



T.C.

KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PEROVSKİTE NANOKRİSTALLERİN
SENTEZİ VE ORGANİK GÜNEŞ
HÜCRELERİNDEKİ UYGULAMALARI**

Medine ATAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL-2025

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Medine ATAÖ tarafından hazırlanan “Perovskit Nanokristallerin Sentezi ve Organik Güneş Hücrelerindeki Uygulamaları ” adlı tez çalışması 23/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Gülcihan GÜZEL KAYA
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Fatma ZİLİFDAR FOTO
(Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

İmza

Medine ATAĞ

Tarih: 23.09.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PEROVSKİTE NANOKRİSTALLERİN SENTEZİ VE ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNDEKİ UYGULAMALARI

Medine ATAĞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

2025, 53 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Perovskit, son yıllarda yüksek verimli fotovoltaik malzemeler olarak dikkat çekmiş ve özellikle nanokristal uygulamalarında önemli bir rol oynamıştır. Perovskit nanokristaller, güneş enerjisinin dönüşüm verimliliğini artırma potansiyeline sahip, bu da organik güneş hücreleri için önemli bir gelişme sağlamaktadır. Bu çalışmada, toksik ve çevresel zorluklar nedeniyle organik-inorganik kurşun esaslı perovskit bileşiklere alternatif olarak görülen CsPbX_3 ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) perovskit nanokristallerinin (Per-NK) sentezi ve organik güneş hücrelerinde (OGH) kullanımı incelenmiştir. Per-NK'ların sentezi için ligand destekli yeniden çöktürme yöntemi kullanılmıştır. P3HT:PCBM çözeltisi içerisine çeşitli halojen bileşimlerine sahip 3 farklı Per-NK katkılanarak ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Per-NK/Ag konfigürasyona sahip OGH'leri üretilmiştir. Bant aralıkları enerjisi $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ için sırasıyla 2,01, 2,25 ve 2,41 eV olarak hesaplanmıştır. Katkısız P3HT:PCBM yüzeyinin E_g değeri, 1,889 eV olarak belirlenmiştir. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ katkılanmış P3HT:PCBM ince filmleri için sırasıyla 1,875, 1,884 ve 1,866 eV' a düştüğü görülmektedir. Referans hücrede $5,797 \text{ mA cm}^{-2}$ J_{sc} , $0,296 \text{ V}$ V_{oc} , %29,1 dolum faktörü (FF) ve %0,495 enerji dönüşüm verimi elde edilmiştir. $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ ile hazırlanan aygıt, $6,904 \text{ mA cm}^{-2}$ J_{sc} , $0,31 \text{ V}$ V_{oc} ve %30,4 FF ile enerji dönüşüm veriminde %0,650'lik bir değerle referans aygıtı göre gelişme göstermiştir. Bu aygıtın verimlilik artışı temel olarak V_{oc} , J_{sc} ve FF artışı ile ilişkilendirilmiştir. Bu araştırma, organik güneş pillerinin performansı iyileştirmesi için yeni stratejiler geliştirilmesine yönelik önemli bulgular sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Perovskit, nanokristal, optik özellikler, organik güneş hücresi.

ABSTRACT

MS

SYNTHESIS OF PEROVSKITE NANOCRYSTALS AND THEIR APPLICATION IN ORGANIC SOLAR CELLS

Medine ATAĞ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Chemical Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

2025, 53 Pages

Jury

Doç.Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Perovskite has attracted attention as high efficiency photovoltaic materials in recent years and has played an important role especially in nanocrystal applications. Perovskite nanocrystals have the potential to increase the conversion efficiency of solar energy, which provides a significant development for organic solar cells. In this study, the synthesis of CsPbX_3 ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) perovskite nanocrystals, which are considered as an alternative to organic-inorganic lead-based perovskite compounds due to toxic and environmental difficulties, and their use in organic solar cells were investigated. Ligand-assisted reprecipitation method was used for the synthesis of Per-NCs. The production of these perovskites was carried out by spin coating method and their performances were optimized with different halogenide contents. OSCs with ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Per-NK/Ag configurations were produced by doping Per-NCs into P3HT:PCBM solution. The band gap energies were calculated as 2.01, 2.25 and 2.41 eV for $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ and $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$, respectively. It is observed that it decreases to 1.875, 1.884 and 1.866 eV for $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ and $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ doped P3HT:PCBM thin films, respectively. In the reference cell, 5.797 mA cm^{-2} J_{sc} , 0.296 V V_{oc} , 29.1% fill factor (FF) and 0.495% energy conversion efficiency were obtained. The device prepared with $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ showed an improvement of 0.650% in energy conversion efficiency with 6.904 mA cm^{-2} J_{sc} , 0.31 V V_{oc} and 30.4% FF compared to the reference device. The efficiency increase of this device was mainly associated with the increase in V_{oc} , J_{sc} and FF. This research aims to provide important findings for the development of new strategies for the performance improvement of organic solar cells.

Keywords: Perovskite, nanocrystals, optical properties, organic solar cell.

ÖNSÖZ

Bu tezin tamamlanmasında büyük katkıları olan ve desteklerini esirgemeyen herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, bu çalışmanın danışmanlığını üstlenen Doç. Dr. Çisem Kırbıyık Kurukavak'a en derin teşekkürlerimi iletmek isterim. Kendisi, bu tezin her aşamasında sağladığı değerli rehberlik, öneriler ve destekle bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasına büyük katkıda bulunmuştur. Ayrıca, Prof. Dr. Mahmut Kuş'a, perovskit kuantum noktaları ve organik güneş hücreleri üzerine yaptığı çalışmalarla bu tezin bilimsel derinliğini artırdığı için teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarda ve veri analizlerinde yardımcı olan Mütahire Tok'a da teşekkürlerimi sunarım. Ailem ve arkadaşlarım, bu süreçte her zaman yanımda oldular ve moral kaynağım oldular. Annem ve kardeşlerim başta olmak üzere değerli arkadaşım Hüseyin Kocaman, Gizem Dayan ve sevgili hayat arkadaşım Mehmet Atak'a, verdikleri destek, anlayış ve cesaretlendirme için minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Özellikle zor zamanlarda gösterdikleri sabır ve destek, bu tezin tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Son olarak, bu tezin gerçekleştirilmesine olanak tanıyan Konya Teknik Üniversitesi'ne, gerekli altyapıyı sağlayan ve araştırma imkanlarını sunan tüm akademik ve idari personele teşekkür ederim. Bu tezin, perovskit kuantum noktaları ve organik güneş hücreleri konusundaki bilgi birikimine katkı sağlamak ve bu alandaki gelecekteki araştırmalara ışık tutmak amacıyla hazırlandığını belirtmek isterim.

Medine ATAK

KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
Kısaltmalar	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Perovskit Nanokristaller	5
2.1.1. Perovskit nanokristallerin elektronik ve optik özellikleri	6
2.3. Perovskit Nanokristallerin Uygulama Alanları.....	7
2.4. Perovskit Nanokristallerin Sentez Yöntemleri.....	9
2.5. Organik Güneş Hücreleri.....	11
2.5.1. Çalışma Prensipleri.....	12
2.5.2. Verimlilik ve performans faktörleri	12
2.6. Perovskit Nanokristallerin Organik Güneş Hücrelerindeki Rolü	13
2.7. Perovskit Malzemelerinin Kararlılığı ve Zorlukları	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Araştırma Yöntemi ve Tasarımı.....	15

3.1.1 Perovskit nanokristallerin (Per-NK) sentezi.....	15
3.2. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar.....	16
3.2.1 Organik güneş hücresi üretimi	16
3.3. Karakterizasyon Yöntemleri	20
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	22
4.1. Perovskit Nanokristallerin Sentezi ve Karakterizasyonu	22
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
5.1. Sonuçlar.....	39
5.2. Öneriler.....	39
KAYNAKLAR	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Sembol	Açıklama
Voc	Açık devre voltajı
FF	Dolum faktörü
PL	Fotolüminesans
PLQY	Fotolüminesans kuantum verimi
Eg	Bant aralığı
n	Kırılma indisi
Al	Alüminyum
Pb	Kurşun
T	Sıcaklık

Kısaltmalar

Kısaltma	Açılımı
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
UV-Vis	Ultraviyole-Görünür Spektroskopisi
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
PL	Fotolüminesans
MAPbI ₃	Metilamonyum kurşun iyodür
P3HT	Poli(3-hekziltiyofen)
PCBM	[6,6]-Fenil-C61-bütirik asit metil esteri
XRD	X-Işını Difraktometresi
Per-NK	Perovskit kuantum kristalleri
OGH	Organik güneş hücreleri
Per-NK	Perovskit nanokristal
PVD	Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition)
CVD	Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition)
ITO	İndiyum kalay oksit

1. GİRİŞ

Enerji üretimi, dünya genelinde hızla artan talep ve sınırlı fosil yakıt rezervleri nedeniyle sürdürülebilir çözümler arayışında olan bir alandır. Fosil yakıtların hem çevresel hem de ekonomik maliyetleri, yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelimi hızlandırmıştır (Özbektaş ve ark 2023). Bu bağlamda, güneş enerjisi, sonsuz kaynağı ve çevre dostu olması sebebiyle büyük bir potansiyele sahiptir. Geleneksel silikon bazlı güneş hücreleri yaygın olarak kullanılsa da, yüksek maliyetleri ve üretim süreçlerindeki karmaşıklık, bu teknolojinin geniş ölçekte benimsenmesini sınırlamaktadır (Johnson ve Lee 2018).

Güneş enerjisi, insanoğlunun enerji kaynakları arasında uzun bir tarihe sahiptir. İlk güneş hücresinin 1954 yılında Bell Laboratuvarları tarafından geliştirilmesi, bu teknolojinin başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir (Liu 2015). Bu erken güneş hücreleri, silikon tabanlı olup, düşük verimlilikleri nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahipti. Ancak, güneş enerjisinin çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak potansiyeli, teknolojik ilerlemelerle birlikte giderek daha fazla fark edilmeye başlandı.

1980'ler ve 1990'larda, güneş hücrelerinin verimliliğinde önemli artışlar gözlemlendi. Özellikle, ince film teknolojilerinin geliştirilmesi ve organik güneş hücrelerinin ortaya çıkışı, güneş enerjisi teknolojilerini daha erişilebilir ve ekonomik hale getirdi (Zhang ve ark 2019). Son yıllarda, perovskit tabanlı güneş hücreleri, enerji dönüşüm verimliliğinde sağladıkları büyük ilerlemelerle dikkat çekmektedir. Güneş enerjisi, ekonomik ve çevresel avantajları nedeniyle, sürdürülebilir enerji çözümleri arasında ön planda yer almaktadır (Meddeb ve ark 2022). Güneş enerjisinin tarihçesi ve gelişimi, teknolojik ilerlemenin enerji sektörü üzerindeki etkilerini gözler önüne sermektedir. Güneş enerjisi teknolojilerinin sürekli gelişmesi, çevresel sürdürülebilirliği artırma açısından büyük bir umut vaat etmektedir. Özellikle perovskit tabanlı hücreler, bu alandaki en son yenilikler olarak, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından önemli bir potansiyele sahip.

Perovskit minerali, 19. yüzyılda keşfedilmiş olup, 1839 yılında Gustav Rose tarafından Rusya'nın Ural Dağlarında keşfedilmiştir. Adını ise Rus mineralog Lev Perovski'den almıştır. Perovskitin kristal yapısı ilk olarak 1926 yılında Victor Goldschmidt tarafından tolerans faktörleri üzerine yaptığı çalışma sırasında

tanımlanmıştır ve yapısal olarak CaTiO_3 bileşimine sahiptir. İlk perovskit tabanlı güneş hücreleri, 2009 yılında Tan et al. tarafından geliştirilmiş ve bu teknolojinin potansiyelini göstermiştir (Kojima ve ark 2009). Perovskitler, geniş bir enerji bant aralığına ve yüksek ışık emilim verimliliğine sahip olmaları nedeniyle güneş hücreleri için ideal bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Perovskit malzemelerinin enerji dönüşüm teknolojilerindeki kullanımı, özellikle son on yılda hız kazanmış ve bu malzemelerin güneş hücreleri başta olmak üzere pek çok optoelektronik cihazda uygulanabilirliği kanıtlanmıştır (Stranks ve Snaith 2016). Perovskit tabanlı güneş hücreleri, 2009 yılında yapılan ilk çalışmalarda %3,8 verimlilikle dikkat çekerken, 2020'li yıllarda bu verimlilik %25'in üzerine çıkmıştır (Ma ve ark 2023). Bu hızlı gelişim, perovskit malzemelerinin enerji sektöründe önemli bir oyuncu haline gelmesini sağlamıştır.

Yüksek verimlilikleri ve düşük maliyetleri sayesinde, bu malzemeler enerji dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır (Kim ve ark 2020). Perovskitlerin, organik güneş hücreleri ve diğer enerji teknolojilerindeki kullanımı, enerji üretiminin daha ekonomik ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlamaktadır. Perovskit nanokristalleri (Per-NK) ise perovskit malzemelerin yığın yapılı hallerinden oldukça farklıdır. Bu kristaller, kuantum mekaniksel etkiler nedeniyle, daha büyük boyutlarda elde edilen perovskitlerden farklı optoelektronik özellikler gösterirler (Kim ve ark 2021). Kuantum sınırlama etkisi, bir malzemenin boyutu nanometre ölçeğine düştüğünde, enerji seviyelerinin ayrışmasıdır. Bu etki, perovskit kuantum kristalleri optoelektronik özelliklerini iyileştirir ve ışık emilim verimliliğini artırır (De Wolf ve ark 2014). Per-NK' ler yüksek verimli ışık yayan diyotlar (LED), çeşitli sensörler, esnek elektronikler ve lazerlerin üretiminde de kullanılabilir. Bu malzemelerin optik özellikleri, parlaklık ve enerji verimliliğini artırmak için optimize edilebilir (Wang ve ark 2023) ve kullanıldıkları cihazların performansını ve hassasiyetini artırabilir (Li ve ark 2021). Per-NK' ler, organik güneş hücrelerinde de enerji dönüşüm verimliliğini artırabilir.

1.1. Organik Güneş Hücreleri (OGH)

Son yıllarda geliştirilen organik güneş hücreleri (OGH), düşük maliyetli, esnek ve hafif yapılarıyla öne çıkmaktadır. Ancak OGH' lerinin yaygınlaşmasını engelleyen temel faktör, bu cihazların enerji dönüşüm verimliliğinin silikon bazlı hücrelere kıyasla düşük olmasıdır (Solak ve Irmak 2023). Organik güneş hücrelerinin ticari olarak geniş çapta benimsenmesi için verimliliklerinin artırılması gerekmektedir. Bunun için yeni

malzeme çözümleri ve optimizasyon yöntemleri araştırılmaktadır. Per-NK' ler organik güneş hücrelerinin performansını artıracak yeni bir malzeme sınıfı olarak araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Chaudhary ve ark 2020). Bu malzemeler, güneş hücrelerinde daha verimli enerji üretimini mümkün kılarken aynı zamanda esnek ve hafif cihazların geliştirilmesine de olanak tanımaktadır. Bu tez, perovskit nanokristallerin sentezi ve organik güneş hücrelerindeki uygulamalarını araştırarak, enerji verimliliği üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Per-NK'lerin OGH'lerdeki uygulamalarına yönelik çalışmalar henüz başlangıç aşamasındadır ve bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Per-NK'lerin sentezi ve OGH'lerde uygulanması, henüz tam anlamıyla optimize edilmemiştir.

Per-NK'lerin sentez sürecinde kullanılan farklı yöntemlerin, kristallerin büyüklüğü, şekli ve optoelektronik özellikleri üzerinde belirleyici etkileri bulunmaktadır. Farklı sentez yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmek, daha verimli ve uygun maliyetli Per-NK'lerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Per-NK'lerin sentezi konusunda yapılan çalışmalar, çeşitli yöntemlerin kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, buhar biriktirme teknikleri ise yüksek kaliteli ve homojen kristallerin elde edilmesinde başarılıdır. Ancak, bu yöntem karmaşıktır ve yüksek maliyetli olabilir. Kimyasal çözelti yöntemlerinde çeşitli çözücüler ve kimyasal reaksiyonlar kullanılarak PER-NK'lar sentezlenir. Yüksek saflıkta kristaller elde etmek için uygundur (Lin ve ark 2020).

Per-NK'lerin optoelektronik özelliklerini iyileştirmek için ligand mühendisliği çalışmaları da dikkat çekmektedir. Ligandlar, kuantum noktalarının yüzeyinde stabiliteyi artırmak ve optik özellikleri optimize etmek amacıyla kullanılır. Son araştırmalar, ligand mühendisliği ile Per-NK'lerin çevresel koşullara karşı daha dayanıklı hale getirilebileceğini göstermektedir (Zhong ve ark 2019). Bu, özellikle organik güneş hücrelerinde kullanılan perovskit malzemelerinin dayanıklılığı konusunda önemli bir adımdır. Ancak, Per-NK'lerin çevresel stabilitesi hala bir sorun teşkil etmektedir. Bu bağlamda, yeni ligandlar ve hibrid malzemeler kullanılarak Per-NK'lerin çevresel dayanıklılığı artırılmakta ve güneş hücrelerinin uzun ömürlülüğü geliştirilmektedir (Liu ve ark 2023).

