı

4.1. Organik Arayüzey Malzeme Sentezi

4.1.1. 6C Malzemenin Sentezi

Prosedür A: 100 mg (0,37 mmol) isokromeno [6,5,4-def] isokromen-1,3,6,8-tetraon (3)'ün 10 mL DMF içerisindeki çözeltisine 35 mg (0,37 mmol) piridin-4-amin (7) ve 65 mg (0,37 mmol) (4-aminofenil) fosfonik asit (4) ilave edilerek reaksiyon azot atmosferinde ve 140°C sıcaklıkta 18 gün karıştırıldı. Reaksiyon çözücüsü 50°C’de vakum altında uzaklaştırıldıktan sonra ham ürün $\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{MeOH}$ (%25) ile silika jel kolon (35 g) üzerinden

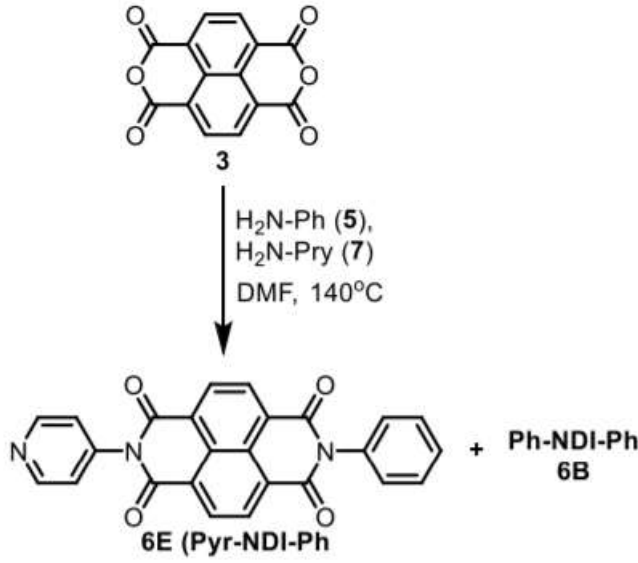
yürütülerek saflaştırma işlemine tabi tutuldu. İlk fraksiyonda 62 mg (%40) simetrik NDI türevi Pry-NDI-Pry (6D) turuncu renkli katı (erime noktası; 300°C'den büyük olarak belirlendi) olarak elde edilirken, ikinci fraksiyonda 15 mg (%8) hedef ürün asimetrik NDI türevi (6C) ve son fraksiyonda ise yine çıkış moleküllerinden 4-aminofenil) fosfonik asit (4,42 mg) elde edildi. Prosedür B: 100 mg (0,37 mmol) isokromeno [6,5,4-def]isokromen-1,3,6,8-tetraon (3)'ün DMF (10 mL) içerisindeki çözeltisine önce 65 mg (0,37 mmol) (4-aminofenil) fosfonik asit (4)'ün DMF (5 mL) içerisindeki çözeltisi 100°C sıcaklıkta damlatma hunisi yardımıyla damla damla ilave edildi. (4-aminofenil)fosfonik asit (4)'ün tamamı eklendikten bir saat sonra bu kez 35 mg (0,37 mmol) piridin-4-amin (7)'nin DMF (5 mL) içerisindeki çözeltisi aynı sıcaklıkta yine bir damlatma hunisi yardımıyla damla damla ilave edildikten sonra banyo sıcaklığı 140°C'ye getirildi. Reaksiyon gün aşırı azot atmosferinde karıştırılmaya devam edildi. Reaksiyon çözücüsü 50°C'de vakum altında uzaklaştırıldıktan sonra ham ürün CH₂Cl₂/MeOH (%25) ile silika jel kolon üzerinden yürütülerek saflaştırıldı. İlk fraksiyonda 98 mg (%53) hedef asimetrik NDI türevi (6C) kırmızı katı (erime noktası; 300 °C'den büyük olarak belirlendi) olarak elde edilirken, ikinci fraksiyonda 25 mg (%16) simetrik NDI türevi Pry-NDI-Pry (6D) elde edildi. (6C)'ye ait spektral veriler ; ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ 8.86-8.81 (m, =CH, 2H), 8.72-8.68 (m, =CH, .4H), 7.63-7.52 (m, =CH, 4H), 7.34-7.30 (m, =CH, 2H), 6.72-6.68 (m, OH, 2H); ¹³C-NMR (100 MHz, DMSO-d₆): δ 163.26, 162.87, 151.19, 143.96, 139.01, 137.10, 131.54, 130,96, 130,87, 128.72, 127.49, 127.36, 127.14, 127.04, 124.96; IR (KBr, cm⁻¹): 1711 (C=O), 1668 (amit N-C=O), 1446 (C-N), 1346, 1247 (C-O); LC-MS C₂₅H₁₅N₃O₇P: [M]⁺ 499.07. Pry-NDI-Pry (6D)'ye ait spektral veriler; ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ 8.82-8.80 (m, =CH, 4H, AB sisteminin A kısmı), 8.75 (s, =CH, 4H), 7.58-7.57 (m, =CH, 4H, AB sisteminin B kısmı); ¹³C-NMR (100 MHz, DMSO-d₆): δ 162.93, 151.24, 144.05, 131.02, 127.42, 127.21, 124.97. Şekil 4.2'de 6C sentezinin moleküler yapısı verilmiştir.



Şekil 4.2. 6C malzemenin sentezi

4.1.2. 6E Malzemenin Sentezi

100 mg (0,37 mmol) isokromeno[6,5,4-def] isokromen-1,3,6,8-tetraon (3)'ün DMF (10 mL) içerisindeki çözeltisine önce 34 mg (0,37 mmol) piridin-4-amin (7)'nin DMF (5 mL) içerisindeki çözeltisi 100 °C sıcaklıkta damlatma hunisi yardımıyla damla damla ilave edildikten bir saat sonra bu kez 35 mg (0,37 mmol) anilin (5)'in DMF (5 mL) içerisindeki çözeltisi aynı sıcaklıkta yine bir damlatma hunisi yardımıyla damla damla ilave edilerek, banyo sıcaklığı 140°C'ye getirildi. Reaksiyon gün aşırı azot atmosferinde karıştırılmaya devam edildi. Reaksiyon çözücüsü 50 °C'de vakum altında uzaklaştırıldıktan sonra ham ürün CH₂Cl₂/MeOH (%20) ile silika jel kolon üzerinden yürütülerek saflaştırıldı. İlk fraksiyonda 115 mg (%74) hedef asimetric NDI türevi (6E) gri katı (erime noktası; 300 °C'den büyük olarak belirlendi) olarak elde edilirken, ikinci fraksiyonda ise 19 mg (%12) simetric NDI türevi Ph-NDI-Ph (6B) elde edildi. 19 (6E)'ye ait spektral veriler; ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ 8.83-8.81 (m, =CH, 2H), 8.74-8.71 (m, =CH, .4H), 7.58-7.54 (m, =CH, 2H), 7.50-7.45 (m, =CH, 5H); ¹³C-NMR (100 MHz, DMSO-d₆): δ 163.36, 163.21, 151.43, 136.47, 132.36, 130,91, 130,82, 129.45, 129.01, 127.16, 126.81, 126.81, 126.33; IR (KBr, cm⁻¹): 3819, 3069, 1710 (C=O), 1622 (amit N-C=O), 1492 (C-N), 1348, 1244 (C-O), 1199, 1028 (C-O-C); LC-MS C₂₅H₁₃N₃O₄: [M]⁺ 419.09. Şekil 4.3'te 6E'nin sentezinin moleküler yapısı verilmiştir. Ancak sentezde Ph-NDI-Ph (6B) kullanılmamıştır.



Şekil 4.3. 6E malzemenin sentezi

4.2. Rutenyum Komplekslerinin Sentezi

4.2.1. 1A Malzemenin Sentezi

50 mg (0,12 mmol) (6E)'nin 10 mL etanol içerisindeki çözeltisine 36 mg (0,06 mmol) [RuCl₂(p-simen)]₂ (11) ilave edilerek reaksiyon azot atmosferinde ve etanolün kaynama sıcaklığında gün aşırı karıştırılarak geri akıtıldı. Reaksiyon karışımı daha sonra oda sıcaklığına soğutuldu ve etanol içerisindeki kristallendirme işlemi tabii tutuldu. Kristallendirme işlemi neticesinde 42 mg (%68) hedef rutenyum kompleksi 1A elde edildi. 1A için spektral veriler; ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ 8.81-8.80 (m, =CH, 2H, AB sisteminin A kısmı), 8.75-8.72 (m, =CH, 4H), 7.59-7.57 (m, =CH, 4H, AB sisteminin B kısmı), 7.55-7.46 (m, =CH, 3H), 5.82-5.77 (m, =CH, 4H, AB sistemi), 2.82 (sep, J = 6.8 Hz, CH, 1H), 2.08 (s, CH₃, 3H), 1.18 (d, J = 6.8 Hz, CH₃, 6H). UV-Vis (nm): 319/328 (p-simen) ve 488/527 (NDI Band I).

4.2.2. 2A Malzemenin Sentezi

50 mg (0,10 mmol) (6D)'nin 10 mL etanol içerisindeki çözeltisine 31 mg (0,05 mmol) [RuCl₂(p-simen)]₂ (11) ilave edilerek reaksiyon azot atmosferinde ve etanolün kaynama

sıcaklığında gün aşırı karıştırılarak geri akıtıldı. Reaksiyon karışımı daha sonra oda sıcaklığına soğutuldu ve etanol içerisindeki kristallendirme işlemi tabii tutuldu. Kristallendirme işlemi neticesinde 33 mg (%41) hedef rutenyum kompleksi 2A elde edildi. 2A için spektral veriler; ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ 8.84-8.81 (m, =CH, 2H, AB sisteminin A kısmı), 8.75-8.58 (m, =CH, 4H), 7.85-7.78 (m, =CH, 2H, AB sisteminin B kısmı), 7.60-7.43 (m, =CH, 4H), 5.81-5.76 (m, =CH, 4H, AB sistemi), 2.82 (sep, J = 6.1 Hz, CH, 1H), 2.09 (s, CH₃, 3H), 1.19 (d, J = 6.1 Hz, CH₃, 6H).

