



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNDE
KUANTUM NANOMALZEMELER İLE
KATKILAMA İŞLEMİNİN FOTOVOLTAİK
PARAMETRELERE ETKİSİ

Ayşegül TOPRAK

DOKTORA TEZİ

Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

Temmuz-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşegül Toprak tarafından hazırlanan “Kuantum Nanomalzemeler ile Katkılama İşleminin Fotovoltaik Parametrelere Etkisi” adlı tez çalışması 08/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan/Danışman

Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ

.....

Üye

Prof. Dr. İmren HATAY PATİR

.....

Üye

Prof. Dr. Mustafa KARAMAN

.....

Üye

Prof. Dr. Faruk ÖZEL

.....

Üye

Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ayşegül TOPRAK

Tarih: 08.07.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNDE KUANTUM NANOMALZEMELER İLE KATKILAMA İŞLEMİNİN FOTOVOLTAİK PARAMETRELERE ETKİSİ

Ayşegül TOPRAK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ
2. Danışman: Doç. Dr. Parvaneh MOKARIAN

2024, 124 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ
Prof. Dr. İmren HATAY PATİR
Prof. Dr. Mustafa KARAMAN
Prof. Dr. Faruk ÖZEL
Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

Perovskit güneş pilleri (PGP) fotovoltaik teknolojiler arasında yüksek verim elde etme ve düşük maliyetli üretim sağlaması açısından ilgi çekici bir araştırma alanına sahiptir. Perovskit güneş pilleri düşük maliyetleri, imalat kolaylığı ve yüksek dönüşüm verimliliğine sahip yeni nesil fotovoltaik teknolojiler olarak ortaya çıkmasına rağmen ticari uygulamaları için daha fazla iyileştirme gerekmektedir. Pil performansının iyileştirilmesini cihaz içindeki katmanlarda ve arayüzeylerde araştırmak önemlidir. Perovskit güneş pillerinin perovskit tabakasının uygun malzemelerle katılanması fotovoltaik performansını geliştirmeyi mümkün kılar. Karbon kuantum noktalar (KKN) olarak bilinen küçük karbon nanopartiküller, bu katkı maddelerinin yeni ve umut verici üyesidir. Karbon kuantum noktalar (KKN) boyutları 2-10 nm arasında değişen ve güçlü floresans özelliğe sahip olan karbon temelli sıfır boyutlu, yarı küresel bir yapıya sahip nanomalzemelerdendir. Karbon kuantum noktalar suda çözünürlük, hızlı ve kolay hazırlanabilme, ucuz ve kolay sentez yöntemleri, düşük toksisite, biyouyumluluk ve kolay işlevselleştirme gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu olağanüstü kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri, karbon kuantum noktaları yüksek fotovoltaik performansa sahip perovskit piller oluşturmak için en potansiyel aday haline getirir.

Bu tez çalışması karbon kuantum noktaların Bor (B) ve Azot (N) gibi farklı hetero-atomlarla katılanmasıyla floresans özelliklerinin iyileştirilmesi ve sentezlenen Azot katkılı Karbon Kuantum Nokta (N-KKN) ve Bor Katkılı Karbon Kuantum Noktaların (B-KKN) perovskit güneş pillerinin aktif tabakasına dahil edilmesiyle güneş pili veriminin artırılması çalışmaları odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında Karbon Kuantum Noktaların sentezleri gerçekleştirilmiş, optik ve yapısal özellikleri UV-Vis absorpsiyon ve PL spektroskopisi ayrıca TEM ve XPS teknikleriyle karakterize edilmiştir. Sentezlenen ve karakterize edilen N-KKN ve B-KKN'lar perovskit güneş pillerine dahil edilerek pilin fotovoltaik parametreleri belirlenmiştir. Katkısız perovskit güneş pillerinin verimliliği yaklaşık %10 olarak elde edilirken, N-KKN ve B-KKN ile katılan perovskit güneş pillerinde sırasıyla %14.0 ve %12.7 verimliliğe ulaşılmıştır. Ayrıca Katkılı/Katkısız üretilen her bir MAPbI₃ ince filmin XRD, SEM, AFM, EQE ve UV-Vis teknikleriyle yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen analiz sonuçlarında perovskit güneş pillerine dahil edilen KKN'ların pil verimini artırdığı ve yüzey morfolojisini iyileştirdiği kanıtlanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların özgün değeri sonraki çalışmalara yol gösterici nitelikte yer alacaktır.

Anahtar Kelimeler: Perovskit Güneş Pilleri, Karbon Kuantum Nokta, Katkılama, Pasivasyon

ABSTRACT

Ph.D THESIS

THE EFFECT OF DOPING WITH QUANTUM DOT NANOMATERIALS ON PHOTOVOLTAIC PARAMETERS IN PEROVSKITE SOLAR CELLS

Ayşegül TOPRAK

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY

THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN NANOTECHNOLOGY AND ADVANCED MATERIALS

Advisor: Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ

2. Advisor: Assoc. Prof. Parvaneh MOKARIAN

2024, 124 Pages

Jury

Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ

Prof. Dr. İmren HATAY PATİR

Prof. Dr. Mustafa KARAMAN

Prof. Dr. Faruk ÖZEL

Assoc. Prof. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

Perovskite solar cells (PSC) among photovoltaic technologies are an interesting research area because they provide high efficiency and low-cost production. Although perovskite solar cells have emerged as new generation photovoltaic technologies with low costs, ease of manufacturing and high conversion efficiency, further improvements are required for their commercial applications. It is important to investigate improvement off cell performance at layers and interfaces within the device. Doping the perovskite layer of perovskite solar cells with suitable materials allows improving the photovoltaic performance. Small carbon nanoparticles, known as carbon quantum dots (CQDs), are a new and promising candidate for doping. Carbon quantum dots (CQDs) are carbon-based nanomaterials with a zero-dimensional, semi-spherical structure, with sizes varying between 2-10 nm and strong fluorescence properties. Carbon quantum dots have superior properties such as water solubility, fast and easy preparation, cheap and easy synthesis methods, low toxicity, biocompatibility and easy functionalization. The outstanding chemical, electrical and mechanical properties of carbon quantum dots make them the most potential candidate for creating perovskite cells with high photovoltaic performance.

This thesis focuses on improving the fluorescence properties of carbon quantum dots by doping them with Boron (B) and Nitrogen (N) hetero-atoms and increasing the solar cell efficiency by incorporating the synthesized N-CQDs and B-CQDs into the active layer of perovskite solar cells. The optical and structural properties of N-CQDs and B-CQDs were characterized by UV-Vis absorption and PL spectroscopy as well as TEM and XPS techniques. The synthesized and characterized N-CQDs and B-CQDs were incorporated into perovskite solar cells and the photovoltaic parameters of the cells were determined. While the efficiency of pure perovskite solar cells was approximately 10%, N-CQDs and B-CQDs doped perovskite solar cells achieved 14.0% and 12.7% efficiency, respectively. In addition, structural, morphological and optical characterizations of each MAPbI₃ thin film produced with or without doping were carried out using XRD, SEM, AFM, EQE and UV-Vis techniques.

Analysis results showed that CQDs incorporated into perovskite solar cells increased cell efficiency and improved surface morphology. The original value of the results obtained from the studies carried out within the scope of the thesis will serve as a guide for future studies.

Keywords: Perovskite Solar Cells, Carbon Quantum Dot, Doping, Passivation

ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarım süresince desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, akademisyen kimliğini her zaman örnek aldığım değerli bilim insanı Sayın Hocam Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ'e ve ikinci danışmanım Sayın Doç. Dr. Parvaneh MOKARIAN'a, bilgisiyle beni yönlendiren ve tezimi şekillendiren Sayın Hocam Prof. Dr. Mahmut KUŞ'a, güler yüzüyle ve enerjisiyle çalışmalarımда takıldığım her noktada desteğini, tecrübesini ve bilgisini benimle her zaman paylaşan kıymetli hocam, canım arkadaşım Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK'a, laboratuvar çalışmalarımда bana yardımcı olan Selen POLAT'a, Öğr. Gör. Mutahire TOK'a, ayrıca Doç. Dr. Tuğbahan YILMAZ'a ve Öğr. Gör. Dr. Sümeyra BÜYÜKÇELEBİ'ye, eşim Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TOPRAK'a, çocuklarım Ayşe Elif ve Ali Emre'ye, manevi olarak desteklerini üzerimde hep hissettiğim anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayşegül TOPRAK
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
1. GİRİŞ	1
1.1. Küresel Isınma ve Fotovoltaik Teknolojisi.....	1
1.2. Fotovoltaik (PV) Teknolojisinin Gelişimi	4
1.2.1. Birinci Nesil Fotovoltaikler	5
1.2.2. İkinci Nesil Fotovoltaikler	6
1.2.3. Üçüncü Nesil Fotovoltaikler	7
1.3. Güneş Pillerinin Temeli	8
1.4. Güneş Pilinin Temel Çalışma Prensibi	9
1.5. Güneş Pilinin Çıkış Karakteristikleri	15
1.6. Güneş Pilinin Elektriksel Eşdeğer Devresi	17
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	21
2.1. Perovskit Güneş Pilleri	21
2.2. Perovskit Güneş Pillerinde Kullanılan Cihaz Mimarileri	27
2.3. Perovskit Güneş Pillerinde Elektron-Boşluk Hareketi	30
2.4. Perovskit Güneş Pillerinde Katkılama	31
2.5. Karbon Kuantum Noktalar (KKN) ve Güneş Pillerinde Uygulamaları.....	32
2.6. Perovskit Güneş Pillerindeki Zorluklar	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemeler	43
3.2. Karbon Kuantum Noktaların (KKN) Sentezi	43
3.2.1. Azot Katkılı Karbon Kuantum Nokta (N-KKN) Sentezi.....	43
3.2.2. Bor Katkılı Karbon Kuantum Nokta (B-KKN) Sentezi.....	44
3.3. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemelerin Hazırlık Süreci	45
3.3.1. İndiyum Kalay Oksit (ITO) Kaplı Cam Yüzeylerin Hazırlanması.....	45
3.3.2. İndiyum Kalay Oksit (ITO) Kaplı Cam Yüzeylerin O ₂ Plazma ile Temizlenmesi	47
3.4. Tez Çalışmasında Kullanılan Çözeltilerin Hazırlanması.....	48

3.4.1.	PEDOT:PSS Çözeltilisinin Hazırlanması	48
3.4.2.	Perovskit Çözeltilisinin Hazırlanması	49
3.4.3.	PCBM Çözeltilisinin Hazırlanması	50
3.5.	Tez Çalışmasında Kullanılan Kaplama Teknikleri	51
3.5.1.	Spin Kaplama Tekniği	51
3.5.2.	Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Kontakların Oluşturulması	52
3.6.	Tez Çalışmasında Kullanılan Çözeltilerin Kaplanması	53
3.6.1.	PEDOT:PSS Çözeltilisinin Kaplanması	53
3.6.2.	Perovskit Çözeltilisinin Kaplanması	54
3.6.3.	PCBM Çözeltilisinin Kaplanması	54
3.7.	Tez Çalışmasında Kullanılan Karakterizasyon Teknikleri	54
3.7.1.	Akım Yoğunluğu-Gerilim (J-V) Karakteristikleri	54
3.7.2.	Yapısal ve Optik Karakterizasyonları	56
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	66
4.1.	Karbon Kuantum Noktaların Karakterizasyonları	66
4.1.1.	N-KKN'ların Yapısal ve Optik Karakterizasyonları	66
4.1.2.	B-KKN'ların Yapısal ve Optik Karakterizasyonları	68
4.2.	İnce Filmlerin Karakterizasyonları	71
4.2.1.	N-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin Yapısal, Morfolojik ve Optik Karakterizasyonları	71
4.2.1.1.	N-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin XRD Karakterizasyonları	71
4.2.1.2.	N-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin SEM Karakterizasyonları	72
4.2.1.3.	N-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin AFM Karakterizasyonları	73
4.2.1.4.	N-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin UV-Vis Absorpsiyon Karakterizasyonları	75
4.2.2.	B-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin Yapısal, Morfolojik ve Optik Karakterizasyonları	77
4.2.2.1.	B-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin XRD Karakterizasyonları	77
4.2.2.2.	B-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin AFM Karakterizasyonları	79
4.2.2.3.	B-KKN Katkılı MAPbI ₃ Filmlerin UV-Vis Absorpsiyon Karakterizasyonları	80
4.3.	Perovskit Güneş Pillerinin Fotovoltaik Karakterizasyonları	81
4.3.1.	N-KKN Katkılı Perovskit Güneş Pillerinin Fotovoltaik Karakterizasyonları	82
4.3.2.	B-KKN Katkılı Perovskit Güneş Pillerinin Fotovoltaik Karakterizasyonları	86
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
5.1.	Sonuçlar	90
5.2.	Öneriler	95
KAYNAKLAR	96	
ÖZGEÇMİŞ	108	

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Atmosferik karbondioksit konsantrasyonu (Nasa, 2024b)	2
Şekil 1.2. Atmosferik karbondioksit seviyesi (Nasa, 2024a)	3
Şekil 1.3. Fotovoltaik (PV) Teknolojisi.....	4
Şekil 1.4. n-tipi ve p tipi yarıiletken	8
Şekil 1.5. p-n eklem şematik gösterimi	9
Şekil 1.6. p-n eklem yapısı ve bant yapısı	11
Şekil 1.7. Karanlıkta ve Aydınlıkta p-n bant yapısı	12
Şekil 1.8. Karanlıkta ve Aydınlıkta pin bant yapısı.....	13
Şekil 1.9. Rekombinasyon Mekanizmaları.....	14
Şekil 1.10. Güneş Pili I-V Grafiği	15
Şekil 1.11. İdeal Güneş Pili Modeli.....	17
Şekil 1.12. I-V Karakteristiğinin elde edilmesi	18
Şekil 1.13. Tek Diyot R_{SH} Modeli	18
Şekil 1.14. R_S ve R_{SH} dirençlerinin I-V karakteristiğine etkisi	20
Şekil 2.1. Perovskit kristal yapısı	22
Şekil 2.2. 12 farklı perovskit malzemesine göre hesaplanmış t ve μ değerleri	23
Şekil 2.3. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan güneş pili verimleri	25
Şekil 2.4. Perovskit Güneş Pilleri Genel Tabaka Yapısı	26
Şekil 2.5. Akım Akış Yönüne Göre a) Mezoporik n-i-p Yapı b) Düzlemsel p-i-n Yapı c) Düzlemsel n-i-p Yapı.....	28
Şekil 2.6. a) Mezoporik iskelet yapı ve b) Düzlemsel yapı.....	29
Şekil 2.7. Perovskit pillerde elektron boşluk hareketi	30
Şekil 2.8. Yığın malzeme ve kuantum noktaların bant aralığı değişimi ve kuantum noktaların UV ışık altındaki emisyon renkleri.....	33

Şekil 3.1. Üretilen ITO/PEDOT:PSS/Perovskit(MAPbI ₃)/PCBM/Al güneş pili konfigürasyonu	42
Şekil 3.2. Perovskit güneş pillerinin hazırlama prosedürünün ve cihaz mimarisinin şematik gösterimi	42
Şekil 3.3. ITO kaplı camların bantlanarak açıkta kalan kısmın kral suyu ile aşındırılması	46
Şekil 3.4. Aşındırma sonrası üretilen yapının yandan ve üstten görüntüsü.....	47
Şekil 3.5. ITO kaplı yüzeylerin temizlik aşamasında kullanılan O ₂ plazma sistemi.....	48
Şekil 3.6. Perovskit çözeltisi ve kaplama sonrası ısıtıcı üzerindeki görüntüsü	50
Şekil 3.7. Spin Kaplama ile çözeltinin yüzeye kaplanması	51
Şekil 3.8. Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi ve Glovebox içerisindeki PVD	52
Şekil 3.9. a) Kullanılan 3 katotlu maske yapısı b) PVD kaplama için yerleştirilen 12 adet pil.....	53
Şekil 3.10. Perovskit çözeltisinin kaplanma adımları.....	54
Şekil 3.11. Temiz oda laboratuvarı b) Keithley 2400 potansiyostat c) Glovebox sistemi	55
Şekil 3.12. a) AM1,5 Atlas Solar Simülatör b) Pil Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi	56
Şekil 3.13. Gelen ışığın numune tarafından absorpsiyonu	57
Şekil 3.14. Elektronik moleküler enerji seviyeleri	58
Şekil 3.15. Jablonski Diyagramı	59
Şekil 3.16. Bragg Yasası.....	60
Şekil 3.17. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) şematik gösterimi.....	63
Şekil 3.18. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) şematik gösterimi.....	64
Şekil 3.19. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) şematik gösterimi.....	65
Şekil 4.1. N-KKN'ların TEM görüntüleri	66
Şekil 4.2. N-KKN'ların UV-Vis absorpsiyon ve floresans spektrumları	67

Şekil 4.3. N-KKN'ların a) XPS yüzey spektrumu ve b) C1, c) O1 ve d) N1 XPS dekonvolüsyonu	68
Şekil 4.4. a) B-KKN'ların UV-Vis Absorpsiyon spektrumu ve b) PL spektrumu	69
Şekil 4.5. (a) SEM görüntüsü, (b) EDX deseni ve (c-f) B-KKN'ların EDX haritalama görüntüleri.....	70
Şekil 4.6. B-KKN'ların TEM görüntüleri	70
Şekil 4.7. PEDOT:PSS kaplı ITO camın üzerinde katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI ₃	72
Şekil 4.8. (a) Katkısız MAPbI ₃ ve (b) %3 N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin üstten SEM görüntüleri	72
Şekil 4.9. (a) %1 N-KKN katkılı MAPbI ₃ ve (b) %5 N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin üstten SEM görüntüleri.....	73
Şekil 4.10. (a) Katkısız MAPbI ₃ ve (b) %3 N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin AFM görüntüleri.....	74
Şekil 4.11. (a) %1 N-KKN katkılı MAPbI ₃ ve (b) %5 N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin AFM görüntüleri.....	74
Şekil 4.12. Katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin (a) UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve.....	75
Şekil 4.13. PEDOT:PSS kaplı ITO camın üzerinde katkılı olmayan ve B-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin X-ışını kırınım (XRD) desenleri.....	77
Şekil 4.14. Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin AFM görüntüleri	80
Şekil 4.15. Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerinin (a) UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve.....	81
Şekil 4.16. a) Aydınlık ve b) Karanlık koşullar altında en iyi performansı gösteren cihazların I-V karakteristiği	82
Şekil 4.17. Katkısız ve %3 N-KKN katkılı MAPbI ₃ ile üretilmiş perovskit güneş pillerinin EQE spektrumları.....	83
Şekil 4.18. Katkısız ve 3% N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmlerle üretilen PGP'nin J-V eğrilerinden çıkarılan paralel ve seri dirençlerin kutu grafiği analizi	85
Şekil 4.19. Katkısız ve %3 N-KKN katkılı MAPbI ₃ filmler ile üretilmiş pillerin a) V _{OC} , b) I _{SC} , c) FF ve d) η fotovoltaiik karakteristiklerinin kutu grafiği	85
Şekil 4.20. En iyi performans gösteren katkısız ve B-KKN katkılı cihazların J-V eğrileri ve.....	87

Şekil 4.21. Katkısız ve %5 B-KKN katkılı MAPbI₃ filmler ile üretilmiş pillerin V_{OC} , I_{SC} , FF ve η fotovoltatik parametrelerinin kutu grafiği 89



ÇİZELGE LİSTESİ

- Çizelge 4.1.** Katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI₃ Filmlerin Pik Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM) ve Kristal Boyutu (D)
- Çizelge 4.2.** Katkısız ve N-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve istatistiksel tane boyutu dağılımı
- Çizelge 4.3.** Katkısız ve N-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin E_g değerleri
- Çizelge 4.4.** Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ Filmlerin Pik Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM) ve Kristal Boyutu (D)
- Çizelge 4.5.** Katkısız ve B-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) farklılıkları ve tane boyutu dağılımı
- Çizelge 4.6.** Katkısız ve N-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin E_g değerleri
- Çizelge 4.7.** Katkısız ve N-KKN katkılı perovskit güneş pillerinin fotovoltatik parametreleri
- Çizelge 4.8.** J-V Grafiğinden elde edilen Seri (R_S) ve Paralel (R_{SH}) dirençler
- Çizelge 4.9.** Katkısız ve N-KKN katkılı perovskit güneş pillerinin fotovoltatik parametreleri
- Çizelge 4.10.** J-V Grafiğinden elde edilen Seri (R_S) ve Paralel (R_{SH}) dirençler

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

η	Enerji Dönüşüm Verimi
μ	oktahedral faktör
c	ışık hızı
E	foton enerjisi
h	plank sabiti
t	tolerans faktör
λ	fotonun dalga boyu

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
B-KKN	Bor Katkılı Karbon Kuantum Nokta
CdS	Kadmiyum Sülfür
CdTe	Kadmiyum Tellür
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3^+$	Etilamonyum
CH_3NH_3^+	Metilamonyum (MA)
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	Metilamonyum Kurşun İyodür
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenid
DMF	Dimetilformamit
DMSO	Dimetilsülfoksit
DSSC	Boya Duyarlı Güneş Pilleri
CO_2	Karbondioksit
EDA	Etilen Diamin
E_g	Bant Aralığı
ETL	Elektron İletim Tabakası (Electron Transport Layer)
ETM	Elektron İletim Malzemesi (Electron Transport Material)
EQE	Dış Kuantum Verimi (External Quantum Efficiency)
FAPbI_3	Formamidyum Kurşun İyodür
FF	Doluluk Faktörü (Fill Factor)
FTO	Flor katkılı Kalay Oksit
FWHM	Pikin Yarı Yükseklik Genişliği (Full Width at Half Max) (FWHM)
GaAs	Galyum Arsenit
GBL	γ -bütirolakton
HOMO	En Yüksek Dolu Moleküler Orbital
HTL	Boşluk İletim Tabakası (Hol Transport Layer)
HTM	Boşluk İletim Malzemesi (Hol Transport Material)
$h\nu_0$	Elektronu Koparmak İçin Gereken Eşik Enerjisi
$h\nu$	Yüzeye Gelen X Işını Enerjisi

I _{SC}	Kısa Devre Akımı
ITO	İndiyum kalay oksit
J _{SC}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
$KE_{elektron}$	Elektronun Kinetik Enerjisi
KKN	Karbon Kuantum Nokta
KN	Kuantum nokta
LUMO	En Düşük Boş Moleküler Orbital
MAPbI ₃	Metilamonyum Kurşuniyodür
NH ₂ -CH ₂ ==NH ₂ ⁺	Formamidyum (FA)
N-KKN	Azot Katkılı Karbon Kuantum Nokta
PCBM	6,6-fenil C61 bütirik asit metil ester
PCE	Güç Dönüşüm Verimliliği (Power Conversion Efficiency)
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)
P _{giriş}	Pil Üzerine Düşen Güç (P _{input})
PGP	Perovskit Güneş Pilleri
PL	Fotoluminesans
P _M	Pilden Elde Edilen Maksimum Güç
PV	Fotovoltaik
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapour Deposition)
QY	Kuantum Verimi
R _a	Ortalama Pürüzlülük (Average Roughness)
R _S	Seri Direnç
R _{SH}	Paralel (Şant) Direnç
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SRH	Shockley-Read-Hall
TCO	Şeffaf İletken Oksit Tabaka
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
UV	Ultraviyole
UV-Vis	Ultraviyole-Görünür Bölge
V _{OC}	Açık Devre Gerilimi
XPS	X Işını Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	X Işını Kırınım Metodu

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak enerji kavramı daha da ön plana çıkmaktadır. Enerji hem ekonomik büyüme hem de daha yüksek bir yaşam standardı için gereklidir. Enerjiye duyulan ihtiyaç kalkınma ve gelişme ile yakından ilişkilidir. Kişi başına harcanan enerji miktarı, bir ulusun teknoloji açısından gelişimini tanımlayabilir. Mevcut küresel enerji üretiminin çoğu fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bununla birlikte, sınırlı kullanılabilirlik ve çevreye olan zararları gibi fosil yakıtların doğasında var olan sorunlar toplumların temiz, çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesine sebep olmakta ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması amaçlanmaktadır. Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkisinin artması ve çevre sorunları konusunda artan farkındalık sebebiyle, modern toplumlar gelecekteki enerji arzını sağlamak için çevre dostu ve uzun vadeli enerji çözümleri aramaktadır.

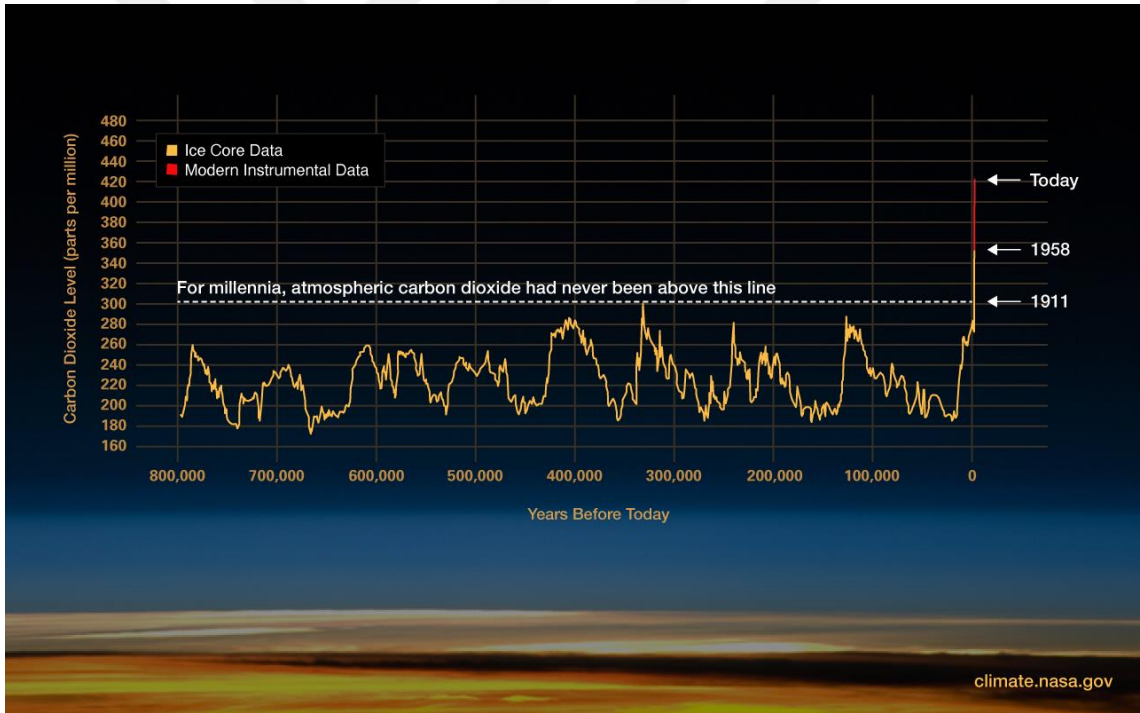
Yenilenebilir enerji kaynakları temiz enerji kaynakları olarak kabul edilir ve çevre dostu olması sebebiyle bu sorunun çözümünde kritik öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji rüzgâr, güneş ışığı, gelgitler, dalgalar, jeotermal ısı vb. gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanan bir enerji türüdür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu sürdürülebilir ve çevre dostudur. Yenilenebilir enerji kaynakları gelecekteki enerji krizi için uzun vadeli çözümler sağlar ve artan enerji talebinin karşılanmasında büyük ölçüde umut vadetmektedir. Birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyeti hızla artmaktadır. Özellikle rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri başta olmak üzere yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımı artmaktadır.

1.1. Küresel Isınma ve Fotovoltaik Teknolojisi

Yaygın olarak iklim değişikliği veya sera gazı etkisi olarak da adlandırılan küresel ısınma, endüstriyel toplumun neden olduğu dünyanın ortalama sıcaklığındaki ani yükselişi ifade eder. Fosil yakıtların yakılması, atmosferdeki karbondioksit ve diğer sera gazlarının birikimini artırarak küresel ısınmaya neden olur. Uluslararası Bilim Konseyi (ISC), sera gazı emisyonlarında ciddi düşüşler olmazsa, yeryüzü ekosisteminin büyük ölçüde değişeceği konusunda uyarılmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının

neden olduğu kirletici emisyonlardan dolayı, dünya çapında ortam sıcaklığının 2050 yılına kadar yaklaşık 2 °C artması beklenmektedir (Al-Shahri ve ark., 2021).

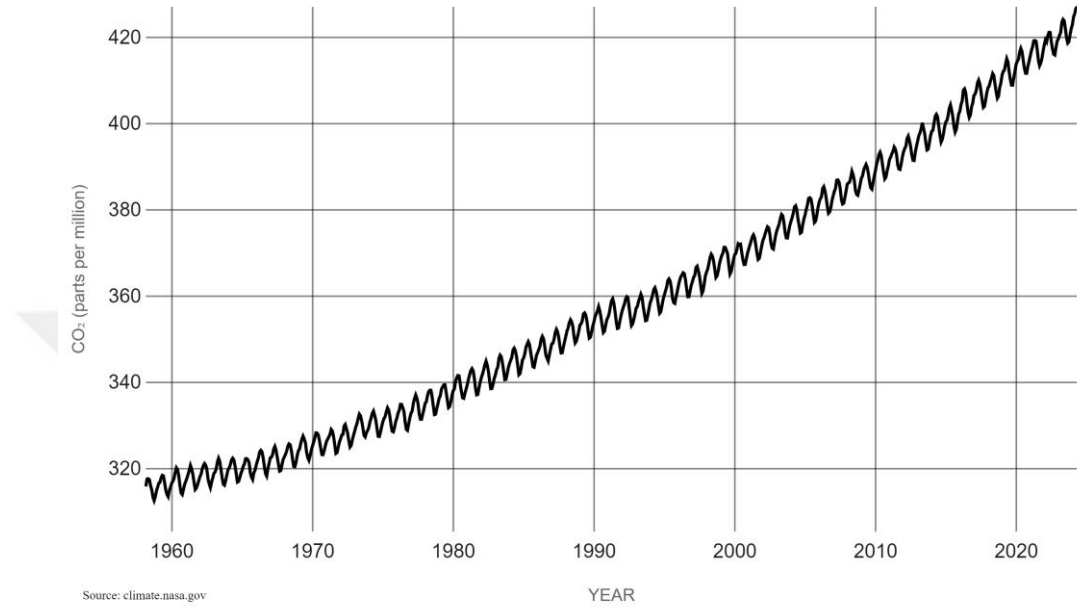
Karbondioksit, metan, azot oksit, hidroflorokarbonlar, perflorokarbonlar ve sülfür heksaflorür küresel ısınmaya en çok sebep olan sera gazlarıdır (Beer, 2012). Bu gazların içinde karbondioksit (CO₂), ormanların tahribatı ve fosil yakıtların yakılması gibi insan faaliyetleriyle açığa çıkan ve küresel ısınmaya en çok etkisi olan sera gazıdır (Nasa, 2024b). Yapılan araştırmalar atmosferimizdeki doğal karbondioksit konsantrasyonunun, son 50 yıldaki yıllık artış oranının önceki artışlardan yaklaşık 100 kat daha hızlı olduğunu göstermiştir (Righini ve Enrichi, 2020). Bu durum Şekil 1.1’de görüldüğü gibi sanayi devriminden bu yana atmosferik CO₂’nin arttığına dair kanıtlar vermektedir.



Şekil 1.1. Atmosferik karbondioksit konsantrasyonu (Nasa, 2024b)

Şekil 1.1’de 1958’den günümüze kadar Hawaii’deki Mauna Loa Gözlemevi’nde 3400 m yükseklikte ölçülen atmosferik CO₂ seviyelerini göstermektedir. Son verilere göre 2024 temmuz ayında CO₂ seviyesi 427 ppm seviyesine ulaşmıştır (Nasa, 2024a). CO₂ emisyonlarının en büyük sebebi, enerji dönüşümü sağlamak için kullanılan fosil yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır (Hwang ve ark., 2021). CO₂ emisyonlarını azaltma hedefine, ancak emisyonu sebep olan enerji kaynaklarının, daha genel olarak

fosil yakıtların etkisi önemli ölçüde azaltılarak ulaşılabilir. Elektrik enerjisinin dünya çapındaki nihai enerji kullanımları içindeki payı her geçen gün artmaktadır. Bu hususlar göz önüne alındığında çevre dostu yenilenebilir enerji kaynakları artan enerji talebinin karşılanması için önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 1.2. Atmosferik karbondioksit seviyesi (Nasa, 2024a)

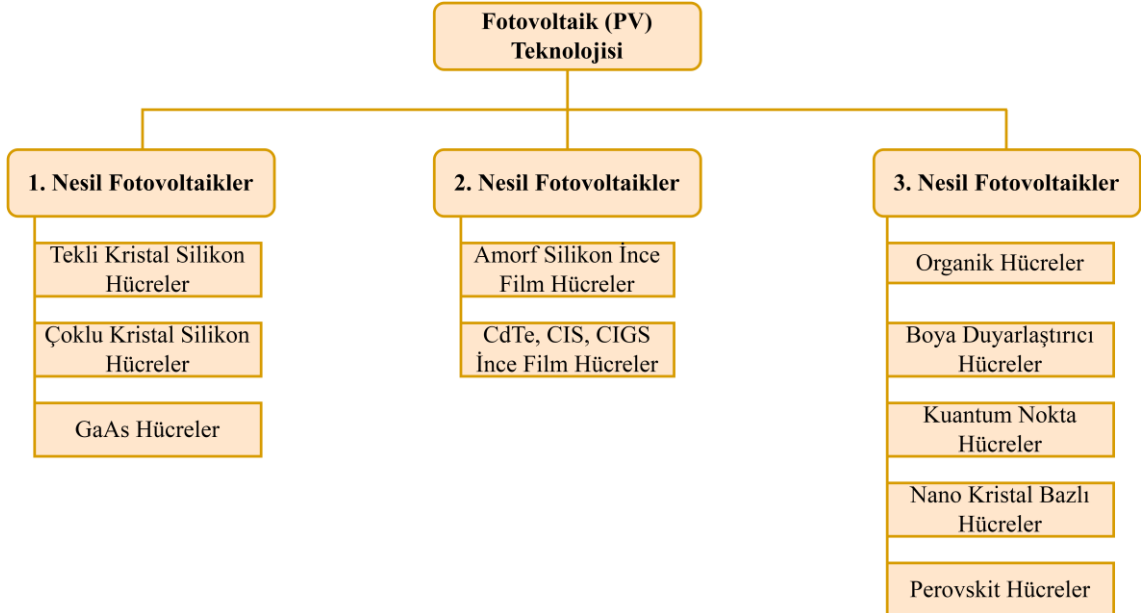
Günümüzde rüzgâr, hidroelektrik ve fotovoltaikler (PV), elektrik enerjisini elde etmede önemli bir potansiyeli temsil etmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde dünya çapında, ana elektrik şebekesine geniş çapta entegre edilmiş yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi ve rüzgar enerjisidir (Al-Shetwi ve ark., 2020).

CO₂ miktarını azaltmak ve küresel enerji talebini karşılayabilmek için yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki en büyük potansiyel ve gelecekteki büyük ölçekli elektrik üretiminde en güçlü alternatiflerden biri fotovoltaiklerdir; yani güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren enerjidir. Bir yıllık güneş ışığı, dünyanın bilinen fosil yakıt rezervlerinin tamamının enerjisinin yüz katından fazlasını sağlar. (Sum ve Mathews, 2014). Güneş enerjisinin sonsuz ve hiç tükenmeyen bir enerji kaynağı oluşu, çevre dostu olması, gürültü kirliliğine sebep olmayışı ve sürdürülebilir bir enerji olması gelecekte ana enerji kaynağı olma potansiyeli taşımaktadır.

1.2. Fotovoltaik (PV) Teknolojisinin Gelişimi

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme sürecine fotovoltaik (PV) teknolojisi denir. Bu etki 1839’da Becquerel tarafından keşfedilmiş olup “Becquerel etkisi” olarak da adlandırılır ancak literatürde genellikle fotovoltaik etki olarak ifade edilmektedir. Fotovoltaik etki genel olarak ışığın yarıiletken tarafından soğurulması, elektron boşluk çiftlerinin oluşması ve elektron boşluk çiftlerinin ayrılması esasına dayanır. Güneş pilleri, fotovoltaik etkiye dayalı olarak çalışmaktadır.

Günümüze kadar gelen fotovoltaik teknolojisi Şekil 1.3’de görüldüğü gibi üç başlıkta sınıflandırılabilir; Birinci nesil fotovoltaikler (1GEN) hem monokristal hem de polikristal silisyum teknolojilerine ve galyum arsenite (GaAs) dayanmaktadır. İkinci nesil fotovoltaikler (2GEN), Amorf silikon (a-Si) ve mikrokristal silisyum (μ c-Si) ince film güneş pilleri, kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) güneş pillerini içerir. Üçüncü nesil fotovoltaikler (3GEN), nanokristal filmler, aktif kuantum noktaları, organik (polimer) bazlı güneş pilleri, boya duyarlı güneş pilleri (DSSC) ve perovskit güneş pillerini içerir (Jayawardena ve ark., 2013; Hao ve ark., 2014; Tonui ve ark., 2018; Rehman ve ark., 2023).



Şekil 1.3. Fotovoltaik (PV) Teknolojisi

1.2.1. Birinci Nesil Fotovoltaikler

Birinci nesil fotovoltaikler ticarileşmiş güneş pillerinde en yaygın kullanılan yarı iletken malzeme olan silisyum bazlı hücreleri (mevcut PV pazarının ~% 90'ı) ve GaAs temelli hücreleri içermektedir. Bunlar, üretimleri nispeten pahalı olsa da yüksek verimlilikleri nedeniyle en çok kullanılan hücrelerdir. Silisyumun yeryüzünde en bol bulunan ikinci malzeme olması (Kuhlmann, 1963), kararlı ve toksik olmayan bir element olması, mikroelektronik endüstrisi (entegre devreler, transistörler vb.) ile kolayca uyum sağlaması çok kullanılması yönündeki cazip özelliklerdendir (Sampaio ve González, 2017). Öte yandan, GaAs özellikle çok bağlantılı hücreler için kullanışlıdır. GaAs kullanılarak güneş ışığı spektrumunu soğurmak için birkaç mikron kalınlığındaki bir hücre yeterlidir, halbuki kristal silisyum 100 mikron veya daha kalın hücreler gerektirir. GaAs radyasyona karşı çok dayanıklıdır, performansları sıcaklıktan daha az etkilenir böylelikle uzay uygulamaları için idealdir (Moon ve ark., 2016).

Birinci nesil fotovoltaikler içinde yer alan silisyum tabanlı piller tek kristalli (m-Si) ve çok kristalli silisyum (p-Si) hücreler olmak üzere iki ana silikon bazlı hücre bulunmaktadır. Czochralski işlemiyle üretilen (Sampaio ve González, 2017) tek kristal silisyum hücreler büyük tek kristal ingotların, silisyum levhalara dilimlenmesiyle elde edilir. Bu işlem, çapları 10 ila 300 mm arasında değişen ve uzunlukları 50 cm ila 2 m arasında değişen kristallerin üretimine izin verir. Bununla birlikte, Czochralski (CZ) kristal büyütme yöntemi yüksek bir üretim maliyeti içerir (Kivambe ve ark., 2017).

Çok kristalli güneş pilleri çok sayıda farklı silikon kristalinden oluşur ve tek kristal silisyum hücrelere kıyasla çeşitli avantajlar sunarlar. Erimiş silisyum içeren bir grafit kalıbın soğutulmasıyla üretilen çoklu kristal silisyum (p-Si) hücrelerin üretilmesi daha ekonomiktir. Tek kristal silisyum hücrelere kıyasla verimi daha düşük olmasına rağmen, maliyeti ucuzdur (Roy ve ark., 2022). Böylelikle çoklu kristal silisyum hücreler ticari olarak en popüler güneş hücreleridir (Sharma ve ark., 2015). Ancak fotovoltaik piyasasında daha az maliyetli, daha kolay üretim metotlarıyla yüksek verimlilik sağlayan malzemeler PV araştırmacılarının ilgi odağıdır.

1.2.2. İkinci Nesil Fotovoltaikler

İkinci nesil güneş pilleri “ince film” olarak da bilinir ve birinci nesil fotovoltaiklerin yüksek maliyetlerini düşürmek amacıyla ince film teknolojilerine odaklanmaktadır. İkinci nesil fotovoltaiklerde kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum selenid (CIGS), mikrokristal silisyum ($\mu\text{c-Si}$) ve amorf silisyum (a-Si) kullanılan soğurucu malzemelerdendir. Bu cihazlar, püskürtme, fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme gibi düşük maliyetli geniş alan biriktirme teknikleri kullanılarak üretilir.

İkinci nesil fotovoltaikler silisyum bazlı güneş hücrelerine kıyasla daha ucuzdur ve yüksek soğurma katsayısına sahip malzemeler ile ihtiyaç duyulan malzeme miktarında önemli bir azalma söz konusudur. Sadece 1-2 μm kalınlığında bir katman yeterli olmaktadır. İkinci nesil fotovoltaikler, birinci nesil fotovoltaiklere göre üretim aşamalarının sayısını azaltır. Vakumlu ve vakumsuz prosesleri kullanabilir. Bununla birlikte bazı dezavantajlara da sahiptir; birinci nesil fotovoltaiklere göre daha düşük verimlilik elde edilir. Dış mekân kullanımlarında yüksek bozulmalar meydana gelmektedir. Amorf silisyum tabanlı güneş hücreleri nispeten düşük üretim maliyetleri nedeniyle ticari olarak başarılıdır. Fakat amorf bir malzemenin kristal düzeni yoktur ve mikrokristal silisyum oluşturmak için ek sıcaklık adımlarına ihtiyaç vardır.

İnce film güneş pilleri arasında kadmiyum tellür (CdTe) daha ucuz, ekonomik olarak uygun fotovoltaik (PV) cihazların geliştirilmesi için önde gelen adaylardan biridir. CdTe yaklaşık 1.5 eV’luk bir bant aralığının yanı sıra yüksek optik soğurma katsayısına ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Bu özellikler, CdTe’yi ince film güneş pillerinin tasarımı için ilgi çekici bir malzeme yapmaktadır. Fakat kadmiyum bileşeni insan vücudunda, hayvanlarda ve bitkilerde birikebilen bir ağır metal ve potansiyel toksik madde olarak kabul edilir. Zehirli Cd bazlı malzemelerin imhası ve geri dönüşümü oldukça pahalı olabilir ve çevremize ve topluma da zarar verebilir (Maehlum, 2015). Bu nedenle kadmiyum kullanımıyla ilişkili çevresel tehlike CdTe teknolojisindeki en önemli ana sorundur.

CIGS, bileşikteki elementlerin oranına bağlı olarak bant aralığı değeri 1.0-1.7 eV arasında değişen $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ genel formülüne ve doğrudan bant aralığına sahip yarı

iletken bir malzemedir (Niki ve ark., 2010). CIGS ince film güneş pillerinin avantajları, önemli bir bozulma olmaksızın uzun ömürlü olmalarıdır. CdTe ve CIGS güneş pilleri, n-tipi kadmiyum sülfür (CdS) tabakası ile p-tipi CdTe veya CIGS soğurucu tabaka arasındaki heteroeklem cihazlar oluşturur. Bu sistemlerin zorlukları farklı katmanlar arasındaki etkileşimler ve neme karşı hassasiyettir (Luceno-Sanchez ve ark., 2019).

