

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENDİLİĞİNDE DİZİLEN TEK TABAKA MOLEKÜLLER İLE PEROVSKİT  
TEMELLİ GÜNEŞ HÜCRELERİNDE ARA YÜZEY ÇALIŞMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhittin ÜNAL**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cem TOZLU**

**AĞUSTOS 2020**



**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENDİLİĞİNDE DİZİLEN TEK TABAKA MOLEKÜLLER İLE PEROVSKİT  
TEMELLİ GÜNEŞ HÜCRELERİNDE ARA YÜZEY ÇALIŞMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhittin ÜNAL  
170851102**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cem TOZLU**

**AĞUSTOS 2020**



## TEZ ONAYI

Muhittin Ünal tarafından hazırlanan *Kendiliğinden Dizilen Tek Tabaka Moleküller ile Perovskit Temelli Güneş Hücrelerinde Ara Yüzey Çalışmaları* adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:  
Doç. Dr. Cem TOZLU

Jüri Üyeleri

*Doç. Dr. Aytaç Gültekin*

*Doç. Dr. Cem Tozlu*

*Doç. Dr. Mustafa Can*

İmza:

Tez Savunma Tarihi: 05/08/2020

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI**  
**Enstitü Müdürü**



## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

**Muhittin ÜNAL**





*Babama,*



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, üç farklı SAM molekülünün perovskit güneş hücrelerindeki ara yüzey çalışması ile güç dönüşüm verimliliğine etkisi incelenmiştir.

Lisans eğitimime başladığım ilk günden bu yana verdiği öğretiler sayesinde sorgulamanın önemini öğreten, yüksek lisans eğitimim süresince sunduğu çalışma ortamı, engin tecrübeleri, sabrı ve sonsuz desteği için saygıdeğer hocam Doç. Dr. Cem TOZLU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda kullandığım kendiliğinden dizilen tek tabaka moleküllerin sentezinde katkılarından dolayı Doç. Dr. Mustafa CAN ve Dr. Mesude Zeliha Yiğit'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım boyunca bilgi birikimi ve tecrübelerini esirgemeyen, fikir alışverişinde bulunduğum, her zaman yanımda olan Adem MUTLU ve sayın hocam Arş. Gör. Semih YURTDAŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2020

Muhittin ÜNAL  
Enerji Sistemleri Mühendisi



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOLLER .....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
ABSTRACT .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ...</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Güneş Hücresinin Çalışma Mekanizması ve Yapısı .....	5
2.2 Güneş Hücresinin Elektriksel Parametreleri .....	9
2.3 Güneş Hücresinin Tarihçesi .....	10
2.4 Nesillere Göre Güneş Hücreleri .....	11
2.4.1 Birinci nesil güneş hücreleri .....	11
2.4.2 İkinci nesil güneş hücreleri .....	11
2.4.3 Üçüncü nesil güneş hücreleri .....	11
2.5 Perovskit Güneş Hücreleri.....	12
2.5.1 Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi .....	14
2.5.2 Perovskit güneş hücre çeşitleri ve aygıt yapısı .....	15
2.6 Kendiliğinden Dizilen Tek Tabaka Moleküller (Self Assembled Monolayer, SAM) .....	17
<b>3. MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>19</b>
3.1 Materyal.....	19
3.1.1 Kullanılan kimyasal malzemeler .....	19
3.1.2 Kullanılan ekipmanlar .....	19
3.2 Metod.....	27
3.2.1 ITO alttaşların hazırlanması .....	27
3.2.2 Sam çözeltilerinin hazırlanması .....	27
3.2.3 PEDOT:PSS filmlerin kaplanması.....	28
3.2.4 Perovskit çözeltilisinin hazırlanması ve kaplanması.....	28
3.2.5 PC <sub>61</sub> BM çözeltilisinin hazırlanması ve kaplanması .....	28
3.2.6 Metal kontakların kaplanması .....	28
3.2.7 SAM kaplı alttaşların yüzey analizi .....	28
3.2.8 Perovskit ince filmin yapı analizi ve görüntüleri .....	29
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>31</b>
4.1 Perovskit Filmlerin Yapısal Analizi .....	31
4.1.1 X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları .....	31
4.1.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri .....	31
4.2 Kendiliğinden Dizilen Tek Tabaka Moleküllerin (SAM) Yüzey Analizleri....	33
4.2.1 Kontak açısı sonuçları.....	33
4.2.2 Kelvin probe kuvvet mikroskobu sonuçları .....	34
4.3 Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları .....	35
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>41</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>43</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>47</b>



## KISALTMALAR

<b>AFM</b>	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Oksit
<b>a:Si</b>	: Amorf Silisyum
<b>BaTiO<sub>3</sub></b>	: Baryum Titanat
<b>CaTiO<sub>3</sub></b>	: Kalsiyum Titanat
<b>CdTe</b>	: Kadmiyum Tellür
<b>CH(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup></b>	: Formamidinyum
<b>CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup></b>	: Metil Amonyum
<b>CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub></b>	: Metil Amonyum Kurşun İyodür
<b>CIGS</b>	: Bakır İndiyum Galyum Selenür
<b>CPD</b>	: Kontak Potansiyel Farkı
<b>DMF</b>	: Dimetil Formamid
<b>DMSO</b>	: Dimetil Sülfoksit
<b>DSSC</b>	: Boya Duyarlı Güneş Hücresi
<b>ETM</b>	: Elektron Taşıyıcı Malzeme
<b>FTO</b>	: Flor Katkılı Kalay Oksit
<b>HOMO</b>	: İşgal Edilmiş En Yüksek Moleküler Orbital
<b>HTM</b>	: Hol Taşıyıcı Malzeme
<b>IPCE</b>	: Gelen Fotonun Akıma Katkısının Verimliliği
<b>ITO</b>	: İndiyum Katkılı Kalay Oksit
<b>KPFM</b>	: Kelvin Probe Kuvvet Mikroskobu
<b>LUMO</b>	: İşgal Edilmemiş En Düşük Moleküler Orbital
<b>MAPbI<sub>3</sub></b>	: Metil Amonyum Kurşun İyodür
<b>OSC</b>	: Organic Güneş Hücresi
<b>PbI<sub>2</sub></b>	: Kurşun İyodür
<b>PC<sub>61</sub>BM</b>	: Fenil-C <sub>61</sub> -Bütirik Asit Metil Esteri
<b>PEDOT</b>	: Poli(3-4etilendioksitiyofen)
<b>PSS</b>	: Polistiren Sülfonat
<b>PV</b>	: Fotovoltaik
<b>PVD</b>	: Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>QE</b>	: Kuantum Verimliliği
<b>rpm</b>	: Dakikadaki Devir Sayısı
<b>SAM</b>	: Kendiliğinden Dizilen Tek Tabaka Molekül
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu

**SrTiO<sub>3</sub>** : Stronsiyum Titanat  
**TiO<sub>2</sub>** : Titanyum Dioksit  
**XRD** : X-ışını Kırınımı  
**ZnO** : Çinko Oksit



## SEMBOLLER

$\alpha$	: Soğurma Katsayısı
$\text{Å}$	: Angström
<b>A</b>	: Amper
<b>Ag</b>	: Gümüş
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Au</b>	: Altın
$\beta$	: Sarı Faz
<b>Be</b>	: Berilyum
<b>Br</b>	: Brom
$^{\circ}\text{C}$	: Derece Celsius
<b>c</b>	: Coulomb
<b>C</b>	: Karbon
<b>Ca</b>	: Kalsiyum
<b>Cl</b>	: Klor
<b>Cm</b>	: Santimetre
<b>cm<sup>2</sup></b>	: Santimetre Kare
<b>Cs</b>	: Sezyum
<b>e</b>	: Elementel Yük
<b>E<sub>c</sub></b>	: İletkenlik Bandı
<b>E<sub>f</sub></b>	: Fermi Enerji Seviyesi
<b>E<sub>g</sub></b>	: Yasak Enerji Aralığı
<b>E<sub>v</sub></b>	: Değerlik Bandı
<b>eV</b>	: Elektron Volt
<b>FF</b>	: Doluluk Faktörü
$\gamma$	: Siyah Faz
<b>H</b>	: Hidrojen
<b>h<math>\gamma</math></b>	: Fotonun Enerjisi
<b>I<sub>0</sub></b>	: Ters Doyum Akımı
<b>I</b>	: İyot
<b>I<sub>sc</sub></b>	: Kısa Devre Akımı
<b>J</b>	: Joule
<b>J<sub>sc</sub></b>	: Akım Yoğunluğu
<b>k</b>	: Boltzman Sabiti

<b>K</b>	: Kelvin
<b>kW</b>	: Kilowatt
<b>mA</b>	: Miliamper
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>mg</b>	: Miligram
<b>mL</b>	: Mililitre
<b>nA</b>	: Nanoamper
<b>nm</b>	: Nanometre
<b>O<sub>2</sub></b>	: Oksijen
<b>O<sub>3</sub></b>	: Ozon
<b>ppm</b>	: Milyonda Bir Birim
<b>Pb</b>	: Kurşun
<b>P<sub>in</sub></b>	: Toplam Işınım Miktarı
<b>P<sub>max</sub></b>	: Maksimum Güç
<b>Sn</b>	: Kalay
<b>sn</b>	: Saniye
<b>t</b>	: Goldschmidt Tolerans Faktörü
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>Ti</b>	: Titanyum
<b>UV</b>	: Ultraviyole
<b>W</b>	: Watt
<b>V</b>	: Voltaj
<b>V<sub>Bi</sub></b>	: İç Potansiyel
<b>V<sub>OC</sub></b>	: Açık Devre Voltajı
<b>Vs</b>	: Volt Saniye
<b>η</b>	: Verim
<b>μL</b>	: Mikrolitre
<b>°</b>	: Derece
<b>~</b>	: Yaklaşık Olarak
<b>Ø</b>	: İş Fonksiyonu
<b>λ</b>	: Dalgaboyu

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1</b> : Üretilen güneş hücrelerinin ileri tarama durumundaki elektriksel parametreleri. ....	<b>39</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : Üretilen güneş hücrelerinin geri tarama durumundaki elektriksel parametreleri. ....	<b>39</b>





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Elektronun uyarılması ve boşluk oluşumu. ....	6
Şekil 2.2 : P-n eklem yapısı. ....	7
Şekil 2.3 : Besleme gerilimine göre Fermi enerji seviyeleri .....	8
Şekil 2.4 : Bir güneş hücresinin I-V grafiği üzerinde elektriksel parametrelerinin gösterimi.....	10
Şekil 2.5 : Perovskit güneş hücrelerinde a) düzlemsel n-i-p yapı b) düzlemsel p-i-n yapı c) mezoskopik yapı.....	15
Şekil 2.6 : Perovskit güneş hücresinin çalışma prensibinin şematik gösterimi. ....	16
Şekil 2.7 : Sam molekülünün şematik gösterimi. ....	17
Şekil 3.1 : Kudos-sk2210hp marka ultrasonik su banyosu.....	19
Şekil 3.2 : Jeligh company 342-220 marka uv ozon temizleme cihazı. ....	20
Şekil 3.3 : Vwr-vms-07 ve mtops hsd150-03p ısıtıcı karıştırıcı.....	21
Şekil 3.4 : Polos-spin-150-i marka dönel kaplama cihazı. ....	21
Şekil 3.5 : Innovative technology marka glovebox. ....	22
Şekil 3.6 : Fiziksel buhar biriktirme cihazı.....	22
Şekil 3.7 : Oai trisol aaa güneş simülatörü. ....	23
Şekil 3.8 : Keithley 2400 akım gerilim kaynağı.....	23
Şekil 3.9 : Biolin scientific theta lite tl 101 marka kontak açıcı cihazı. ....	24
Şekil 3.10 : Carl zeiss 300 vp marka taramalı elektron mikroskobu.....	24
Şekil 3.11 : Nt-mdt ntegra solaris marka atomik kuvvet mikroskobu.....	25
Şekil 3.12 : Panalytical empyrean marka XRD cihazı. ....	26
Şekil 3.13 : Enlitech qe-r marka ipce cihazı. ....	26
Şekil 3.14 : Sam moleküllerinin kimyasal yapısı. ....	27
Şekil 4.1 : XRD sonuçlarının görüntüsü.....	31
Şekil 4.2 : 1µm ölçekli taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	32
Şekil 4.3 : 200nm ölçekli taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.....	33
Şekil 4.4 : Kontak açıcı ölçüm sonuçları.....	34
Şekil 4.5 : Kpfm ölçümlerine göre kontak potansiyeline karşılık büyüklük grafiği. ....	35
Şekil 4.6 : ITO/Perovskit/PC <sub>61</sub> BM/Ca/Ag ve ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/ PC <sub>61</sub> BM /Ca/Ag konfigürasyonuna sahip aygıtların I-V eğrileri.....	36
Şekil 4.7 : Kullanılan sam moleküllerine ait I-V eğrileri. ....	37
Şekil 4.8 : Üretilen tüm aygıtlara ait I-V eğrisi. ....	38
Şekil 4.9 : En iyi sonuçların ipce grafiği .....	39



## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **KENDİLİĞİNDEN DİZİLEN TEK TABAKA MOLEKÜLLER İLE PEROVSKİT TEMELLİ GÜNEŞ HÜCRELERİNDE ARA YÜZEY UYGULAMALARI**

**Muhittin Ünal**

**Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Cem TOZLU**

**Ağustos, 2020, 73 sayfa**

Bu tez çalışmasında p-i-n yapı perovskit güneş hücresinde, ITO ile perovskit ara yüzeyi, kendiliğinden dizilen tek tabaka moleküller (SAM) ile modifiye edilerek güç dönüşüm verimliliğindeki iyileştirmeler incelenmiştir. Fenil grupları içeren üç farklı karboksilik asit türevi SAM molekülünün ITO yüzeyine organize olmasıyla ITO'nun iş fonksiyonu azalmıştır. İş fonksiyonun azalması ile Perovskit ile ITO arasındaki enerji bariyeri azalarak daha verimli bir yük transferi olması sağlanmıştır. ITO/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonunda %5,42 güç dönüşüm verimliliği elde edilirken, boşluk taşıyıcı malzeme olarak PEDOT:PSS'in kullanıldığı ITO/PEDOT:PSS/Perovskite/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag yapısında %11,66 güç dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. MC-2, MZ-187, MZ-325 olarak kodlanan SAM moleküllerinin kullanıldığı ITO/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag yapıda sırasıyla %13,43, %14,44, %12,89 güç dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Yüzey analizi ve yapısal karakterizasyon sonuçları da güç dönüşüm verimliliklerindeki pozitif gelişmeyi destekler niteliktedir. En iyi sonuca göre; PEDOT:PSS'in kullanıldığı yapıya göre yaklaşık olarak %24 bir artışla güç dönüşüm verimliliğinde iyileştirme gerçekleşmiştir. Tüm sonuçlara göre ise SAM moleküllerinin PEDOT:PSS'e alternatif malzemeler olacağı açık bir şekilde gösterilmiştir.



## **ABSTRACT**

**MsThesis**

### **INTERFACE APPLICATIONS IN PEROVSKITE BASED SOLAR CELLS WITH SELF ASSEMBLED MONOLAYER**

**Muhittin Ünal**

**Karamanoğlu Mehmetbey University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Advanced Technologies**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cem TOZLU**

**August, 2020, 73 pages**

In this thesis, the p-i-n structure in perovskite solar cell, ITO and the perovskite interfaces are modified with self-assembled monolayer (SAM) molecules to improve power conversion efficiency. With the organization of three different carboxylic acid derivatives SAM molecules containing phenyl groups to the ITO surface, the work function of ITO has decreased. With the decrease in work function, the energy barrier between perovskite and ITO has been reduced and more effective load transfer has been provided. 11.46% power conversion efficiency has been achieved in ITO/PEDOT:PSS/Perovskite/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag structure where PEDOT:PSS is used as hole transport material and in the ITO/Perovskite/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag structure, 5.42% power conversion efficiency was achieved. Power conversion efficiency of respectively 13.43%, 14.44%, 12.89% in the structure of ITO/SAM/Perovskite/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag using SAM molecules encoded as MC-2, MZ-187, MZ-325 were obtained. Surface and structural characterization results also support positive improvement in power conversion efficiencies. According to the best result; improvement in power conversion efficiency has been achieved with an increase of approximately 24% compared to the structure in which PEDOT:PSS is used. According to all results, it is clearly shown that SAM molecules will be alternative materials to PEDOT:PSS.



