



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KARBON KUANTUM NOKTALARIN
SENTEZİ VE GÜNEŞ HÜCRELERİNDE
UYGULAMALARI

Alihan BÜYÜKBEKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

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

Alihan BÜYÜKBEKAR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KARBON KUANTUM NOKTALARIN SENTEZİ VE GÜNEŞ HÜCRELERİNDE UYGULAMALARI

Alihan BÜYÜKBEKAR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

2023, 66 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ
Doç. Dr. Tuğbahan YILMAZ**

Perovskit güneş hücreleri (PGH) enerji tasarrufu sağlayan bir dünya inşa etmek için artan bir ilgi görmektedir. Günümüzde, PGH'nin %25' in üzerinde bir fotovoltaik performans gösterdiği bilinmektedir. Bu anlamda kurşun halojenür perovskit malzemeler ile hazırlanan yeni cihazların geliştirilmesi ile birçok maliyet ve verimlilik sorununun ortadan kaldırılacağı öngörülmektedir. Ancak verimlilik sonuçlarına rağmen, optoelektronik cihazlar üretim maliyeti, verimlilik ve kullanım ömrü ile değerlendirildiğinden, gelecekteki büyük ölçekli ticari uygulamalar için perovskit cihaz performansında ve istikrarında daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Yeni bir katkı malzemesi sınıfı olan koloidal kuantum noktalar (KN) lar, düşük maliyetli üretime ve kurşun halojenür perovskit malzemesi ile birçok kombinasyona izin vermektedir. Tezin temel amacı, heteroatom katkılı karbon KN (KKN) ları kullanarak oldukça kararlı ve yüksek verimli kurşun halojenür PGH'leri üretmektir. Öncelikle hidrotermal/solvotermal teknikle heteroatom katkılı farklı KKN sentezlenmiştir. Yüksek verimli ve kararlılığa PGH üretmek için sentezlenen bu nano yapılar katkı malzemesi olarak perovskit katmanında kullanılmıştır. Özellikle, heteroatom katkılı KKN' lar, uygulanacak cihaza göre heteroatomun değiştirilmesiyle özellikleri ayarlanabilir olduğundan oldukça avantajlıdır. Ek olarak KKN' ların yüksek ısı ve nem stabilitesine sahip olması sayesinde büyük ölçekli PGH üretimi için uygun maliyetli, kolay ve ortam koşullarına (nem vb.) dayanıklı bir cihaz üretim modifikasyonu yöntemi literatüre kazandırılacaktır.

Yapılan çalışmalar neticesinde P-KKN' lar sentezlenmiş ve perovskit güneş hücrelerine entegre edildiğinde yüzey kusurlarını pasifleştirdiği aynı zaman da perovskit kristalleşmesini etkilediği ve hücrelerin fotovoltaik performansını %10,71' den %13'12' ye yükselttiği incelenmiştir. OGH' lerde ise yük ayrımı ve aktarımında gelişmeler sağladığı bununla birlikte yüzey morfolojisinde iyileşmeler gözlenmiştir. P-KKN' ların OGH' lere eklenmesiyle hücrelerin veriminde %2,373' den 2,589' a bir artış sağlanmıştır. Çalışma neticesinde literatüre yeni bir katkı maddesi kazandırılarak KKN' ların potansiyel kullanımına ışık tutması sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbon kuantum nokta, hetero-atom katkılama, perovskit güneş hücresi, pasivasyon

ABSTRACT

MS THESIS

Synthesis of Carbon Quantum Dots (CQDs) and Their Applications in Solar Cells

Alihan BÜYÜKBEKAR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Chemical Engineering**

Advisor: Assoc. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

2023, 66 Pages

Jury

**Assoc. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ
Assoc. Dr. Tuğbahar YILMAZ**

Lead halide perovskites have gained a remarkable attention in optoelectronic application owing to their excellent optical and electronic properties. The performance of perovskite solar cells (PSCs) has certified a value of over 25%. Many cost and efficiency problems will be eliminated by developing of new devices prepared by lead halide perovskite materials. However, further enhancement in device performance and stability is still needed for future large scale commercial applications as optoelectronic devices are scored by production cost, efficiency, and lifetime. As a new class of doping materials, colloidal quantum dots (QDs) allow the low-cost fabrication and a lot of easy combination with lead halide perovskite material. The main objective of the project is to produce highly stable and highly efficient lead halide PSCs by using heteroatoms-doped carbon quantum dots (CQDs). Heteroatoms-doped CQDs will be synthesized by hydrothermal/solvothermal techniques. It is possible to obtain highly efficient and stable PSCs by simple, low-cost solution processes by doping lead halide perovskite thin films with these new nano structures. In particular, heteroatom-doped CQDs are very advantageous as their properties can be adjusted by changing the heteroatom according to the device to be applied. In addition, thanks to the high thermal and moisture stability of CQDs, a cost-effective, easy, and resistant to ambient conditions (humidity, etc.) device production modification method will be introduced to the literature for large-scale PSCs production. The arrangement structure made, P-CQDs, was synthesized and displays that the perovskite solar cell passivates all surface defects, while controlling the perovskite crystallization and increasing the cells photovoltaic monitors from 10.71% to 13% 12%. On the other hand, improvements in surface morphology were observed with improvements in load separation and management in OSCs. A scene from 2.373% to 2.589 of P-CQDs in their nests was shown to OSCs with their feathers. The work environment literature has provided a new additive, shedding light on the potential use of CQDs.