1.2.3. Üçüncü Nesil Fotovoltaikler

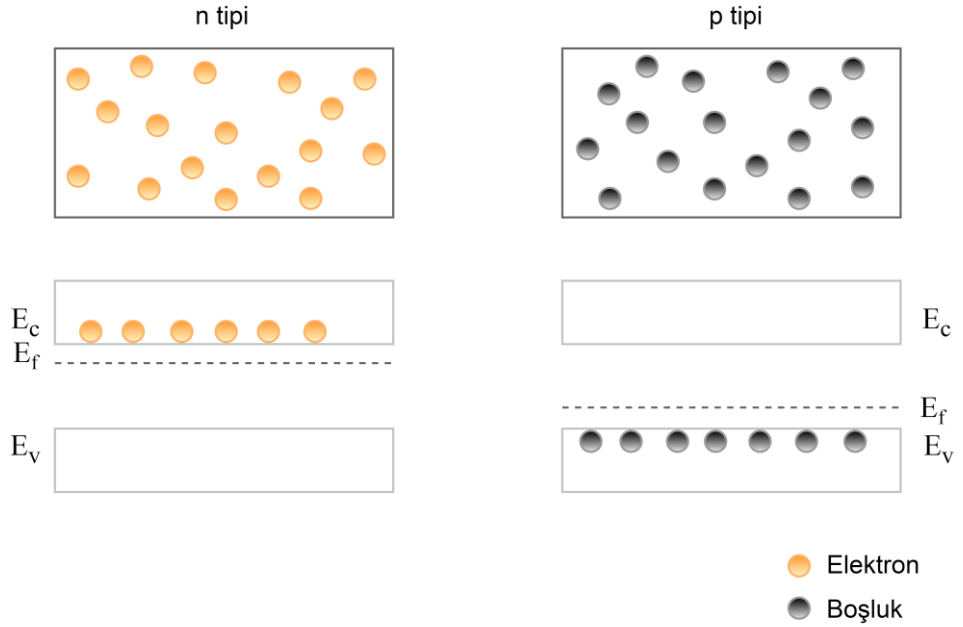
Üçüncü nesil fotovoltaikler gelecek vaat eden yeni teknolojilerdir. Üçüncü nesil fotovoltaiklere dahil edilen en önemli teknolojiler, Boya duyarlı güneş pilleri (DSSC), Organik ve polimerik güneş pilleri, Perovskit hücreleri, Kuantum nokta hücreleri içerir (Roy ve ark., 2022). Bu nesil fotovoltaikler hücrenin performansından ödün vermeden düşük maliyet ve kolay üretim potansiyeli sergilemiştir. Ayrıca büyük ölçekli üretime uygun olması, mekanik sağlamlık ve yüksek sıcaklıklarda yüksek verimlilik üçüncü nesil fotovoltaiklerin temel avantajlarıdır.

Bu teknolojiler içinde perovskit bazlı güneş pilleri son zamanlarda çok kısa bir süre içinde yüksek verim elde etme açısından beklentileri aşan bir fotovoltaik teknoloji olarak ortaya çıkmış ve fotovoltaik teknolojilerde devrim yaratmıştır. Perovskit güneş pilleri ilk olarak 2009'da rapor edilmiştir ve verimleri günümüze kadar % 3.8'den %25.8'e kadar yükselmiştir (Xie ve ark., 2023). Perovskit malzemenin geleneksel fotovoltaiklere göre sahip olduğu en büyük avantaj, yüksek soğurma katsayısına sahip olup ışığın farklı dalga boylarına tepki verebilme yeteneğidir (Roy ve ark., 2022). Güneş spektrumunda görünür bölgenin tamamını ultra ince filmlerle soğurmaya izin verir (Yin ve ark., 2014). Böylece maksimum ışıınımı elektriğe dönüştürmeye adaydır. Esnek bir alt tabaka üzerinde üretilmesi, farklı şekillerde uygulanmasına olanak sağlar. Perovskit bazlı güneş pilleri üretim yöntemlerinin basit ve düşük maliyetli elde edilmesi, ayrıca kolay üretilirlik ve ölçeklenebilirlik avantajlarına sahiptir (Razza ve ark., 2016). Bu özellikler, onları düşük maliyetli, yüksek verimli, ince, hafif ve esnek güneş modülleri üretmek için ideal adaylar haline getirir.

1.3. Güneş Pillerinin Temeli

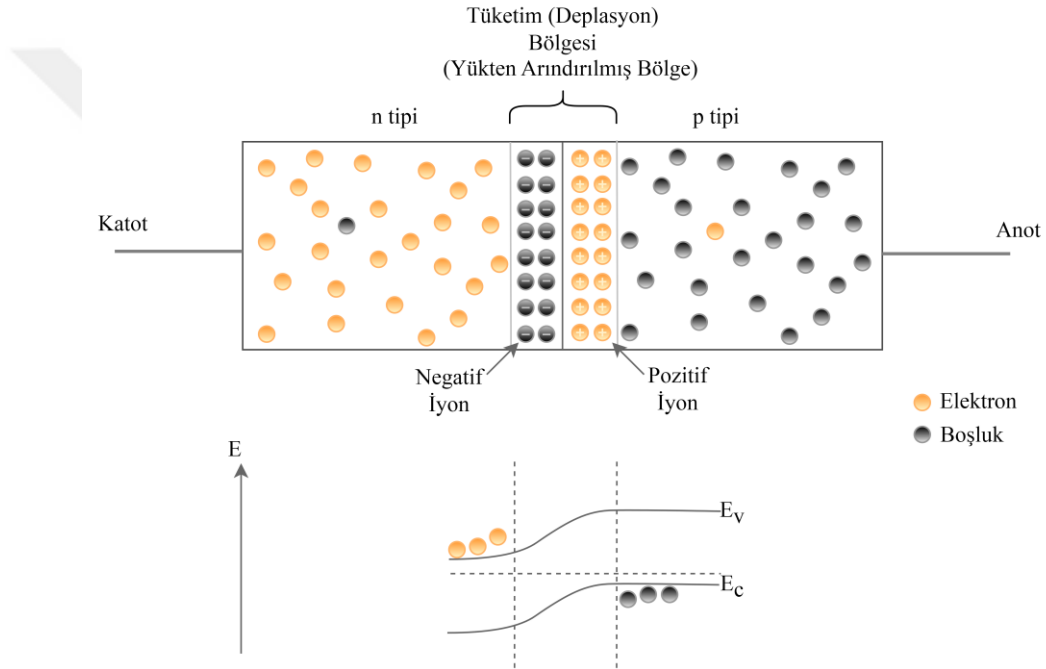
Güneş pillerinin temelini yarıiletken malzemeler oluştururlar. Yarıiletkenler günümüzde elektronikte, bilimsel çalışmalarda, enerji üretiminde ve birçok alanda kullanılmaktadır. Yarı iletken malzemeler katkısız (intrinsic) yarıiletkenler, n tipi yarıiletkenler ve p tipi yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Katkısız yarıiletkenlerin iletkenliklerinin artırılması için katkılanması gereklidir.

Silisyum veya Germanyum elementlerinin V. grup elementlerinden biriyle katkılanmasıyla n tipi yarıiletken, III. grup elementlerinden birinin katkılanmasıyla da p tipi yarıiletken elde edilir. n tipi yarıiletkenlerde her katkı atomuna karşılık bir elektron oluşurken, p tipi yarıiletkenlerde her katkı atomuna karşılık bir boşluk oluşur. Dolayısıyla n tipi yarıiletkenler elektronlarca zengin, p tipi yarıiletkenler ise boşluklarca zengindir (Şekil 1.4). Katkı maddelerinin yarı iletkene dahil edilmesi fermi enerjisinde bir kaymaya neden olur. n tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesi iletim bandına doğru kayarken p tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesi valans bandına doğru kayar. Kayma miktarı, katkılanan maddenin yoğunluğuna bağlıdır.



Şekil 1.4. n-tipi ve p tipi yarıiletken

p tipi ve n tipi yarıiletkenler birleştirildiği zaman, n tarafındaki serbest elektronların bir kısmı eklemın diğer tarafına difüzyon ederler ve boşluklar ile birleşirler. N tipi yarıiletken elektron verdiği için negatif yüklü iyon, p tipi yarıiletken ise elektron aldığı için pozitif yüklü iyon oluşturur. Bu yük geçişi her iki bölgenin Fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar devam eder. Elektronların p tarafına difüzyonu, yine p tarafındaki azınlık elektronları tarafından itilme sonucu bir noktada durdurulur. Oluşan bu negatif ve pozitif iyon bölgesi “yükten arındırılmış bölge” (deplasyon bölgesi ya da geçiş bölgesi) olarak isimlendirilir. Böylelikle eklemde Şekil 1.5’de görüldüğü gibi yapısal bir elektrik alan oluşmuş olur.



Şekil 1.5. p-n eklem şematik gösterimi

P ve n tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan p-n eklem yapısı bir çeşit ışığa duyarlı diyottur. Bu yapının güneş pili olarak çalışabilmesi için eklem yüzeyine ışığın düşürülmesi gerekir.

1.4. Güneş Piliin Temel Çalışma Prensibi

Güneş pilleri yüzeyine ışık düşürüldüğü zaman bu ışığın bir kısmı yarı iletken yüzeyinden geri yansır bir kısmı yarıiletkendten geçer bir kısmı ise yarıiletken tarafından soğrulur. Yüzeylerine gelen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen

sistemlere fotovoltaik piller ya da güneş pilleri adı verilir. Güneş pilleri Fotovoltaik (PV) ilkeye dayalı olarak çalışır. Fotovoltaik enerji dönüşümü 4 temel esasa dayanmaktadır. Bunlar;

- Işığın yarıiletken tarafından soğurulması
- Elektron boşluk çiftlerinin oluşması
- Elektron boşluk çiftlerinin ayrılması
- Yüklerin dış devreye aktarılması

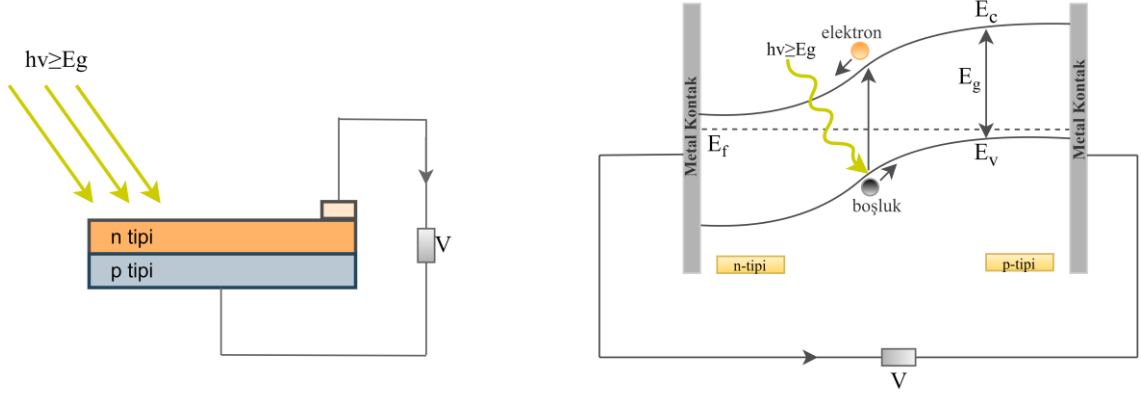
Işık, güneş enerjisinin foton paketlerinden oluşmaktadır. Bu fotonlar, güneş spektrumunun farklı dalga boylarına karşılık gelen farklı miktarlarda enerji içerir. Her bir foton, dalga boyuna bağlı olarak Denklem 1.1'deki bağıntıyla birlikte belirli bir enerji taşır;

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

E fotonun enerjisi, h plank sabiti, c ışık hızı ve λ fotonun dalga boyudur. Fotovoltaik etki, yarı iletken bir malzeme, yarı iletkenlerin bant aralığına eşit veya daha yüksek enerjili fotonlarla aydınlatıldığında meydana gelir. Tüm yarı iletken malzemeler için bant aralığı, valans bandının üstü ile iletim bandının altı arasındaki enerji farkıdır. Valans bandı (değerlik bandı), atom çekirdeğinden en uzaktaki elektronların enerji seviyesidir. İletim bandı, malzemeyi iletken hale getirmek için elektronların uyarılması gereken enerji seviyesidir. Bu enerji seviyesi, atomların temel durumundaki elektronlar tarafından işgal edilmez. Organik yarı iletkenler için bu enerji seviyeleri HOMO-LUMO olarak da adlandırılır ve işgal edilen en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ile en düşük boş moleküler orbital (LUMO) olarak tanımlanır. Elektronun valans bandından/HOMO'dan iletim bandına/LUMO'ya çıkabilmesi için bir enerji ile uyarılması gerekmektedir.

Güneş pilinin bant aralığından büyük ya da bant aralığına eşit enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğrulduğunda, enerjinin korunumu yasasına göre fotonun enerjisi yarıiletkenin valans bandındaki elektronlara aktarılır ve elektronun iletim bandına çıkmasını sağlar. Valans bandından iletim bandına geçen her bir elektron yerinde bir boşluk bırakır. Böylelikle elektron-boşluk çiftleri oluşur. Bu olay p-n eklemin tüketim

bölgesinde meydana gelmişse yükler buradaki yapısal elektrik alan tarafından itilerek birbirinden ayrılır. Birbirinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri yeniden birleşmeden kontaklara aktarılırsa eklem uçlarında bir güç çıkışı oluşturur. Şekil 1.6'da p-n eklem yapısı ve bant yapısı görülmektedir.

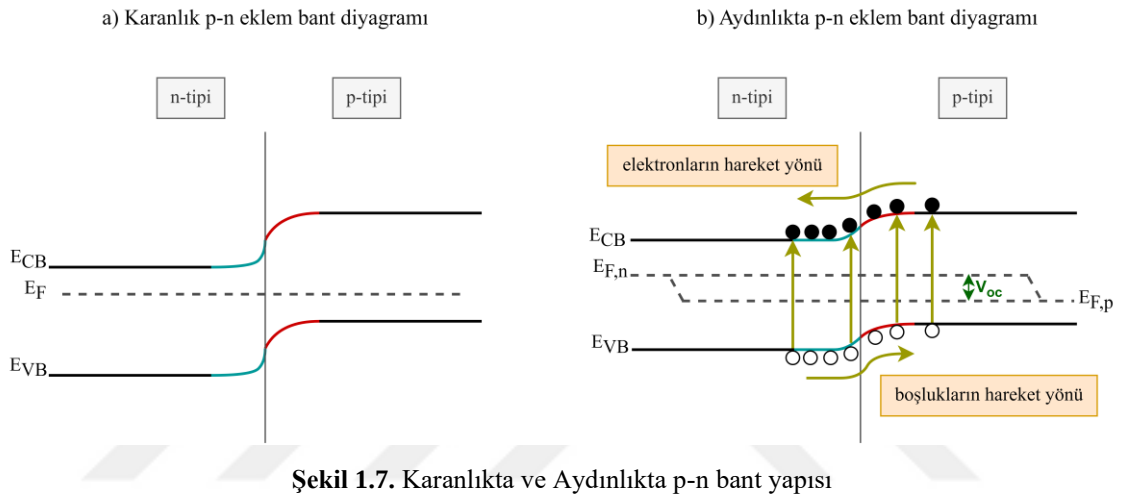


Şekil 1.6. p-n eklem yapısı ve bant yapısı

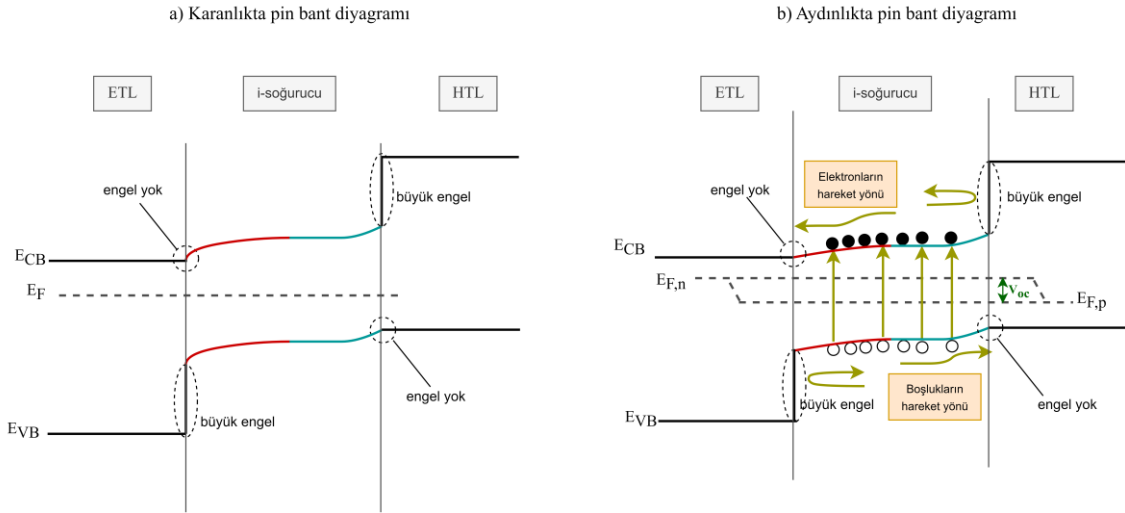
p-n heteroyapılı güneş pilleri günümüzde kristal silikon güneş pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu heteroyapılar içerdikleri malzemelerin spektral özelliklerinden dolayı 400-500 nanometre dalga boyu aralığında nispeten düşük ışık soğurma verimliliğine sahiptir. p-n yapısına -i (instruct) bölgesinin dahil edilmesi ile oluşturulan p-i-n yapısı daha kısa dalga boyuna olan duyarlılığı artırmanın bir yolu olarak görülmüştür. Yapıya -i bölgesinin dahil edilmesi, spektrumun daha kısa dalga boyu bölgesine doğru bir absorpsiyon kaymasına izin verir, bu da heteroyapının görünür spektrumun mor ve mavi bölgesindeki dalga boylarına duyarlılığını önemli ölçüde artırabilir (Strekert ve Marsov, 2022). Genellikle kristal silikon güneş pilleri p-n cihaz yapısına sahip olup, amorf silikon güneş pilleri ve perovskit güneş pilleri p-i-n cihaz yapısına sahiptir.

Bir p-n eklemnin açık devre koşullarında karanlık ve aydınlık ortamdaki enerji bant diyagramları Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Karanlıkta bağlantı noktası elektronik dengededir ve Fermi seviyesi tüm cihaz üzerinde sabittir. n- tarafında ve p- tarafında bükülen bant sırasıyla mavi ve kırmızı ile işaretlenmiştir. Aydınlatma anında elektron-boşluk çiftleri meydana gelir. Bu durumda iletim bandındaki (n) elektron sayısı ve değerlik bandındaki (p) boşluklar artık tek bir Fermi seviyesi ile tanımlanamaz. Elektronlar ($E_{f,p}$) ve delikler ($E_{f,n}$) için ayrı Fermi seviyeleri tanımlanmalıdır. Bu yarı Fermi seviyesi (quasi-Fermi) olarak da adlandırılır. Yarı-Fermi seviye bölünmesinin

miktarı, iletim bandındaki elektronların ve değerlik bandındaki boşlukların potansiyel farkıdır ve cihazın açık devre gerilimine (V_{OC}) eşittir. Boşluklar p tarafına doğru hareket ederken elektronlar n tarafına doğru hareket etmeye başlar. Açık devre koşullarında, yük taşıyıcılarının ayrılması, Şekil 1.7 b)'de açık mavi ve açık kırmızı renk ile gösterildiği gibi, bant bükülmesiyle düz bant durumuna doğru yönelir. Açık devre koşullarında bile, genellikle bant bükülmesi tam olarak düz bant koşullarına ulaşamayacaktır. Karanlıkta bükülen bant bu nedenle aydınlatma altında cihazın açık devre voltajını sınırlandırmaktadır.

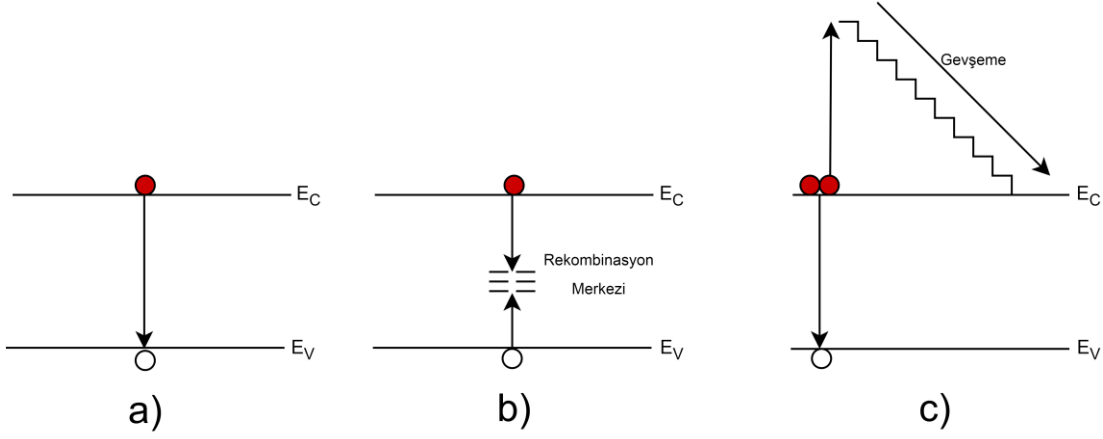


Şekil 1.8'de sırasıyla karanlıkta ve aydınlatma altında açık devre koşullarında bir pin bağlantı cihazını göstermektedir. Soğurucu malzeme düşük iş fonksiyonlu elektron iletim tabakası (ETL) ve elektronları bloke eden büyük iş fonksiyonlu boşluk iletim tabakası (HTL) arasına yerleştirilmiştir. Soğurucu malzemenin taşıyıcı konsantrasyonu, n tipi malzemedeki elektron konsantrasyonuna ve p tipi yarıiletken malzemenin boşluk konsantrasyonuna göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, bant bükülmesinin yalnızca soğurucu malzemenin içinde görüldüğü ve malzemenin kalınlığı boyunca uzandığı varsayılır. Her elektron-boşluk çifti soğurucu potansiyel içinde uyarılır, bu da yük taşıyıcıların daha verimli bir şekilde ayrılabilceği anlamına gelir. Elektron iletim tabakasının minimum iletkenlik bandı ile soğurucu, aynı zamanda boşluk iletim tabakasının maksimum valans bandı ile soğurucu tam olarak hizalanmıştır, böylece bir bariyer veya voltaj kaybına sebep olabilecek hiçbir ofset ortaya çıkmaz (Hellmann, 2021). Bu nedenle, soğurucu malzemeye uygun temaslar oluşturan doğru yük iletim katmanlarının seçimi önemlidir.



Şekil 1.8. Karanlıkta ve Aydınlıkta pin bant yapısı

Fotovoltaik dönüşümde güneş ışığını soğuracak malzemenin bant aralığının, güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin ayrılabilmesine izin verebilecek özellikte bir yarıiletken olması gerekmektedir (Columbus, 2014). Uyarılmış elektronlar ve boşluklar yeniden birleşmeye ve temel durumuna geri dönme eğilimindedir. Bu durum güneş pili veriminin azalmasına yol açar ve istenmeyen bir durumdur. Elektron boşluk çiftlerinin akıma katkıda bulunamadan yeniden birleşmesine rekombinasyon denir. Rekombinasyon, güneş pillerinde foton ile üretilmiş yük taşıyıcılarında meydana gelen kayıp mekanizmalarından biridir. Foton enerjisi ile serbest kalmış elektronun dış devreye aktarılamadan boşlukla birleşerek yok olması durumunda ortaya çıkar. Uyarılmış elektron temel duruma dönmek için valans bandındaki bir boşlukla yeniden birleşmesi ışımalı veya ışımasız gerçekleşebilir. İşlem sırasında enerji, fotonlar (ışımalı rekombinasyon) veya ısı (ışımasız rekombinasyon) şeklinde açığa çıkar (Esfahani, 2015). Rekombinasyon işlemi, foton formunda enerji açığa çıkarırsa, bu rekombinasyon sürecine ışımsal rekombinasyon denir. Fakat fonon biçiminde enerji salınımı meydana gelirse bu rekombinasyon ışımsız rekombinasyon olarak adlandırılır. Şekil 1.9'da gösterildiği gibi üç ana rekombinasyon mekanizması vardır; a) banttı banta rekombinasyon, b) tuzak destekli rekombinasyon (Shockley-Read-Hall rekombinasyonu) ve c) Auger rekombinasyonudur (Esfahani, 2015).



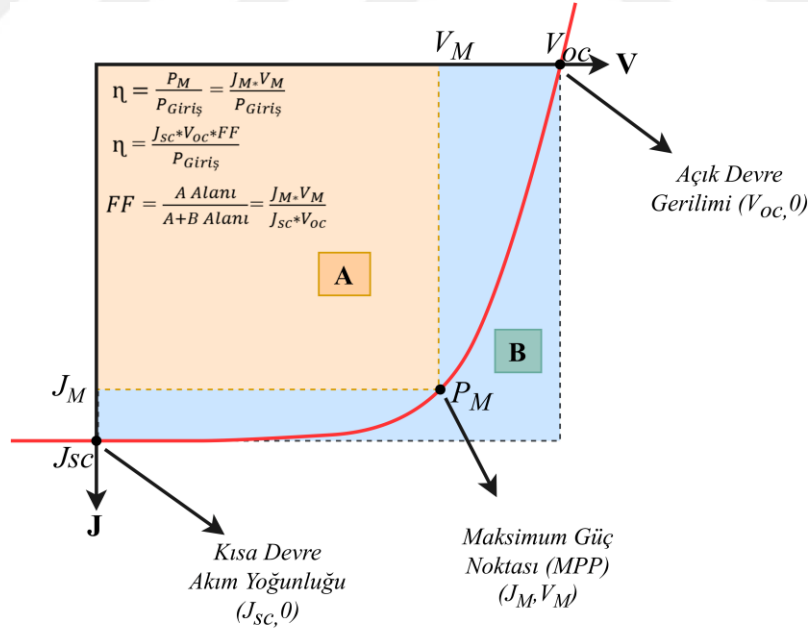
Şekil 1.9. Rekombinasyon Mekanizmaları

Uyarılmış yükler farklı yollarla yeniden birleşebilir. Banttan banta rekombinasyonda, iletim bandındaki bir elektron doğrudan değerlik bandındaki bir boşlukla yeniden birleşir. Banttan banta rekombinasyon tipik olarak ışıınımsaldır yani enerji farkı bir foton şeklinde açığa çıkar. Cihazdaki bant aralığı içindeki kusur yoğunluğu yüksekse, elektron ve boşluklar cihazdaki Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu olarak adlandırılan tuzak durumları yoluyla da yeniden birleşebilir. Şekil 1.9 (b), iletim bandında bir elektronun ve valans bandından bir boşlukla malzeme bant aralığındaki bir tuzak durumunda nasıl yeniden birleşebileceğini göstermektedir. Buna tuzak destekli veya Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu denir. SRH rekombinasyonu hem bulk malzemede hem de arayüzeylerde meydana gelebilir. SRH rekombinasyonunda enerji salınımı genellikle ışıınımsızdır ve numunenin ısınmasıyla sonuçlanır. Çok sayıda çalışma PGP'lerinde tuzak destekli rekombinasyonun V_{OC} değerini düşürdüğünü göstermektedir (Marinova ve ark., 2017). Çok yüksek doping seviyesinde, rekombinasyondan salınan enerjinin başka bir taşıyıcıyı harekete geçirmek için transfer edildiği Auger rekombinasyonu da gözlemlenir. Rekombinasyondan salınan enerji başka bir taşıyıcıya aktarılır ve onu daha yüksek bir duruma uyarır. Uyarılmış elektron daha sonra ısıl işlemle iletim bandına doğru gevşer. Güneş pili uygulamalarında, tipik olarak düşük doping seviyelerinde Auger rekombinasyonu ihmal edilebilir, ancak hem banttan banta hem de SRH rekombinasyonu önemlidir (Joshi, 2016). PGP'lerinde baskın rekombinasyon mekanizması, ışıınımsız tuzak destekli rekombinasyondur (Marinova ve ark., 2017) Yüksek verimlilik elde etmek için, ışııkla üretilen yük taşıyıcılarının yeniden birleşmeden önce elektrotlarda toplanması çok önemlidir (Hossain, 2018).

1.5. Güneş Piliin Çıkış Karakteristikleri

Uzaydaki güneş ışınımı dünya atmosferindeki gazlarla reaksiyona girip enerji kaybettiği için yeryüzüne ulaşan ışıınımdan farklı enerjiye sahiptir. Aynı zamanda güneş ışıınıımı dünyanın neresinde ölçüldüğüne bağlı olarak, yükseklik değişimleri ve havadaki nem oranı gibi nedenlerle de değişir. Bu nedenle, güneş pillerini ölçmek için kullanılan evrensel hava kütlesi katsayısı AM1.5'tir. Bu, 48.2°'lik güneş zenith açısına bağlı olarak 1,5 atmosferik kalınlığa sahiptir ve güneşten gelen güç yoğunluğunu 1000 W/m² verir (NREL, 2024b). Güneş pilinin ölçümü genellikle güneş ışığı ile aynı yoğunluğa ayarlanmış bir iç mekân ışığı kullanılarak yapılır. Işık aydınlatması altında voltaj taramalı bir kaynak ölçer kullanılarak cihaz akımı ölçülür.

Güneş pili karakteristikleri 4 temel parametre ile tanımlanır. Bu parametreler enerji dönüşüm verimi (η), açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}) ve doluluk faktörüdür (FF) (Fill Factor). Şekil 1.10'da bir güneş piline ait örnek I-V grafiğı gösterilmektedir. I-V eğrisi, aydınlatma sırasında uygulanan gerilimin değiştirilmesiyle ölçülen akımın ilişkisini ifade eder.



Şekil 1.10. Güneş Pili I-V Grafiğı

Enerji dönüşüm verimi (η) pilin performansını ifade etmektedir. Enerji dönüşüm verimi pilden elde edilen en yüksek gücün (P_M), pil üzerine düşen güce (P_{input} ya da $P_{giriş}$) oranı olup Denklem 1.2'deki gibi ifade edilir;

$$\eta = \frac{P_M}{P_{Giriş}} \quad (1.2)$$

Pilden geçen akımın sıfır olması durumunda, pil uçlarından ölçülen gerilim açık devre gerilimi (V_{OC}) olarak tanımlanırken, pilinin uçları arasına uygulanan gerilim sıfır olduğunda pilden geçen akıma kısa devre akımı (I_{SC}) denir. Kısa devre akımı, ışık ile taşıyıcıların üretilmesine ve toplanmasına bağlıdır. Bu nedenle kısa devre akımı, gelen ışık spektrumu, aktif katmanın soğurma katsayısı ve kalınlığı, güneş hücresinin alanı gibi çeşitli optik ve elektriksel faktörlerle ilişkilidir.

Kısa devre akımının (I_{SC}), güneş pilinin yüzey alanına (A) oranı, akım yoğunluğu (J_{SC}) (mA/cm^2) olarak tanımlanır ve yüzey alanı (aktif alan) bilinen bir hücre üzerinde ölçümler yapıldığında, kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) kullanılır ve $J_{SC}=I_{SC}/A$ şekilde ifade edilir.

Doluluk Faktörü (FF) güneş pilinin maksimum çıkış gücünü, açık devre gerilimi ve kısa devre akımına bağlı olarak tanımlamak için kullanılan bir parametredir ve Şekil 1.10'daki iç kare (A) alanının, dış kare ($A+B$) alanı oranına eşittir. Bu durumda bir güneş pilinin doluluk faktörü (FF) Denklem 1.3 ile belirlenir;

$$FF = \frac{A \text{ Alanı}}{A+B \text{ Alanı}} = \frac{J_M * V_M}{J_{SC} * V_{OC}} \quad (1.3)$$

Burada, V_M ve J_M sırasıyla maksimum güç noktasındaki gerilim ve akım yoğunluğudur. Denklem 1.2'yi tekrar düzenlersek;

$$\eta = \frac{P_M}{P_{Giriş}} = \frac{J_M * V_M}{P_{Giriş}} \quad (1.4)$$

veya

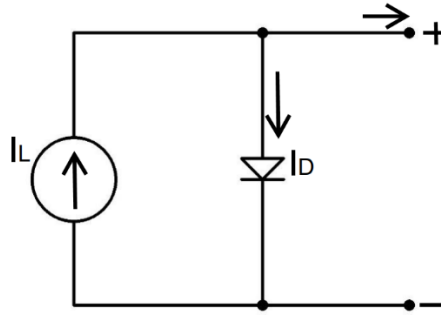
$$\eta = \frac{J_{SC} * V_{OC} * FF}{P_{Giriş}} \quad (1.5)$$

olarak ifade edilir. Güneş pili ölçümleri sabit bir ışık kaynağı altında uygulanan gerilime karşılık ölçülen pil akımları kaydedilerek yapılır. Elde edilen sonuçlarla pil verimi hesaplanır.

1.6. Güneş Piliin Elektriksel Eşdeğer Devresi

Güneş pilleri p-n ekleminden oluşan ve p-n eklemi ışığa maruz kalan bir yarıiletkenidir (Walker, 2001; Villalva ve ark., 2009). Güneş pilinin elektriksel davranışını tam olarak tanımlayan bir matematiksel model oldukça önemlidir.

İdeal bir güneş pili Şekil 1.11'deki gibi doğrultucu bir diyot ile paralel bağlanmış bir akım kaynağı ile temsil edilebilir. Karşılık gelen I-V karakteristiği, Shockley güneş pili denklemi ile açıklanmaktadır.



Şekil 1.11. İdeal Güneş Pili Modeli

Güneş yokken pil basit bir p-n eklem diyot olarak davranır. Bu durumda karakteristik diyot akımı olarak ifade edilen Shockley eşdeğeri ile kontrol edilir (Chin ve ark., 2015);

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{AkT} \right) - 1 \right) \quad (1.6)$$

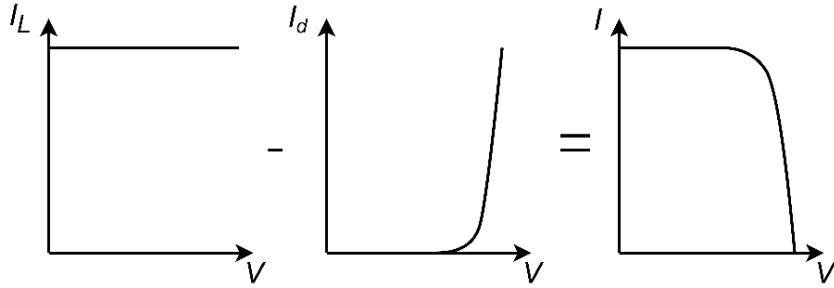
Bu denklemden; I_D karanlık akımı (A), I_0 saturasyon akımı (A), V pil gerilimi, q elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C), A diyot idealite katsayısı, k Boltzman sabiti ($1,38 \times 10^{-19}$ J/K) ve T sıcaklıktır (K).

Akımlar arasındaki ilişki Denklem 1.7 ile ifade edilir;

$$I = I_L - I_D \quad (1.7)$$

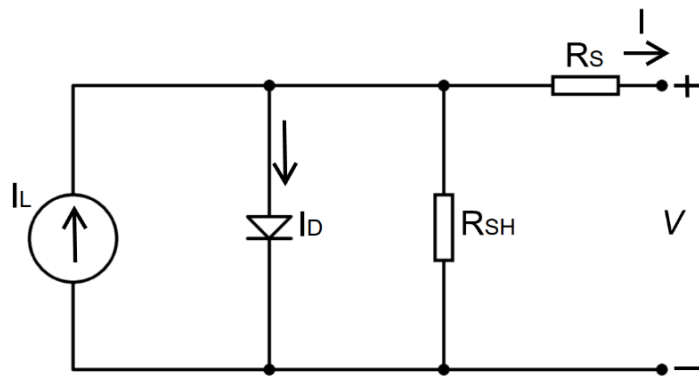
Üretilen fotoakım (I_L) ve diyot akımı (I_D) arasındaki fark net akım “I” ya eşittir ve I-V grafiği Şekil 1.12’deki ve Denklem 1.8’deki gibi elde edilir;

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1 \right) \quad (1.8)$$



Şekil 1.12. I-V Karakteristiğinin elde edilmesi

Güneş pilleri pratikte ideal değildirler ve kayıplar söz konusudur. Gerçekte malzeme ve elektrot yüzeyi arasındaki kontak direncinden dolayı oluşan kayıplar nedeniyle malzeme direnci ve elektrot direncinin göz önüne alınması gerekir. Ayrıca kristal kusurlarından dolayı da kayıplar söz konusudur. Böylelikle ideal diyot modeline seri (R_S) ve paralel (şant) (R_{SH}) dirençler dahil edilerek bu kayıplar gösterilir. Bir akım kaynağı, bir diyot, seri ve paralel dirençlerden meydana gelen tek diyot R_{SH} modeli Şekil 1.13’ te gösterilmiştir (Chin ve ark., 2015);



Şekil 1.13. Tek Diyot R_{SH} Modeli

Bu devreye Kirchoff'un Akım Kanunu uygulandığında pilin çıkış akımı, diyot akımı ve R_{SH} direncinden kaynaklanan akımın üretilen fotoakımdan çıkarılmasıyla elde edilir;

$$I_L - I_D - I_{SH} - I = 0 \quad (1.9)$$

Denklem 1.8'i düzenlersek çıkış akımı;

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (1.10)$$

elde edilir.

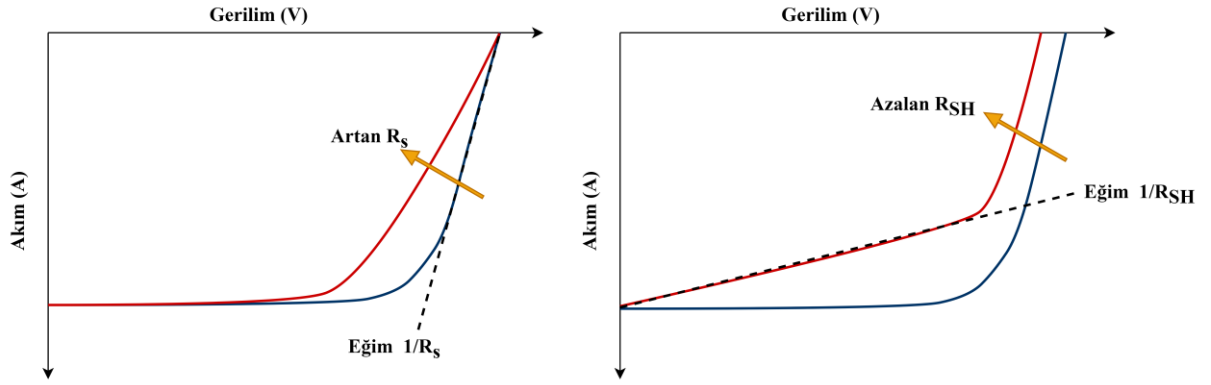
Diyot üzerine düşen gerilim V_D , çıkış gerilimi ve seri direnç üzerine düşen gerilimin toplamıdır;

$$V_D = V + IR_S \quad (1.11)$$

Ve pilin çıkış akımı aşağıdaki Denklem 1.9 hesaplanır;

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (1.12)$$

Seri direnç (R_S), yük taşıyıcılarının hücredeki tüm katmanlar boyunca hareket etmesinden kaynaklanır ve yük taşıyıcılarının hücre içinde engellenmeden hareket etmesine izin vermek için mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Hücredeki yük taşıyıcıları için alternatif yolları engellemek için ise paralel direncin (R_{SH}) mümkün olduğunca yüksek olması gerekmektedir. Dolayısıyla R_{SH} 'nin sonsuza ($R_{SH} \rightarrow \infty \Omega$), R_S 'nin sıfıra yakın ($R_S \rightarrow 0 \Omega$) olması istenir. Gerçekte, I-V eğrisinin şekli büyük ölçüde her iki dirence de bağlıdır. R_S ve R_{SH} değerleri sırasıyla V_{OC} ve I_{SC} yakınındaki eğime karşılık geldiğinden her iki direncin değeri, V_{OC} ve I_{SC} 'deki eğimlerle tahmin edilebilir. Şekil 1.14 a) R_S arttığında IV eğrisinin nasıl değiştiğini gösterir. Şekil 1.14 b) ise, R_{SH} azaldığında IV eğrisinin nasıl değiştiğini ve R_{SH} 'nin I_{SC} 'deki IV eğrisinin eğimi ile tanımlandığını gösterir.



Şekil 1.14. R_s ve R_{SH} dirençlerinin I-V karakteristiğine etkisi

Paralel (R_{SH}) direnci çok düşükse hücrenin performansı ciddi şekilde etkilenir. Düşük R_{SH} direnci genellikle, katmanlar arasındaki istenmeyen parçacıklar veya hasarlı yüzey katmanları gibi yüzey kusurlarından kaynaklanır. Seri direnç ise esas olarak üst ve arka metal kontaklarda oluşan dirençten kaynaklanmaktadır. Seri ve paralel direnç kayıpları pilin doldurma faktörünü (FF) büyük ölçüde etkilemektedir. Seri direncin küçük, paralel direncin yüksek olması yüksek FF sağlar ve dolayısıyla daha yüksek hücre verimliliğine neden olur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Nano yapılı malzemeler, yeni nesil nano yapılı güneş pillerinde güneş enerjisi dönüşüm verimliliğinin büyük ölçüde iyileştirilmesi için en umut verici adaylardır (Shevaleevskiy, 2020). Son on yılda, yeni malzemeler ve gelişmiş hücre tasarımlarına odaklanarak PV araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Silikona benzer veya daha iyi seviyelerde performans gösterebilen (monokristal, polikristal ve amorf silikon gibi) hem kolayca bulunabilen hem de üretilmesi daha ucuz olan malzemeler araştırmacıların ilgi odağıdır. Bu yeni malzemeler arasında organikler, ince film yarı iletkenler, perovskitler, kuantum noktalar, karbon nanotüpler bulunmaktadır (Han, 2022).

Güneş pili endüstrisinde silikon en çok tercih edilen malzeme olarak kabul edilmektedir. Ancak, toprak mineralleri olan perovskitler son on yılda PV endüstrisinde devrim yaratmıştır (Ijaz ve ark., 2020). Perovskit güneş pilleri geleneksel fotovoltaik teknolojilerin yerine düşük maliyeti ve yüksek verimlilikleriyle bir yenilenebilir teknoloji seçeneği olarak, dünya çapında enerji üretimi ve iklim değişikliği alanındaki küresel zorlukları ele almak için ortaya çıkmıştır (Valadi ve ark., 2021). Perovskit güneş pillerinin güç dönüştürme verimliliği (PCE) laboratuvar ölçeğinde %25'i aşarak, onu geleneksel kristal silikon fotovoltaik teknolojilere uygun bir alternatif haline getirmiştir (Zhang ve Zhu, 2020). Perovskit güneş pillerinde verim gün geçtikçe artmaktadır ve bu da onu PV endüstrisinin geleceği olarak önemli kılmaktadır.