## 1. GİRİŞ

21. yüzyılda tüm dünyanın başlıca sorunlarından bir tanesi sürekli artan enerji talebidir. Bu talebin doğurduğu diğer sorunlar; maliyet, sürdürülebilirlik, çevre dostu olma, hammaddenin bolluğu ve basit tasarımlar olmasıdır. Günümüzde yaygın olarak fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanılmasından dolayı bu kullanımdaki artışın sonucu olarak küresel ısınma ve çevre kirliliği her geçen gün artmaktadır. Bu probleme çözüm olarak yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir paya sahip olan güneş, gelecek nesiller ve yeşil bir dünyanın enerji gereksinimlerini karşılamak adına çok büyük potansiyele sahiptir. Güneşten dünyaya yılda  $1,73 \times 10^{14}$  kw güç yayılmaktadır bu da dünyada bir yılda kullanılan enerjinin 10 bin katı olarak ifade edilmektedir. Bu enerjinin kaynağı güneşin çekirdeğinde gerçekleşen füzyon tepkimeleridir. Füzyon sonucu her saniye hidrojen atomları helyum atomlarına dönüşür ve aradaki kütle farkından kaynaklı olarak büyük bir enerji açığa çıkmaktadır (Şen, 2004). Dolayısıyla güneş enerjisi; fosil yakıt kaynaklı enerji, nükleer enerji ve diğer kaynaklardan üretilen enerji teknolojilerine alternatif olabilecek büyük bir potansiyele sahiptir, çünkü güneş ışınımı çeşitli teknolojiler kullanılarak ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Nihayetinde güneş enerjisini soğurabilecek yeni malzemeler ve sistemler sürekli olarak optimize edilmeli ve en faydalı şekilde kullanılmalıdır. Bu noktada güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken tabanlı aygıtlar olan fotovoltaik güneş hücreleri geliştirilmiştir. Bilimsel araştırmalar neticesinde fotovoltaik teknolojilerinin gelişiminde önemli mesafeler kat edilmiştir.

Güneş hücreleri şu ana kadar 3 nesilde incelenmiştir; ilk nesil polikristal ve mono kristal silisyum tabanlı güneş hücreleri, ikinci nesil ise, amorf silisyum (Amorph Silicon, a:Si), Bakır İndiyum Galyum Selenür (Copper Indium Gallium Selenium, CIGS), Kadmiyum Tellür (Cadmium Tellurium, CdTe) inorganik ince film güneş hücreleridir. Bu iki tip güneş hücrelerinde tüm gelişmelere rağmen maliyetleri hala oldukça yüksektir. Bu nedenle üçüncü nesil güneş hücreleri diğer iki nesile göre yüksek verimli düşük maliyetli fotovoltaik (Photovoltaic, PV) teknolojiler için ümit vaat eden bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır ancak henüz PV pazarında yer

bulamamıştır. Bununla birlikte, organik güneş hücreleri (Organic Solar Cell, OSC) ve boya duyarlı güneş hücreleri (Dye Sensitized Solar Cell, DSSC) ucuz ve doğada bol bulunan malzemelerden üretilmesinden dolayı muhtemelen PV pazarında uzun vadeli başarı için umut vaat etmektedir. Üçüncü nesil güneş hücreleri ailesine son dönemlerde katılan ve PV modüller için cezbedici bir aday olarak görülen hibrid perovskit güneş hücre yapılarıdır. Yaygın olarak kullanılan silisyum tabanlı ve CIGS teknolojilerinde elde edilen güç dönüşüm verimliliklerine yaklaşmaktadır.

Perovskit kelimesi  $\text{CaTiO}_3$  (Kalsiyum titanat)'ün mineral formunu ifade etmektedir ve  $\text{ABX}_3$  stokiyometrik yapısına sahiptir. Aynı yapıya sahip birçok malzeme bulunmaktadır,  $\text{SrTiO}_3$  (Stronsiyum titanat),  $\text{BaTiO}_3$  (Baryum titanat) ise en çok bilinenleridir. Güneş hücresi uygulamalarında ise en bilinen yapı  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  (Metil amonyum kurşun iyodür) olmakla beraber farklı kompozisyonlarda perovskit yapısı elde edilebilir.  $\text{ABX}_3$  yapısında A:  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  (metil amonyum),  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$  (Formamidinyum) gibi kationlar, B: Pb (kurşun) veya Sn (kalay) gibi metaller, X: Cl (klor), Br (Brom), I (iyot) gibi halojen malzemeler kullanılmaktadır (**Yu ve Sun, 2020**). Perovskit güneş hücreleri düşük maliyetli, basit bir şekilde hazırlanabilen, yüksek soğurma katsayısı ( $\alpha \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ), bant aralığının ayarlanabilmesi, yük taşıyıcıların mikrometre boyutunda difüzyon uzunluğuna sahip olması, yüksek yük taşıyıcı mobilitesi ( $1\text{-}100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) gibi özelliklerinden dolayı diğer PV teknolojilerine göre oldukça avantajlıdır (**Im ve diğerleri, 2011; Noh ve diğerleri, 2013; Stranks ve diğerleri, 2013; De Wolf ve diğerleri, 2014; Wehrenfennig ve diğerleri, 2014**). Ancak tüm bu avantajlarının yanında yapısal ve termal kararsızlıklar, stabilizasyon, ara yüzey kusurları gibi dezavantajları da beraberinde getirmektedir. İndiyum katkılı kalay oksit (Indium doped tin oxide, ITO) üzerine kaplanan PEDOT:PSS (poli 3-4 etilen dioksi tiyofen:poli stiren sülfonat) görünür bölgede geçirgen bir yapıya sahip olması, boşluk taşıyıcı mobilitesinin yüksek olması, iş fonksiyonunun ITO ile uyumlu olması gibi özellikleri ile güneş hücresi uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır (**Xia ve Dai, 2020**). Fakat, PSS grubunun asidik yapısından dolayı ITO/PEDOT:PSS ara yüzeyinde oluşan korozif etkiler ve PEDOT:PSS çözücüsünün su olmasından kaynaklı olarak da PEDOT:PSS/Perovskit ara yüzeyinde de yapısal deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu kusurları engellemek ve aygıt performansını geliştirmek adına literatürde yüzey modifikasyonu, ara yüzey mühendisliği gibi kavramlar ortaya çıkmaktadır (**Zhou ve diğerleri, 2014**). Kendiliğinden dizilen tek tabaka moleküller (Self assembled monolayer, SAM) bunun en somut örneğidir. Kaplandığı yüzeyin

özelliklerini değiştirmekle kalmayıp yapının enerji bant seviyelerinde de değişimler sağlayarak aygıt performansında iyileştirmeler sağlamaktadır (**Zuo ve diğerleri, 2015**). Bu tez çalışmasında, PEDOT:PSS polimerine alternatif olabilecek ITO/Perovskit ara yüzeyinde literatüre kazandırmak adına 3 farklı SAM molekülü kullanarak (4',4''-([1,1'-bifenil]-4,4'-diil bis(fenil azanedil))bis([1,1'-bifenil]-4-karboksilik asit)), 5-(4-(9H-karbazol-9-il)fenil)tiyofen-2-karboksilik asit, 4'-(difenil amino)-[1,1'-bi fenil]-4-karboksilik asit) aygıt performansları incelenip, sonuçları tartışılmıştır.

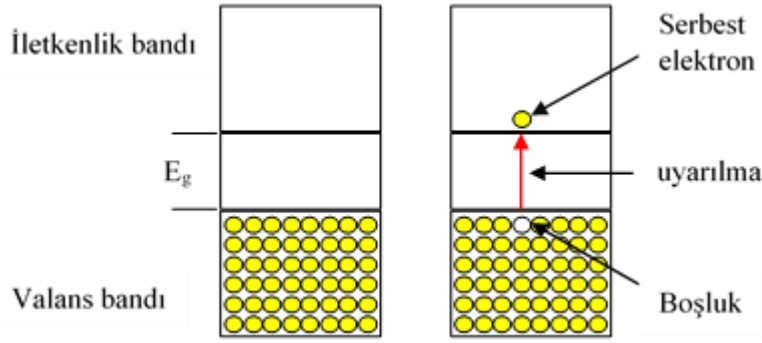




## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1 Güneş Hücresinin Çalışma Mekanizması ve Yapısı

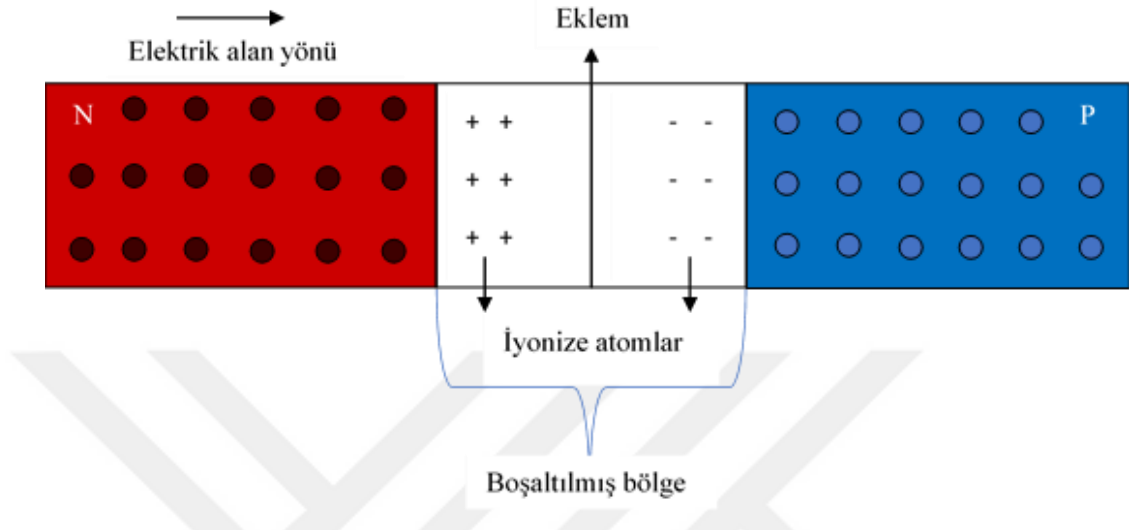
Güneşten gelen ışınım enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren, yarı iletken malzemeler kullanılarak yapılan aygıtlara güneş hücresi adı verilmektedir. Yarı iletkenin tanımını yapabilmek için bazı kavramları bilmek gerekmektedir. Atomun yapısında elektronlar belirli enerji seviyelerinde yer alırlar ve doğası gereği her zaman en düşük enerji seviyesinde bulunma eğilimindedirler. Fakat Pauli dışlama prensibine göre iki elektron aynı enerji seviyesinde yer alamaz. Bir katı malzemenin oluşumu çok sayıda atomun bir araya gelmesiyle oluşur. Atomlar katıyı oluştururken birbirinden bağımsız ve belirli bir mesafe ile dizilirler ancak komşu atomlar birbirlerine yakın oldukları için aynı düzeydeki enerji seviyelerinde yarılmalar oluşur. Bu durumun sonucu olarak ise elektronların enerji seviyeleri artık enerji bantları olarak değerlendirilir. İki bant arasındaki mesafe o katıyı oluşturan atomların birbiri arasındaki mesafeye bağlı olarak değişir. Bantlar arasında elektronların bulunamayacağı enerji seviyeleri oluşur ve yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) adını alır (Callister ve Rethwisch, 2011). Bantlar arası enerji seviyelerine göre malzemeler yalıtkan, iletken ve yarı iletken özellikler sergilerler. Mutlak sıfırda temel enerji seviyesinden başlayarak elektronların doldurduğu maksimum enerji seviyesine ise Fermi enerji seviyesi denir, güneş hücresi çalışmalarında kullanılan malzemeler için büyük bir öneme sahiptir. Değerlik elektronları ile dolu bant, valans bandı ya da değerlik bandı olarak adlandırılır ve  $E_v$  ile sembolize edilir. Aynı şekilde değerlik elektronlarının uyarılması ile geçtiği bir üst enerji seviyesi ise iletkenlik bandı olarak adlandırılır,  $E_c$  ile sembolize edilir. Valans bandının maksimum seviyesi ile iletkenlik bandının minimumu arasındaki kısma ise yasak enerji aralığı denilmektedir. Bir yarı iletkende mutlak sıfırda (0 Kelvin) valans bandı elektronlarla doluyken iletkenlik bandı ise tamamen boştur. Dışarıdan uygulanan ısı, ışık gibi enerji kaynakları ile valans bandındaki elektronlar uyarılır ve iletkenlik bandına doğru geçişleri gerçekleşir (Şekil 2.1). İletkenlik bandına geçen elektron ardında bir boşluk, başka bir deyişle deşik bırakır ve bu pozitif yüklü yük taşıyıcı olarak kabul edilir. Yarı iletkenlerde elektron dışında boşluklarda yük iletimine katkıda bulunurlar.



**Şekil 2.1 :** Elektronun uyarılması ve boşluk oluşumu.

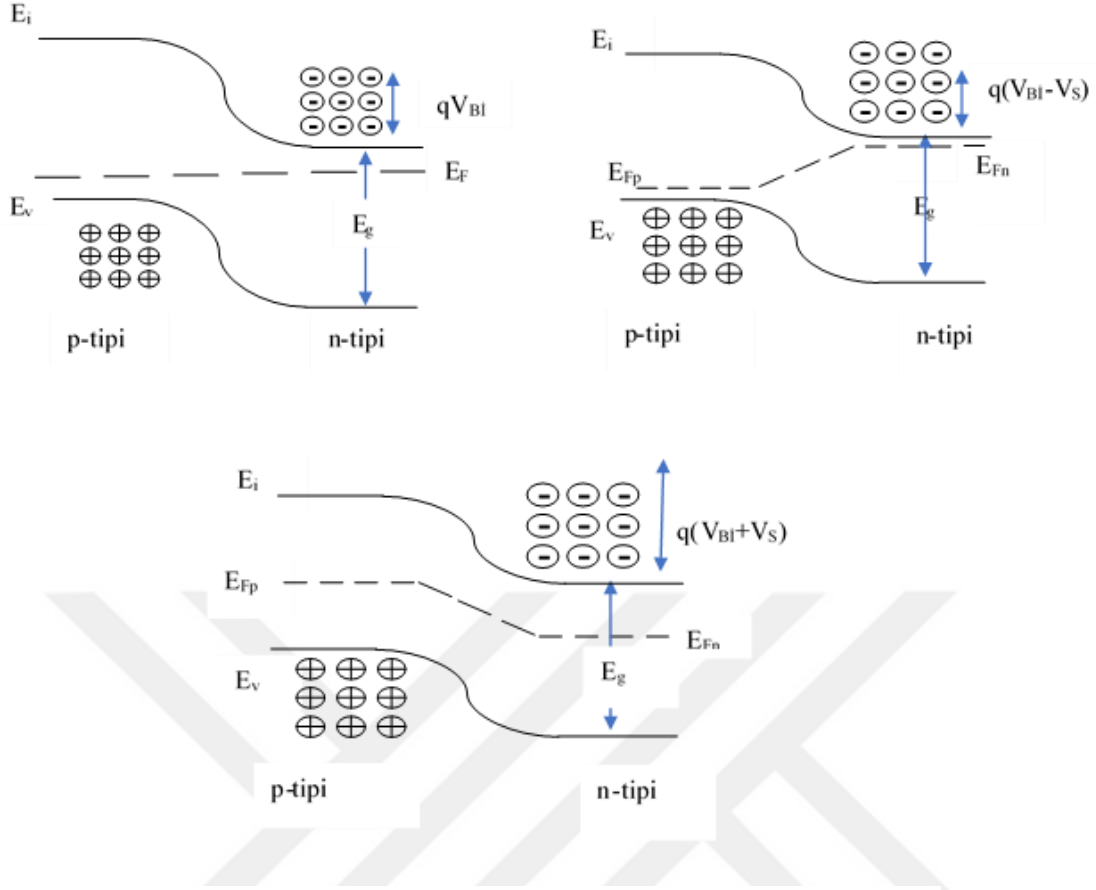
Yarı iletken kristal yapısına en iyi örnek silisyumdur. Kristal yapı içindeki silisyum atomları kendi arasında elektron ortaklaşmasına dayanan kovalent bağ ile dizilmiştir. Yarı iletkenin elektriksel özelliklerin değiştirilebilmesi en önemli özelliklerinden bir tanesidir. Elektriksel iletkenliği arttırmak için yapılan uygulamalardan bir tanesi katkılama (doping) işlemidir. Yarı iletken içerisine, uygun boyutlarda ve eser miktarda başka bir atomun eklenmesi sonucu yarı iletkenler n- tipi ve p-tipi olarak sınıflanırlar. Katkı atomları elektron verici (donör) ya da elektron alıcıdır (akseptör). N-tipi katkılamada arsenik, fosfor gibi son yörüngesinde 5 tane elektron bulunan periyodik cetvelin 5A grubu atomları ile yapılır. Her bir katkı atomu silisyum atomları ile 4 tane kovalent bağ yapar. Katkılanmış silisyum mutlak sıfırda hala yalıtkan haldedir ancak sıcaklığın artması durumunda katkı atomunun zayıf bağ yapan beşinci elektronu kopar ve yapı içerisinde hareket etmeye başlar ve iletkenliğe katkı sağlar böylece nötr haldeki yarı iletken özelliğini kaybeder ve n-tipi yarı iletkende yük taşıyıcısı fazlalık olarak elektronlardır. Aynı şekilde p-tipi katkılamada ise bor, indiyum gibi son yörüngesinde 3 tane elektron bulunan periyodik cetvelin 3A grubu atomları ile yapılır. Katkı atomları silisyum atomları ile 3 bağ yapabilirler, dördüncü bağı ise en yakınındaki atom ile yaparak arkasında boşluk bırakır. Bu şekilde saf haldeki yarı iletken özelliğini kaybeder ve p-tipi yarı iletkende yük taşıyıcısı fazlalık olarak boşluklardır. P tipi ve n tipi katkılı yarı iletkenlerin bir araya getirilmesiyle arayüzeyde p-n eklem oluşmaktadır. Eklem oluştuğunda yüksek elektron konsantrasyonuna sahip bölgeden (n-tipi) düşük elektron konsantrasyonuna sahip bölgeye elektronların difüzyonu gerçekleşir. Diğer taraftan boşluklar ise elektronların hareketine benzer fakat yönü farklı olacak şekilde bir difüzyon oluşturacaktır. Bu difüzyon akımının sonucunda eklem n-tipi kısmında pozitif yüklü iyonlar, p-tipi kısmında ise negatif yüklü iyonlar ortaya çıkar ve yük dengesinin değişiminden dolayı n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru bir iç elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan serbest taşıyıcıların geçişine bariyer

oluştururken aynı zamanda elektron ve boşlukların çoğunluk yük taşıyıcı oldukları bölgeye sürüklenmesine neden olur. P-n eklemde yer alan negatif ve pozitif yüklü iyonlardan oluşmuş bölgeye uzay yük bölgesi (space charge region), boşaltılmış bölge (depletion region) adı verilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : P-n eklem yapısı.