Keywords: Carbon quantum dot, heteroatom doping, perovskite solar cell, passivation

ÖNSÖZ

Bilim yolundaki bu zorlu ve meşakkatli süreçte danışmanlığımı üstlenen güler yüz ve olumlu tavrıyla beni cesaretlendiren, bilgi ve birikimiyle daima farklı açılardan bakmamı sağlayan, en önemlisi öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum ve duyacağım değerli danışman hocam ve bilim insanı Sayın. Doç. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK' a ve ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca deneysel çalışmalarım, araştırmalarım fikirlerinden ve becerilerinden her zaman yararlandığım desteğini üzerimden hiç çekmeyen sayın Doç. Dr. Tuğbahan YILMAZ' a ve oğlu Ege'ye emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim ve çalışmalarım boyunca bilgi ve birikimiyle, tecrübesiyle başarıya ulaşmam için sabrıyla ve hoş görüşüyle elini her zaman üzerimde hissettiğim bizlere her zaman örnek olan değerli bilim insanı sayın Prof. Dr. Mahmut KUŞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca gece gündüz her konuda yardımcı olan ve beni hep motive eden değerli grup arkadaşlarım Buse BÜTÜN, Gamze DÖLEK, Emre ÜNVER ve Mutahire TOK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca imkânlarından faydalandığım, Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (PN:221016007), 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Yüksek Lisans Burs Programı ve 121F377 numaralı proje kapsamında maddi desteğinden yararlandığım TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca desteklerini üzerimden esirgemeyen ve her zaman yanımda olan çalışma arkadaşlarıma ve Alt yapı imkânlarından faydalandığım Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Merkezine teşekkür ederim.

Son olarak en önemli teşekkürü hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen ve yanımda olan canım ailem Seyit BÜYÜKBEKAR, Ferhunde BÜYÜKBEKAR, Gizem BÜYÜKBEKAR, dayım Musa Kerim MUTLUAY, dedem Ali MUTLUAY' a ve en önemlisi değerli ağabeyim yol göstericim Dr. Burak ZAFER BÜYÜKBEKAR' a sonsuz teşekkür ederim.

Alihan BÜYÜKBEKAR
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Hücre Türleri	2
1.1.1. Birinci nesil güneş hücreleri.....	3
1.1.2. İkinci nesil güneş hücreleri	3
1.1.3. Üçüncü nesil güneş hücreleri	4
1.2. Güneş Hücreleri	6
1.3. Güneş Hücresi Eşdeğer Devresi	8
1.4. Güneş Hücreleri Verim Hesabı	9
1.5. Perovskit Güneş Hücreleri	10
1.6. Perovskit Güneş Hücreleri Çalışma Prensibi ve Yapısı	12
1.7. Perovskit Güneş Hücrelerindeki Bazı Zorluklar	15
1.7.1. Stabilite	15
1.8. Organik Güneş Hücreleri (OGH)	17
1.8.1. Tek Katmanlı Organik Güneş Hücreleri	17
1.8.2. Çift Katmanlı Organik Güneş Hücreleri	18
1.8.3. Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri	19
1.8.4. Organik Güneş Hücreleri Çalışma Prensibi	19
1.8.5. Hücre Performansını Etkileyen Parametreler	20
1.9. Kuantum Noktalar(KN)	21
1.9.1. Kuantum nokta yapısı	21
1.9.2. Kuantum noktaların optik özellikleri	24
1.9.3. Kuantum noktaların sentez yöntemleri	26
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	32
3.2. Kullanılan Karakterizasyon Yöntemleri.....	33
3.2.1. Akım-Voltaj grafiklerinin elde edilmesi	33
3.2.2. KKN'ların ve İnce Filmlerin Yapısal, Optik ve Morfolojik Karakterizasyonları	33
3.3. Kaplama Teknikleri	36
3.3.1. Spin kaplama yöntemi.....	36
3.3.2. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi.....	37
3.4. Güneş Hücrelerinin Hazırlanması	38
3.4.1. Cihaz Yüzeylerinin Hazırlanması ve Temizlenmesi.....	38

3.5. Çalışmada Kullanılan Çözeltilerin Hazırlanması	40
3.6. P-KKN' ların Sentezi	41
3.7. Perovskit Güneş Hücrelerinin Kaplamaları	41
3.8. Organik Güneş Hücrelerinin Kaplanması	42
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	43
4.1. P-KKN Karakterizasyonu.....	43
4.2. Perovskit İnce Filmlerin Karakterizasyonu	45
4.3. Perovskit Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu	49
4.4. P3HT:PCBM İnce Filmlerinin Karakterizasyonu	52
4.5. Organik Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
5.1 Sonuçlar	58
5.2 Öneriler.....	58
KAYNAKLAR	60
EKLER	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

η	: Enerji dönüşüm verimi
$^{\circ}\text{C}$: Santigrant
cm^2	: Santimetrekare
eV	: Elektron volt
mW/cm^2	: Aydınlatma şiddeti