4.3. UV-Vis Ölçümleri ve Yasak Enerji Aralığı Hesabı

Elektromanyetik ışın ile madde arasındaki etkileşimi inceleyen bilim dalı Spektroskopi'dir. Işının soğurmasını inceleyen dalı Absorpsiyon Spektroskopi ışının yaymasını inceleyen dalına ise Emisyon Spektroskopi denir. Işınlara enerjileri moleküllerin son katmanındaki elektronlardadır. Son katmandaki elektronların uyarılması sonucunda elektronlar çok kısa zamanda karşı bağ orbitaline geçerler. Bu duruma "ışının absorplanması" denir. Işının absorplanması sırasında molekülün enerjisi kısa süreliğine artmıştır.

Absorpsiyon kanunları;

$$T = I / I_0 \quad (4.1)$$

$$\log T = \log I / I_0 \quad (-1 \text{ ile çarpılırsa})$$

$$A = -\log T \quad (4.2)$$

Absorbans ile derişim arasında Lambert-Beer kanunu vardır.

$$A = \epsilon c l \quad (\text{Lambert-Beer kanunu}) \quad (4.3)$$

Denklem 4.1' de T geçirgenlik (transmitans), I geçen ışın şiddeti, I_0 gelen ışın şiddetidir. Denklem 4.2'de A absorbans (ekstinksiyon) ve denklem 4.3'te ϵ molar absorptivite katsayısı (madde ve dalga boyuna göre değişir), c derişim (molarite), l cm olarak uzunluktur.

UV-Vis absorpsiyon spektrumunda x ekseninde dalga boyu (nm olarak), y ekseninde ise fotovoltaj aygıtına gönderilen ışının absorbans değerini ifade eder. 400-700 nm değer aralığı bize malzemenin görünür bölgede olduğunu gösterir.

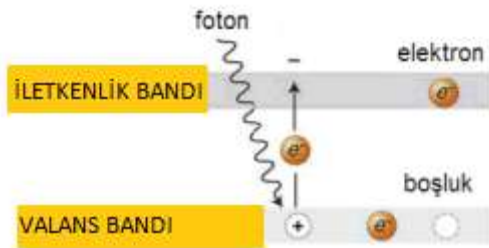
UV-Vis ölçümlerinden elde edilen verilerle aygıtların yasak enerji aralığı hesaplanmıştır.

$$\alpha = \frac{\ln(1-T)}{d} \quad (4.4)$$

$$E = hv \quad (4.5)$$

$$\alpha hv = K(hv - E_g)^2 \quad (4.6)$$

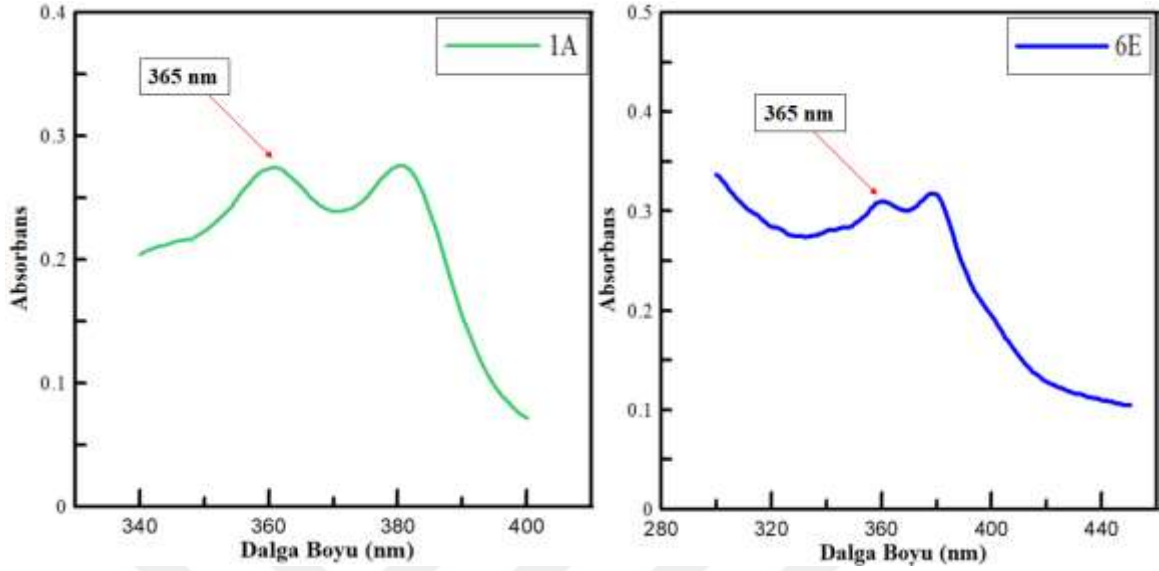
Denklem 4.4'de α absorbans katsayısı, T geçirgenliktir. Denklem 4.5'te E foton enerjisi, h Planck sabiti, ν elektromanyetik dalga frekansı ve denklem 4.6'da K malzeme sabiti, E_g yasak enerji aralığıdır.



Şekil 4.4. Yasak enerji aralığı şematik gösterim

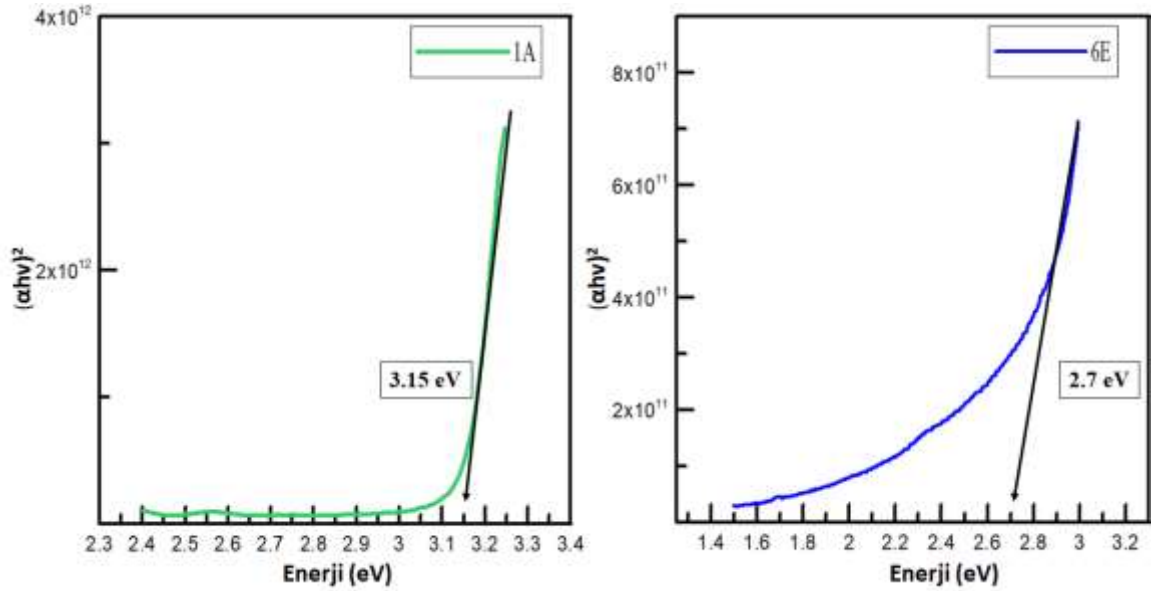
Yasak enerji aralığı malzemenin elektriksel iletkenliğini dolayısıyla iletkenlik sınıfını belirtir. Başka bir tanımla bir elektronun kinetik enerji miktarıdır. Malzemenin valans bandı ve iletkenlik bandı arasındaki boşluktur (Narin, 2014). Yasak enerji aralığının şematik gösterimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Yasak enerji aralığı normal şartlarda 0,7- 3 eV aralığında ise malzemenin elektriksel iletkenlik sınıfı yarıiletkenlerdir.

4.3.1. 1A ve 6E Malzemenin UV-Vis Ölçümleri ve Yasak Enerji Aralıkları



Şekil 4.5. 1A ve 6E malzemenin UV-Vis ölçüm grafiği

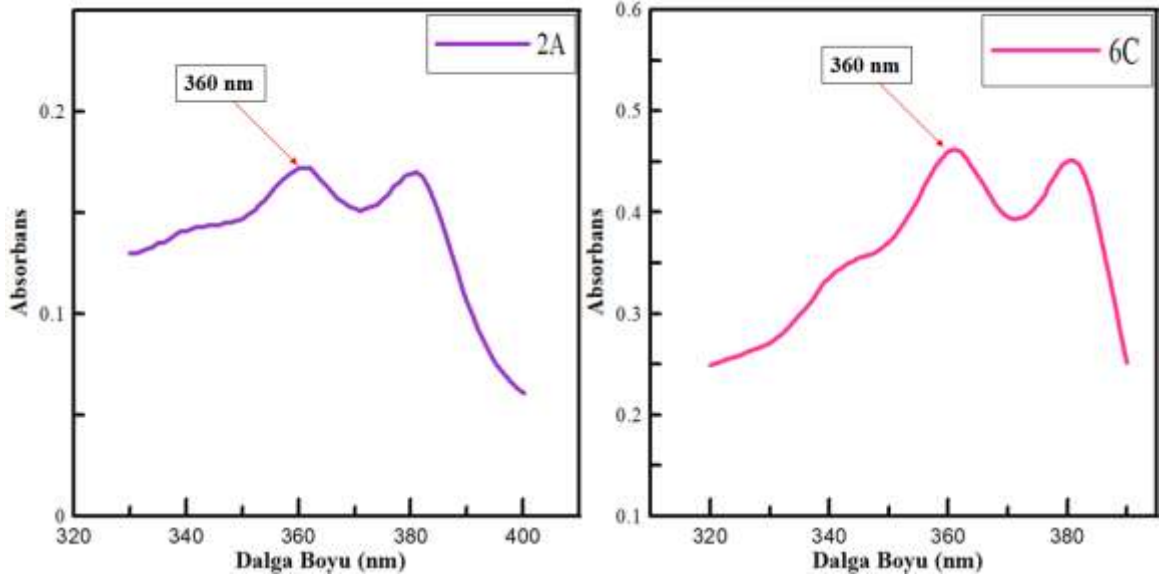
Şekil 4.5’de de anlaşılacağı üzere 6E organik malzemenin absorpsiyon pik değeri 365 nm iken organik rutenyum kompleksi olan 1A malzemesinin de 365 nm dir.