p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin Fermi enerji seviyeleri birbirinden farklı olmasından dolayı yapı boyunca Fermi enerji seviyelerinin aynı hizaya gelmesi amacıyla uzay yük bölgesinde iletkenlik ve değerlik enerji bantları bükülürler ve uzay yük bölgesinde yük dağılımından dolayı  $qV_{bi}$  (built-in potential) iç potansiyeli oluşur. P-n eklem uygulanan gerilimin pozitif veya negatif olmasına göre Fermi seviyesinde değişiklikler olur. P-tipi kısma pozitif, n-tipi kısma negatif uçların bağlandığı durumdaki beslemeye ileri besleme, p-tipi kısma negatif, n-tipi kısma pozitif ucun bağlandığı durumdaki beslemeye ters besleme adı verilir. İleri besleme durumunda potansiyel engel uygulanan gerilim ( $V_s$ ) değeri kadar azalır, böylece çoğunluk yük taşıyıcılarının boşaltılmış bölge üzerinden difüzyonuna engel olan elektrik alan azalır ve eklem üzerinden geçen akım değeri artar, boşaltılmış bölge genişliği daralır. Ters besleme durumunda ise uygulanan gerilim ile iç elektrik alan aynı yönlü olduğu için boşaltılmış bölgenin genişliği artacaktır, çoğunluk yük taşıyıcıları için bir bariyer oluşturacak ve azınlık oldukları bölgeye geçişleri zorlaşacaktır. Besleme durumuna göre Fermi seviyesindeki değişim Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3 :** Besleme gerilimine göre Fermi enerji seviyeleri

İdeal bir p-n eklemde boşaltılmış bölge boyunca toplam akım, elektron ve boşluk akımlarının toplamına eşittir (Eşitlik 2.1).

$$I(V) = I_0(e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'e göre V; voltaj değeri,  $I_0$  ise ters doyum akımı (reverse saturation current), e; elementel yük ( $1,6 \times 10^{-19}$  C), k; Boltzman sabiti ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K), T ise sıcaklığı ifade etmektedir (**Neamen, 1992**).

Bir güneş hücresinde p-n eklem üzerine ışık düşmesiyle elektron boşluk çifti (eksiton) oluşur. Işık, fotonlardan oluşur ve foton enerjisi  $E_f = h\nu$  ile formülüne edilir. Fotonun enerjisi; yasak enerji aralığından küçükse ( $E_g > E_f$ ) eksiton oluşmaz ve enerji dönüşümüne katkı sağlamaz şayet büyük veya eşitse ( $E_g \leq E_f$ ) eksitonlar oluşur böylece boşaltılmış bölgede iç elektrik alan kuvvetinin etkisiyle yeniden birleşme (rekombinasyon) olmadan elektronlar n-tipi bölgeye boşluklar p-tipi bölgeye hareket ederek akıma katkı sağlarlar.

## 2.2 Güneş Hücresinin Elektriksel Parametreleri

Bir güneş hücresinin çalışma prensibi;

- Işığın soğurulması
- Yük oluşumu
- Yükün ayrılması
- Yükün taşınımı
- Yüklerin toplanması

esaslarına dayanır, sonuç olarak üzerine ışık düşen güneş hücresinin karşılığı % cinsinden verim olarak ifade edilir. Verim hesabı için gerekli temel parametreler kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) ve doluluk faktörüdür (FF). Kısa devre akımı; voltajın sıfır olduğu andaki akım değeri olup aynı zamanda fotoakıma eşittir. Bu durumda  $I_{sc}=I_L$  olur. Açık devre gerilimi; akımın sıfır olduğu andaki gerilim değeridir. Doluluk faktörü ise I-V eğrisinde maksimum gücün, kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımına bölünmesiyle elde edilir başka bir ifade ile akım gerilim eğrisinin altında kalan karesel alanı ifade etmektedir ve değeri 0 ile 1 arasındadır (**Quaschnig ve Hanitsch, 1996**).

Açık devre gerilimi (Eşitlik 2.2),

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_{sc}} + 1 \right) \quad (2.2)$$

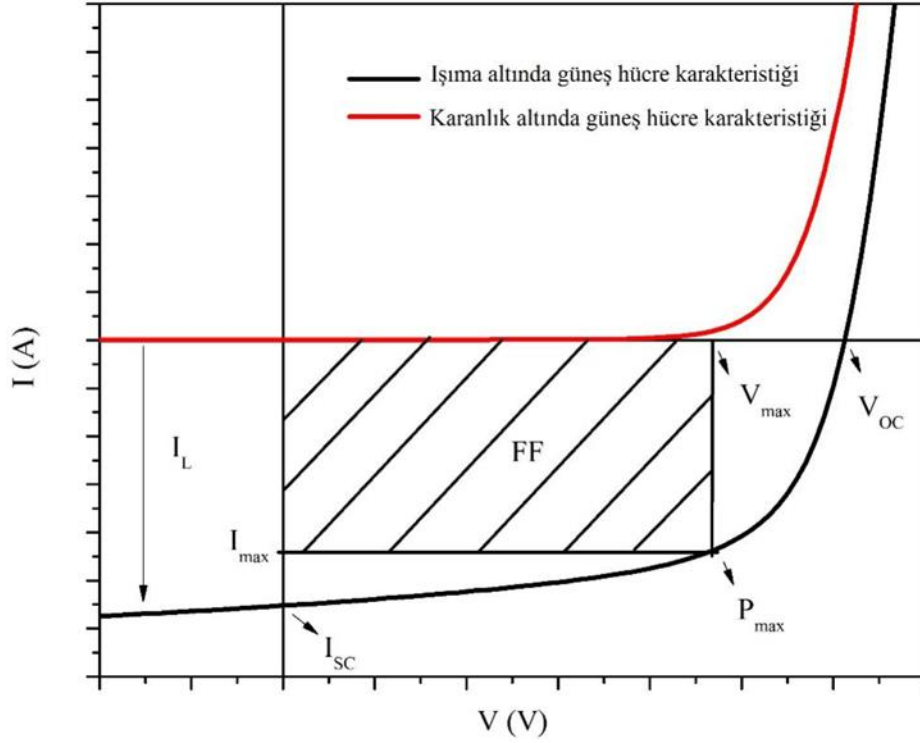
Doluluk faktörü (Eşitlik 2.3),

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

şeklinde ifade edilir. Bu denklemlerden yola çıkarak güneş hücresini verimi (Eşitlik 2.4).

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

Formülü ile hesaplanır.  $P_{in}$ ; güneş hücresi üzerine düşen toplam ışınımı ifade etmektedir. Şekil 2.4'te verilen I-V eğrisi üzerinde bir güneş hücresinin elektriksel parametreleri gösterilmiştir



**Şekil 2.4 :** Bir güneş hücresinin I-V grafiği üzerinde elektriksel parametrelerinin gösterimi

### 2.3 Güneş Hücresinin Tarihiçesi

1839 yılında Fransız fizikçi Edmund Becquerel'in fotovoltajik etkiyi keşfetmesi güneş hücrelerinin miladı olarak kabul edilir. Bir elektrolit çözeltisine daldırılmış gümüş plakaları ışık altına tutarak akımın oluştuğunu gözlemlemiş ve rapor etmiştir (**Becquerel, 1839**). 1876 yılına gelindiğinde Adams ve Day fotovoltajik olayı detaylandırarak, selenyum kaplı elektrotların ışık altında akım ve voltaj ürettiğini gözlemlemişlerdir (**Adams ve Day, 1876**). 1952 yılında silika kullanılarak p-n ekleme sahip güneş hücreleri yapılmıştır (**Kingsbury ve Ohl, 1952**). Silisyum temelli güneş hücrelerinin ilki 1954 yılında Chapin ve arkadaşları tarafından yapılmış ve %6 verim ile çalıştığı rapor edilmiştir (**Chapin ve diğerleri, 1954**). Günümüzde bu verim değerleri %28'lere ulaşmaktadır (**Anonim, 2020**).

## 2.4 Nesillere Göre Güneş Hücreleri

### 2.4.1 Birinci nesil güneş hücreleri

Fotovoltaik pazarında büyük bir pay sahibi olan silisyum tabanlı güneş hücreleri üretim aşamalarına göre tek kristal ve çok kristal olarak ikiye ayrılır. Tek kristal güneş hücresi, Czochralski prosesi olarak da bilinen tek bir silisyum kristalinden üretilir (Zulehner, 1983). Bu tek kristal üretim için hassas ve birçok aşamalı olduğu için oldukça maliyetlidir. Verimlilik değerleri %18-20 arasındadır. Çok kristal güneş hücreleri genellikle bir hücrede birbirine bağlanmış birkaç farklı kristalden oluşur. Üretimi tek kristal güneş hücrelerine göre daha kolay ve maliyeti daha düşüktür. Eritilmiş silisyum bloklarının soğumaya bırakılarak basit bir üretim aşamasına sahiptir (Saga, 2010).

### 2.4.2 İkinci nesil güneş hücreleri

Kristal silisyumlar düşük soğurma katsayılarından dolayı mikron mertebesindeki kalınlıklarda üretilirken ikinci nesil güneş hücrelerinde yüksek soğurma katsayıları sayesinde daha ince filmler üretilebilmektedir, bu yüzden ince film güneş hücreleri olarak da bilinmektedir. Bunlar, Amorf silisyum (a:Si), Kadmiyum Tellür (CdTe), Bakır İndiyum Galyum Diselenid (CIGS) güneş hücreleridir. Genellikle birinci nesil güneş hücrelerine göre daha ekonomik olup verimlilik değerleri daha düşüktür (Chopra ve diğerleri, 2004).

### 2.4.3 Üçüncü nesil güneş hücreleri

Silisyum temelli güneş hücrelerinin üretim aşamasındaki süreçlerin karmaşık olması ve yüksek maliyetleri, 2. nesil güneş hücrelerinin ise daha ekonomik olmasına rağmen düşük verimliliklerine alternatif olarak düşük maliyetli yüksek verimli güneş hücreleridir. Nano kristal güneş hücreleri, organik güneş hücreleri, DSSC'ler, tandem güneş hücreleri ve perovskit güneş hücreleri umut vaat eden fotovoltaik teknolojiler olarak bu sınıfta yer almaktadır. Üretim aşamasının kolay olması, esnek ve geniş alanlara işlenebilmeleri, ham maddelerinin bol ve ekonomik olması başlıca avantajlarıdır (Yan ve Saunders, 2014). Organik malzemeler ile donör-akseptör moleküllerin yük transferindeki yüksek verimlerin kaynağı olarak iletken polimerlerin keşfi ile başlar. Organik güneş hücresi teknolojilerinde; boyalar, pigmentler ve sıvı kristaller gibi malzemeler kullanılmaktadır (Sarıçiftçi ve diğerleri, 1992).

1991 yılında Gratzel ve O'regan'ın DSSC çalışmalarıyla bu alanda ciddi bir ilerleme kaydedilmiştir (**O'regan ve Gratzel, 1991**). Bu çalışmada, yarı iletken malzeme olarak gözenekli (mezoporoz) yapıdaki titanyum dioksit ( $TiO_2$ ), foto sensör olarak ise rutenyum temelli bir boya kullanılarak %7'den fazla bir verim ulaşıldığı bildirilmiştir. DSSC'lerdeki en önemli özellik oldukça büyük yüzey alanına sahip gözenekli yarı iletken ( $TiO_2$ ) tabakanın kullanılıyor olmasıdır. Yüzey alanının artışı güneş hücresinin verimini önemli oranda arttırmaktadır.

Popüler bir teknoloji haline gelen fotovoltaiik teknolojisinin evriminde 2009 yılına gelindiğinde DSSC'lerde fotosensör olarak perovskit adlı bir malzeme kullanılmış ve %3,8 verim rapor edilmiştir (**Kojima ve diğerleri, 2009**). Bu çalışma ile fotovoltaiik ailesine katılan perovskit, güneş hücrelerinde düşük maliyet, yüksek verimlilik, üretim sürecinin basitliği, yüksek soğurma katsayısına sahip olması gibi umut vaat eden özellikte bir malzeme olarak ilgileri üzerine çekmiştir. Literatürde organo metal halojenür ışık soğurucu olarakta anılan perovskit, optiksel olarak yüksek soğurma karakteristiği sergilemektedir ve dengeli bir yük taşıma özelliğine sahip aynı zamanda difüzyon uzunluğu büyük bir malzemedir (**Zhang ve diğerleri, 2016**).

## 2.5 Perovskit Güneş Hücreleri

Adını Rus mineral bilimci Lev Aleksevich Perovski tarafından alan perovskit; inorganik oksit perovskit, alkali halojenür perovskit, organo metal halojenür perovskit olarak gruplara ayrılmaktadır (**Saparov ve Mitzi, 2016**). Güneş hücresi çalışmalarının büyük kısmında organo metal halojenür perovskit yapısı kullanılmaktadır. Perovskit molekülü,  $ABX_3$  yapısında olup inorganik perovskit için A; +2 değerlikli Berilyum (Be), Magnezyum (Mg), Kalsiyum (Ca) gibi periyodik cetvelin 2A grubu elementlerinden, B; Titanyum (Ti), Kalay (Sn) gibi +4 değerlikteki elementlerden oluşur. X ise oksijeni simgelemektedir. Alkali halojenür perovskit için A; alkali metaller olarak da bilinen periyodik cetvelin 1A grubu elementlerinden, B; ara geçiş metallerinden olan Kurşun (Pb) ve Kalay (Sn), X; Klor (Cl), Brom (Br), İyot (I) gibi periyodik cetvelin 7A grubu elementlerinden oluşur. Alkali halojenür perovskit'ten farklı olarak A katyonu 1A grubu alkali metaller dışında Hidrojen (H) ve Karbon (C) atomlarının bir metale bağlı olduğu bileşiklerin oluşturduğu perovskit yapısı ise organo metal halojenür perovskit olarak adlandırılır (Metil Amonyum,  $CH_3NH_3^+$ , MA ve Formamidinyum,  $CH(NH_2)_2^+$ , FA).  $CH_3NH_3PbX_3$  (X=Br ve I) Perovskit yapısının

boya duyarlı güneş hücrelerinde kullanıldığı çalışmada %3,8 verimlilik elde edilmiştir (**Kojima ve diğerleri, 2009**). Klasik boya duyarlı güneş hücrelerine kıyasla bu verim değeri düşük kalmaktadır ancak 2011 yılında kuantum nokta güneş hücrelerinde yine duyarlaştırıcı olarak kullanılan metil amonyum kurşun iyodür (MAPbI<sub>3</sub>) yapısı ile %6,5 verimlilik değeriyle bir sıçrama yaşanmıştır (**Im ve diğerleri, 2011**). 2012 yılına gelindiğinde verimlilik değeri %9,7 ye ulaşmıştır, bu çalışmada verimin 500 saat sabit olarak korunduğu rapor edilmiştir (**Kim ve diğerleri, 2012**). Günümüze kadar bu verimlilik değeri %20 lerin üzerine kadar çıkmış olup son olarak National Renewable Energy Laboratory verilerine göre %25,2 değerinde verim rapor edilmiştir (**Anonim, 2020**).