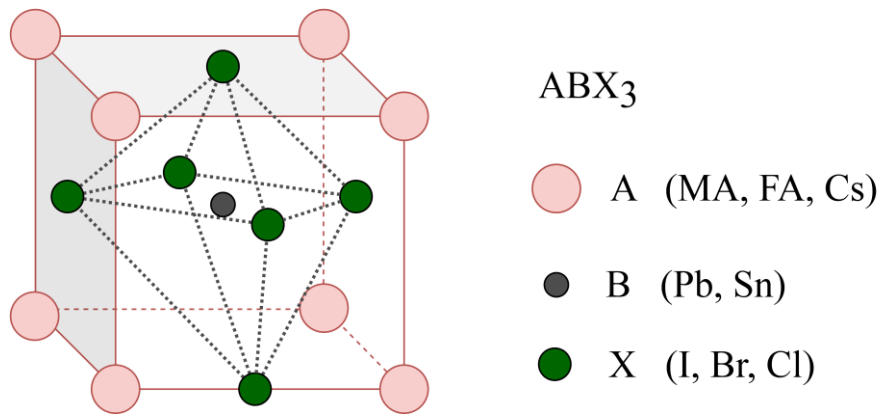
2.1. Perovskit Güneş Pilleri

Perovskit güneş pilleri çok kısa bir süre içinde düşük maliyetli ve yüksek verimli güneş pilleri elde etme açısından beklentileri aşan fotovoltaik teknolojiler olarak ortaya çıkmıştır. Perovskit malzemeler bir soğurucu olarak kullanılmaya elverişli optik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Doğrudan bant aralığına sahip olan perovskit malzemeler, 300 ila 800 nm arasında hemen hemen tüm görünür spektrumu kapsayan yüksek optik soğurma katsayısı, iyi elektriksel iletim özellikleri ve geniş soğurma bandı gibi özelliklere sahiptir. Soğurucu olarak perovskitin başarısı, yüksek taşıyıcı difüzyon uzunluğuna ve yüksek taşıyıcı mobilitesinden kaynaklanmaktadır. Perovskit içindeki elektron ve boşluk difüzyon uzunluğu, perovskit ortamın morfolojisine bağlı olarak,

elektronların arayüzey tabakalarına ve elektrotlara ulaşması için yeterince büyük olan 1 μm 'ye kadar çıkabilmektedir (Tonui ve ark., 2018). Elektronlar ve boşluklar üretildikten sonra 2 ps'de hızla ayrılmaktadır (Habibi ve ark., 2016b).

Perovskitler, güneş pillerinde ışığı soğurabilen bir tabaka olarak ortaya çıkan karakteristik ABX_3 kimyasal formülüne sahip organik-inorganik bileşikler sınıfıdır. Bu tip güneş pilleri perovskit güneş pilleri olarak adlandırılmaktadır. Perovskit bileşikleri ABX_3 genel kimyasal formülüne sahiptir ve adını 1839'da keşfeden bir Rus mineralog L.A. Perovski'den alarak perovskit olarak adlandırılır. Aktif bir katman olarak Perovskit, yüksek soğurma katsayısı, düşük kusur yoğunluğu, uzun difüzyon uzunlukları ve düşük eksiton bağlama enerjisi gibi birçok optiksel ve elektriksel özelliğe sahiptir. Bu özellikler, perovskiti ince film güneş pilleri için mükemmel bir alternatif haline getirmiştir.

Perovskit, ABX_3 bileşimine sahip kristal bir yapıdan oluşur; Şekil 2.1'de gösterildiği gibi "A" ve "B" farklı boyutlarda katyon, "X" ise bir anyondur. A, kübikoktahedral bir bölgede bulunan büyük bir katyondur ve +1 elektron boşluğuna sahiptir. (pembe renkte gösterilmiştir). B, oktahedral bölgede daha küçük bir katyondur (gri olarak gösterilmiştir) ve +2 elektron boşluğuna sahiptir. X ise bir anyondur. (halojen veya oksijen) (yeşil renkte gösterilmiştir).



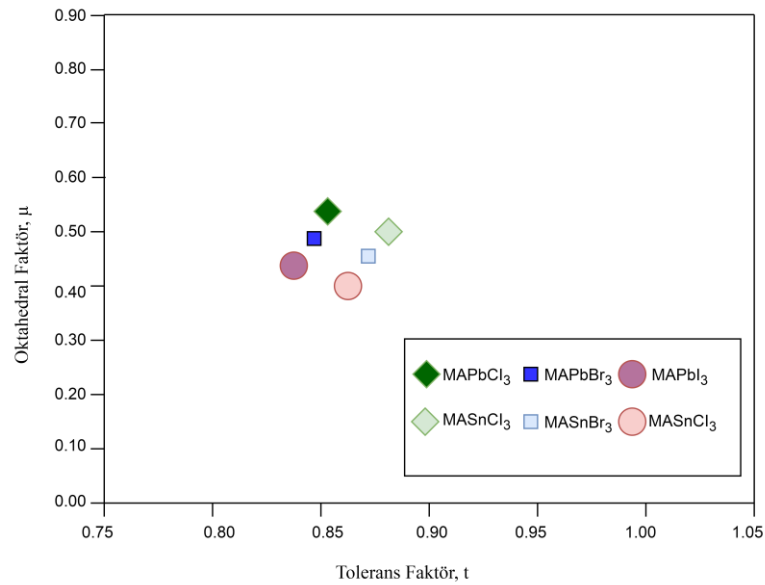
Şekil 2.1. Perovskit kristal yapısı

Kararlı bir perovskit yapı oluşturmak için her bir bileşenin boyutunun dikkatle değerlendirilmesi gerekir. Goldschmidt tolerans faktörü (t), iyonik yarıçapların oranından hesaplanan kristal yapıyı belirlemek için kullanılır. 3D perovskit yapısını oluşturmak için, A, B ve X'in iyonik yarıçapları Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 tolerans (t) ve oktahedral faktörleri (μ) karşılamalıdır (Li ve ark., 2008; Zhou ve Zhao, 2019).

$$t = \frac{R_A + R_B}{\sqrt{2}(R_B + R_X)} \quad (2.1)$$

$$\mu = \frac{R_B}{R_X} \quad (2.2)$$

Burada R_A A katyonunun yarıçapıdır, R_B B katyonunun yarıçapıdır ve R_X anyonun iyonik yarıçaplarıdır. Tolerans faktörü perovskit yapı oluşumunun sınırlarını gösterir ve en kararlı perovskit yapı $0.8 \leq t \leq 1$ sınırları aralığında olmalıdır (Roy ve ark., 2022). $t < 0.8$ koşulu, A bölgesi katyonunun çok küçük olduğu anlamına gelirken, $t > 1$ koşulu, A katyonunun çok büyük olduğu anlamına gelir. Tolerans faktörü (t), 1'den büyük olduğunda veya 0.8'den küçük olduğunda karşılık gelen perovskit yapıları genellikle kararsızdır (Luo ve ark., 2022). Belirtilen aralıktan sapma, perovskitlerle aynı özelliklere sahip olmayan alternatif yapıların ortaya çıkmasına neden olabilir. Oktahedral faktörün ise $0.44 < \mu < 0.9$ aralığında olması gerekir (Çel, 2022).



Şekil 2.2. 12 farklı perovskit malzemesine göre hesaplanmış t ve μ değerleri

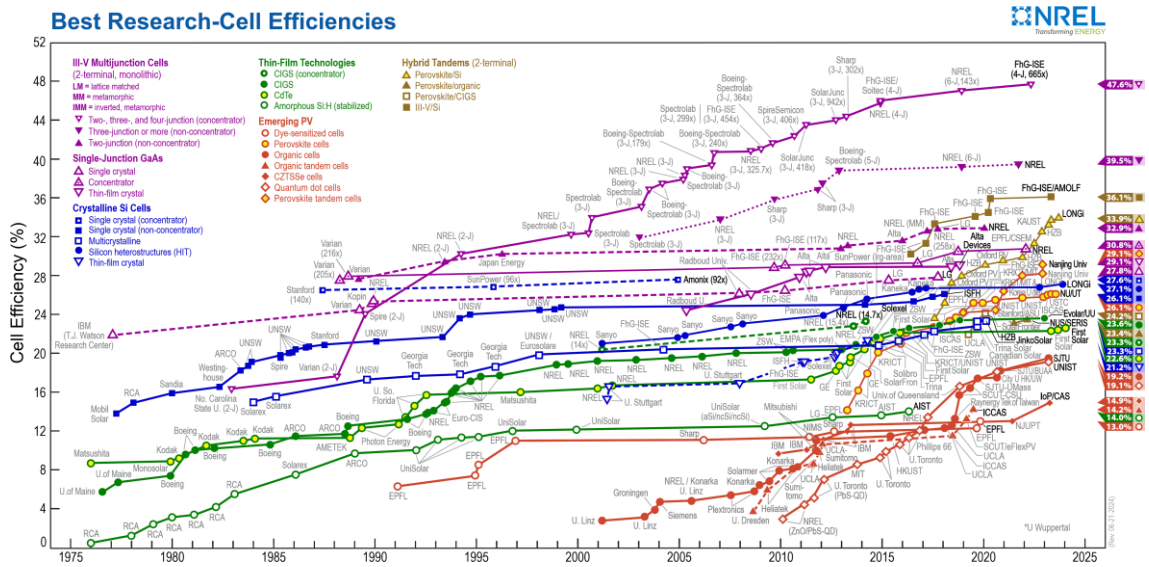
Şekil 2.2 perovskit oluşturmak için gerekli toleransı ve oktahedral koşulları sağlayan farklı malzemelerin kombinasyonunu göstermektedir. Bu durumda büyük organik katyon A genellikle metilamonyum (MA) (CH_3NH_3^+), formamidyum (FA) ($\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{=NH}_2^+$), etilamonyum ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3^+$) yada Sezyum (Cs)'dur. Daha küçük inorganik katyon genellikle kurşun (Pb^{2+}) veya kalay (Sn)'dır. X ise halojen anyon İyot(I), Klor (C) veya Brom (Br)'dur.

A, B ve X iyonları değiştirilerek birçok farklı perovskit yapı oluşturma olasılığı ortaya çıkar ve farklı oranlarda A, B ve X bileşikleri bant aralığının ayarlanabilmesini mümkün kılar. Doğrudan bant aralığı, yüksek absorpsiyon katsayıları, düşük eksiton bağlama enerjisi ve büyük dielektrik sabiti gibi perovskitlerin benzersiz özelliklerinden dolayı, lazerler, ışık yayan diyotlar, transistörler ve güneş pilleri gibi çeşitli optoelektronik uygulamalar için kullanılabilirler (Tonui ve ark., 2018). A ve B katyonlarının çeşitli konfigürasyonları ile ferroelektrik, manyetoelektrik, antiferroelektrik, ferromanyetik, yarı iletken ve süperiletken gibi farklı özelliklere sahip yapılar elde edilebilir (Habibi ve ark., 2016a).

Soğurucu malzemenin bant aralığı çok küçükse ($<1\text{eV}$) cihaz, kızılötesi bölgeden ekstra akım toplayabilecektir ancak açık devre gerilimi çok küçük olacaktır. Bant aralığı çok büyükse ($> 2\text{ eV}$) güneş ışınlarının sadece küçük bir kısmı toplanabilir. Yaklaşık $1.2\text{-}1.6\text{ eV}$ bant aralığına sahip bir yarı iletken, güneş pilleri üretimi için ideal bir malzemedir (Tonui ve ark., 2018).

Fotovoltaik hücreler için kullanılan perovskit materyalin spesifik bileşimi organometalik halojenürler olarak adlandırılır. İlk perovskit yarıiletken, sezyum kurşun halojen (CsPbX_3 , $\text{X}=\text{Cl}$, Br veya I) 1957 yılında Moller tarafından keşfedildi ve yüksek fotoiletkenlik özelliklerinden dolayı yarı iletken olarak sınıflandırıldı. İlk organik-inorganik hibrit perovskit, 1978 yılında Weber tarafından önerildi ve sezyum, metilamonyum katyonları ile değiştirildi (Weber, 1978). Soğurucu malzeme olarak $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ perovskit kullanan Miyasaka ve arkadaşları, 2006 yılında perovskiti fotovoltaik uygulamalarda ilk kullanan grup olarak %2.2'lik bir güç dönüştürme verimliliği elde ettiler (Kojima ve ark., 2006). Aynı grup 2009 yılında $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskiti boya duyarlı güneş pillerinin (Dye Sensitized Solar Cells-DSSC) performansını arttırmak amacıyla pile dahil etmiş ve % 3.8'lik bir güç dönüşüm verimliliği (PCE) sağlamışlardır (Kojima ve ark., 2009). Daha sonra farklı araştırma

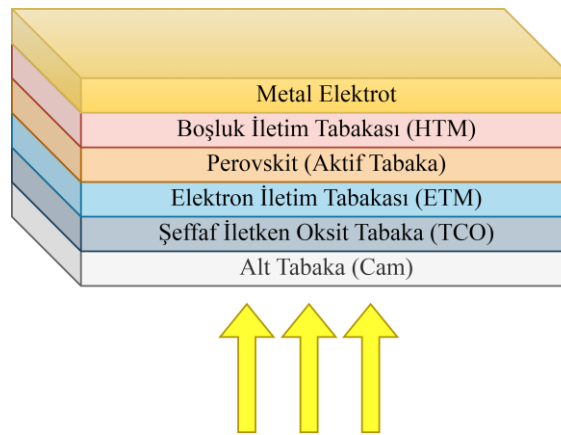
grupları, farklı iletim katmanları kullanarak perovskit güneş pillerini optimize etmeye başladılar. 2011 yılında, elektron iletim katmanı olarak TiO_2 kullanılarak % 6.5'lik bir güç dönüştürme verimliliği elde edildi (Im ve ark., 2011). 2012'de ilk katı hal perovskit güneş pilinin boşluk iletim tabakasında spiro-OMeTAD kullanılarak 500 saatlik uzun süre kararlılığı ve % 9.7'lik güç dönüşüm verimliliği elde edildi (Kim ve ark., 2012). 2013'te, Grätzel ve grubu %15'ten fazla güç dönüştürme verimliliği elde ettiler (Burschka ve ark., 2013). Yang grubu 2014 yılında % 19.3 verim elde ettiler (Zhou ve ark., 2014a). Bundan kısa bir süre sonra, birkaç grup %20'den fazla güç dönüştürme verimliliği elde ettiklerini bildirdi. 2015 yılında Seok grubu, perovskit tabakasını oluşturmak için MAI yerine FAI ve MABr'yi PbI_2 ile karıştırarak % 20.2 verimlilik bildirdi (Yang ve ark., 2015). 2016 yılında Gratzel grubu tarafından Cs, FA ve MA'nın üçlü katyon karışımını yapmak için Cs eklenerek % 21.1 verimlilik bildirilmiştir (Saliba ve ark., 2016). 2018 yılında Çin Bilim Akademisi araştırmacıları %23.3 verimlilikte perovskit piller elde ettiklerini bildirmişlerdir (Bhandari, 2022). 2021 yılında Jeong ve grubu FAPbI_3 tabanlı perovskit güneş pilleri ile sertifikalı 25.2'lik bir verim elde ettiler (Jeong ve ark., 2021). En yüksek performanslı fotovoltaiik hücrelerin kayıtlarını tutan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan perovskit güneş pilleri Şekil 2.3' de görüldüğü gibi verimlerini % 26.1'lik enerji dönüşüm verimliliğine çıkarmıştır (NREL, 2024a). Böylece perovskit bazlı güneş pillerinin verimi katlanarak artmıştır.



Şekil 2.3. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan güneş pili verimleri

Cihazın performansını ve kararlılığını arttırmak için organik katyonların (CH_3NH_3^+ ve $\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2^+$) inorganik katyonların (Cs_2^+ ve Sn_2^+) ve halojen anyonlarının (Br , Cl ve I) birçok kompoziti kullanılmıştır. Son yıllarda metilamonyum kurşuniyodür (MAPbI_3) perovskit yaygın olarak kullanılan güneş pilleri arasındadır (Asghar ve ark., 2017) ve iyi bir verimlilik göstermektedir (Prasanthkumar ve Giribabu, 2016). Bu perovskit sınıfı, fotovoltaik uygulamalar için önemli olan yüksek soğurma katsayısı, geniş bant aralığı, elektron ve boşlukların verimli bir şekilde taşınması nedeniyle üstün ışık soğurma özelliklerine sahiptir (Djurišić ve ark., 2017). MAPbI_3 soğurucu, yaklaşık olarak 1.55 eV'luk bir doğrudan bant aralığına yüksek elektron mobilitesine ($800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) ve görünür bölgede yüksek soğurma katsayısına (10^5 cm^{-1}) sahiptir (Marinova ve ark., 2017). Böylelikle yüksek yoğunlukta foton ile uyarılmış yükler ince bir perovskit tabakası ile oluşturularak verimli ışık absorpsiyonu sağlar. MAPbI_3 'ün valans ve iletim bandı, yalnızca Pb ve I orbitallerinden oluşturulur. Metilamonyum katyonu, bant yapısına elektronik olarak katılmaz, ancak 3 boyutlu perovskit kristalinin oluşumunu yönetir ve bu nedenle malzemenin optik özelliklerini etkiler (Marinova ve ark., 2017).

Bununla birlikte, son zamanlardaki eğilim, MAPbI_3 'ün formamidyum kurşun iyodür (FAPbI_3) ve diğer potansiyel soğurucularla değiştirilmesidir. Formamidyum kurşun iyodür (FAPbI_3) 1.48 eV'luk daha dar bir bant aralığına sahiptir. Böylece soğurucu olarak kullanıldığında teorik olarak daha büyük akımların elde edilmesine izin verir, ancak bu malzeme MAPbI_3 'e kıyasla daha düşük kararlılık gösterir (Eperon ve ark., 2014).



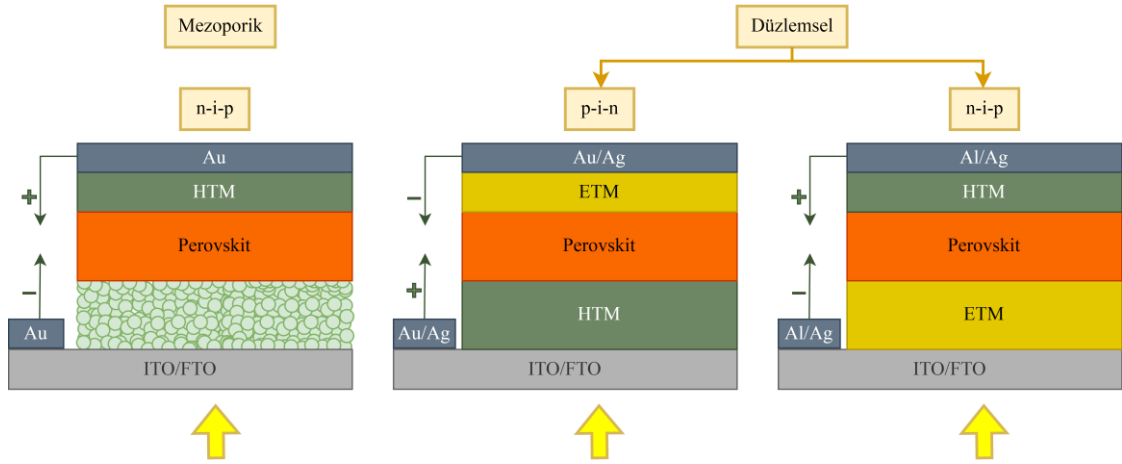
Şekil 2.4. Perovskit Güneş Pilleri Genel Tabaka Yapısı

Perovskit güneş pilleri için genel katman yapısı Şekil 2.4’de gösterilmektedir. Şeffaf iletken oksit tabaka (TCO) kaplı camlar pil üretiminde alt tabaka olarak kullanılmaktadır. Bu katmanın üzerinde bir elektron iletim tabakası (ETL) vardır. Elektron iletim katmanı üzerinde fotonun soğurulduğu ve bir elektron boşluk çiftlerinin (eksiton) uyarıldığı aktif katman olan perovskit katmanı bulunur. Perovskitin üstünde boşluk iletim tabakası (HTL) ve son olarak metal bir elektrot bulunur. Şeffaf iletken oksit tabaka ve metal elektrot yükler için kapalı devre oluşturur.

Şeffaf iletken oksit tabaka (TCO) gelen ışığın büyük kısmının diğer katmanlara geçmesine izin verecek şeffaflıkta olmalıdır. İndiyum kalay oksit (ITO) veya Flor katkılı Kalay Oksit (FTO) yaygın olarak kullanılan şeffaf iletken oksitlerdir. Perovskit katmanı güneş ışığını soğurarak boşluk ve elektronları harekete geçiren aktif tabakadır. Elektron iletim malzemesi (ETM) n-tipi yarı iletken, boşluk iletim malzemesi (HTM) ise p tipi yarı iletken oluşur (Jung ve Park, 2015). Elektron iletim ve boşluk iletim katmanları, perovskit tarafından fotonun soğurulmasıyla oluşan yük taşıyıcılarına tam bir devre oluşturmak için kullanılır (Ijaz ve ark., 2020). ETM ve HTM elektrotlara yük transferi sağladığından dolayı cihaz performansı üzerinde kritik bir rol oynar (Wu ve ark., 2017).

2.2. Perovskit Güneş Pillerinde Kullanılan Cihaz Mimarileri

Bir perovskit güneş pilinin mimarisi ve her bir katmanda kullanılan malzemeler, cihazın elektronik ve optik performansını önemli ölçüde etkiler. Perovskit güneş pilleri çeşitli yapısal konfigürasyonlar kullanılarak imal edilmiş olmakla birlikte, perovskit güneş pilinin hazırlanmasında bilinen iki ana cihaz mimarisi vardır (Jung ve Park, 2015). Bunlar mezoporik yapı ve düzlemsel yapılardır. Mezoporik ve Düzlemsel güneş pilleri akımın akış yönüne bağlı olarak Şekil 2.5’de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir.



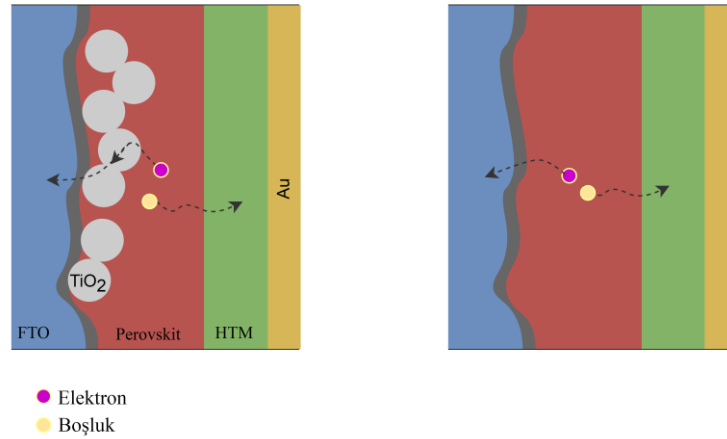
Şekil 2.5. Akım Akış Yönüne Göre a) Mezoporik n-i-p Yapı b) Düzlemsel p-i-n Yapı c) Düzlemsel n-i-p Yapı

Cihazın üzerine düşen ışık önce n tipi elektron taşıma katmanını ardından aktif katman ve ardından p tipi boşluk taşıma katmanına ulaşırsa, böyle bir cihaza n-i-p cihazı denir. Ancak ışık, boşluk taşıma katmanını, aktif katman, elektron taşıma katmanını sırasına göre yolu takip ediyorsa buna p-i-n cihazı denir. Yani n-i-p ve p-i-n yapıları sırasıyla ETM/perovskit/HTM ve HTM/perovskit/ETM mimarileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Manspeaker ve ark., 2017). Farklı konfigürasyonlarda üretilen perovskit güneş pillerinde kullanılan cihaz mimarilerinin her birinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Mezoporik pil yapısı, yüksek performanslı cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılan ve perovskit tabanlı güneş pilinin hazırlanmasına yönelik ilk tasarım olarak karşımıza çıkar. Mezoporik yapıda perovskit tabakaları, Şekil 2.6 (a)'da görüldüğü gibi, iki faz arasında iç içe geçmiş gözenekli yarı iletken metal oksit iskeleti ortamında oluşturulur ve bu nedenle ışıkla üretilen elektronlar metal oksit iskeleti alanı boyunca katoda taşınır. Bu durum yük rekombinasyonunu önleyerek veya azaltarak ortamdan elektronların etkili toplanmasına yardımcı olur (Tonui ve ark., 2018). Ayrıca mezoporik tabakanın varlığı perovskit oluşumu sırasında kristal büyümesini ve morfolojisini kontrol eder (Habibi ve ark., 2016a). Elektron iletim katmanı (ETM) olarak kullanılan, düşük iş fonksiyonuna sahip TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 veya ZrO_2 gibi metal oksitler, perovskit güneş pillerinde mezoporik ortamın hazırlanması için en çok kullanılan malzemelerdir (Tonui ve ark., 2018). Mezoporik perovskit cihazında elektron iletim katmanını ve boşluk iletim katmanını olarak sırasıyla kompakt TiO_2 ve spiro-OMeTAD yaygın olarak kullanılmaktadır. Mezoporik yapıda üretilen perovskit güneş pillerinde yüksek verimli

piller (>%26) elde edilebilirken, pil yapısında bulunan metal oksitlerin yüksek sıcaklıklarda ($\sim 400-500$ °C) tavlama gerekmektedir (Habibi ve ark., 2016a). Bu durum ek maliyetler ve komplikasyonlar meydana getirir bu nedenle düşük sıcaklık süreçleri arzu edilmektedir. Ayrıca spiro-OMeTAD'ın yüksek maliyetinden dolayı boşluk iletim malzemesi olarak kullanılabilecek alternatif materyallere gereksinim duyulmaktadır.

Düzlemsel p-i-n yapı perovskit güneş pilleri, yüksek sıcaklıkta tavlama gerektiren mezoporik metal oksit tabakasının kullanılmasını önlemek üzere tasarlanmıştır. Düzlemsel perovskit güneş pili basit bir cihaz yapısına sahiptir, Şekil 2.6 (b)'de görüldüğü gibi mezoporik iskelet olmadan perovskit katman, n-tipi yarıiletken katmanına doğrudan temas eder. Yüksek sıcaklık süreçleri söz konusu olmadığından, 150 °C'nin altındaki sıcaklıklarda üretilebilir. Bu da onları esnek alt tabakalar üzerinde cihaz üretimine uygun hale getirir. Bununla birlikte, düzlemsel konfigürasyonla hazırlanan güneş pilleri, ışınsız elektron-boşluk rekombinasyonuna sebep olan ve tuzaklara atfedilebilen açık devre gerilim kaybından muztariptir (Tonui ve ark., 2018).



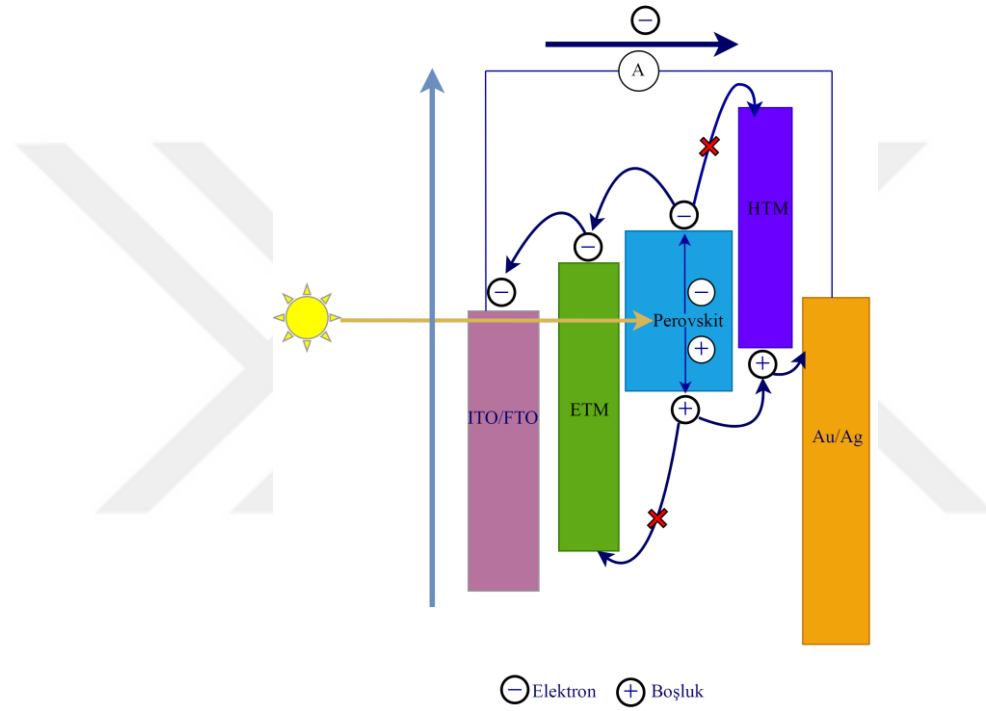
Şekil 2.6. a) Mezoporik iskelet yapı ve b) Düzlemsel yapı

Düzlemsel perovskit yapının ilk kez denenmesiyle %15.4 verimliliğe sahip perovskit piller elde edilmiştir (Liu ve ark., 2013). Daha sonra, düzlemsel yapının verimliliği arayüzey mühendisliği yoluyla %20'nin üzerine kadar çıkmıştır (Zhou ve ark., 2014a). Mezoporik pillerden daha yüksek verim elde edildiği rapor edilmiş olsa da bu sonuçlar düzlemsel yapının mezoporik yapıya benzer cihaz performansı elde edebileceğini göstermektedir. Perovskit güneş pillerinde kullanılan cihaz mimarisinin yanı sıra, perovskit film morfolojisinin kalitesi, cihazların güç dönüştürme

verimliliğinde büyük bir etkiye sahiptir. Ayrıca çözelti konsantrasyonu, tavlama sıcaklığı, çözücü doğası ve reaksiyon süresi gibi işlem parametreleri de pil verimini etkileyici rol oynamaktadır.

2.3. Perovskit Güneş Pillerinde Elektron-Boşluk Hareketi

Perovskit güneş pillerinin genel çalışma mekanizması ve elektron boşluk hareketi Şekil 2.7'deki gibidir.



Şekil 2.7. Perovskit pillerde elektron boşluk hareketi

Işık kaynağından gelen fotonlar, cam ve şeffaf elektrot aracılığıyla perovskit tabakasına ulaşır. Aktif perovskit tabakasında foton soğurulur ve eğer foton enerjisi perovskit malzemesinin bant aralığı enerjisinden büyükse bir eksiton uyarılır. Eksiton, serbest yük taşıyıcılarına ayrılarak boşluklar, boşluk iletim tabakasına (HTL) taşınırken elektronlar, elektron iletim tabakasına (ETL) taşınır. Oradan elektronlar şeffaf elektrotta (ITO/FTO) ve boşluklar metal elektrotta (Ag/Au) iletilir. Daha sonra elektron, iki elektrotu birbirine bağlayan iletken boyunca hareket eder ve hareket eden elektronlar tarafından bir akım üretilir. Metal elektrotta elektron ve boşluklar yeniden birleşir.

Perovskit güneş pillerinin düzgün çalışması için, her katman için enerji seviyelerinin dikkatlice planlanması gerekir. Elektron ve boşluk iletim katmanları ışıkla

üretileen elektron ve boşlukların ayrılabilmesi için çok dikkatli seçilmelidir. Çünkü uyarılmış elektronlar ve boşluklar yeniden birleşmek ister. Doğru katman yapısı ile hücredeki rekombinasyonun bir kısmı, yük taşıyıcılarının farklı bir yol izlemesi engellenerek bloke edilmelidir.

Bu durum, elektron iletim tabakasının LUMO'sunun, aktif katmanın LUMO'sundan biraz daha düşük olmasıyla yapılabilir. Böylelikle elektronun dış devreye taşınmasını sağlayan bir yol oluşturulmuş olur. Aynı durum boşluklar için de geçerlidir. Boşluk iletim katmanında ise HOMO seviyesinin, aktif tabakanın HOMO seviyesinden daha yüksek olmasıyla boşlukların hareketinde bir yol oluşturulmuş olur. Bu durum, hücredeki her katman için aynıdır. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi yük taşıyıcılarının iletim yolunun oluşması için her katmanda daha yüksek HOMO veya daha düşük LUMO bulunur. İletim katmanı, yüklerin etkili bir şekilde toplanması için TCO ile ohmik kontak oluşturmaktadır.

2.4. Perovskit Güneş Pillerinde Katkılama

Fotovoltaik cihazlar üretim maliyeti, verimlilik, kullanım ömrü ve kararlılığa göre değerlendirilir. Fotovoltaik cihazların küresel enerji piyasasında yer alabilmesi için bu parametrelerin dengelenmesi en önemli konudur. Perovskit güneş pilleri (PGP) düşük maliyetleri, imalat kolaylığı ve yüksek dönüşüm verimliliğine sahip yeni nesil fotovoltaik (PV) teknolojiler olarak ortaya çıkmasına rağmen ticari uygulamaları ve seri üretim için daha fazla iyileştirme gerekmektedir. Toksik olmayan maddelerin kullanımı, yük taşıyıcı rekombinasyonunun azaltılması, endüstriyel büyük ölçekli üretim ve ortam koşulları altında kararlılığın artırılması konuları aydınlatılmalıdır (Bu ve ark., 2019).

Kararlılık ve cihaz performansının iyileştirilmesini, cihaz içindeki katmanlarda ve arayüzeylerde araştırmak önemlidir. Tane sınırları ve yüzey kusurları pil üzerinde olumsuz etkilere sahip olup verimin ve kararlılığın düşmesine ve histerezis etkisinin artmasına sebep olur. Bu yüzden perovskit tabakasındaki morfolojiyi, tane sınırını, tane boyutunu, yük rekombinasyonunu ve kusur durumlarının yoğunluğunu daha fazla kontrol etmek, fotovoltaik performansını ve kararlılığını geliştirmek için gereklidir.

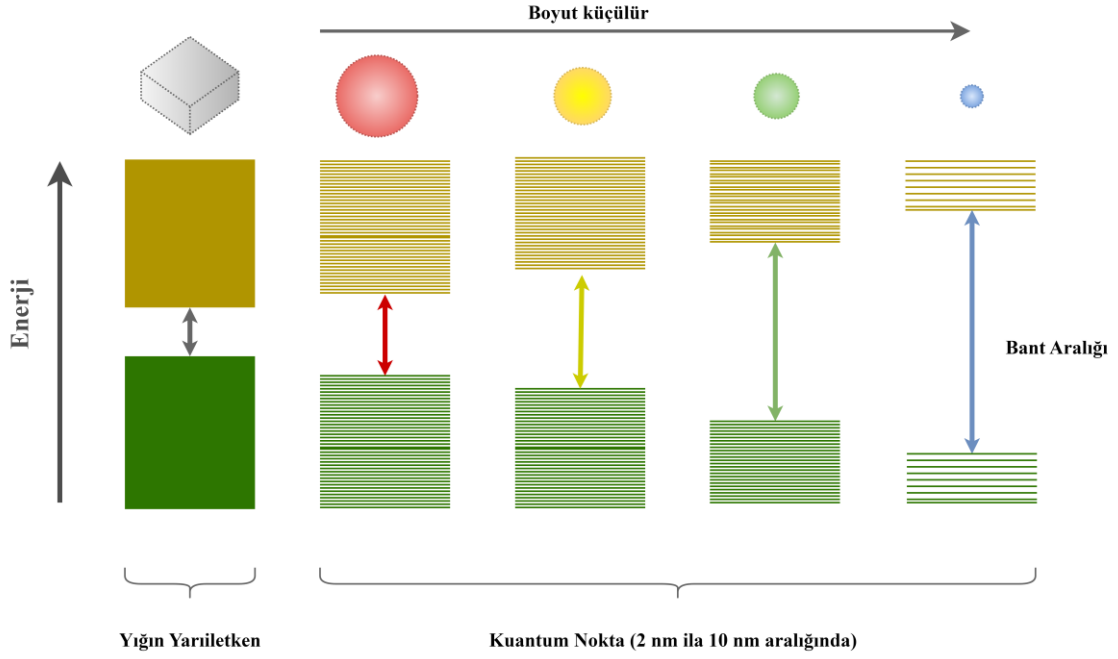
Katkı mühendisliği, tane sınırlarını pasifleştiren perovskit tabakasının kristalleşmesini kontrol etmek için en etkili yollardan biri olarak kabul edilir. Katkı

maddeleri; metal halid tuzları, organik halid tuzları, inorganik asitler, çözücüler, polimerler ve küçük moleküller, fulleren türevleri ve nanopartiküller olarak sınıflandırılabilir (Kırbıyık ve ark., 2020). Bunlar arasında, karbon kuantum noktaları (KKN) olarak da bilinen küçük karbon nanopartiküller, bu katkı maddelerinin yeni ve umut verici üyesidir. Son on yıldır, kontrol edilebilir boyutları, elektriksel ve optik özellikleri nedeniyle birçok araştırmacı tarafından oldukça ilgi görmektedir. KKN'lar ışık yayan diyotlar, sensörler, güneş pilleri ve biyotıp gibi farklı uygulamalarda bir bileşen olarak kullanılmıştır (Yin ve ark., 2019). Karbon kuantum noktaların eşsiz optik ve elektriksel özellikleri, perovskit güneş pillerinin fotovoltaiik performansını geliştirmeyi mümkün kılar.

2.5. Karbon Kuantum Noktalar (KKN) ve Güneş Pillerinde Uygulamaları

Kuantum noktalar (KN) temel olarak yarı iletken nano malzemelerdir. “Nokta” terimi, genellikle 2-10 nm aralığındaki küçük boyutlarını, “kuantum” terimi ise kuantum sınırlama etkisi gösterebilen fiziksel özelliklerini ifade eder. Kuantum sınırlama etkisi 10 nm'nin altındaki nanomalzemelerde ortaya çıkar. Böylelikle kuantum noktalar elektron hareketinin üç boyutta sınırlandırıldığı yapılardır (Hong ve ark., 2022).

Kuantum noktalar yığın (bulk) malzemelere göre farklı davranışlar gösterirler. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi bulk malzemelerde enerji seviyeleri birbirine çok yakın olduğu için enerji seviyeleri iç içe geçmiş ve sürekli bir bant yapısına sahip olmasına rağmen, kuantum malzemelerde ayırık enerji seviyeleri söz konusudur. Bu durum kuantum noktaların önemli bir özelliğidir bu durum yığın malzemeye göre daha farklı optik ve elektriksel özelliklere sahip olmasını sağlar. Değişen boyutları elektronik ve optik özelliklerini etkiler ve boyutları değiştikçe UV ışık altında farklı renklerde ışıma yapabilirler. Böylelikle karbon kuantum noktalar ile farklı dalga boyunda ışıma yapan yapılar elde etmek mümkündür. Şekil 2.8'deki gibi boyutu azaldıkça kırmızıdan maviye doğru kayma gözlemlenebilir (Hong ve ark., 2022). Bu durum karbon kuantum noktaların boyutunu kontrol edilebilir bir parametre haline getirir. Ayrıca kuantum noktalar mükemmel elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında elektronları çok hızlı bir şekilde aktarabilirler (Jana ve ark., 2020).



Şekil 2.8. Yığın malzeme ve kuantum noktaların bant aralığı değişimi ve kuantum noktaların UV ışık altındaki emisyon renkleri

Kuantum noktalar, yarıiletken kuantum noktalar ve karbon temelli karbon kuantum noktalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Karbon kuantum noktalar (KKN), geleneksel kadmiyum ve kurşun bazlı kuantum noktalara alternatif olarak ortaya çıkan, boyutları 2-10 nm arasında değişen ve güçlü floresans özelliğe sahip olan karbon temelli sıfır boyutlu, yarı küresel bir yapıya sahip nanomalzemelerinden biridir (Liu ve ark., 2020; Yang ve ark., 2023). Karbon kuantum noktaların yapısı, yüzeylerine bağlı çok sayıda polimer zinciri veya fonksiyonel grup içeren sp^2 ve sp^3 karbon atomlarından oluşur (Xia ve ark., 2019). Üzerinde bulunan karbonil, karboksil, hidroksil, amino ve epoksi gibi fonksiyonel gruplar suda mükemmel çözünürlük sağlar ve fonksiyonelleştirme için platform oluşturur (Molaei, 2019; Pourmadadi ve ark., 2023). Karbon kuantum noktaların yüzeylerindeki bu fonksiyonel gruplar ($-OH$, $-COOH$, $-NH_2$, vb.) kolayca işlevselleştirilebilir ve organik-inorganik moleküllerin bağlanmasına izin verir (Xia ve ark., 2019; Kumar ve ark., 2022).

Karbon kuantum noktalar (KKN), eşsiz özelliklerinin yanında suda çözünürlük, hızlı ve kolay hazırlanabilme, ucuz ve kolay sentez yöntemleri, düşük toksisite, biyouyumluluk ve kolay işlevselleştirme gibi üstün özellikleriyle inorganik kuantum noktalara göre daha kolay üretilip işlenebilir bir alternatif olmaktadır (Lim ve ark., 2018; Giordano ve ark., 2023).

Bu dikkat çeken özellikleri sayesinde fotoelektrokimyasal hücreler, fotovoltaik güneş pilleri, fotokataliz, ışık yayan diyotlar (LED'ler), nano prob ve biyotıp gibi farklı alanlarda çok yönlü uygulamalar bulmuştur. Geniş spektral soğurmaya ve yüksek soğurma katsayısına sahip KKN'lar düşük maliyeti ve düşük toksisitesi nedeniyle, güneş enerjisi dönüştürme uygulamalarında potansiyel alternatifler olarak düşünülebilirler (Zuo ve ark., 2015; Dua ve ark., 2023).