Kısaltmalar

PV	: Fotovoltaik
a-Si	: Amorf silisyum
Cd-Te	: Kadmiyumtelliür
PPV	: Poli [2-metoksi-5-(2'-etilheksiloksi)-p-fenilen vinilen]
KN	: Kuantum nokta
OGH	: Organik güneş hücreleri
CPV	: Konsantre fotovoltaik
E_g	: Bant aralığı
Rsh	: Şönt direnci
R_s	: Seri direnç
q	: Temel yük
k_B	: Boltzmann sabiti
PCE	: Güç dönüştürme verimliliği
T	: Sıcaklık
J-V	: Akım yoğunluğu-voltaj
I_{sc}	: Güneş hücresi kısa devre akımı
FF	: Doldurma faktörü
V_{oc}	: Açık devre voltajı
FF	: Doldurma faktörü
CaTiO_3	: Kalsiyum titanat
Pb_2	: Kurşun
ETL	: Elektron taşıma katmanı
HTL	: Boşluk taşıma katmanı
ITO	: İndiyum kalay oksit
FTO	: Flor katkılı kalay oksit
TCO	: Şeffaf iletken oksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
SnO_2	: Kalay oksit
PC_{61}BM	: [6,6]-fenil-C61-bütirik asit metil ester
PEDOT:PSS	: Poli (3,4-etilen dioksitiyofen):poli (4-stirensülfonat)
PC_{61}BM	: [6,6]-fenil-C61-bütirik asit metil ester
KKN	: Karbon Kuantum Nokta
GQD	: Grafen Kuantum Noktaları
SQD	: Yarı iletken tabanlı noktalar
CND	: Karbon nano Noktaları

PGH	: Perovskite güneş hücresi
NREL	: Ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı
P3HT	: (poli(3hekziltiyofen-2,5-diil))
PCBM	: 6,6-fenil C61 bütirik asit metil ester
BCP	: 2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline
XRD	: X-ışını kırınımı
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
PL	: Fotolüminesans
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
EQE	: Dış Kuantum verimliliği
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
RPM	: Dönme hızı



1. GİRİŞ

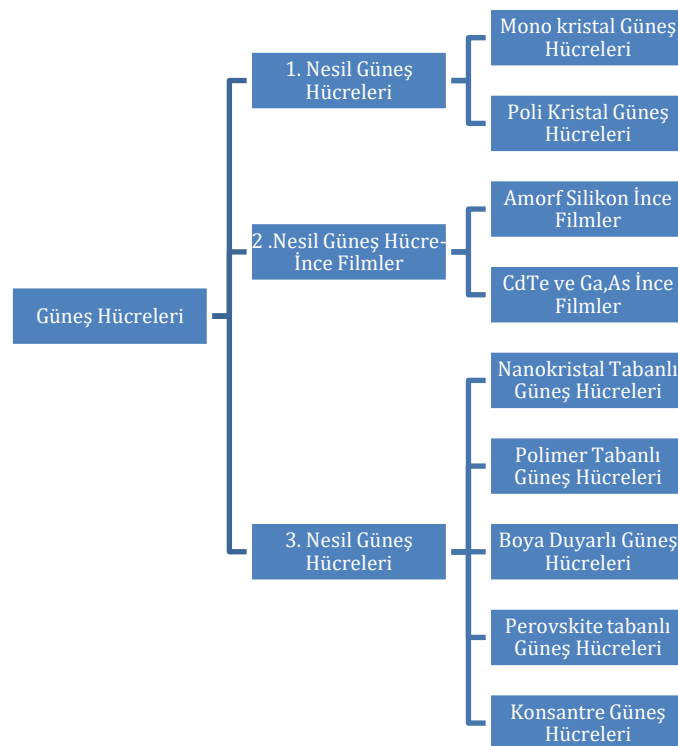
Enerji en yaygın tanımıyla iş yapabilme yeteneğidir. Son zamanlarda enerji dünyada çok önemli bir konuma gelmiş bulunmaktadır. Hayatımızın her alanında kullanılan enerji kimyasal, nükleer, mekanik, termik, jeotermal, biyokütle, güneş, rüzgâr ve elektrik enerjisi gibi çeşitli türlerde bulunmakta ve uygun süreçlerle birbirlerine dönüşebilmektedirler. Fosil kaynakların hızla azalmasıyla, birlikte tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynakları dikkat çekmektedir. Dünya, son yıllarda büyük bir fosil enerjiden temiz enerjiye geçişe tanık olmaktadır. Bununla birlikte, kömür, doğal gaz ve petrol şeklindeki fosil yakıtlar halen dünya çapındaki enerji kullanımının %80' ine sahiptir. Üretilen elektriğin yaklaşık yarısı hâlâ kömürle çalışan elektrik santrallerinde üretilmektedir (Li ve Tao, 2017). Günümüzde, enerji paydaşlarının çoğu, enerji verimliliği konusunda anlamlı bir ilerleme kaydetmek istiyorlarsa hem uygulanabilir hem de zorlayıcı hedefler oluşturmaları gerektiğinin farkındadır. Sürdürülebilirlik ve enerji verimliliğine odaklanmak, özellikle küçük işletme sektöründe ülkelere benzersiz bir rekabet avantajı sağlayabilmektedir. Enerji fiyatlarının önümüzdeki yıllarda artması muhtemeldir ve sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir yaklaşım, küçük işletmelerin markalaşmasına yardımcı olabilir (Gunawan ve ark., 2020). Hatta bazı şirketlerin enerji sektöründeki son modernizasyonlarla enerji verimliliklerini %30 artırdıkları bile söylenmektedir (Wu ve ark., 2020). Bu noktada ülkelerin kendilerini geliştirmede ve bağımsızlıklarını ilan etme noktasında yenilenebilir enerji kaynakları büyük önem arz etmektedir. Enerji verimliliğine verilen önemin artması ve 1970' lerde yaşanan enerji krizinin ardından güneş enerjisinin kullanımı artırmıştır. Güneş enerjisi, dünyada olduğu gibi Türkiye'de de enerji talebinin bir kısmının karşılanması için ciddi olarak değerlendirilmektedir (Sözen ve ark., 2005).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen Güneş tüm enerjilerin kaynağıdır. Günümüzde artmakta olan enerji maliyetleri ve enerji talebi araştırmacıları alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya ve verim artırılması için çalışmalar yapmaya teşvik etmektedir. Güneş enerjisi bolluğu ve çok yüksek enerji taleplerini karşılayabilme kapasitesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici olanıdır. Bu amaçla, güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için fotovoltaik (PV) güneş hücreleri geliştirilmeye devam etmektedir. Güneş ışığı, konut ve ticari binaların ısıtılması ve aydınlatılması için doğrudan kullanılabilir. Güneşin ısısı, sıcak su ısıtma, güneş enerjisiyle soğutma ve diğer ticari kullanımlar için değerlendirilebilir. Güneş ısısı, güneş