ABX<sub>3</sub> yapısına sahip olan perovskit kompleksinde kullanılan malzemelere göre farklı kafes yapıları oluşabilir. Bu durumu tanımlayan eşitliğe Goldschmidt tolerans faktörü denilmektedir (**Goldschmidt, 1926**). Kristal yapılarda kararlılığın bir göstergesidir ve  $t$  ile ifade edilir (Eşitlik 2.5)

$$t = \frac{r_{AX}}{\sqrt{2}(r_{BX})} \quad (2.5)$$

Burada;  $r_A$ , A katyonunun iyonik yarı çapını,  $r_B$ , B katyonunun iyonik yarıçapını,  $r_X$ , X anyonunun iyonik yarı çapını ifade etmektedir.  $t > 1$  durumunda tetragonal yapı,  $1 > t > 0,9$  aralığında kübik yapı,  $0,9 > t > 0,7$  aralığında ortorombik yapı  $0,7 > t$  durumunda ise farklı yapılar oluşur. Perovskit güneş hücrelerinde kübik form istenen yapıdır. Perovskitlerde kübik yapının elde edilmesi için gerekli şartlardan birisi de sıcaklıktır. Metil amonyum tabanlı halojenür perovskitler ilginç bir şekilde sıcaklık ile faz geçişine uğrar. Bu faz geçişleri siyah faz ( $\beta$ ) ve sarı faz ( $\gamma$ ) olarak ikiye ayrılır, sarı fazda perovskit yapısı oluşmazken siyah fazda düzenli ve kübik bir perovskit yapısı oluşur. MAPbX<sub>3</sub> yapısında moleküllerin C-N eksenini boyunca dönmesi ve organik katyonların yüksek düzeninden dolayı düşük sıcaklıklarda faz değişimi gözlemlenmiştir (**Stoumpos ve ark., 2013**). Bu durum MA iyonlarının valans bandı ve iletkenlik bandını doğrudan etkilemezken Pb-X bağ uzunluğunu, Pb-X-Pb bağ açısını etkiler. Bu bağ uzunlukları ve açıları da MA iyonlarının elektronik yapısını belirleyen yasak enerji bant aralığının değişmesinde önemli bir role sahiptir (**Poglitsch ve Weber, 1987**).

MAPbI<sub>3</sub> yapısının soğurma özellikleri hesaplandığında, nanokristal titanyum dioksit kaplı ince film üzerinde 550 nm’de soğurma katsayısı  $1,5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  olarak ölçülmüştür.

(Lee ve diğeri, 2014). Bu değer üçüncü nesil güneş hücrelerinin silisyum tabanlı güneş hücreleri ile kıyaslandığında kritik bir öneme sahiptir. GaAs, CdTe, CIGS gibi geleneksel fotovoltaik malzemelerin yasak enerji aralığı; pankromatik soğurma (görünür bölgede tüm güneş ışığının soğurulması) için ideal olan 1,1 eV ile 1,4 eV arasında değişkenlik göstermektedir (Jean ve diğeri, 2017). MAPbI<sub>3</sub>'ün bant aralığı; UV foto elektron, UV-visible, IPCE ölçümlerine göre 1,5-1,55 eV aralığında ölçülmüştür (Baikie ve diğeri, 2013; Kulkarni ve diğeri, 2014; Hao ve diğeri, 2014). Bu sonuç geleneksel fotovoltaik malzemelere benzer özellikler göstermektedir ancak bant aralığını daha uzun dalga boylarında soğurmayı arttıracak şekilde ayarlamak gereklidir (Kim ve diğeri, 2012). MA ile diğeri organik katyonların yer değiştirdiği bir yaklaşıma göre: ABX<sub>3</sub> yapısındaki A organik katyonları bant aralığını ayarlayabilir çünkü A-X bağ uzunluğu ve bağ açısı değiştirilebilir (Geng ve diğeri, 2014). Örneğin MA ile FA yer değiştirdiğinde yasak enerji aralığının 0,07 eV azaldığı, absorpsiyon dalga boyunun 40 nm arttığı gözlemlenmiştir (Stoumpos ve diğeri, 2013). Bir diğeri yaklaşım ise B-X bağlarının direk değiştirilmesidir, MAPbI<sub>3</sub> perovskitinde Pb yerine Sn kullanıldığı zaman yasak enerji aralığı 1,55 eV'den 1,17 eV'ye düşer. Bu şekilde kalay ve kurşunun farklı oranlarına göre yasak enerji aralığı ayarlanabilir. Her iki durumda da Pb ve Sn tabanlı perovskit malzemeler soğurma özellikleri ve yasak enerji aralıkları ile yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinde umut vaat eden adaylardır (Umebayashi ve diğeri, 2003). Son zamanlarda ise katyon değişimi ile ilgili yapılan çalışmalarda, üçlü katyon perovskit güneş hücrelerine olan ilgi artmaktadır. Üçlü katyon perovskit güneş hücrelerinde MA ve FA katyonlarına ek olarak Cs atomu kullanılmaktadır. Bu karışımın kullanılmasındaki temel sebeplerin başında MAPbI<sub>3</sub> yapısında güneş hücre verimliliğinin %20' yi geçememesi, neme karşı olan hassasiyeti, ışık kaynaklı tuzak durumlarının oluşumu, termal kararlılık ve faz geçişleri gibi önemli faktörler etkindir. Bu bağlamda Saliba ve arkadaşlarının üçlü katyon perovskit ile yaptığı çalışmada; maksimum %21,1 verimlilikteki güneş hücresi, yaklaşık olarak %15 kayıpla %18 verimlilik değerini 250 saat boyunca koruduğu rapor edilmiştir (Saliba ve diğeri, 2016).

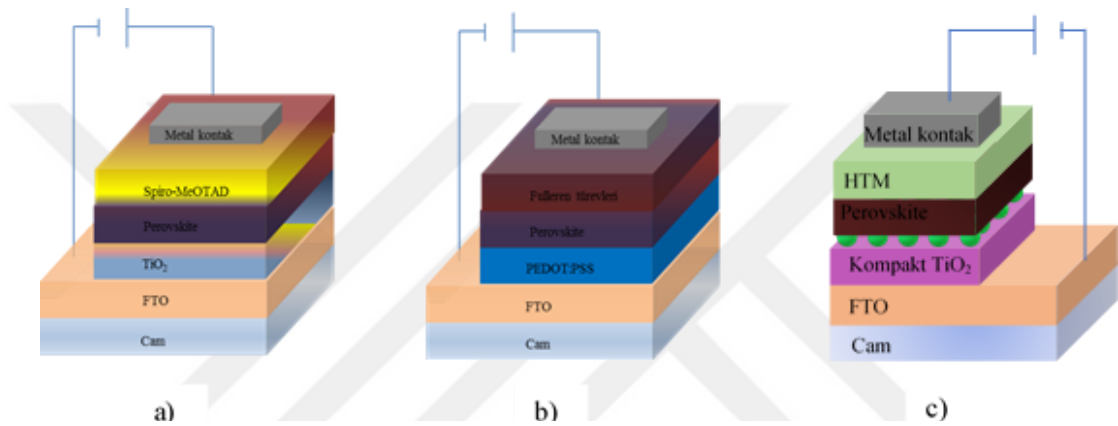
### 2.5.1 Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi

Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi; ışığın soğurulması, yük ayrımı, yük taşınımı ve yük toplanması esaslarına dayanır. Foton soğurucu katmanın saf bir yarı

iletken olması durumunda p-i-n eklem gereklidir eğer soğurucu n-tipi veya p- tipi özelliğe sahipse p-n eklem gereklidir.

### 2.5.2 Perovskit güneş hücre çeşitleri ve aygıt yapısı

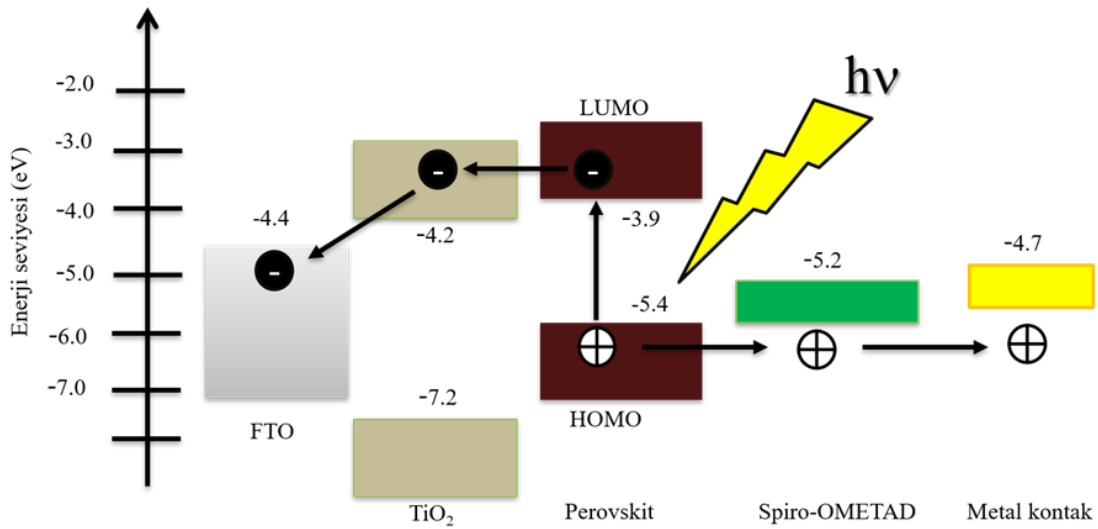
Perovskit'in benzersiz özellikleri altında iki tip yapı inşa edilebilir; şekil 2.5'te gösterildiği gibi bunlar düzlemsel ve mezo gözenekli yapıdır (Şekil 2.5). Düzlemsel yapıda n-tipi yarı iletken ile p-tipi yarı iletken arasında yerleştirilmiş katkısız perovskit yarı iletken tabakadan oluşmaktadır. Mezo gözenekli yapı; düzlemsel yapıdan ekstra olarak mezo gözenekli katmanların kullanılmasıdır.



**Şekil 2.5 :** Perovskit güneş hücrelerinde a) düzlemsel n-i-p yapı b) düzlemsel p-i-n yapı c) mezoskopik yapı

Mezo gözenekli  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  en çok kullanılan malzemelerdir (**Guarnera ve diğerleri, 2015**). Mezo gözenekli yapının kullanıldığı çalışmalarda elektronun difüzyon uzunluğu arttırıldığı rapor edilmiştir (**Edri ve diğerleri, 2014**). Düzlemsel n-i-p yapının konfigürasyonu; FTO/n-tipi malzeme/Perovskit/p-tipi malzeme/Metal kontak şeklinde ise bu yapı geleneksel güneş hücresi olarak adlandırılır. Burada FTO; Flor katkılı kalay oksit (Fluorine doped tin oxide), n-tipi malzeme; elektron taşıyıcı malzeme (ETM) olarak görev alır, genelde  $TiO_2$ ,  $ZnO$  gibi geçiş metal oksitlerdir. P-tipi malzeme; hol taşıyıcı malzeme (HTM) olarak bilinir ve genellikle 2,2',7,7'-tetrakis-(N,N-di-4-metoksifenilamino)-9,9'-spirobifluoren (spiro-Me-OTAD) kullanılmaktadır. Yükleri toplamak için ise üst kontak olarak HTM ile uygun iş fonksiyonlu metallere olan, altın (Au), gümüş (Ag), alüminyum (Al) kullanılmaktadır. Devrik perovskit güneş hücresi konfigürasyonu ise; FTO/p-tipi malzeme/Perovskit/n-tipi malzeme/Metal kontak şeklindedir. Burada yaygın olarak p-tipi malzeme poly 3,4-ethylenedioxythiophene:polystyrene sulfonic acid (PEDOT:PSS) ve n-tipi malzeme olarak fullerene türevleri kullanılabilir. Güneş ışığının hücreye çarpması sonucu

perovskit katman uyarılır ve eksiton oluşur, eksiton yapı içerisinde başka bir enerji seviyesi ile karşılaşınca kadar hareket eder, bu farklı enerji seviyeleri yapı içerisindeki tuzak enerji seviyeleri veya bir ara yüzey olabilir. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi  $\text{TiO}_2$  ve Spiro Me-OTAD’ın kullanıldığı bir yapı göz önüne alınırsa, eksiton  $\text{TiO}_2$  veya Spiro Me-OTAD ile karşılaşınca elektronlar ve boşluk olarak ayrılır, elektronlar  $\text{TiO}_2$  üzerinden taşınarak FTO kaplı elektrottan yük toplanır, boşluklar ise Spiro Me-OTAD üzerinden hareket eder ve metal kontakta toplanır bu şekilde yükler elektrotlara taşınır ve kontaklar aracılığıyla toplanıp, devre tamamlanmış olur (Şekil 2.6). Saf bir yarı iletkendeki valans bandı ve iletkenlik bandı yapısından farklı olarak En yüksek dolu moleküler orbital, HOMO (high occupied molecular orbital), ve en düşük boş moleküler orbital, LUMO (low unoccupied molecular orbital), enerji seviyeleri bulunmaktadır. Organik malzemelerde atomik orbitallerin örtüşmesi sonucu oluşan bu enerji seviyeleri yarı iletkendeki valans bandına karşılık HOMO, iletkenlik bandına karşılık ise LUMO enerji seviyesi karşılık gelir. Elektronların hareketi LUMO enerji seviyesinden olurken, boşlukların hareketi HOMO enerji seviyesinden olmaktadır. Bu enerji seviyeleri aygıt konfigürasyonu belirlenirken büyük bir önem arz etmektedir.

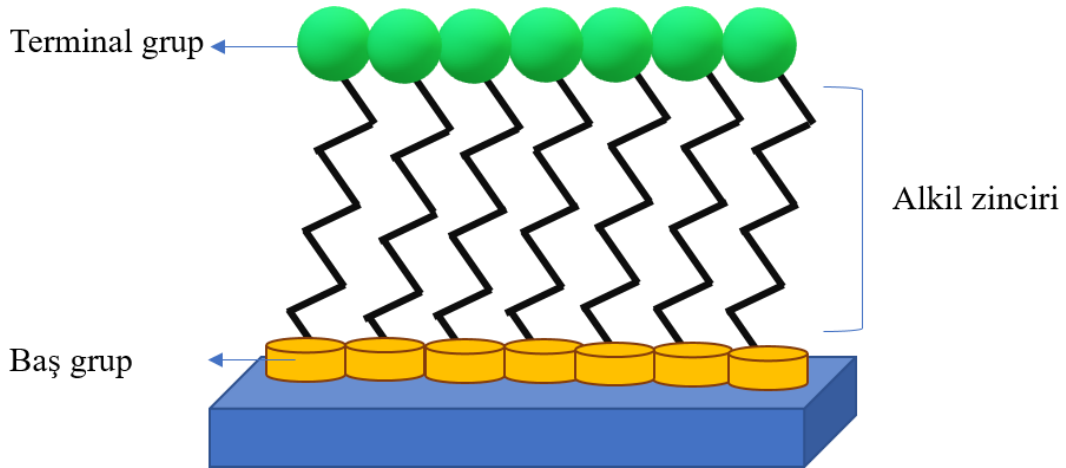


Şekil 2.6 : Perovskit güneş hücresinin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

## 2.6 Kendiliğinden Dizilen Tek Tabaka Moleküller (Self Assembled Monolayer, SAM)

SAM molekülleri diyot, led, oled ve güneş hücresi gibi elektronik uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Tarihçesine bakıldığında ilk olarak organik tek katmanları oluşturmak için Langmuir tarafından keşfedilmiştir (Langmuir, 1920). Bu yöntemde bir alttaş üzerine moleküller fiziksel yollar ile dizilmiştir ancak bu dizilimin fiziksel olarak yapılmasından dolayı molekül ve alttaş arasındaki bağlar çok zayıf olmaktadır (Decher, 1992). Elektronik bir aygıt üzerinde ise ilk olarak bir diyot uygulamasında kullanılmıştır. Bu çalışma, donör bir grubun akseptör bir gruba kimyasal bağ ile tutunmasını sağlayarak HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki bariyeri azaltarak elektronik iletimin bir yönden diğerine daha kolay olmasını gerçekleştirmiştir (Aviram ve Ratner, 1974).

SAM molekülleri; alttaş yüzeyine kimyasal bağ ile tutunan baş grup, zincirler arası van der Waals etkileşimlerine yardımcı olan alkil zinciri, moleküle karakteristik özelliğini kazandıran, farklı fonksiyonel gruplarla değiştirilebilen terminal grup başka bir deyişle yüzey grubu, olmak üzere üç kısımdan oluşur (Aswal ve diğerleri, 2006). Şekil 2.7 de SAM molekülü şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Sam molekülünün şematik gösterimi.