Per-NK'ler, su, oksijen ve UV ışığı gibi çevresel faktörlere karşı hassas olabilir. Çevresel stabilite, Per-NK'lerin uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlamak için kritik bir faktördür. Per-NK'lerin çevresel stabilitesi üzerine yapılan çalışmalar, bu kristallerin su, oksijen ve UV ışığına karşı hassas olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, stabilizasyon stratejileri üzerine yapılan çalışmalar büyük önem taşımaktadır (Wu ve ark 2017). Örneğin, kapsülleme teknolojileri ve koruyucu kaplamalar, Per-NK'lerin çevresel faktörlere karşı daha dirençli hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, Per-NK'lerin termal stabilitesini artırmak amacıyla çeşitli organik-inorganik hibrit yapılar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Lim ve ark 2022). Gelecekteki araştırmaların, Per-NK'lerin verimliliğini artırırken aynı zamanda stabilitesini iyileştirmeye odaklanması gerekmektedir .

Per-NK'lerin mevcut durumu, bu malzemelerin enerji teknolojilerindeki potansiyelini açıkça göstermektedir. Gelişen teknoloji ve araştırmalar, Per-NK'lerin performansını daha da artıracak ve bu malzemelerin enerji sektöründe önemli bir rol oynamasına olanak sağlayacaktır. Bu araştırmanın amacı, Per-NK'lerin çevresel stabilitesini ve performansını değerlendirmek, özellikle farklı halojen türlerinin (Cl, Br, I) malzeme üzerindeki etkilerini anlamak ve uygulama potansiyellerini incelemektir. Bu sayede, Per-NK'lerin pratik kullanımının yaygınlaştırılmasına katkıda bulunulacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde perovskit temelli malzemeler, fotovoltaik teknolojilerde devrim yaratan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Ek olarak, düşük boyutlu perovskit malzemeler, boyutlarına bağlı olarak optoelektronik özellikleri ayarlama kapasitesi ile öne çıkmaktadırlar. Perovskit malzemelerinin zorlukları ve kararlılığı üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin ticari uygulamalar için daha güvenilir hale getirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.1. Perovskit Nanokristaller

Nanokristal, birkaç nanometre aralığında küçük kristalit boyutuyla karakterize edilen, yüksek açılı tane sınırlarıyla ayrılmış ve tane sınırları olarak bilinen düzensiz bölgelerin büyük hacim oranına sahip bir malzeme olarak tanımlanır. Yarı-iletken ve metal bileşiklerinin neredeyse hepsinden nanokristal üretimi mümkündür. Bu noktaların boyutu kontrol edilebilir bir değişkendir, bu sayede renkleri de kontrol edilebilir (Bera ve ark 2010). Nanokristallerin sentezinde boyut ve dağılımı kontrol etmek kritik öneme sahiptir. Boyut, çözeltinin miktarı, kullanılan başlangıç maddesi miktarı, çözgen miktarı, sıcaklık ve pH gibi parametrelerle belirlenir.

Güneş hücresi teknolojisinde, kuantum nanoparçacıklarının verimliliği artırma potansiyeli kanıtlanmıştır. Yarıiletkenin bant aralığı ne kadar büyükse, o kadar foton absorbe edilir ve bu da çıkış gerilimini artırır. Nanokristaller, güneş spektrumundaki ışığın daha fazla üretimini sağlayarak ve tek bir fotondan daha fazla yük üreterek güneş hücrelerinin verimliliğini artırmaktadır (Bera ve ark 2010). Perovskit güneş hücrelerinde, elektron taşıma katmanı genellikle düşük elektron hareketliliği ve ultraviyole (UV) ışık altında olumsuz fotokatalitik olaylara duyarlılığı nedeniyle mezogözenekli titanyum dioksit ile yapılır. Metal halojenür perovskitler, optoelektronik uygulamalar için gelecekte büyük potansiyel taşıyan fotovoltaik malzemelerdir, çünkü yüksek ışık soğurma katsayıları, doğrudan bant aralığı ve uzun taşıyıcı ömrü gibi avantajlara sahiptir. Bu malzemeler doğrudan kullanılabildiği gibi, enerji seviyeleri uyumluluğunu sağlamak ve yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır.

Perovskit kuantum noktalarının temel yapısı, ABX_3 formülüne dayanır. Burada "A" katyonu genellikle organik bir molekül (örneğin metilamonyum), "B" katyonu genellikle bir metal (örneğin kurşun), ve "X" halojen atomları (Cl, Br, I) ile temsil edilir. Bu yapılar, kuantum boyutlara indirildiğinde yüzey ve hacim etkileri nedeniyle malzemenin optik ve elektriksel özelliklerinde büyük değişiklikler meydana gelir. $CsPbX_3$ perovskit nanokristalleri, kurşun bazlı ve tam inorganik yapıları ile öne çıkar. Örneğin, Noh et al. (2013) perovskitlerin kristal yapısının esnekliği ve çeşitli iyonların yer değiştirme kabiliyetinin, geniş bir bant aralığı ve yük taşıma hareketliliği sağladığını belirtmiştir (Noh ve ark 2013). Bu özellikler, özellikle nanokristallerde daha belirgin hale gelir.

2.1.1. Perovskit nanokristallerin elektronik ve optik özellikleri

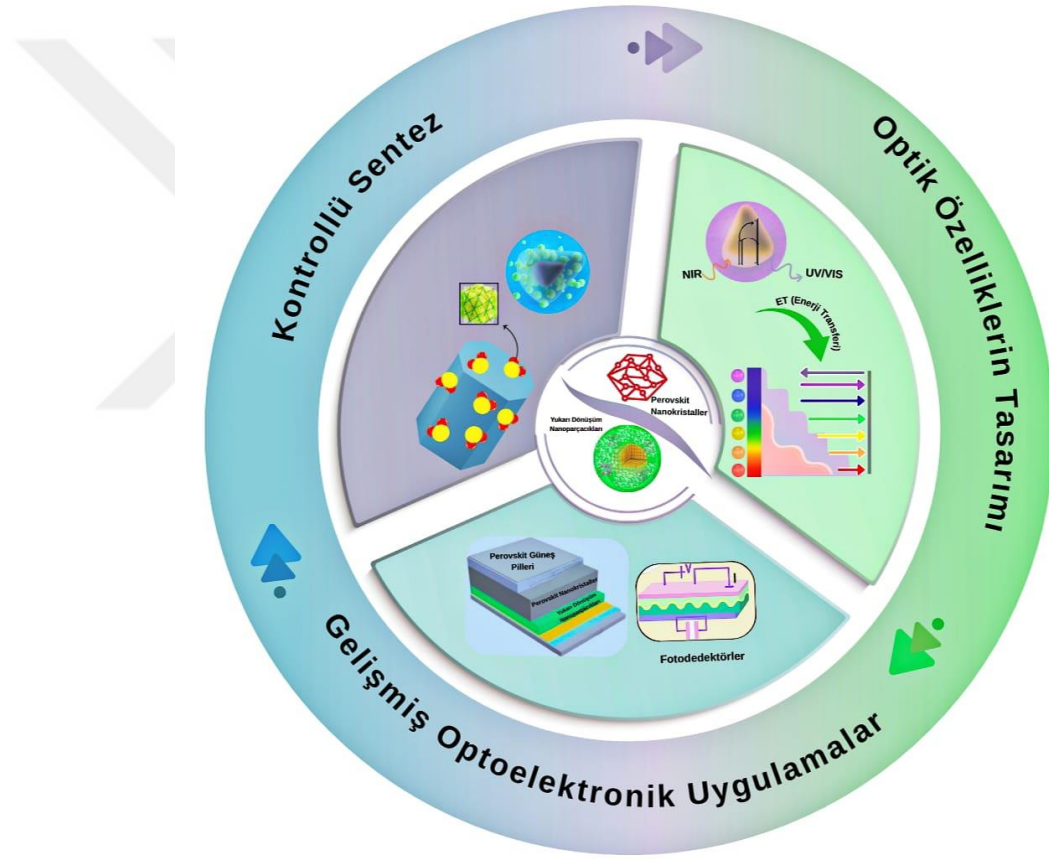
$CsPbX_3$ nanokristaller, yüksek elektron hareketliliği ve düşük rekombinasyon kayıpları ile dikkat çekmektedir. Bu özellikler, onları optoelektronik cihazlar ve güneş hücreleri için cazip hale getirir. Protesescu ve arkadaşları (2015), $CsPbX_3$ kuantum noktaların fotonlarla etkileşimlerinin boyutlarına ve kimyasal bileşimlerine göre ayarlanabileceğini göstermiştir (Protesescu ve ark 2015). Bu çalışmada, kuantum noktaların boyutu küçüldükçe, bant aralığının genişlediği ve ışık absorpsiyon spektrumunun maviye kaydığı gözlemlenmiştir. Örneğin, $CsPbX_3$ bileşiğinde, 12 nm'lik bir boyut küçültmesi, bant aralığının 2,3 eV' tan 3,1 eV' a kadar genişlemesine neden olmuştur, bu da kuantum boyutlandırma etkisinin doğrudan bir sonucu olarak açıklanmıştır. $CsPbX_3$ nanokristallerinin ışık emilim spektrumunun bileşimlerine ve boyutlarına bağlı olarak değiştiğini ve bu sayede renkli görüntüleme, LED ve fotovoltaik uygulamalarda kullanıldığını göstermiştir. Küçük boyutlu kristallerde yüzey kusurları ve yüzey etkileri önemli hale gelir, bu da nanokristallerinin performansını etkileyebilmektedir.

Elektronik özellikler aynı zamanda yüzey etkileriyle de belirlenir. Nanokristaller yüzeylerinde, genellikle pasivasyon gerektiren kusurlar bulundurulur. Bu yüzey kusurları, malzemenin fotoluminesans kuantum verimliliğini düşürebilir ve taşıyıcıların yüzeyde birleşmesine yol açabilir. $CsPbX_3$ nanokristallerin yüzeylerini oleik asit ve oleil amin ile stabilize ederek yüzey kusurlarını pasifleştirip, elektronik performanslarını artırdıkları rapor edilmiştir (Palazon ve ark 2017). Nanokristallerin boyutları, yüzey/alan oranı ve elektron hareketliliği arasındaki ilişki, optoelektronik

cihazların verimliliğini doğrudan etkiler. Küçük boyutlarda, nanokristallerin yüzeyinde daha fazla kusur olabilir, bu da taşıyıcıların tuzaklanmasına ve cihaz performansının düşmesine neden olabilir. Bununla birlikte, uygun pasivasyon ve sentez teknikleriyle bu sorunlar minimize edilebilir.

2.3. Perovskit Nanokristallerin Uygulama Alanları

CsPbX_3 gibi nanokristaller, düşük maliyetli fotovoltaik cihazlardan LED' lere, transistörlere ve hatta fotodetektörlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Perovskit nanokristallerin uygulamaları (Zhang ve ark 2024).

- **Fotovoltaik Uygulamalar**

Perovskit bazlı güneş hücrelerinin geleneksel silikon bazlı güneş hücrelerine göre üretim maliyetlerinin daha düşük olduğunu ve verimliliğinin daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Perovskit nanokristaller, güneş hücrelerinde ışık absorpsiyon

kapasitesini artırarak enerji dönüşüm verimliliğini iyileştirebilmektedir. Yüksek teknoloji gereksinimleri, optik ve elektriksel özellikleri boyut ve şekli değiştirilerek kolayca ayarlanabilen nanokristal yapılar tarafından daha kolay karşılanabildiğinden, Per-NK' lerin kullanımı, güneş hücrelerinde gelecekteki kullanımları için büyük bir potansiyele sahiptir (Şekil 2.1). Per-NK' lerin belirgin avantajları ile ilgili olarak, son derece verimli, kararlı ve çözeltide işlenmiş güneş hücreleri için farklı bileşenler olarak kullanılabilirler. En umut verici yaklaşımlardan biri, organik malzemelere dayalı optoelektronik cihazlarda Per-NK' lerin katkı maddesi olarak kullanılmasıdır. Örneğin, Soltani ve arkadaşları, çeşitli yükleme miktarlarında yığın hetero-eklem yapıları (BHJ) organik güneş hücrelerine FAPbI_3 nanokristallerin eklenmesinin cihaz performansı üzerindeki etkisini incelemişler ve iyileştirilmiş akım yoğunluğu (J_{sc}) ve genişletilmiş foton hasadının elde edildiğini ortaya koymuşlardır (Soltani ve ark 2018). Organik güneş hücrelerinde kullanılan CsPbX_3 nanokristaller, geniş bir spektral absorpsiyon kapasitesine sahiptir ve güneş spektrumunun büyük bir kısmını absorbe ederek daha yüksek bir yük ayrışma verimliliği sağlar.

- **LED Uygulamaları**

Tipik bir nanokristal biçimi olan kolloidal kuantum noktaları, renk saflığı ve ayarlanabilirliği, parlak emisyonu, çözelti işlenebilirliği ve mükemmel kararlılığı nedeniyle yüksek renk kalitesine sahip aydınlatma ve görüntüleme teknolojileri için umut verici malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. İlk kuantum nokta ışık yayan diyot (QLED) cihazları CdSe nanokristallere dayalı olarak üretildiğinden beri, son 30 yılda kuantum nokta tabanlı ışık yayan cihazlarda büyük ilerleme kaydedilmiştir. Per-NK' ler, aynı zamanda LED teknolojisinde de kullanılmaktadır. Bu nanokristaller, parlak ve saf renkler üretebilme yetenekleri nedeniyle geniş bir renk gamı sunar ve bu, yüksek kaliteli LED'lerin üretimini mümkün kılar. Özellikle, kurşun (Pb) bazlı halide perovskitleri özellikle çekici olarak ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, yüksek fotoluminesans kuantum verimi (PLQY), uzun taşıyıcı difüzyon uzunluğu, yüksek yük taşıyıcı hareketliliği, yüksek kusur toleransı ve dar emisyon spektrumları ile karakterize edilen olağanüstü optoelektronik özellikleridir (Kim ve ark 2023). Organik-inorganik MAPbBr_3 Per-NK' lere dayalı ilk LED, Pérez-Prieto ve çalışma arkadaşları tarafından gösterilmiştir. Per-NK' lerden üretilen filmin PLQY'si yaklaşık %23'e ulaşsa da,

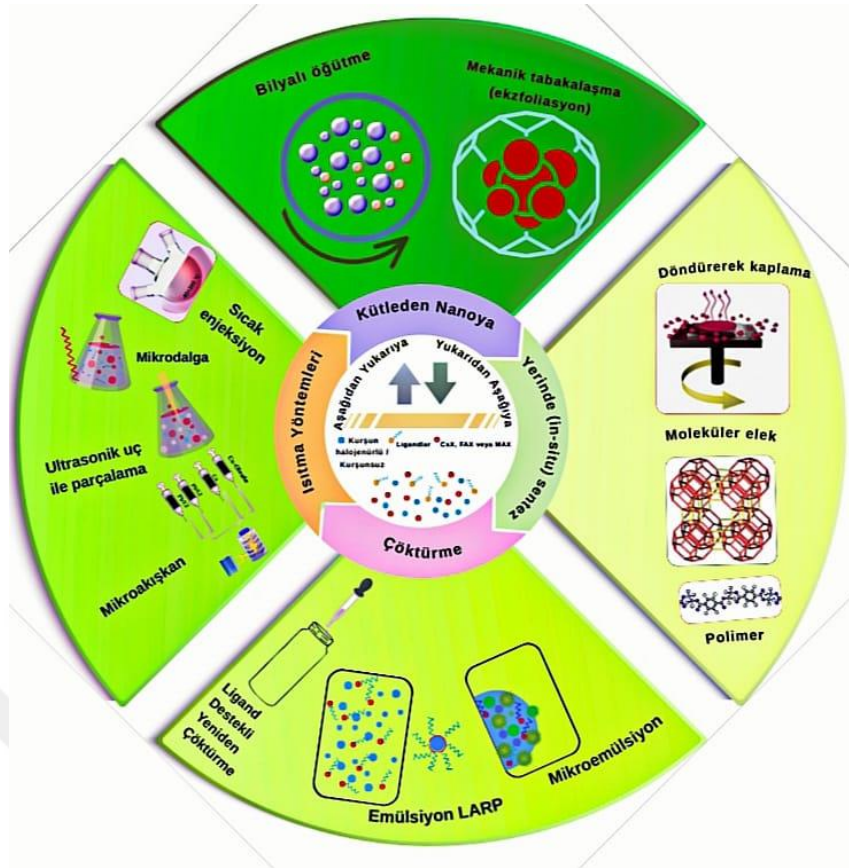
cihazların elektrolüminesans performansının oldukça düşük olduğu rapor edilmiştir (Schmidt ve ark 2014).

- ***Fotodetektör Uygulamaları***

Kurşun halojenür perovskitleri geniş bir optoelektronik uygulama yelpazesi gösterse de bu malzemelerin fotodetektörlerdeki araştırmaları diğerlerine kıyasla daha azdır ve esas olarak organik-inorganik hibrit perovskitlere odaklanmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, CsPbBr_3 ' ün tüm inorganik kurşun halojenür perovskitlerinden nispeten daha kararlı olduğundan fotoalgılama için uygun bir aday olduğu belirtilmiştir (Faheem ve ark 2020). CsPbBr_3 Per-NK' lerdeki bol yüzey ve hacim kusurlarının, cihaz performansını etkileyen yük ekstraksiyonunun verimliliğini azalttığı rapor edilmiştir (Jaramillo-Quintero ve ark 2015). Cihaz performansını iyileştirmek için çeşitli boyut ve morfolojilere sahip CsPbBr_3 Per-NK' lerdeki kusurları azaltmak için çeşitli işlemler kullanılmıştır. Amin içermeyen CsPbBr_3 tabanlı fotodetektör için yükselme/düşüş sürelerinin çok kısa olduğu gözlemlenmiştir. Per-NK fotodiyotlarındaki fazla halojenürler, yapışma tabakasındaki yük tutulması nedeniyle tepki hızını azalttığı çalışmalarda belirlenmiştir (Patra ve ark 2024).