Şekil 4.6. 1A ve 6E malzemenin yasak enerji aralığı grafiği

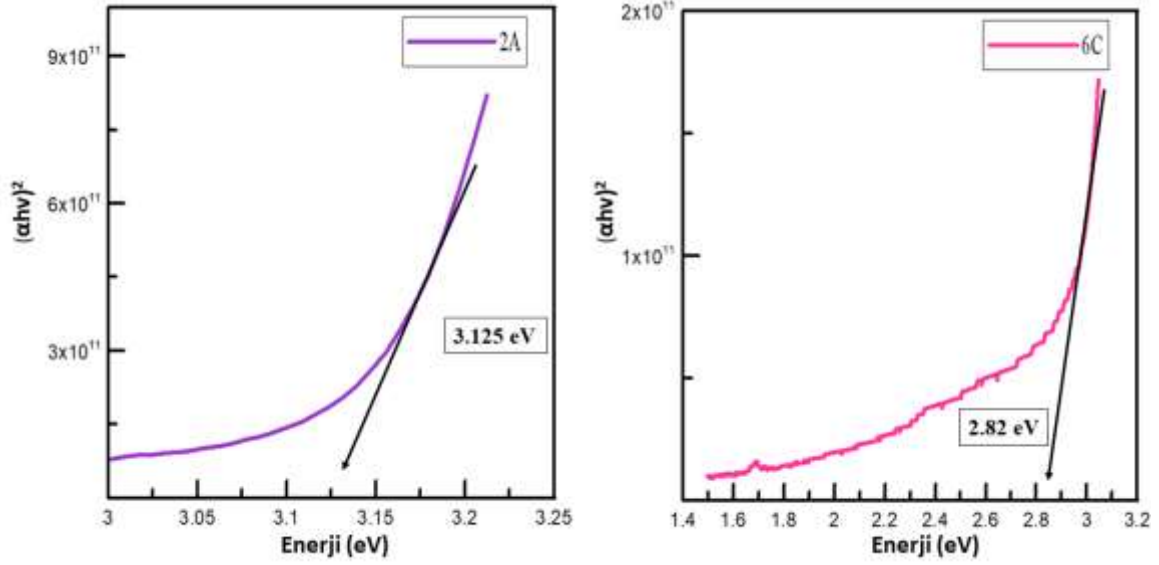
Denklem (4.4), denklem (4.5) ve denklem (4.6) verilen denklemler kullanılarak yasak enerji aralığı grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.6’da gösterildiği üzere 6E organik malzemenin yasak enerji değeri yaklaşık olarak 2,7 eV hesaplandığından kullanılan arayüzey malzeme için yarıiletken özelliği gösterdiği sonucunu çıkarabiliriz. Benzer şekilde 1A rutenyum kompleksli malzemenin yasak enerji değeri yaklaşık olarak 3,15 eV değerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum rutenyum molekülünün malzemenin iletkenlik sınıfını değiştirmedeği sonucuna varabiliriz. Diğer bir taraftan 1A ve 6E malzemelerin yasak enerji aralığındaki yaklaşık olarak 0,45 eV fark değeri 1A ve 6E molekül yapısındaki tek fark olan rutenyum elementinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç yasak enerji aralığı değerinin molekülün yapısıyla ilgili olduğunu göstermektedir. Ek olarak 1A ve 6E fotovoltatik aygıtların yapımında kullanılan arayüzey malzemeler farklı optoelektronik aygıtlarda kullanılabilir.

4.3.2. 2A ve 6C Malzemenin UV-Vis Ölçümleri ve Yasak Enerji Aralıkları



Şekil 4.7. 2A ve 6C malzemenin UV-Vis ölçümü

Şekil 4.7’de de anlaşılacağı üzere 6C organik malzemenin absorbans pik değeri ile 2A organik rutenyum kompleksinin pik değeri 360 nm dir.



Şekil 4.8. 2A ve 6C malzemenin yasak enerji aralığı

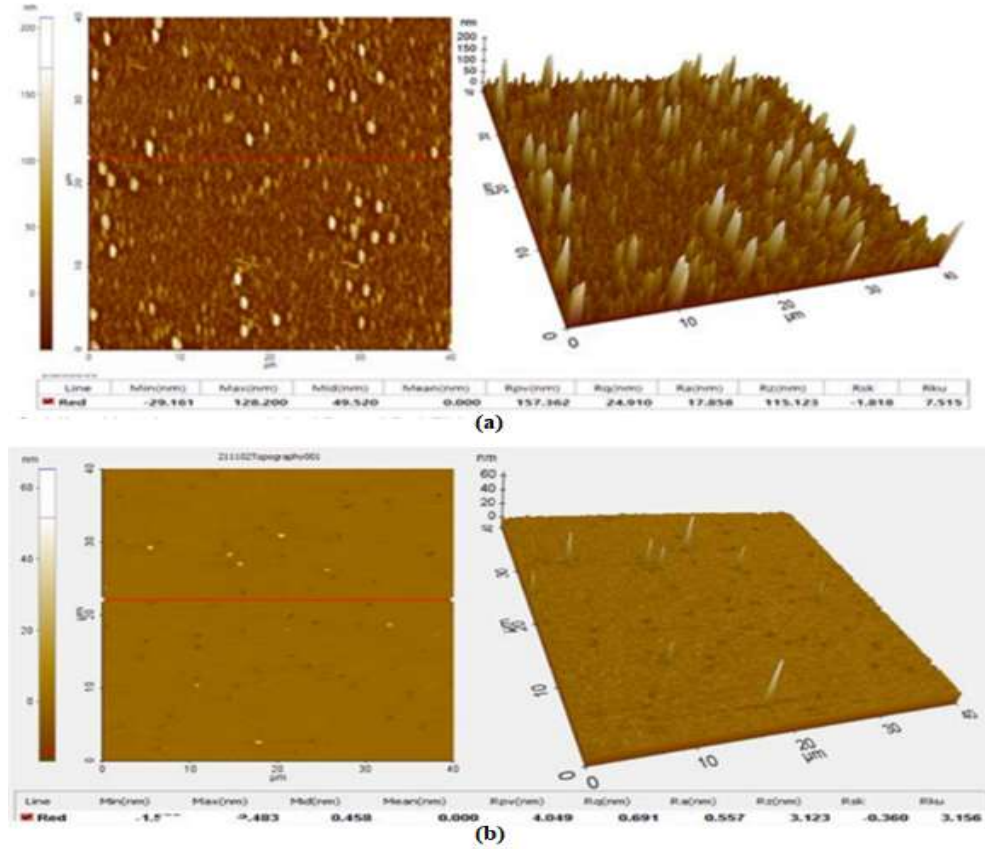
Denklem (4.4), denklem (4.5) ve denklem (4.6) verilen denklemler kullanılarak yasak enerji aralığı grafiği elde edilmiştir. 2A ve 6C organik malzemelerin yasak enerji aralığı grafiği Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. 6C organik malzemenin 2,82 eV iken 2A rutenyum kompleksli malzemenin 3,13 eV değerindedir. Bu değerler 2A ve 6C malzemelerinin iletkenlik sınıfının yarıiletken olduğu sonucunu verir. Ek olarak bu malzemeler farklı optoelektronik aygıtlarda yasak enerji aralığı değerlerinden dolayı kullanılabilir. Elde edilen dört organik malzemenin absorpsiyon değerleri incelendiğinde görünür bölgede pik veren bu malzemelerin güneş hücrelerinde kullanılabilme potansiyelini ortaya koymuştur (Liao vd. 2022). Aynı zamanda yasak enerji aralığının 2,7 eV ile 3,2 eV arasında fotovoltaik verimliliklerini kısıtlayacağı anlamına gelmektedir (Yao vd. 2022).

4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları

İnce filmlerin yüzey morfolojisini inceleme amacıyla termal buharlaştırma yöntemiyle cam yüzeye kaplanan malzemelerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile yüzey morfolojisi analizi yapıldı. 1A ve 6E malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

4.4.1. 1A ve 6E Malzemelerin AFM Ölçümü

1A ve 6E malzemelerin $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ alan üzerine yapılan 2D ve 3D AFM görüntüsü Şekil 4.9'da gösterildiği gibidir. 1A malzemenin yüzey pürüzsüzlüğü rms değeri yaklaşık olarak 17.8 nm olarak tespit edilmiş iken 6E malzemenin pürüzsüzlük değeri yaklaşık olarak rms değeri 0,55 nm olarak ölçülmüştür. Termal buharlaştırma ile yapılan katlamalarda 1A malzeme yüzeyi 6E malzemeye kıyasla daha pürüzlüdür ancak her iki malzemenin de rms değeri 50 nm pürüzlülük değeri altında bir pürüzlülük değerine sahip olduklarından teknolojik uygulamalarda kullanılabilirliğini ortaya koymuştur (Kurtaran, 2021).