termal elektrik gücü adı verilen bir teknoloji kullanılarak elektrik üretmek için de kullanılabilir. Güneş ışığı fotovoltaik (PV) güneş hücreleri kullanılarak doğrudan elektriğe dönüştürülebilir. Diğer birçok yenilenebilir enerji türü, dolaylı olarak güneş tarafından desteklenmektedir. Tüm bunlara rağmen önemi bu kadar yüksek olan güneş enerjisinin yüksek yatırım maliyetleri ülkemizde yeterince yaygınlaşmamasın temel sebebidir.

1.1. Güneş Hücre Türleri

Güneş hücreleri temel olarak, ışık enerjisini elektron hareketi yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır (Lingamallu ve Kanaparthi, 2013). Güneş hücreleri, genellikle kaplandıkları yarı iletken malzemeden sonra adlandırılır. Bu malzemelerin güneş ışığını absorbe edebilmesi için belirli özelliklere sahip olması gerekir. Bazı hücreler, dünya yüzeyine ulaşan güneş ışığını işlemek için tasarlanırken, diğerleri uzayda kullanım için optimize edilmiştir. Güneş hücreleri, çeşitli soğurma ve yük ayırma mekanizmalarından yararlanmak için yalnızca tek bir ışık emici malzeme tabakasından (tek bağlantı) yapılabilir veya çoklu fiziksel konfigürasyonlar (çoklu bağlantı) kullanılabilir. Güneş hücreleri birinci, ikinci ve üçüncü nesil hücreler olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 1.1 Güneş hücresi türleri

1.1.1. Birinci nesil güneş hücreleri

Birinci nesil güneş hücreleri, esas olarak güneş hücre pazarına hâkim olan, geleneksel silikon bazlı fotovoltaik hücrelerdir. Monokristal ve polikristal güneş hücresi bu gruba dâhildir. Birinci nesil güneş hücreleri yüksek verimliliğe sahip olmakla birlikte, yüksek üretim maliyetleri ve yüksek teknoloji gerektiren üretim koşullarının karmaşıklığı gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Birinci nesil güneş hücrelerinin bu dezavantajları ikinci nesil güneş hücreleri ile giderilmeye çalışılmıştır (Sharma ve ark., 2015).

Adından da anlaşılacağı gibi mono kristal güneş hücresi, Czochralski (Sharma ve ark., 2015) adı verilen bir işlemle tek silikon kristallerinden üretilir. Üretim sürecinde büyük boyutlu külçelerden Si kristalleri dilimlenir. Tek kristal üretimleri, çoklu işlem olduğundan hassas işlem gerektirir. Tek kristalli silikon güneş hücrelerinin verimliliği %17 ila %18 arasındadır (Sui ve ark., 2021).

Polikristalin PV modülleri ise genellikle tek bir hücrede birbirine bağlanmış birkaç farklı kristalden oluşur. Erimiş silikon içeren bir grafit kalıbın soğutulmasıyla üretilen çok kristalli Si güneş hücrelerinin işlenmesi daha ekonomiktir. Polikristal Si güneş hücreleri şu anda en popüler güneş hücreleridir. 2008'de dünya çapındaki güneş hücreleri üretiminin yaklaşık %48'ini oluşturmaktadır (Saga, 2010). Üretimi monokristal silikon güneş panellerine kıyasla biraz daha ucuz olmasına rağmen yaklaşık %12 - %14 verimliliğindedir (Saga, 2010).