2.4. Perovskit Nanokristallerin Sentez Yöntemleri

Perovskit nanokristallerin sentezlenmesi, malzemenin optik ve elektronik özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir süreçtir. Çeşitli sentez yöntemleri geliştirilmiş olup, bu yöntemler malzemenin boyutunu, yüzey özelliklerini ve kristal yapısını kontrol etme imkânı sunar. Halojenür Per-NK' ler, MAPbX_3 (MA, metilamonyum katyonları CH_3NH_3^+ ı temsil eder) gibi organik-inorganik hibrit perovskitler ve CsPbX_3 gibi tamamen inorganik perovskitler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Per-NK'lerin çeşitli sentetik yöntemlerin şematik genel görünümü. Bu yöntemler genel olarak "yukarıdan aşağıya" veya "aşağıdan yukarıya" olarak sınıflandırılabilir.

Metal kalkojenür koantum noktaların sentetik protokollerinden esinlenerek, sıcak enjeksiyon yöntemi ilk olarak Kovalenko ve çalışma arkadaşları tarafından sezyum kurşun halojenür (CsPbX_3 , $X = \text{Cl, Br, I}$) nanokristalleri hazırlamak için kullanılmıştır (Protesescu ve ark 2015). Sezyum tuzları önce Cs-oleata dönüştürülmüş ve sonra yüksek sıcaklıkta ($140\text{--}200^\circ\text{C}$) oktadesilene bir kurşun halojenürle reaksiyona sokulmuştur. Kurşun öncüllerini ve sentezlenen nanokristalleri stabilize etmek için eşit miktarda oleil amin ve oleik asit eklenmiştir. Saf kübik kristal form TEM görüntüleri ile ortaya çıkarıldı ve tipik üçlü ve karışık halojenür nanokristaller için XRD desenleri ile doğrulanmıştır. İyi faz saflığı, kübik fazın bastırıldığı yüksek reaksiyon sıcaklığına atfedilmiştir. Ayrıca, nanokristallerin boyutu sıcaklık kontrolü ile 5 ile 14 nm arasında ayarlanabilmektedir. Sezyum kurşun halojenür nanokristal serisi, %90'a kadar yüksek kuantum verimi, 12-42 nm dar emisyon hat genişliği ve geniş renk gamı göstermiştir (Stoumpos ve ark 2013).

Farklı bir çalışmada, Zeng ve çalışma arkadaşları oda sıcaklığında tüm inorganik CsPbX_3 Per-NK' leri farklı bir yöntemle sentezlemişlerdir. Hibrit perovskit kuantum nokta sentezinde ligant destekli yeniden çöktürme (LARP) yönteminden esinlenerek, basitçe sezyum halojenürü, kurşun halojenürü dimetil formamit (DMF) veya dimetilsülfoksit (DMSO)'da karıştırmışlardır. Öncü çözelti daha sonra oleik asit ve oleil amin eklenerek stabilize edilmiştir. İnorganik perovskit CsPbX_3 NK' lerin, öncül çözeltinin toluene enjekte edilmesinden 10 saniye sonra oluştuğu rapor edilmiştir. İlginç bir şekilde, oda sıcaklığında oluşmasına rağmen, elde edilen nanokristaller yüksek sıcaklıkta hazırlananlara benzer şekilde %95'e kadar son derece yüksek PLQY sergilemişlerdir (Aharon ve Etgar 2016). CsPbX_3 nanokristallerin TEM şekline yakından bakıldığında, oda sıcaklığında hazırlanan numuneler, yığın malzemelerde düşük sıcaklıkta kararlı olan saf monoklinik faz sergilediği rapor edilmiştir. Pan ve çalışma arkadaşları daha sonra capping ligandlarını optimize etmişlerdir. Bu çalışmada sezyum ve kurşun önce polar olmayan çözücüde çeşitli yağ asitleri tarafından şelatlanmış ve bu öncül çözeltilerin halojenür kaynağı ile karıştırılması, kübik faza sahip perovskit kuantum noktaların oluşumuna yol açmıştır. Dahası, sentez yaklaşımı, ürünlerin kalitesinden ödün vermeden gram ölçeğine genişletilebilmiştir (Wei ve ark 2016).

2.5. Organik Güneş Hücreleri

Organik güneş hücreleri (OGH'leri), organik materyaller kullanılarak üretilen ve güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren cihazlardır. Bu tür hücreler, özellikle organik yarı iletken malzemelerin kullanımına dayanır ve genellikle esnek, hafif ve düşük maliyetli üretim avantajlarına sahiptir. Organik güneş hücreleri genellikle üç ana katmandan oluşur:

Üst Elektrot (Şeffaf Anot): Genellikle indiyum kalay oksit (ITO) gibi şeffaf iletken oksitlerden yapılır. Bu katman, güneş ışığının aktif tabakaya ulaşmasını sağlar ve elektronların hücreye girişini mümkün kılar.

Aktif Tabaka: Bu katman, organik yarı iletken malzemelerden oluşur ve güneş ışığını emerek enerjiye dönüştürür. Genellikle bir organik polimer (örneğin, P3HT) ve bir fulleren (örneğin, PCBM) karışımı kullanılır.

Alt Elektrot (Arka Elektrot): Genellikle alüminyum (Al) gibi metallerden yapılır ve cihazın devresini tamamlar. Elektronların çıkışını sağlar ve elektrot ile aktif tabaka arasındaki temas sağlar. Brabec ve arkadaşları (2001), organik güneş hücrelerinin yapısının ve kullanılan materyallerin, cihazın performansını doğrudan etkilediğini rapor etmiştir. Bu çalışma, çeşitli organik materyallerin güneş hücrelerindeki etkilerini inceleyerek, ideal yapıların belirlenmesine katkı sağlamıştır.

2.5.1. Çalışma Prensipleri

Organik güneş hücreleri, güneş ışığını elektriğe dönüştürme sürecinde birkaç aşamadan geçer:

Işık Emme ve Yük Ayırıştırma: Güneş ışığı, aktif tabakadaki organik yarı iletken materyallere çarptığında, enerji fotonlardan elektronlara aktarılır. Bu elektronlar, aktif tabakadaki enerji seviyeleri aracılığıyla serbest hale gelir ve deliklerle birleşir.

Yük Taşıma: Serbest elektronlar ve delikler, aktif tabakadan üst ve alt elektrotlara yönlendirilir. Bu yük taşıma süreci, organik yarı iletkenlerin verimliliğine bağlıdır. İyi bir organik yarı iletken, yük taşıma özelliklerini optimize eder ve verimliliği artırır.

Elektriksel Akım Üretimi: Elektronlar ve delikler elektrotlar arasında hareket ederken, bir elektrik akımı oluşur. Bu akım, dış bir devreye yönlendirilir ve elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Heeger ve arkadaşları (2008), organik güneş hücrelerinin çalışma prensiplerini detaylandırmış ve bu hücrelerde kullanılan organik yarı iletkenlerin, fotonlardan yük taşıma ve ayırıştırma yeteneklerini etkilediğini vurgulamıştır. Bu çalışma, organik güneş hücrelerinin verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmesine yardımcı olmuştur.

2.5.2. Verimlilik ve performans faktörleri

Organik güneş hücrelerinin verimliliği, kullanılan organik materyallerin özelliklerine, yapı tasarımına ve üretim sürecine bağlıdır. Performans faktörleri arasında optik absorpsiyon, yük taşıma verimliliği ve elektrot temas kalitesi bulunmaktadır. Organik güneş hücrelerinin performansını artırmak için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında, aktif tabakada kullanılan materyallerin optimizasyonu ve elektrot

tasarımının iyileştirilmesi bulunmaktadır. Çalışma, organik güneş hücrelerinin verimliliğini artırmak için önemli bilgiler sunmuştur.

2.6. Perovskit Nanokristallerin Organik Güneş Hücrelerindeki Rolü

Perovskit kuantum noktalar, organik güneş hücrelerinde kullanılan aktif materyaller olarak son yıllarda büyük bir ilgi görmüştür. Bu nanokristaller, organik güneş hücrelerinin verimliliğini ve performansını artırmada önemli bir rol oynamaktadır.

- ***Işık Absorpsiyonu ve Fotovoltaik Performans***

Perovskit kuantum noktalar, organik güneş hücrelerinde geniş bir ışık spektrumunda yüksek ışık absorpsiyonu sağlar. Bu özellik, güneş ışığının etkin bir şekilde emilmesine ve dönüştürülmesine yardımcı olur. Snaith ve arkadaşları (2014), perovskit nanokristallerin geniş bant aralığı ve yüksek ışık emme kapasitesinin, güneş hücrelerinin performansını önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir.

- ***Elektron ve Delik Taşıma***

Perovskit kuantum noktalar, yük taşıma özellikleri sayesinde organik güneş hücrelerinin verimliliğini artırabilir. Bu nanokristaller, elektron ve deliklerin ayrıştırılmasını ve taşınmasını optimize ederek daha yüksek verimlilik sağlar. Chen ve arkadaşları (2015), CsPbBr_3 perovskit kuantum noktaların, elektron ve delik taşıma verimliliğini artırarak güneş hücrelerinin performansını geliştirdiğini rapor etmiştir.

- ***Stabilite ve Dayanıklılık***

Perovskit kuantum noktalar, organik güneş hücrelerinin stabilitesini ve dayanıklılığını artırabilir. Bu nanokristaller, atmosfer koşullarına karşı direnç sağlar ve hücrelerin ömrünü uzatır. Kojima ve arkadaşları (2009), organik-inorganik perovskit malzemelerinin, özellikle CsPbX_3 ($X=\text{Cl, Br, I}$) kuantum noktaların, organik güneş hücrelerinde uzun ömür ve yüksek stabilite sağladığını göstermiştir. Çalışma, bu kuantum noktalarının çevresel koşullara karşı dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını incelemiştir.

- ***Katman Yapısının Optimizasyonu***

Perovskit kuantum noktaların organik güneş hücrelerindeki rolü, hücrelerin katman yapısının optimizasyonunda da belirgindir. Bu nanokristaller, çeşitli katmanlarda kullanılarak güneş hücrelerinin genel performansını artırabilir. Gao ve arkadaşları (2016), perovskit kuantum noktaların organik güneş hücrelerindeki katman yapısını nasıl etkilediğini ve hücre verimliliğini nasıl artırdığını araştırmıştır.

2.7. Perovskit Malzemelerinin Kararlılığı ve Zorlukları

Perovskit malzemelerin kararlılığı ve performansını etkileyen çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Perovskit malzemeleri, güneş hücrelerinde yüksek verimlilik sağlayabilir ancak uzun vadeli kararlılıkları hala bir sorun teşkil etmektedir. Çevresel faktörler, bu malzemelerin kararlılığını etkileyebilir. Perovskitler, nem ve oksijen gibi çevresel etmenlere karşı hassas olabilir. Bu etmenler, malzemelerin bozulmasına ve performans kaybına neden olabilir (Yang ve arkadaşları, 2015). Perovskit malzemeler, yüksek sıcaklıklara karşı da hassas olabilir. Termal stabilite, malzemelerin uzun süreli performansını etkileyebilir.

Perovskiti oluşturan bileşenler malzemelerin kararlılıklarını ve performanslarını da etkileyebilmektedir. Safılık ve malzeme karışımları, bu malzemelerin kalitesini ve uzun ömürlülüğünü belirler. Saf olmayan malzemeler, hücrelerin verimliliğini ve kararlılığını azaltabilir.

Perovskit malzemelerin üretimi de çeşitli zorluklar barındırabilir. Bu zorluklar, malzemelerin kalitesini ve üretim sürecini etkileyebilir. Üretim süreci karmaşık olabilir ve kontrol edilmesi zor olabilir. Üretim sürecindeki değişkenlikler, malzemelerin kalitesini etkileyebilir. Perovskit malzemelerin üretim maliyetleri ve ölçeklenebilirlik sorunları da mevcuttur. Bu, endüstriyel üretim ve ticari uygulamalar açısından önemli bir faktördür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, perovskit nanokristallerin (Per-NK) sentezi ve organik güneş hücrelerinin (OGH) üretim süreci ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1. Araştırma Yöntemi ve Tasarımı

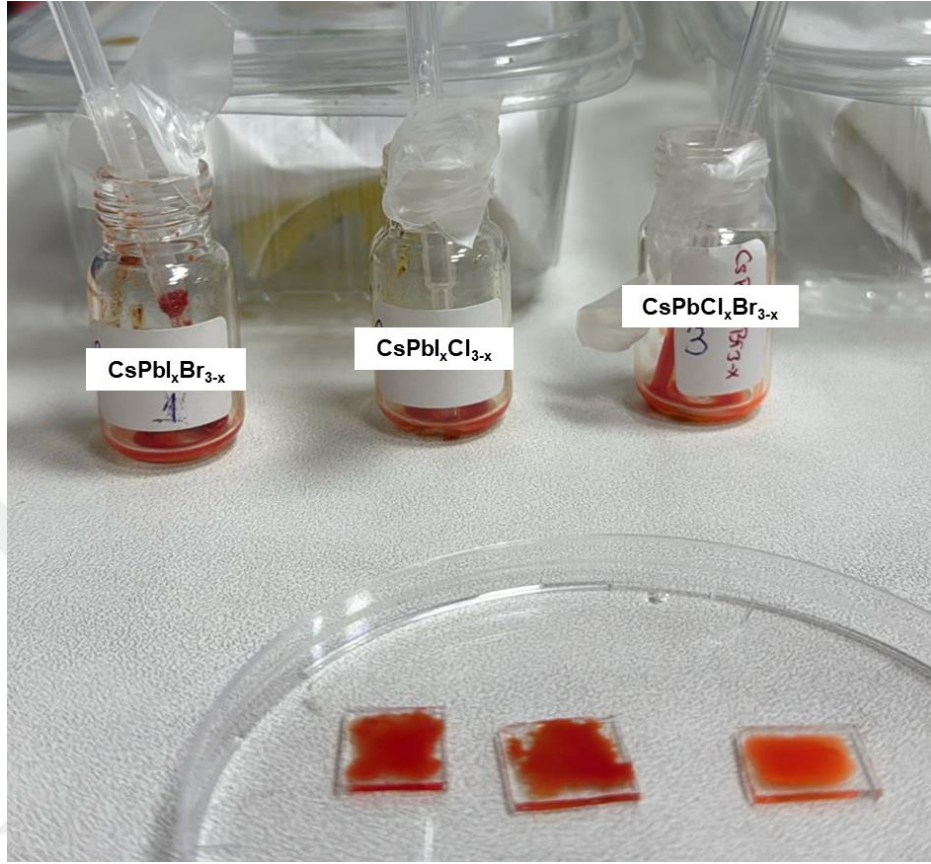
Araştırma, LARP yöntemi kullanılarak sentezlenen Per-NK' ların detaylı karakterizasyonunu ve organik güneş hücrelerine entegre edilmesini kapsamaktadır. Farklı bileşimlere sahip 3 farklı Per-NK katkıları ile oluşturulan OGH' lerinin performans ve karakterizasyonları incelenmiştir.

3.1.1 Perovskit nanokristallerin (Per-NK) sentezi

Bu çalışmada kullanılan $\text{CsPbX}_x\text{Y}_{3-x}$ ($X, Y = \text{Cl, Br, I}$) bazlı perovskit nanokristaller, literatürde yer alan yöntemler esas alınarak optimize edilmiş bir protokol ile sentezlenmiştir. Sentez işlemine başlamadan önce 0,1 mmol Cs_2CO_3 (Sigma-Aldrich, %99 saflıkta) 10 mL oktadesen (veya mineral yağ, Merck), 0,5 mL oleik asit (Merck, $\geq 99\%$) ve 0,5 mL oleil amin (Sigma-Aldrich, $\geq 98\%$) içeren bir ortamda çözülerek, 50°C sıcaklıkta manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen karıştırılmış ve böylece sezyum oleat kompleksi oluşumu sağlanmıştır. Bu çözeltinin üzerine 0,15 mmol PbX_2 ve 0,15 mmol PbY_2 ($X, Y = \text{Cl, Br, I}$) eklenerek karışım tamamlanmıştır. Oluşan sistem manyetik karıştırma ile homojen hale getirildikten sonra, 30 W gücündeki bir ultrasonik prob cihazı (Sonopuls HD 3100, Bandelin) yardımıyla 10 dakika süreyle sonikasyon uygulanmıştır. Reaksiyonun ilerleyişi, karışım renginin değişmesiyle gözlemlenmiş ve sırasıyla $\text{CsPbBr}_x\text{Cl}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbBr}_x\text{I}_{3-x}$ oluşumlarında renk geçişleri sırasıyla sarıdan açık kahverengiye, turuncudan açık pembeye ve koyu turuncudan koyu pembeye gözlenmiştir.

Reaksiyonun ardından oluşan kuantum noktaların saflaştırılması için karışım 6500 rpm'de 10 dakika santrifüjlenmiştir. Elde edilen çökelti yaklaşık 3-5 mL hekzan içinde hafif sonikasyonla yeniden dağıtılarak büyük boyutlu partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla ikinci kez 2000 rpm'de santrifüj uygulanmıştır. UV ışık altında, elde edilen dispersiyonun floresans emisyonunun güçlü olduğu gözlemlenmiş, bu da büyük parçacıklardan arındırılmış kuantum noktaların varlığına işaret etmiştir.

Son adımda, Per-NK'lar 50°C'de kurutulmuş ve ışık etkisinden korunması amacıyla +4°C'de karanlık ortamda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.1. Sentezlenen Per-NK' ler.