KKN'ları sentezlemek için çeşitli stratejiler geliştirilmiş ve çok sayıda yöntem önerilmiştir. Genel olarak KKN'ların sentezi, yukarıdan aşağıya (Top-down) ve aşağıdan yukarıya (Bottom up) olmak üzere iki ana başlığa ayrılmaktadır. Yukarıdan aşağıya metotta daha büyük karbon yapılarının (grafit, grafen, karbon nanotüp (CNT), kömür vb.) ark deşarjı, lazer ablasyon, elektrokimyasal sentez ve kimyasal oksidasyon gibi zorlu koşullar altında daha küçük nano ölçekli parçacıklara dönüştürülmesidir (Liu ve ark., 2020). Bu yöntemlerle elde edilen KKN'lar genellikle mükemmel sp^2 yapılarına sahiptir, süreç hızlı ve kolaydır, ancak parlak lüminesans özelliklerinden yoksun olup, ürünün boyutu ve morfolojik dağılımı tam olarak kontrol edilemez (Xu ve ark., 2016; Yang ve ark., 2023). Aşağıdan yukarıya metot ise hidrotermal, termal yanma, mikrodalga, ultrasonik vb. gibi nispeten daha basit yöntemleri kapsayan küçük moleküllerden (karbonhidratlar, organik asitler ve aminler) senteze ve karbonizasyona dayanmaktadır. Bu sentez yönteminin avantajları arasında tek biçimli boyut ve ayarlanabilir morfoloji yer almaktadır (Yang ve ark., 2023). Genel olarak, yukarıdan aşağıya yaklaşımlar, yüksek kristallite ve nispeten sağlam bir yapıya sahip karbon kuantum noktaların sentezini sağlarken, aşağıdan yukarıya yaklaşımlar, bol miktarda doping bölgeleri ve fonksiyonel gruplara sahip amorf karbon çekirdekleri içeren karbon kuantum noktalar sentezleme eğilimindedir (Liu ve ark., 2020). Aşağıdan yukarıya sentezde, karbon kuantum noktaların kimyasal yapısını ve boyutunu etkileyen temel faktörler arasında öncüllerin moleküler yapısı, çözücü, reaksiyon süresi ve sıcaklık yer alır. Genel olarak, karbon kuantum noktalar bir süspansiyon veya sulu ortamda saf karbon nanopartikülleri içermektedir (Luo ve ark., 2014). Çözücü moleküllerin pasivasyon etkisinin büyük olduğu çözümlerde, floresans emisyonu daha parlaktır. KKN'lar için daha iyi yüzey pasivasyonu, daha parlak emisyon sağlar ve bunun sentez stratejilerinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılabilir (Molaei, 2020). KKN'ların sentezinde farklı karbon içeren öncüller de kullanılabilir, sentez için geleneksel kimyasal malzemelerin yerine portakal suyu, muz suyu, patates, elma suyu, domates

suyu, lahana dahil olmak üzere meyveler, bitkiler; süt, bal gibi gıda ürünleri; hindistan cevizi kabuğu, çay yaprakları, çimen gibi doğal kaynaklar da KKN'ların sentezi için öncül olarak kullanılabilir (Molaei, 2020). Böylelikle yeşil sentez ile daha az toksisite gerçekleştirilebilir.

KKN'ların büyük ölçekli uygulamalarda kullanılabilmesi için kayda değer bir lüminesans, yüksek emisyon verimliliği ve daha iyi yüzey pasivasyonu gerekmektedir. Bu nedenle KKN'lara katkılama (doping) yaklaşımı, KKN'ların kimyasal, elektronik ve optik özelliklerini iyileştirmek için sunulan stratejilerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Doping malzemeleri genellikle metal atomları ve heteroatomlar (metal olmayan) olarak sınıflandırılabilir. Metal ile katkılamanın önündeki en büyük engel toksisite artışına sebep olmasıdır (Xu ve ark., 2016). Bu nedenle KKN'ların heteroatomlar ile katkılanması daha fazla tercih edilmektedir. KKN'ların Bor (B), kükürt (S), azot (N), fosfor (P) gibi hetero-atomlarla katkılanması elektronik yapılarının iyileştirilmesine ve floresans özelliklerinin geliştirilmesine olanak tanır. Son yapılan çalışmaların, hetero atom dopinginin KKN'ların kuantum verimini (QY) büyük ölçüde artırabileceğini göstermiştir (Miao ve ark., 2020). Bor (B), kükürt (S), azot (N), fosfor (P) gibi atomlar n-tipi veya p-tipi taşıyıcıların üretilmesini sağlayacağından KKN'ların elektronik yapılarının iyileştirilmesine katkı sağlayacağı umulmaktadır. Ayrıca araştırmacılar karbon kuantum noktalarda heteroatom varlığının lüminesans özelliklerin geliştirilebildiğini rapor etmişlerdir. Bu durum doping işleminin KKN'ların içsel özelliklerini modüle etmede etkili bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır (Xu ve ark., 2016).

Karbon nanoyapılarının yüksek elektron depolama kapasitesi sayesinde, karbon kuantum noktalar, yarıiletken yapısındaki yük taşıyıcılarının fotonla uyarılması durumunda, elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyonunu geciktirebilir. Karboksilik asit ve karbonil gruplarının, elektron boşluk çifti rekombinasyonlarının azaltılmasına neden olan yukarı doğru bant bükülmesini indüklemeye etkisine sahip olduğu öne sürülmüştür (Wang ve ark., 2017).

Ayrıca tek atom ile katkılama KKN'ların yüzey aktif bölgelerini etkili bir şekilde pasifleştirebilir ve bu da emisyon özelliklerinin büyük ölçüde iyileştirilmesine katkı sağlar. Katkılanan heteroatom içeriğine bağlı olarak KKN'ların daha fazla

elektron hapsedmesi ve buna bağı olarak yüksek kuantum verimliliği ile sonuçlanması beklenir (Xu ve ark., 2016).

KKN'lar, sp^2 atomik çerçevede π -konjuge elektronlar tarafından meydana gelen ışık absorpsiyonunun bir sonucu olarak kısa dalga boyunda foton toplama özelliğine sahiptir (Molaei, 2020). Ultraviyole-görünür bölge (UV-Vis) spektrumunda KKN'lar iki absorpsiyon bandına sahiptir. KKN'ların tipik absorpsiyon spektrumu önemli bir absorpsiyon zirvesine ve görünür bölgeye uzanan bir absorpsiyon kuyruğuna sahiptir. KKN'ların absorpsiyon spektrumu 230-270 nm civarında bir pik ve 300-390 nm civarında ise bir omuz gösterebilir (El-Shabasy ve ark., 2021); bunlar sırasıyla aromatik C=C bağlarının π - π^* geçişine ve C=O bağlarının n - π^* geçişine karşılık gelir (Tambe ve ark., 2022).

Karbon bazlı nanomalzemeler olağanüstü kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri nedeniyle güneş pillerinde hem verimliliği hem de kararlılığı arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle, belirli karbon nanomateryallerinin suya dayanıklılık özelliği, ortam nemi girişini engelleyerek çeşitli fonksiyon katmanlarının bozulmasını önemli ölçüde önleyebilmesi güneş pillerinin kararlılığını geliştirmiştir.

Şimdiye kadar karbon kuantum nokta, fulleren ve türevleri, karbon nanotüp, grafen gibi karbon nanomalzemelerin kullanılarak üretildiği perovskit pil çalışmaları mevcuttur. Bu karbon malzemeler sadece bir katkı maddesi olarak uygulanmamış, aynı zamanda elektron iletim tabakası, boşluk iletim tabakası ve elektrot olarak da kullanılmıştır.

Karbon nanomalzemeler 2013 yılında ilk kez Jeng ve arkadaşları tarafından perovskit pillere dahil edilmiş ve $CH_3NH_3PbI_3$ perovskit/fulleren mimarisi kullanılarak %3,9'luk bir verimlilik artışı sağlanmıştır (Jeng ve ark., 2013).

2016 yılında Sofia Paulo ve arkadaşları sitrik asit ve p-fenilendiamin kullanarak sentezledikleri KKN'ları perovskit güneş pillerinde ilk kez boşluk iletim malzemesi olarak FTO/d-TiO₂/mp-TiO₂/MAPI/HTM/Au güneş pili yapısında kullandılar ve %0.71'den %3'e yükselen bir pil verimi gözlemlediler. Bu verimlilik, boşluk iletim malzemesi olarak spiro-OMeTAD kullanılarak üretilen başka bir benzer cihazla gözlemlenen %8.06'lık PCE ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür (Paulo ve ark., 2016).

2017 yılında Hao Li ve arkadaşları perovskit güneş pillerinde elektron taşıma tabakası olarak KKN'lar/TiO₂ kompozit katmanını kullanarak ITO/KKN/TiO₂/perovskit/spiro-OMeTAD/Au yapısıyla pil verimini %15.15'den %18.89'a yükselttiler. Karbon kuantum noktaların varlığı perovskitten TiO₂'e elektron taşıma özelliğini iyileştirerek, kısa devre akım yoğunluğunun (J_{SC}) ve açık devre geriliminin (V_{OC}) artmasını sağladılar (Li ve ark., 2017).

2019'da Xiaomeng Zhu ve arkadaşları elektron taşıma katmanı olarak KKN katkılı PCBM kullanarak FTO/PEDOT:PSS/MAPbI₃/PCBM:KKN/BCP/Ag yapısında düzlemsel perovskit güneş pili ürettir. KKN'larla yapılan katkılama ile pil veriminin %13'den %18.1'e yükselmesini sağladılar (Zhu ve ark., 2019).

2021'de Nguyen ve arkadaşları solvotermal bir işlem kullanarak N-KKN'ları sentezledi ve bunların PEDOT:PSS varlığında üretilmiş güneş pillerinin performansı üzerindeki boşluk iletim malzemesi olarak etkilerini incelediler ve ITO/PEDOT:PSS-KKN/PTB7:PC71BM/TiO_x/Al güneş pili yapısında, pil performansının KKN'lar dahil edildiğinde artmasını sağladılar. KKN'ların yokluğunda elde edilen verim %7.26 iken N-KKN varlığında üretilen pillerde %8.57'lik PCE elde ettiler. N-KKN'ların PEDOT:PSS'ye dahil edilmesi ile iş fonksiyonunun arttığını ve PEDOT:PSS'nin yüzey morfolojisini düzelttiğini gözlemlediler. Böylelikle PEDOT:PSS ve N-KKN'ların kombinasyonu yük enjeksiyonunu geliştirerek güneş pillerinin performansının artmasını sağlamıştır (Nguyen ve ark., 2021).

2021'de Shejale ve arkadaşları sentezledikleri KKN'ları boya duyarlı güneş pilinin (DSSC) aktif katmanına dahil ettiler ve pil performansını %8.75'e yükselttiler. N-KKN'ların fotoaktif katmana dahil edilmesi absorpsiyonu artırdı ve foto-anot ile elektrolit arasındaki rekombinasyonun azalması sağlanmış, sonuç olarak performansın arttığı gözlenmiştir (Shejale ve ark., 2021).

2023'de Liu ve arkadaşları perovskit katman ve ETL arayüzeyine SnO₂-KKN yapısı eklediler ve pil performansını %21,6'dan %24'e yükselterek etkili bir arayüzey modifikasyonu sağladılar (Liu ve ark., 2023).

Sonuç olarak, yapılan literatür çalışmalarında karbon nanomalzemelerin benzersiz özellikleri uzun vadede mükemmel fotovoltajik performansa sahip piller oluşturmak için en potansiyel malzemelerden biri haline getirmektedir (Hu ve ark.,

2021). Fonksiyonel gruplara sahip moleküllerin kullanımı, cihazın perovskit katmanının tane sınırlarını pasifleştirmek için etkili bir yöntemdir (Patel ve ark., 2023). Karboksil, amin, izopropil, fenetil ve tert-butilfenetil gibi fonksiyonel gruplar perovskit içindeki veya yüzeyindeki elektronik kusurları iyileştirme ve tane sınırlarını pasifleştirme yeteneğine sahiptir (Yang ve ark., 2019). Güneş spektrumunun sınırlı bir penceresinde güneş ışığı fotonlarını absorplayabilmesi ve katkılama malzemesi olarak KKN'ların dahil edilmesiyle güneş pili teknolojilerindeki uygulamalarda pil verimine katkı sağlayacağı umulmaktadır.

Yapılan literatür araştırmaları göstermiştir ki, perovskit pillerin aktif tabakasına katkılı karbon kuantum noktaların dahil edilmesiyle pil verimine olan etkisi tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu tez kapsamı, karbon kuantum noktaların Bor (B) ve Azot (N) gibi farklı heteroatomlarla katkılanmasıyla elektronik ve optik özelliklerinin geliştirilmesi ve sentezlenen Azot katkılı KKN ve Bor katkılı KKN'ların perovskit güneş pillerine dahil edilmesiyle pil veriminin artırılması çalışmalarına odaklanmaktadır. Üretilen güneş pillerinin fotovoltaiik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve spektroskopik karakterizasyonları elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların özgün değerinin sonraki çalışmalara yol gösterici nitelikte yer alacağı umulmaktadır.

2.6. Perovskit Güneş Pillerindeki Zorluklar

Perovskit güneş pillerinin üstün avantajlarına rağmen, hala aşılması gereken bazı dezavantajlara sahiptir. Perovskit pillerin ana sorunu kararsız doğasıdır. Perovskitler hava, nem, ısı ve ışıktan etkilenebilen oldukça hassas malzemelerdir. Diğer bir zorluk ise güneş pillerinin J-V ölçümü sırasında gözlemlenen histeresiz olgusudur. Ticarileşmenin önünü açabilecek kararlı ve histerezis içermeyen perovskit piller elde etmek amacıyla kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Perovskit güneş pilleri üzerine yapılan güncel çalışmalar, oksijen, sıcaklık, nem, UV ışığı etkisinin kimyasal kararlılıkta büyük rol oynadığını göstermektedir (Nair ve ark., 2020).

Kararsızlık

Perovskit güneş pillerinde kararsızlık genel olarak ortam koşullarına bağlı dışsal etkenlerin sebep olduğu sorunlardan kaynaklanmaktadır. Özellikle oksijen ve nemin neden olduğu ortam koşulları perovskit pillerin bozulmasına yol açabilir (Wang ve ark., 2016). Nem, perovskit yapısındaki hidrojen bağlarını kıran ve perovskit malzemesinin kararlılığını doğrudan etkileyerek bozulmasına neden olan hidratlı bileşikler oluşturan kimyasal reaksiyonları indükler. Bu reaksiyonlar tersine çevrilebilir olsa bile perovskit nem tarafından doygun hale geldiğinde işlem geri döndürülemez olur ve MAPbI_3 , MAI ve PbI_2 'ye parçalanır. Perovskit güneş pillerinin nem direncini artırmak için nemi bloke eden bir boşluk iletim tabakası kullanmak, perovskit ve boşluk iletim tabakası arasında ince bir blokaj tabakası kullanmak ya da hidrofobik karbon elektrot kullanmak gibi çeşitli yaklaşımlar önerilmektedir. Nemin yanı sıra ortamdaki oksijen ise perovskit yapısındaki MA^- , Pb^+ , I^- iyonları ile reaksiyona girerek elektronik tuzaklar ve yük bariyerleri oluşturur. Ayrıca oksijen molekülleri, film yüzeyinde perovskit pillerin bozulmasına yol açan Pb-O bağları oluşturabilir (Çel, 2022). Perovskit pillerin kararlılığını modüle etmek için farklı koşullar altında kimyasal kararlılığı üzerine yapılan araştırmalar perovskitin bileşimi ve kristal yapı tasarımı, boşluk iletim tabakasının ve elektrot malzemelerinin hazırlanması, ince film imalat yöntemi, arayüzey pasifleştirme ve kapsülleme gibi birçok konuya odaklanmaktadır (Mahapatra ve ark., 2020). Pasivasyon teknikleri ve kapsülleme teknolojisi, yüksek verimli ve kararlı perovskit güneş pillerinin üretimi için etkili yaklaşımlardan biridir (Zhang ve ark., 2021). Malzemeler pasif hale geldiklerinde, çevreden daha az etkilenirler. PGP'lerinde pasivasyon esas olarak ya fiziksel ya da kimyasal pasivasyonu ifade eder. Fiziksel pasifleştirme sürecinde, işlevsel katman üzerindeki ek bir kaplama, onu dış ortamdan izole eder ve cihazın stabilitesini artırır. Kimyasal pasivasyon durumunda ise malzemelerin tuzak ve kusur yoğunluğunu azaltarak çeşitli PGP arayüzeyler arasında yük aktarımı optimize edilir (Mahapatra ve ark., 2020). Perovskit pillerin kararlılığında elde edilen ilerlemeler ticarileştirilmesinin ve dış mekân uygulamalarında kullanılmasının önünü açacaktır.

Histerezis Etkisi

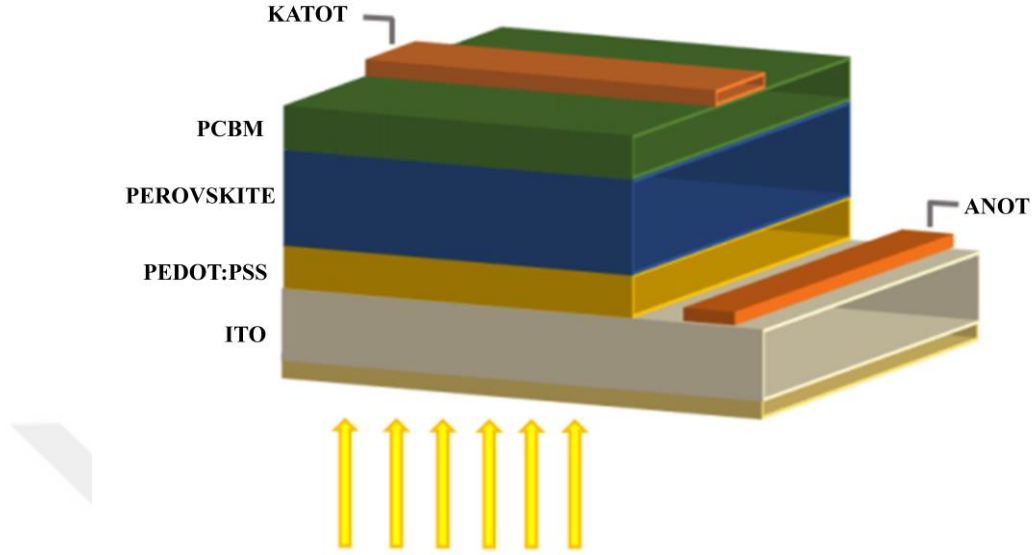
Perovskit güneş pillerinin akım yoğunluğu-voltaj (J-V) tepkileri, histerezis olarak tanımlanan voltaj tarama yönüne ve hızına bağımlılık gösterebilir. Başka bir deyişle histerezis, tarama hızına ve yönüne olduğu bağı olarak farklı sonuçlar elde edilmesiyle J-V eğrilerinin örtüşmemesi ve PCE'de fark oluşturmaktadır. Perovskit hücrelerde belirli bir elektriksel kararsızlığı temsil eder. Bir J-V taraması, negatif voltaj yönünden, pozitif voltaj yönüne veya tersi yönde gerçekleştirilebilir. Perovskit güneş pilleri için, aynı cihaz üzerinde farklı yönlerde yapılan taramalardan elde edilen J-V grafikleri birbirinden farklı olabilir. Histerezisin bazı olası nedenleri kusurlu arayüzeyler, iyon göçü ve tane sınırlarında meydana gelen yük rekombinasyonu ile ilişkilidir. Perovskit güneş pillerinde histerezisin olmaması, perovskit katmanlarının iyi yapılandırılmış olduğunu gösterir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında Karbon Kuantum Nokta (KKN) nanomalzemelerin sentezlenmesi ve perovskit güneş pillerine katkılanması ile üretilen pillerin fotovoltaiik parametrelere etkisinin incelenmesi amaçlanmış olup yapılan çalışmalar aşağıdaki kronolojik sıra ile adım adım listelenmiştir.

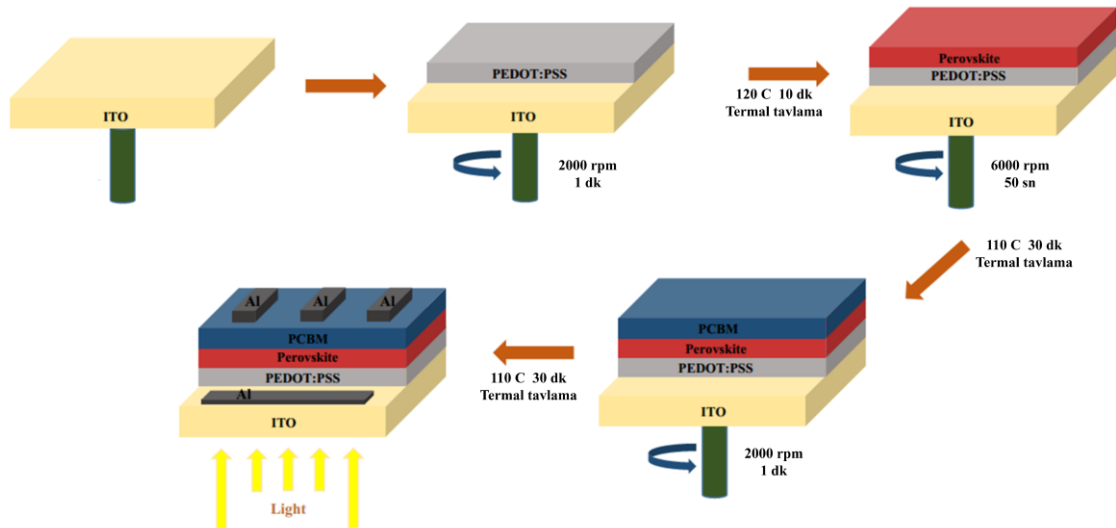
1. Azot ve Bor heteroatomları ile katkılanmış Karbon Kuantum Noktaların (N-KKN ve B-KKN) sentezlenmesi
2. Sentezlenen Karbon Kuantum noktaların optik ve yapısal karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesi
3. Pil çalışmaları için alt tabaka olarak kullanılacak şeffaf iletken oksit tabaka (TCO) kaplı cam yüzeylerin temizlenerek kaplamaya hazır hale getirilmesi
4. Elektron İletim tabakası için kullanılacak çözeltinin hazırlanması ve TCO yüzeye kaplanması
5. Perovskit (MAPbI_3) çözeltisinin hazırlanması ve hazırlanan çözeltiye, sentezlenen KKN'ların farklı konsantrasyonlarda eklendikten sonra yüzeye kaplanması
6. Boşluk İletim tabakası için kullanılacak çözeltinin hazırlanması ve yüzeye kaplanması
7. Son olarak elektrotların kaplanması
8. Katkılı ve katkısız MAPbI_3 filmlerin karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesi
9. Üretilen perovskit pillerin fotovoltaiik çıkış parametrelerinin belirlenmesi

Bu tez kapsamında üretilmesi hedeflenen yapı Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Üretilen ITO/PEDOT:PSS/Perovskite(MAPbI_3)/PCBM/Al güneş pili konfigürasyonu

Perovskit güneş pilleri ters düzlemsel yapıda (p-i-n) üretilmiş olup Şekil 3.2’de gösterildiği gibi ITO/PEDOT:PSS/ MAPbI_3 /PCBM/Al işlem basamakları adım adım gerçekleştirilerek pil yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. Perovskit güneş pillerinin hazırlama prosedürünün ve cihaz mimarisinin şematik gösterimi

3.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemeler

Karbon kuantum nokta sentezinde sitrik asit, borik asit, üre ve etilendiamin (EDA) kimyasalları kullanılmış olup, global kimyasal ürün satıcılarından (SigmaAldrich, Merck) temin edilmiştir. Yeşil sentez kapsamında N-KKN sentezi için kombucha çay mantarı ve siyah çay kullanılmış olup tüm kimyasallar saflaştırılmadan kullanılmıştır.

Tez çalışmamızda üretilen pillerde şeffaf iletken oksit tabaka (TCO) olarak kullanılan İndiyum kalay oksit kaplı camların temizliği toluen (SigmaAldrich), isopropanol (SigmaAldrich), hellmanex (hellma III sıvı temizleyici) ve saf su ile kullanıma hazır hale getirilmiştir. p-i-n yapıda üretilen perovskit güneş pillerinde boşluk iletim malzemesi olarak PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate), Clevios P VP AI 4083) kullanılmış olup, elektron iletim malzemesi olarak ise kloroform (%99, Sigma Aldrich) ve klorobenzen (%99, Sigma Aldrich) çözücüleri kullanılarak hazırlanan PCBM (%99.5, Lumtec) (6,6-fenil C₆₁ bütirik asit metil ester) çözeltisi tercih edilmiştir. Kimyasallar saflaştırma işlemine tabi tutulmadan kullanılmıştır.

Perovskit çözeltilerini hazırlama aşamasında CH₃NH₃I (Solaronix), PbI₂ (%99.9, Sigma Aldrich), γ -bütürolakton (GBL, kuru, %99.9, Sigma Aldrich), dimetilsülfoksit (DMSO, %99.9, Sigma Aldrich) ve dimetilformamit (DMF, %99, Sigma Aldrich) kimyasalları kullanılmıştır.

3.2. Karbon Kuantum Noktaların (KKN) Sentezi

Bu tez kapsamında Azot Katkılı KKN (N-KKN) ve Bor katkılı KKN (B-KKN) olmak üzere karbon kuantum nokta sentezleri gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen karbon kuantum noktalar perovskit güneş pili çalışmalarına dahil edilmiştir.

3.2.1. Azot Katkılı Karbon Kuantum Nokta (N-KKN) Sentezi

Azot Katkılı Karbon Kuantum Nokta (N-KKN) sentezi yeşil sentez yoluyla gerçekleştirilmiştir. Sentez için kombucha çayı mantarı ve siyah çay ticari olarak satın

alındı. Kombucha mantarlı fermente çay 20 gün fermantasyonda bekletildi. 20 gün sonra çay süzülerek ve mantardan ayrıldı. Fermente çaya 0.2 mL etilendiamin (EDA) eklendi. Karışım solüsyonu yaklaşık 5 saat kuvvetlice karıştırdı. Karışım sonrası UV ışık altında bakılan çözeltinin yeşil emisyon verdiği gözlenmiştir. Bu durum N-KKN parçacıklarının oluştuğunun bir sonucudur. N-KKN çözeltisi, 0.2 mm gözenekli bir filtre ile filtre edildi. Böylelikle reaksiyona girmemiş kimyasallar, vakumla buharlaştırılarak çıkarıldı sonrasında karışım gece boyunca fırında kurutuldu. Uygun oranlarda su ile çözeltileri hazırlanarak karakterizasyon için kullanılmıştır.

Sentezlediğimiz N-KKN'lar perovskit güneş pili yapımında perovskit çözeltisine katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bunun için N-KKN'lar 10 mg/mL konsantrasyonda DMSO içinde çözülerek 0.22 μm 'lik PVTE filtreden geçirilmiş ve %1, %3 ve %5 oranlarında perovskit çözeltisine dahil edilmiştir.

3.2.2. Bor Katkılı Karbon Kuantum Nokta (B-KKN) Sentezi

B-KKN'ların sentezi için bor kaynağı olarak borik asit (4 g), karbon kaynağı olarak ise üre (4 g) ve sitrik asit (4 g), deiyonize (DI) su (80 mL) içinde çözüldü. Hazırlanan çözelti manyetik karıştırıcıda 30 dakika karıştırıldı.

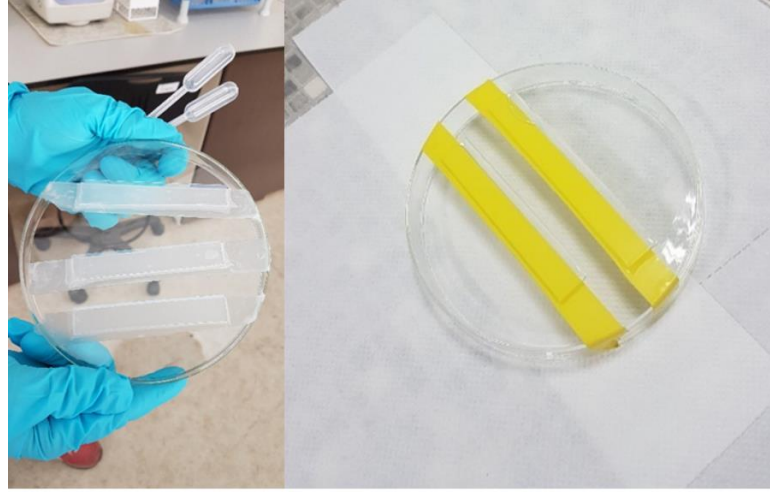
Karıştırma sonunda şeffaf ve homojen hale gelen çözelti, teflon kaplı paslanmaz çelik otoklava aktarıldı. 120 °C etüvde 12 saat bekletilerek sentez işlemine başlandı. 12 saatin sonunda otoklav kontrollü olarak açıldı ve otoklav içerisinde kahverengi bir süspansiyon gözlemlendi. Daha sonra elde edilen çözelti falkon tüplere alınarak 6000 devir/dakikada 10 dakika santrifüj edilerek saflaştırıldı. Santrifüj bittiğinde falkon tüplerindeki solüsyonun üst kısımları pastör pipet yardımıyla solüsyonun altındaki yoğun kısımdan ayrıldı. Daha sonra çöken kısım su ile yıkanıp tekrar santrifüj edildi. Bu işlem iki kez tekrarlandı. Tüpteki fazla su uzaklaştırıldıktan sonra tüpün tabanındaki katı kısım 80 °C'de 24 saat kurutuldu. Sentezlenen karbon kuantum noktaların uygun oranlarda su ile çözeltileri hazırlanarak karakterizasyon için kullanılmıştır.

Ek olarak sentezlenen B-KKN'lar perovskit güneş pili yapımında katkı maddesi olarak kullanıldığı için, B-KKN'lar 10 mg/mL konsantrasyonda dimetilsülfoksit (DMSO) içerisinde çözündürülerek, hazırlanan çözeltiler %1, %3 ve %5 oranlarında perovskit çözeltisine karıştırılmıştır.

3.3. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemelerin Hazırlık Süreci

3.3.1. İndiyum Kalay Oksit (ITO) Kaplı Cam Yüzeylerin Hazırlanması

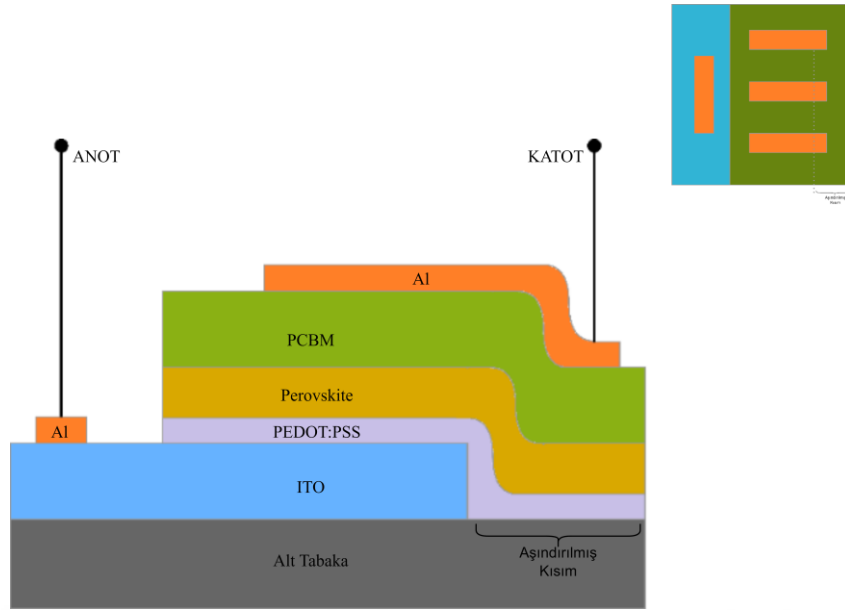
ITO kaplı camlar yüksek elektriksel iletkenliğe sahip ve yüzeyine gelen ışığın büyük kısmının diğer katmanlara geçmesine izin verecek şeffaflıktadır. Tez çalışmamızda $10 \Omega/\text{sq}$ dirence, 1,1 mm kalınlığa sahip ITO kaplı camlar kullanılmıştır. Öncelikle ITO camlar 1.5 cm şeritler halinde kesilmiş ve Şekil 3.3'te şematik olarak gösterildiği gibi, her bir kesilen şeride aşındırma işlemi uygulanmıştır. Aşındırma işlemi, ölçüm esnasında prop ucunun pile zarar vermesi durumunda direkt kısa devre olma ihtimalini ortadan kaldırarak, metal kontağın zarar görmemiş yerinden tekrar ölçebilmemize imkân vermektedir. Aşındırma işlemi için Şekil 3.3'teki gibi her bir şerit, yaklaşık $\frac{1}{4}$ 'ü açıkta kalacak ve diğer kısmı tamamen kapanacak şekilde elektrik bandı ile bantlanmış ve düz bir zemine sabitlenmiştir. Açıkta kalan kısımdan ITO kaplamayı aşındırabilmek için su ile 1:1 oranında seyreltilmiş kral suyu bir pastör pipet yardımıyla şeridin açıkta kalan kısmına dikkatlice uygulanmış ve aşındırma işleminin gerçekleşmesi için yaklaşık 20 dakika bekletilmiştir. Ardından bant çıkarılmadan yüzeydeki kral suyu bir peçete yardımıyla uzaklaştırılmış ve saf su ile yıkandıktan sonra kurulanmıştır. Bu aşamada aşındırma işleminin gerçekleşip gerçekleşmediği bir multimetre yardımıyla direnci farklı noktalardan kontrol edilmiş ve eğer ITO kaplama tamamen aşındırılmamışsa direnci 0Ω görene kadar bu işlem tekrarlanmıştır. Bant şerit üzerinden kaldırıldıktan sonra yüzeyde kalan yapıştırıcı artıklarının giderilmesi için ucu pamuklu bir çubuk toluene batırılarak yüzeydeki kirlilik temizlenmiştir.



Şekil 3.3. ITO kaplı camların bantlanarak açıkta kalan kısmın kral suyu ile aşındırılması

Bu aşamadan sonra aşındırılmış ITO kaplı şeritler $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesilmişlerdir. Artık istenilen boyutlardaki camlar, yıkama işleminden önce yalıtkan kısmı üzerine cam kalemi kullanılarak numaralandırılmıştır. Ardından camlar teflona dizilip bir beher içine yerleştirilmiş ve sırasıyla hellmanex, aseton ve isopropanol ile 15'er dakika ultrasonik banyoda temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak 10 dakika saf su ile arındırılmış ve azot tabancası yardımıyla N_2 gazı püskürtülerek kurutulmuştur. Temizlenen camları petri kaplara alırken pens ile cam yüzeyine temas etmemeye özen gösterilmiştir.

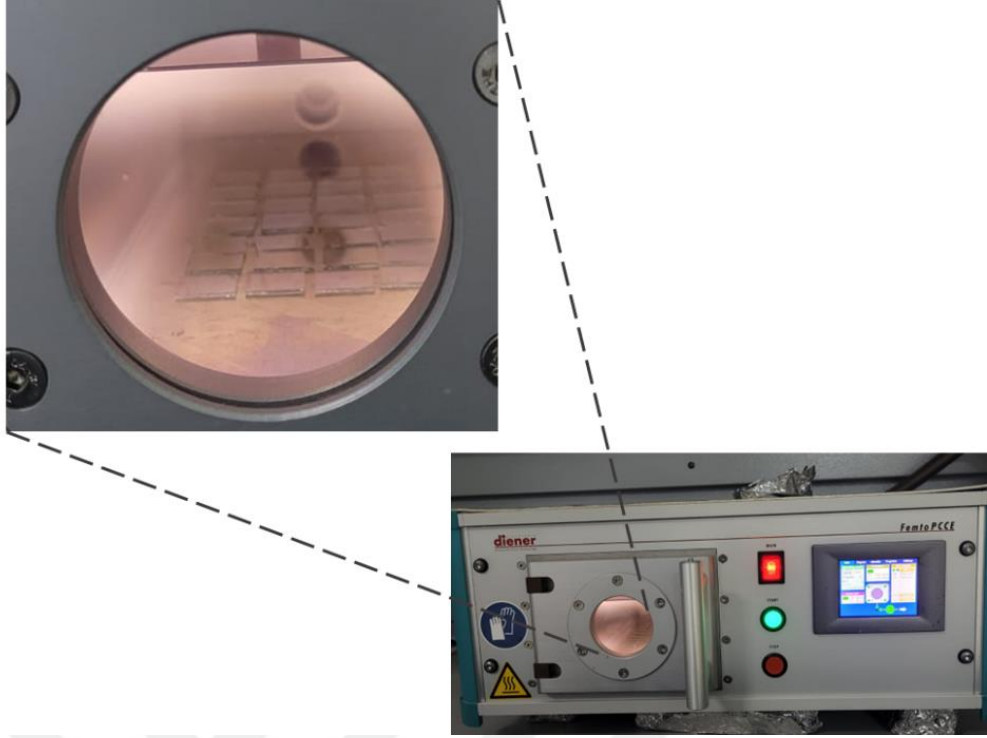
ITO kaplama üzerinde büyütülen ince filmlerin morfolojisi ve güneş pilinin performansı, alt tabaka yüzeyinin temizliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden temizlik işlemi üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir aşamadır. Aşındırma sonrası pil tabakaları alt tabaka üzerine inşa edildiğinde yapının üstten ve yandan görünümü Şekil 3.4'deki gibi olmuştur.



Şekil 3.4. Aşındırma sonrası üretilen yapının yandan ve üstten görüntüsü

3.3.2. İndiyum Kalay Oksit (ITO) Kaplı Cam Yüzeylerin O₂ Plazma ile Temizlenmesi

Plazma temizliği, kaplama yapılacak yüzeylerin hazırlık süreci aşamalarından biri olarak literatürde yaygın olarak uygulanmaktadır. Plazma temizliği ile amaç, ıslak kimyasallarla yapılan temizleme işlemlerinden sonra yüzeylerdeki yabancı maddelerin ve kirletici maddelerin atomik seviyede nihai olarak uzaklaştırılmasıdır (Belkind ve Gershman, 2008). Yüzey temizleme işleminin verimini en üst düzeye çıkarmak ve kaplama yüzeyini aktif hale getirmek için bu aşama mutlaka dahil edilmelidir. Plazma temizleme yüzeylerdeki kirliliği ve kontaminantları farklı gaz türlerinden oluşturulan enerjik plazma kullanarak temizler. Argon ve oksijen gibi gazlar ya da hidrojen/nitrojen gibi karışımlar kullanılır. Farklı gaz türlerinin kullanılmasının sebebi kaplama yüzeyine farklı özellikler kazandırmak sebebiyledir. Örneğin oksijen molekülleri yüzeyin kendisini de aktifleştirebilir. İşlem süresinin kısa olması, yüzeyin yüksek derecede temizlenebilmesi ve kullanılan gazların toksik olmayışı bu tekniğin kullanılmasında önemli bir kriterdir.



Şekil 3.5. ITO kaplı yüzeylerin temizlik aşamasında kullanılan O₂ plazma sistemi

Islak kimyasallarla temizlik işlemine tabi tutulan ITO kaplı camlar Şekil 3.5’da görülen Diener Plasma System Femto Pcce – Plasma Cleaner O₂ plazma sisteminde 5 dakika plazma işlemine tabi tutulmuş ve aktif hale gelen yüzeylerdeki radikallerin ömrü kısa olduğundan dolayı bekletilmeden kaplama aşamasına geçilmiştir.

3.4. Tez Çalışmasında Kullanılan Çözeltilerin Hazırlanması

3.4.1. PEDOT:PSS Çözeltisinin Hazırlanması

PEDOT: PSS yüksek iletkenliğe sahip bir polimerdir (Abd Mutalib ve ark., 2018) ve düzlemsel p-i-n pillerde en çok kullanılan boşluk iletim malzemesidir (Mesquita ve ark., 2018). Tez çalışmamızda ticari olarak satın alınan Heraeus marka Clevios P VP Al 4083 PEDOT:PSS sulu çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözelti, %5 oranında eklenen dimetilsülfoksit (DMSO) ile homojen bir karışım oluşturması için bir gece boyunca manyetik karıştırıcı üzerine bırakılmış ve sonrasında buzdolabı ortamında saklanmıştır. Kaplama yapılacağında çözeltide içinde olası tortuları engellemek için 0.22 µm PTFE filtrelerden geçirilerek kullanılmıştır.

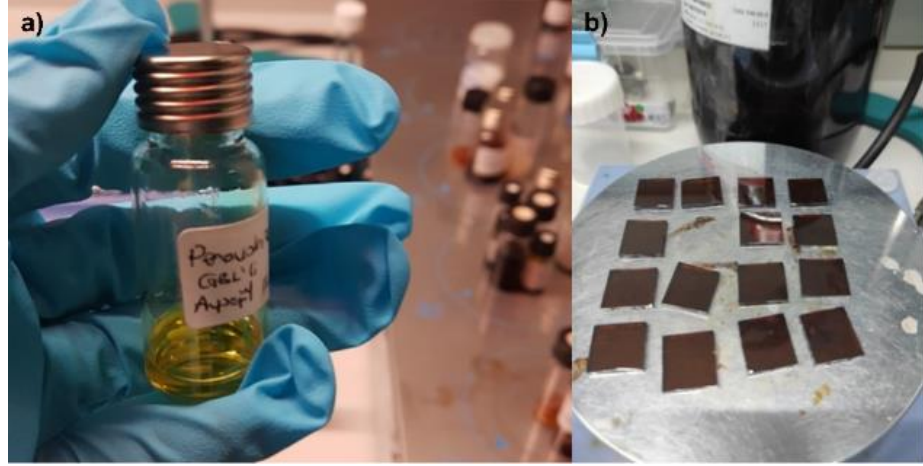
3.4.2. Perovskit Çözeltisinin Hazırlanması

Perovskit metilamonyum kurşun iyodür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) aşağıdaki reaksiyonda gösterildiği gibi genellikle $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ve PbI_2 'nin reaksiyonu ile oluşturulur (Djurišić ve ark., 2017);



Bir alt tabaka üzerinde $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskit kristalini oluşturmak için tek adımlı veya iki adımlı kaplama yöntemleri olmak üzere iki yöntem mevcuttur. Tek adımlı kaplama yönteminde perovskit kristalleri oluşturmak için $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ve PbI_2 malzemelerinden hazırlanan çözelti formu kullanılır ve döndürerek kaplanma yoluyla yüzey üzerinde biriktirilir. İki adımlı kaplama yönteminde ise alt tabaka üzerine PbI_2 solüsyonu önce bir PbI_2 filmi oluşturmak için kaplanır ve ardından PbI_2 filmi üzerinde $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ solüsyonu döndürerek kaplanma yoluyla kaplanır ve MAPbI_3 elde edilir (Jung ve Park, 2015). Tek adımlı kaplama yöntemi literatürde çok tercih edilen yöntemdir (Assadi ve ark., 2018).

Tek adımlı perovskit çözeltisinin elde edilmesi için hazırlanan çözeltilerde, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ve PbI_2 malzemeleri dimetilformamid (DMF), gammabutirolakton (GBL) veya dimetilsülfoksit (DMSO) gibi polar aprotik bir çözücü içerisinde çözündürülür (Ansari ve ark., 2018). Bu tez kapsamında, hazırlanan perovskit çözeltisi γ -bütiralakton (GBL) çözücüsü içinde çözündürülmüştür. Çözücü olarak GBL kullanılan bu çözeltide, 1.54:1.23 molar oranda $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}:\text{PbI}_2$ malzemelerinin karıştırılmasıyla elde edilmiştir. 5 ml'lik şişelerde hazırlanan bu çözeltide homojen bir karışım elde edebilmek için karışıma manyetik bar eklenmiş ve 70 °C'de 1 gece boyunca karışması sağlanmıştır. Hazır hale gelen çözelti Şekil 3.6 a)'da görüldüğü gibi açık sarı renkte ve duru bir görünüme sahiptir.