1.1.2. İkinci nesil güneş hücreleri

İkinci nesil güneş hücreleri, birinci nesil güneş hücrelerinin dezavantajlarının üstesinden gelmek için önerilmiştir. Bunlar temel olarak ince film güneş hücreleridir. İnce film güneş hücreleri, daha ucuz üretim teknikleri gerektirir. Ancak öte yandan silikon bazlı güneş hücrelerine göre daha düşük verim sergilerler. İnce film tabanlı güneş hücreleri, amorf silikon (a-Si), Cd-Te, Ga-As ve CIGS gibi bazı geçiş metallerinin üretimini ve modifiye edilmesini içerir. Bu ikinci grup güneş hücrelerinin bazı avantajlı yanları olsa da güneş hücrelerinin üretim sürecinde kullanılan hammaddelerin yüksek maliyetli, çevre ve insan sağlığına zararlı olduğunu belirtmek önemlidir.

İkinci nesil amorf Si (a-Si) PV modülleri, endüstriyel olarak üretilen güneş hücreleridir. Amorf (a-Si) güneş hücreleri, düşük bir işleme sıcaklığında üretilebilir, böylece çeşitli düşük maliyetli, polimer ve diğer esnek alt tabakaların kullanımına izin

verir. Bu alt tabakaların işlenmesi için daha az miktarda enerji gerekir (Choubey ve ark., 2012). Bu nedenle, a-Si güneş hücresi nispeten daha ucuzdur ve yaygın olarak bulunur. Güneş hücresi ile ilgili olarak “amorfl” kelimesi, hücrenin silisyum maddesinin kafes içinde belirli bir atom dizilişine sahip olmaması, kristal olmayan bir yapı veya yüksek düzeyde yapılandırılmamış olması anlamına gelir. Bunlar, katkı silikon malzemenin alt taşının/cam plakanın arka tarafına kaplanmasıyla üretilir. Bu güneş hücreleri genellikle yansıtıcı tarafta koyu kahverengi, iletken tarafta ise gümüş rengindedir. a-Si güneş hücresinin ana sorunu, zayıf ve neredeyse kararsız verimliliğidir. Hücre verimliliği otomatik olarak PV modülü seviyesinde de düşer. Şu anda ticari PV modüllerinin verimlilikleri %4 ila %8 aralığında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda rahatlıkla çalıştırılabilirler ve güneşin birkaç saat görüldüğü iklim koşullarına uygundur.

İnce film güneş hücreleri arasında kadmiyum tellür (CdTe) ise, daha ucuz ve ekonomik PV cihazların geliştirilmesi için önde gelen adaylardan biridir ve aynı zamanda düşük maliyetli ilk PV teknolojisidir. CdTe ~1.5 eV'luk bir bant aralığına, ayrıca yüksek optik absorpsiyon katsayısına ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Bu özellikler, CdTe'yi ince film güneş hücrelerinin tasarımı için en çekici malzemelerden biri haline getirmiştir (Badawy, 2015).

1.1.3. Üçüncü nesil güneş hücreleri

Üçüncü nesil hücreler yeni umut verici teknolojilerdir. Bu grup aynı zamanda eksitonik güneş hücreleri olarak da adlandırılır. Eksitonik güneş hücreleri farklı çalışma prensiplerine sahiptir ve nanokristal, boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC) ve organik/polimer güneş hücreleri olarak da kategorize edilebilirler. Bunlardan şu anda DSSC'ler ticari olarak üretilmekte olsa da bu teknoloji de henüz tamamen olgunlaşmış değildir. Üçüncü nesil güneş hücreleri hala gelişime açık ve geliştirilen bir teknolojidir (Badawy, 2015).

Nanokristal bazlı güneş hücreleri genellikle kuantum noktalı (KN) güneş hücreleri olarak da bilinir. Bu güneş hücreleri, genellikle yarı iletken malzemelerden yapılmış nanokristal aralığındaki geçiş metal gruplarından oluşur. KN, tipik olarak birkaç nanometre boyutunda değişen kristal boyutunun adıdır. Nanoteknolojinin ilerlemesiyle birlikte, yarı iletken malzemelerin yığın halindeki yarı iletken malzemenin yerini alması beklenmektedir (Hoppe ve Sariciftci, 2007). Genel olarak, nanokristaller Si alt taş üzerine

kaplanır. Bu kristaller merkezkaç kuvveti nedeniyle çok hızlı döner. Geleneksel bileşik yarı iletken güneş hücrelerinde, genellikle bir foton, bir elektron delik çifti oluşturarak oradaki bir elektronu uyarır. Bununla birlikte, bir foton benzer yarı iletken malzemeden yapılmış bir KN' ya çarptığında, çok sayıda elektron delik çifti oluşturabilmektedir (Dubey ve ark., 2013).