3.2. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

3.2.1 Organik güneş hücresi üretimi

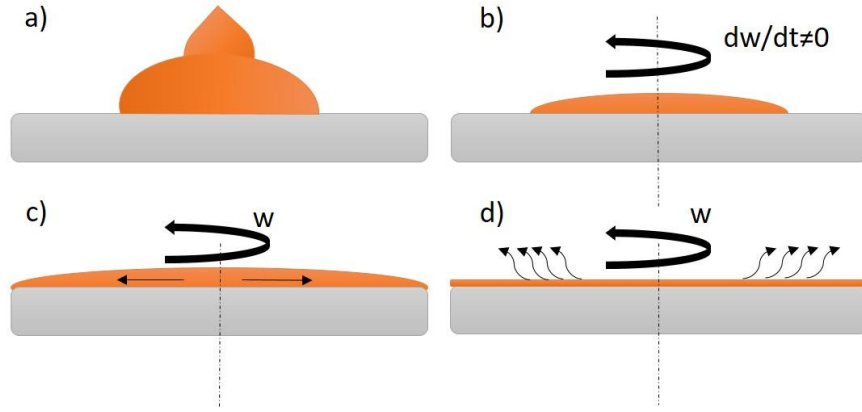
İndiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam alt tabakalar (15 Ω /sq yüzey direncine sahip) sırasıyla seyreltilmiş Hellmanex çözeltisi (Hellmanex® III, Hellma), deiyonize su, aseton ve izopropil alkol içinde her biri 15 dakika süreyle ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Kurutma işlemi azot gazı akışıyla gerçekleştirilmiş, ardından yüzeydeki organik kalıntıları uzaklaştırmak ve yüzey enerjisini artırmak amacıyla 5 dakika süreyle oksijen plazma işlemi (Diener Plasma System Femto, Şekil 3.2) uygulanmıştır. Plazma temizliği, iyonize bir gaz olan plazmanın kullanıldığı ve yüzeydeki organik kalıntıların giderilmesini amaçlayan bir işlemdir. Genellikle vakum altında gerçekleştirilen bu yöntemde, oksijen, azot, hidrojen ya da argon gibi gazlar plazma hâline getirilerek

kullanılır. Kullanılan gaz türüne bağlı olarak yüzeye farklı özellikler kazandırmak da mümkün olmaktadır.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan O₂ plazma sistemi.

Temizlenmiş yüzeylere, boşluk iletim tabakası olarak 60 nm kalınlığında PEDOT:PSS çözeltisi 2000 rpm’de 60 saniye döndürülerek kaplanmış ve ardından 120°C’de 30 dakika tavlammıştır. Aktif katman çözeltisi ise, 25 mg poli(3-heksiltiyofen-2,5-diyl) (P3HT, Sigma-Aldrich) ve 15 mg (6,6)-fenil C₆₁ bütirik asit metil esterinin (PCBM, Lumtec), 1 mL klorobenzen/kloroform karışımında (1:1, v/v) çözülmesiyle hazırlanmıştır. Bu çözeltiye %1 oranında (10 mg/mL) Per-NK koloidal çözeltileri eklenmiştir. Elde edilen çözelti 200 nm kalınlığında bir film oluşturacak şekilde ITO/PEDOT:PSS alt tabakaları üzerine 2000 rpm’de 60 saniye döndürülerek kaplanmış, sonrasında tekrar 120°C’de 30 dakika tavlammıştır.

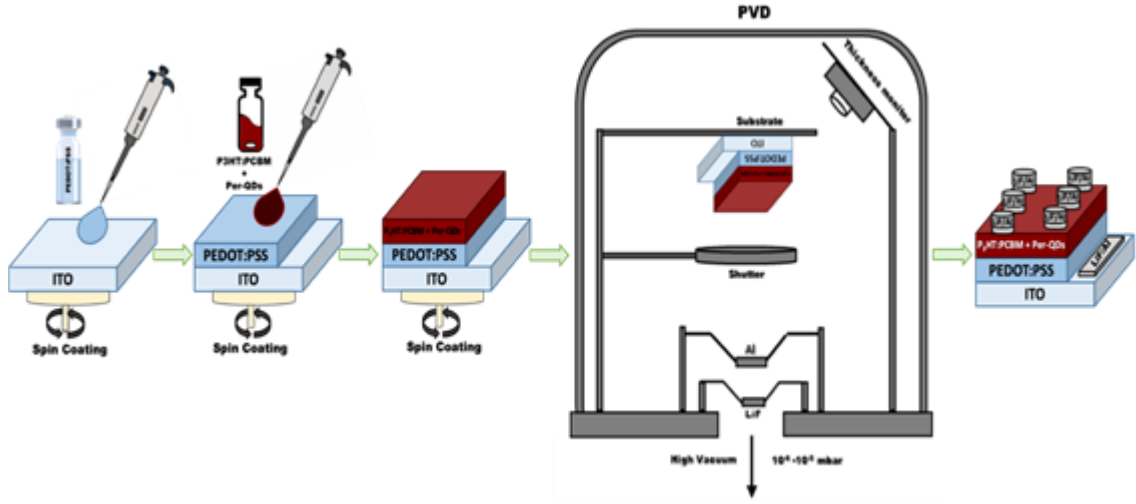


Şekil 3.3. Spin-kaplama yönteminin dört temel basamağı (Tyona 2013).



Şekil 3.4. İnce filmlerin hazırlanmasında kullanılan spin-kaplama sistemi ve kaplanan ince filmler.

Şekil 3.5’de, üretilen organik güneş hücresine ait şematik yapı sunulmuştur. Katman dizilimini tamamlamak üzere, 2 nm kalınlığında LiF ve 100 nm kalınlığında Al tabakaları fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma sırasında maske kullanılarak 0,023 cm² aktif alan elde edilmiştir (Şekil 3.6).



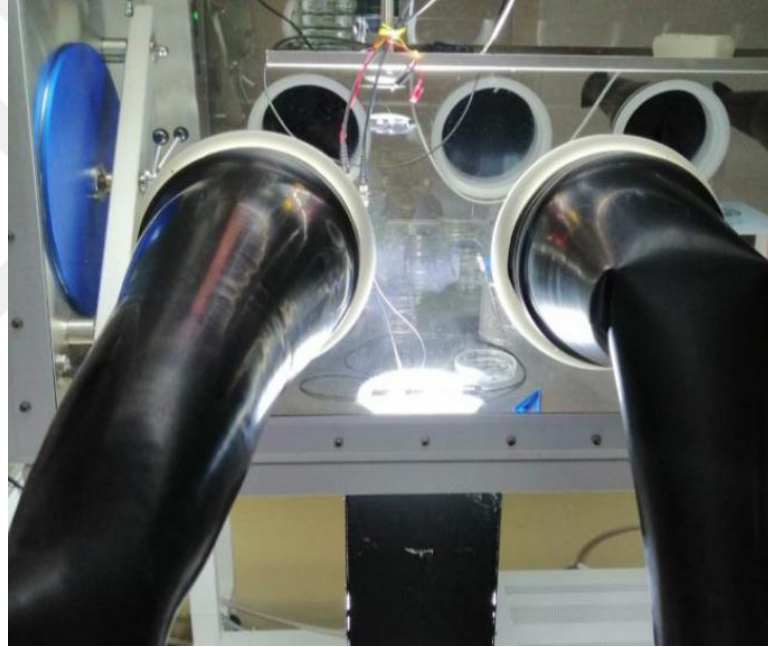
Şekil 3.5. Per-NK ile hazırlanmış olan organik güneş hücrelerine ait şematik gösterim.



Şekil 3.6. Fiziksel buhar biriktirme sistemi.

3.3. Karakterizasyon Yöntemleri

Per-NK' lerin ve ince film örneklerinin spektral absorpsiyon özellikleri UV-Görünür (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopisi (Biochrom Libra S22) ile belirlenmiştir. Kristalografik özellikleri ise X-ışınları difraktometresi (Bruker Advance D8) ile belirlenmiştir. Per-NK' lerin ve ince film örneklerinin yapısal değişimlerinin ve yüzey fonksiyonel grupların belirlenmesinde Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR Thermo Scientific, Nicolet 380) tekniği kullanılmıştır. Hücrelerin fotovolttaik performansı, oda sıcaklığında, Keithley 2400 kaynak ölçüm cihazı ve AM 1.5 spektrumuna sahip güneş simülatörü (MBraun M200, ATLAS, 100 mW/cm²) kullanılarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Güneş simülatörü.

Güneş hücresinin performansını değerlendirmede en önemli kriter, enerji dönüşüm verimidir. “ η ” ile gösterilen bu verim, Denklem 1.1’deki formül yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemde P_m , güneş pili tarafından sağlanan maksimum elektriksel gücü, P_{in} ise pil yüzeyine gelen ışımsal gücü ifade eder.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (1.1)$$

Güneş hücrelerinin verimliliğini etkileyen önemli parametrelerden biri açık devre voltajı olup, V_{oc} ile simgelenir. V_{oc} , hücreden geçen akımın sıfır olduğu durumda ölçülen gerilimdir. Bir diğer temel parametre ise kısa devre akımıdır ve J_{sc} ile gösterilir. J_{sc} , hücrenin uçları arasında voltaj uygulanmadığında (yani sıfır voltaj durumunda) ışık altında ölçülen akımı ifade eder. Seri direnç göz ardı edildiğinde, bu akım ışık tarafından oluşturulan akıma eşittir ve ışık şiddeti ile doğru orantılıdır. Güneş hücresi verimliliğinin hesaplanmasında dikkate alınan bir diğer unsur ise doyma faktörü ya da doluluk faktörüdür. FF (Fill Factor) olarak kısaltılan bu değer, güneş pilinden elde edilen maksimum gücün, V_{oc} ve J_{sc} değerlerine göre oranlanmasıyla tanımlanır.

$$FF = \frac{P_m}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (1.2)$$

Maksimum güç, belirli bir ışık altında, bir yükten geçen akım ve gerilimin çarpımının en büyük olduğu durumu ifade eder.

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (1.3)$$

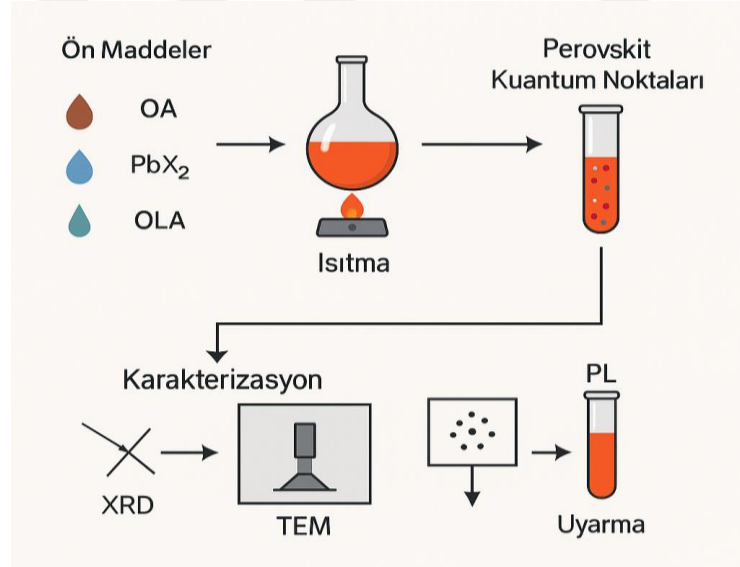
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_m \times V_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad \text{yani} \quad \eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (1.4)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, sentezlenen perovskit kuantum noktalarının (Per-NK) yapısal ve optik özellikleri ile bunların organik güneş hücreleri (OGH) üzerindeki etkileri ele alınmış, sonuçlar literatürdeki verilerle karşılaştırılmış ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur. İnorganik yapıya sahip olan CsPbX_3 ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) tipi perovskit nanokristaller, yüksek fotoluminesans kuantum verimi, ayarlanabilir bant yapısı ve dar bant emisyon gibi optik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu özellikler, Per-NK' ları optoelektronik cihazlar için uygun hale getirmektedir. Bu bağlamda, ligand destekli yeniden çöktürme yöntemi kullanılarak sentezlenen farklı bileşimlerdeki 3 farklı Per-NK' lar, P3HT:PCBM aktif katman karışımına katkılanmış ve ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM:Per-NK/LiF/Al konfigürasyonunda OGH' leri üretilmiştir.

4.1. Perovskit Nanokristallerin Sentezi ve Karakterizasyonu

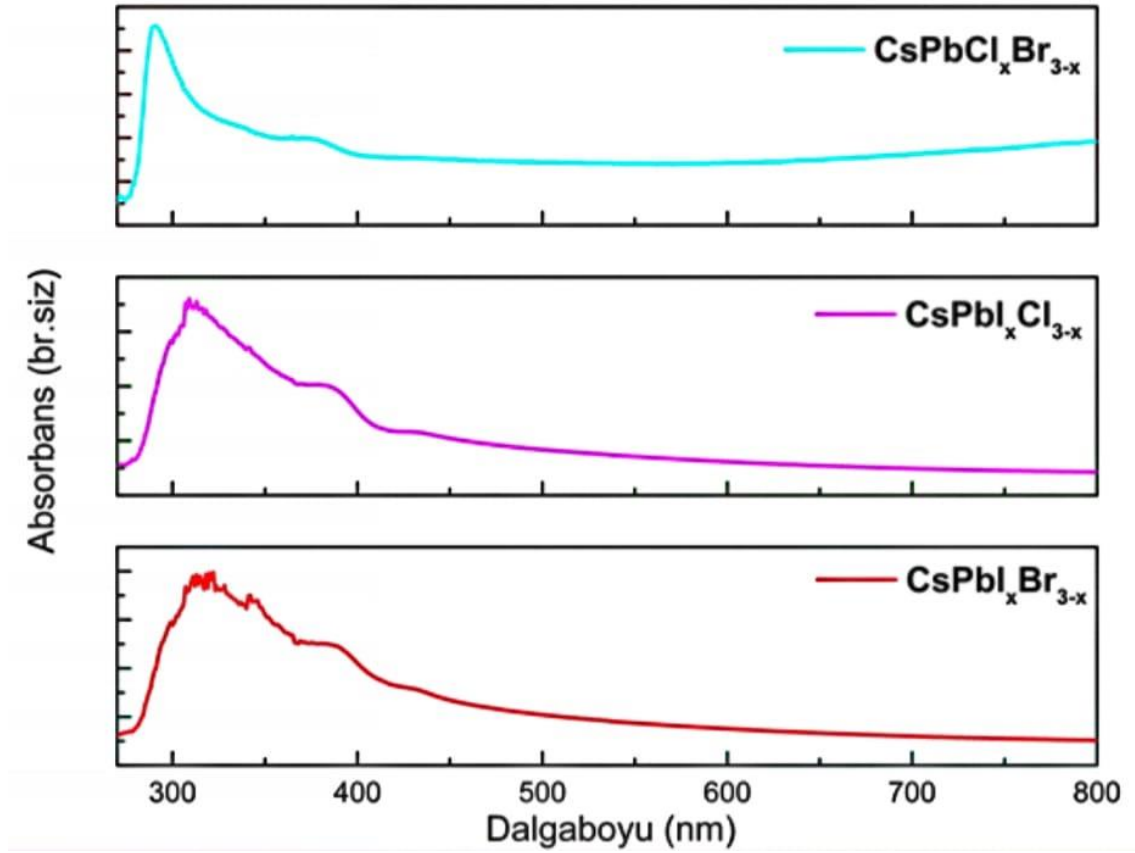
Şekil 4.1' de $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ nanokristallerinin sentezinde uygulanan yol şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Per-NK' ların Sentezi ve Karakterizasyonu

Sentezlenen $\text{CsPbX}_x\text{Y}_{3-x}$ ($X, Y = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) bazlı Per-NK' lerin optik özellikleri UV-Görünür (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Şekil 4.2'de sunulan spektrumlar, her bir halojen kombinasyonunun karakteristik emilim

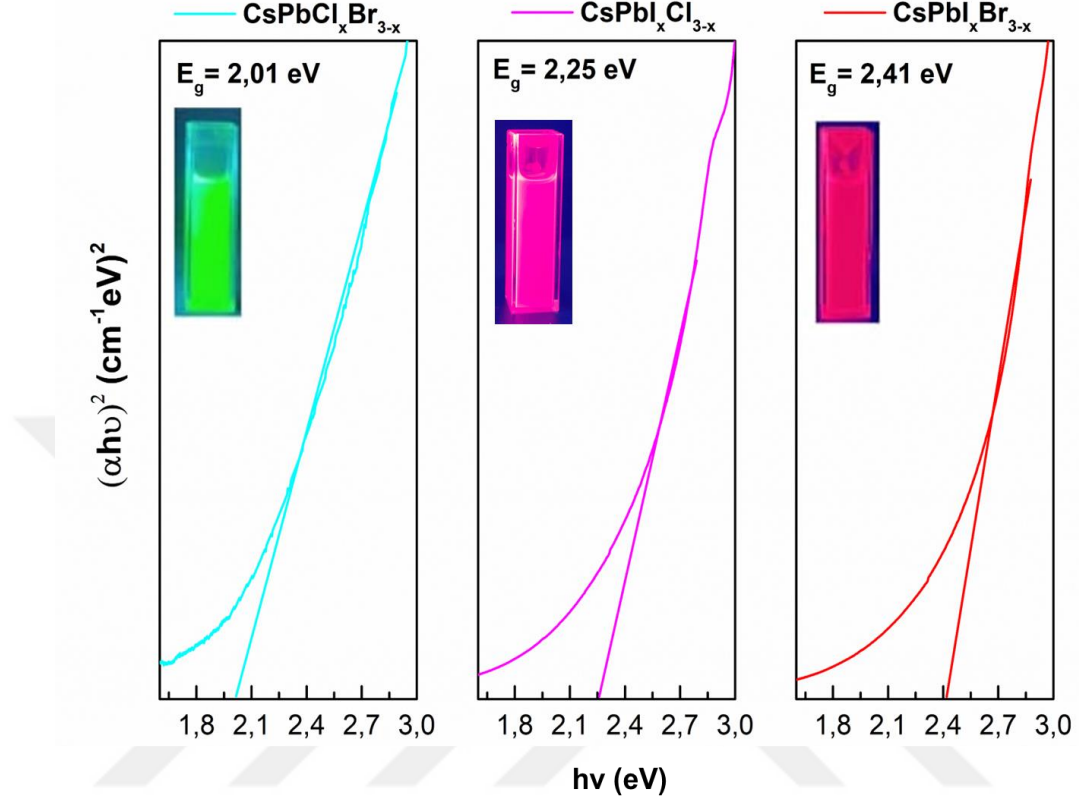
maksimumlarını ortaya koymuştur. Sezyum kurşun halojenür nanokristallerin absorpsiyon yoğunluğu halojenür içeriğine, sentez parametrelerine veya yönteme bağlı olarak değiştiğinden, en yüksek absorpsiyon $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ 'te gözlenmiştir. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ için sırasıyla absorpsiyon pik pozisyonları sırasıyla 290, 311 ve 319 nm olarak belirlenmiştir. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ ile $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ kıyaslandığında yapıda klor ve iyot yer değiştirdiğinde önemli bir kırmızıya kayma görülmektedir. Literatür ile karşılaştırıldığında absorpsiyon pik değerlerindeki değişikliklerin uygun olduğu görülmektedir (Knezevic ve ark 2023).