Şekil 3.6. Perovskit çözeltisi ve kaplama sonrası ısıtıcı üzerindeki görüntüsü

Katkılı perovskit çözeltilerini hazırlamak için 10 mg/mL konsantrasyonda DMSO içinde çözdürülen N-KKN ve B-KKN'lar, farklı şişelerde %1, %3 ve %5 oranlarında perovskit çözeltisine eklenerek N-KKN katkılı ve B-KKN katkılı perovskit çözeltileri elde edilmiştir. %1, %3 ve %5 N-KKN katkılı veya %1, %3 ve %5 B-KKN katkılı MAPbI_3 çözeltileri bir gece boyunca homojen bir karışım sağlamak için ısıtma olmaksızın manyetik karıştırıcıda karıştırılarak kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.6 b)'de görüldüğü gibi de yüzeyi kaplama sonrası ısıtıcı üzerinde koyu kahverengi bir renktedir.

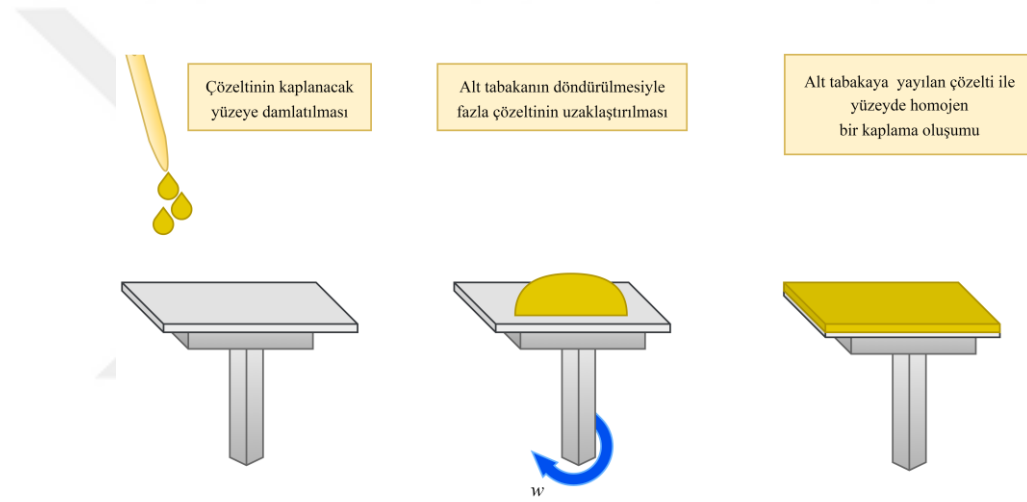
3.4.3. PCBM Çözeltisinin Hazırlanması

Tez çalışmamızda p-i-n mimarisindeki güneş pilinde elektron iletim tabakası olarak n tipi yarı iletken PCBM (6,6-fenil C61 bütirik asit metil ester) malzemesi tercih edilmiştir. Perovskit ile enerji seviyelerinin uyumlu oluşu bu malzemenin sıklıkla tercih edilmesine olanak sağlar. Çalışmamızda 1:1 hacimsel oranda klorobenzen:kloroform malzemeleri kütlece %2'lik oranda hazırlanarak, bir gece boyunca manyetik karıştırıcıda homojen bir çözelti olması sağlanmış ve kaplama öncesi yüzey üzerinde oluşabilecek tortuları engellemek için 0,22 μm 'lik PTFE filtrelerden geçirilerek kullanılmıştır.

3.5. Tez Çalışmasında Kullanılan Kaplama Teknikleri

3.5.1. Spin Kaplama Tekniği

Spin kaplama tekniği ince film üretimi için hem en ucuz hem de çözelti temelli proseslerde en çok kullanılan yöntemdir. Spin kaplama genel olarak, sıkıca tutulan alt tabakanın merkezine malzemenin sıvı formda bırakılması, ardından alt tabakanın yüksek hızda döndürülmesi ve malzemenin çözücüsünün hızlı bir şekilde uzaklaştırılması temeline bağlıdır (Tyona, 2013). Spin kaplama için kullanılan cihaza spin kaplayıcı veya spinner denir (Tyona, 2013). Spin kaplama yönteminin temel adımları Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Spin Kaplama ile çözeltinin yüzeye kaplanması

İlk olarak spin kaplayıcı tarafından vakumla sabit tutulan alt tabaka yüzeyine, kaplanacak sıvı malzeme yayılır. Elde edilmek istenen ince filme bağlı olarak, kaplama yöntemi dinamik ya da statik olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Statik kaplamada, sıvı malzeme hareketsiz alt tabakaya tüm yüzeyi kaplayacak şekilde yayıldıktan sonra döndürme işlemi gerçekleştirilirken, dinamik kaplama çözeltinin hareket halindeki alt tabaka yüzeyine enjekte edilmesi esasına dayanmaktadır. Sistem dönmeye başladığında merkezkaç kuvvetinin etkisiyle kaplanacak sıvı yüzeye yayılır ve fazlası alt tabakadan dışarı savrulur yüzeyi terk eder. Bu aşamada film aşamalı olarak incelmeye başlar. Dönme süresi, 10 saniyeden birkaç dakikaya kadar ayarlanabilir. Sistem durduğunda film oluşumu tamamlanmış ve alt tabaka üzerinde homojen

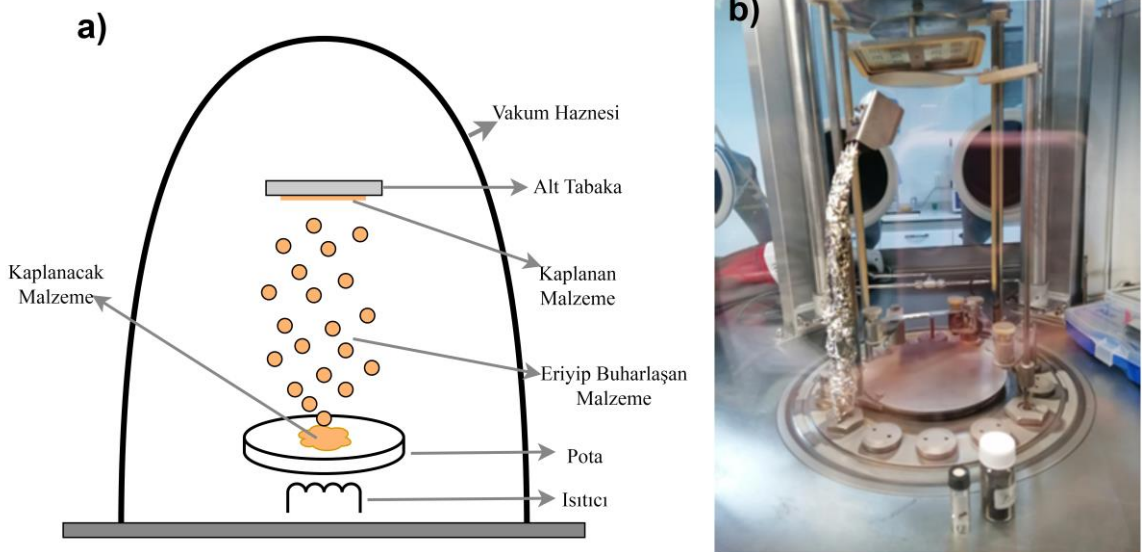
kalınlıkta bir ince film elde edilmiş olur. Sistem durdurulduktan sonra yüzeyin tamamen kuruyabilmesi için ısıtım işlemi uygulanarak çözücünün tamamen buharlaşması sağlanır.

Spin kaplama tekniğinde yüzeye kaplanan filmin özellikleri çözelti konsantrasyonu, kaplamanın süresi, uygulanan açısal hız, kuruma hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. Genel olarak yüksek dönme hızı ve uzun dönme süreleri yüzey üzerinde daha ince film oluşumunu destekler. Alt tabakanın istenilen dönme hızına en kısa sürede ulaşması düzgün kalınlıkta film elde etmede önemli bir rol oynamaktadır.

Tez çalışmamızda tüm spin kaplama işlemleri Laurell WS 400-6 nnp LITE spin kaplayıcı ile gerçekleştirilmiş ve yüzeyin hızlı bir şekilde kuruyabilmesi için işlemin hemen ardından kurutma ve tavlama işlemine tabi tutulmuştur.

3.5.2. Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Kontakların Oluşturulması

Güneş pillerinde oluşturulan yük taşıyıcılarının dış devreye aktarılabilmesi için uygun iş fonksiyonuna sahip bir metal ile kaplanması gerekir. Tez çalışmamızda kaplamanın son aşaması olan ve pilin elektrotlarının oluşturulduğu bu aşama, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemlerinden biri olan termal buharlaştırma tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarımızda kullanılan glovebox bütünleşmiş MBraun markalı termal buharlaştırma sistemi termal kaplama düzeneği Şekil 3.8 a)'da şematik ve Şekil 3.8 b)'de resim olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi ve Glovebox içerisindeki PVD

Yüksek vakum altında gerçekleştirilen bu işlemde, elektrot için kullanılacak katı malzeme pota içerisine yerleştirilir. Yüksek vakum altında pota uçlarına kademeli olarak akım verilir ve kaplama malzemesinin buhar fazına geçmesi sağlanır. Kaplanacak malzeme kalınlık monitörü ekranından takip edilerek sistemin kontrollü bir şekilde kaplama yapması sağlanır.

Çalışmalarımızda Şekil 3.9 a)'da görülen maske yapısı kullanılarak üç ayrı katot oluşturulmuştur. Böylelikle ölçümler her üç katottan elde edilen sonuçlarla değerlendirilmiştir. Her bir maske 6 adet pilin PVD ile kaplanmasına imkân vermektedir. 2 adet maskenin aynı anda kullanımı, Şekil 3.9 b)'de görüldüğü gibi bir defada 12 adet güneş pilinin PVD ile kaplanmasına imkân verebilmektedir. Güneş pillerinin aktif alanı, kullanılan maskenin kontak alanı ve alt tabakanın aşındırılmış kısmı da hesaba katılarak 0.08 cm^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. a) Kullanılan 3 katotlu maske yapısı b) PVD kaplama için yerleştirilen 12 adet pil

3.6. Tez Çalışmasında Kullanılan Çözeltilerin Kaplanması

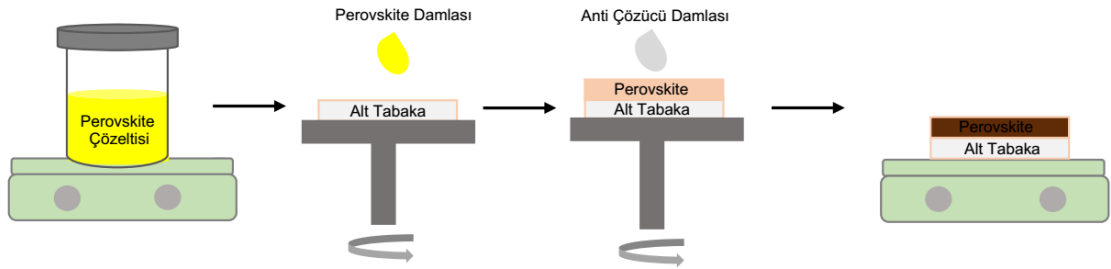
3.6.1. PEDOT:PSS Çözeltisinin Kaplanması

PEDOT:PSS çözeltisi Laurell Marka WS-400BZ-GNPP/Lite model spin kaplama cihazı kullanılarak temizlenmiş ve O_2 plazmadan geçirilmiş ITO kaplı camlara

2000 rpm’de 1 dk boyunca kaplanmıştır. Kaplanan yüzeylerin 10 dk boyunca 120 °C’de ısıtıcı üzerinde kuruması sağlanmıştır.

3.6.2. Perovskit Çözeltisinin Kaplanması

Perovskit çözeltileri kaplanırken apolar çözücü yıkama yöntemi kullanılmıştır. 2500 rpm’de 50 sn süreye ayarlanan spin kaplama cihazında 35. saniyede apolar çözücü olarak tolüen damlatılmıştır. MAPbI₃ filmlerin yüzeye kaplama aşaması Şekil 3.10’de gösterilmektedir. Kaplanan yüzeyler 30 dakika boyunca 110 °C’de tavlansmıştır.



Şekil 3.10. Perovskit çözeltisinin kaplama adımları

3.6.3. PCBM Çözeltisinin Kaplanması

PCBM çözeltisi 2000 rpm’de 1 dakika boyunca kaplanmış ve elektrotların kaplanmasına geçmeden önce 30 dakika boyunca 110 °C’de ısıtıcı üzerinde kurumaya bırakılmıştır.

3.7. Tez Çalışmasında Kullanılan Karakterizasyon Teknikleri

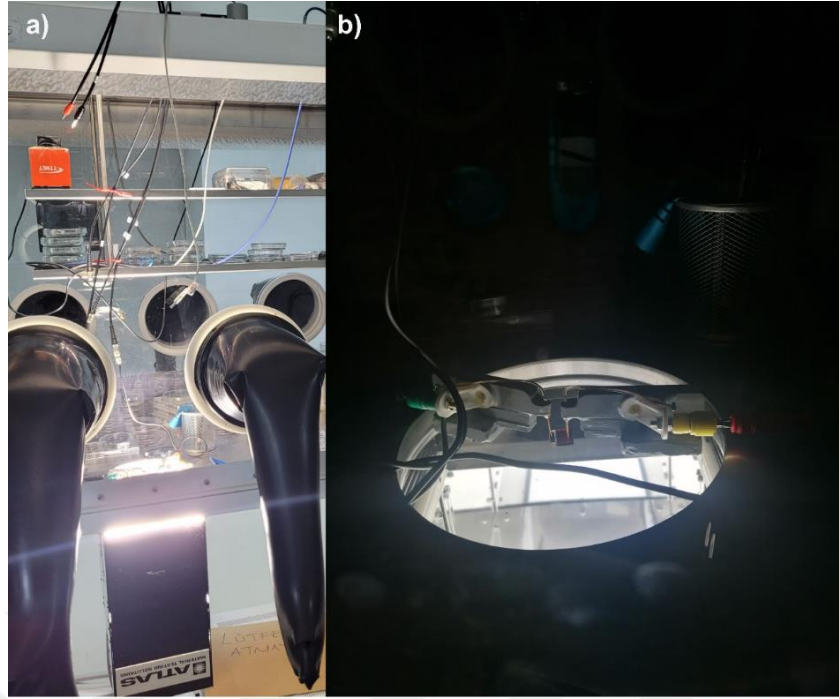
3.7.1. Akım Yoğunluğu-Gerilim (J-V) Karakteristikleri

Bu tez çalışması kapsamında üretilen güneş pillerinin akım yoğunluğu-gerilim (J-V) karakteristikleri, Şekil 3.11 a)’da görülen temiz oda laboratuvarındaki, Şekil 3.11 b)’deki Keithley 2400 (SMU) değişken DC güç kaynağı kullanılarak ve Şekil 3.11 c)’deki azot (N₂) atmosferi altında bulunan MBraun M200 glovebox içerisinde kaydedilmiştir ve kaydedilen veriler National Instruments LabVIEW yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Tüm üretilen güneş hücrelerinin akım yoğunluğu-gerilim (J-V) eğrileri LabView yazılımının dosya halinde vermiş olduğu datalardan çizdirilmiştir.



Şekil 3.11. Temiz oda laboratuvarı b) Keithley 2400 potansiyostat c) Glovebox sistemi

Güneş pillerinin ölçümü standart test koşulları üzerinden yapılmaktadır. Bu standart 1000 W/m^2 ışıyım şiddeti ve AM 1.5 hava kütlesi (AM 1.5) spektrumu (ISO 9845-1) koşulları kabul edilerek gerçekleştirilmektedir (Hellmann, 2021). AM 1.5 güneşin dünyanın tepesi ile 48° 'lik açı yaptığı durumda yeryüzüne ulaşan güneş ışığının spektral dağılımıdır. ($AM = \frac{1}{\cos \theta}$). AM 1.5 koşullarını temsil eden standart ışıyım spektrumları, tüm dünyada güneş pili performansı hesaplanırken kullanılır. Üretilen güneş pillerinin davranışları, doğal güneş ışığı koşullarını taklit etmek amacıyla laboratuvar güneş simülatörleri ile gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında üretilen güneş pillerinin J-V eğrilerini elde etmek için Şekil 3.12 a)'da görülen azot atmosferi altında gloveboxa entegre edilmiş ATLAS solar simülatör kullanılarak, Şekil 3.12 b)'de görüldüğü gibi pil ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Işık kaynağı olarak güneş ışığına benzer bir spektral tepkiye sahip olacak şekilde kalibre edilmiş xenon lambası tarafından sağlanan bir beyaz ışık kullanılır.



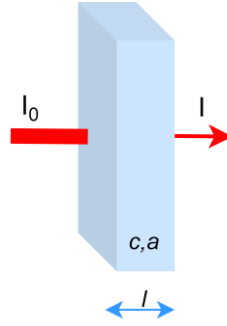
Şekil 3.12. a) AM1,5 Atlas Solar Simülatör b) Pil Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

3.7.2. Yapısal ve Optik Karakterizasyonları

Nanomalzemelerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin anlaşılabilmesi için ayrıntılı karakterizasyonlarının yapılması gerekmektedir. Karakterizasyon süreci nanomalzemeleri tanımak açısından son derece önemlidir. Bu tez kapsamında KKN'ların sentezi ve güneş pillerinin üretimi aşamasında optik, morfolojik ve yapısal olarak karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Ultra Viyole-Görünür Bölge (UV-Vis) Absorpsiyon Spektroskopisi

UV/Vis Absorpsiyon spektroskopisi numunelerin niceliksel veya niteliksel analizi için kullanılır. UV/Vis analizi için numune katı, sıvı veya buhar olabilir. UV/Vis analizi için uygulanan dalga boyu 200-800 nm aralığındadır (200-400 nm ve 400-800 nm'deki dalga boyları sırasıyla UV ve görünür bölgelerdir).



Şekil 3.13. Gelen ışığın numune tarafından absorpsiyonu

Bir malzeme ile ışık arasında olası üç etkileşim vardır. Işığın bir kısmı malzeme tarafından absorbe edilir, bir kısmı iletilir veya yansıtılır. Bu nedenle, gelen ışığın yoğunluğu Denklem 1’de olduğu gibi soğurulan (%A), yansıtılan (%R) ve iletilen (%T) ışığın yüzdeleri olarak yazılabilir.

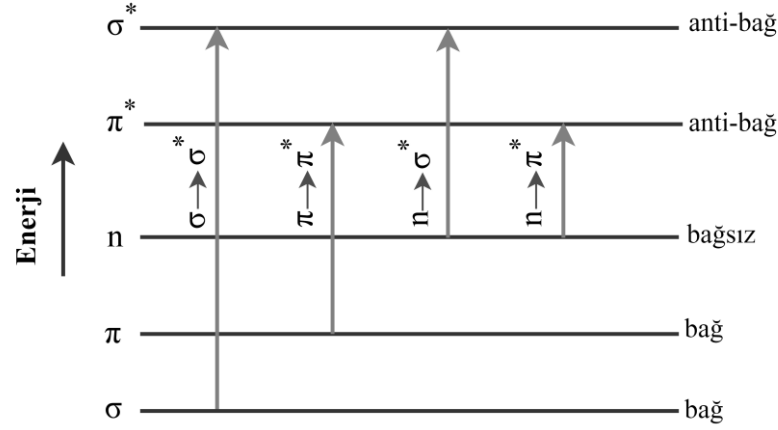
$$%A + %R + %T = 1 \quad (3.1)$$

Absorpsiyon, gelen ışığın bir malzemeden çıkan ışığa oranının logaritması olarak tanımlanır. Belirli bir dalga boyundaki absorbans A, Denklem 3.2’ de tanımlanır;

$$A(\lambda) = -\log \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (3.2)$$

Burada I ölçülen yoğunluktur ve I_0 gelen ışının yoğunluğudur. UV-Vis Absorpsiyon Spektroskopisi malzemenin elektromanyetik ışınımı absorptlamasını inceler. Başka bir deyişle, numunenin UV/Vis absorpsiyonu, molekülün değerlik elektronunda bir enerji seviyesi geçişi yaratır. Kimyasal yapılarda Şekil 3.14’de görüldüğü gibi σ bağlayıcı elektronlar, π bağlayıcı elektronlar ve bağlayıcı olmayan (n) elektronlardan oluşan üç tip değerlik elektronu vardır. Bu nedenle kimyasal yapının elektronik geçişi $\sigma \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \sigma^*$, $\pi \rightarrow \pi^*$ ve $n \rightarrow \pi^*$ olabilir (burada *, elektronik olarak uyarılmış bir durumu belirtir) (Lin, 2013). $\sigma \rightarrow \sigma^*$ ’nın geçişleri genellikle vakumlu UV bölgesine karşılık geldiği için UV-Vis analizi dalga boyu sınırının dışındadır. Benzer şekilde $n \rightarrow \sigma^*$ elektronik geçişleri de 200 nm’nin altındaki dalga boylarında gerçekleşir ve UV/Vis spektroskopisi kullanılarak kolayca analiz edilemez. Bununla birlikte, yukarıdaki geçişlerden farklı olarak, $\pi \rightarrow \pi^*$ ve $n \rightarrow \pi^*$ geçişleri, uygun yoğunluk ve dalga boyunda (UV bölgesinden görünür bölgeye, 200-800 nm) UV/Vis

spektrumlarında rutin olarak gözlemlenir. Farklı moleküller ve malzeme yapıları, farklı UV/Vis absorpsiyon spektrumu özellikleri oluşturur.



Şekil 3.14. Elektronik moleküler enerji seviyeleri

Numunede elektromanyetik ışının absorptasyonu Lambert-Beer Yasası ilkesine dayanır. Lambert-Beer yasasına göre, bir çözeltinin absorptladığı ışığın miktarı, çözeltinin konsantrasyonu ve çözeltiden geçerken aldığı optik yol uzunluğu ile doğru orantılıdır (Binek, 2017).

$$Absorbans (A) = \epsilon \cdot c \cdot l = -\log_{10} T \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’de ϵ absorpsiyon katsayısı (L/mol.cm), c çözeltinin konsantrasyonu (mol/L), l çözeltinin uzunluğu (cm) ve T ise çözeltiden çıkan ışık şiddetinin çözeltiliye giren ışık şiddetine oranı olan transmittanstır. UV-Vis Absorpsiyon Spektroskopisi ile monokromatörden geçerek farklı dalga boylarına ayrılan ışın demeti malzemenin içinden geçerek dedektöre ulaşır ve dedektörden okunan foton miktarına karşılık absorpsiyon verileri UV-VIS spektrumu halinde kaydedilir.

UV-Vis absorpsiyon spektrometre verileri kullanılarak numunelerin optik bant boşluklarını da belirlemek mümkündür. Teorik olarak absorpsiyon katsayısı α ile doğrudan geçiş foton enerjisi arasındaki ilişki Tauc Plot denklemi olarak isimlendirilen Denklem 3.4’de gösterildiği gibi verilmektedir.

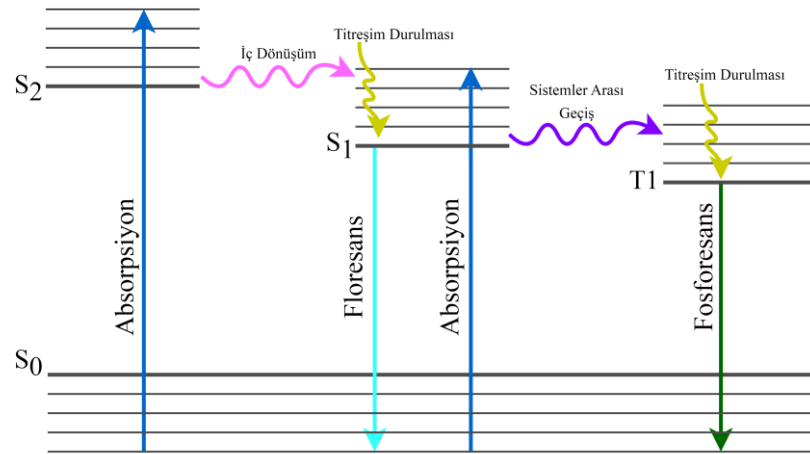
$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (3.4)$$

Bu denklemde A kırılma indisi ve α , ν , h sırasıyla absorpsiyon katsayısı, frekans ve Planck sabitidir (Kızılçaoğlu ve ark., 2016). Absorbans verileri $(h\nu\alpha)^2$ ye karşı $(h\nu)$ Tauc grafiğine yerleştirilir ve elde edilen eğriye teğet olacak şekilde bir doğru x eksenini kestiği noktaya kadar indirildiğinde, doğrunun x eksenini kestiği nokta malzemenin optik bant boşluğunu verir.

Bu tez çalışması kapsamında absorpsiyon verileri 200 ila 800 nm dalga boyu aralığında Biochrom Libra S22 marka cihaz ile elde edilmiştir. Ayrıca absorpsiyon verileri kullanılarak perovskit filmlerin bant boşlukları hesaplanmıştır.

Fotolüminesans (PL) Spektroskopisi

Bir malzemenin atom veya molekülleri elektronik olarak uyarıldığında kararsız hale geçer. Uyarılmış bu atomlar enerjilerini atarak temel enerji seviyesine geçme eğilimindedirler. Temel seviyeye sönümlenirken enerjisini ışıma olarak vermesi lüminesans olarak tanımlanır. Uyarmanın ışık ile yapıldığı lüminesansa fotolüminesans denir (Menzek, 2017). Lüminesans olayları Şekil 3.15'deki Jablonski diyagramı ile açıklanmaktadır. S_0 molekülün temel halini, S_1 singlet uyarılma halini, S_2 'de triplet uyarılma halini göstermektedir. Bu seviyeler elektronik uyarılma seviyeleridir. Singlet uyarılma halinden temel enerji seviyesine geçişteki ışıma floresans, triplet uyarılma halinden temel seviyeye geçiş ise fosforesans olarak tanımlanmaktadır. Elektronun temel enerji düzeyine dönmesi için geçen süre floresansta 10^{-6} s içinde gerçekleşirken, fosforesansta 10^{-6} s'den daha uzun süreleri kapsar ve uyarma kesildikten sonra bile devam edebilir (Koçak, 2019).



Şekil 3.15. Jablonski Diyagramı

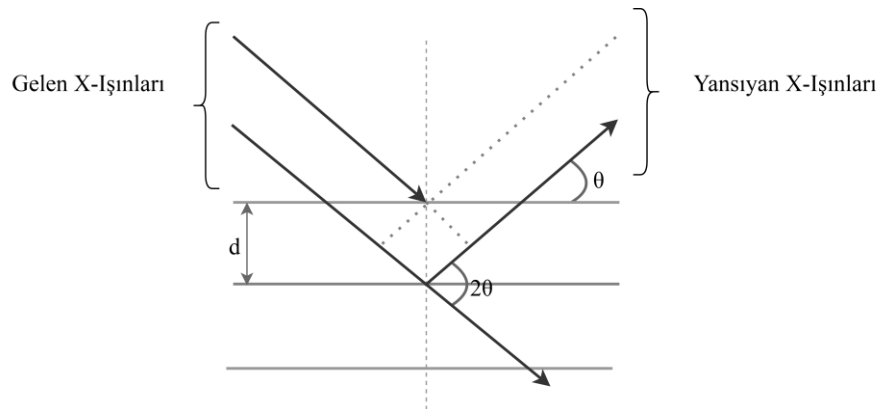
Fotolüminesans Spektroskopisi, ışığa duyarlı malzemelerin foton-elektron özelliklerini anlamak için kullanılan temel bir yöntemdir. Malzeme spektroskopik tekniklerle uyarıldıktan sonra yayılan fotonların enerji dağılımını ölçmesi prensibine dayanmaktadır (Yakut ve ark.). Bu tez çalışmasında, karbon kuantum nokta ve ince film numunelerinin optik karakterizasyonu için Perkin Elmer LS-55 fotolüminesans spektrometresi kullanılmıştır.

X Işını Kırınım Metodu (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), kristal malzemelerin bileşimi ve atomik yapının karakterizasyonu için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. XRD ölçümü Şekil 3.16'da görüldüğü gibi X ışınları demetinin, analiz edilecek numunenin üzerine gönderilip, kristallerin atomlarına çarptırılarak yansıtılması prensibine dayanır. Bir dedektör yardımıyla kırılan ışınların kaydedilmesiyle kristalin katman sayısı ile ilgili bilgi elde edilebilir. X-ışınlarının numune yüzeyi üzerindeki kırınımı Denklem 3.5'te verilen Bragg yasası ile açıklanabilir;

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.5)$$

bu denklemde λ gelen X-ışınının dalga boyu, θ ışınların düzlemle yaptığı açı, d düzlemler arası mesafe ve n kırınım sabitidir (Hellmann, 2021).



Şekil 3.16. Bragg Yasası

X Işını Kırınım Metodu ile elde edilen piklerden Scherrer denklemi kullanılarak kristalin ortalama parçacık büyüklüğü hesaplanabilmektedir.

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{B \cdot \cos \theta} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’da D; kristal çapını, K; kristal biçimine bağlı bir sabiti (genellikle 0.89 alınır), λ ; x ışını dalga boyunu, B; FWHM (full width at half max) pikin yarı yükseklik genişliğini ve θ_B ; Bragg açısını ifade eder.

Tez çalışması kapsamında Bruker D8 Advance marka ve modeli XRD cihazı kullanılmış olup MAPbI₃ perovskit kristallerinin yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca XRD verilerine Scherrer formülü uygulanarak MAPbI₃ filmlerinin kristal boyutları hesaplanmıştır.

X Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), malzemelerin elementel bileşimlerini belirlemek için kullanılır. Numune yüzeyindeki bileşimin tespiti, numune yüzeyine vakum altında X-ışını gönderilmesi ve uyarılmış elektronların (fotoelektron) kinetik enerjilerinin ölçülmesi prensibine dayanır. Denklem 3.7’de $KE_{elektron}$ elektronun kinetik enerjisi, $h\nu$ yüzeye gelen X ışını enerjisi ve $h\nu_0$ elektronu koparmak için gereken eşik enerjisidir.

$$KE_{elektron} = h\nu - h\nu_0 \quad (3.7)$$

Buna bağlı olarak fotoelektronların kinetik enerjisi bilindiğinde, koparılan her bir elektronun bağlanma enerjisi tespit edilebilir. Uyarılan her bir elektronun bağlanma enerjisi Denklem 3.8’deki denklem yardımıyla hesaplanabilir (Martínez, 2020).

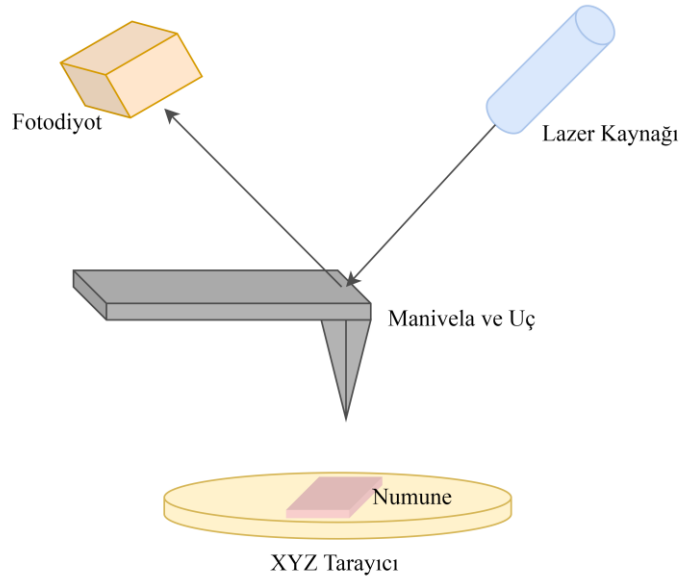
$$BE = h\nu - KE_{elektron} - \phi_{spec} \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte BE uyarılan elektronun bağlanma enerjisi, Φ spektrometre iş fonksiyonudur. X-ışını fotoelektron spektroskopisi fotoelektron sayısını elektron bağlanma enerjisine göre gösteren bir grafikdir. Bağlanma enerjisi elementin kendine özgü karakteristik bilgisidir. Bu nedenle, belirli enerjilere sahip pikler, numunedeki belirli bir elementi gösterir ve pik yoğunluğu, numunedeki atomların konsantrasyonu

hakkında bilgi sağlar. Böylelikle numunedeki element ve bileşenlerin neler olduğu ve her bir bileşenin miktarı belirlenebilir. Bu çalışmada Thermo Scientific K-Alpha X-ray Fotoelektron Spektrometresi ile XPS taramaları gerçekleştirilmiştir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) biriktirilen ince filmlerin yüzey morfolojisi ve pürüzlülük özelliklerinin incelenmesi için kullanılan yüksek çözünürlüklü bir mikroskopi tekniğidir. Yüzeydeki atomları tanımlamak ve belirli bir atom ile komşu atomları arasındaki etkileşimleri değerlendirmek için kullanılır. Atomik Kuvvet Mikroskobu Şekil 3.17’de şematik olarak gösterildiği gibi bir konsol ucundaki probun, nanometreden mikrometreye kadar ölçekte topografik varyasyonları tarama tekniğine dayalı bir ölçüm tekniğidir. İncelenen alan, bir fotodiyoda yansıyan lazer ışığı miktarının değiştirilmesiyle analiz edilir (Degterev, 2020). Tarama işleminde yüzeye değerek ölçüm yapılabildiği gibi temas etmeden de tarama yapılabilmektedir. Temas ederek yapılan ölçüm modu sert ve düz yüzeyler için daha uygundur. AFM tekniğinin en avantajlı yönlerinden biri ölçümlerden elde edilen sayısal verilerin hesaplanmasıyla görüntü çıktısı elde edilebilmesidir. Böylelikle AFM ile görüntüsü elde edilen yüzeyin istenilen alandaki pürüzlülük değerleri cihazın yazılımı ile bulunabilmektedir (Kara, 2018). Çalışma kapsamında N-KKN ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin yüzeyleri ve pürüzlülük değerleri NT-MDT, AFM NTEGRA Solaris marka ve modellenli cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) şematik gösterimi

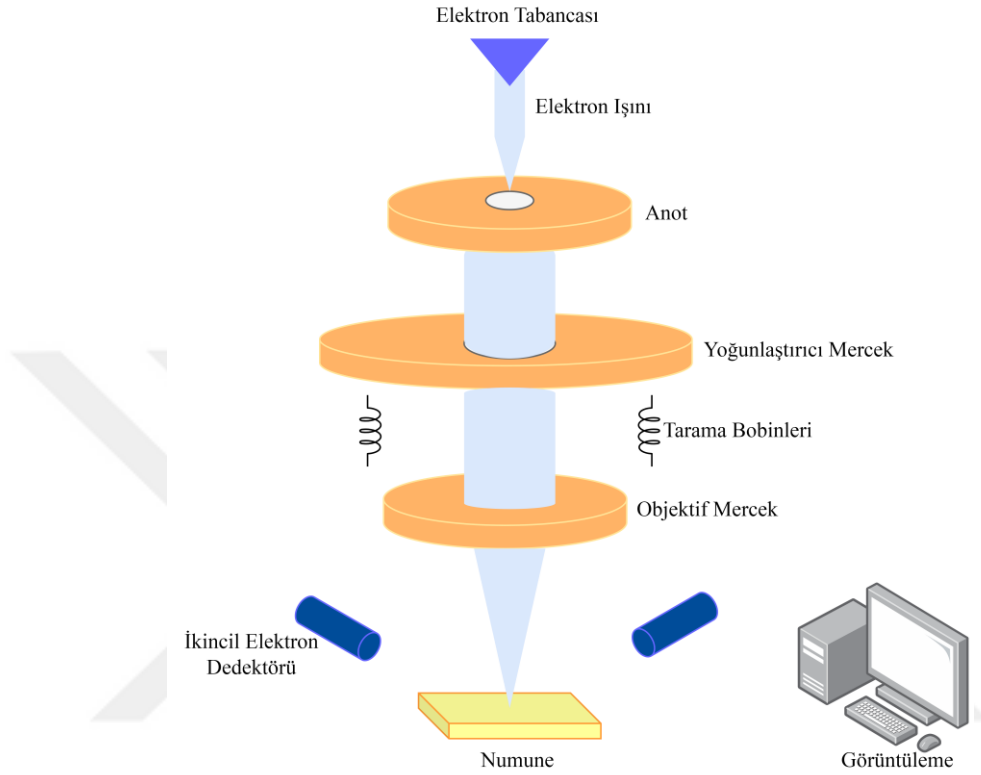
Elektron Mikroskopları

Elektron Mikroskopları yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için kullanılan cihazlardır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) en yaygın kullanılan iki elektron mikroskobu türüdür.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Malzemeleri karakterize etmenin bir yolu da taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanmaktır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numunenin yüzey morfolojisi bilgilerini nanometrik ölçekte elde etmek için ince bir odaklanmış elektron demeti ile numunenin yüzeyini tarama esasına dayalı bir elektron mikroskobudur. Ayrıca temassız bir görüntüleme yöntemi olduğu için numunenin çizilme riski AFM'ye göre çok daha azdır. Numune ve elektron ışını arasındaki etkileşimden elde edilir. Taramalı Elektron Mikroskobu, Şekil 3.18'da şematik olarak görüldüğü gibi elektron tabancasından gelen elektron ışını, elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekten ve elektron demetini numune üzerinde odaklamak için objektif mercekten geçer. Tarama bobinleri elektron demetinin numune yüzeyini taramasını sağlar. Yüzeyde saçılan elektronlar belirli bir açıyla yerleştirilmiş bir dedektör tarafından tespit edilerek dijital sinyale çevrilir ve bilgisayar monitörüne aktarılır. Taramalı Elektron

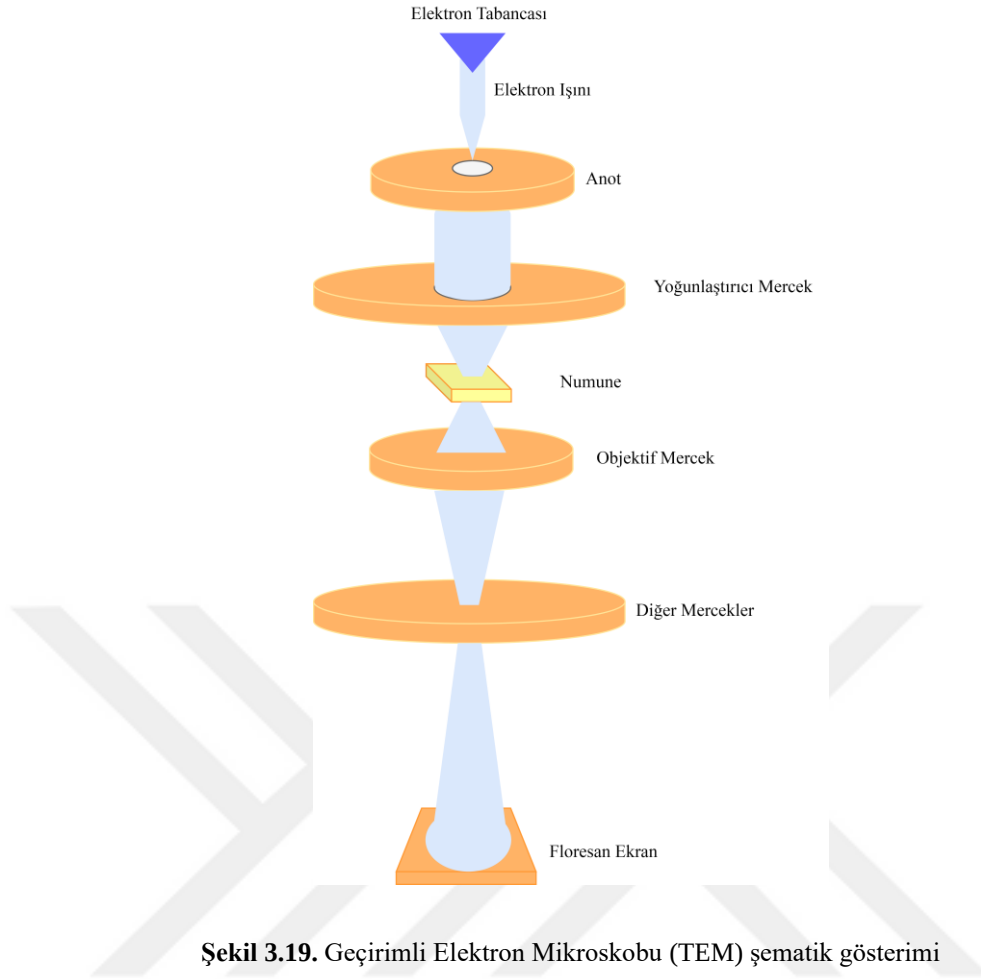
Mikroskobu ile üç boyutlu siyah-beyaz görüntüler elde edilir. Ayrıca SEM, numunedeki elementleri tanımlamak ve özelliklerini analiz etmek için EDX ile birlikte kullanılabilir (Yakut ve ark.). Bu tez çalışmasında KKN'ların ve ince filmlerin ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yüzey görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 3.18. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) şematik gösterimi

Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), numunenin iç yapısının görüntüsünü oluşturmak için geniş bir elektron demeti kullanan elektron mikroskobudur. Bir elektron ışını, numunenin içinden geçirilerek numunenin morfolojisini, bileşimini ve kristal yapısını detaylandıran bir görüntü oluşturur. Şekil 3.19'de şematik görselde olduğu gibi elektronlar numuneden geçtikten sonra aşağıdaki dedektöre ulaşır ve floresan üzerinde 2 boyutlu görüntü elde edilir (Gleichmann, 2020). Tez çalışmasında KKN'ların ve ince film numunelerinin parçacık tarama ölçümleri JEOL JEM 2100 FHRTEM marka Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ile gerçekleştirilmiştir.



SEM ve TEM arasında birçok benzerlik vardır. Bu iki yüksek çözünürlüklü mikroskobun bileşenleri birbirine çok benzer. Her ikisi de vakum altında çalışır ve numuneye doğru bir elektron akışı yayan bir elektron kaynağı/tabancası vardır ve her biri elektron ışınını kontrol etmek ve görüntü yakalamak için lensler içerir. Her iki elektron mikroskobunun benzerlikleri yanı sıra işlevsel farklılıkları da bulunmaktadır. Temel mikroskop kurulumları birbirinden farklıdır. SEM’de elektron sütununun tabanında bulunan numune taranır ve ortaya çıkan elektron saçılması analiz edilerek bir görüntü üretilir. TEM’de ise numune mikroskobun ortasına yerleştirilir ve elektronlar toplanmadan önce numuneden geçer. TEM ultra ince numunelerin iç yapısı hakkında bilgi sunarken, SEM numunenin yüzeyi hakkında bilgi kaydeder.