Polimer ya da organik güneş hücreleri (OGH), polimer yarıiletkenlerin kullandığı genellikle esneklik avantajlarına sahip güneş hücreleridir. Bir OGH, bir polimer folyo veya şerit üzerine kaplanmış, seri olarak bağlanmış ince işlevsel katmanlardan oluşur. Genellikle bir verici (polimer) ve bir alıcı (fulleren) kombinasyonu olarak çalışır. OGH fotovoltaiik etki ile dönüşümünün gerçekleştiği prensipte çalışır. Yu ve ark. ilk polimer güneş hücresini geliştirmek için yığın poli [2-metoksi-5-(2'-etilheksiloksi)-p-fenilen vinilen] (PPV), C60 ve diğer türevleri ile yüksek bir güç dönüştürme verimliliği elde etmiştir (Sui ve ark.) Bu süreç, güneş enerjisini yakalamak için polimer malzemelerde yeni bir çağın gelişimini tetiklemiştir. Araştırmacılar, parametreleri önemli ölçüde optimize ettikten sonra, PPV tipi OGH' leri için %3,0' ın üzerinde verimlilik elde etmişlerdir (Sharma ve ark., 2015). OGH' lerinin bu benzersiz özellikleri, tekstil ve kumaşlar dâhil olmak üzere giyilebilir güneş enerjisi cihazlarının oluşumunda yeni uygulamalar için yeni bir kapı açmıştır

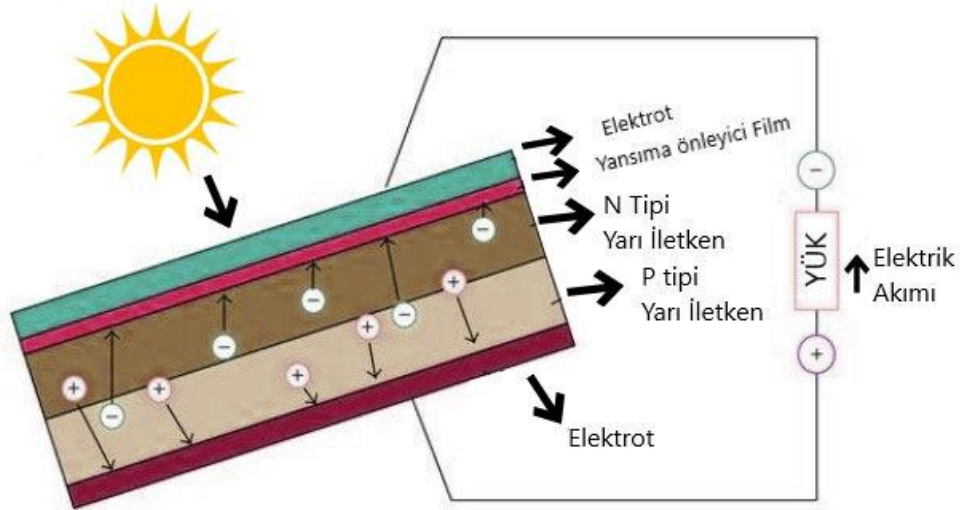
Son araştırmalar, moleküler ışık enerjisi için nanoteknolojinin kullanımı yoluyla güneş verimliliğini geliştirmeye odaklanmıştır. İlk DSSC güneş hücresi, İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsünde Michel Gratzel tarafından üretilmiştir (Grätzel, 2001). DSSC' lere dayalı güneş hücreleri genellikle farklı elektrotların arasında boya molekülleri kullanılması ile üretilmektedir. DSSC güneş hücreleri dört bileşenden oluşur: yarı iletken elektrot (n-tipi TiO_2 ve p-tipi NiO), bir boya duyarlılaştırıcı, redoks aracı ve bir karşı elektrot (karbon veya Pt) (Ossai ve ark., 2021). Baskı teknikleri gibi basit geleneksel işleme yöntemleri nedeniyle cazip olan DSSC' ler, oldukça esnek, şeffaf ve aynı zamanda düşük maliyetlidir. DSSC güneş hücrelerindeki yenilik, optik olarak aktif boyalarla birleştirilmiş nano tanecikli TiO_2 kaplamaların ışığa duyarlı hale getirilmesinden kaynaklanmaktadır, böylece verimlilik %10'dan fazladır (Liang ve ark., 2007). Bununla birlikte, boya moleküllerinin bozulması ve dolayısıyla stabilite sorunları gibi belirli zorluklar vardır. Bunun nedeni, hassaslaştırıcıların zayıf optik absorpsiyonudur ve bu da zayıf dönüşüm verimliliği ile sonuçlanır. Boya molekülleri genellikle ultraviyole ve kızılötesi radyasyonlara maruz kaldıktan sonra bozularak hücrelerin ömrünün ve stabilitesinin azalmasına neden olmaktadır (Chen ve ark., 2022).

Konsantre fotovoltaik (CPV) güneş hücresi araştırma ve geliştirme alanındaki en yeni teknolojidir (Mohanta ve ark., 2015). Konsantre hücrelerin ana prensibi, büyük miktarda güneş enerjisinin PV güneş hücresi üzerindeki küçük bir bölgede toplanmasıdır. Bu teknolojinin prensibi, güneş ışınlarını güneş hücresi üzerinde küçük bir bölgeye odaklamak için büyük aynalar ve lens düzenlemesi kullanan optiğe dayanmaktadır (Barnes ve ark., 2009). Güneş ışığı radyasyonlarının yakınsaması bu nedenle büyük miktarda ısı enerjisi üretir. Bu ısı enerjisi ayrıca entegre bir güç jeneratörü tarafından kontrol edilen bir ısı motoru tarafından tahrik edilir. Mercek sistemlerinin gücüne bağlı olarak düşük, orta ve yüksek yoğunluklu güneş hücreleri olarak sınıflandırılabilir (Philipps ve ark., 2015). Konsantre fotovoltaik teknolojisi herhangi bir hareketli parça olmaması, termal kütle olmaması, hızlı tepki süresi gibi avantajlara sahiptir.