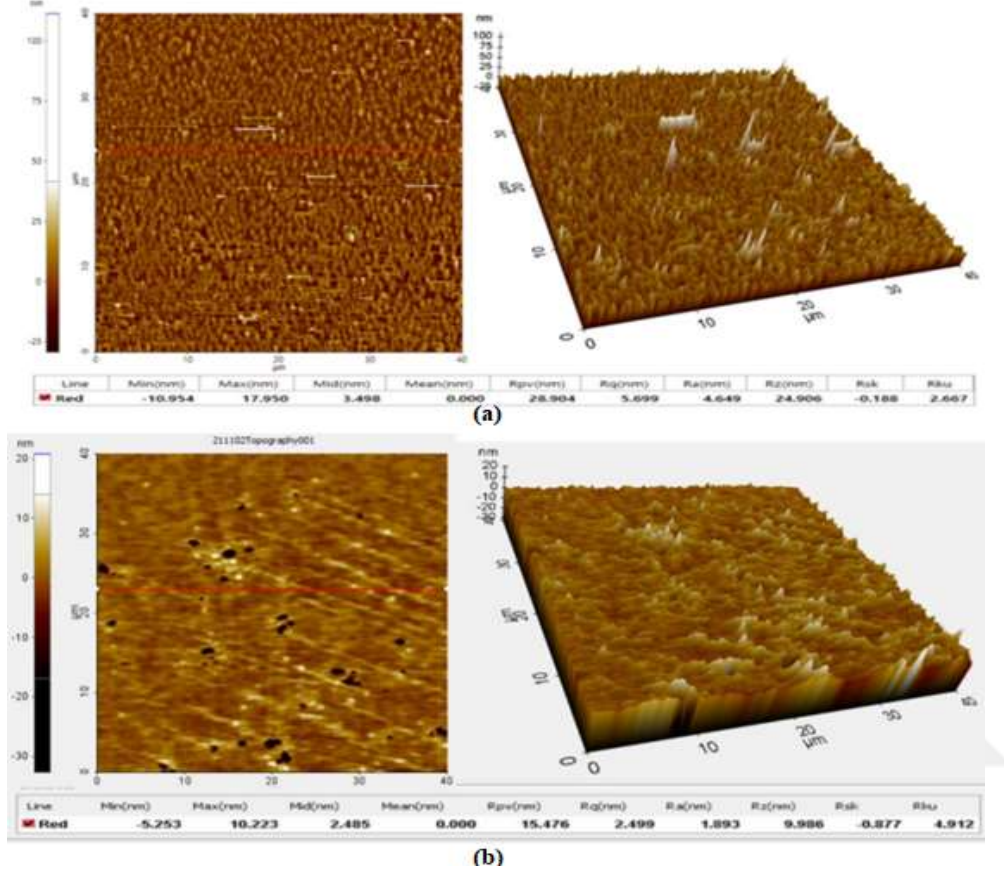


Şekil 4.9. (a) 1A malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü (b) 6E malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü

4.4.2. 2A ve 6C Malzemelerin AFM Ölçümü

2A ve 6C malzemelerin $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ alan üzerine yapılan 2D ve 3D AFM görüntüsü Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir. 2A ve 6C malzemelerin pürüzlülük değerleri incelendiğinde

sırasıyla rms değerleri yaklaşık 4,65 nm ve 1,89 nm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla Rutenyum kompleksli malzeme daha pürüzlü olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.10. (a) 2A malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü (b) 6C malzemenin 2D ve 3D AFM görüntüsü

4.5. Işık Altında I-V Karakteristiği

Bu bölümde fotovoltaik aygıtların elektriksel karakterizasyonu analiz edeceğiz. Farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır. -2 V ile +2 V arasında voltaj uygulanarak akım ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler organik aygıtın ve onun rutenyum kompleksi aygıtın verdiği sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafiksel olarak gösterildi. Oda sıcaklığında karanlık ve farklı ışık şiddetlerine bağlı olarak aygıttaki elektriksel farklılıklar ve değişimler incelenmiştir. Ayrıca ters gerilim voltajlarını değiştirmek için ışık açık ve kapalı ($I_{on/off}$) durumları için I-V özellikleri de incelenmiştir. Bu ölçümlerde elde edilen verilerle aygıtların idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, şönt direnç, doğrultma oranı ve doyma akımı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda

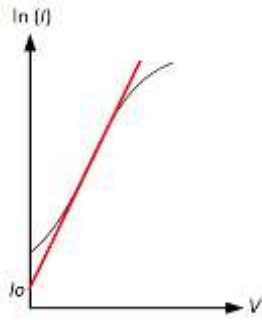
Norde fonksiyonları ve Cheung fonksiyonları kullanılmıştır (Cheung ve Cheung, 1998; Norde, 2008).

İdealite faktörü termiyonik emisyon ile analiz edilebilir (Yildirim ve Durumlu, 2016).

$$I=I_0 \exp\left(-\frac{q(V-lR_S)}{nkT}\right) \quad (4.7)$$

Bu eşitliğin her iki tarafının ln'i alınıp, V 'ye göre diferansiyelinin alınmasıyla n (idalite faktörü) elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (4.8)$$



Şekil 4.11. İleri yönde diyot karakteristiği

Şekil 4.11'de ileri yöndeki diyot karakteristiğinden elde edilen pozitif bölgedeki lineer kısma doğru çizildiğinde doğrunun eğimi bulunur. Doğrunun düşey eksenini kestiği kısımdan doyma akımı yoğunluğu bulunur. Bulunan doyma akım yoğunluğu termiyonik emisyon teorisinden engel yüksekliğini elde etmemize yardımcı olur.

(I_0) doyma akım yoğunluğu,

$$I_0=AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_B}{kT}\right) \quad (4.9)$$

Bu eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak, Φ_B terimine göre çözümlerse engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

$$e\Phi_B = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.10)$$

Burada, A diyotun etkin alanını ($7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), A^* Richardson sabitini (p-Si için $32 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$), k Boltzman sabitini ($8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), T Kelvin cinsinden sıcaklığı simgeler.

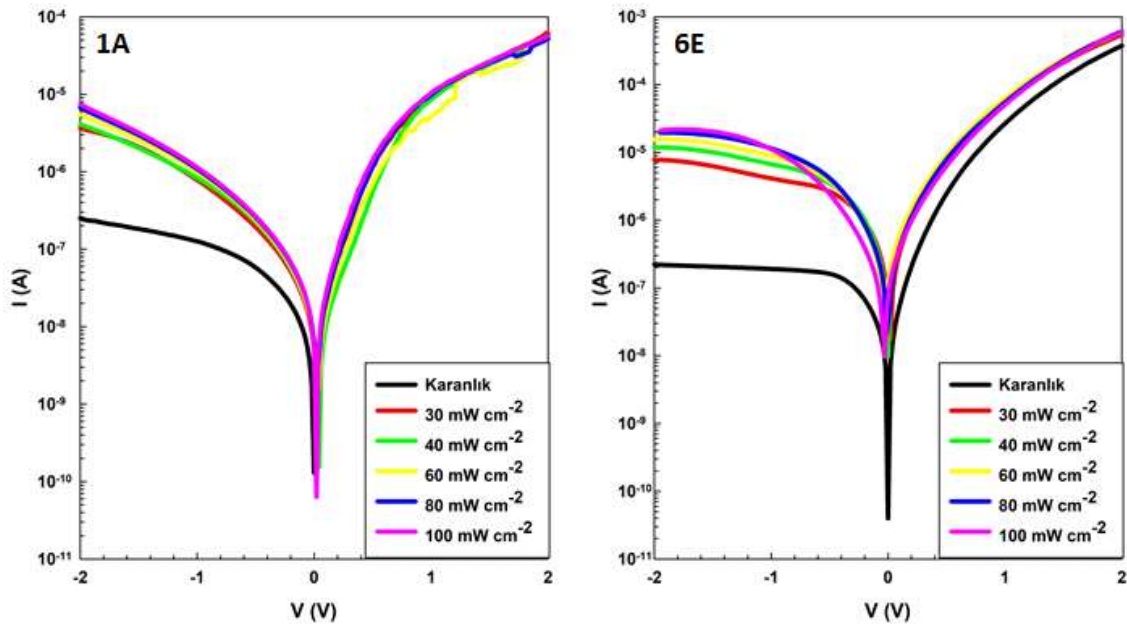
Doğrulma oranı (RR),

$$RR = \frac{I_F}{I_V} \quad (4.11)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada I_F doğru beslem akımı, I_V ters beslem akımıdır.

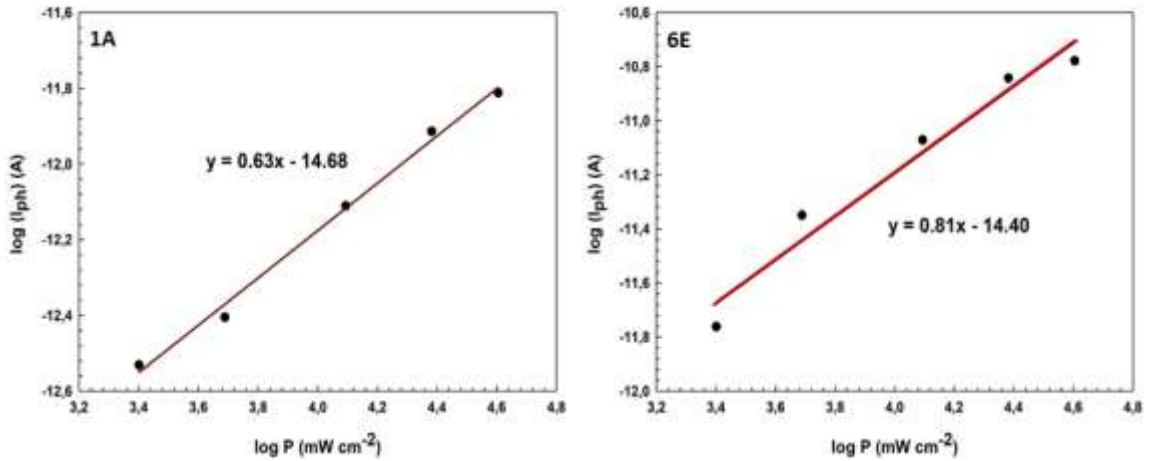
4.5.1. 1A ve 6E Fotovoltaik Aygıtların Işık Altında I-V Karakteristiği

1A ve 6E aygıtlarının I-V grafiği Şekil 4.12'de, logI-logP grafiği Şekil 4.13'te ve $I_{on/off}$ grafiği Şekil 4.14'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Oda sıcaklığında karanlık ve artan ışık şiddetine bağlı olarak ölçülen I-V değerlerine göre denklem (4.7), denklem (4.8), denklem (4.9), denklem (4.10) ve denklem (4.11)'de ifade edilen matematiksel hesaplamalar yapılarak Tablo 4.1'de gösterilen değerler elde edilmiştir.