Şekil 4.2. Per-NK'lerin UV-Vis absorpsiyon spektrumları.

Ayrıca, UV ışık altında gözlemlenen fotoluminesans emisyonları da parçacıkların başarıyla sentezlendiğini ve çözeltide kararlı bir şekilde dağılmış olduğunu göstermiştir. Gözlemlenen renk değişimleri – örneğin $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ için sarıdan açık kahverengiye, $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ için turuncudan koyu pembeye – halojen iyonlarının kuantum noktalarının bant aralığı üzerindeki doğrudan etkisini

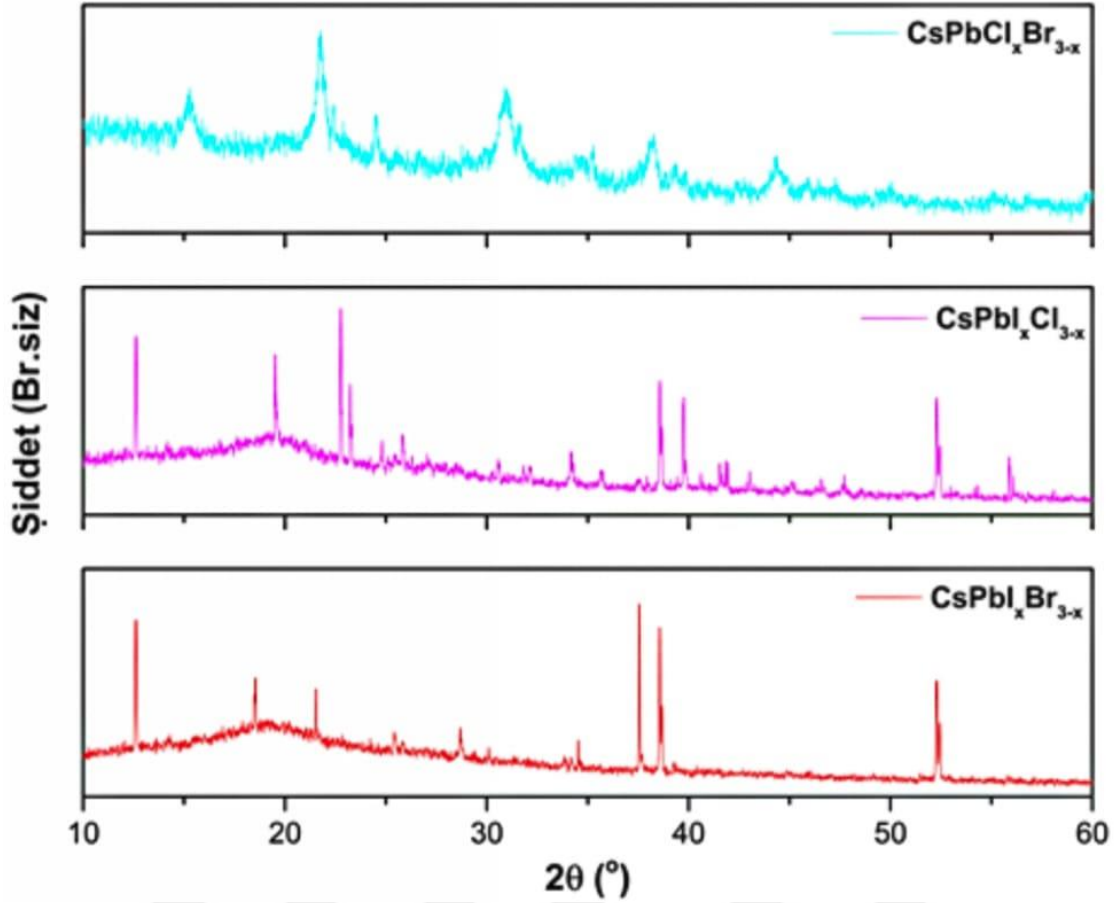
doğrulamaktadır. Bu nedenle, CsPbX₃ nanokristaller optoelektronik cihazlar için fotoindüklenmiş yük ayırmada kullanılmak üzere iyi adaylardır.



Şekil 4.3. Per-NK'lerin Tauc grafikleri.

Ek olarak, Per-NK katkısının bant yapısı üzerindeki etkilerini incelemek adına UV-Vis spektroskopisi ile optik absorbans verileri toplanmış ve Tauc yöntemiyle bant aralığı (E_g) hesaplamaları yapılmıştır. Per-NK'lerin azaltılmış delik ve elektron tuzak durumları ve bant aralıklarının ayarlanabilirliği mükemmel yük transfer özellikleri sağlar. $(\alpha h\nu) = \beta(h\nu - E_g)^n$ bağıntısına göre, burada α soğurma katsayısı, $h\nu$ foton enerjisi, β bir sabit ve $n = 2$ doğrudan bant aralığı için geçiş modu güç faktörüdür. Grafikteki doğrusal bölgenin x-eksenini kestiği nokta E_g değerini vermektedir. Bant aralıkları enerjisi Şekil 4.3'te CsPbCl_xBr_{3-x}, CsPbI_xCl_{3-x} ve CsPbI_xBr_{3-x} için sırasıyla 2,01, 2,25 ve 2,41 eV olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler literatür ile uyumludur (Liu ve ark 2021, Knezevic ve ark 2023). Daha küçük bant aralıkları daha etkili güneş enerjisi yakalama yeteneği anlamına gelebilmektedir. Bu nedenle güneş hücresi uygulamalarında daha yüksek bir elektron-boşluk çifti oluşumu sağlayabilmektedir. Sonuç olarak, verimlilikte iyileşme sağlanabilir.

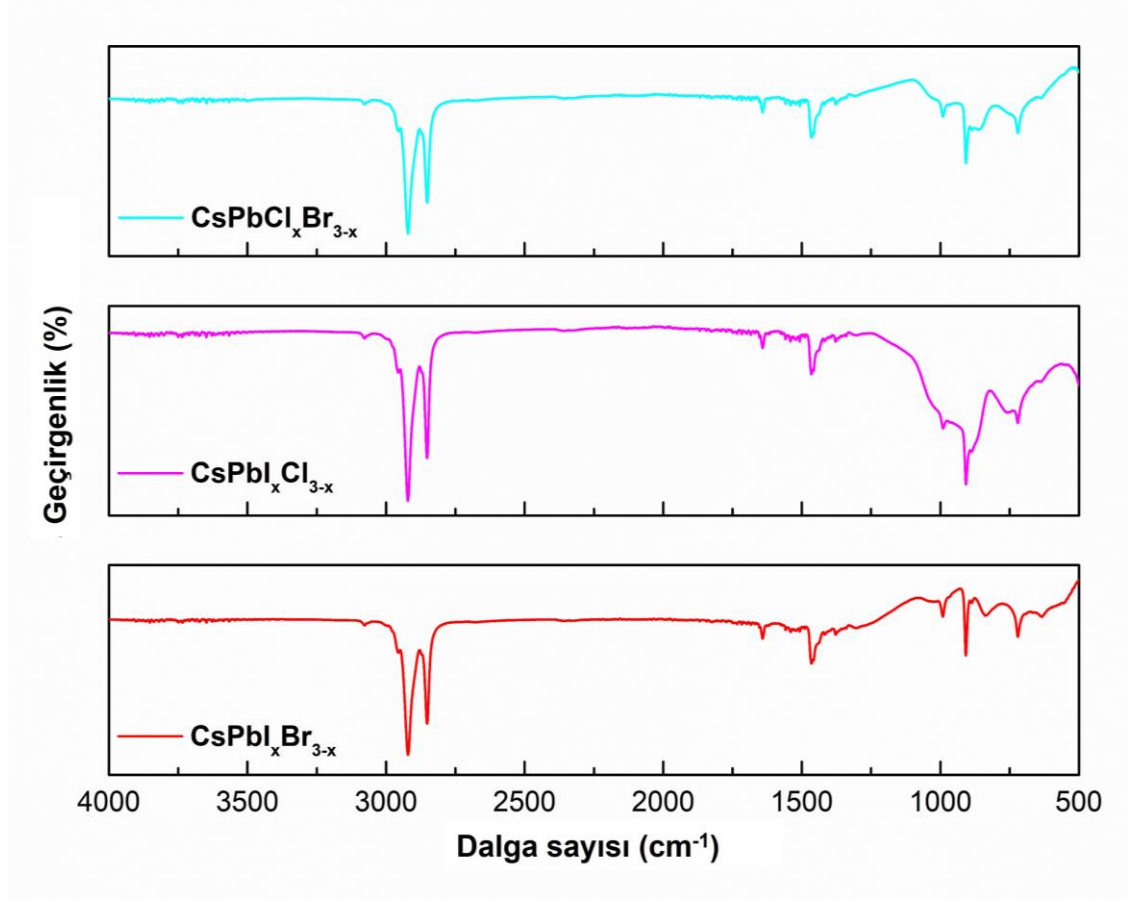
Şekil 4.4' te Per-NK' lerin XRD desenleri verilmiştir. Per-NK' ler doğası gereği oldukça kristalin yapıda olduğu açıktır. XRD desenleri, tüm numunelerin tipik kübik faza uyduğunu ortaya koymaktadır. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ nanokristallerinde $15,2^\circ$, $21,7^\circ$, $24,5^\circ$, $31,0^\circ$, $35,1^\circ$, $39,2^\circ$, $44,4^\circ$, $45,8^\circ$, $49,9^\circ$, $55,4^\circ$ ve $59,5^\circ$ deki karakteristik tepeler sırasıyla (100), (110), (111), (200), (210), (211), (220), (300), (310), (222) ve (321) kübik kristal düzlemleriyle uyumludur (Li ve ark 2025). $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ nanokristallerinin $31,1^\circ$ deki (yani (200) yansıması) XRD piki, zıt yönlerde doğru ayrılan iki tepeye ayrılır ve bu da şiddetli faz ayrımının meydana geldiğini gösterir (Wang ve ark 2024). $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ için $12,7^\circ$, $19,5^\circ$, $22,6^\circ$, $30,7^\circ$, $35,7^\circ$, $39,8^\circ$, $40,6^\circ$, $46,2^\circ$ ve $52,0^\circ$ deki karakteristik tepeler ise sentezlenen nanokristallerde klor içeriğinin yüksek olduğunu göstermektedir (Livakas ve ark 2023). $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ için verilen XRD deseninde $2\theta = 12,7^\circ$, $21,6^\circ$, $30,0^\circ$ ve $34,8^\circ$ deki karakteristik tepeler sırasıyla (100), (110), (200) ve (210) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir (Yang ve ark 2022). Bromun var olduğu her iki Per-NK için $\sim 21,5^\circ$ deki belirginleşen pikler literatür ile uyumludur (Ghaithan ve ark 2022). Dikkat çekici bir şekilde, iyot bileşimin içerisine dahil edildiğinde, karşılık gelen kırınım pikleri kademeli olarak daha küçük açılara kaymıştır. Bunun sebebinin kafes genişlemesi olduğu varsayılabilir. Çünkü iyotun iyonik yarıçapı ($2,16 \text{ Å}$) bromun ($1,96 \text{ Å}$) ve klorun ($1,81 \text{ Å}$) iyonik yarıçapından daha büyüktür (Shi ve ark 2024).



Şekil 4.4. Per-NK'lerin XRD desenleri.

LARP yöntemi ile sentezlenen Per-NK'lerin yüzey ligandlarındaki malzeme bileşiminin ve yapılarının doğrulanabilmesi için FTIR spektrumları kaydedilmiştir. Test aralığı sürekli ışığın $4000-500\text{ cm}^{-1}$ aralığıdır. Şekil 4.5' te, halojen bileşimlerinin değişimi dışında sentezde kullanılan parametrelerin aynı olmasından dolayı spektrumların oldukça benzer olduğu görülmektedir. Her üç spektrumda da yaklaşık 2920 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} bölgelerinde gözlemlenen pikler, $-\text{CH}_2$ gruplarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1468 cm^{-1} ve 1380 cm^{-1} civarında gözlemlenen pikler, $-\text{CH}_2$ bükülme titreşimleri ile birlikte $-\text{COO}^-$ (karboksilat) gruplarının titreşimlerini işaret etmektedir. Bunun yanında yaklaşık 1637 cm^{-1} civarındaki pik, $-\text{NH}_2$ gruplarının bükülme (scissoring) titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu pikler oleik asit ve oleil aminin başarıyla hidrolize olduğunu ve ligandlar olarak Per-NK' lere bağlandığını göstermektedir (Zheng ve ark 2022). İnfrared spektrumun $1200-700\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bölgesine parmak izi bölgesi denir. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ NK' lerde $740-760\text{ cm}^{-1}$ de görülen hafif yayvan bantlar $\text{C}-\text{Cl}$ gerilmesinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ NK' lerde

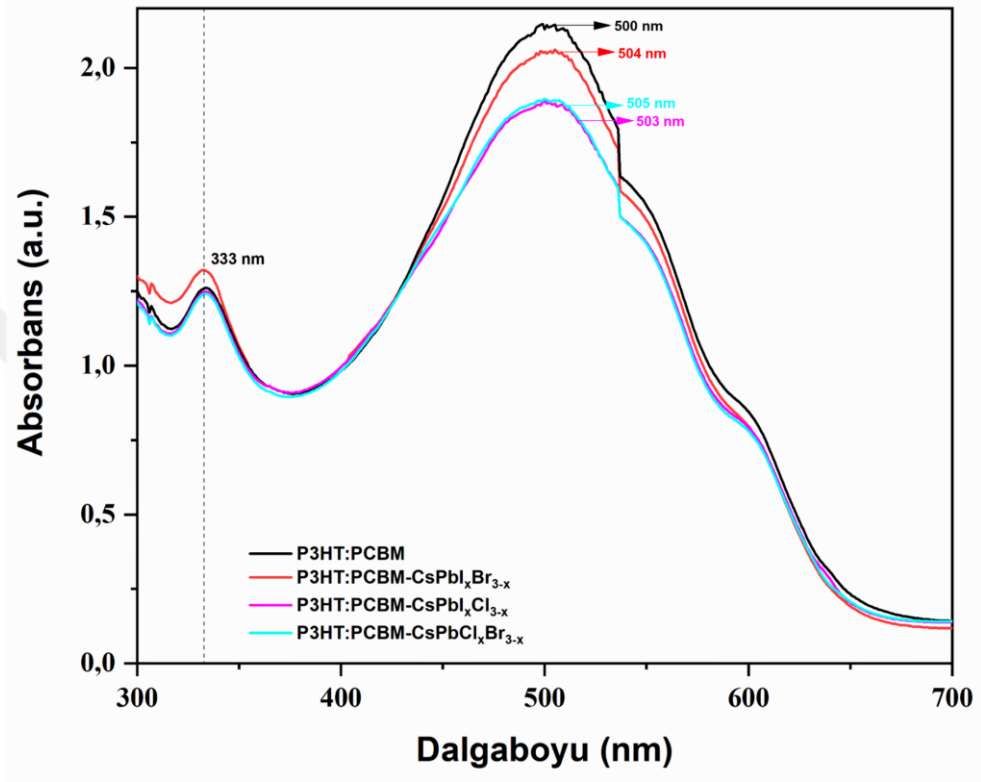
800-830 cm^{-1} ' de görülen fazladan yayvan bantlar C–Br gerilmesini işaret etmektedir (Bhoyate ve ark 2018). FTIR ve XRD sonuçlarına bakıldığında hedeflenen yapıların sentezlendiği görülmektedir.



Şekil 4.5. Per-NK'lerin IR spektrumları.