1.2. Güneş Hücreleri

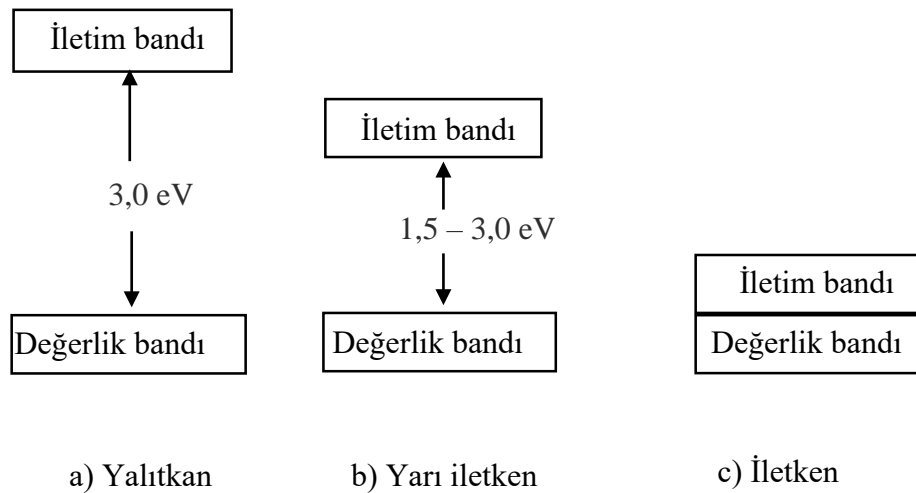
Fransız fizikçi Edmond Becquerel, fotovoltaik hücrelerin deneysel olarak gösteren ilk kişiydi. 1839'da henüz 19 yaşındayken babasının laboratuvarında ilk fotovoltaik hücreyi üretti. İlk güneş hücresi, 1954 yılında Calvin Souther Fuller, Daryl Chapin ve Gerald Pearson tarafından Bell Laboratuvarlarında icat edilmiştir.

Güneş hücresi temel olarak güneş ışığını fotovoltaik etki yoluyla elektriğe dönüştüren bir cihazdır. Güneş ışığının fotonları iletken elektrotunu aydınlattığında, güneş hücresinin aktif tabakası tarafından soğurularak elektron-boşluk çifti aktive edilir. Daha sonra taşıyıcılar, elektrik akımının akmasına neden olan bu elektron boşluğu çiftini hareket ettirir.



Şekil 1.2. Basit bir güneş hücresinin çalışma prensibi (Husain ve ark., 2018)

Bir güneş hücresi ışığı absorbe ederek ışık enerjisini elektrik enerjisine çeviren cihazdır. Bu kavramda maddenin iletkenliği atomun değerlik veya en dıştaki kabukta bulunan elektronlarla belirlenir. Bu elektronlar malzemenin kimyasal özelliklerinden sorumlu olup diğer elementlerle kimyasal olarak etkileşime girenlerdir. Bir malzemenin iletkenliği, iletim bandı (LUMO) ile değerlik bandı (HOMO) arasındaki farkla belirlenir. Bant aralığı (E_g) olarak bilinen bu seviyeler arasındaki fark, elektronvolt (eV) olarak tanımlanır.



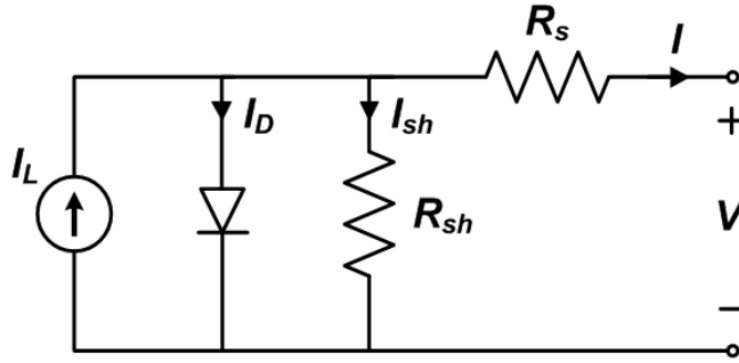
Şekil 1.3. İletkenlik durumuna göre enerji seviyeleri

- İletken, Bant aralığı $< 1,0$ eV
- Yarı iletken, Bant aralığı $< 1,5 - 3,0$ eV
- Yalıtkan, Bant aralığı $> 3,0$ eV (Dey ve ark., 2016)

Aynı enerji seviyelerine sahip elektronlar, iletken malzemelerden yalıtkanlara kadar değişen enerji bantları oluşturur. İletkenlerde, işgal edilen en yüksek enerji seviyesi bir enerji bandının ortasındayken, yarı iletkenlerde işgal edilen en yüksek enerji seviyesi, değerlik bandı enerji seviyesinin hemen altına yerleşir. Güneşten dalga şeklinde gelen fotonlar, elektronları yarı iletkenlerin değerlik bandından iletkenlik bandına uyararak eksiton adı verilen elektron-boşluk çiftlerini oluşturur. Bununla birlikte, yalıtkanlar için enerji aralığı oldukça geniştir, bu nedenle elektron iletimini sağlayamazlar (Chen, 2011).