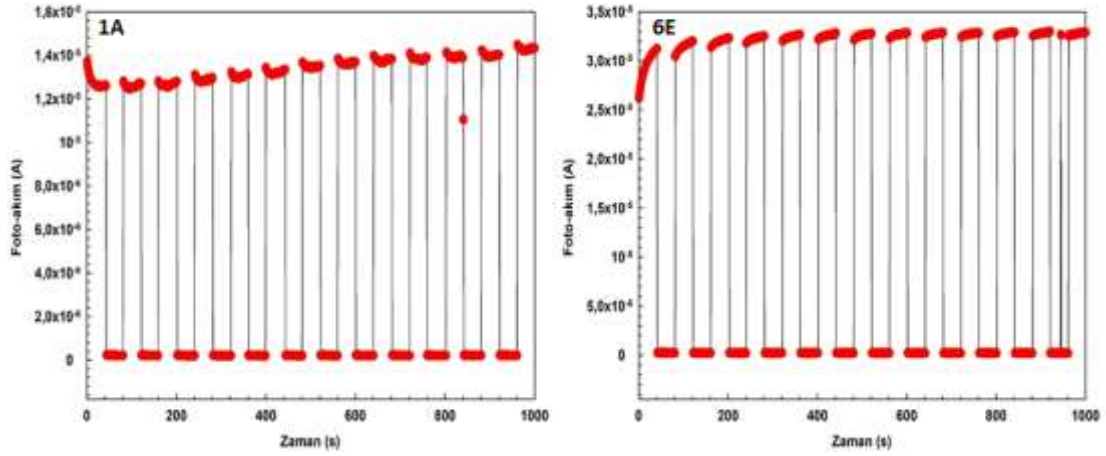
Şekil 4.12. 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların farklı ışık şiddeti altında I-V ölçümleri grafiği

1A ve 6E fotovoltaik aygıtlarının I-V ölçüm sonuçları Şekil 4.12'de grafiksel olarak verilmiştir. Ölçümler -2 V ile +2 V arasında voltaj uygulanarak yapılmıştır. Ölçümlerin sonuçları incelediğinde her iki fotovoltaik aygıtta da karanlık ortamda akım değeri yaklaşık olarak 10^{-7} amperdir. Uygulanan 30 mWcm^{-2} ila 100 mWcm^{-2} aralığında uygulanan farklı ışık şiddetine bağlı olarak her iki fotovoltaik aygıtın da akım değeri artmıştır. Bu durum her iki fotovoltaik aygıtın da ışık ortamından etkilendiği sonucunu vermektedir. 1A fotovoltaik aygıt ile 6E fotovoltaik aygıtın ışık şiddetine bağlı olarak çektiği akım değerleri kıyaslandığında 6E rutenyum kompleksi olmayan fotovoltaik aygıtın daha fazla akım çektiği sonucu elde edilmiştir. Bu durum rutenyum molekülün I-V ölçümlerinin ışık altında fotovoltaik aygıtta performans düşümüne neden olduğu sonucunu vermiştir. Buna ek olarak 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların fabrikasyonu sırasında kullanılan malzemeler iletkenliğin ışıkla değiştiği optoelektronik aygıtların üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir (Scheuer vd. 2021).



Şekil 4.13. 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların logI-logP grafiği

Şekil 4.13'te 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların artan ışık şiddetine bağlı olarak ölçümleri yapılan I-V değerleri kullanılarak oluşturulan logI-logP gösterilmiştir. Grafik ışık yoğunluğu (logP) ile foto-akımı (log(I_{ph})) karşılaştırmaktadır. Foto-akımı artan ışık şiddeti yoğunluğuyla artmaktadır (Kazim vd. 2007). 1A ve 6E fotovoltaik aygıtın kuvvet değerleri sırasıyla 0,63 ve 0,81 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.14. 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların $I_{on/off}$ ölçümleri grafiği

Şekil 4.14'te 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların karakteristiklerinin belirlemede kullanılan yöntemlerden biri olan $I_{on/off}$ ölçümü grafikleri verilmiştir. $I_{on/off}$ ölçümleri fotovoltaik aygıtların zamana bağlı olarak ışık altında etkilenme durumlarını incelememize olanak sağlamıştır. 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların $I_{on/off}$ ölçümlerinden elde ettiğimiz grafik incelediğinde 1A ve 6E fotovoltaik aygıt malzemesinin 40'ar saniyelik adımlar ile karanlık ortamdan ışık ortamına geçmesiyle sergilediği akım değeri ve bu değerin her defasında benzerlik göstermesi malzemenin optoelektronik aygıtlara kullanılması uygundur ve rutenyum olmayan 6E molekül tercih edilmelidir.

Tablo 4.1. 1A ve 6E fotovoltaik aygıtların farklı ışık şiddetleri altında bazı elektriksel parametreleri

	$P(mW.cm^{-2})$	n	$I_0(A)$	$\Phi_{B0}(eV)$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$	RR
1A	Karanlık	2,28	2,35E-09	0,76	35E+03	79E+05	226
	30	2,77	3,11E-09	0,75	32E+03	55E+05	16,98
	40	2,81	2,99E-09	0,75	37E+03	48E+05	12,92
	60	2,94	2,88E-09	0,75	38E+03	36E+05	9,32
	80	2,98	4,56E-09	0,74	38E+03	29E+05	7,72
	100	3,03	6,21E-09	0,73	35E+03	26E+05	7,61
6E	Karanlık	2,27	8,18E-09	0,72	53E+02	89E+05	1678,89
	30	2,90	7,39E-08	0,67	36E+02	25E+04	69,62
	40	3,37	1,29E-07	0,65	34E+02	16E+04	49,42
	60	3,95	2,1E-07	0,64	32E+02	12E+04	39,08
	80	4,24	2,68E-07	0,63	30E+02	10E+04	34,07
	100	4,63	2,64E-07	0,63	31E+02	95E+03	30,79

İdealite faktörü aygıtın hazırlama işleminde kullanılan malzemenin yapısının ne derece istenilen özelliklerde saflaştırılabildiğini ve katkılandırma aşamasının ne kadar doğru yapıldığını gösterir (Bohlin, 1998) . Bununla birlikte idealite faktörü aynı zamanda akım taşıyıcıların rekombinasyon olasılıkları ile ilgilidir bu sebeple arayüz düzgünlüğünün de bir göstergesidir (Gökşen ve Kurtay, 2019). Tablo 4.2’de gösterildiği gibi idealite faktörü çeşitli fotovoltaik aygıt yapısına bağlıdır (Cuce ve Cuce, 2012; Tsai, 2010).

Tablo 4.2. Farklı fotovoltaik aygıtlar için idealite faktörü (Cuce ve Cuce, 2012)

Fotovoltaik aygıt	İdealite faktörü
Si-mono	1,2
Si-poly	1,3
a-Si: H	1,8
a-Si: H tandem	3,3
a-Si: H triple	5
CdTe	1,5
CIS	1,5
GaAs	1,3

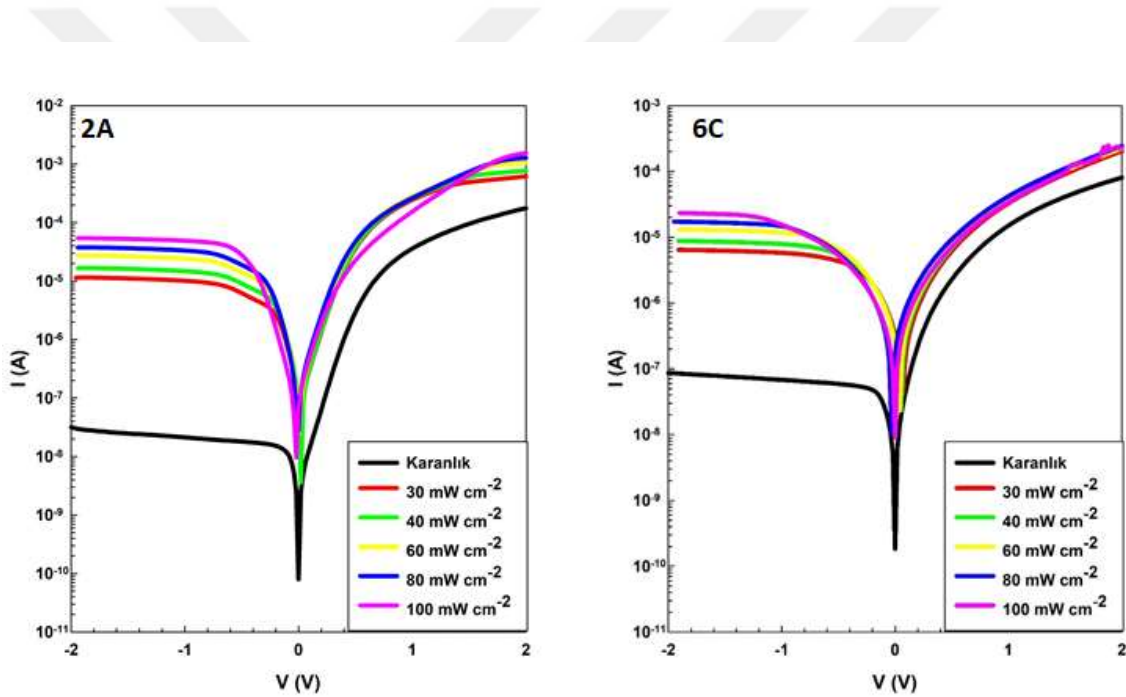
İdeal aygıtların idealite faktör değeri 1’dir ideal olmadığı durumlarda ise 1’e uzak olması beklenir (Orak vd. 2015) . İdeal durumdan küçük artışlar aygıtın arayüz düzgünlüğü ve kontak kalitesi gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir (Gökşen vd. 2019). İdealite faktörünün 2 veya daha fazla olduğu aygıtlarda yüksek rekombinasyon (valans banttan iletken banda geçen elektronun iletim bandına ulaşmaya kadar sahip olduğu enerjiyi koruyamaması ve bir boşlukla birleşerek yok olması) ihtimallerine sahip olmalarıyla açıklanabilir (Campos vd. 2000). İdealite faktörü değerinin artması dolum faktörü değerini azaltacaktır bu durum fotovoltaik aygıtlarda istenmeyen bir sonuçtur.

1A ve 6E aygıtın idealite faktörü incelendiğinde karanlık ortamda sırasıyla 2,28 ve 2,27 olarak hesaplanmıştır. 100 mW.cm⁻² ışık şiddetinde ise sırasıyla 3,03 ve 4,63 olarak hesaplanmış olup ışık şiddetinin artmasına bağlı olarak idealite faktörü artmaktadır ve ideal aygıt idealite faktöründen uzaklaşmaktadır. Ancak fotovoltaik organik rutenyum kompleksli aygıtın (1A) fotovoltaik organik aygıtı (6E) göre idealite faktörü artan ışık şiddetine bağlı olarak daha az değişmiştir.