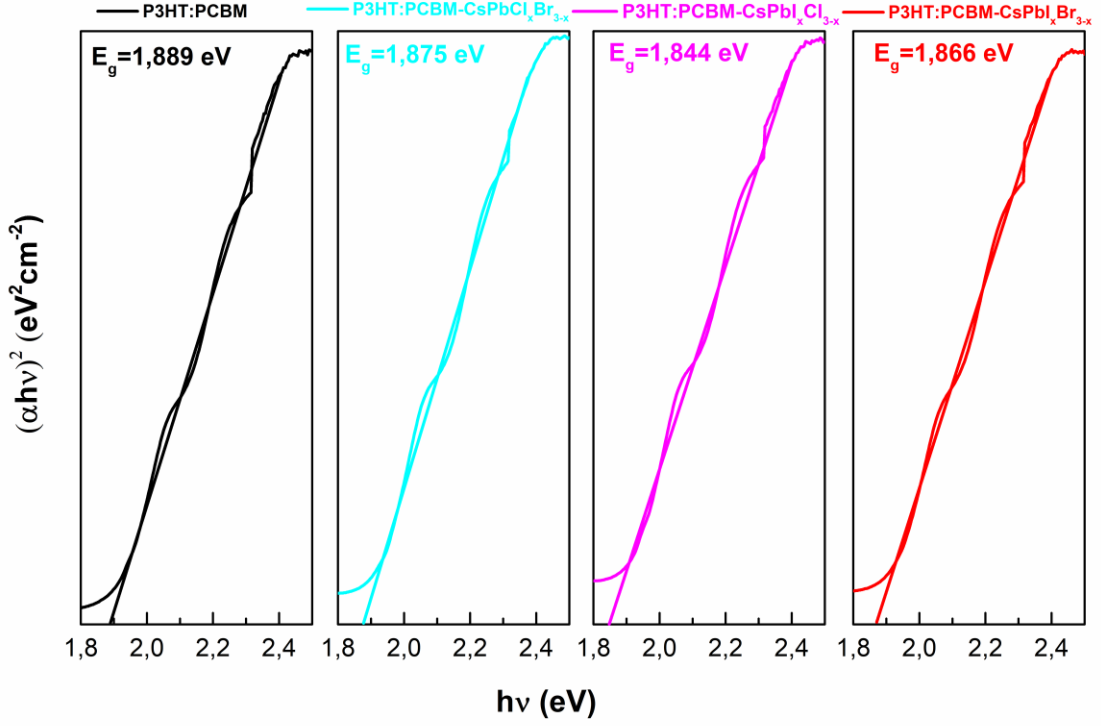
Üretilen P3HT:PCBM tabanlı organik güneş hücreleri, farklı perovskit nanokristalleri katkı oranlarıyla test edilmiştir. En uygun katkı oranı %1 (ağırlıkça) olarak belirlenmiş ve bu katkı seviyesiyle cihazlarda anlamlı performans artışları elde edilmiştir. Katkısız ve Per-NK katkılanmış P3HT:PCBM ince filmlerin UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumları da sentezlenen nanokristallerin ince film optik ve elektriksel özelliklerinin aydınlatılması için kaydedilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.6' da verilmiştir. 333 nm'de PCBM absorpsiyonuna bağlı bir pik görülürken, PCBM absorpsiyonuna bağlı 333 nm'de bir pik görünmesinin yanı sıra 560 nm ve 600 nm civarında iki omuz ile yaklaşık 500-505 nm'de geniş pikin olduğu iki ana absorpsiyon piki vardır. Bu absorpsiyon pik omuzları sırasıyla katı haldeki konjugasyona ve P3HT'nin zincirler arası Π - Π istiflenmesine karşılık gelmektedir (Liu ve ark 2010).

Hem PCBM hem de P3HT ile ilgili genişleyen absorpsiyon bandı yoğunlukları, polimer karışım filminin gelişmiş kristalleşme ve organizasyon yeteneğine bağlı olabilir. Bunların yanı sıra P3HT'nin pik pozisyonları halojenür tipine bağlı olarak yaklaşık 500 nm'den 505 nm'ye hafifçe kırmızıya kaymıştır, bu da daha verimli Π - Π^* istiflemesine ve gelişmiş Π - Π^* geçişine atfedilebilir.



Şekil 4.6. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin UV-vis absorpsiyon spektrumları.

Her üç halojen kombinasyonunda da gözlemlenen emilim kaymaları, halojenlerin elektron yoğunluğu ve iyonik yarıçap farklılıklarından kaynaklanan bant aralığı mühendisliği etkilerini ortaya koymaktadır. Bu durum, Per-NK katkısının sadece enerji seviyeleri üzerinde değil, aynı zamanda cihaz stabilitesi ve çalışma ömrü üzerinde de etkili olabileceğini göstermektedir.

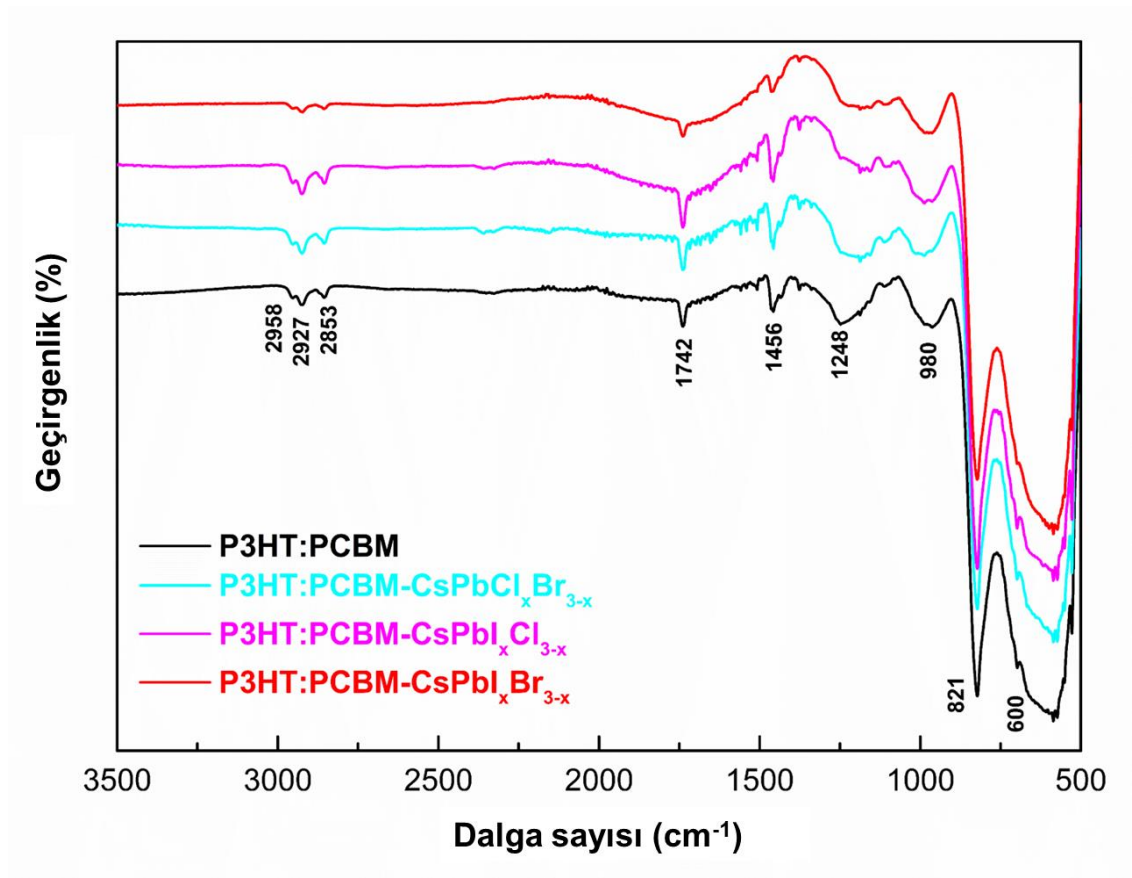


Şekil 4.7. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin bant aralığı değerleri.

Farklı Per-NK'lerin eklenmesiyle hazırlanan P3HT:PCBM ince filmlerinin bant aralığı değerleri Şekil 4.7' de verilmiştir. Katkısız P3HT:PCBM yüzeyinin E_g değeri, 1,889 eV olarak belirlenmiştir. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ katkılanmış P3HT:PCBM ince filmleri için sırasıyla 1,875, 1,884 ve 1,866 eV' a düştüğü görülmektedir. P3HT:PCBM filmlerine Per-NK'lerin eklenmesinden sonra elde edilen daralan bant aralığı değerleri, katmanlar arasında daha iyi enerji seviyesi genişlemesi sağlamıştır, bu da yük çıkarımını destekleyebilir ve taşıyıcı rekombinasyonunu azaltabilir (Cui ve ark 2024). Elde edilen bu sonuçlardan yola çıkarak üretilcek güneş hücrelerinde özellikle FF değerinde yükseliş görülebilir.

Farklı Per-NK'lerin eklenmesiyle hazırlanan P3HT:PCBM ince filmlerinde oluşabilecek olası yapısal değişikliklerin belirlenebilmesi için FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.8' de verilmiştir. Yaklaşık 2958 cm^{-1} 'deki pikler C-H asimetrik bant gerilmesiyle ve yaklaşık 1742 ve 980 cm^{-1} 'deki pikler C=C ve P3HT polimerinin C-H gerilmesiyle ilişkilendirilmektedir. 821 ve 600 cm^{-1} civarındaki

pikler ise tiyofen halkası titreşim düzlemindeki aromatik C–H eğilme titreşimlerine atfedilebilir. Ek olarak, yaklaşık 1456 cm^{-1} 'deki pikler C–H asimetric eğilmesinden kaynaklanmaktadır (de Antoni ve ark 2018). Per-NK' lerinin eklenmesiyle birlikte yük transferi fenomeninin aydınlatılması için FTIR spektrumundaki piklerin değişimi incelenmiştir. Özellikle $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ NK' lerinin eklenmesiyle 2927, 1742 ve 1456 cm^{-1} 'de görülen pik yoğunlukları hafifçe arttığı ve tüm her üç Per-NK' li eklenmiş ince filmlerin belirtilen pik noktalarının kırmızıya kaydığı belirlenmiştir. Bu, inorganik katyon bazlı Per-NK' lerin başarılı bir şekilde katkılındığını ve moleküler yük transferinin gerçekleştiğini göstermektedir (Mkawi ve ark 2021).

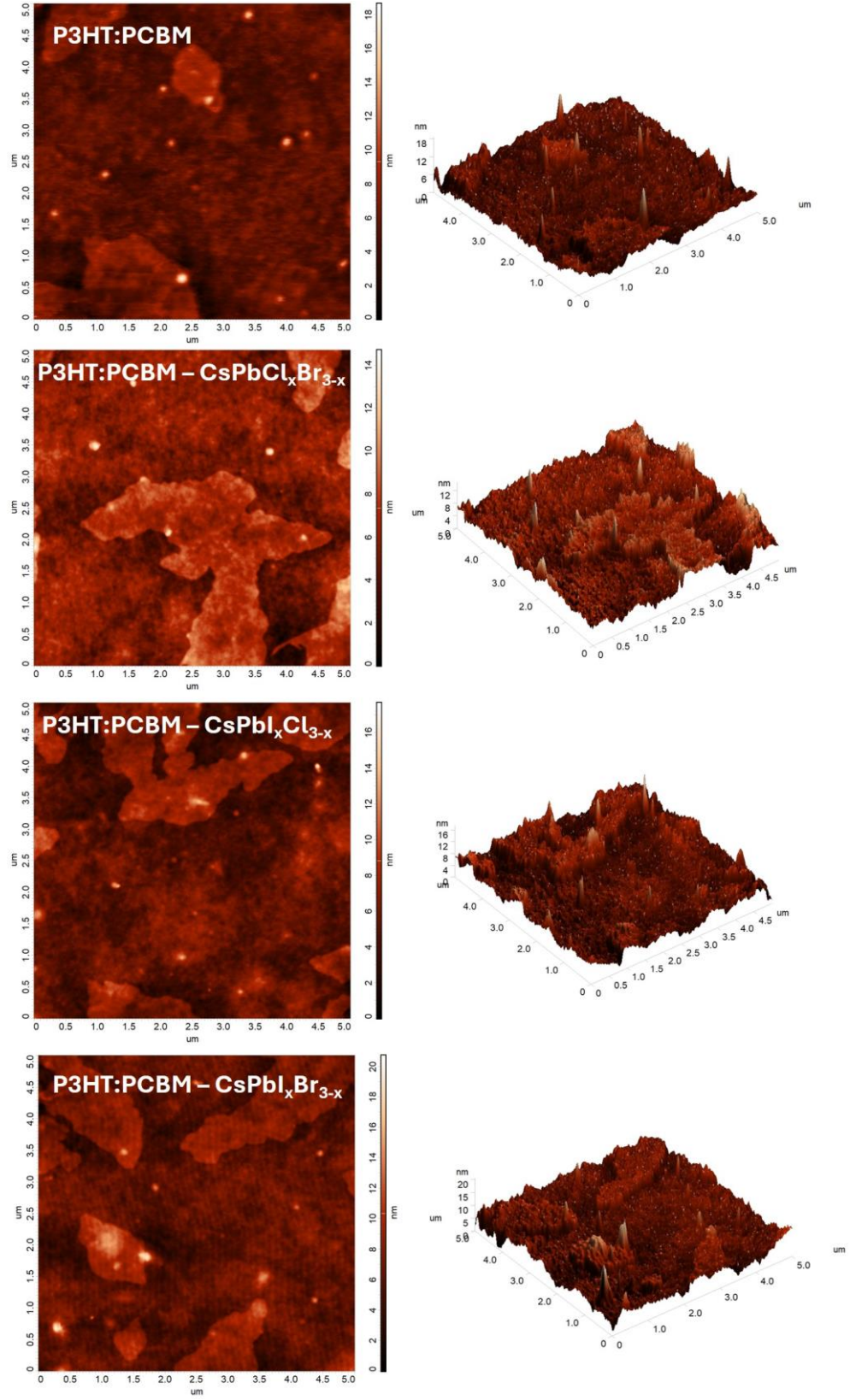


Şekil 4.8. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin FTIR spektrumları.

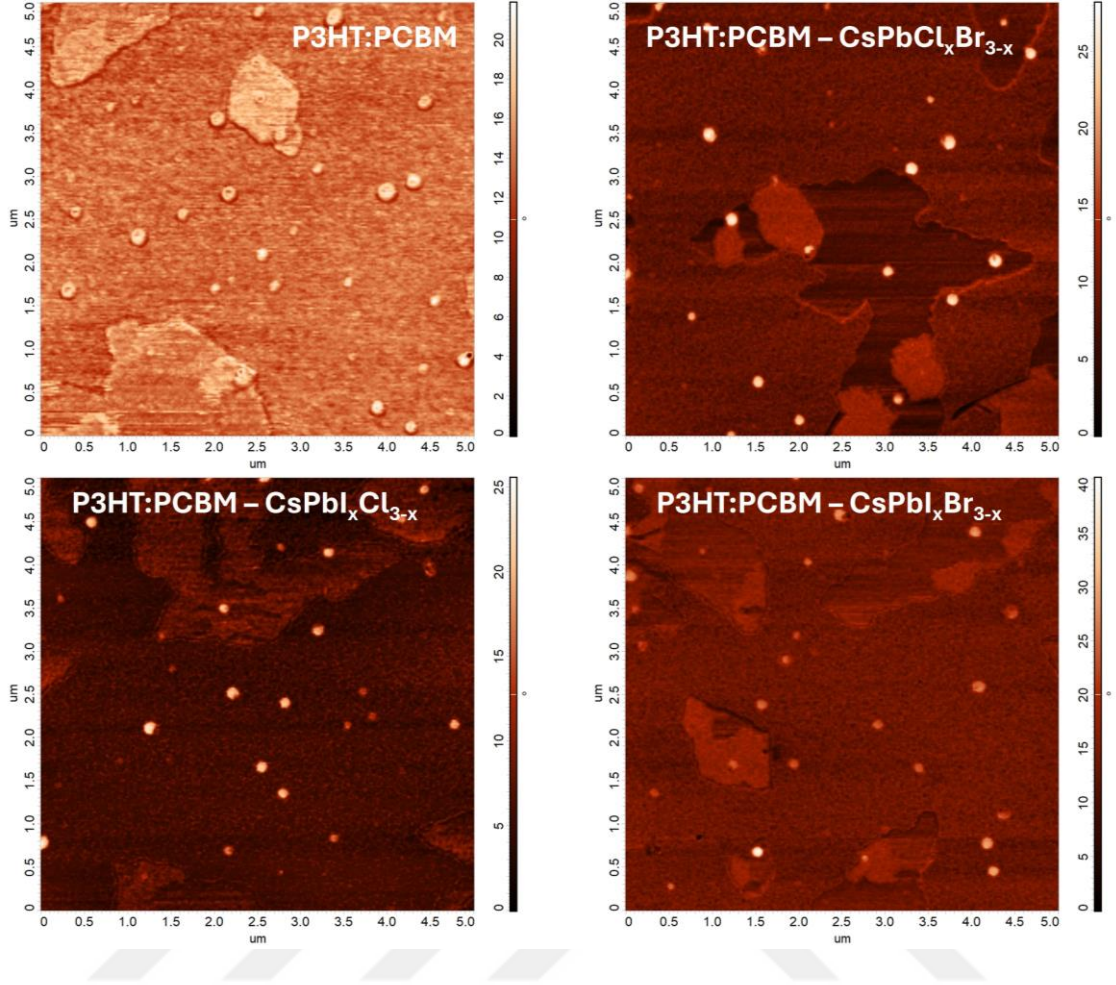
Per-NK' lerin P3HT:PCBM aktif tabakasına eklenmesiyle morfolofik değişimlerin incelenmesi için AFM tekniği kullanılmıştır. $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ alan için elde edilen temsili AFM görüntüleri ve ilgili görüntülerin 3D halleri Şekil 4.9' da verilmiştir. Per-NK' lerin eklenmesiyle P3HT:PCBM ince filmlerinin ortalama pürüzlülüğü (R_a) ve

tanecik boyut dağılımı da AFM görüntü işleme yazılımı tarafından tahmin edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.1' de listelenmiştir. P3HT:PCBM–CsPbI_xCl_{3-x} filminde ($R_a = 0,98$ nm), katkılanmamış P3HT:PCBM ince filmine kıyasla pürüzlülükte bir artış ($R_a = 1,35$ nm) görülmüştür. Ayrıca, P3HT:PCBM–CsPbCl_xBr_{3-x} ($R_a = 1,20$ nm) ve P3HT:PCBM–CsPbI_xBr_{3-x} ($R_a = 1,34$ nm) filmlerinin ölçülen R_a değerlerinde daha küçük bir artış gözlemlenmiştir. Çok yüksek bir artış gözlenmemesi ve aynı zamanda P3HT:PCBM yüzeylerinin tümünün R_a değerlerinin oldukça düşük olması nedeniyle Per-NK' lerin eklendiği durumda bile oldukça pürüzsüz ve homojen bir yüzey elde edildiği söylenebilir.