Güneş hücresi çalışmalarında SAM'lar tutunduğu yüzeyde kalıcı bir dipol kuvvet oluşturarak malzemenin enerji seviyesini değiştirip yük taşıyıcıların aşması gereken enerji bariyerini azaltarak aygıt performansında olumlu gelişmeler sağlamaktadır. N-i-p yapı perovskit güneş hücrelerinde SAM olarak 4-amino benzoik asidin kullanıldığı bir çalışmada, n-tipi malzeme olarak mezo gözenekli TiO<sub>2</sub>'nin yüzeyindeki tuzak

seviyeleri pasifize edilerek aygıt performansında %10'luk bir iyileştirme yapıldığı rapor edilmiştir (Li ve diğerleri., 2015). Benzer şekilde p-i-n konfigürasyonu ile ITO altaş üzerine modifiye edilen SAM malzemeleri dolun faktörü, açık devre gerilimi, akım yoğunluğu ve güç dönüşüm verimliliğini iyileştirdiği gibi, p-tipi malzeme olarak kullanılan PEDOT:PSS'e alternatif olarak kullanılabilceği açıkça gösterilmiştir (Yalçın ve diğerleri, 2019).



### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Materyal

##### 3.1.1 Kullanılan kimyasal malzemeler

Boşluk taşıyıcı malzeme olarak kullanılan PEDOT:PSS ticari olarak Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Perovskit çözeltisini hazırlamak için %99 saflık derecesine sahip kurşun iyodür ( $PbI_2$ ), %99,9 saflıkta susuz dimetilformamid (DMF,  $C_3H_7ON$ ), %99,9 saflıkta dimetilsülfoksit (DMSO,  $C_2H_6OS$ ) Sigma-Aldrich firmasından, %99,5 saflıktaki metil amonyum iyodür Lumtec firmasından, %99,9 saflıktaki izopropil alkol ( $C_3H_8O$ ) VWR firmasından temin edilmiştir. Elektron taşıyıcı katman olarak %99,5 saflıktaki 61 karbonlu (6,6)-fenil bütirik asit metil esteri ( $PC_{61}BM$ ) Lumtec firmasından, çözücüsü olarak kullanılan %100 saflıktaki klorobenzen ( $C_6H_5Cl$ ) VWR firmasından temin edilmiştir. SAM malzemelerinde çözücü olarak kullanılan %99,8 saflıktaki toluen ( $C_7H_8$ ) VWR firmasından temin edilmiştir. Alttaş olarak kullanılan 15-20 ohm/sq ITO'lar Kintech firmasından temin edilmiştir.

##### 3.1.2 Kullanılan ekipmanlar

**Ultrasonik Su Banyosu:** Alttaşların yüzey temizliği ve SAM çözeltilerinin hazırlanmasında KUDOS-SK2210HP marka ultrasonik su banyosu kullanılmıştır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1 :** Kudos-sk2210hp marka ultrasonik su banyosu.

**UV Ozon Temzileyici:** 254 nm dalga boyuna sahip uv ışık ile ITO yüzeyindeki organik kirlilikleri uzaklaştırmak için kullanılan cihazdır (Şekil 3.2). 200 nm civarında, O<sub>2</sub> molekülü bağını kopararak iki tane radikal O atomuna ayrılır ve ozon (O<sub>3</sub>) üretilir, alttaş üzerindeki organik bileşikler O<sub>3</sub> ile bağ yaparak yüzeyden uzaklaşır. Bu şekilde ITO yüzeyi daha hidrofilik bir hale gelmiş olur.



**Şekil 3.2 :** Jeligh company 342-220 marka uv ozon temizleme cihazı.

**Isıtcılı Manyetik Karıştırıcı:** Perovskit çözeltisinin hazırlanması ve kaplanan filmlerin tavlama işlemi için VWR-VMS-07 marka ısıtcılı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Ayrıca PC<sub>61</sub>BM çözeltisinin hazırlanması için de aynı karıştırıcı

kullanılmıştır. PEDOT:PSS kaplı filmlere yapılan ısıl işlem için MTOPS HSD150-03P marka ısıtıcı kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Vwr-vms-07 ve mtops hsd150-03p ısıtıcılı karıştırıcı.

**Dönel Kaplama Cihazı:** ITO alttaş üzerinde film elde etmek için kullanılan cihazdır. Merkez kısmında boşluk olan hareketli numune standı üzerine koyulan alttaş dönme esnasında fırlatmayı engellemek için vakum ile sabitlenir ve üzerine çözelti formundaki malzeme damlatılarak arzu edilen devirde döndürülür. Filmin kalınlığı, cihazın dönme hızına, çözeltinin viskozitesine, hareketli veya durgun kaplama yapılmasına göre değişkenlik göstermektedir. Filmlerin kaplamalarında POLOS-SPİN-150i marka dönel kaplama cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Polos-spin-150-i marka dönel kaplama cihazı.

**Glove Box:** Eldivenli kabin olarak da bilinen bu cihazda oksijen ve neme karşı hassasiyeti olan malzemelerin muhafaza edilmesi, kaplanması, ısıl işlemlerin yapılması sağlanmıştır. INNOVATIVE TECHNOLOGY marka cihazın çalışma gazı azot olup güneş hücresi üretimi çalışmalarında kullanılmıştır. Oksijen ve nem seviyesi 1 ppm altında olup bağıl nem %20-25 aralığında seyretmiştir (Şekil 3.5).



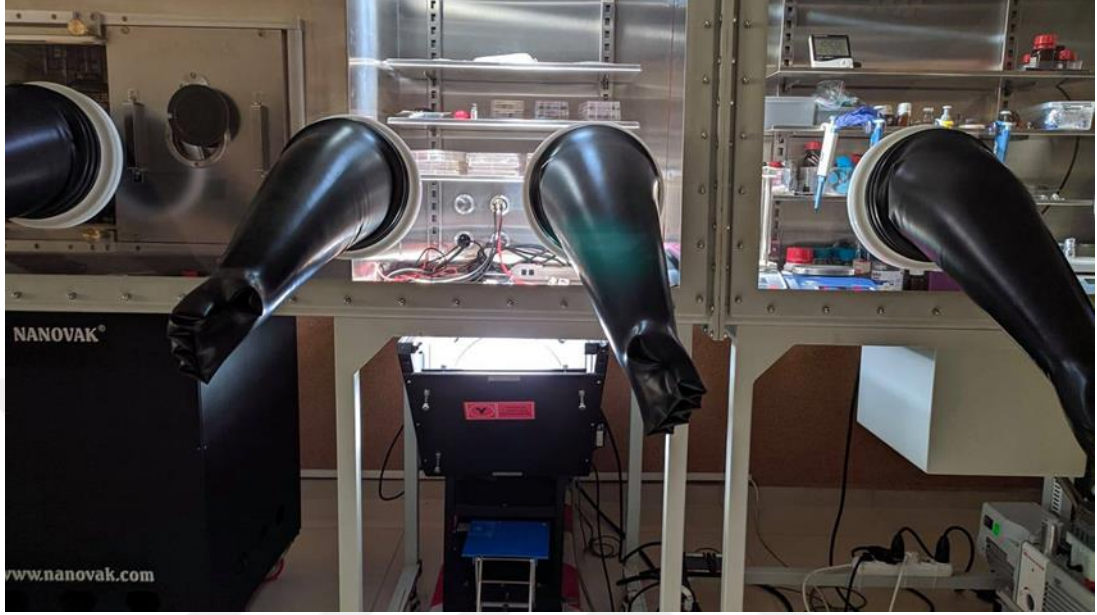
Şekil 3.5 : Innovative technology marka glovebox.

**Fiziksel Buhar Biriktirme Cihazı (PVD):** Güneş hücresinden elektriksel ölçümleri almak adına metal kontakların film olarak kaplandığı sistemdir. Metallerin yüksek vakum altında süblimleştirilmesi esasına dayanır. Süblimleştirilecek malzeme bir pota veya rezistans içerisine koyularak elektrotlar arasına yerleştirilir. Pota üzerinden akım geçirilerek malzemenin süblimleşmesi sağlanır, bu şekilde istenilen kalınlıkta filmler oluşturulur. Üretilen aygıtlardaki metal filmler Nanovak marka termal buharlaştırma cihazı ile oluşturulmuştur (Şekil3.6).



Şekil 3.6 : Fiziksel buhar biriktirme cihazı.

**Güneş Simülatörü:** Yapay güneş olarak da nitelendirilen bu cihaz ile üretilen aygıtların ışık altındaki performanslarını incelemek için kullanılmıştır. Güneş hücrelerinin tüm ölçümleri OAI Trisol AAA model 1000 watt Xenon ışık kaynağına sahip cihaz ile alınmıştır (Şekil3.7).



Şekil 3.7 : Oai trisol aaa güneş simülatörü.

**Akım Gerilim Kaynağı:** Güneş hücresinin akım-gerilim eğrisi hakkında data veren bir cihazdır. Üretilen aygıtların elektriksel olarak ölçümleri keithley2400 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.8).



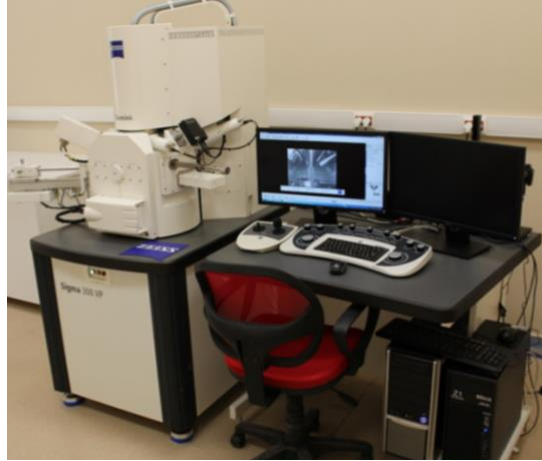
Şekil 3.8 : Keithley 2400 akım gerilim kaynağı.

**Kontak Açı Ölçüm Cihazı:** Yüzey gerilimi ve serbest yüzey enerjisi gibi ölçümler için kullanılmaktadır. Numune üzerine damlatılan suyun yayılma durumuna göre yüzeyin hidrofilik ya da hidrofobik özellik sergilediğini göstermektedir. SAM molekülleri alttaş yüzeyine tutunduktan sonra yüzey hakkında bilgi edinmek için ölçümler Biolin Scientific Theta Lite TL101 marka cihaz tarafından yapılmıştır (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9 :** Biolin scientific theta lite tl 101 marka kontak açı cihazı.

**Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM):** Vakum altında yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronların, numune üzerine gönderilerek numuneden saçılan elektronların dedektör aracılığıyla toplanması sonucu görüntü elde edilmesini sağlayan cihazdır. Üretilen güneş hücrelerinin SEM görüntüleri Katip Çelebi Üniversitesi bünyesinde bulunan Carl Zeiss 300VP ile alınmıştır (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10 :** Carl zeiss 300 vp marka taramalı elektron mikroskobu.

**Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM):** Malzemenin yüzey topografisi hakkında bilgi veren bir taramalı elektron mikroskobudur. Uç kısmında iğne şeklinde tip adı verilen bir malzemenin bütün halinde olduğu çubuğun (kantilever) yüzeyi taraması esasına dayanarak çalışır. Kantileverin arka kısmına bir lazer ışık demeti gönderilir, yüzeyin morfolojisine göre tip hareket eder ve lazerin konumunu değiştirir. Bu değişimde bir detektöre aktarılarak yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilebilir. Perovskit güneş hücrelerinin AFM görüntüleri NT-MDT Ntegra Solaris model cihaz ile alınmıştır (Şekil 3.11).

**Kelvin-Probe Kuvvet Mikroskobu (KPFM):** Atomik kuvvet mikroskobuna entegre bir cihaz olup yüzeyin potansiyeli hakkında bilgi vermektedir. Üretilen güneş hücrelerinin kontak potansiyel farklarının ölçümleri Selçuk Üniversitesi bünyesinde bulunan NT-MDT Ntegra Solaris ile alınmıştır (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11 :** Nt-mdt ntegra solaris marka atomik kuvvet mikroskobu.

**Gelen Fotonun Akıma Dönüşüm Verimliliği (IPCE):** Güneş hücresi üzerine düşen fotonun dalga boyuna karşılık olarak ne kadarının akıma katkı sağladığını karakterize eden bir cihazdır. Üretilen aygıtların ölçümleri ENLITECH QE-R marka cihaz ile yapılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : Enlitech qe-r marka IPCE cihazı.

**X-ışını Kırınım Cihazı (XRD):** Katı malzemelerin kristal yapısı hakkında bilgi veren bir cihazdır. X-ışınlarının dalga boyu  $1-100 \text{ \AA}$  aralığındadır ve katı malzemeyi oluşturan atomlar arası mesafede bu aralıkta olduğundan kristale gelen ışınlar atomlardan elastik olarak saçılarak kırılırlar. Bu kırınım Bragg yasasına göre analiz edilerek kristal hakkında yorum yapılmaktadır. Perovskit kristal yapı tayini Panalytical Empyrean marka cihaz ile yapılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : Panalytical empyrean marka XRD cihazı.

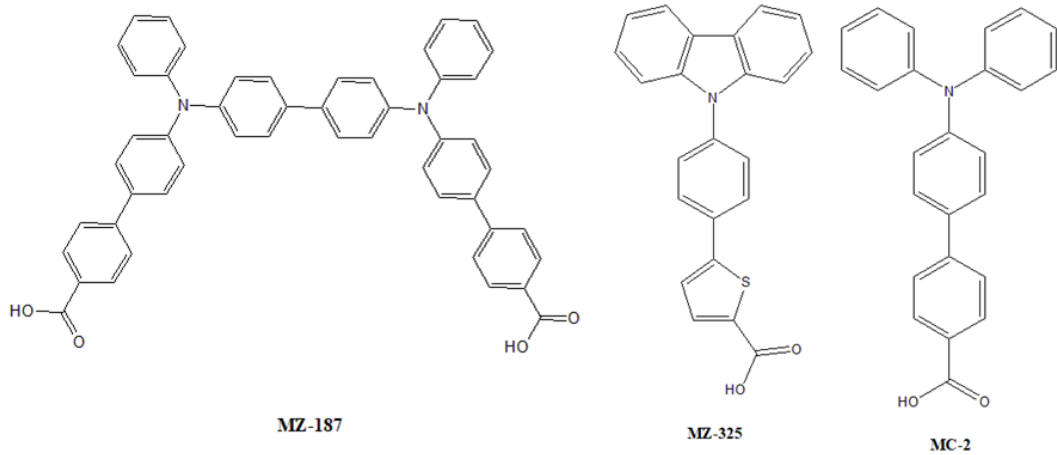
## 3.2 Metod

### 3.2.1 ITO alttaşların hazırlanması

30x30 cm plaka halindeki ITO'lar 1,5 x 1,5 cm boyutlarında kesildikten sonra aktif alanı belirlemek ve kısa devre olmasını engellemek adına iletken tarafın belirli ölçüdeki kısmını kimyasal olarak aşındırılır. Bu işlem esnasında yüzeyde oluşan kirlilikleri gidermek için deterjanlı su ile yüzey temizlenir ve sırasıyla ultra saf su, aseton ve izopropil alkol ile 20şer dk ultrasonike edilir.

### 3.2.2 Sam çözeltilerinin hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan moleküller 4',4'''-([1,1'-bifenil]-4,4'-diil bis(fenil azanedil))bis((1,1'-bifenil]-4-karboksilik asit)), 5-(4-(9H-karbazol-9-il)fenil)tiyofen-2-karboksilik asit, 4'-(difenil amino)-[1,1'-bi fenil]-4-karboksilik asit olup sırasıyla (MZ-187, MZ-325, MC-2) olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.14). SAM moleküllerinin tamamı  $1 \times 10^{-4}$  derişimde hazırlanmıştır. Çözücü olarak toluen kullanılmıştır. Temizlenen alttaşlar SAM çözeltileri içerisine daldırılmadan önce 20 dk UV-Ozon temizleyicisinde bekletilmiştir. Gece boyu çözelti içerisinde bekletilen alttaşlar çıkarıldıktan sonra yüzeye tutunmayan fazlalık moleküllerin uzaklaştırılması için toluen içerisinde 30 dk ultrasonike edilmiş ve perovskit çözeltisini kaplamak için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.14 : Sam moleküllerinin kimyasal yapısı.

### 3.2.3 PEDOT:PSS filmlerin kaplanması

Ticari olarak temin edilen PEDOT:PSS çözeltisi temizlenen alttaşlar üzerine dönel kaplama cihazı ile 4500 rpm'de 1 dk boyunca kaplanır ve 120 °C'de 30 dk boyunca ısı işleme tabi tutulur.