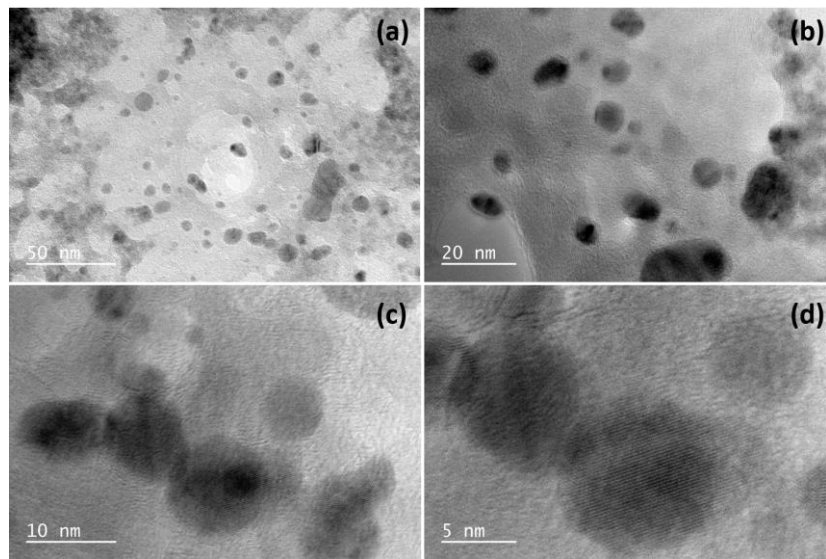
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında azot katkılı karbon kuantum noktalar (N-KKN) ve bor katkılı karbon kuantum noktalar (B-KKN) sentezlenmiş olup, sentezlenen karbon kuantum noktaların optik ve yapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen N-KKN ve B-KKN'ların her biri, perovskit güneş pili çalışmalarında katkı maddesi olarak kullanılmıştır. N-KKN ve B-KKN'lar MAPbI₃ çözeltilerine hacimce farklı konsantrasyonlarda eklenerek hem katkısız hem de katkılı perovskit güneş pilleri üretilerek pil üzerindeki etkileri incelenmiş ve güneş pillerinin fotovoltaik karakteristikleri belirlenmiştir.

4.1. Karbon Kuantum Noktaların Karakterizasyonları

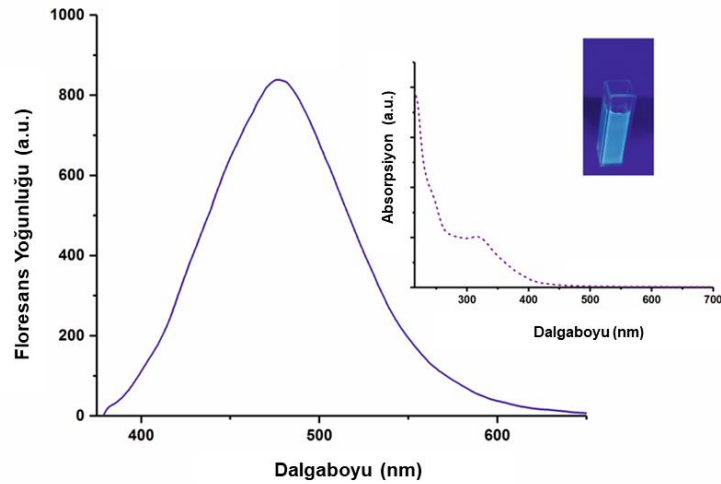
4.1.1. N-KKN'ların Yapısal ve Optik Karakterizasyonları

Karbon kuantum noktaların, farklı hetero atomlar ile katkılanmasının etkileri çeşitli karakterizasyon yöntemleri yardımıyla incelenmiştir. Azot katkılı karbon kuantum noktaların (N-KKN) karakterizasyonu için ilk olarak TEM analizi gerçekleştirilmiş olup, Şekil 4.1'de N-KKN'ların TEM görüntüleri kuantum noktaların DMSO çözeltisi içinde homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Partikül şekillerinin küresel olduğu görülmektedir. N-KKN'ların ortalama çapının 2-5 nm aralığında olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir.



Şekil 4.1. N-KKN'ların TEM görüntüleri

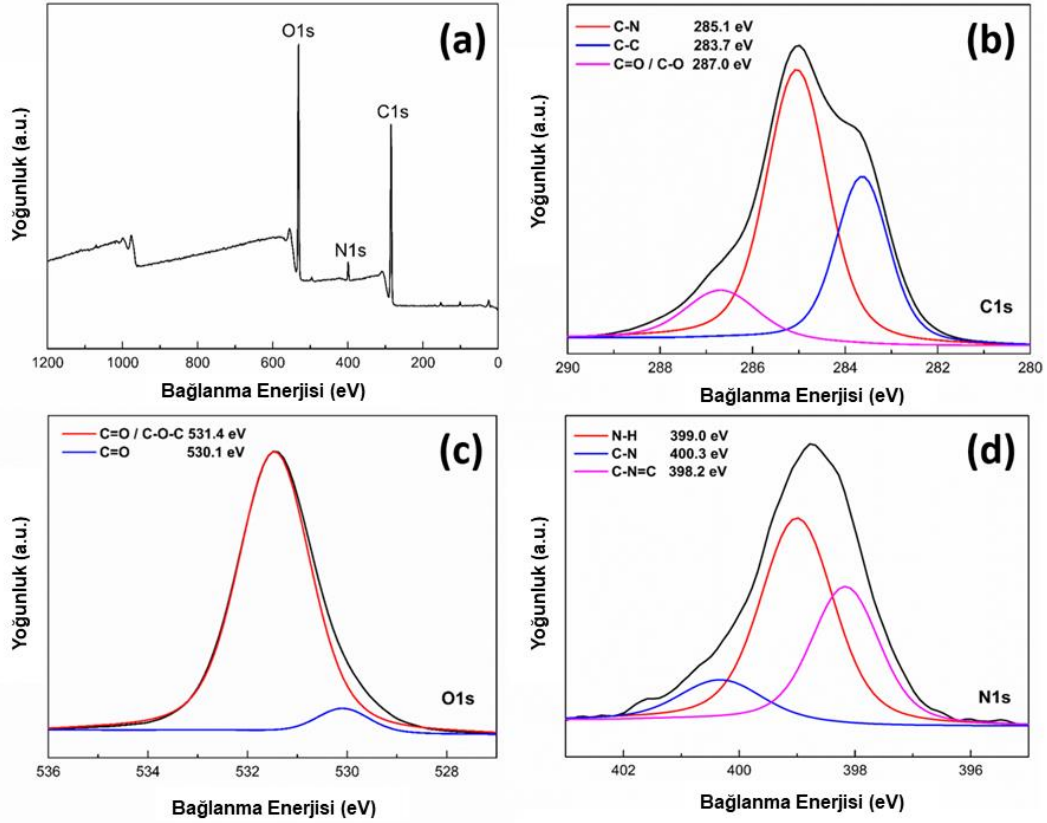
Daha fazla yapısal analiz için N-KKN'lar UV-Vis absorpsiyon ve floresans spektrometresi ile analiz edildi. N-KKN'ların floresans spektrumu, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, 360 nm uyarma dalga boyunda elde edilmiştir. N-KKN'ların DMSO'lu dispersiyonları gün ışığında şeffaf açık sarı olarak görülürken, UV lamba altında parlak mavi-yeşil floresans sergilemektedir. 490 nm civarındaki emisyon zirvesi simetriktir ve çok yüksek bir emisyon yoğunluğuna sahiptir. Ek olarak, UV-Vis absorpsiyon spektrumunda yaklaşık 320 nm'de güçlü bir absorpsiyon zirvesi gözlenmektedir. Bu, N-N-KKN'ların yüzeyindeki C=O gruplarına ait $n-\pi^*$ geçişinden kaynaklanan karakteristik karbon pikine atfedilebilir (Niu ve ark., 2015). N-KKN'ların floresan yoğunluğunu 60 gün sonra bile büyük bir değişim olmadan kararlılığını korumuştur.



Şekil 4.2. N-KKN'ların UV-Vis absorpsiyon ve floresans spektrumları

N-KKN'ların yüzeylerindeki karbon, azot ve oksijen atomları arasındaki bağı ortaya çıkarmak için yüzey analizi, XPS taramaları ile gerçekleştirilmiş olup Şekil 4.3 (a) (b) (c) ve (d)'de gösterilmektedir. Şekil 4.3 (a)'da 531.1 eV, 399.1 ve 285.1 eV'daki kuvvetli pikler, sırasıyla O1, N1 ve C1'lerin bağlanma enerjilerine karşılık gelir (Zhou ve ark., 2014b). Şekil 4.3 (b)'de C1'lerin yüksek çözünürlüklü spektrumundan görüldüğü gibi, 287.0, 285.1 ve 283.7 eV'daki üç tepe sırasıyla C-O, C-N ve C-C bağlarına karşılık gelir (Kang ve ark., 2015). Şekil 4.3 (c)'de gösterildiği gibi 531.4 eV ve 530.1 eV'daki O1'lerin zirvesi, sırasıyla C-O-C ve C=O bağlarına karşılık gelir

(Yang ve ark., 2014). Şekil 4.3 (d)'te, 400.3 eV, 399.0 eV ve 398.2 eV'da bulunan zirveler, sırasıyla N-KKN'ların $-NH_2$ grubu tarafından başarıyla fonksiyonelleştirildiğini doğrulayan C-N, N-H ve C-N=C bağlarına karşılık gelir (Park ve ark., 2017). Sonuçlar literatür verileriyle uyum içerisindedir ve yapılan sentez işlemi N-KKN'nın varlığını doğrulamaktadır.

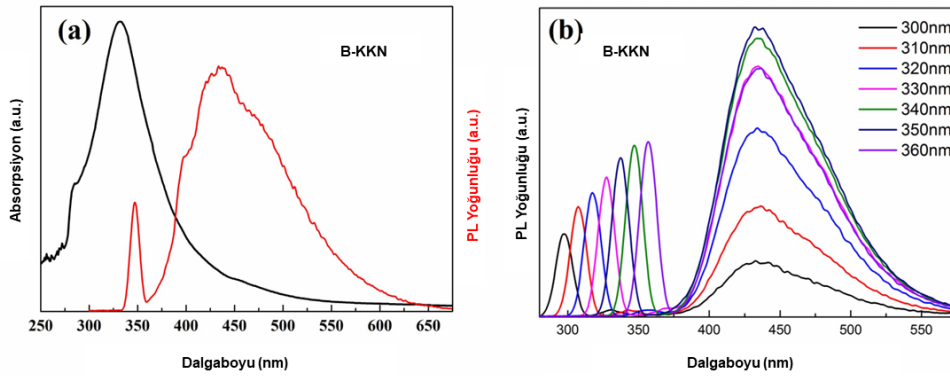


Şekil 4.3. N-KKN'ların a) XPS yüzey spektrumu ve b) C1, c) O1 ve d) N1 XPS dekonvolüsyonu

4.1.2. B-KKN'ların Yapısal ve Optik Karakterizasyonları

B-KKN'ların optik özellikleri ultraviyole görünür (UV) absorpsiyon ve fotoluminesans (PL) spektroskopisi ile incelenmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.4 (a) ve Şekil 4.4 (b)'de gösterilmiştir. B-KKN'ların absorpsiyon zirvesi, $n-\pi^*$ absorpsiyon bandına atfedilen yaklaşık 330 nm'de merkezlenmiştir (Fan ve ark., 2014). Farklı uyarma dalga boylarında alınan Fotoluminesans (PL) ölçümlerindeki spektrum davranışının maksimum zirvesinin uyarma dalga boyuna bağlı olarak değiştiği görülmektedir. B-KKN'ların PL spektrumu 300 nm ila 360 nm arasındaki uyarma dalga boyunda ve Şekil 4.4 (b)'de gösterildiği gibi yaklaşık 430 nm'de güçlü bir emisyon

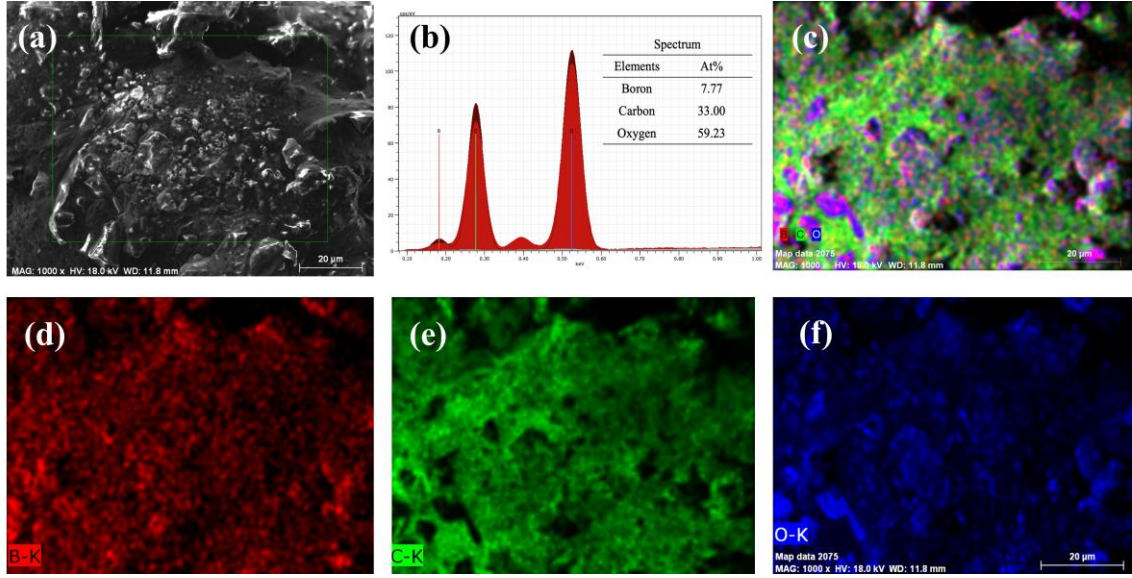
zirvesinde elde edilmiştir. Uyarma dalga boyu arttıkça, 330 nm ila 350 nm arası uyarma dalga boyunda B-KKN'ların emisyon zirvesinin yoğunluğu yükselmiş, daha sonra 360 nm uyarma dalga boyunda azalma eğilimi göstermiştir. Şekil 4.4 (a)'da görüldüğü gibi en parlak fotolüminesans zirvesi 350 nm dalga boylarında gözlenmiştir. B-KKN'ların optik özelliklerinde mavi-yeşil floresan ışımaya yapmasının, daha yüksek işgal edilmiş moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) arasındaki bant aralığı ile ilişkili olabilir (Pan ve ark., 2010).



Şekil 4.4. a) B-KKN'ların UV-Vis Absorpsiyon spektrumu ve b) PL spektrumu

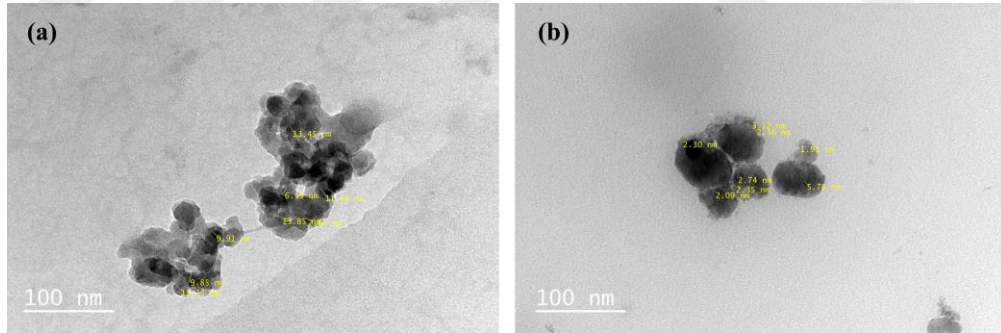
Ek olarak, sentezlenen B-KKN'ların yapılan önceki çalışmalarda fotolüminesans (PL) kuantum verimi (QY), referans olarak Kumarin 2 ile yaklaşık olarak %12.4 olarak hesaplanmıştır (Yılmaz, 2021). Kuantum verimleri, bir elektron alıcısı olarak B-KKN'ların, özellikle uyarılmış durumda, yük transferi için bir itici güç olarak hareket edebileceğini göstermektedir (Shan ve ark., 2014).

Sentezlenen B-KKN'lar için yapısal karakterizasyon çok önemlidir. Böylece, B-KKN'larda bor elementinin varlığını anlamak için SEM-EDX haritalama tekniği uygulanmıştır. Şekil 4.5 (a-f)'de gösterildiği gibi SEM-EDX haritalaması sonucuna göre, %7.77 bor (B), %33.00 karbon (C) ve %59.23 oksijenden (O) oluşan üç ana element ölçülmüştür. Görüldüğü gibi, ana bileşen karbondur, oysa oksijenin varlığı B-KKN'larda hidroksil gibi fonksiyonel gruplarla korelasyon göstermektedir. SEM-EDX haritalamasının sonucu, B-KKN'ların bor atomlarıyla başarılı bir şekilde katkıldığını göstermektedir.



Şekil 4.5. (a) SEM görüntüsü, (b) EDX deseni ve (c-f) B-KKN'ların EDX haritalama görüntüleri

Sentezlenen B-KKN'ların parçacık boyutu TEM tekniği ile analiz edildi. B-KKN'ların TEM görüntüleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. B-KKN'lar düzgün dağılmış küresel forma sahiptir ve B-KKN'ların ortalama çapı 10 nm civarında ölçülmüştür. Hem SEM-EDX hem de TEM sonuçları B-KKN'ların sentezlendiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.6. B-KKN'ların TEM görüntüleri

4.2. İnce Filmlerin Karakterizasyonları

Bu bölümde N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin yapısal morfolojik ve optik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

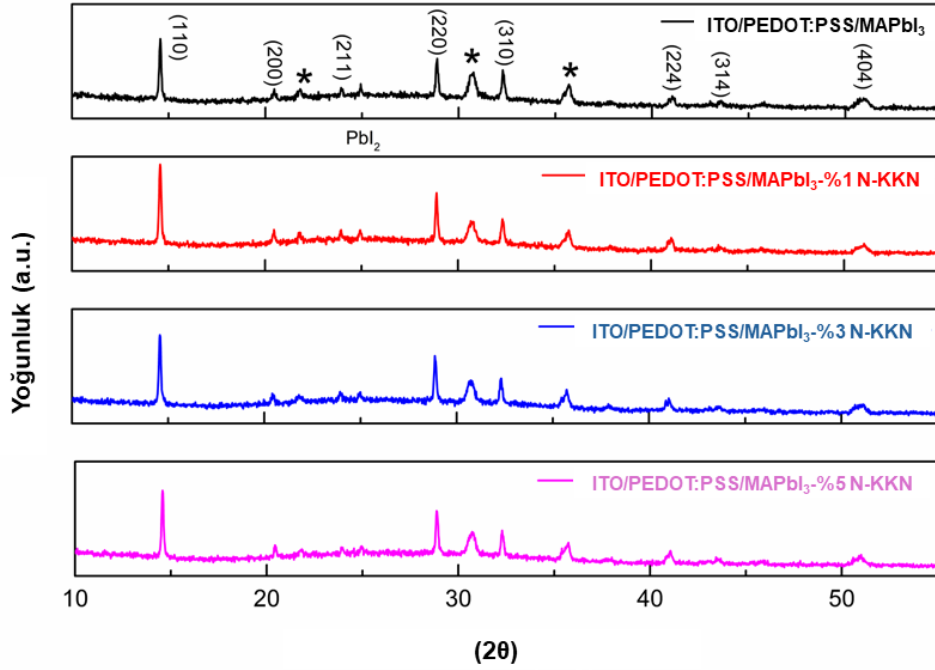
4.2.1. N-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin Yapısal, Morfolojik ve Optik Karakterizasyonları

4.2.1.1. N-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin XRD Karakterizasyonları

Tüm yüzeylerin XRD desenleri Şekil 4.7’de görülen, (110), (200), (211), (220), (310), (224), (314) ve (404)’e karşılık gelen 14.4°, 20.4°, 23.9°, 28.8°, 32.3°, 41.0°, 43.6° ve 51.0°’de sekiz ana pikten oluşmaktadır. Ek olarak, XRD spektrumlarında sırasıyla 21.8°, 30.7° ve 35.7° ve 24.9°’da PEDOT:PSS ve PbI₂ fazlarının varlığı görülebilir. Perovskit kafes, literatürde bildirilen bulgularla uyumludur (Seyyed Majid Mirhendi ve ark., 2017). N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin kristal yapısı üzerinde önemli bir etki gösterdiği görülebilir. N-KKN’ların konsantrasyonları arttıkça filmlerin kristallliği artmıştır. Özellikle, (110) düzlemlerinin şiddetlenen pikleri N-KKN katkı maddesinin daha iyi bir kristalleşmeye yol açtığını göstermektedir (Ma ve ark., 2018). MAPbI₃ filmlerinin kristal boyutları XRD desenlerinden Scherrer formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm MAPbI₃ filmleri için (110) pik değerine Scherrer formülü uygulanmış ve Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi bu piklerin yarı yükseklik genişliği (FWHM) değerleri katkısız ve %1, %3 ve %5 katkılı filmler için 0.146, 0.0589, 0.0579 ve 0.0508 olarak hesaplanmıştır. Katkılı olmayan MAPbI₃ filminin kristal boyutu 54.8 nm olarak hesaplanırken, hacimce %1, %3 ve %5 katkılı MAPbI₃ filmlerinin kristal boyutları sırasıyla 135.8, 138.2 ve 157.8 nm olarak hesaplanmıştır. N-KKN’ların, MAPbI₃ kristallliğini arttırmak için çekirdeklenme merkezi gibi davrandığı ve bunun da kristallerin tane boyutunda bir artışa yol açtığı söylenebilir (Wen ve ark., 2019).

Çizelge 4.1. Katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI₃ Filmlerin Pik Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM) ve Kristal Boyutu (D)

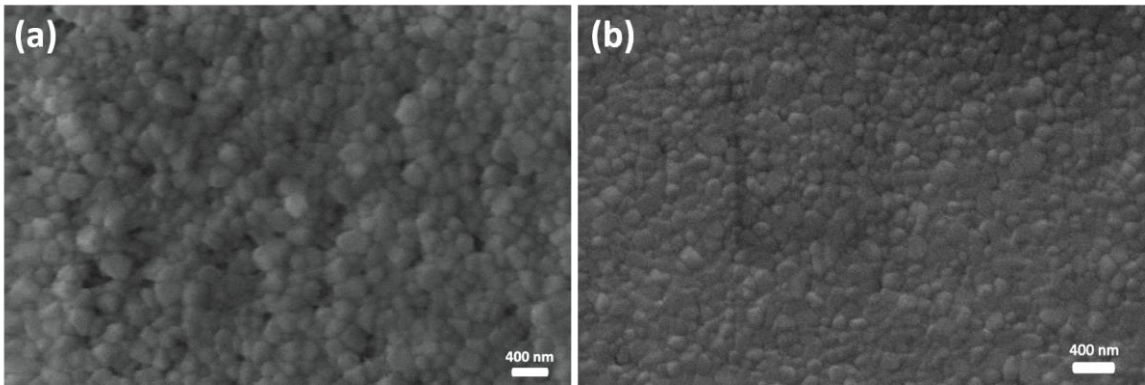
	Pik Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM)	Kristal Boyutu (D)
Katkısız	0.146	54.8
%1 N-KKN Katkılı	0.058	135.8
%3 N-KKN Katkılı	0.057	138.2
%5 N-KKN Katkılı	0.050	157.8



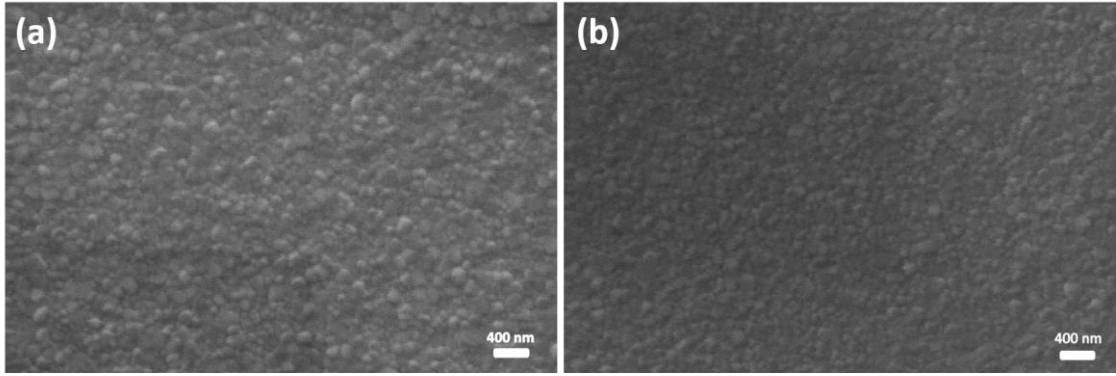
Şekil 4.7. PEDOT:PSS kaplı ITO camın üzerinde katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI₃

4.2.1.2. N-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin SEM Karakterizasyonları

Şekil 4.8 (a ve b), sırasıyla katkısız MAPbI₃ ve 3% oranında N-KKN katkılı MAPbI₃'ün (ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃ ve ITO/PEDOT: PSS/MAPbI₃-3% N-KKN), Şekil 4.9 (a ve b) ise sırasıyla %1 ve 5% oranında N-KKN katkılı MAPbI₃'ün, (ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃-1% N-KKN ve ITO/PEDOT: PSS/MAPbI₃-5% N-KKN) üst yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 4.8. (a) Katkısız MAPbI₃ ve (b) %3 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin üstten SEM görüntüleri



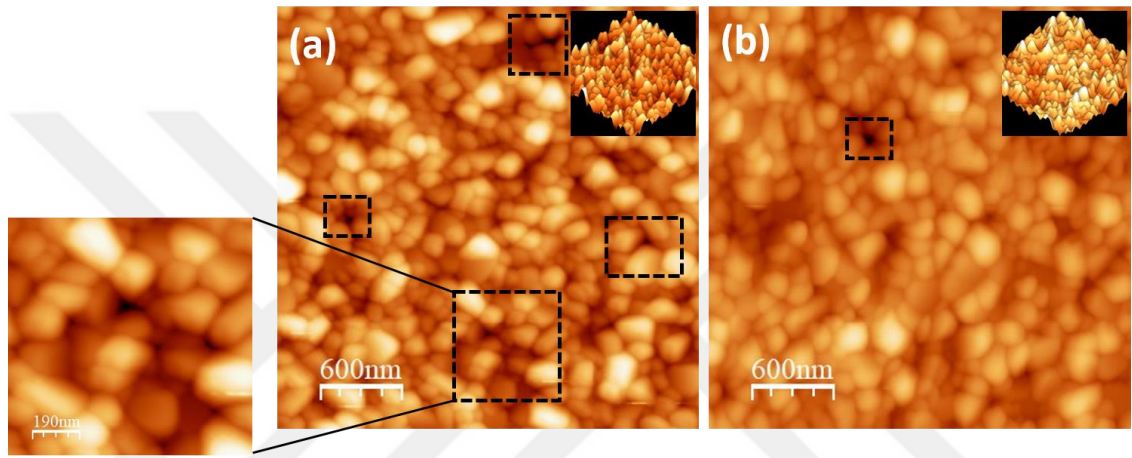
Şekil 4.9. (a) %1 N-KCN katkılı MAPbI₃ ve (b) %5 N-KCN katkılı MAPbI₃ filmlerinin üstten SEM görüntüleri

Katkı maddesinin dahil edilmesiyle yüzeylerin daha düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Katkılı yüzeylerin daha kompakt bir yüzeye sahip olduğu ve kristal taneleri arasında katkısız MAPbI₃'ün yüzeyine göre daha az boşluk olduğu gözlenmektedir. N-KCN katkısının hacminin MAPbI₃ çözeltilerine ilave edilmesiyle katkılanmamış yüzeye göre yüzeylerin daha az pinhol yoğunluğu gösterdiği açıktır. Daha pürüzsüz yüzeyler, Pb²⁺ iyonları için bir ara madde gibi davranan N-KCN'lar üzerindeki karbonil ve amin fonksiyonel gruplarının varlığına bağlanabilir (Bi ve ark., 2016). Tanecik formunun sıkı olması katkı maddesi varlığının MAPbI₃ kristal yapısını iyileştirdiğine atfedilebilir.

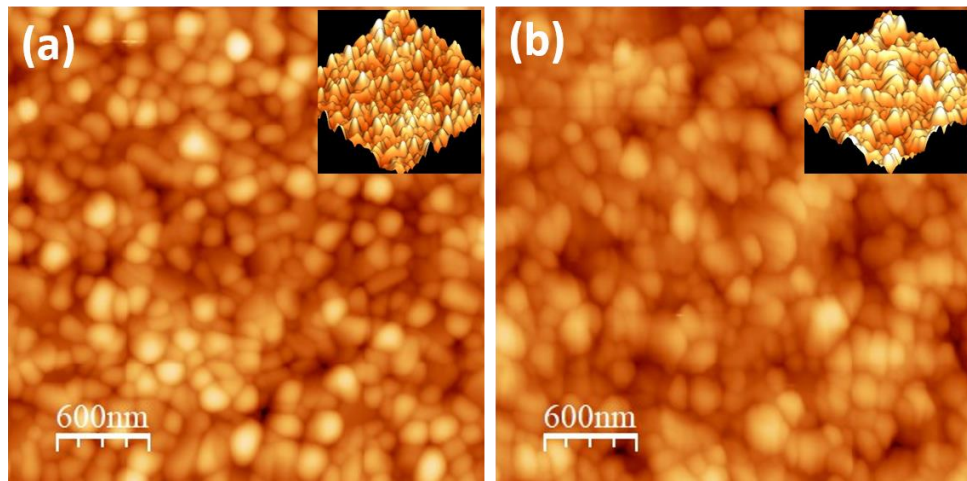
4.2.1.3. N-KCN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin AFM Karakterizasyonları

N-KCN'ların varlığının ince filmlerin morfolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için, perovskit filmlerin morfolojisi, ortam koşulları altında 5 V'luk bir gerilim ile Pt/Ir ile kaplanmış bir iğne uç vasıtasıyla temaslı modda AFM tekniği ile incelenmiştir. Ayrıca tane boyutu dağılımı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) analiz edilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de, katkısız ve %3 N-KCN katkılı MAPbI₃ filmlerin AFM görüntüleri görülmektedir. Katkısız ince film için perovskit taneler arasında ~50 nm büyüklüğünde çok sayıda boşluğa sahip olduğu görülmektedir. Az bir hacimde N-KCN'ların eklenmesiyle bile [hacimce %1 N-KCN katkılı ince film, Şekil 4.11 (a)], daha sürekli perovskit kristal oluşumu ve daha kompakt filmler elde edildiği sonucuna varılabilir. N-KCN katkısı kullanılarak hazırlanan MAPbI₃ filmlerin PEDOT:PSS yüzeyleri üzerinde homojen kaplamalar oluştuğu tespit edilmiştir. Üç boyutlu (3D)

görüntülerde ve Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi, Ra değerleri 14.5 nm’den (katkısız) 10.7 nm’ye (%1 N-KKN katkılı MAPbI₃) düşmüştür ve daha iyi bir üst katman büyümesi oluşturmak için iyileştirilmiş yüzey sunmaktadır. MAPbI₃ filminin Ra değerleri, artan N-KKN katkı maddesi hacmi ile 10.7 nm’den 13.5 nm’ye bir artış göstermesine rağmen, uygun hacimde katkı maddesi kullanılarak hazırlanan filmlerin yüzey morfolojik özelliklerini iyileştirilebileceği gözlemlenebilir. Katkısız ve katkılı MAPbI₃ filmlerinin (Çizelge 4.2) belirlenen tane boyutları, N-KKN katkı maddesinin tane boyutu dağılımı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.10. (a) Katkısız MAPbI₃ ve (b) %3 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin AFM görüntüleri



Şekil 4.11. (a) %1 N-KKN katkılı MAPbI₃ ve (b) %5 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin AFM görüntüleri

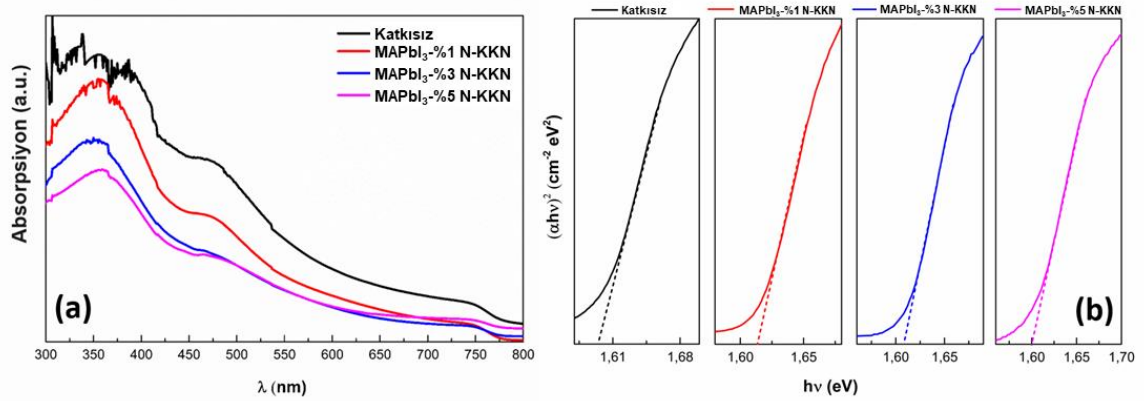
Çizelge 4.2. Katkısız ve N-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve istatistiksel tane boyutu dağılımı

	R_a (nm)	Tane Boyutu Dağılımı (nm)
Katkısız	14.51	62.1
%1 N-KKN Katkılı	10.69	85.7
%3 N-KKN Katkılı	11.17	94.6
%5 N-KKN Katkılı	13.48	143.9

4.2.1.4. N-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin UV-Vis Absorpsiyon

Karakterizasyonları

MAPbI₃ filmlerinde N-KKN'ların, optik özellikler üzerindeki etkisi UV-Vis absorpsiyon verileri kullanılarak araştırılmıştır. Katkısız ve katkılı MAPbI₃ filmlerinin soğurma spektrumları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin (a) UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve (b) Bant aralığını hesaplamak için optik absorpsiyon verilerine göre Tauc grafikleri

Tüm MAPbI₃ filmleri, 1.5-1.6 eV optik bant aralığını gösteren ~750-775 nm civarında karakteristik güçlü absorpsiyon göstermiştir. 500 ila 350 nm arasındaki geniş soğurma, PbI₂ varlığı ile ilişkili olabilir (Abdelmageed ve ark., 2016). N-KKN katkı maddesinin ilavesiyle optik soğurmanın azalması, N-KKN çözeltilerinin perovskit çözeltisini seyreltmesiyle açıklanabilir. Deneysel bölümde belirtildiği gibi, N-KKN'lar DMSO içinde çözülmüştür. Bu nedenle, her bir ilave nihai MAPbI₃ çözeltisi konsantrasyonunda bir azalmaya neden olacağından optik soğurma, artan N-KKN katkı maddesi hacmiyle azalmıştır. N-KKN'ların ultraviyole ışığı soğurduğu açıktır (Chandra ve ark., 2013). Katkısız MAPbI₃ yüzeyle karşılaştırıldığında, N-KKN'ların ilavesi ile karbon fonksiyon gruplarının $n-\pi^*$ geçişine bağlı olarak 300-400 nm'de absorpsiyon

spektrumlarında küçük bir mavi kayma meydana gelmiştir (Lin ve Zhang, 2012). Buna ek olarak, katkılanan malzemelerin parçacık boyutunun, elde edilen ince filmlerin optik özellikleri üzerinde bir etkisi olduğu bilinmektedir. Böyle bir mavi kaymanın, ışımsal depolarizasyon etkilerinden dolayı ince filmlerin partikül boyutlarının azalmasının bir fonksiyonu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, daha homojen kristal taneler bu kaymaya katkıda bulunabilir (Sheng Peng ve ark., 2010). Bu nedenle, MAPbI₃ filmlerinde N-KKN'ların varlığı, MAPbI₃'ün optik bant aralığı üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir.

Çizelge 4.3. Katkısız ve N-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin E_g değerleri

Yüzey	E _g (eV)
Katkısız	1.593
%1 N-KKN Katkılı	1.614
%3 N-KKN Katkılı	1.608
%5 N-KKN Katkılı	1.600

Katkısız ve katkılı MAPbI₃ filmlerinin optik bant boşlukları, absorbans verilerinin $(h\nu\alpha)^2$ ye karşı $(h\nu)$ Tauc grafiğine yerleştirilmesi ile belirlenebilir, Burada α absorpsiyon katsayısıdır ve Denklem 4.1 ile hesaplanır, ayrıca denklemdeki d film kalınlığı, T geçirgenliği ve R ise filmlerin yansımadır.

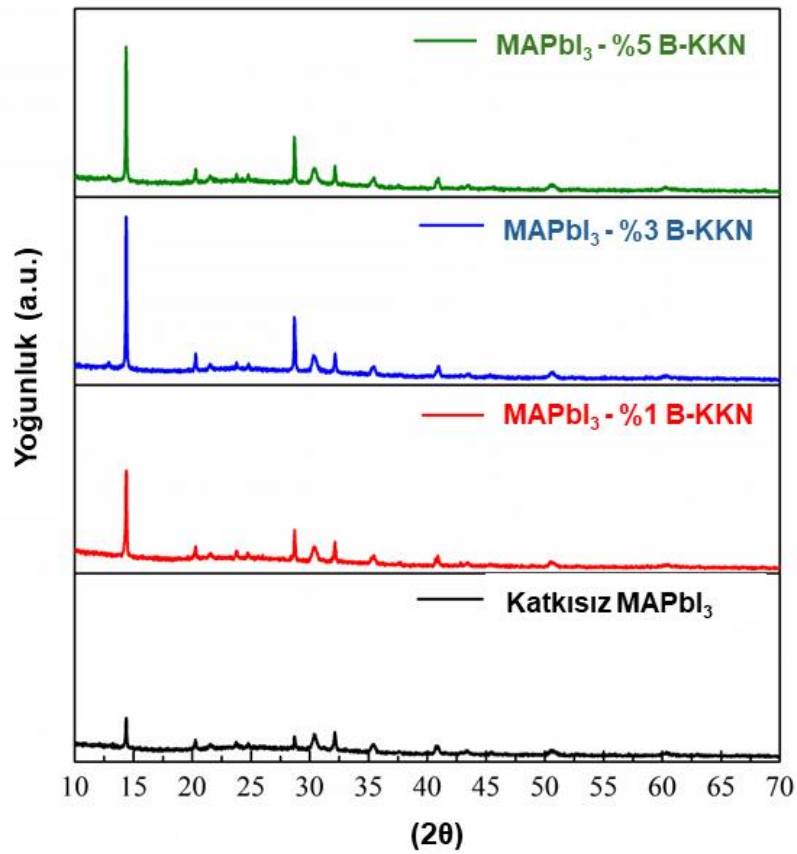
$$\alpha = -\left(\frac{1}{d}\right) \ln \left[\frac{T}{(1-R)^2} \right] \quad (4.1)$$

Farklı hacimlerdeki N-KKN katkı maddesinin optik bant aralığına etkisi Şekil 4.12 (b) absorpsiyon verileri kullanılarak tauc grafiği ile elde edilmiş ve Çizelge 4.3'de listelenmiştir. Katkısız MAPbI₃ filminin doğrudan bant aralığı 1.593 eV olarak hesaplanmış ve hacimce %1 N-KKN ilave edildikten sonra, doğrudan bant aralığı değeri 1.614 eV'a yükselmiştir. Doğrudan bant aralığı değerleri, N-KKN katkısı hacminin artmasıyla 1.608 ve 1.600 eV'a düşmektedir. Bu çalışma, N-KKN katkı maddesinin MAPbI₃'ün doğrudan bant aralığını oluşturmak için kullanılabileceğini göstermektedir.

4.2.2. B-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin Yapısal, Morfolojik ve Optik Karakterizasyonları

4.2.2.1. B-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin XRD Karakterizasyonları

B-KKN'ların MAPbI₃ yüzeylerinin kristalizasyonu üzerindeki etkisini belirlemek için perovskit ince filmlerin XRD karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13'te B-KKN'ların katkılандığı MAPbI₃ ince filmlerinin XRD desenleri görülmektedir. Tüm yüzeylerin XRD desenleri, MAPbI₃ için sırasıyla (110), (200), (220), (310), (310), (220), (310), (220), (310), (224), (304), (404) ve (444) kafes düzlemleriyle ilgili olarak yaklaşık 14.4°, 20.3°, 23.7°, 24.8°, 28.7°, 32.2°, 40.2°, 40.9°, 43.4°, 50.6° ve 60.4°'te on ana zirveden oluşur.



Şekil 4.13. PEDOT:PSS kaplı ITO camın üzerinde katkılı olmayan ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin X-ışını kırınım (XRD) desenleri

Bu kafes düzlemleri MAPbI₃ için ortorombik fazı temsil etmektedir (Ma ve ark., 2018). Ek olarak, stokiometrik olmayan PbI₂ fazlarının varlığı yaklaşık 21.5°, 30.4° ve 35.4° kırınım pozisyonlarında gözlemlenebilir (Caram ve ark., 2018). Görüldüğü gibi, bu PbI₂ faz zirvelerinin yoğunluğu, B-KKN'ların eklenmesi arttıkça biraz azalmıştır. Literatürde bildirilen çalışmalara dayanarak, perovskit güneş pillerinin performansının reaksiyona girmemiş PbI₂ ile doğrudan bağlı olduğu ve PbI₂'nin MAPbI₃ perovskitin bozunmasının bir yan ürünü olduğu bilinmektedir (Kim ve ark., 2019). Yüksek hücre verimliliği ancak PbI₂'nin büyük çoğunluğu perovskite dönüştürüldüğünde elde edilmektedir (Jacobsson ve ark., 2016). X-ışını kırınım (XRD) deseninde (110) ve (220) kafes düzlemlerinin artan tepe yoğunlukları, B-KKN'ların eklenmesinin perovskitin kristal yapısını iyileştirdiğini göstermektedir (Ma ve ark., 2018). B-KKN'ların eklenmesinin kristal yapı üzerinde önemli bir etki gösterdiği sonucuna varılabilir. B-KKN'ların %1 hacmine kıyasla, (110) ve (220) kafes düzlemlerinin tepe yoğunlukları, B-KKN'ların %3 ve %5'lik hacmi için artmıştır. Bu, eksitonik absorpsiyon zirvesinde gözlenen mavi kayma ile uyumlu olabilir (Rebecca ve ark., 2020). Perovskit filmlerin kristal boyutunu hesaplamak için tüm MAPbI₃ filmlerin (110) pik değerine Scherrer formülü uygulanmış ve bu piklerin yarı yükseklik genişliği (FWHM) değerleri B-KKN'ların 0, 1, 3 ve 5 hacimlerinde, sırasıyla 0.121, 0.112, 0.103 ve 0.093 olarak ölçülmüştür. Daha sonra, MAPbI₃'ün kristal boyutları, Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi, B-KKN'ların % 0 hacmi için 69.17 nm, % 1 hacmi için 74.73 nm, % 3 hacmi için 81.26 nm ve % 5 hacmi için 89.99 nm olarak hesaplanmıştır. B-KKN katkı maddesi ile hazırlanan MAPbI₃ filmleri, gelişmiş perovskit kristallliği ve artmış tane boyutu sunmuştur (Ma ve ark., 2018). B-KKN'ların perovskit filmlerin yapısını iyileştirmek için bir katkı maddesi olarak kullanılabilirdiği söylenebilir. XRD sonuçları morfolojik karakterizasyon sonucu ile uyum içindedir.