Per-NK' lerin eklenmesinin P3HT ve PCBM yarı iletkenlerinin faz dağılımlarına etkisinin belirlenmesi için faz yüzey görüntüleri alınmıştır. Sonuçlar Şekil 4.10' da verilmektedir. Görüntülerdeki renk farklılıkları ve belirgin sınırlar faz değişimlerini göstermektedir. Topografik görüntü ve faz görüntüsü aynı anda üretilmektedir ve kıyaslanması ile topografik görüntülerde görülemeyen detayları ortaya çıkarmaktadır. Koyu renk bölgeler düşük faz kaymasına sahip bölgeleri gösterirken, açık renk bölgeler yüksek faz kaymasını ve polimer matrisi temsil etmektedir. Şekil 4.10' a bakıldığında Per-NK' lerinin polimer matristen farklı özellikler göstermesi nedeniyle renkler farklılaşmıştır. P3HT'nin belirgin çizgisel yapılarda kristal bölgelerinin ve mikrometre ölçeğinde oldukça düzenli polimer karışımlarının görülmesi, iyi yük ayrımı ve transferi için gereken temel faktörlerden biridir. Yaklaşık 1–2 μm boyutunda donör-alıcı bölgeleri gözlemlenmiştir. Ek olarak, Per-NK' lerin eklendiği P3HT:PCBM ince filmlerin faz görüntülerine bakıldığında belirgin bir renk değişiminin olmaması katkılanma sonrası ince filmlerin homojenliğin belirgin şekilde değişmediğini ortaya koymuştur.



Şekil 4.9. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin AFM görüntüleri (solda) ve ilgili görüntülerin 3D halleri.



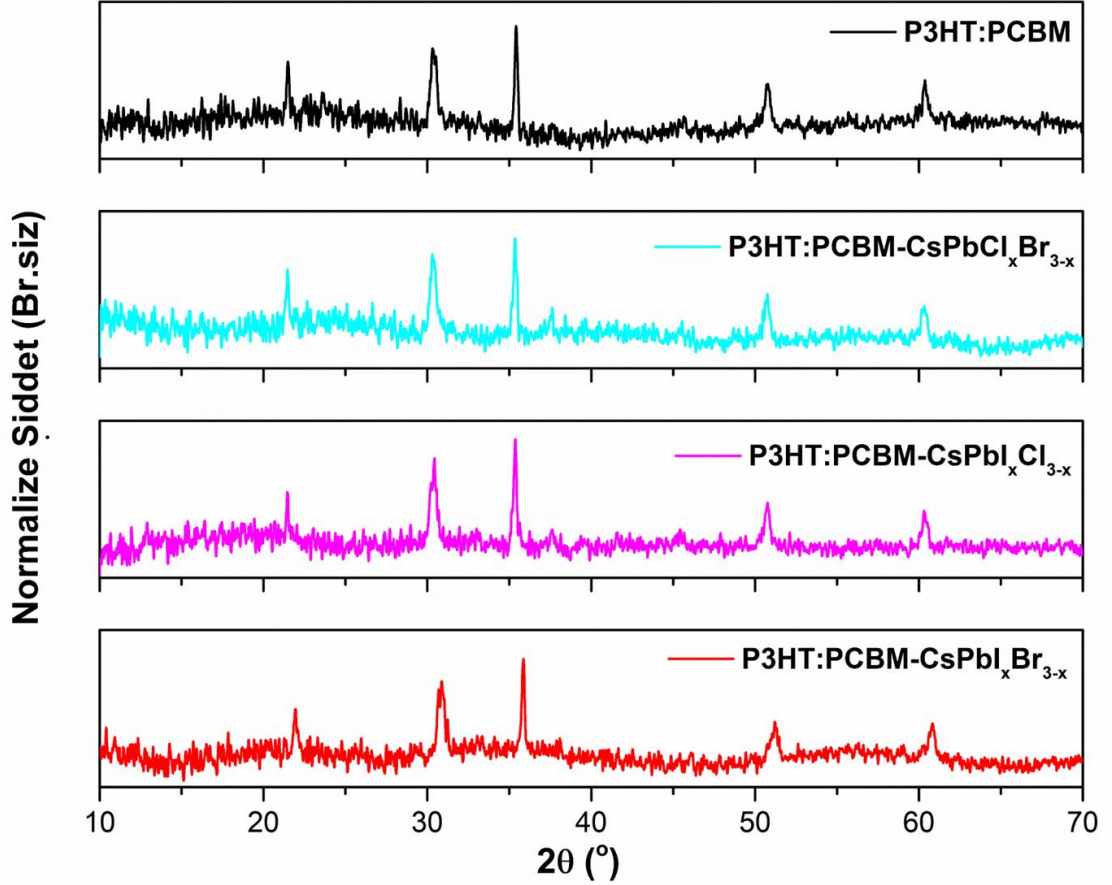
Şekil 4.10. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin AFM faz görüntüleri.

Çizelge 4.1’ de P3HT:PCBM ince filmlerinin AFM görüntülerinin Nova yazılımı ile işlenmesi sonucu elde edilen tanecik boyut dağılımı değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi katkısız P3HT:PCBM ince filminin tanecik boyut dağılımı değeri 9,32 nm olarak hesaplanırken, herhangi bir Per-NK eklenmesi, P3HT:PCBM filmlerinin tanecik boyutu dağılımının 12,9-14,1 nm aralığına artışa neden olmuştur. Per-NK eklenmesinin, P3HT zincir dizilimini etkileyen polimer karışımının morfolojisi üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıktır. Genel olarak tanecik boyut dağılımının yüksek değerlere çıkması polimer karışımının kristalliğinin iyileştiği yönünde yorumlanmaktadır.

Çizelge 4.1. Katkısız ve Per-KN eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin ortalama pürüzlülüğü (R_a), tanecik boyut dağılımları ve kristal boyutları.

Yüzeyler	R_a (nm)	Tanecik boyut dağılımı (nm)	Kristal boyutu (nm)
P3HT:PCBM	0,977	9,32	10,97
P3HT:PCBM – CsPbCl_xBr_{3-x}	1,203	14,07	25,09
P3HT:PCBM – CsPbI_xCl_{3-x}	1,351	13,97	16,21
P3HT:PCBM – CsPbI_xBr_{3-x}	1,339	12,87	14,80

Per-NK katkılamaasının P3HT:PCBM polimer karışımının kristallenme ve zincir düzenlenmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi için ince filmlerin XRD karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11' de görülmektedir). Tüm ince filmler için $21,51^\circ$ de bulunan tepeler (PCBM için karakteristik (100) düzlemine karşılık gelen), literatürde bulunan ve P3HT:PCBM' i temel alan çalışmalarla uyumludur (Molamohammadi ve ark 2019). Normalize şiddet pik tepe noktaları kıyaslandığında P3HT:PCBM filmlerinin pik yoğunluklarının katkısız filme göre daha yüksek olduğu görülebilir. Bu gelişmeler göz önüne alındığında, aktif tabakaya Per-NK ilavesiyle polimer zincirlerinin düzenlenmesinin arttığı sonucuna varılabilir. P3HT:PCBM ince filminin kristalliğinin iyileştirilmesi ve AFM faz görüntülerinde elde edilen daha iyi faz ayrımı, daha iyi yük taşıyıcı taşınması ve aktif tabakada azalmış rekombinasyon bölgesi ile sonuçlanabilir.

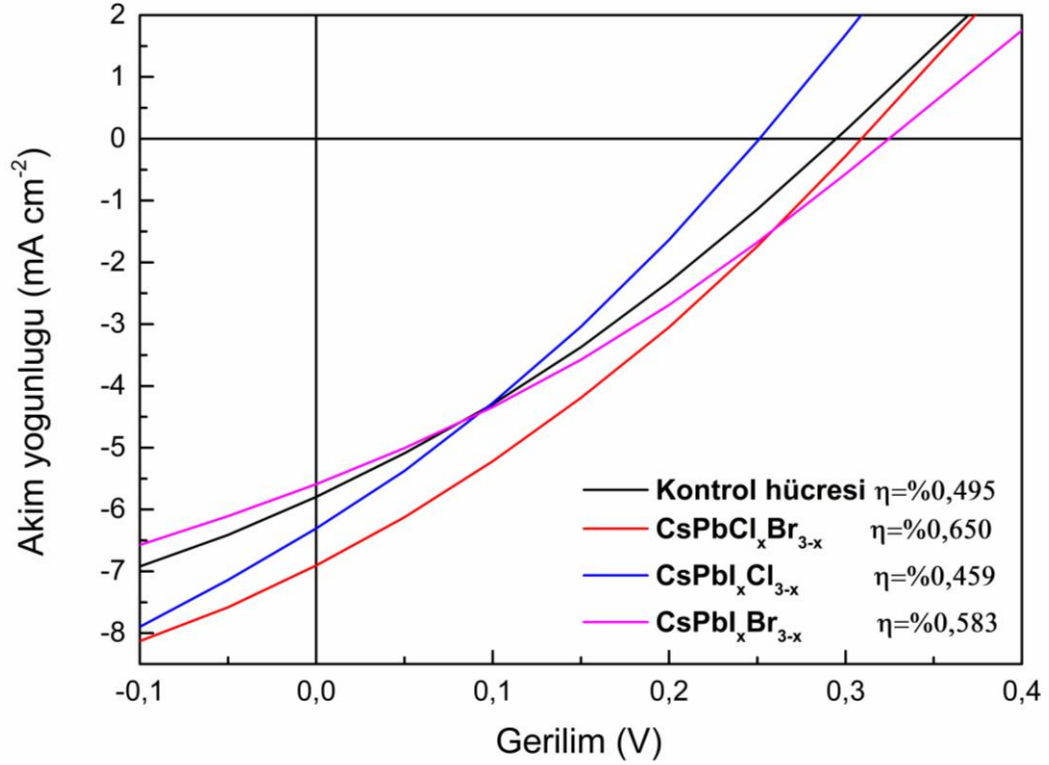


Şekil 4.11. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin XRD desenleri.

Ek olarak, Scherrer denklemi vasıtasıyla XRD sonuçlarından hesaplanan kristal boyutlarının Per-NK katkılanmamış ince filmlerde 10,97 nm'den P3HT:PCBM–CsPbCl_xBr_{3-x} ince filminde 25,09 nm' ye yükselmesi AFM sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Katkılama için seçilen Per-NK' lerin XRD ve AFM karakterizasyonu sonucu elde edilen genel artış trendi oldukça benzerdir. P3HT:PCBM–CsPbI_xCl_{3-x} (16,21 nm) ve P3HT:PCBM–CsPbI_xBr_{3-x} (14,80 nm) filmlerinin ölçülen kristal boyutlarında gözlenen yükselişler de katkılama sonrası ince filmlerdeki kristal boyutunun artışı P3HT'nin alkil zincirinin daha düzenli hale geldiği ve bunun da yük ekstraksiyonu ve yük taşıma özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılabilir.

Üretilen cihazların karakterizasyonu kapsamında, J-V analizleri ile elektriksel performans parametreleri (V_{oc} , J_{sc} , FF, η) hesaplanmış, ayrıca seri ve shunt direnç değerleri de belirlenmiştir. Şekil 4.12' de, fotoaktif katmana katkılanmış farklı Per-NK türleri ile hazırlanan ITO/PEDOT:PSS/P3HT: PCBM: Per-NK/LiF/Al cihazlarının J-V

eğrileri görülmektedir. Farklı Per-KN'lar ile hazırlanmış olan organik güneş hücrelerinin fotovoltaiik özellikleri Çizelge 4.2'de listelenmiştir.



Şekil 4.12. Katkısız ve Per-NK eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerin J-V eğrileri.

Referans hücrede $5,797 \text{ mA cm}^{-2}$ J_{sc} , $0,296 \text{ V}$ V_{oc} , %29,1 dolum faktörü (FF) ve %0,495 enerji dönüşüm verimi elde edilmiştir. CsPbCl_xBr_{3-x} ile hazırlanan aygıt, $6,904 \text{ mA cm}^{-2}$ J_{sc} , $0,31 \text{ V}$ V_{oc} ve %30,4 FF ile enerji dönüşüm veriminde %0,650'lik bir değerle referans aygıtı göre gelişme göstermiştir. Bu aygıtın verimlilik artışı temel olarak V_{oc} , J_{sc} ve FF artışı ile ilişkilendirilmiştir. Tüm bunlara ek olarak CsPbCl_xBr_{3-x} katkılanmış organik güneş hücrelerinin gelişmiş performansı fotoaktif katmandaki genişletilmiş konjugasyon uzunluğuna atfedilebilir; bu, polimer karışımının gelişmiş kristallliği ve düzenlenmesi ile kolaylaştırılır, bu da daha yüksek yük ayrımı ve eksiton difüzyon süresi ile sonuçlanır (Oseni ve ark 2023). CsPbI_xBr_{3-x} katkılanmış OGH' leri CsPbCl_xBr_{3-x} katkılanmış olanlara göre daha düşük bir yükseliş gözlense de referans hücrelere kıyasla iyileşme sağlama karakterizasyon sonuçları ile uyumludur. Bu performans artışının, Per-NK' lerin ışık absorpsiyonunu geniş spektruma yayarak artırmalarına ve taşıyıcı taşıma yollarını iyileştirmelerine bağlanabileceği

düşünülmektedir. $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ katkılanmış OGH' lerinin referansla benzer performans sergilemesi ise ince filmler arasındaki temas problemlerine atfedilebilir.

Çizelge 4.2. Katkısız ve Per-KN eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerle hazırlanan organik güneş hücrelerinin fotovoltatik performans parametreleri.

Yüzeyler	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
P3HT:PCBM	0,296	5,797	29,1	0,495
P3HT:PCBM – $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$	0,310	6,904	30,4	0,650
P3HT:PCBM – $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$	0,252	6,438	27,0	0,459
P3HT:PCBM – $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$	0,325	5,589	32,1	0,583

Organik güneş hücrelerinin performans analizinde en çok kullanılan karakterizasyonlardan biri J-V ölçümleri sayesinde hesaplanabilen seri direnç (R_s) ve shunt direnç (R_{sh}) gibi elektriksel büyüklüklerdir. Seri direnç (R_s), cihaz içerisindeki aktif tabakalar, elektrotlar ve ara yüzeylerde meydana gelen omik kayıpları temsil etmektedir. Yüksek R_s değeri, hücre üzerinden geçen akımı sınırlar ve dolayısıyla cihaz verimini düşürür. Özellikle açık devre gerilimi (V_{oc}) civarındaki eğrinin eğimi kullanılarak hesaplanabilir. Shunt direnç (R_{sh}) ise cihaz içindeki kusur ve sızıntı yollarından kaynaklanan şant yollarını temsil eder. Düşük bir R_{sh} değeri, cihazda enerji kaybına neden olurken; yüksek bir R_{sh} değeri daha iyi izolasyon ve verimliliğe işaret eder. R_{sh} değeri genellikle kısa devre akımı (I_{sc}) bölgesindeki eğrinin eğiminden elde edilir. Çizelge 4.3' te elde edilen sonuçlar, katkılı hücrelerde R_s değerinin azaldığını ve R_{sh} değerinin arttığını göstermiştir; bu durum, katkının cihaz içi taşıma ve izolasyon karakteristiklerini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, perovskit nanokristallerinin organik aktif katmana katkısının sadece optik özellikleri iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda morfolojik olarak daha düzgün ve homojen film oluşumunu da desteklediğini göstermektedir. Bu da taşıyıcıların rekombinasyon (yeniden birleşme) oranını düşürerek cihaz verimini artırmaktadır.

Çizelge 4.3. Katkısız ve Per-KN eklenmiş P3HT:PCBM ince filmlerle hazırlanan organik güneş hücrelerinin seri direnç (R_s) ve shunt direnç (R_{sh}) değerleri.

Yüzeyler	$R_s (\Omega)$	$R_{sh} (\Omega)$
P3HT:PCBM	39,11	70,78
P3HT:PCBM – CsPbCl ₃ Br _{3-x}	32,10	64,24
P3HT:PCBM – CsPbI ₃ Cl _{3-x}	29,02	53,64
P3HT:PCBM – CsPbI ₃ Br _{3-x}	43,09	85,81

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, Per-NK'ların sentezi ve organik güneş hücrelerinin üretim süreçlerinde iyileştirme yapılabilecek alanlar belirlenmiştir. Özellikle, farklı ligandlar ve çözücülerin kullanımı ile hücre verimliliğinin artırılması ve yeni nesil enerji malzemelerinin araştırılması önerilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, ligand destekli yeniden çöktürme yöntemi kullanılarak Per-NK başarıyla sentezlenmiş ve organik güneş hücrelerine (OGH) entegre edilmiştir. Yapılan XRD ve FTIR karakterizasyonları, sentezlenen Per-NK'lerin kristal yapısının istenilen özellikleri taşıdığını doğrulamıştır. UV-Vis analizleri ise hem Per-NK'lerin absorpsiyon özellikleri hem de Per-NK katkısının optik soğurma özelliklerini iyileştirerek aktif katmanın ışık emilimini artırdığını göstermiştir.