### 3.2.4 Perovskit çözeltisinin hazırlanması ve kaplanması

461 mg  $PbI_2$ , susuz DMF:DMSO (920  $\mu$ L : 80  $\mu$ L) içerisinde birkaç saat karıştırılmıştır. 50 mg MAI 1mL kurutulmuş İPA içerisinde birkaç saat karıştırılmıştır. ITO, PEDOT:PSS ve SAM kaplı alttaşlar üzerine perovskit kaplama işlemi dönel kaplama cihazı ile yapılmıştır. Önce  $PbI_2$  çözeltisi 80  $\mu$ L damlatılır ve 800 rpm/sn hızlanma ile 4000 rpm'e çıkılır, daha sonra dönme devam ederken 60 sn sonra hızlı fakat kontrollü bir şekilde 100  $\mu$ L MAI çözeltisinden damlatılır. MAI damlatıldıktan sonra 30 sn daha dönme devam eder, 800 rpm/sn yavaşlama ile cihazın durması beklenir. Kaplanan filmler 100 °C'deki ısıtıcı üzerinde 10 dk ısı işleme tabi tutulur ve soğumaya bırakılır. Isıl işlemde önce filmler koyu kahverengi bir renkte iken ısı işlemde sonra filmlerin rengi siyaha yakın bir hal alır.

### 3.2.5 $PC_{61}BM$ çözeltisinin hazırlanması ve kaplanması

15 mg  $PC_{61}BM$  1mL klorobenzen içinde birkaç saat karıştırılır. Daha sonra perovskit kaplı filmler üzerine damlatılan çözelti 2000 rpm'de 30 sn kaplanır. ETM'nin kaplanmasından sonra filmler metal kontak büyötmek için hazır hale getirilmiştir.

### 3.2.6 Metal kontakların kaplanması

Aygıt yapımının son aşamasında  $PC_{61}BM$  ile Ag arasındaki bariyer farkını azaltmak için yüksek vakumda ( $\sim 10^{-6}$  Torr) 20 nm Ca buharlaştırılmıştır. Daha sonra da 100 nm Ag buharlaştırılmıştır. Metal kontak buharlandırdıktan sonra aygıtların ışık altında I-V karakterizasyonu yapılmıştır.

### 3.2.7 SAM kaplı alttaşların yüzey analizi

SAM'ların ITO yüzeyine organize olup olmadığını görmek adına ITO yüzeyinin ve ITO/SAM yüzeyinin kontak açılı ölçümleri alınmıştır. Ayrıca yüzeyin enerjisinin nasıl değiştiğini görmek adına ITO ve ITO/SAM yüzeylerinin kelvin probe kuvvet mikroskobu ile ölçümleri alınmıştır.

### **3.2.8 Perovskit ince filmin yapı analizi ve görüntüleri**

Perovskit yapısının oluşup oluşmadığı hakkında bilgi sahibi olmak için X-ışını kırınım ölçümleri alınıp literatürdeki perovskit yapısı ile kıyaslanmıştır. Ayrıca perovskit tane sınırlarını ve morfolojisini görmek için SEM görüntüleri alınmıştır.



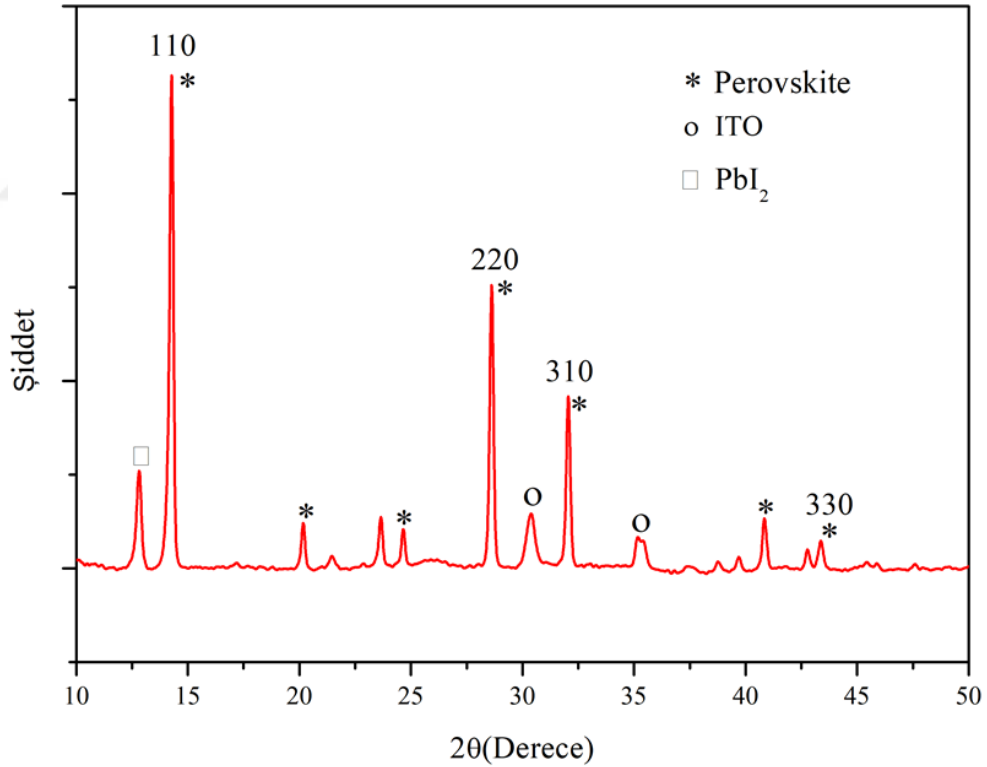


## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Perovskit Filmlerin Yapısal Analizi

#### 4.1.1 X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları

Perovskit kristal yapısını incelemek amacıyla XRD ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.1'de 14, 28 ve 41 derecedeki pikler perovskit kristal yapısına ait karakteristik pikler olarak gözlemlenmiş olup düzlem indislerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir (Zuo ve diğerleri, 2015). Perovskit yapısı dışındaki safsızlıkların pikleri de mevcut olup perovskit ince filmi ITO alttaş üzerine büyütüldüğü için ITO pikleri de belirtilmiştir (Şekil4.1).

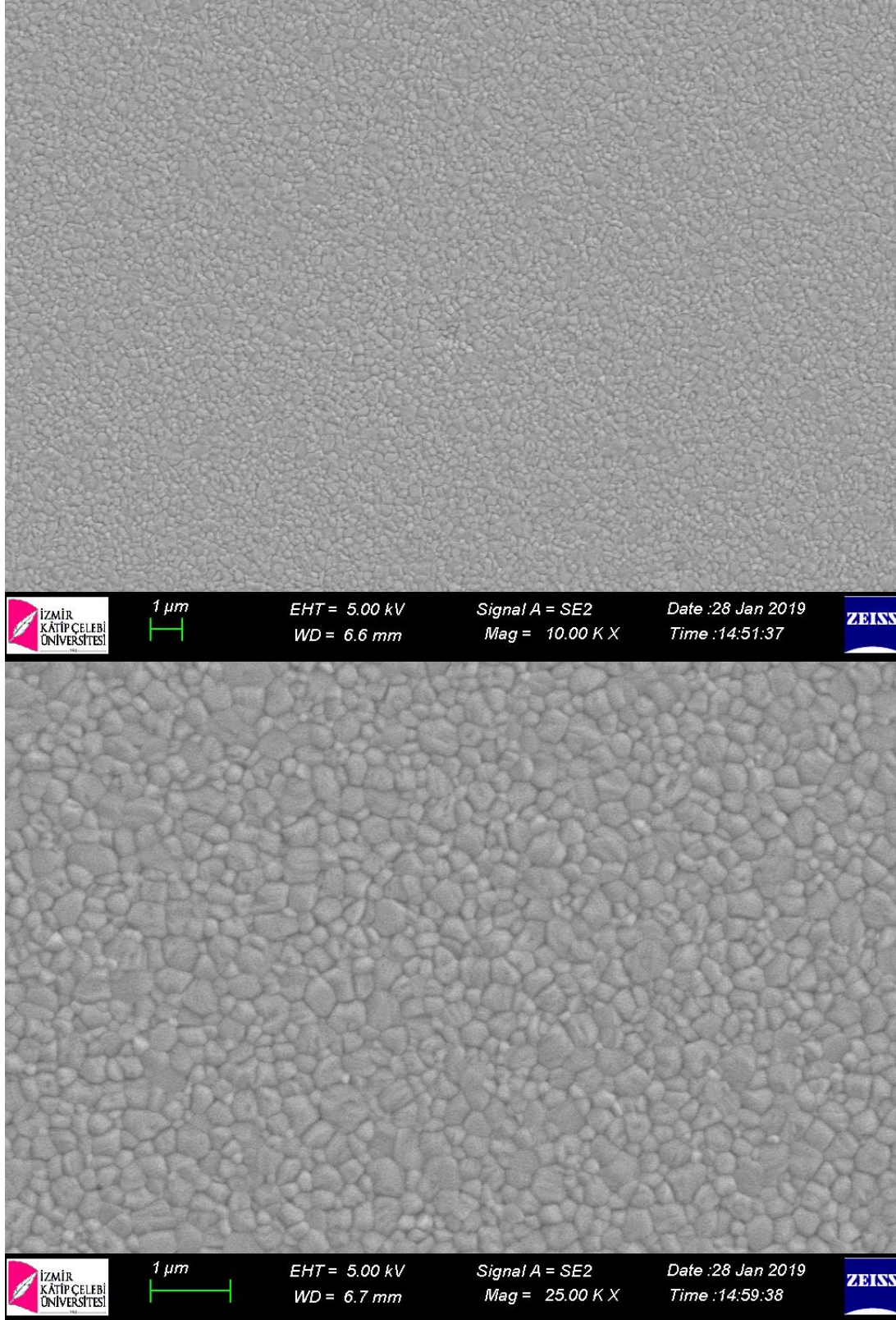


Şekil 4.1 : XRD sonuçlarının görüntüsü.

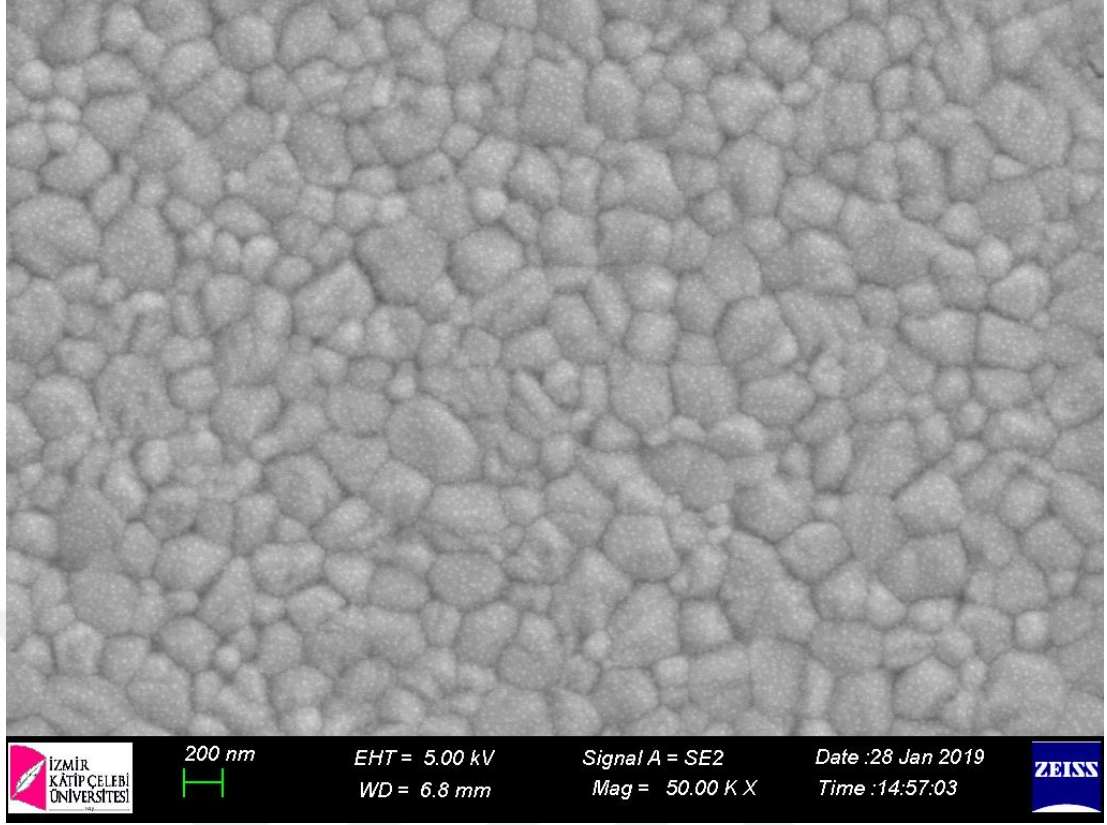
#### 4.1.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri

Perovskit ince film yüzeyinin topolojisini incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Homojen ve kompakt bir film yapısı görülmektedir ayrıca

tane sınırları net bir şekilde görüntülenmiştir (Şekil 4.2). Genel olarak tane boyutları birbirine yakın boyutlardadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.2 : 1µm ölçekli taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

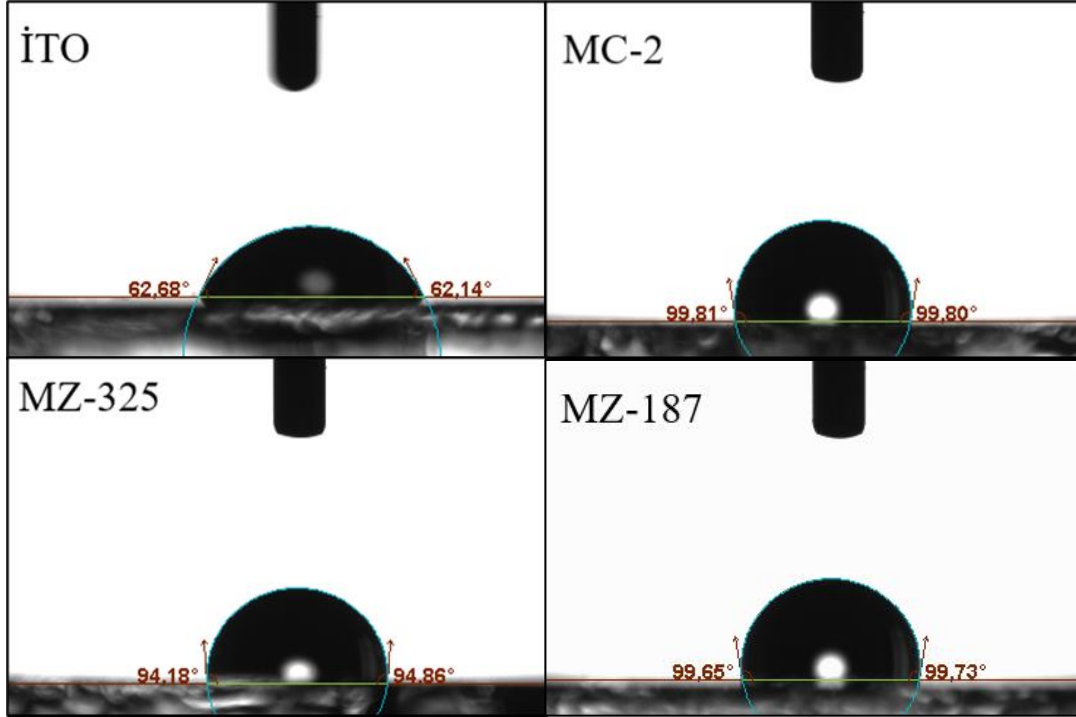


Şekil 4.3 : 200nm ölçekli taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.

## 4.2 Kendiliğinden Dizilen Tek Tabaka Moleküllerin (SAM) Yüzey Analizleri

### 4.2.1 Kontak açısı sonuçları

ITO alttaş yüzeyine organize olmuş SAM moleküllerinin yüzeyde nasıl bir etki yarattığını incelemek adına kontak açısı cihazı kullanılmıştır. Kıyas yapmak adına ITO yüzeyinin kontak açısı ölçümleri ve ITO üzerine kaplanmış SAM yüzeyinin kontak açısı ölçümleri alınmıştır. Yüzeyle yaklaşık 4µL hacminde saf su damlatılıp yüzeyde nasıl yayıldığı gözlemlenip yüzey ile kaç derecelik bir açı yaptığı ölçülmüştür. Ayrıca ölçümler SAM moleküllerinin ITO yüzeyine organize olduğu hakkında da fikir vermektedir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere ITO yüzeyine damlatılan suyun yüzeyle yaptığı açı 62° iken, SAM moleküllerinde bu değerler daha yüksek olup moleküllerin yüzeye tutunduğunun bir göstergesidir (Şekil4.4).