Diğer elektriksel ölçümler doyma akım yoğunluğu, engel yüksekliği, seri direnç, şönt direnç ve doğrulma faktörü artan ışık şiddetine göre Tablo 4.1’de verilmiştir. Buna göre 1A aygıtın 6E aygıtına göre doyma akım yoğunluğu daha küçük, engel yüksekliği birbirine çok yakın, seri ve şönt direnç değeri daha yüksektir. Doğrulma oranı karşılaştırılmasında ise 1A aygıtın değeri ışığın şiddetine göre düşüktür.

4.5.2. 2A ve 6C Fotovoltaik Aygıtların Işık Altında I-V Karakteristiği

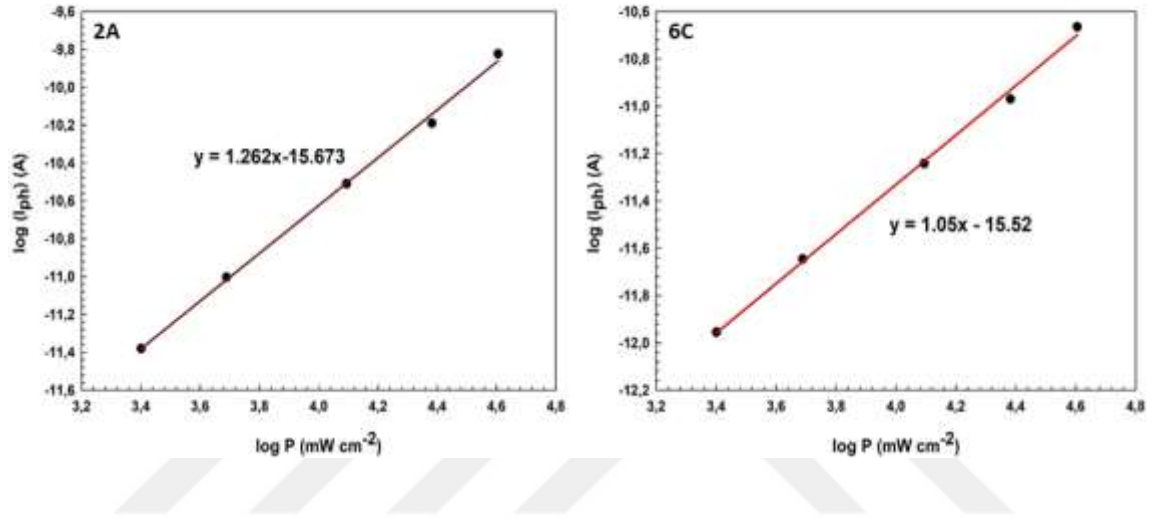
2A ve 6C aygıtın I-V grafiği Şekil 4.15’te, logI-logP grafiği Şekil 4.16’da ve $I_{on/off}$ grafiği Şekil 4.17’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.15. 2A ve 6C fotovoltaik aygıtların farklı ışık şiddeti altında I-V ölçümleri grafiği

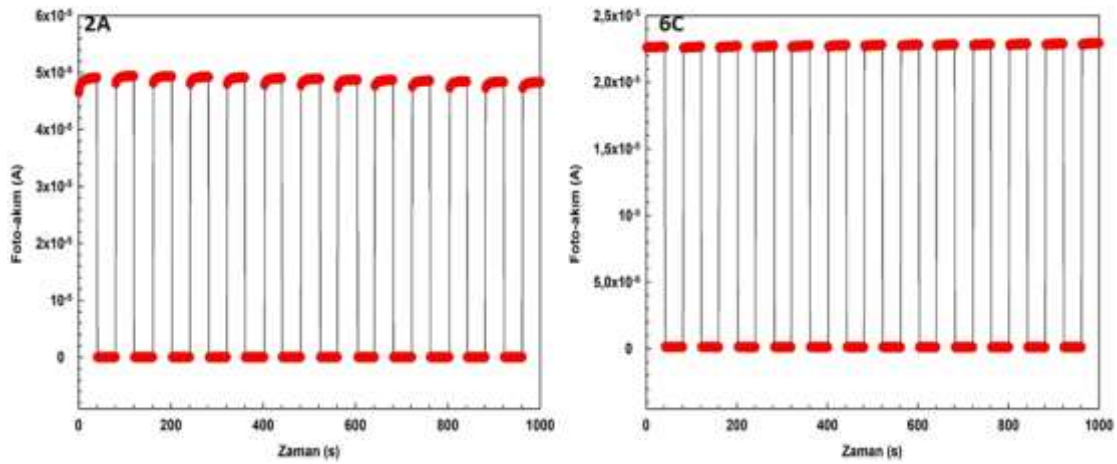
2A ve 6C fotovoltaik aygıtların I-V ölçüm sonuçları Şekil 4.15’te grafiksel olarak verilmiştir. Ölçümler -2 V ile +2 V arasında voltaj uygulanarak yapılmıştır. Ölçümlerin sonuçları incelediğinde karanlık ortamda 6C rutenyum olmayan fotovoltaik aygıt daha yüksek akım çekerken 2A fotovoltaik aygıt daha az akım çektiği görülmüştür. Uygulanan 30 mWcm^{-2} ila 100 mWcm^{-2} aralığında uygulanan farklı ışık şiddetine bağlı olarak her iki fotovoltaik aygıtın da akım değeri artmıştır. Bu durum her iki fotovoltaik aygıtın da ışık ortamından etkilendiği sonucunu vermektedir. 2A fotovoltaik aygıt ile 6C fotovoltaik

aygıtın ışık şiddetine bağlı olarak çektiği akım değerleri kıyaslandığında karanlık ortama göre 2A fotovoltaiik aygıt daha fazla akım çekmiştir. Sadece akım değerlerine baktığımızda 2A rutenyumlu fotovoltaiik aygıt daha fazla akım çektiğinden rutenyum molekülün fotovoltaiik aygıtın performansını yükselttiği sonucunu verir. Aynı zamanda 2A ve 6C fotovoltaiik aygıtların fabrikasyonu sırasında kullanılan malzemeler iletkenliğin ışıkla değiştiği optoelektronik aygıtların üretiminde kullanılabilir.



Şekil 4.16. 2A ve 6C fotovoltaiik aygıtların logI-logP grafiği

Şekil 4.16'da 2A ve 6C fotovoltaiik aygıtların artan ışık şiddetine bağlı olarak ölçümleri yapılan I-V değerleri kullanılarak oluşturulan logI-logP gösterilmiştir. Grafik ışık yoğunluğu (logP) ile foto-akımı (log(I_{ph})) karşılaştırmaktadır. Foto-akımı artan ışık şiddeti yoğunluğuyla artmaktadır (Kazim vd. 2007). 1A ve 6E fotovoltaiik aygıtın kuvvet değerleri sırasıyla 1,26 ve 1,05 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.17. 2A ve 6C fotovoltaik aygıtların $I_{on/off}$ ölçümleri grafiği

Şekil 4.17’de 2A ve 6C fotovoltaik aygıtların karakteristiklerinin belirlemede kullanılan yöntemlerden biri olan $I_{on/off}$ ölçümü grafikleri verilmiştir. $I_{on/off}$ ölçümleri fotovoltaik aygıtların zamana bağlı olarak ışık altında etkilenme durumlarını incelememize olanak sağlar. 2A ve 6C fotovoltaik aygıtların $I_{on/off}$ ölçümlerinden elde ettiğimiz grafik incelediğinde 2A ve 6C fotovoltaik aygıt malzemesinin 40’ar saniyelik adımlar ile karanlık ortamdan ışık ortamına geçmesiyle sergilediği akım değeri ve bu değer her defasında benzerlik göstermesi malzemenin optoelektronik aygıtlara kullanılması uygundur ve rutinyumlu 6C molekül yapısı tercih edilmelidir.

Tablo 4.3. 2A ve 6C fotovoltaik aygıtların farklı ışık şiddetleri altında bazı elektriksel parametreleri

	$P(mW.cm^{-2})$	n	$I_0(A)$	$\Phi_{B0}(eV)$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$	RR
2A	Karanlık	2,52	2,75E-09	0,75	11E+03	62E+06	5532,27
	30	2,93	1,5E-07	0,65	31E+02	17E+04	55,08
	40	3,01	2,21E-07	0,64	25E+02	12E+04	47,46
	60	3,12	3,45E-07	0,63	18E+02	73E+03	39,16
	80	3,26	3,85E-07	0,63	15E+02	53E+03	34,39
	100	3,74	4,09E-07	0,62	12E+02	36E+03	29,02
6C	Karanlık	2,09	6,62E-09	0,73	24E+03	23E+06	928,75
	30	3,80	2,62E-07	0,63	87E+02	31E+04	35,62
	40	4,17	3,65E-07	0,63	74E+02	22E+04	30,72
	60	4,62	5,16E-07	0,62	77E+02	15E+04	19,76
	80	4,90	6,04E-07	0,61	75E+02	11E+04	15,33
	100	5,28	6,51E-07	0,61	72E+02	85E+03	11,77

2A ve 6C aygıtın idealite faktörü incelendiğinde karanlık ortamda sırasıyla 2,52 ve 2,09 olarak hesaplanmıştır. 100 mW.cm^{-2} ışık şiddetinde ise sırasıyla 3,74 ve 5,28 olarak hesaplanmış ve ışık şiddetinin artmasına bağlı idealite faktörü artmıştır. Buna karşın 2A aygıtın 6C aygıtına göre doyma akım yoğunluğu daha küçük, engel yüksekliği birbirine çok yakın, seri ve şönt direnç değeri daha düşüktür. Doğrulma oranı karşılaştırılmasında ise 2A aygıtın değeri ışığın şiddetine göre yüksektir Tablo 4.3'te gösterilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Organik malzeme ile oluşturulan fotovoltaik aygıtların karakteristiği günümüzde popüler araştırma konularından biridir. Organik fotovoltaik aygıtlar inorganik malzeme kullanılarak üretilen fotovoltaik aygıtlara kıyasla maliyeti daha düşük, esnek, hafif ve kolay üretilmesi açısından avantajlıdır. Güneşlenme süresinin uzun olduğu ülkelerde kaliteli ve aynı zamanda çevreci bir enerjiye ulaşma konusunda büyük katkısı olacaktır. Bu çalışmada organik arayüzey malzeme olarak 6E, 6C 1A ve 2A kullanılarak 4 adet fotovoltaik aygıtın morfolojik özellikleri araştırılmıştır.