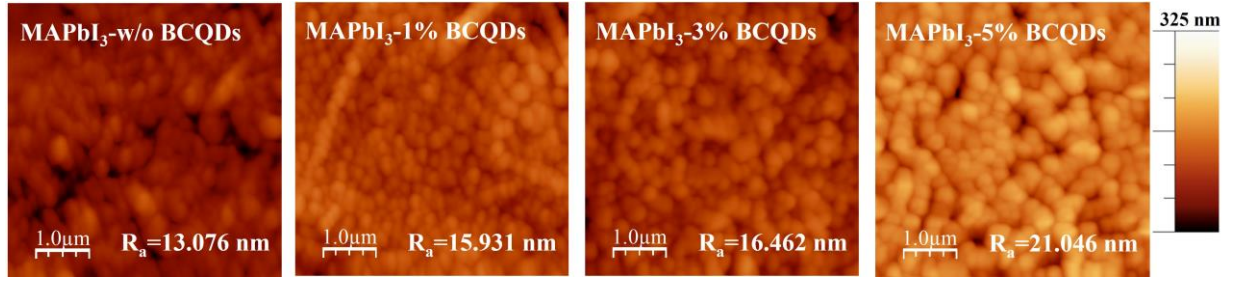
Çizelge 4.4. Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ Filmlerin
Pik Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM) ve Kristal Boyutu (D)

	Pik Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM)	Kristal Boyutu (D)
Katkısız	0.121	69.17
%1 B-KKN Katkılı	0.112	74.73
%3 B-KKN Katkılı	0.103	81.26
%5 B-KKN Katkılı	0.093	89.99

4.2.2.2. B-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin AFM Karakterizasyonları

B-KKN'ların varlığının ince filmlerin morfolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için AFM tekniği ile, ortam koşulları altında 5 V'luk bir gerilim ile Pt/Ir ile kaplanmış bir iğne uç vasıtasıyla temaslı modda incelenmiştir. Ayrıca, tane büyüklüğü dağılımı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) analiz edilmiştir. 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ tarama alanında B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin AFM görüntüleri Şekil 4.14'de görülmektedir. R_a değerleri, Çizelge 4.5'te listelendiği gibi, B-KKN'ların %0 hacminde 13.076 nm, B-KKN'ların %1 hacminde 15.931 nm, B-KKN'ların %3 hacminde 16.462 nm ve B-KKN'ların %5 hacminde 21.046 nm olarak ölçülmüştür. Perovskit filmlerin R_a değerlerinin, B-KKN'ların hacim artışı ile arttığı görülmektedir. %5 hacminde B-KKN içeren perovskit film, diğer yüzeylere göre daha yüksek bir R_a değerine sahiptir. Benzer literatür çalışmalarına göre pürüzlü bir yüzeye sahip olmak, daha büyük perovskit kristal boyutuna bağlanabilir ve bu durum daha iyi ışık absorpsiyonuna ve saçılmasına yol açar (Hsu ve ark., 2018; Xu ve ark., 2021). B-KKN'ların eklenmesi, perovskitin kristalleşme sürecini arttırabilir. Sonuç olarak, perovskit tane boyutu PbI₂ ve B-KKN'ların etkileşiminden kaynaklanabilir (Kurukavak ve ark., 2022).

B-KKN'ların katkı maddesi olarak kullanılması, PbI₂ ile C=O arasında güçlü bir etkileşime neden olabilir ve hızlı perovskit kristalleşmesini geciktirmek için perovskit tane boyutunu arttırır. Bu hipotezi desteklemek için hazırlanan perovskit ince filmlerin tane büyüklükleri AFM ile entegre bir yazılım ile ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Katkısız perovskit film için tane büyüklüğü 75,07 nm iken, % 0,1,3,5 hacminde B-KKN ile hazırlanan perovskit ince filmlerin tane büyüklükleri sırasıyla 80.97 nm, 92.45 nm ve 116.24 nm'ye yükselmiştir. Ayrıca, perovskit ince filmin artan tane boyutu dağılımının, yük taşınımını uyarırken perovskit filmlerinin tane sınırlarında ve taşıyıcı rekombinasyonunda bir azalmaya yol açabileceği bildirilmiştir (Xie ve ark., 2019). Böylece yüksek fotovoltaiik performansla sahip güneş pilleri elde edilebilir.



Şekil 4.14. Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin AFM görüntüleri

Çizelge 4.5. Katkısız ve B-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) farklılıkları ve Tane Boyutu Dağılımı

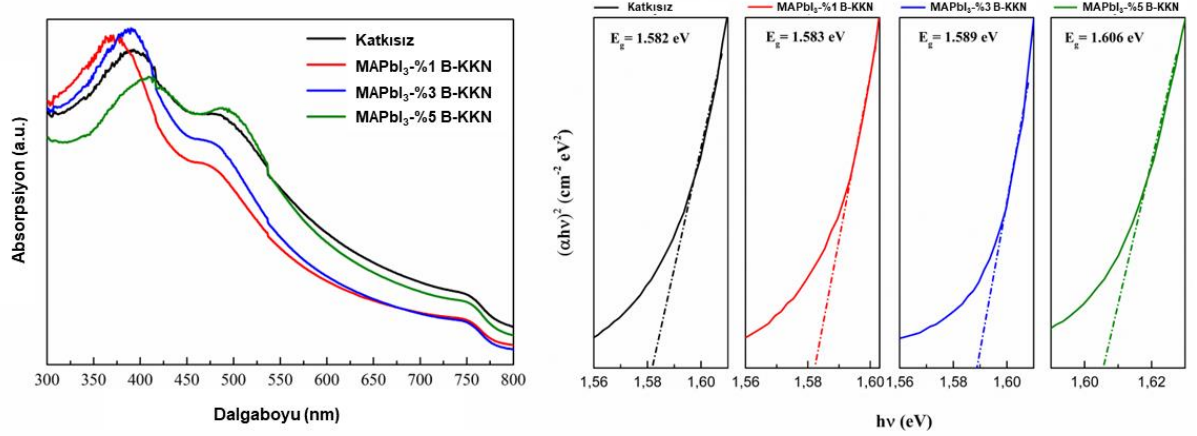
Yüzey	R_a (nm)	Tane Boyutu Dağılımı (nm)
Katkısız	13.1	75.07
%1 B-KKN Katkılı	15.9	80.97
%3 B-KKN Katkılı	16.5	92.45
%5 B-KKN Katkılı	21.0	116.24

4.2.2.3. B-KKN Katkılı MAPbI₃ Filmlerin UV-Vis Absorpsiyon

Karakterizasyonları

Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin UV-Vis absorpsiyon spektrumu Şekil 4.15 (a)'da ve optik absorpsiyon verilerine göre çizilen Tauc grafikleri ile bant aralıkları ise Şekil 4.15 (b)'de hesaplanarak optik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Görüldüğü gibi, farklı miktarlarda B-KKN içeren perovskit filmlerin UV-Vis spektrumları benzer absorbans davranışı göstermiştir. Tüm perovskit filmleri, 1.5 eV ile 1.6 eV arasındaki optik bant boşluğunu (E_g) gösteren yaklaşık 750 nm'lik güçlü bir emilim göstermiştir. Ek olarak, 350 nm ila 500 nm aralığındaki absorbans bölgesi PbI₂'ye bağlanabilir (Abdelmageed ve ark., 2016).

Perovskit filmlerinde B-KKN katkısının arttırılması, UV-Vis absorpsiyon spektrumunda yaklaşık 750 nm'de bir artışa neden olurken, 350-500 nm aralığında azalmaya neden oldu; bu durum perovskit güneş pillerinin kararlılığında fayda sağlar. Sonuç olarak, B-KKN'ların görünür bölgede güçlü bir soğurma gösterdiği açıktır.



Şekil 4.15. Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin (a) UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve (b) Bant aralığını hesaplamak için optik absorpsiyon verilerine göre Tauc grafikleri

Ayrıca B-KKN'lar ile hazırlanan perovskit filmlerin Tauc denklemi (Hossain ve ark., 2020) ile hesaplanmış E_g değerleri Çizelge 4.6'da listelenmiştir. E_g değerleri, B-KKN'ların % 0 hacmi için 1.582 Ev'den B-KKN'ların %1, %3 ve %5 hacim için sırasıyla 1.583 eV, 1.589 eV ve 1.606 eV'a yükselmiştir. Hesaplanan E_g absorpsiyon bölgesinde maviye kayma göstermiştir. İyi bir ışık soğurucu olması nedeniyle güneş pili uygulamaları için uygun olduğu düşünülebilir.

Çizelge 4.6. Katkısız ve B-KKN Katkılı MAPbI₃ filmlerin E_g değerleri

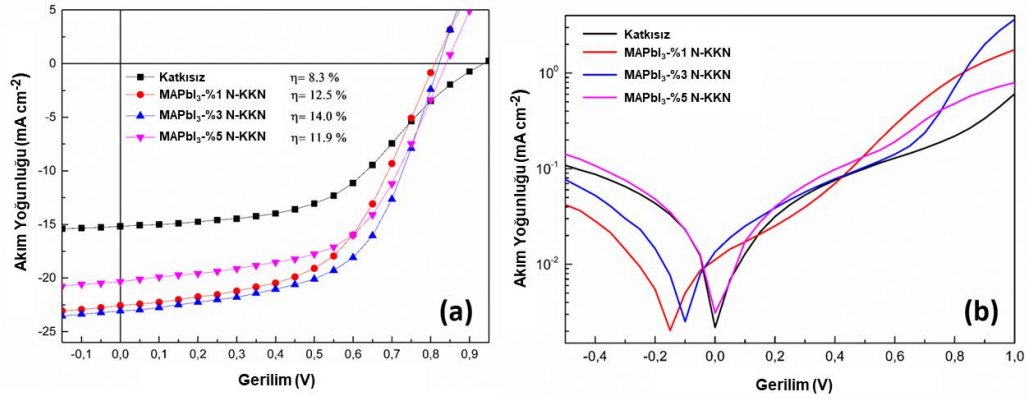
Yüzey	E_g (eV)
Katkısız	1.582
%1 B-KKN Katkılı	1.583
%3 B-KKN Katkılı	1.589
%5 B-KKN Katkılı	1.606

4.3. Perovskit Güneş Pillerinin Fotovoltaik Karakterizasyonları

Tez çalışmasının bu bölümünde ITO/PEDOT:PSS(50nm)/MAPbI₃(90 nm)/PCBM (50 nm)/Al(60 nm) yapısında perovskit güneş pilleri üretilmiştir. Katkısız MAPbI₃ ve hacimce %1, %3 ve %5 N-KKN ve B-KKN katkılı MAPbI₃ pillerin fotovoltaik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. N-KKN Katkılı Perovskit Güneş Pillerinin Fotovoltaik Karakterizasyonları

Üretilen cihazların fotovoltaik özelliklerini tanımlamak için, J-V eğrisi aydınlatma ve karanlık koşullar altında kaydedildi ve sırasıyla Şekil 4.16 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. İlgili cihaz parametreleri Çizelge 4.7'de listelenmiştir.



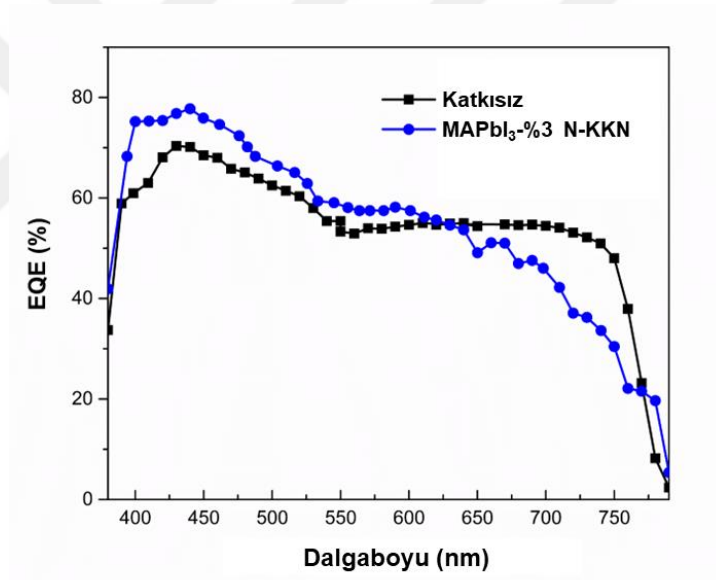
Şekil 4.16. a) Aydınlatma ve b) Karanlık koşullar altında en iyi performansı gösteren cihazların I-V karakteristiği

Çizelge 4.7. Katkısız ve N-KKN katkılı perovskit güneş pillerinin fotovoltaik parametreleri

	V_{OC} (mA)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Katkısız	0.936	15.18	49.96	8.340
%1 N-KKN Katkılı	0.810	22.56	54.67	12.488
%3 N-KKN Katkılı	0.822	23.07	58.79	13.936
%5 N-KKN Katkılı	0.844	20.33	55.51	11.906

Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi N-KKN katkılı olmayan referans perovskit güneş pilinin açık devre gerilim (V_{OC}) değeri 0.936 V, kısa devre akım (J_{SC}) değeri 15.18 mA/cm², fill faktör (FF) değeri %46.96, ve güç dönüşüm verimlilik (PCE) değeri %8.3 olarak hesaplanmıştır. Hacimce %3 N-KKN katkılı perovskit güneş pilinde V_{OC} değeri 0.822 V, J_{SC} değeri 23.07 mA/cm², FF değeri %58.79, ve PCE değeri %13.9 olarak hesaplanmıştır. J_{SC} değerlerinin sırasıyla $J_{SC}(\%3 \text{ N-KKN katkılı}) > J_{SC}(\%1 \text{ N-KKN katkılı}) > J_{SC}(\%5 \text{ N-KKN katkılı}) > J_{SC}(\text{katkısız})$ olduğu görülmektedir. N-KKN'ların eklenmesinden sonra J_{SC} değerlerinin artmış olması, perovskit tabakasında yük iletiminin artmış olması ile açıklanabilir (Zhu ve ark., 2019).

Her ne kadar arayüz özellikleri ve enerji bandı eşleşmesi iyileşmiş olsa da N-KKN'ların eklenmesinden sonra V_{OC} değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, J_{SC} -V grafiğini elde etmek için kullanılan tarama hızı ve tarama oranı ile ilişkili olabilir. Dolayısıyla, PSC'lerde V_{OC} ve J_{SC} arasındaki farklılıklar, tarama hızı ve tarama oranı ile ilişkili olan histeresis etkisinden kaynaklanabilir. PCE'nin artmasındaki önemli bir parametre olan FF değerleri, $FF_{(\%3 \text{ N-KKN katkı})} > FF_{(\%5 \text{ N-KKN katkı})} > FF_{(\%1 \text{ N-KKN katkı})} > FF_{(\text{katkısız})}$ olarak %47'den %59'a önemli bir artış göstermektedir. Absorpsiyon katmandaki tuzak durumlarının pasifleştirilmesi, gelişmiş FF değerlerinin göstergesi olan ışımsız yük rekombinasyonunun azalmasına yol açar (Woon Seok Yang ve ark., 2017). FF değerlerindeki artış, ohmik kontakın iyi olmasına, gelişmiş serbest yük üretimine ve ekstraksiyon verimliliğine bağlanabilir. Ayrıca FF değeri, güneş pillerin, I-V grafiğinden çıkarılan, seri direncine (R_s) de bağlıdır.



Şekil 4.17. Katkısız ve %3 N-KKN katkılı MAPbI₃ ile üretilmiş perovskit güneş pillerinin EQE spektrumları

Katkısız ve MAPbI₃-3% N-KKN katkılı cihazlarının EQE spektrumları Şekil 4.17'de verilmiştir. Katkısız PGP'lerde %70'lik bir EQE değeri elde edilirken, MAPbI₃-3% N-KKN katkılı PGP'lerde 400-500 nm'de %77'lik yüksek bir EQE değeri elde edildiği görülmektedir. EQE değerindeki bu artış J-V özelliklerinin bulgularıyla eşleşmektedir. Karbon kuantum noktalar enerji aşağı kaydırma özellikleri gösterdiğinden, bu çalışmada daha kısa dalga boylarındaki ışık mavi-yeşil ışığa dönüştürülür (Riaz ve ark., 2019). Karbon kuantum noktalar kısa dalga boylarında foton

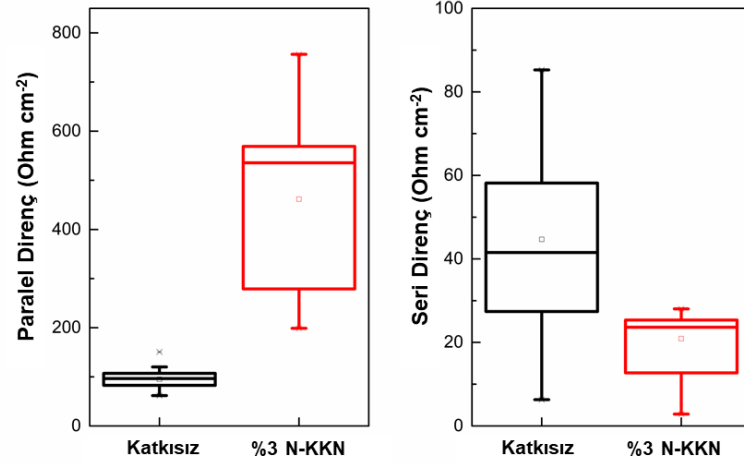
toplama özelliğine sahip olduğundan perovskit güneş pilindeki karbon kuantum varlığı EQE’de bir artış sağlar, bu da cihaz veriminin artmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Çizelge 4.8. J-V Grafiğinden elde edilen
Seri (R_s) ve Paralel (R_{SH}) dirençler

	$R_s (\Omega \text{ cm}^2)$	$R_{SH} (\Omega \text{ cm}^2)$
Katkısız	6.29	150.8
%1 N-KKN Katkılı	3.58	637.8
%3 N-KKN Katkılı	2.85	756.4
%5 N-KKN Katkılı	2.97	281.5

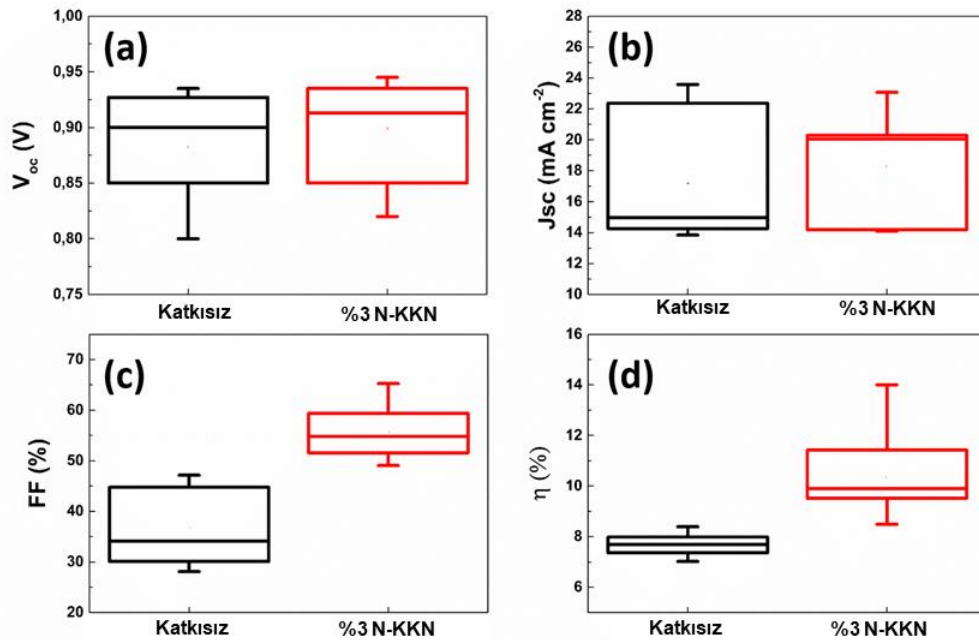
Hacimce %3 N-KKN katkılı perovskit güneş pilleri, katkısız ve hacimce %1 N-KKN ve %5 N-KKN katkılı perovskit güneş pilleri ile karşılaştırıldığında Çizelge 4.8’de listelendiği gibi en düşük R_s değeri $2.85 \Omega \text{ cm}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Katkısız perovskit güneş pili için R_s değerleri $6.29 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ’den 1% N-KKN katkılı perovskit güneş pilleri için $3.58 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ve 5% N-KKN katkılı perovskit güneş pilleri için $2.97 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ’ye düşmüş olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, paralel direncinin (R_{SH}), referans perovskit güneş pili için $150.8 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ’den hacimce %3 N-KKN katkılı perovskit güneş pili için $756.4 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ’ye açıkça yükseldiği gözlemlenebilir. Bu sonuçlar, fotovoltaik özelliklerden elde edilen bulgularla mükemmel bir uyum içindedir. FF kayıplarındaki kaynağın, N-KKN katkısı olmadan perovskit tabakasının tek biçimli olmamasına bağlanabileceğini desteklemektedir (Singh ve ark., 2019).

Paralel direncin (R_{SH}) katkısız pilde $150.8 \Omega/\text{cm}^2$ ’den MAPbI₃-% 3 N-KKN katkılı pilde $756.4 \Omega/\text{cm}^2$ ’ye yükseldiği gözlemlenebilir. Bu aynı zamanda fotovoltaik özelliklerle de benzerdir. Ayrıca, kontrol cihazının ve MAPbI₃-3% N-KKN katkılı cihazın J-V eğrilerinden çıkarılan R_{SH} ve R_s değerlerinin istatistik grafikleri Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Katkısız ve 3% N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerle üretilen PGP'nin J-V eğrilerinden çıkarılan paralel ve seri dirençlerin kutu grafiği analizi

MAPbI₃ katmanındaki N-KKN katkı maddesinin PGP'lerinin tekrarlanabilirliği üzerindeki etkisini göstermek için 20 cihaz üretildi. Katkısız (referans) ve MAPbI₃-3% N-KKN katkılı (en yüksek verim) için fotovoltaiik karakteristiklerin istatistik grafikleri Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Katkısız ve %3 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmler ile üretilmiş pillerin a) V_{oc} , b) J_{sc} , c) FF ve d) η fotovoltaiik karakteristiklerinin kutu grafiği

Sonuçlar en iyi verim elde edilen cihazlara benzer bir eğilim göstermektedir. Beklendiği gibi, en iyi cihaz sonuçlarıyla uyumlu olan MAPbI₃-3% N-KKN katkılı cihazları için FF’de büyük bir gelişme sağlandı. MAPbI₃-3% N-KKN cihazları için son derece düzgün perovskit yüzey, FF değerlerinin tekrarlanabilirliğinin artmasına öncülük etmiştir. MAPbI₃-3% N-KKN katkılı cihaz için elde edilen en yüksek FF değeri %65.2 iken, katkısız cihazın %47.1 FF’si karşısında göre önemli bir artış sağladığı söylenebilir.

4.3.2. B-KKN Katkılı Perovskit Güneş Pillerinin Fotovoltaik Karakterizasyonları

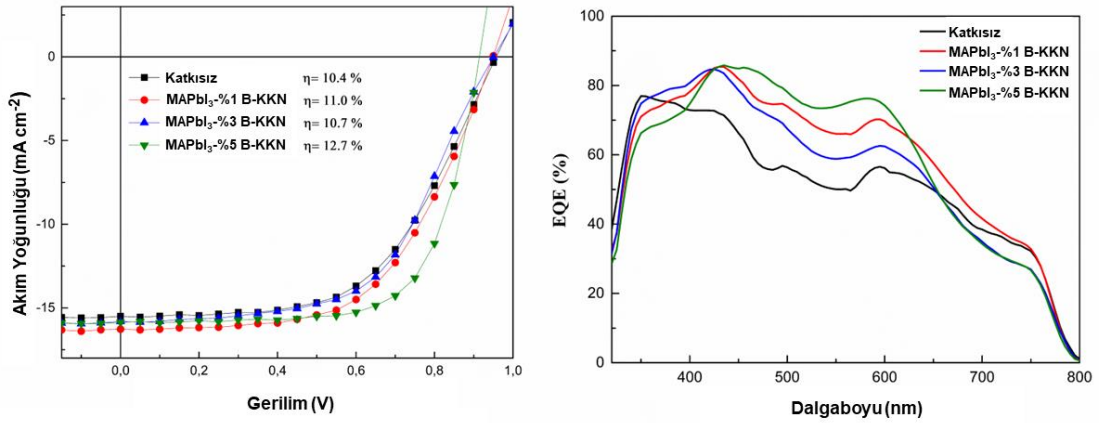
B-KKN katkılı perovskit güneş pillerinin fotovoltaik özelliklerini tanımlamak için, J-V eğrisi aydınlatma koşulları altında elde edilmiş olup, farklı konsantrasyonlarda B-KKN’ların (%0, %1, %3 ve %5 hacim) J-V eğrileri Şekil 4.20 (a)’da verilmiştir. Ayrıca MAPbI₃’e farklı katkılama oranlarında en iyi sonuç veren cihazların fotovoltaik performans sonuçları Çizelge 4.9’da listelenmiştir. Katkısız KKN’ların 0.956 V’luk açık devre gerilimi (V_{oc}), 15.5 mA cm⁻²’lik bir kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), % 56.4’lük bir doldurma faktörü (FF) ve % 10.45’lik nispeten düşük bir PCE sunmuştur. MAPbI₃’e hacimce % 5 B-KKN eklenmesi ile en iyi verim (PCE’nin % 12.73’ü) elde edilmiş olup, bu verimde 0.917 V’luk açık devre gerilimi (V_{oc}), 15.9 mA cm⁻²’lik kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve % 70.0’lük bir doldurma faktörü (FF) elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. Katkısız ve N-KKN katkılı perovskit güneş pillerinin fotovoltaik parametreleri

	V_{oc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Katkısız	0.957	15.5	56.39	10.45
%1 B-KKN Katkılı	0.949	16.27	57.12	11.02
%3 B-KKN Katkılı	0.951	15.81	56.92	10.69
%5 B-KKN Katkılı	0.948	15.92	66.44	12.54

B-KKN katkılı perovskit güneş pillerinde J_{sc} değerlerinin sırasıyla J_{sc} (%1 B-KKN katkılı) > J_{sc} (%5 B-KKN katkılı) > J_{sc} (%3 B-KKN katkılı) > J_{sc} (katkısız) olduğu görülmektedir. B-KKN katkılama yapıldıktan sonra J_{sc} değerinin artmış olması perovskit tabakasındaki yük iletiminin artmış olduğunu göstermektedir. B-KKN katkılı perovskit güneş pillerinde elde edilen FF değerleri, $FF_{(%5 \text{ B-KKN katkılı})} > FF_{(%1 \text{ B-KKN katkılı})} > FF_{(%3 \text{ B-KKN katkılı})} > FF_{(katkısız)}$ olarak %56.39’dan %66.44’a önemli bir artış göstermektedir. B-KKN’ların

eklenmesiyle FF değerlerindeki önemli artış, kusur durumlarının azalmasına, ışımsal olmayan rekombinasyonu baskılamaya ve enerji bant aralığı değerlerinin ayarlanmasına bağlanabilir (Woon Seok Yang ve ark., 2017). Bununla birlikte, karbon yapısına katkı yapan bor atomlarının, delik ekstraksiyonunu artırabileceğini, bunun da verimli hareketliliğe yol açabileceğini ve ince film arayüzlerinde geri yükleme rekombinasyonunu azaltabileceği öne sürülebilir (Barman ve ark., 2014). Ayrıca karbon kuantum noktalar tuzak durumlarını pasifleştiren ve perovskit tabakasındaki stokiometrik olmayan Pb iyonları ile koordine olan karbonil gibi farklı fonksiyonel gruplara sahiptir ve bu da daha iyi film kaplaması oluşturur (Abate ve ark., 2014). Bununla birlikte bildirilen çalışmalara göre, daha yüksek hacimde karbon kuantum noktaların eklenmesi, katkı maddesinin güçlü agregasyonu nedeniyle düzgün olmayan perovskit tabakası kaplamasına neden olabilir (Maxim ve ark., 2022). Bu nedenle, perovskit tabakası B-KKN'ların hacminin %5 konsantrasyonunda optimize edildi. FF'deki yüksek artış, perovskit tabakasının optimal oluşumuna ve daha iyi kristalliğine bağlanabilir. Optimal bir B-KKN hacmi (%5 hacim), perovskit ve alt/üst katmanlar arasındaki daha iyi arayüzey teması nedeniyle FF'yi başarılı bir şekilde iyileştirebilir (Wu ve ark., 2021).



Şekil 4.20. En iyi performans gösteren katkısız ve B-KKN katkılı cihazların J-V eğrileri ve EQE spektrumları

J_{SC} değerleri B-KKN eklenmesinden sonra artmıştır. Bu gelişme Şekil 4.20' deki PGP'lerin EQE spektrumları ile doğrulanmıştır. %1 ve %5 hacim B-KKN ilavesi ile hazırlanan cihazlar, B-KKN olmadan hazırlanan cihazlara kıyasla 400-600 nm'de en yüksek EQE yanıtını vermiştir. Ek olarak, B-KKN'larla hazırlanan PGP'lerinin 350-800 nm arasındaki daha iyi EQE performansı, daha yüksek yük ayırma verimliliğine

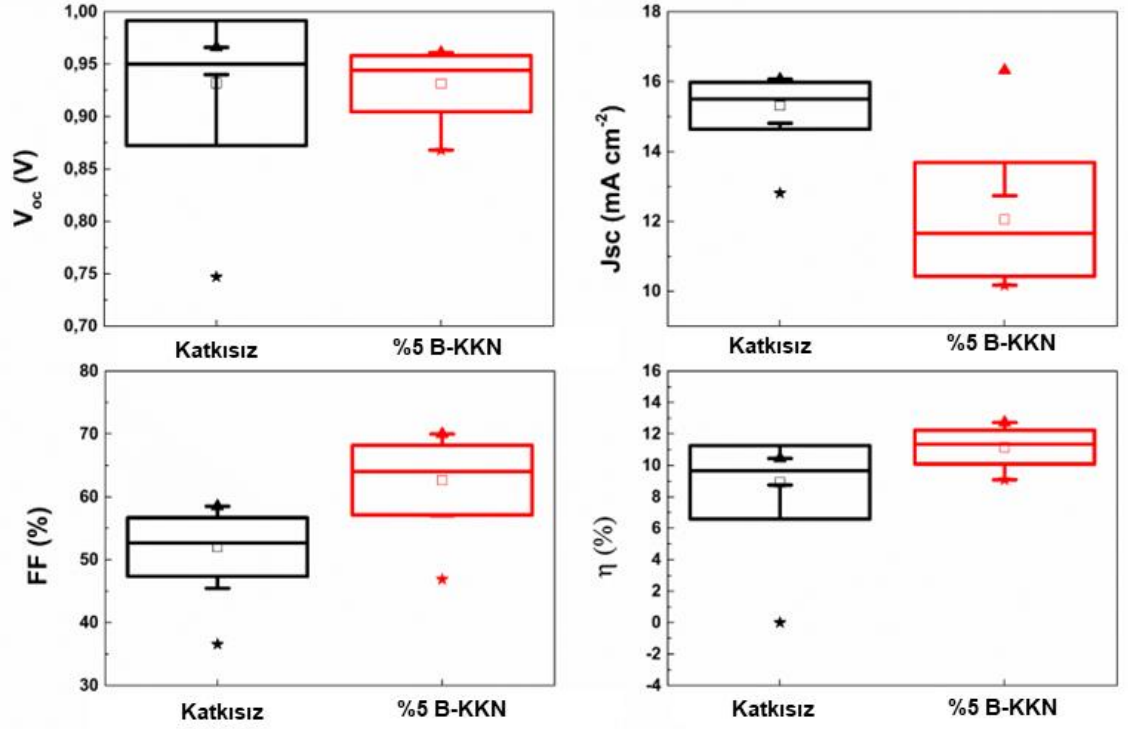
bağlıdır (Luo ve ark., 2015). Sonuç olarak, artan J_{SC} değerleri EQE eğrilerindeki bulgularla aynı doğrultudadır.

Karbon kuantum nokta katkısı olmadan üretilen perovskit güneş pillerinin, J_{SC} -V eğrilerinden çıkarılan, seri (R_S) ve paralel direnci (R_{SH}) Çizelge 4.10'da verilmiştir. B-KKN'ların eklenmesinden sonra R_S değerleri azalırken, R_{SH} değerlerinde kayda değer bir artışın gözlemlenmektedir. Katkısız perovskit güneş pili için R_S değeri $20.36 \Omega \text{ cm}^{-2}$ iken 1% B-KKN katkılı perovskit güneş pilleri için $15.56 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ve 3% B-KKN katkılı perovskit güneş pilleri için $19.65 \Omega \text{ cm}^{-2}$ 'ye düşmüş olduğu görülmektedir. En düşük R_S değeri $12.65 \Omega \text{ cm}^{-2}$ olarak %3 B-KKN katkılı perovskit güneş pilinde elde edilmiştir. Buna ek olarak, katkısız perovskit güneş pilinin paralel direncinin (R_{SH}), %5 B-KKN katkılı perovskit güneş pilinde açıkça yükseldiği görülmektedir. Bu sonuçlar FF değerlerindeki artışla uyum içerisindedir. Bu cihaz parametrelerine göre, perovskit aktif katmanına optimize edilmiş B-KKN'ların eklenmesinin, rekombinasyon kayıplarını azaltırken, yük taşıma özelliklerini ve delik ekstraksiyonunu verimli bir şekilde iyileştirebileceği söylenebilir. Sonuç olarak, katkı maddeleri perovskitin kristalleşmesini, çekirdeklenme ve tane büyüme mekanizmasını etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar göre B-KKN'ların perovskit tabakasındaki stokiometrik olmayan Pb iyonları ile koordine edildiği ve tuzak durumlarını pasifleştirdiği öne sürülebilir (Li ve ark., 2016).

Çizelge 4.10. J-V Grafiğinden elde edilen
Seri (R_S) ve Paralel (R_{SH}) dirençler

	$R_S (\Omega \text{ cm}^2)$	$R_{SH} (\Omega \text{ cm}^2)$
Katkısız	20.36	681.20
%1 B-KKN Katkılı	15.56	1851.85
%3 B-KKN Katkılı	19.65	1219.51
%5 B-KKN Katkılı	7.65	10000.00

PGP teknolojisinde ticarileştirme için en önemli sınırlayıcı faktörlerden biri tekrarlanabilirliktir. B-KKN ilavesinin tekrarlanabilirlik sonuçları üzerindeki etkisini görmek için, 20 cihaz %5 hacimli B-KKN ile imal edilmiştir. Fotovoltaik parametrelerin istatistiksel dağılım verileri Şekil 4.21'de B-KKN katkılı cihazlar için ortalama verimlilik ve FF'nin yüksek olduğunu göstermiştir. Pasivasyon etkisinden ve perovskit tabakasının daha iyi kaplanması kaynaklandığı sonucuna ulaşabiliriz.



Şekil 4.21. Katkısız ve %5 B-KKN katkılı MAPbI₃ filmler ile üretilmiş pillerin V_{oc} , I_{sc} , FF ve η fotovoltaiik parametrelerinin kutu grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Güneş pili uygulamalarında güç dönüşüm verimliliğinin artırılması pil çalışmalarının halen en temel araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Perovskit güneş pillerindeki perovskit film tabakası fotovoltaiik performansta belirleyici rol oynayan ışığı absorbe eden tabakadır ve perovskit filmin kristal kalitesi, güneş pilinin fotovoltaiik performansına büyük ölçüde hakimdir. Bu hususta perovskit tabakanın uygun katkı malzemeleriyle katkılanması güç dönüşüm verimliliğini yüksek oranda iyileştirecektir.

Bu tez çalışması kapsamında perovskit güneş pillerinin güç dönüşüm verimliliğinin artırılması esas alınmıştır. Katkı maddesi olarak kullanılmak üzere Karbon Kuantum Nokta malzemesi seçilerek tez kapsamında KKN sentezleri gerçekleştirilmiştir. Azot ve Bor hetero-atom katkısı kullanılarak farklı prosedürlerde Azot katkılı KKN'lar ve Bor katkılı KKN'lar sentezlenmiştir. Sentezlenen katkılı karbon kuantum noktalardan N-KKN ve B-KKN, MAPbI₃ perovskit filme ayrı ayrı eklenerek katkılı ve katkısız yüzeylerin morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin karakterize edilmesiyle yüzey özellikleri ve son olarak p-i-n düzlemsel yapıda üretilen perovskit güneş pillerinin güç dönüşüm verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu tezde yapılan çalışmaların sonuçları sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

- Tez kapsamında sentezlenen hetero atom katkılı KKN'lar sentezlenerek optik ve yapısal karakterizasyonları yapılmıştır. Optik ve yapısal karakterizasyon için UV-Vis absorpsiyon ve Fotoluminesans (PL) spektrometreleri ayrıca TEM ve XPS spektrometreleri kullanılmıştır. Azot ve Bor Katkılı KKN'ların UV ışık altında parlak ve güçlü floresans vermiştir. Sentezlenen KKN'ların absorpsiyon spektrumu genel olarak 300-330 nm civarında bir omuz göstermiştir. Bu spektrum C=O bağlarının n- π^* geçişine karşılık gelir. Bu sonuçlar karbonun varlığını doğrulamakta ve KKN'ların başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermektedir.
- Farklı hetero atom katkısının KKN'ların optik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkisi elde edilen karakterizasyon sonuçları ile net olarak görülmüştür. XPS ve

SEM-EDX haritalama tekniği verileri sentezlenen N-KKN'da Azot katkısının varlığını, B-KKN'da ise Bor katkısının varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca KKN'ların parçacık boyutları TEM analizi ile ortaya koyulmuş ve parçacık boyutları sentezlenen tüm KKN'larda 2 ila 10 nm arasında ölçülmüştür. Sonuçlar literatür verileriyle uyum içerisinde.

- Katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerle elde edilen XRD karakterizasyonlarından, perovskit kafes yapısını destekleyen literatür bulgularıyla uyumlu desenler elde edilmiştir. Katkılı MAPbI₃ filmlerde (110) düzlemine karşılık gelen piklerin şiddetlendiği ve bu durumun N-KKN katkı maddesinin daha iyi bir kristalleşme sağladığını göstermektedir. Ayrıca XRD desenlerinden Scherrer formülü kullanılarak hesaplanan kristal boyutlarının katkılı olmayan MAPbI₃ ve hacimce %1, %3 ve %5 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin sırasıyla 54.8 nm, 135.8, 138.2 ve 157.8 nm olarak hesaplanmıştır. MAPbI₃ filmlere N-KKN katkısının kristallerin tane boyutunda ciddi bir artışa yol açtığı söylenebilir. Ayrıca katkılı ve katkısız MAPbI₃ filmlerin SEM görüntüleri değerlendirildiğinde katkılı yüzeylerin daha kompakt bir yüzeye sahip olduğu ve kristal taneleri arasındaki boşlukların azaldığı N-KKN katkısının olumlu varlığına işaret etmektedir.
- Perovskit ince filmlerin tane büyüklükleri AFM ile entegre bir yazılım ile ölçülmüş ve sırasıyla hacimce %1, %3 ve %5 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin tane büyüklükleri 61.1 nm, 85.7, 94.6 nm ve 143.9 nm olarak ölçülmüştür. Belirlenen tane boyutlarının N-KKN katkısının tane boyutu dağılımı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- MAPbI₃ filmlerinde N-KKN katkısının optik özellikler üzerindeki etkisi UV-Vis absorpsiyon verileri kullanılarak araştırılmıştır. N-KKN katkısının ilavesi ile optik soğurmanın azalması perovskit çözeltisini seyreltmesi ile açıklanabilir. DMSO içinde çözölen N-KKN'lar perovskit çözeltisinin konsantrasyonunu azalttığından katkı maddesinin ilavesiyle soğurma oranında düşüş meydana gelmiştir. Absorpsiyon verileri Tauc grafiğine yerleştirilerek katkısız ve N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerinin optik bant aralıkları belirlenmiştir. Katkısız MAPbI₃ filmin bant aralığı 1.593 eV olarak hesaplanırken, N-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin bant

aralıkları sırasıyla 1.614 eV, 1.608 eV ve 1.600 eV olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler N-KKN varlığının bant aralığında değişikliğine sebep olduğu anlaşılmaktadır.

- B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin elde edilen XRD desenlerinde (110) ve (220) kafes düzlemlerinde katkısız olan MAPbI₃ filme göre tepe yoğunluklarının arttığı B-KKN katkısının perovskitin kristal yapısını iyileştirdiğini ispatlamaktadır. Ek olarak perovskit filmlerin kristal boyutunu hesaplamak için XRD desenlerinden faydalanılmış, Scherrer formülü uygulanarak katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ filmlerin kristal boyutları katkısız MAPbI₃ film için 69.17 nm, % 1 B-KKN katkılı MAPbI₃ film için 74.73 nm, % 3 B-KKN katkılı MAPbI₃ film için 81.26 nm ve % 5 B-KKN katkılı MAPbI₃ film için 89.99 nm olarak hesaplanmıştır. Katkı maddesi ilavesiyle perovskit kristallliği artmıştır. Bu durum film yapısını iyileştirmek için B-KKN kullanılabileceğini göstermektedir.
- Perovskit ince filmlerin tane büyüklükleri AFM ile entegre bir yazılım ile ölçülmüştür. Katkısız perovskit film için tane büyüklüğü 75.07 nm iken, % 1, % 3, % 5 katkılı B-KKN ile hazırlanan perovskit ince filmlerin tane büyüklükleri sırasıyla 80.97 nm, 92.45 nm ve 116.24 nm'ye yükselmiştir. Katkı malzemesinin varlığının perovskit filmlerinin tane sınırlarındaki azalmayla ilişkilendirilebilir.
- Katkısız ve B-KKN katkılı MAPbI₃ yüzeylerinin UV-Vis absorbands spektrumları kaydedilerek seçilen konsantrasyonlarda hazırlanan ince filmlerin optik ve yapısal özellikler üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Farklı miktarlarda B-KKN içeren perovskit filmlerin UV-Vis spektrumları benzer absorbands davranışı göstermiştir. Tauc denklemi ile hesaplanan bant aralığı değerleri katkısız MAPbI₃ film için 1.582 eV iken, B-KKN'ların %1, %3 ve %5 oranlarındaki katkısında sırasıyla 1.583 eV, 1.589 eV ve 1.606 eV'a yükselmiştir. Bu durum katkı malzemesinin varlığının bant aralığı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.
- Katkısız ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃/PCBM/Al ve N-KKN'nın hacimce farklı oranları ile ITO/PEDOT:PSS/N-KKN:MAPbI₃/PCBM/Al konfigürasyonunda inşa edilen güneş pillerinin fotovoltaiik parametreleri ve pil performansları incelenmiştir.