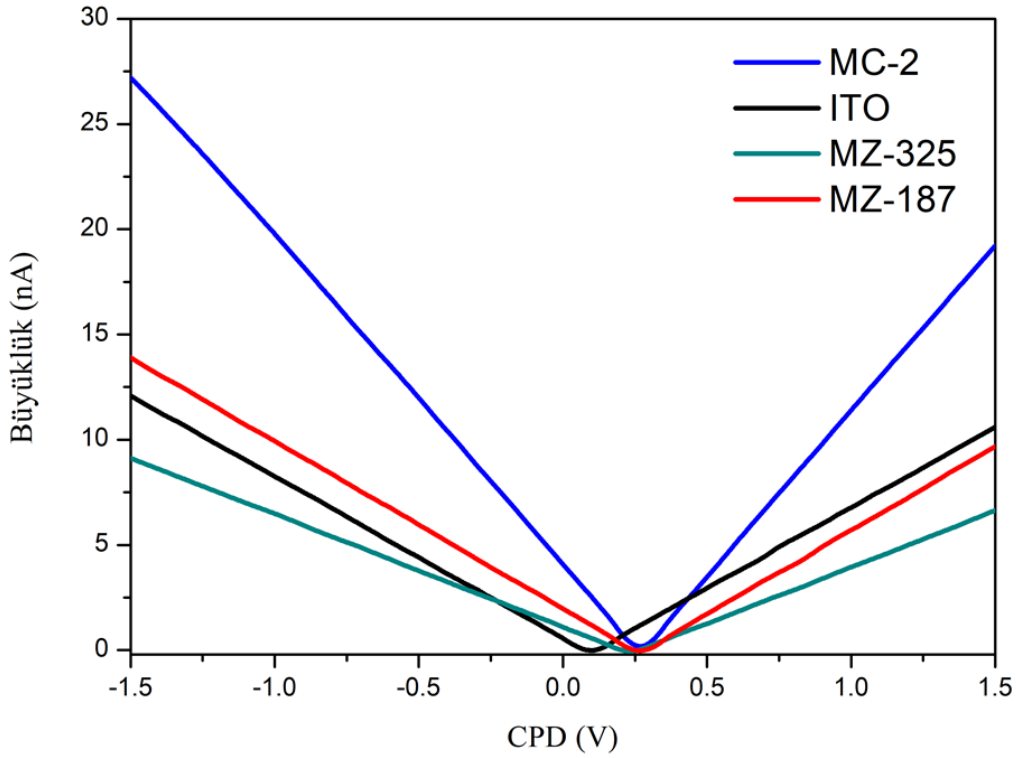


Şekil 4.4 : Kontak açısı ölçüm sonuçları.

#### 4.2.2 Kelvin probe kuvvet mikroskobu sonuçları

ITO ve İTO/SAM numunelerinin ölçümleri alınarak iş fonksiyonları hesaplanmıştır. İTO ile mikroskobun iletken ucunun arasındaki kontak potansiyel farkı 0,098V olarak ölçülmüştür. Şekil 4.5'te belirtildiği gibi MC-2, MZ-187, MZ-325 moleküllerinin kaplı olduğu alttaşların potansiyel farkları ise sırasıyla; 0,267 V, 0,269 V, 0,236 V, olarak ölçülmüştür (Şekil 4.5). Bu sonuçlarda SAM moleküllerinin İTO yüzeyine organize olup yüzeyin enerjisini değiştirdiğinin göstergesidir. Son olarak SAM'ların organize olduğu İTO alttaşların iş fonksiyonu, İTO iş fonksiyonuna göre azalmaktadır. İTO alttaşın kontak potansiyel farkı referans değer olarak kullanılıp SAM'ların dizili olduğu alttaşların iş fonksiyonu değerleri eşitliğe göre hesaplanmıştır (Eşitlik 4.1).

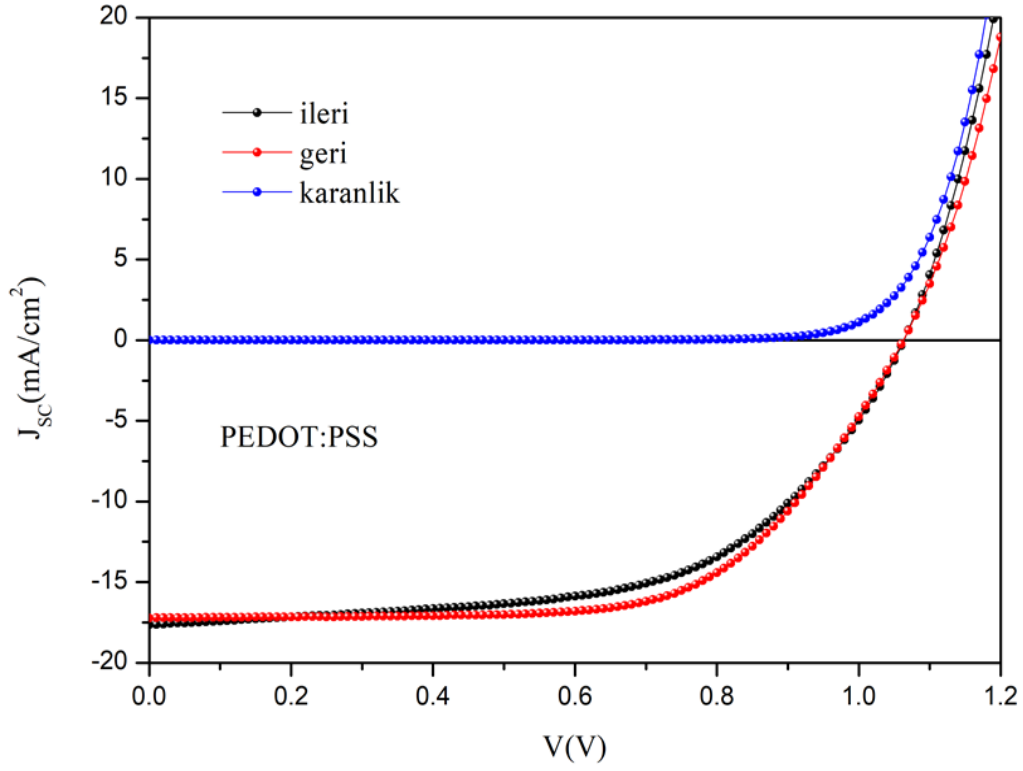
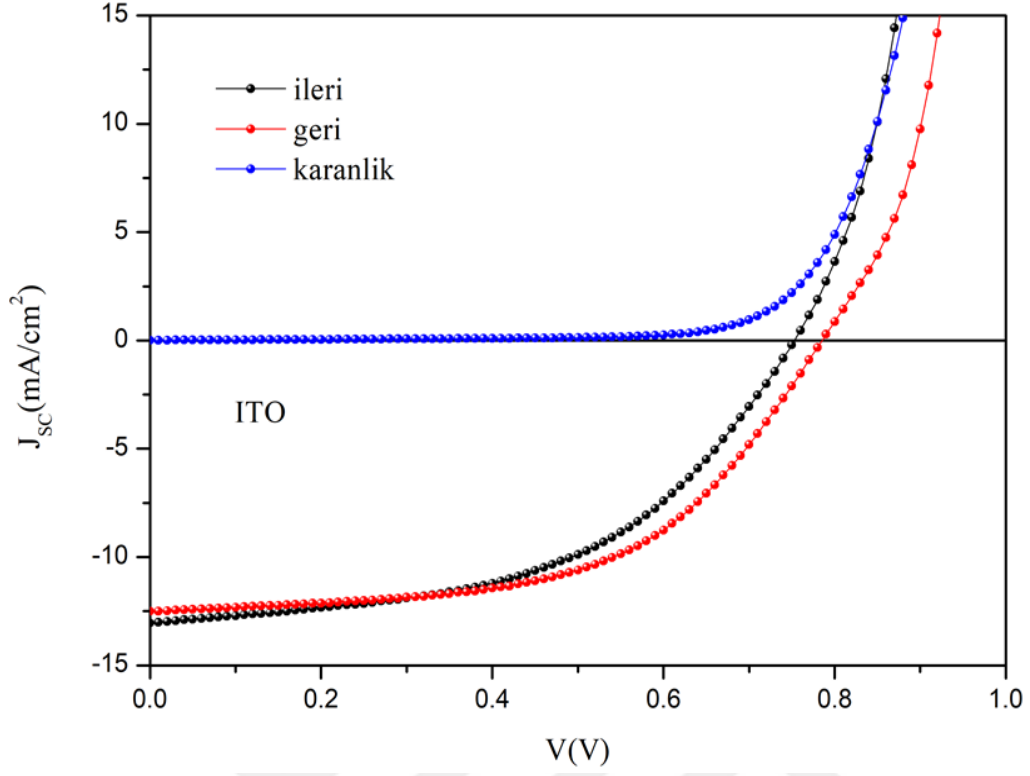
$$V_{CPD} = \frac{\phi_{numune} - \phi_{tip}}{-e} \quad (4.1)$$



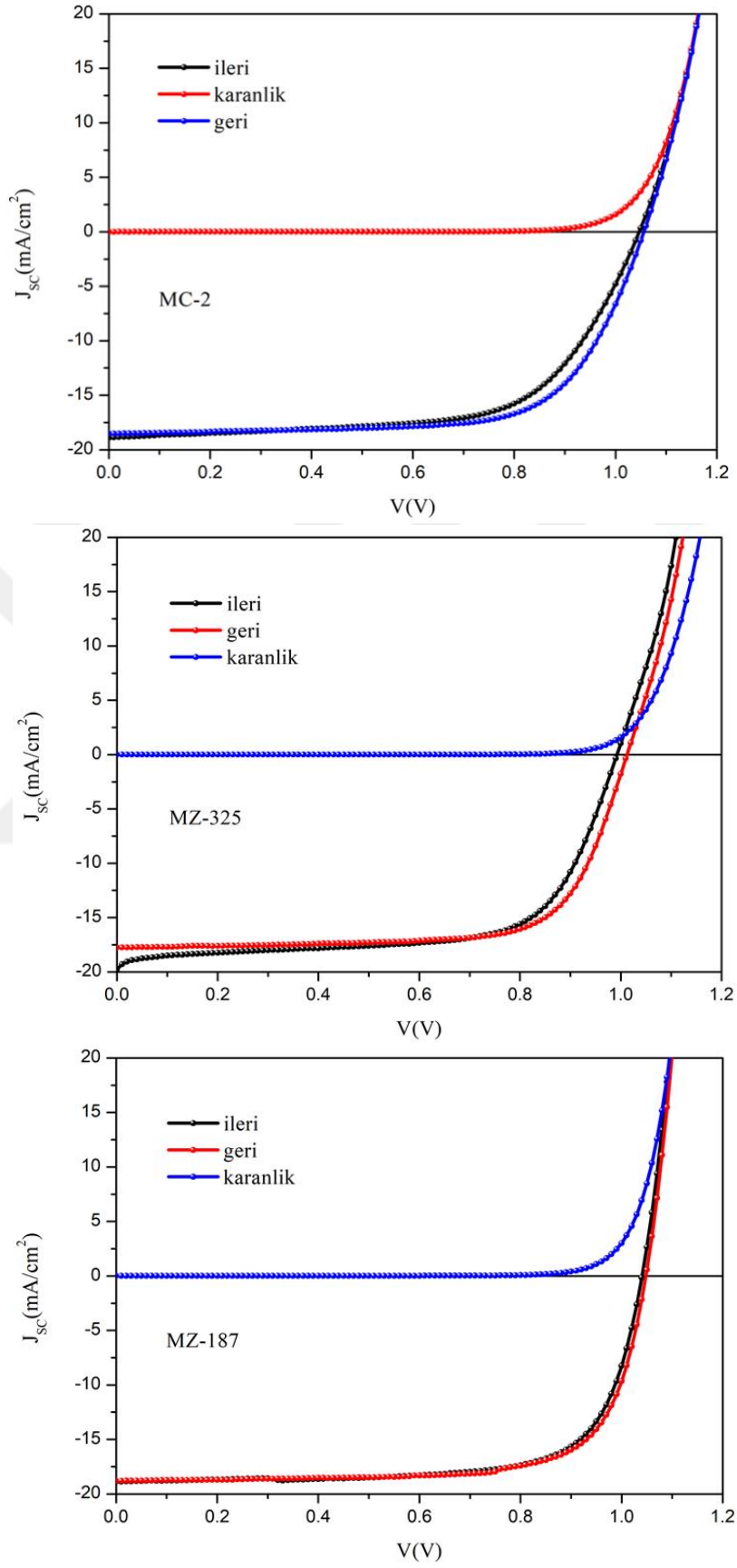
Şekil 4.5 : Kpfm ölçümlerine göre kontak potansiyeline karşılık büyüklük grafiği.

### 4.3 Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

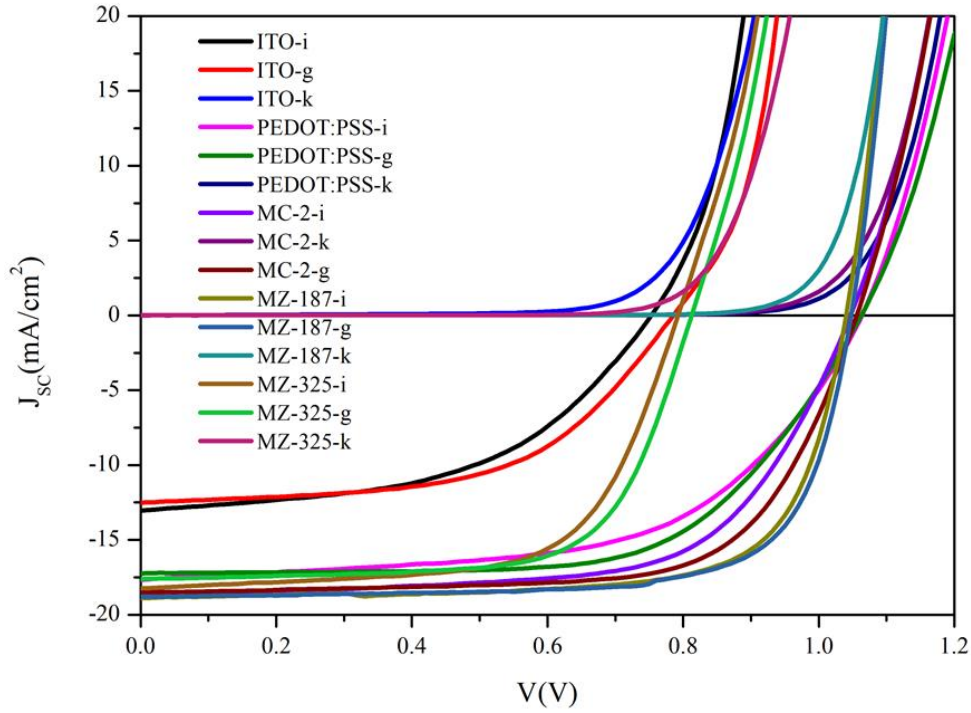
ITO/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonu, ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonu ve SAM'ların kullanıldığı ITO/SAM/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonuna sahip güneş hücrelerinin elektriksel sonuçları incelenip karşılaştırılmıştır. İleri tarama ve geri tarama durumundaki I-V eğrileri aynı zamanda karanlık altındaki I-V eğrileri, ayrıca elektriksel parametreler sonuçları çizelge olarak verilmiştir. ITO/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag ve ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonunda üretilen aygıtların ileri tarama, geri tarama ve karanlık altındaki I-V eğrileri Şekil 4.6' da verilmiştir (Şekil 4.6). ITO/MC-2/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag, ITO/MZ-325/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag, ITO/MZ-187/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonu ile üretilen aygıtların ileri tarama, geri tarama ve karanlık altındaki I-V eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir (Şekil 4.7). Ayrıca üretilen tüm aygıtların, ileri tarama, geri tarama ve karanlık altındaki I-V eğrileri ise Şekil 4.8'de verilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.6 : ITO/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag ve ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM /Ca/Ag konfigürasyonuna sahip aygıtların I-V eğrileri.



Şekil 4.7 : Kullanılan sam moleküllerine ait I-V eğrileri.