Fabrikasyonu yapılan aygıtların optiksel olarak UV-Vis ölçümleri, AFM ölçümleri ve I-V ölçümleri yapılarak grafiksel olarak sonuçlar verilmiştir ve ölçümlerden elde edilen bazı parametreler kullanılarak aygıtın karakteristiğinin daha iyi anlaşılması için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda aygıtların yasak enerji aralığı, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, şönt direnç, doğrultma oranı ve doyma akımı değerleri hesaplanmıştır.

UV-Vis ölçümlerinde 6E malzemenin absorptans pik değeri 365nm olarak ölçülmüş rutenyum kompleksi olan 1A malzemenin absorptans pik değeri de 365 nm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde 6C malzemenin ve rutenyum kompleksi 2A malzemenin organik absorptans pik değeri 360 nm olarak ölçülmüştür. UV-Vis ölçümlerinde elde edilen verilerle yasak enerji aralığı için 6E 2,7 eV, 1A 3,12 eV, 6C 2,82 eV, ve 2A 3,12 eV olarak hesaplanmıştır. Malzemelerin absorptans pik değerleri kıyaslandığında 5 nm fark ile 6E ve 1A malzeme daha iyi sonuç vermiştir. Benzer şekilde yasak enerji aralığı kıyaslandığında da en iyi sonuç veren malzeme 6E organik malzemedir.

Fotovoltaik aygıtların AFM ölçüm sonuçlarında yüzey pürüzlülük değerleri 1A malzemenin rms değeri yaklaşık olarak 17,8 nm, 6E malzemenin rms değeri yaklaşık 0,55 nm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde 6C malzemenin rms değeri yaklaşık 4,65 nm ve 2A malzemenin rms değeri yaklaşık 1,89 nm olarak ölçülmüştür. Bütün değerler

incelendiğinde ve kıyaslandığında yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi organik malzememiz 1A'dır.

I-V ölçüm sonuçlarına ve elde edilen verilerle hesaplama yaptığımız (idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, şönt direnç, doğrultma oranı ve doyma akımı) parametreler incelenmiştir. 6E ve 1A malzemeli organik fotovoltaik aygıtların karanlık yaklaşık olarak 10^{-7} amper olarak ölçülmüştür. Uygulanan 30 mWcm^{-2} ila 100 mWcm^{-2} ışık şiddetine bağlı olarak 1A fotovoltaik aygıt 10^{-5} amperin altında bir değere sahipken 6E fotovoltaik aygıt 10^{-5} amperin üstüne bir değere sahiptir. Benzer şekilde karanlık ortamda 6C malzemeli organik fotovoltaik aygıt yaklaşık olarak 10^{-7} amper, 2A malzemeli organik fotovoltaik aygıt 10^{-7} amperden daha az akım çekmektedir. Uygulanan 30 mWcm^{-2} ila 100 mWcm^{-2} aralığında uygulanan farklı ışık şiddetine bağlı olarak 2A fotovoltaik aygıt yaklaşık olarak 10^{-5} amper değerinin üzerine çıkarken 6C fotovoltaik aygıt 10^{-5} amper civarındadır. Bütün fotovoltaik aygıtların I-V ölçümlerinde ışığa göstermiş oldukları tepki kıyaslandığında karanlık ile ışık şiddeti arasındaki akım farkı en büyük olan 2A malzemeli organik fotovoltaik aygıttır. 4 fotovoltaik aygıtın arayüz malzemeler iletkenliğinin ışıkla değiştiği optoelektronik aygıtların üretiminde kullanılabilir. Ancak 1A, 2A, 6C ve 6E malzemeleri güneş pili uygulamalarında kullanılması için fotovoltaik aygıtın ışığa maruz kaldığında ileri yönlü bir gerilim oluşturması gerektiğinden güneş pili yapımında kullanılması uygun değildir.

I-V ölçüm verileriyle hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, şönt direnç, doğrultma oranı ve doyma akımı değerleri incelendiğinde ışık altında idealite faktör değeri en iyi malzeme 2,77 değeriyle 1A organik malzemeli fotovoltaik aygıta aittir. Engel yüksekliği değeri 0,75 eV olan en yüksek malzeme 1A seri direnç ve şönt direnç değeri en az olan malzeme 2A dir. Doyma akımı aralarında en iyi 1A malzemesine sahip organik fotovoltaik aygıttır. Son olarak doğrultma oranı en düşük olan malzeme 1A malzemeli organik fotovoltaik aygıta aittir ve değeri 16,98 dir.

Tüm bu yukarıda bahsedilen malzemeler kıyaslandığında rutenyum kompleksi kullanılmayan malzemeler (6E ve 6C) rutenyum kullanılan (1A ve 2A) organik malzemelerden daha iyi sonuçlar verdiğini yapılan hesaplamalardan tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel verilerden yola çıkarak bu tarz organik moleküller ile yapılacak yeni nesil

fotovoltaik aygıtların alt yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda bu tarz moleküllere farklı tip metal kompleksleri eklendiği zaman performansı artıracak unsurların ortaya çıkacağı ortaya konulmuştur.



KAYNAKÇA

Adams, W.G. ve Day, R. E. (1877). The Action of Light on Selenium. Proceedings of the Royal Society, 25(171-178), 113-117.

Agrawal, M. (2009). Photonic Design for Efficient Solid State Energy Conversion (Dissertation, University of Stanford).

Ajder, A. (2011). Fotovoltaik Güneş Enerjisi Sistemleri İçin Optimum Eğim Açısının Hesaplanması (Tez, Yıldız Teknik Üniversitesi).

Akkaşoğlu, E. K. (2018). Organik Camlar. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(2), 512-536.

Akman, E. (2020). Bakır Katkılı TiO₂ Fotoanotlarının Boya Duyarlı Güneş Pilleri Performansı Üzerindeki Etkisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 129-135.

Aydoğan, Ş. (2017). Fe₃O₄ Nanoparçacık ve Mpg -C₃N₄ Nanokompozit Katkılı P₃HT : PCBM Tabanlı Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyonu , Optik , Morfolojik ve Yapısal Özellikleri (Tez, Atatürk Üniversitesi).

Aydoğan, Ş. (2016). Katkılı Perovskit Güneş Pillerinin Üretimi ve Fotovoltaik Karakterizasyonu (Tez, Atatürk Üniversitesi).

Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., ve Mohsen, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. 3(5), 94.

Ballıpınar, F. (2012). Çinko Oksit (Zno) Nanoyapıların Organik Güneş Pillerinde Uygulaması / Zno Nanoyapıları Üzerine Organik Güneş Pilleri (Tez, İstanbul Üniversitesi)

Bayraç, N. (2010). Effects of Energy Use on Global Warming and Prevention Policies. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 11(2), 229-260

Binnig, G., Quate, C. F., ve Gerber, C. (1986). Atomic Force Microscope. Physical Review Letters, 56(9), 930-933.

Bohlin, K. E. (1998). Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. Journal of Applied Physics, 60(3), 1223.

Brabec, C. J., Shaheen, S. E., Winder, C., Sariciftci, N. S., ve Denk, P. (2002). Effect of Lif/Metal Electrodes on the Performance of Plastic Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 80(7), 1288–1290.

Çalış, H. (2016). Yapısında Tiyofen Bulunduran Yeni Antrasen Türevlerinin Sentezi ve Elektrokimyasal, Elektrooptiksel Özelliklerin Bulunması (Tez, Yüzüncü Yıl Üniversitesi).

Campos, M., Bulhões, L. O. S., ve Lindino, C. A. (2000). Gas-Sensitive Characteristics of Metal/Semiconductor Polymer Schottky Device. *Sensors and Actuators A: Physical*, 87(1–2), 67–71.

Celal, C., ve Cezim, C., (2013). Fotovoltaik Sistemler Fotovoltaik Sistemler ve Uygulamaları ve Uygulamaları. TMMOB. <https://www.emo.org.tr/kod=98522>

Çelen, O. (2020). Fotovoltaik (Pv) Paneller İçin Fotokatalitik, Antibakteriyel ve Yansıma Önleyici Yüzey Kaplamaların Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu (Tez, Afyon Kocatepe Üniversitesi).

Çelik, A. ve Koç, F. (2020). Polikristal Tür Bir Fotovoltaik Panelin IV Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Validasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(4), 2491-2515.

Çelik, V. (2017). Tio₂ Mesoporous/Zno Nanotel Tabanlı Tandem (Katmanlı) Nano Yarıiletkenlerin Üretilerek Optoelektronik Özelliklerinin İncelenmesi ve Boya ile Duyarlı Fotovoltaik Hücrelerin Üretilmesi (Tez, Yalova Üniversitesi).

Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L., Chapin, D. M., Fuller, C. S., ve Pearson, G. L. (1954). A New Silicon P-N Junction Photocell for Converting Solar Radiation Into Electrical Power. *JAP*, 25(5), 676–677.

Cheung, S. K., ve Cheung, N. W. (1998). Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85.

Cuce, P. M., ve Cuce, E. (2012). A Novel Model of Photovoltaic Modules for Parameter Estimation and Thermodynamic Assessment. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7(2), 159–165.

Davidson, M. (2011). Optikte Öncüler: Alexandre Edmond Becquerel ve William Henry Bragg. *Mikroskopi Bugün*, 19 (4), 42-44.

Dolar, M. (2006). Spatial Interpolation of Sunshine Duration in Slovenia. *Meteorological Applications*, 13(4), 375–384.

Geng, H., Hill, C. M., Zhu, S., Liu, H., Huang, L., ve Pan, S. (2013). Photoelectrochemical Properties and Interfacial Charge Transfer Kinetics of BODIPY-Sensitized TiO₂ Electrodes. *RSC Advances*, 3(7), 2306–2312.

Gezeroğlu, B. (2019). Kimyasal Sprey Püskürtme Yöntemi ile Büyütülen Mgpc İnce Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi (Tez, Namık Kemal Üniversitesi).

Gökşen, K., Kurtay, M., Özmen, Ö. T., Şağban, M., ve Köysal, O. (2019). PCDTBT: PCBM Tabanlı Organik Schottky Diyotlarının ve Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Optoelektronik Karakterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1644-1657.

Görkey, A. (2013a). Boya ile Duyarlı Hale Getirilmiş Güneş Pilleri Nasıl Çalışır? <https://www.elektrikport.com/9008>.

Görkey, A. (2013b). Organik Güneş Pilleri. <https://www.elektrikport.com/8810>.