N-KKN katkı malzemesi olmadan inşa edilen pil verimi %8.34 olarak elde edilmiş, N-KKN katkılı MAPbI₃ filmler ile üretilen perovskit güneş pillerinde katkı oranına göre PCE değerleri $13.94_{(\%3 \text{ N-KKN katkılı})} > 12.49_{(\%1 \text{ N-KKN katkılı})} > 11.91_{(\%5 \text{ N-KKN katkılı})}$ olarak hesaplanmıştır. Katkısız perovskit pilin fotovoltaiik parametreleri açık devre gerilim (V_{OC}) değeri 0.936 V, kısa devre akım (J_{SC}) değeri 15.18 mA/cm² ve doldurma faktörü (FF) değeri %46.96 olarak hesaplanmıştır. %3 N-KKN katkılı MAPbI₃ filmin fotovoltaiik parametreleri ise açık devre gerilimi (V_{OC}) 0.822 V, kısa devre akımı (J_{SC}) 23.07 mA/cm² ve doldurma faktörü (FF) %58.79 olarak hesaplanmıştır. Kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) değerleri $23.07 \text{ mA/cm}^2_{(\%3 \text{ N-KKN katkılı})} > 22.56 \text{ mA/cm}^2_{(\%1 \text{ N-KKN katkılı})} > 20.33 \text{ mA/cm}^2_{(\%5 \text{ N-KKN katkılı})} > 15.18 \text{ mA/cm}^2_{(\text{katkısız})}$ olarak hesaplanmıştır. Katkı malzemesinin eklenmesiyle kısa devre akım yoğunluğunun artmış olması perovskit tabakadaki yük iletiminin artması ve daha fazla yük taşıyıcısının rekombinasyon oluşmadan dış devreye aktarılabilirdiğini, bunun da tane sınırlarının azalmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılabilir. Katkı malzemesinin eklenmesiyle pil performansı iyileşmiş olmasına rağmen açık devre akım yoğunluğunun (V_{OC}) katkısız pile göre azalmış olması kullanılan tarama hızı ve tarama oranı ile ilişkili olan histerezis etkisinden kaynaklanmış olabilir. Doldurma faktörü (FF) değeri $FF_{(\%3 \text{ N-KKN katkılı})} > FF_{(\%5 \text{ N-KKN katkılı})} > FF_{(\%1 \text{ N-KKN katkılı})} > FF_{(\text{katkısız})}$ olarak %47'den %59'a ciddi bir artış göstermektedir. Bu durum katkılama ile aktif tabakadaki tuzak durumlarının pasifleştirilmesinin ve ışıınımsız rekombinasyonun azaldığının göstergesidir. Ek olarak J-V eğrilerinden hesaplanan R_s değeri katkısız pilde 6.29 $\Omega \text{ cm}^{-2}$, %5 N-KKN katkılı perovskit pilde ise 2.85 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ değerine düştüğü buna ek olarak hesaplanan R_{SH} değerinin katkısız pilde 150.8 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ değerinden 756.4 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ 'ye yükselmesi fotovoltaiik özelliklerden elde edilen bulgularla mükemmel bir uyum içindedir. Elde edilen EQE değerleri de katkı malzemesinin pildeki olumlu etkisini doğrulamaktadır. Katkısız ve %3 N-KKN katkılı pillerin %70'den %77'ye yükselmiştir. Özellikle kısa dalga boylarının akıma sağladığı katkı EQE'de bir artış sağlamıştır. Ayrıca katkı maddesinin perovskit pillerdeki tekrarlanabilirliği üzerindeki etkisi için üretilen 20 cihazdan en iyi verim elde edilen piller de benzer bir eğilim göstermiştir. %3 N-KKN katkılı pillerin, katkısız pillere göre doldurma faktörünün %47.1'den %65.2 değerine yükselmesi FF değerlerinin tekrarlanabilirliğinin artmasına öncülük etmiştir.

- İkinci perovskit güneş pili çalışması olarak yine katkı malzemesi olmaksızın ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃/PCBM/Al konfigürasyonu kullanılmış olup, katkı malzemesi olarak sentezlediğimiz B-KKN'lar hacimce %1, %3 ve %5 oranlarında perovskit çözeltisine dahil edilerek ITO/PEDOT:PSS/B-KKN:MAPbI₃/PCBM/Al konfigürasyonunda B-KKN katkılı piller inşa edilmiştir. Perovskit güneş pilleri PCE değerleri $12.73 (\%5 \text{ B-KKN katkılı}) > 11.02 (\%1 \text{ B-KKN katkılı}) > 10.70 (\%3 \text{ B-KKN katkılı}) > 10.45$ (katkısız) olarak elde edilmiştir. Katkısız KKN'ların açık devre gerilimi 0.956 V, kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) 15.5 mA cm⁻² ve doldurma faktörü (FF) % 56.4 iken, en yüksek pil performansı gösteren %5 B-KKN katkılı pilin ($\eta=12.73$) fotovoltaik parametreleri ise 0.917 V'luk açık devre gerilimine (V_{OC}), 15.9 mA cm⁻²'lik kısa devre akım yoğunluğuna (J_{SC}) ve % 70.0'luk bir doldurma faktörüne (FF) sahip olmuştur. Katkılama yapılmadan üretilen pilde kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) 15.50 mA cm⁻² iken, hacimce %1, %3 ve %5 B-KKN katkısı ile sırasıyla 16.271 mA cm⁻², 15.812 mA cm⁻² ve 15.867 mA cm⁻² değerleri elde edilmiştir. Katkısız pile göre artan J_{SC} değerleri, katkı malzemesinin yük iletimini artırdığını göstermektedir. Ayrıca EQE eğrilerindeki bulgular da artan kısa devre akım yoğunluğunu desteklemektedir. Doldurma faktörü (FF) katkısız perovskit pilden, %5 B-KKN katkılı pile göre %56.39'dan %66.44'e ciddi bir artış göstermiştir. Kusur durumlarının azalması ve dış devreye aktarılabilen artan yük taşıyıcıları buna bağlanabilir. Ek olarak B-KKN'lar yüzeyindeki karbonil gibi fonksiyonel grupların perovskit tabakasındaki Pb iyonları ile koordinesi iyi bir film yüzeyi oluşmasını destekler. J_{SC} -V eğrilerinden çıkarılan, seri (R_s) dirençleri katkısız ve %5 B-KKN katkılı pillerde sırasıyla 20.36 Ω cm⁻²'den 7.65 Ω cm⁻²'den düşerken, paralel (R_{SH}) direnç değerleri 681.20 Ω cm⁻²'den, 10000 Ω cm⁻²'ye yükselmiştir. R_s değerindeki azalma ve paralel (R_{SH}) direnç değerindeki kayda değer artış FF değerlerindeki artışla uyum içindedir. Bu cihaz parametrelerinden, B-KKN katkısının perovskit güneş pillerindeki yük taşıma özelliklerini iyileştirebileceği açıkça söylenebilir. B-KKN katkısının pilin tekrarlanabilirliği üzerindeki etkisi için %5 B-KKN katkılı 20 cihaz imal edilerek araştırılmıştır. Elde edilen veriler B-KKN katkılı cihazlarda doldurma faktörü değerlerinin yüksek olduğunu ve bunu perovskit film tabakasının pasivasyon özelliklerinin artmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Bu bilgiler kapsamında yüksek kristallığe sahip filmler güç dönüşüm verimliliğini (PCE) yüksek oranda iyileştirmektedir. Hem N-KKN ve hem de B-KKN katkılı

MAPbI₃ perovskit filmler ile inşa edilen güneş pillerinin, katkısız perovskit filmle inşa edilen pillere göre pil verimini ciddi oranda artırdığı ve yüzey morfolojisini iyileştirdiği elde edilen karakterizasyon sonuçları ile net olarak görülmüştür.

5.2. Öneriler

Organometal halojenür perovskitler düşük sıcaklıkta çözeltide işlenebilirlikleri, güçlü soğurma, düşük kusur yoğunluğu ve mükemmel yük difüzyon uzunlukları nedeniyle yeni nesil ticari fotovoltaiik modül için umut verici fotovoltaiik malzemelerdir. Perovskit güneş pillerinde arayüzey modifikasyonu, farklı kaplama tekniklerinin geliştirilmesi, katkı malzemelerinin pile dahil edilmesi gibi uygulamalarla verimleri %26'lara ulaşmıştır. Bu çalışma hetero atom katkılı KKN'ların perovskit pillerdeki varlığının pil parametrelerini iyileştirebileceğini ortaya koymuştur. Karbon kuantum noktaların bu sorunlara çözüm bulma konusunda umut verici adaylar olduğu açıktır. Ancak hetero-atom katkısının ve konsantrasyonunun verim üzerindeki etkisi daha geniş bir perspektifte detaylandırılmalı ve ne kadar etki ettiği öngörülebilmelidir.

Perovskit güneş pilleri yüksek verim ve düşük maliyet gibi üstün avantajlara sahip olmasına rağmen en büyük dezavantajı perovskit pillerin kararsızlık problemidir. Gelecekte ticarileştirilmiş bir uygulamaya ulaşmak için, PGP'lerinde yer alan verimlilik, stabilite ve histerezisin iyi bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Ortam parametrelerinden etkilenebilen hassas yapısı ticarileşmesinin önündeki büyük engellerden biridir. Bu noktada KKN ile katkılamanın uzun vadeli kararlılığa etkileri detaylı olarak incelenebilir ve çevresel koşullar altındaki dayanıklılığı ve performans sürekliliği değerlendirilebilir. Bu amaçla yapılacak kapsamlı çalışmalar perovskit güneş pillerinin güneş pili teknolojilerindeki yerini belirleyecektir.

Bunun yanı sıra perovskit güneş pillerinin esnek yüzeylere uygulanabilirliği potansiyeli göz önünde bulundurularak gelecekte giyilebilir teknolojilerde de uygulama alanı olabileceği ve bu doğrultuda fotovoltaiik parametrelerinin iyileştirilmesi çalışmalarına odaklanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abate, A., Saliba, M., Hollman, D. J., Stranks, S. D., Wojciechowski, K., Avolio, R., Grancini, G., Petrozza, A. ve Snaith, H. J., 2014, Supramolecular halogen bond passivation of organic–inorganic halide perovskite solar cells, *Nano letters*, 14 (6), 3247-3254.
- Abd Mutalib, M., Aziz, F., Ismail, A. F., Wan Salleh, W. N., Yusof, N., Jaafar, J., Soga, T., Sahdan, M. Z. ve Ahmad Ludin, N., 2018, Towards high performance perovskite solar cells: A review of morphological control and HTM development, *Applied Materials Today*, 13, 69-82.
- Abdelmageed, G., Jewell, L., Hellier, K., Seymour, L., Luo, B., Bridges, F., Zhang, J. Z. ve Carter, S., 2016, Mechanisms for light induced degradation in MAPbI₃ perovskite thin films and solar cells, *Applied Physics Letters*, 109 (23).
- Al-Shahri, O. A., Ismail, F. B., Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., Al-Muhsen, N. F. O. ve Soujeri, E., 2021, Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production*, 284.
- Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Jern, K. P., Mansur, M. ve Mahlia, T. M. I., 2020, Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods, *Journal of Cleaner Production*, 253.
- Ansari, M. I. H., Qurashi, A. ve Nazeeruddin, M. K., 2018, Frontiers, opportunities, and challenges in perovskite solar cells: A critical review, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 35, 1-24.
- Asghar, M. I., Zhang, J., Wang, H. ve Lund, P. D., 2017, Device stability of perovskite solar cells – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 131-146.
- Assadi, M. K., Bakhoda, S., Saidur, R. ve Hanaei, H., 2018, Recent progress in perovskite solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2812-2822.
- Barman, M. K., Jana, B., Bhattacharyya, S. ve Patra, A., 2014, Photophysical properties of doped carbon dots (N, P, and B) and their influence on electron/hole transfer in carbon dots–nickel (II) phthalocyanine conjugates, *The Journal of Physical Chemistry C*, 118 (34), 20034-20041.
- Beer, T., 2012, Global warming, *The Wiley-Blackwell Encyclopedia of Globalization*.
- Belkind, A. ve Gershman, S., 2008, Plasma cleaning of surfaces, *Vacuum Coating and Technology November*, 46-57.
- Bhandari, S., 2022, Integrating Diverse Materials for Carbon Perovskite Solar Cells: Examining the Performance and Stability.

- Bi, D., Yi, C., Luo, J., Décoppet, J.-D., Zhang, F., Zakeeruddin, S. M., Li, X., Hagfeldt, A. ve Grätzel, M., 2016, Polymer-templated nucleation and crystal growth of perovskite films for solar cells with efficiency greater than 21%, *Nature Energy*, 1 (10), 1-5.
- Binek, A., 2017, Synthesis and characterization of novel perovskite materials for solar cell applications, *Imu*.
- Bu, X., Westbrook, R. J. E., Lanzetta, L., Ding, D., Chotchuangchutchaval, T., Aristidou, N. ve Haque, S. A., 2019, Surface Passivation of Perovskite Films via Iodide Salt Coatings for Enhanced Stability of Organic Lead Halide Perovskite Solar Cells, *Solar RRL*, 3 (2).
- Burschka, J., Pellet, N., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M. K. ve Grätzel, M., 2013, Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells, *Nature*, 499 (7458), 316-319.
- Caram, J., Budini, N. ve Arce, R. D., 2018, Analysis of substrate coverage of hybrid halide perovskite thin films deposited on glass, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23.
- Chandra, S., Patra, P., Pathan, S. H., Roy, S., Mitra, S., Layek, A., Bhar, R., Pramanik, P. ve Goswami, A., 2013, Luminescent S-doped carbon dots: an emergent architecture for multimodal applications, *Journal of Materials Chemistry B*, 1 (18).
- Chin, V. J., Salam, Z. ve Ishaque, K., 2015, Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review, *Applied Energy*, 154, 500-519.
- Columbus, D. A., 2014, Design and optimization of copper indium gallium selenide solar cells for lightweight battlefield application, *NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA*.
- Çel, G. B., 2022, Interface passivation of perovskite solar cells with novel cations, *Middle East Technical University*.
- Degterev, A., 2020, Enhancing the stability of halide perovskite solar cells by dopant engineering of the hole-transporting material.
- Djurišić, A. B., Liu, F. Z., Tam, H. W., Wong, M. K., Ng, A., Surya, C., Chen, W. ve He, Z. B., 2017, Perovskite solar cells - An overview of critical issues, *Progress in Quantum Electronics*, 53, 1-37.
- Dua, S., Kumar, P., Pani, B., Kaur, A., Khanna, M. ve Bhatt, G., 2023, Stability of carbon quantum dots: a critical review, *RSC Advances*, 13 (20), 13845-13861.
- El-Shabasy, R. M., Farouk Elsadek, M., Mohamed Ahmed, B., Fawzy Farahat, M., Mosleh, K. N. ve Taher, M. M., 2021, Recent developments in carbon quantum dots: properties, fabrication techniques, and bio-applications, *Processes*, 9 (2), 388.

- Eperon, G. E., Stranks, S. D., Menelaou, C., Johnston, M. B., Herz, L. M. ve Snaith, H. J., 2014, Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells, *Energy & environmental science*, 7 (3), 982-988.
- Esfahani, M. S., 2015, Device physics of organic and perovskite solar cells, *Iowa State University*.
- Fan, Z., Li, Y., Li, X., Fan, L., Zhou, S., Fang, D. ve Yang, S., 2014, Surrounding media sensitive photoluminescence of boron-doped graphene quantum dots for highly fluorescent dyed crystals, chemical sensing and bioimaging, *Carbon*, 70, 149-156.
- Giordano, M. G., Seganti, G., Bartoli, M. ve Tagliaferro, A., 2023, An overview on carbon quantum dots optical and chemical features, *Molecules*, 28 (6), 2772.
- Gleichmann, N., 2020, SEM vs TEM, *Technology Networks: Analysis & Separations*, Online: <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/sem-vs-tem-331262>.
- Habibi, M., Zabihi, F., Ahmadian-Yazdi, M. R. ve Eslamian, M., 2016a, Progress in emerging solution-processed thin film solar cells – Part II: Perovskite solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1012-1031.
- Habibi, M., Zabihi, F., Ahmadian-Yazdi, M. R. ve Eslamian, M., 2016b, Progress in emerging solution-processed thin film solar cells–Part II: Perovskite solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1012-1031.
- Han, Q., 2022, Interfacial Engineering for Carbon-Based All-Inorganic Perovskite Solar Cells, *九州工業大学*.
- Hao, F., Stoumpos, C. C., Cao, D. H., Chang, R. P. ve Kanatzidis, M. G., 2014, Lead-free solid-state organic–inorganic halide perovskite solar cells, *Nature photonics*, 8 (6), 489-494.
- Hellmann, T., 2021, Advanced understanding of the electronic properties of perovskite solar cells: Contact formation, band energy diagrams and involved surface photovoltages.
- Hong, K. J., Tan, C. H., Tan, S. T. ve Chong, K.-K., 2022, Morphology and topography of quantum dots, *Graphene, Nanotubes and Quantum Dots-Based Nanotechnology*, 727-770.
- Hossain, M. F., Pervez, M. S. ve Nahid, M., 2020, Influence of film thickness on optical and morphological properties of TiO₂ thin films, *Emerging Materials Research*, 9 (1), 186-191.
- Hossain, S. I., 2018, Performance and stability of perovskite solar cells, *Iowa State University*.

- Hsu, H. L., Hsiao, H. T., Juang, T. Y., Jiang, B. H., Chen, S. C., Jeng, R. J. ve Chen, C. P., 2018, Carbon nanodot additives realize high-performance air-stable p-i-n perovskite solar cells providing efficiencies of up to 20.2%, *Advanced Energy Materials*, 8 (34), 1802323.
- Hu, J., Xiong, X., Guan, W. ve Long, H., 2021, Recent advances in carbon nanomaterial-optimized perovskite solar cells, *Materials Today Energy*, 21, 100769.
- Hwang, H., Kim, S., García, Á. G. ve Kim, J., 2021, Global sensitivity analysis for assessing the economic feasibility of renewable energy systems for an off-grid electrified city, *Energy*, 216.
- Ijaz, M., Shoukat, A., Ayub, A., Tabassum, H., Naseer, H., Tanveer, R., Islam, A. ve Iqbal, T., 2020, Perovskite solar cells: importance, challenges, and plasmonic enhancement, *International Journal of Green Energy*, 17 (15), 1022-1035.
- Im, J.-H., Lee, C.-R., Lee, J.-W., Park, S.-W. ve Park, N.-G., 2011, 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell, *Nanoscale*, 3 (10), 4088-4093.
- Jacobsson, T. J., Correa-Baena, J.-P., Halvani Anaraki, E., Philippe, B., Stranks, S. D., Bouduban, M. E., Tress, W., Schenk, K., Teuscher, J. ve Moser, J.-E., 2016, Unreacted PbI₂ as a double-edged sword for enhancing the performance of perovskite solar cells, *Journal of the American Chemical Society*, 138 (32), 10331-10343.
- Jana, J., Ngo, Y.-L. T., Chung, J. S. ve Hur, S. H., 2020, Contribution of carbon dot nanoparticles in electrocatalysis: Development in energy conversion process, *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 11 (3), 220-237.
- Jayawardena, K. D., Rozanski, L. J., Mills, C. A., Beliatas, M. J., Nismy, N. A. ve Silva, S. R., 2013, 'Inorganics-in-organics': recent developments and outlook for 4G polymer solar cells, *Nanoscale*, 5 (18), 8411-8427.
- Jeng, J. Y., Chiang, Y. F., Lee, M. H., Peng, S. R., Guo, T. F., Chen, P. ve Wen, T. C., 2013, CH₃NH₃PbI₃ perovskite/fullerene planar-heterojunction hybrid solar cells, *Advanced Materials*, 25 (27), 3727-3732.
- Jeong, J., Kim, M., Seo, J., Lu, H., Ahlawat, P., Mishra, A., Yang, Y., Hope, M. A., Eickemeyer, F. T. ve Kim, M., 2021, Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI₃ perovskite solar cells, *Nature*, 592 (7854), 381-385.
- Joshi, P. H., 2016, Understanding the photostability of perovskite solar cell, *Iowa State University*.
- Jung, H. S. ve Park, N. G., 2015, Perovskite solar cells: from materials to devices, *small*, 11 (1), 10-25.

- Kang, Y.-F., Li, Y.-H., Fang, Y.-W., Xu, Y., Wei, X.-M. ve Yin, X.-B., 2015, Carbon Quantum Dots for Zebrafish Fluorescence Imaging, *Scientific reports*, 5 (1).
- Kara, K., 2018, Yeni nesil perovskit güneş hücrelerinde iskelet yapıların desenlenmesi.
- Kim, H.-S., Lee, C.-R., Im, J.-H., Lee, K.-B., Moehl, T., Marchioro, A., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Yum, J.-H. ve Moser, J. E., 2012, Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%, *Scientific reports*, 2 (1), 1-7.
- Kim, H., Lee, J., Kim, B., Byun, H. R., Kim, S. H., Oh, H. M., Baik, S. ve Jeong, M. S., 2019, Enhanced stability of MAPbI₃ perovskite solar cells using poly (p-chloroxylylene) encapsulation, *Scientific reports*, 9 (1), 1-6.
- Kırbıyık, Ç., Toprak, A., Başlak, C., Kuş, M. ve Ersöz, M., 2020, Nitrogen-doped CQDs to enhance the power conversion efficiency of perovskite solar cells via surface passivation, *Journal of Alloys and Compounds*, 832.
- Kivambe, M., Aissa, B. ve Tabet, N., 2017, Emerging technologies in crystal growth of photovoltaic silicon: progress and challenges, *Energy Procedia*, 130, 7-13.
- Kızılcıaoğlu, H., GÖKŞEN, K. ve KÖYSAL, Y., 2016, Amorf Hidrojenlenmiş Karbon İnce Filmlerin Yasak Enerji Bant Aralıklarının Optiksel İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (1), 317-326.
- Koçak, Ç., 2019, Lantanit ve geçiş metali bileşiklerinin elde edilmesi ve fotoluminesans özelliklerinin incelenmesi.
- Kojima, A., Teshima, K., Miyasaka, T. ve Shirai, Y., 2006, Novel photoelectrochemical cell with mesoscopic electrodes sensitized by lead-halide compounds (2), *ECS Meeting Abstracts*, 397.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. ve Miyasaka, T., 2009, Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells, *Journal of the American Chemical Society*, 131 (17), 6050-6051.
- Kuhlmann, A., 1963, The second most abundant element in the Earth's crust, *JOM*, 15 (7), 502-505.
- Kumar, P., Dua, S., Kaur, R., Kumar, M. ve Bhatt, G., 2022, A review on advancements in carbon quantum dots and their application in photovoltaics, *RSC Advances*, 12 (8), 4714-4759.
- Kurukavak, Ç. K., Yılmaz, T., Toprak, A., Büyükbekar, A., Kuş, M. ve Ersöz, M., 2022, Improved performance with boron-doped carbon quantum dots in perovskite solar cells, *Journal of Alloys and Compounds*, 927, 166851.
- Li, C., Lu, X., Ding, W., Feng, L., Gao, Y. ve Guo, Z., 2008, Formability of ABX₃ (X = F, Cl, Br, I) halide perovskites, *Acta Crystallogr B*, 64 (Pt 6), 702-707.

- Li, H., Shi, W., Huang, W., Yao, E.-P., Han, J., Chen, Z., Liu, S., Shen, Y., Wang, M. ve Yang, Y., 2017, Carbon quantum dots/TiO₂ electron transport layer boosts efficiency of planar heterojunction perovskite solar cells to 19%, *Nano letters*, 17 (4), 2328-2335.
- Li, L., Chen, Y., Liu, Z., Chen, Q., Wang, X. ve Zhou, H., 2016, The additive coordination effect on hybrids perovskite crystallization and high-performance solar cell, *Advanced Materials*, 28 (44), 9862-9868.
- Lim, H., Liu, Y., Kim, H. Y. ve Son, D. I., 2018, Facile synthesis and characterization of carbon quantum dots and photovoltaic applications, *Thin Solid Films*, 660, 672-677.
- Lin, L. ve Zhang, S., 2012, Creating high yield water soluble luminescent graphene quantum dots via exfoliating and disintegrating carbon nanotubes and graphite flakes, *Chemical Communications*, 48 (82).
- Lin, L., 2013, The Preparation and characterisation of graphene and its analogues, *University of Sheffield*.
- Liu, J., Yin, Y., He, B., Wang, P., Wang, M., Cai, W., Han, Y., Su, Z., Guo, J. ve Cai, R., 2023, Focusing on the bottom contact: Carbon quantum dots embedded SnO₂ electron transport layer for high-performance and stable perovskite solar cells, *Materials Today Physics*, 33, 101041.
- Liu, M., Johnston, M. B. ve Snaith, H. J., 2013, Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition, *Nature*, 501 (7467), 395-398.
- Liu, Y., Huang, H., Cao, W., Mao, B., Liu, Y. ve Kang, Z., 2020, Advances in carbon dots: from the perspective of traditional quantum dots, *Materials Chemistry Frontiers*, 4 (6), 1586-1613.
- Luceno-Sanchez, J. A., Diez-Pascual, A. M. ve Pena Capilla, R., 2019, Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments, *Int J Mol Sci*, 20 (4).
- Luo, P. G., Yang, F., Yang, S.-T., Sonkar, S. K., Yang, L., Broglie, J. J., Liu, Y. ve Sun, Y.-P., 2014, Carbon-based quantum dots for fluorescence imaging of cells and tissues, *RSC Advances*, 4 (21).
- Luo, Q., Zhang, Y., Liu, C., Li, J., Wang, N. ve Lin, H., 2015, Iodide-reduced graphene oxide with dopant-free spiro-OMeTAD for ambient stable and high-efficiency perovskite solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (31), 15996-16004.
- Luo, X., Lin, X., Gao, F., Zhao, Y., Li, X., Zhan, L., Qiu, Z., Wang, J., Chen, C. ve Meng, L., 2022, Recent progress in perovskite solar cells: from device to commercialization, *Science China Chemistry*, 65 (12), 2369-2416.
- Ma, Y., Zhang, H., Zhang, Y., Hu, R., Jiang, M., Zhang, R., Lv, H., Tian, J., Chu, L. ve Zhang, J., 2018, Enhancing the performance of inverted perovskite solar cells

- via grain boundary passivation with carbon quantum dots, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11 (3), 3044-3052.
- Maehlum, M., 2015, Energy informative the homeowner's guide to solar panels, best thin film solar panels—Amorphous, cadmium telluride or CIGS, *Last updated*, 6.
- Mahapatra, A., Prochowicz, D., Tavakoli, M. M., Trivedi, S., Kumar, P. ve Yadav, P., 2020, A review of aspects of additive engineering in perovskite solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, 8 (1), 27-54.
- Manspeaker, C., Venkatesan, S., Zakhidov, A. ve Martirosyan, K. S., 2017, Role of interface in stability of perovskite solar cells, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 15, 1-7.
- Marinova, N., Valero, S. ve Delgado, J. L., 2017, Organic and perovskite solar cells: Working principles, materials and interfaces, *J Colloid Interface Sci*, 488, 373-389.
- Martínez, J. L., 2020, Hybrid perovskite materials: characterization of their electrical properties and stability at the nanoscale, *Université de Lille; Université de Mons*.
- Maxim, A. A., Aidarkhanov, D., Atabaev, T. S., Jumabekov, A. N. ve Ng, A., 2022, Light management in perovskite solar cell by incorporation of carbon quantum dots, *Materials Today: Proceedings*, 49, 2487-2490.
- Menzek, D. A., 2017, Karbon nokta yapılarının sentezi ve fotoluminesans özelliklerinin incelenmesi.
- Mesquita, I., Andrade, L. ve Mendes, A., 2018, Perovskite solar cells: Materials, configurations and stability, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2471-2489.
- Miao, S., Liang, K., Zhu, J., Yang, B., Zhao, D. ve Kong, B., 2020, Hetero-atom-doped carbon dots: Doping strategies, properties and applications, *Nano Today*, 33.
- Molaei, M. J., 2019, A review on nanostructured carbon quantum dots and their applications in biotechnology, sensors, and chemiluminescence, *Talanta*, 196, 456-478.
- Molaei, M. J., 2020, The optical properties and solar energy conversion applications of carbon quantum dots: A review, *Solar Energy*, 196, 549-566.
- Moon, S., Kim, K., Kim, Y., Heo, J. ve Lee, J., 2016, Highly efficient single-junction GaAs thin-film solar cell on flexible substrate, *Scientific reports*, 6 (1), 1-6.
- Nair, S., Patel, S. B. ve Gohel, J. V., 2020, Recent trends in efficiency-stability improvement in perovskite solar cells, *Materials Today Energy*, 17.

- Nasa, 2024a, Carbondioxide, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/> (Eriřim Tarihi:01.07.2024).
- Nasa, 2024b, Global Climate Change, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/> (Eriřim Tarihi:01.07.2024).
- Nguyen, D. N., Roh, S. H., Kim, D.-H., Lee, J. Y., Wang, D. H. ve Kim, J. K., 2021, Molecular manipulation of PEDOT: PSS for efficient hole transport by incorporation of N-doped carbon quantum dots, *Dyes and Pigments*, 194, 109610.
- Niki, S., Contreras, M., Repins, I., Powalla, M., Kushiya, K., Ishizuka, S. ve Matsubara, K., 2010, CIGS absorbers and processes, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18 (6), 453-466.
- Niu, W.-J., Li, Y., Zhu, R.-H., Shan, D., Fan, Y.-R. ve Zhang, X.-J., 2015, Ethylenediamine-assisted hydrothermal synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots as fluorescent probes for sensitive biosensing and bioimaging, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 218, 229-236.
- NREL, 2024a, Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (Eriřim Tarihi: 01.07.2024).
- NREL, 2024b, Reference Air Mass 1.5 Spectra, <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html> (Eriřim Tarihi: 01.07.2024).
- Pan, D., Zhang, J., Li, Z., Wu, C., Yan, X. ve Wu, M., 2010, Observation of pH-, solvent-, spin-, and excitation-dependent blue photoluminescence from carbon nanoparticles, *Chemical Communications*, 46 (21), 3681-3683.
- Park, Y. R., Jeong, H. Y., Seo, Y. S., Choi, W. K. ve Hong, Y. J., 2017, Quantum-Dot Light-Emitting Diodes with Nitrogen-Doped Carbon Nanodot Hole Transport and Electronic Energy Transfer Layer, *Scientific reports*, 7 (1).
- Patel, K., Prochowicz, D., Akin, S., Kalam, A., Tavakoli, M. M. ve Yadav, P., 2023, Applications of Carbon-Based Materials for Improving the Performance and Stability of Perovskite Solar Cells, *Energy Technology*, 11 (10), 2300228.
- Paulo, S., Stoica, G., Cambarau, W., Martinez-Ferrero, E. ve Palomares, E., 2016, Carbon quantum dots as new hole transport material for perovskite solar cells, *Synthetic Metals*, 222, 17-22.
- Pourmadadi, M., Rahmani, E., Rajabzadeh-Khosroshahi, M., Samadi, A., Behzadmehr, R., Rahdar, A. ve Ferreira, L. F. R., 2023, Properties and application of carbon quantum dots (CQDs) in biosensors for disease detection: a comprehensive review, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 104156.
- Prasanthkumar, S. ve Giribabu, L., 2016, Recent advances in perovskite-based solar cells, *Curr. Sci*, 111 (7), 1173-1181.

- Razza, S., Castro-Hermosa, S., Di Carlo, A. ve Brown, T. M., 2016, Research Update: Large-area deposition, coating, printing, and processing techniques for the upscaling of perovskite solar cell technology, *APL Materials*, 4 (9), 091508.
- Rebecca, L. W. X., Burhanudin, Z. A., Abdullah, M. ve Saheed, M. S. M., 2020, Structural changes and band gap tunability with incorporation of n-butylammonium iodide in perovskite thin film, *Heliyon*, 6 (2), e03364.
- Rehman, F., Syed, I. H., Khanam, S., Ijaz, S., Mehmood, H., Zubair, M., Massoud, Y. ve Mehmood, M. Q., 2023, Fourth generation solar cells: A review, *Energy Advances*.
- Riaz, R., Ali, M., Maiyalagan, T., Anjum, A. S., Lee, S., Ko, M. J. ve Jeong, S. H., 2019, Dye-sensitized solar cell (DSSC) coated with energy down shift layer of nitrogen-doped carbon quantum dots (N-CQDs) for enhanced current density and stability, *Applied Surface Science*, 483, 425-431.
- Righini, G. C. ve Enrichi, F., 2020, Solar cells' evolution and perspectives: a short review, In: *Solar Cells and Light Management*, Eds, p. 1-32.
- Roy, P., Ghosh, A., Barclay, F., Khare, A. ve Cuce, E., 2022, Perovskite solar cells: a review of the recent advances, *Coatings*, 12 (8), 1089.
- Saliba, M., Matsui, T., Seo, J.-Y., Domanski, K., Correa-Baena, J.-P., Nazeeruddin, M. K., Zakeeruddin, S. M., Tress, W., Abate, A. ve Hagfeldt, A., 2016, Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency, *Energy & environmental science*, 9 (6), 1989-1997.
- Sampaio, P. G. V. ve González, M. O. A., 2017, Photovoltaic solar energy: Conceptual framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601.
- Seyyed Majid Mirhendi, Mohammad Reza Golobostanfard ve Abdizadeh, H., 2017, Effect of Speed of Spin Coating Deposition on Properties of CH₃NH₃PbI₃ Organic-Inorganic Halide Perovskite.
- Shan, X., Chai, L., Ma, J., Qian, Z., Chen, J. ve Feng, H., 2014, B-doped carbon quantum dots as a sensitive fluorescence probe for hydrogen peroxide and glucose detection, *Analyst*, 139 (10), 2322-2325.
- Sharma, S., Jain, K. K. ve Sharma, A., 2015, Solar Cells: In Research and Applications—A Review, *Materials Sciences and Applications*, 06 (12), 1145-1155.
- Shejale, K. P., Jaiswal, A., Kumar, A., Saxena, S. ve Shukla, S., 2021, Nitrogen doped carbon quantum dots as Co-active materials for highly efficient dye sensitized solar cells, *Carbon*, 183, 169-175.
- Sheng Peng, Jeffrey M. McMahon, George C. Schatz, Stephen K. Gray ve Sun, Y., 2010, Proceedings of the National Academy of Sciences.

- Shevaleevskiy, O. I., 2020, Perovskite solar cells: recent progress and future prospects, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 11 (6), 716-728.
- Singh, S., Shourie, R. J. ve Kabra, D., 2019, Efficient and thermally stable CH₃NH₃PbI₃ based perovskite solar cells with double electron and hole extraction layers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52 (25).
- Strekert, O. Y. ve Marsov, N., 2022, Comparison of organic-inorganic pin and pn heterostructures as potential solar cell designs for use in difficult weather conditions, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012082.
- Sum, T. C. ve Mathews, N., 2014, Advancements in perovskite solar cells: photophysics behind the photovoltaics, *Energy Environ. Sci.*, 7 (8), 2518-2534.
- Tambe, P., Mane, S., Chaudhari, B. P. ve Kulabhusan, P. K., 2022, Carbon nanomaterials for therapeutic applications, In: *Fundamentals of Bionanomaterials*, Eds: Elsevier, p. 293-325.
- Tonui, P., Oseni, S. O., Sharma, G., Yan, Q. ve Tessema Mola, G., 2018, Perovskites photovoltaic solar cells: An overview of current status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1025-1044.
- Tyona, M. D., 2013, A theoretical study on spin coating technique, *Advances in materials Research*, 2 (4), 195-208.
- Valadi, K., Gharibi, S., Taheri-Ledari, R., Akin, S., Maleki, A. ve Shalan, A. E., 2021, Metal oxide electron transport materials for perovskite solar cells: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 19 (3), 2185-2207.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R. ve Ruppert Filho, E., 2009, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, *IEEE Transactions on power electronics*, 24 (5), 1198-1208.
- Walker, G., 2001, Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model, *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, 21 (1), 49-55.
- Wang, D., Wright, M., Elumalai, N. K. ve Uddin, A., 2016, Stability of perovskite solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 147, 255-275.
- Wang, R., Lu, K.-Q., Tang, Z.-R. ve Xu, Y.-J., 2017, Recent progress in carbon quantum dots: synthesis, properties and applications in photocatalysis, *Journal of Materials Chemistry A*, 5 (8), 3717-3734.
- Weber, D., 1978, CH₃NH₃PbX₃, ein Pb (II)-system mit kubischer perowskitstruktur/CH₃NH₃PbX₃, a Pb (II)-system with cubic perovskite structure, *Zeitschrift für Naturforschung B*, 33 (12), 1443-1445.
- Wen, Y., Zhu, G. ve Shao, Y., 2019, Improving the power conversion efficiency of perovskite solar cells by adding carbon quantum dots, *Journal of Materials Science*, 55 (7), 2937-2946.

- Woon Seok Yang, Byung-Wook Park, Eui Hyuk Jung, Nam Joong Jeon, Young Chan Kim, Dong Uk Lee, Seong Sik Shin, Jangwon Seo, Eun Kyu Kim, Jun Hong Noh ve Seok, S. I., 2017, Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells.
- Wu, T., Li, X., Qi, Y., Zhang, Y. ve Han, L., 2021, Defect passivation for perovskite solar cells: from molecule design to device performance, *Chemsuschem*, 14 (20), 4354-4376.
- Wu, Z., Song, T. ve Sun, B., 2017, Carbon-based materials used for perovskite solar cells, *ChemNanoMat*, 3 (2), 75-88.
- Xia, C., Zhu, S., Feng, T., Yang, M. ve Yang, B., 2019, Evolution and synthesis of carbon dots: from carbon dots to carbonized polymer dots, *Advanced Science*, 6 (23), 1901316.
- Xie, H., Zhang, Y., Xu, J., Zhu, Y., Pan, Y., Zhang, C. ve Yin, X., 2023, Two-dimensional MXene explores ways for applications in perovskite solar cells: a critical review, *Journal of Alloys and Compounds*, 173320.
- Xie, L., Chen, J., Vashishtha, P., Zhao, X., Shin, G. S., Mhaisalkar, S. G. ve Park, N.-G., 2019, Importance of functional groups in cross-linking methoxysilane additives for high-efficiency and stable perovskite solar cells, *ACS Energy Letters*, 4 (9), 2192-2200.
- Xu, Q., Kuang, T., Liu, Y., Cai, L., Peng, X., Sreeprasad, T. S., Zhao, P., Yu, Z. ve Li, N., 2016, Heteroatom-doped carbon dots: synthesis, characterization, properties, photoluminescence mechanism and biological applications, *Journal of Materials Chemistry B*, 4 (45), 7204-7219.
- Xu, T., Wan, Z., Tang, H., Zhao, C., Lv, S., Chen, Y., Chen, L., Qiao, Q. ve Huang, W., 2021, Carbon quantum dot additive engineering for efficient and stable carbon-based perovskite solar cells, *Journal of Alloys and Compounds*, 859, 157784.
- Yakut, M., Kum, M., Şendoğdular, Ö. Ü. S. T. ve Şendoğdular, Ö. Ü. L., Nanoteknolojide Karakterizasyon Teknikleri.
- Yang, H.-L., Bai, L.-F., Geng, Z.-R., Chen, H., Xu, L.-T., Xie, Y.-C., Wang, D.-J., Gu, H.-W. ve Wang, X.-M., 2023, Carbon quantum dots: Preparation, optical properties, and biomedical applications, *Materials Today Advances*, 18, 100376.
- Yang, S., Dai, J., Yu, Z., Shao, Y., Zhou, Y., Xiao, X., Zeng, X. C. ve Huang, J., 2019, Tailoring passivation molecular structures for extremely small open-circuit voltage loss in perovskite solar cells, *Journal of the American Chemical Society*, 141 (14), 5781-5787.
- Yang, W. S., Noh, J. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J. ve Seok, S. I., 2015, High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange, *Science*, 348 (6240), 1234-1237.

- Yang, Z., Xu, M., Liu, Y., He, F., Gao, F., Su, Y., Wei, H. ve Zhang, Y., 2014, Nitrogen-doped, carbon-rich, highly photoluminescent carbon dots from ammonium citrate, *Nanoscale*, 6 (3), 1890-1895.
- Yılmaz, T., 2021, The hydrothermal synthesis of blue-emitting boron-doped CQDs and its application for improving the photovoltaic parameters of organic solar cell, *Turkish Journal of Chemistry*, 45 (6), 1828-1840.
- Yin, W. J., Shi, T. ve Yan, Y., 2014, Unique properties of halide perovskites as possible origins of the superior solar cell performance, *Advanced Materials*, 26 (27), 4653-4658.
- Yin, X., McClary, S. A., Song, Z., Zhao, D., Graeser, B., Wang, C., Shrestha, N., Wang, X., Chen, C., Li, C., Subedi, K. K., Ellingson, R. J., Tang, W., Agrawal, R. ve Yan, Y., 2019, A Cu₃PS₄ nanoparticle hole selective layer for efficient inverted perovskite solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, 7 (9), 4604-4610.
- Zhang, B., Liu, D., Chen, P., Liu, W., Zhao, J., Li, H. ve Liu, H., 2021, Improved perovskite crystallization via antisolvent-assisted processed using additive engineering for efficient perovskite solar cells, *Journal of Alloys and Compounds*, 855.
- Zhang, F. ve Zhu, K., 2020, Additive Engineering for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells, *Advanced Energy Materials*, 10 (13).
- Zhou, H., Chen, Q., Li, G., Luo, S., Song, T.-b., Duan, H.-S., Hong, Z., You, J., Liu, Y. ve Yang, Y., 2014a, Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells, *Science*, 345 (6196), 542-546.
- Zhou, J., Shan, X., Ma, J., Gu, Y., Qian, Z., Chen, J. ve Feng, H., 2014b, Facile synthesis of P-doped carbon quantum dots with highly efficient photoluminescence, *RSC Advances*, 4 (11).
- Zhou, Y. ve Zhao, Y., 2019, Chemical stability and instability of inorganic halide perovskites, *Energy & environmental science*, 12 (5), 1495-1511.
- Zhu, X., Sun, J., Yuan, S., Li, N., Qiu, Z., Jia, J., Liu, Y., Dong, J., Lv, P. ve Cao, B., 2019, Efficient and stable planar perovskite solar cells with carbon quantum dots-doped PCBM electron transport layer, *New Journal of Chemistry*, 43 (18), 7130-7135.
- Zuo, P., Lu, X., Sun, Z., Guo, Y. ve He, H., 2015, A review on syntheses, properties, characterization and bioanalytical applications of fluorescent carbon dots, *Microchimica Acta*, 183 (2), 519-542.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ayşegül TOPRAK
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Elâzığ Balakgazi Lisesi, Elâzığ	2003
Üniversite	: Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elâzığ	2007
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD, Konya	2012
Doktora	: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler ABD, Konya	2024

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009-2011	Meram Elektrik Dağıtım A.Ş. (MEDAŞ) KONYA	İşletme Mühendisi
2011-	Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Yarıiletkenler
 Güneş Pilleri

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Kırbıyık Çisem, Toprak Ayşegül, Başlak Canan, Kuş Mahmut, Ersöz Mustafa (2020). Nitrogen-doped CQDs to enhance the power conversion efficiency of perovskite solar cells via surface passivation. JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS, 832, 154897, Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154897 (Yayın No: 6185151)

(Doktora Tezinden Türetilmiştir)

Kırbıyık Kurukavak Çisem, Yılmaz Tuğbahan, Toprak Ayşegül, Büyükbekar Alihan, Kuş Mahmut, Ersöz Mustafa (2022). Improved performance with boron-doped carbon quantum dots in perovskite solar cells. JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS, 927, 166851, Doi: 10.1016/j.jallcom.2022.166851 (Yayın No: 7921744)

(Doktora Tezinden Türetilmiştir)