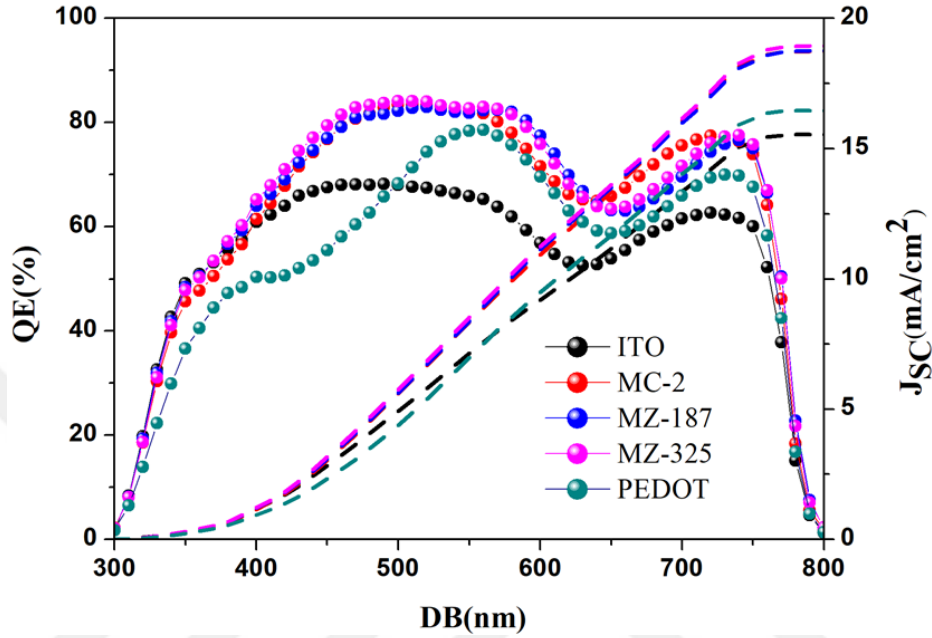
**Şekil 4.8** : Üretilen tüm aygıtlara ait I-V eğrisi.

Çizelgeye göre ITO/Perovskit/Ca/Ag konfigürasyonunda üretilen güneş hücresi ile SAM moleküllerinin kullanıldığı güneş hücreleri kıyaslandığında akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değerlerinde yaklaşık olarak %50, doluluk faktörü değerlerinde ise %25'in üzerinde bir artış gözlenmektedir (Çizelge 4.1). Bu artışların sonucu olarak güç dönüşüm verimliliklerindeki artış %100'ün üzerinde olmuştur (Çizelge 4.2). Ayrıca ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/Ca/Ag konfigürasyonuna göre üretilen güneş hücresinin SAM moleküllerinin kullanıldığı güneş hücreleri ile kıyas yapıldığında, güç dönüşüm verimliliği değerlerinin %15'in üzerinde bir artış olduğu açıkça görülmektedir. Son olarak SAM moleküllerinin hepsi aygıt performansı üzerinde olumlu etkiler yarattığı ve çalışmaların sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Üretilen güneş hücrelerinde elde edilen akım yoğunluğu değerlerini doğrulamak ve gelen fotonun yük taşıyıcısına dönüşümünü analiz etmek adına IPCE ölçümleri alınmıştır. ITO/Perovskit/Ca/Ag, ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/Ca/Ag, ITO/SAM/Perovskit/Ca/Ag aygıt yapılarının IPCE ölçümleri alınarak aygıtlardan elde edilen fotoakım değerleri analiz edilmiştir. IPCE değeri;

$$IPCE(QE)\% = \frac{I_{sc}(A)}{P(W)} \times \frac{1240}{\lambda(nm)} \times 100 \quad (4.2)$$

Formülüne göre hesaplanır ve gelen fotonun dalga boyuna bağlılığının bir göstergesidir. Burada P; gelen ışığın yoğunluk miktarını nitelerken,  $\lambda$ ; gelen ışığın dalga boyunu temsil etmektedir. IPCE ayrıca kuantum verimliği olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.9’da IPCE ve integre edilmiş akım yoğunluğu grafiği görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : En iyi sonuçların ipce grafiği

Çizelge 4.1 : Üretilen güneş hücrelerinin ileri tarama durumundaki elektriksel parametreleri.

Konfigürasyon	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)
ITO	13,1	750	50,4	4,96
ITO/PEDOT:PSS	17,7	1065	57,7	10,84
ITO/MC-2	18,9	1047	63,7	12,62
ITO/MZ-187	18,9	1041	72,7	14,27
ITO/MZ-325	19,8	992	63,7	12,49

Çizelge 4.2 : Üretilen güneş hücrelerinin geri tarama durumundaki elektriksel parametreleri.

Konfigürasyon	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)
ITO	12,52	785	55,1	5,42
ITO/PEDOT:PSS	17,2	1065	63,7	11,66
ITO/MC-2	18,5	1056	68,7	13,43
ITO/MZ-187	18,8	1048	73,3	14,44
ITO/MZ-325	17,8	1012	71,7	12,89



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında perovskit güneş hücrelerinde yük taşıyıcı katmanlar ile perovskit katmanı arasında yük transferini arttırmak için 3 farklı SAM molekülü ile ara yüzey çalışması yapılarak aygıt performanslarında iyileştirme yapılmıştır. Bu moleküller MC-2, MZ-187, MZ-325 olup ITO yüzeyi modifiye edilerek iş fonksiyonu ve yüzey potansiyelinin azalmasının yanında perovskit ile ara yüzeyindeki kusurlar da ortadan kalkmaktadır p-i-n yapıdaki perovskit güneş hücresinin güç dönüşüm verimliliği geliştirildiği bulgular ve tartışma bölümünde açıkça belirtilmiştir.

Perovskit ince filmin yapısal analizi için XRD cihazı kullanılmıştır. Analiz sonucu perovskit kristal yapısının elde edildiği sonucuna ulaşılmış ve literatür ile uyumlu olduğu desteklenmiştir.

SAM moleküllerinin ITO yüzeyine dizildiğini tayin etmek amacıyla kontak açısı ve KPFM ölçümleri alınmıştır. Kontak açısı sonuçlarına göre; hidrofilik bir yapısı olan ITO yüzeyinin, SAM moleküllerinin dizilimiyle daha hidrofobik bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. KPFM sonuçlarında kontak açısı ölçümlerini destekler niteliktedir. SAM molekülleri ITO'nun iş fonksiyonunu azaltarak perovskit ile ITO arasındaki bariyer farkını düşürmektedir, bu durumun sonucu olarak ise yeniden birleşmeye engel olarak daha fazla boşluk yük taşıyıcısı toplanıp akıma katkı sağlamaktadır.

ITO/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag ve ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag yapısındaki aygıt performansları kıyaslandığında akım yoğunluğu değeri 13,1 mA/cm<sup>2</sup>'den 17,7 mA/cm<sup>2</sup>'ye yükselmiştir. Güç dönüşüm verimliliği ise %5,42'den %11,66'ya yükselmiştir. Aynı şekilde ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag ve MC-2, MZ-187, MZ-325 molekülleri ile ITO/SAM/Perovskit/PC<sub>61</sub>BM/Ca/Ag konfigürasyonuna göre üretilen güneş hücreleri kıyaslandığında akım değeri 17,7 mA/cm<sup>2</sup>'den sırasıyla 18,5 mA/cm<sup>2</sup>, 18,8 mA/cm<sup>2</sup> ve 17,8 mA/cm<sup>2</sup>'ye yükselmiştir. Güç dönüşüm verimlilikleri ise %11,66'dan %13,43, %14,44, %12,89'a yükselmiştir. Bu sonuçlara göre SAM molekülleri ITO yüzeyini modifiye ederek aygıt performansında pozitif iyileştirmeler gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda PEDOT:PSS malzemesine alternatif olarak kullanılacak moleküller olarak literatüre katkı sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

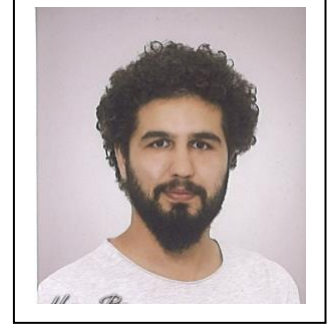
- Adams, W. G. ve Day, R. E. (1876). The action of light on selenium, *The Royal Society publishing*, 25, 171-178
- Anonim, (2020). National Renewable Laboratory Efficiency Chart (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>) ( Erişim tarihi: 14.06.2020)
- Aswal, D. K., Lenfant, S., Guerin, D., Yakhmi, J. V., Vuillaume, D. (2006). Self assembled monolayers on silicon for molecular electronics, *Analytica Chimica Acta*, 568, 84-108.
- Aviram, A. ve Ratner, M. A. (1974). Molecular Rectifiers, *Chemical Physics Letters*, 29, 2, 277-283.
- Baikie, T., Fang, Y., Kadro, J. M., Schreyer, M., Wei, F., Mhaisalkar, S. G., Graetzel, M., White, T. J. (2013). Synthesis and crystal chemistry of the hybrid Perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  for solid-state sensitized solar cell applications, *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 5628-5641.
- Becquerel, E., (1839). Memoire sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons solaires, *Comptes Rendus*, 11, 702-703.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2011). Material science and engineering, *John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.*, 8th edition, p-736.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L. (1954). A new silicon pn junction photocell for converting solar radiation into electrical power, *Journal of Applied Physics*, 25, 676-677.
- Chopra, K. L., Paulson, P. D., Dutta, V. (2004). Thin film solar cells: An overview, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12, 69-92.
- Decher, G., (1992). Book review: An introduction to ultrathin organic films from Langmuir-Blodgett to self-assembly, *Angewandte Chemie International Edition in English*, 104, 498-499.
- De Wolf, S., Holovsky, J., Moon, S-J., Löper, P., Niesen, B., Ledinsky, M., Haug, F-J., Yum, J-H., Ballif, C. (2014). Organometallic halide perovskites: Sharp optical absorption edge and its relation to photovoltaic performance, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5, 1035-1039.
- Edri, E., Kirmayer, S., Henning, A., Mukhopadhyay, S., Gartsman, K., Rosenwaks, Y., Hodes, G., Cahen, D. (2014). Why lead methylammonium tri-iodide Perovskite-based solar cells require a mesoporous electron transporting scaffold (but necessarily a hole conductor), *Nano Letters*, 14, 1000-1004.
- Geng, W., Zhang, L., Zhang, Y-N., Lau, W-M., Liu, L-M. (2014). First principle study of lead iodide Perovskite tetragonal and orthorhombic phases for photovoltaics, *The Journal of Physical Chemistry C*, 118, 34, 19565-19571.

- Goldschmidt, V. M., (1926). Die gesetze der krystallochemie, *Die Naturwissenschaften*, 14, 21, 477-485.
- Guarnera, S., Abate, A., Zhang, W., Foster, J. M., Rihardson, G., Petrozza, A., Snaith, H. J. (2015). Improving the long-term stability of Perovskite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layer, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6, 432-437.
- Hao, F., Stoumpos, C. C., Chang, R. P. H., Kanatzidis M. G. (2014). Anomalous band gap behavior in mixed Sn and Pb perovskites enables broadening of absorption spectrum in solar cells, *Journal of the American Chemical Society*, 136, 8094-8099.
- Im, J-H., Lee, C-R., Lee, J-W., Park, S-W., Park, N-G. (2011). 6,5% efficient Perovskite quantum-dot sensitized solar cell, *Nanoscale*, 3, 4088-4093.
- Jean, J., Mahony, T. S., Bozyigit, D., Sponseller, M., Holovsky, J., Bawendi M. G., Bulovic V. (2017). Radiative efficiency limit with band tailing exceed 30% for quantum dot solar cells, *ACS Energy Letters*, 2, 2616-2624.
- Kim, H-S., Lee, C-R., Im, J-H., Lee, K-B., Moehl, T., Marchioro, A., Moon, S-J., Baker, R. H., Yum, J-H. Moser, J. E., Gratzel, M., Park, N-G. (2012). Lead iodide Perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%, *Scientific Reports*, 2, 591.
- Kingsbury, E. F., Ohl, R. S. (1952). Photoelectric properties of ionically bombarded silicon, *Bell System Technical Journal*, 31, 4, 802-815.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells, *Journal of American Chemistry Society Communications*, 131, 6050-6051.
- Kulkarni, S. A., Baikie, T., Boix, P. P., Yantara, N., Mathews, N., Mhaisalkar, S. (2014). Band-gap tuning of lead halide perovskites using a sequential deposition process, *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 9221-9225.
- Langmuir, I. (1920). The mechanism of the surface phenomena of flotation, *Transactions of the Faraday Society*, 15, 62-74.
- Lee, J. W., Seol, D. J., Cho, A. N., Park, N. G. (2014). High-efficiency Perovskite solar cells based on the black polymorph of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>, *Advanced Materials*, 26, 29, 4991-4998.
- Li, B., Chen, Y., Liang, Z., Gao, D., Huang, W. (2015). Interfacial engineering by using self-assembled monolayer in mesoporous Perovskite solar cell, *RSC Advances*, 5, 94290-94295.
- Neamen, D. A., (1992). Semiconductor physics and devices basic principles, *University of Mexico*, p-741.
- Noh, H. J., Im, S. H., Heo, J. H., Mandal, T. N., Seok, S. I. (2015) Chemical management for colorful efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells, *Nano Letters*, 13, 1764-1769.

- O'Regan, B. ve Gratzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films, *Nature*, 353, 737-739.
- Poglitsch, A. ve Weber, D. (1987). Dynamic disorder in methylammonium trihalogeno plumbates(II) observed by millimeterwave spectroscopy, *The Journal of Chemical Physics*, 87, 6373-6378.
- Quaschnig, V. ve Hanitsch, R. (1996). Influence of shading on electrical parameters of solar cells, *IEEE 25th PVSC*, 1287-1290.
- Saga, T. (2010). Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production, *NPG Asia Materials*, 2, 3, 96-102.
- Saliba, M., Matsui, T., Seo, J-Y., Domanski, K., Baena, J-P. C., Nazeeruddin, M. K., Zakeeruddin, S. M., Tress, W., Abate, A., Hagfeldt, A., Gratzel, M. (2016). Cesium-containing triple cation Perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency, *Energy&Environmental Science*, 9, 1989-1997.
- Saparov, B. ve Mitzi, D. (2016). Organic-inorganic perovskites: structural versatility for functional material design, *Chemical Reviews*, 116, 4558-4596.
- Sarıçiftçi, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J., Wudl, F. (1992). Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene, *Science*, 258, 1474-1476.
- Stoumpos, C. C., Malliakas, C. D., Kanatzidis, M. G. (2013). Semiconducting tin and lead iodide perovskites with organic cations: phase transitions, high mobilities, and near-infrared photoluminescent properties, *Inorganic Chemistry*, 52, 9019-9038.
- Stranks, S. D., Eperon, G. E., Grancini, G., Menelaou, C., Alcocer, M. J. P., Leijtens, T., Herz, L. M., Petrozza, A., Snaith H. J. (2013). Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide Perovskite absorber, *Science*, 342, 341-343.
- Şen, Z. (2004). Solar energy in progress and future research trends, *Progres Energy and Combustion Science*, 30, 367-416.
- Umebayashi, T., Asai, K., Kondo, T., Nakao, A. (2003). Electronic structures of lead iodide based low-dimensional crystals, *Physical Review B*, 67, 155405.
- Wehrenfennig, C., Eperon, G., Johnston, M. B., Snaith, H. J., Herz, L. M. (2014). High Charge carrier mobilities and lifetimes in organolead trihalide perovskites, *Advanced Materials*, 26, 1584-1589.
- Xia, Y. ve Dai, S. (2020). Review on applications of PEDOTs and PEDOT:PSS in Perovskite solar cells, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 155.
- Yalçın, E., Can, M., Seco, C. R., Aktaş, E., Pudi, R., Cambarau, W., Demiş, Ş., Palomares, E. (2019). Semiconductor self-assembled monolayers as selective

- contacts for efficient pin Perovskite solar cells, *Energy & Environment Science*, 12, 230-237.
- Yan, J. Ve Saunders, B. R. (2014). Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and Perovskite solar cells, *RSC Advances*, 4, 43286-43314
- Yu, Z. ve Sun, L. (2015). Recent progress on hole-transporting materials for emerging organometal halide Perovskite solar cells, *Advanced Energy Materials*, 5, 1500213.
- Zhang, W., Eperon, G. E., Snaith, H. J. (2016). Metal halide perovskites for energy applications, *Nature Energy*, 16048.
- Zhou, H., Chen, Q., Li, G., Luo, S., Song, T. B., Duan, H. S., Hong, Z., You, J., Liu, Y., Yang, Y. (2014). Interface engineering of highly efficient Perovskite solar cells, *Science*, 345, 6196, 542-546.
- Zulehner, W. (1983) .Czochralski growth of silicon, *Journal of Crystal Growth*, 65, 189-213.
- Zuo, L., Gu, Z., Ye, T., Fu, W., Wu, G., Li, H., Chen, H. (2015). Enhanced photovoltaic performance of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite solar cells through interfacial engineering using self-assembling monolayer, *Journal of the American Chemical Society*, 137, 7, 2674-2679.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Muhittin ÜNAL  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 22.08.1989 KARAMAN  
**E-posta** : muhittinnunal@gmail.com

### Öğrenim Durumu:

**Lise** : 2006, Karaman Bifa Lisesi  
**Lisans** : 2017, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Enerji Sistemleri Mühendisliği

**Yabancı Dil ve Düzeyi:** İngilizce, B1