Günday, G. (2010). Polifenilenvinilen (PPV) Bazlı Konjuge Polimerlerle Hazırlanan Organik Fotovoltaik Hücreler (Yıldız Teknik Üniversitesi).

Güneş, S., Helmut Neugebauer, A., ve Sariciftci, N. S. (2007). Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews*, 107(4), 1324–1338.

Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., ve Pettersson, H. (2010). Dye-Sensitized Solar Cells. *Chemical Reviews*, 110(11), 6595–6663.

Imer, A. G., Kaya, E., Dere, A., Al-Sehemi, A. G., Al-Ghamdi, A. A., Karabulut, A., ve Yakuphanoglu, F. (2020). Illumination Impact on the Electrical Characteristics of Au/Sunset Yellow/N-Si/Au Hybrid Schottky Diode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2020 31:17, 31(17), 14665–14673.

Kaçuş, H. (2018). Gümüş, Altın ve Gümüş- Altın Alaşımli Nonoparçacıkların Organik Güneş Pillerinin Performansına Etkileri. (Tez, Atatürk Üniversitesi).

Kazim, S., Ali, V., Zulfequar, M., Mazharul Haq, M., ve Husain, M. (2007). Electrical Transport Properties of Poly[2-Methoxy-5-(2'-Ethyl Hexyloxy)-1,4-Phenylene Vinylene] Thin Films Doped with Acridine Orange Dye. *Physica B: Condensed Matter*, 393(1–2), 310–315.

Kocakuşak, R. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisinin, Türkiye'deki Önemi ve GES Kurulum Araştırması (Tez, Maltepe Üniversitesi).

Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., ve Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114.

Koç, Ü. (2021). Güneş Enerjisi ve Ekonomik Büyüme. *Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 515–533.

Köker, M. Ş. (2020). Fotovoltaik Sistemlerde Hücre Çeşitleri - Green Solar Network - Portal International. <https://www.greensolarnetwork.org/>.

Kroon, J. M., Wienk, M. M., Verhees, W. J. H., ve Hummelen, J. C. (2002). Accurate Efficiency Determination and Stability Studies of Conjugated Polymer/Fullerene Solar Cells. *Thin Solid Films*, 403–404, 223–228.

Küçükkaya, E. (2016). Güneş Enerjisi Nedir? <https://www.enerjiportali.com/gunes-enerjisi-nedir-4/>.

Küpeli, A. Ö. (2005). Güneş Pilleri ve Verimleri (Tez, Osman Gazi Üniversitesi).

Kurtaran, S. (2021). Kimyasal Püskürtme Tekniği ile Üretilen Pbs İnce Filmin Karakterizasyonu. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 770–777.

Lan, Y. H., Hsiao, C. H., Lee, P. Y., Bai, Y. C., Lee, C. C., Yang, C. C., Leung, M. K., Wei, M. K., Chiu, T. L., ve Lee, J. H. (2011). Dopant Effects in Phosphorescent White Organic Light-Emitting Device with Double-Emitting Layer. *Organic Electronics*, 12(5), 756–765.

Liao, Q., Kang, Q., Yang, Y., Zheng, Z., Qin, J., Xu, B., ve Hou, J. (2022). Highly Stable Organic Solar Cells Based on an Ultraviolet-Resistant Cathode Interfacial Layer. *CCS Chemistry*, 4(3), 938–948.

Mathew, S., Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B. F., Ashari-Astani, N., ... ve Gratzel, M. (2014). Dye-Sensitized Solar Cells with 13% Efficiency Achieved Through the Molecular Engineering of Porphyrin Sensitizers. *Nature Chemistry*, 6(3), 242-247.

Matzarakis, A. P., ve Katsoulis, V. D. (2006). Sunshine Duration Hours Over the Greek Region. *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1–4), 107–120.

Meteorolojiye Giriş - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (N.D.). Retrieved August 20, 2021. <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=7>.

Narin, P. (2014). Yarıiletkenlerin Özellikleri - KBT Bilim Sitesi. <https://www.kuark.org/2014/01/>.

Nazeeruddin, M. K., Péchy, P., ve Gratzel, M. (1997). Efficient Panchromatic Sensitization of Nanocrystalline TiO₂ Films By a Black Dye Based on Atrithiocyanato–Ruthenium Complex. *Chemical Communications*, 18, 1705–1706.

Norde, H. (2008). A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052.

O'Regan, B., ve Gratzel, M. (1991). A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films. *Nature* 1991 353:6346, 353(6346), 737–740.

Oktik, Ş. (2001). Güneş-Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri. Ankara:Temiz Enerji Vakfı. <http://katalog.istanbul.edu.tr/2002/06853>.

Orak, I., Ejderha, K., ve Turut, A. (2015). The Electrical Characterizations and Illumination Response of Co/N-Type Gap Junction Device. *Current Applied Physics*, 15(9), 1054–1061.

Özkarayel, L. (2013). Elektromanyetik Spektrum Bize Ne Anlatıyor? Açık Bilim. <http://www.acikbilim.com/2013/11>.

Öztürk, H. H. (2004). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0.

Padinger, F., Rittberger, R. S., ve Sariciftci, N. S. (2003). Effects of Postproduction Treatment on Plastic Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 13(1), 85–88.

Perincek, S. D., Körlü, A. E., Duran, K., ve Bahtiyari, İ. (2007). Ultraviyole Teknolojisi Ultraviolet Technology. 4, 219–223.

Scheuer, C., Boot, E., Carse, N., Clardy, A., Gallagher, J., Heck, S., Marron, S., Martinez-Alvarez, L., Masarykova, D., Mcmillan, P., Murphy, F., Steel, E., Ekdom, H. Van, ve Vecchione, H. (2021a). Optoelektronik: Yarıiletkenlerin Yarattığı Renkli Dünya. *Physical Education and Sport For Children and Youth with Special Needs Researches, Best Practices, Situation*, 343–354.

Scheuer, C., Boot, E., Carse, N., Clardy, A., Gallagher, J., Heck, S., Marron, S., Martinez-Alvarez, L., Masarykova, D., Mcmillan, P., Murphy, F., Steel, E., Ekdom, H. Van, ve Vecchione, H. (2021b). Yenilenebilir Enerji Kaynakları. *Physical Education and Sport for Children and Youth With Special Needs Researches, Best Practices, Situation*, 343–354.

Seddon, E. A., ve Seddon, K. R. (1984). *The Chemistry of Ruthenium (15-17)*. <https://www.elsevier.com/ISBN:9781483289908>.

Sevgili, Ö., Tasyürek, L. B., Bayindir, S., Orak, I., ve Caliskan, E. (2021). The Current Transformer Mechanism and Structural Properties of Novel Al/BODIPY/Psi and Au/BODIPY/Psi Heterojunctions. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 130, 105805.

Shirakawa, H., Louis, E. J., Macdiarmid, A. G., Chiang, C. K., ve Heeger, A. J. (1977). Synthesis Of Electrically Conducting Organic Polymers: Halogen Derivatives of Polyacetylene, (CH)_x. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 16, 578–580.

Sola-Llano, R., ve Bañuelos, J. (2018). Introductory Chapter: BODIPY Dye, an All-in-One Molecular Scaffold for (Bio) Photonics. In *BODIPY Dyes-A Privilege Molecular Scaffold with Tunable Properties*. <https://www.intechopen.com/chapters/64978>.

Solmaz, R. (2019). P ve N Tipi Yarıiletken Tabakalar ile Gerçekleştirilen Bariyer Boşalmasının Akım Osilasyonlarının Deneysel Analizi . (Tez, Siirt Üniversitesi).

Sönmez, M. (2018). Ono, Onno Tipi İmin Bileşikleri-Heteronükleer Komplekslerinin Sentezi ve Fotovoltaik Özelliklerinin Belirlenmesi (Tez, Ankara Üniversitesi).

Strobel, N. (2020). The Sun--The Closest Star. <https://www.astronomynotes.com/starsun>.

Takahashi, K., Kuraya, N., Yamaguchi, T., Komura, T., ve Murata, K. (2000). Three-Layer Organic Solar Cell With High-Power Conversion Efficiency of 3.5%. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61(4), 403–416.

Tang, C. W. (1998). Two-Layer Organic Photovoltaic Cell. *Applied Physics Letters*, 48(2), 183.

Taştan, F. (2020). T.C Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü Türkiye Günlük Güneşlenme Süreleri. <https://www.mgm.gov.tr>.

Tsai, H. L. (2010). Insolation-Oriented Model of Photovoltaic Module Using Matlab/Simulink. *Solar Energy*, 84(7), 1318–1326.

Tülin Zateroğlu, M., ve Mustafa Kandırmaz, H. (2018). Türkiye İçin Güneşlenme Süresinin Mekansal Analizi. *SETSCI Conference Indexing System*, 3, 590–593.

Ürper, O. (2014). Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Organik Güneş Pillerinde Elektrot Malzemesi Olarak Kullanılması (Tez, İstanbul Teknik Üniversitesi).

Waldauf, C., Schilinsky, P., Hauch, J., ve Brabec, C. J. (2004). Material and Device Concepts for Organic Photovoltaics: Towards Competitive Efficiencies. *Thin Solid Films*, 451–452, 503–507.

Yao, J., Chen, Q., Zhang, C., Zhang, Z.-G., ve Li, Y. (2022). Perylene-Diimide-Based Cathode İnterlayer Materials for High Performance Organic Solar Cells. *Susmat*. <https://doi.org/10.1002/sus2.50>.

Yildirim, N., ve Durumlu, E. (2016). Ag/Azure A /N-Si Schottky Diyodun Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin Araştırılması. *Doğa ve Fen Dergisi*, Tr. J. Nature Sci, 5(1).

Yıldız, T. (2012). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı ve İlgili Kuruluşlarının Amaç ve Faliyetleri Ankara, 2012 Bağlı ve İlgili Kuruluşlar Dairesi Başkanlığı. <http://www.sp.gov.tr>.

Yu, G., Gao, J., Hummelen, J. C., Wudl, F., ve Heeger, A. J. (1995). Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies Via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions. *Science*, 270(5243), 1789.

Zhang, T., Iqbal, S., Zhang, X.-Y., Wu, W., Su, D., ve Zhou, H.-L. (2020). Recent Advances in Highly Efficient Organic-Silicon Hybrid Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 204, 110245.