OGH'leri için yapılan ince film karakterizasyonları ve güneş hücresi ölçüm çalışmalarına baktığımızda Per-NK katkısının P3HT:PCBM bazlı organik güneş hücrelerinin performansını artırdığı gözlemlenmiştir. P3HT:PCBM katmanındaki Per-NK katkısının halojen kombinasyonuna bağlı olarak değişimi incelenmiştir. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$, $\text{CsPbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ ve $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ Per-NK'leri P3HT:PCBM fotoaktif katmana katılanmış, ince filmlerdeki kristalinite, yük ayrımı ve aktarımı geliştirilmiştir. Özellikle Per-NK'lerin eklenmesinden sonra elde edilen daralan bant aralığı değerleri, katmanlar arasında daha iyi enerji seviyesi genişlemesi sağlamıştır. $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ ile hazırlanan aygıt, $6,904 \text{ mA cm}^{-2}$ J_{sc} , $0,31 \text{ V}$ V_{oc} ve %30,4 FF ile enerji dönüşüm veriminde %0,650'lik bir değerle referans aygıtı göre en iyi gelişmeyi göstermiştir. $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$ katkılanmış OGH'leri $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ katkılanmış olanlara göre daha düşük bir yükseliş gözlense de referans hücrelere kıyasla iyileşme sağlaması karakterizasyon sonuçları ile uyumludur.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak, gelecekteki araştırmalar için bazı öneriler sunulmuştur:

Farklı Ligand ve Çözücülerin Kullanımı: Ligand seçiminin ve çözücülerin değiştirilmesinin Per-NK'lerin boyut, morfoloji ve optik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek, daha verimli materyaller geliştirmek için önemlidir.

Farklı Aktif Katman Bileşenleri: P3HT dışında yeni nesil polimerler ve küçük moleküller ile yapılan çalışmalarda Per-NK katkısının performansa etkisi araştırılmalıdır.

Kapsamlı Stabilitate Testleri: Farklı ortam koşullarında uzun vadeli stabilite testleri, pratik uygulamalarda hücrelerin dayanıklılığı hakkında daha fazla bilgi sağlayabilir.

Ölçek Büyütme ve Ticari Üretim: Laboratuvar ölçekli çalışmalardan endüstriyel uygulamalara geçiş için ölçek büyütme stratejilerinin araştırılması ve maliyet analizlerinin yapılması gereklidir.

Yeni Karakterizasyon Teknikleri: Per-NK'lerin yüzey ve ara yüzey özelliklerini daha iyi anlamak için ileri düzey karakterizasyon yöntemlerinin kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Aharon S, Etgar L, 2016. Two dimensional organometal halide perovskite nanorods with tunable optical properties. *Nano letters*, 16, 5, 3230-5.
- Bera D, Qian L, Tseng T-K, Holloway PH, 2010. Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review. *Materials*, 3, 4, 2260-345.
- Bhoyate S, Ionescu M, Radojcic D, Kahol PK, Chen J, Mishra SR, Gupta RK, 2018. Highly flame-retardant bio-based polyurethanes using novel reactive polyols. *Journal of Applied Polymer Science*, 135, 12, 46027.
- Chaudhary DK, Ghosh A, Ali MY, Bhattacharyya S, 2020. Charge Transport between Coaxial Polymer Nanorods and Grafted All-Inorganic Perovskite Nanocrystals for Hybrid Organic Solar Cells with Enhanced Photoconversion Efficiency. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124, 1, 246-55.
- Cui W, Zhao Y, Cui C, Liu X, Pang B, Feng J, Dong H, Yu L, Dong L, 2024. Improved performance of double Cs₂AgBiBr₆ perovskite solar cells by engineering passivation defects with Co²⁺ additives. *Vacuum*, 220, 112816.
- de Antoni LO, de Menezes EW, Loguercio LF, Rodrigues MRF, de Andrade RL, Costa TM, Benvenuti EV, Santos JFL, Santos MJL, 2018. Ionic silsesquioxane-capped au nanoparticle powders: Application in p3ht/pcbm solar cells and the effect of the capping layer on surface plasmon dumping. *Materials Chemistry and Physics*, 206, 204-12.
- De Wolf S, Holovsky J, Moon S-J, Löper P, Niesen B, Ledinsky M, Haug F-J, Yum J-H, Ballif C, 2014. Organometallic Halide Perovskites: Sharp Optical Absorption Edge and Its Relation to Photovoltaic Performance. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5, 6, 1035-9.
- Faheem MB, Khan B, Feng C, Farooq MU, Raziq F, Xiao Y, Li Y, 2020. All-Inorganic Perovskite Solar Cells: Energetics, Key Challenges, and Strategies toward Commercialization. *ACS Energy Letters*, 5, 1, 290-320.
- Ghaithan HM, Qaid SMH, AlHarbi KK, Bin Ajaj AF, Al-Asbahi BA, Aldwayyan AS, 2022. Amplified Spontaneous Emission from Thermally Evaporated High-Quality Thin Films of CsPb(Br_{1-x}Y_x)₃ (Y = I, Cl) Perovskites. *Langmuir*, 38, 28, 8607-13.
- Jaramillo-Quintero OA, Sanchez RS, Rincon M, Mora-Sero I, 2015. Bright Visible-Infrared Light Emitting Diodes Based on Hybrid Halide Perovskite with Spiro-OMeTAD as a Hole-Injecting Layer. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6, 10, 1883-90.
- Johnson M, Lee S, 2018. Challenges in Organic Photovoltaics: Efficiency and Durability. *Solar Energy Materials*, 12, 2, 98-110.

- Kim D-Y, Jung J-G, Lee Y-J, Park M-H, 2023. Lead-Free Halide Perovskite Nanocrystals for Light-Emitting Diodes. *Materials*, 16, 18, 6317.
- Kim JY, Lee J-W, Jung HS, Shin H, Park N-G, 2020. High-Efficiency Perovskite Solar Cells. *Chemical Reviews*, 120, 15, 7867-918.
- Kim Y-H, Kim S, Kakekhani A, Park J, Park J, Lee Y-H, Xu H, Nagane S, Wexler RB, Kim D-H, Jo SH, Martínez-Sarti L, Tan P, Sadhanala A, Park G-S, Kim Y-W, Hu B, Bolink HJ, Yoo S, Friend RH, Rappe AM, Lee T-W, 2021. Comprehensive defect suppression in perovskite nanocrystals for high-efficiency light-emitting diodes. *Nature Photonics*, 15, 2, 148-55.
- Knezevic M, Quach V-D, Lampre I, Erard M, Pernot P, Berardan D, Colbeau-Justin C, Ghazzal MN, 2023. Adjusting the band gap of $\text{CsPbBr}_{3-y}\text{X}_y$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{I}$) for optimal interfacial charge transfer and enhanced photocatalytic hydrogen generation. *Journal of Materials Chemistry A*, 11, 12, 6226-36.
- Knezevic M, Quach V-D, Lampre I, Erard M, Pernot P, Berardan D, Colbeau-Justin C, Ghazzal MN, 2023. Adjusting the band gap of $\text{CsPbBr}_{3-y}\text{X}_y$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{I}$) for optimal interfacial charge transfer and enhanced photocatalytic hydrogen generation. *Journal of Materials Chemistry A*, 11, 12, 6226-36.
- Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T, 2009. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131, 17, 6050-1.
- Li M-Z, Guo L-C, Ding G-L, Zhou K, Xiong Z-Y, Han S-T, Zhou Y, 2021. Inorganic Perovskite Quantum Dot-Based Strain Sensors for Data Storage and In-Sensor Computing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 26, 30861-73.
- Li Q, Xu K, Fan S, Zhang H, Wei X, Xu C, Luan X, Wang Z, Peng H, Shi L, 2025. Aqueous phase synthesis of all-inorganic halide perovskite $\text{CsPbCl}_x\text{Br}_{3-x}$ nanocrystals using CsTFA as cesium source and surface ligand. *Next Materials*, 6, 100322.
- Lim S, Lee DH, Choi H, Choi Y, Lee DG, Cho SB, Ko S, Choi J, Kim Y, Park T, 2022. High-Performance Perovskite Quantum Dot Solar Cells Enabled by Incorporation with Dimensionally Engineered Organic Semiconductor. *Nano-Micro Letters*, 14, 1, 204.
- Lin W, Nie Q, Jiang X-F, Jiang X, Wang K, Shui L, Priya S, Zhou G, Hu X, 2020. Synthesis of Perovskite Nanocrystals and Their Photon-Emission Application in Conjunction With Liquid Crystals. *Frontiers in Chemistry*, Volume 8 - 2020.
- Liu J, Shao S, Wang H, Zhao K, Xue L, Gao X, Xie Z, Han Y, 2010. The mechanisms for introduction of n-dodecylthiol to modify the P3HT/PCBM morphology. *Organic Electronics*, 11, 5, 775-83.

- Liu X, Shao G, Zhang Y, Liang X, Li C, Xiang W, 2021. CsPbCl_{1.5}Br_{1.5} perovskite nanocrystals glasses powder optimized by Zn²⁺ for photocatalytic hydrogen production. *Molecular Catalysis*, 499, 111305.
- Liu Y, Li Y, Hu X, Wei C, Xu B, Leng J, Miao H, Zeng H, Li X, 2023. Ligands for CsPbBr₃ perovskite quantum dots: The stronger the better? *Chemical Engineering Journal*, 453, 139904.
- Liu Z, 2015. Chapter 6 - Innovation in Global Energy Interconnection Technologies. In: *Global Energy Interconnection*. Eds: Liu Z. Boston: Academic Press, p. 239-72.
- Livakas N, Toso S, Ivanov YP, Das T, Chakraborty S, Divitini G, Manna L, 2023. CsPbCl₃ → CsPbI₃ Exchange in Perovskite Nanocrystals Proceeds through a Jump-the-Gap Reaction Mechanism. *J Am Chem Soc*, 145, 37, 20442-50.
- Ma F, Zhao Y, Qu Z, You J, 2023. Developments of Highly Efficient Perovskite Solar Cells. *Accounts of Materials Research*, 4, 8, 716-25.
- Meddeb H, Götz-Köhler M, Neugebohrn N, Banik U, Osterthun N, Sergeev O, Berends D, Lattyak C, Gehrke K, Vehse M, 2022. Tunable Photovoltaics: Adapting Solar Cell Technologies to Versatile Applications. *Advanced Energy Materials*, 12, 28, 2200713.
- Mkawi E, Al-Hadeethi Y, Bazuhair R, Shalaan E, Arkook B, Abdel-Daiem A, Bekyarova E, 2021. Fabricated Cu₂Zn SnS₄ (CZTS) nanoparticles as an additive in P3HT: PCBM active layer for efficiency improvement of polymer solar cell. *Journal of Luminescence*, 240, 118420.
- Molamohammadi S, Nia SA, Jalili YS, 2019. Improvement of inverted structure organic solar cells by Ar plasma treatment on P3HT: PC61BM active layer. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34, 43-8.
- Nazar M, Hasan M, Wirjosentono B, Gani BA, Nada CE, 2024. Microwave Synthesis of Carbon Quantum Dots from Arabica Coffee Ground for Fluorescence Detection of Fe³⁺, Pb²⁺, and Cr³⁺. *ACS Omega*, 9, 18, 20571-81.
- Noh JH, Im SH, Heo JH, Mandal TN, Seok SI, 2013. Chemical Management for Colorful, Efficient, and Stable Inorganic–Organic Hybrid Nanostructured Solar Cells. *Nano Letters*, 13, 4, 1764-9.
- Oseni SO, Osifeko OL, Boyo AO, Mola GT, 2023. Tri-metallic quantum dot under the influence of solvent additive for improved performance of polymer solar cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 140, 2, e53293.
- Özbektaş S, Şenel M, Sungur B, 2023. Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri Renewable Energy Status and Installation Costs in the World and Turkey. *Mühendis ve Makina*.
- Palazon F, Almeida G, Akkerman QA, De Trizio L, Dang Z, Prato M, Manna L, 2017. Changing the Dimensionality of Cesium Lead Bromide Nanocrystals by

- Reversible Postsynthesis Transformations with Amines. *Chemistry of Materials*, 29, 10, 4167-71.
- Patra D, Saini A, Bag M, Singh SP, 2024. Amine-Free CsPbBr₃ Perovskite Nanocrystals with a Near-Unity Photoluminescence Quantum Yield for a Superfast Photodetector. *ACS Applied Nano Materials*, 7, 14, 16438-49.
- Protesescu L, Yakunin S, Bodnarchuk MI, Krieg F, Caputo R, Hendon CH, Yang RX, Walsh A, Kovalenko MV, 2015. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X= Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut. *Nano letters*, 15, 6, 3692-6.
- Protesescu L, Yakunin S, Bodnarchuk MI, Krieg F, Caputo R, Hendon CH, Yang RX, Walsh A, Kovalenko MV, 2015. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX₃, X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut. *Nano Lett*, 15, 6, 3692-6.
- Schmidt LC, Pertegás A, González-Carrero S, Malinkiewicz O, Agouram S, Mínguez Espallargas G, Bolink HJ, Galian RE, Pérez-Prieto J, 2014. Nontemplate synthesis of CH₃NH₃PbBr₃ perovskite nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, 136, 3, 850-3.
- Shi J, Wang Z, Gaponenko NV, Da Z, Zhang C, Wang J, Ji Y, Ding Y, Yao Q, Xu Y, Wang M, 2024. Stability Enhancement in All-Inorganic Perovskite Light Emitting Diodes via Dual Encapsulation. *Small*, 20, 28, 2310478.
- Solak EK, Irmak E, 2023. Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance. *RSC Advances*, 13, 18, 12244-69.
- Soltani R, Puscher BMD, Katbab AA, Levchuk I, Kazerouni N, Gasparini N, Camaioni N, Osvet A, Batentschuk M, Fink RH, Guldi DM, Ameri T, 2018. Improved charge carrier dynamics in polymer/perovskite nanocrystal based hybrid ternary solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20, 36, 23674-83.
- Stoumpos CC, Malliakas CD, Kanatzidis MG, 2013. Semiconducting tin and lead iodide perovskites with organic cations: phase transitions, high mobilities, and near-infrared photoluminescent properties. *Inorganic chemistry*, 52, 15, 9019-38.
- Stranks SD, Snaith HJ, 2016. Perovskite Solar Cells. In: *Photovoltaic Solar Energy*. Eds, p. 277-91.
- Tyona M, 2013. A theoretical study on spin coating technique. *Advances in materials Research*, 2, 4, 195.
- Wang Y, Yang Y, Zhang D, Zhang T, Xie S, Zhang Y, Zhao Y-B, Mi X, Liu X, 2023. Phosphorescent-Dye-Sensitized Quantum-Dot Light-Emitting Diodes with 37% External Quantum Efficiency. *Advanced Materials*, 35, 45, 2306703.

- Wang Z, Wei Y, Chen Y, Zhang H, Wang D, Ke J, Liu Y, Hong M, 2024. “Whole-Body” Fluorination for Highly Efficient and Ultra-Stable All-Inorganic Halide Perovskite Quantum Dots. *Angewandte Chemie International Edition*, 63, 8, e202315841.
- Wei S, Yang Y, Kang X, Wang L, Huang L, Pan D, 2016. Room-temperature and gram-scale synthesis of CsPbX₃ (X= Cl, Br, I) perovskite nanocrystals with 50–85% photoluminescence quantum yields. *Chemical Communications*, 52, 45, 7265-8.
- Wu L, Zhong Q, Yang D, Chen M, Hu H, Pan Q, Liu H, Cao M, Xu Y, Sun B, Zhang Q, 2017. Improving the Stability and Size Tunability of Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals Using Trioctylphosphine Oxide as the Capping Ligand. *Langmuir*, 33, 44, 12689-96.
- Yang G, Zhang H, Li S, Ren Z, Fang G, Lei D, Li G, 2022. Enhanced efficiency and stability of triple-cation perovskite solar cells with CsPbI_xBr_{3-x} QDs “surface patches”. *SmartMat*, 3, 3, 513-21.
- Zhang W, Zheng W, Huang P, Yang D, Shao Z, Chen X, 2024. The marriage of perovskite nanocrystals with lanthanide-doped upconversion nanoparticles for advanced optoelectronic applications. *Aggregate*, 5, 5, e558.
- Zhang X, Gao X, Meng X, 2019. Fabrication and characterization of all-inorganic halide perovskite CsPbBr₃ films via the two-step sol-gel process: Impact of annealing temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 810, 151943.
- Zheng X, Huang J, Liu Y, Teng B, Ji S, 2022. Highly Photostable Mixed-Halide Blue CsPbBr_{1.5}Cl_{1.5} Perovskite Quantum Dots via Surface Treatment. *Crystal Research and Technology*, 57, 11, 2200065.
- Zhong Q, Cao M, Xu Y, Li P, Zhang Y, Hu H, Yang D, Xu Y, Wang L, Li Y, Zhang X, Zhang Q, 2019. L-Type Ligand-Assisted Acid-Free Synthesis of CsPbBr₃ Nanocrystals with Near-Unity Photoluminescence Quantum Yield and High Stability. *Nano Letters*, 19, 6, 4151-7.