1.3. Güneş Hücresi Eş Değer Devresi

Bir güneş hücresinin, dizisinin veya modülünün I-V eğrisi, eşdeğer devre modeli ile temsil edilir. Fiziksel prensiplere dayanan ve bir güneş hücresi için Şekil 1.4' deki diyot modeli, sıklıkla kullanılan bir temel eşdeğer devre modelidir.



Şekil 1.4. Eşdeğer güneş hücresi devre modeli(Zhang ve ark., 2022)

İlk eklemdeki akımı hesaplamak için, Kirchoff'un mevcut yasası şunu belirtir (Zhang ve ark., 2022):

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (1.1)$$

I_L , I_D ve I_{SH} sırasıyla güneş hücresinin fotoakımı, diyot akımı ve şönt akımıdır.

Paralel gerilimler eşit olduğundan, diyot üzerindeki gerilim şu şekilde tanımlanabilir:

$$V_D = I_{SH} \times R_{SH} \quad (1.2)$$

Çıkış voltajı olarak verilen diyot voltajı

$$V_D = V \times I_{RS} \quad (1.3)$$

İdeal bir diyottaki Shockley denklemi, diyot akımını şu şekilde belirtir:

$$I_D = I_0 \times \left[\exp\left(\frac{V+I_{RS}}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

I' in doyma akımı olduğu yerde, n bir diyot için ideallik faktörüdür, R_S toplam seri direnç ve V_T termal voltajdır. İdeal bir diyot için n=1 olmalıdır, yani diyot boyunca rekombinasyon yoktur. Ancak gerçekte idealite faktörü 1 ile 2 arasındadır.

Yani V_T şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_T = \frac{K_B T}{q} \quad (1.5)$$

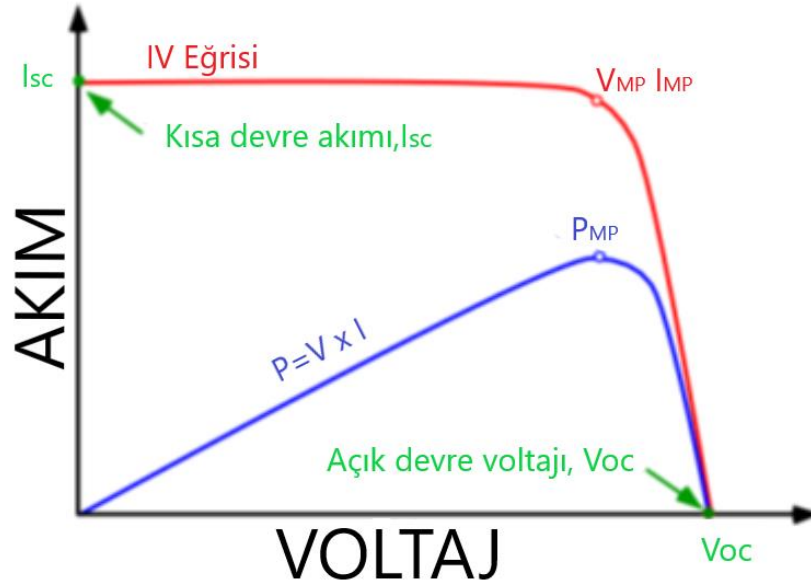
Burada q temel yük, K_B Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır. Bu denklemler birleştiğinde, çıkış akımı aşağıdaki denklem şeklinde ifade edilebilmektedir.

$$F = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(v+I_{RS})}{k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V+I_{RS}}{R_{SH}} \quad (1.6)$$

1.4. Güneş Hücreleri Verim Hesabı

Bir güneş hücresinin ışıktan güç üretme yeteneği, onun temel özelliğidir. Gelen ışık gücünün elektrik çıkış gücüne oranı, enerji dönüştürme verimliliği (EDV) olarak adlandırılır. Güneş hücresi verimliliği, karakteristik akım ve gerilim (I-V) eğrileriyle belirlenir. Normal koşullar altında çalışan güneş hücresinin I-V grafiği Şekil 1.5'de gösterilmektedir. Bir güneş hücresinin, açık devreden kısa devreye kadar olan tüm gerilimleri çizildiğinde güç eğrisi elde edilir.

$$n = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \times V_m}{P_{in}} \quad (1.7)$$



Şekil 1.5. Akım-gerilim eğrisi

Güneş hücresi herhangi bir yüke bağlı olmadığında yani açık devre olduğunda akım sıfır olacaktır ve güneş hücresi üzerindeki açık devre voltajı (V_{oc}) olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan, güneş hücresindeki pozitif ve negatif uçlar birbirine bağlandığında gerilim en düşük noktasında (sıfır), hücreden çıkan akım ise en yüksek noktasındadır. Buna güneş hücresi kısa devre akımı veya I_{sc} denir. Doldurma faktörü (FF), PV hücrelerinin verimliliğini anlamak için bir başka önemli parametredir (El-Ahmar ve ark., 2016).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (1.8)$$

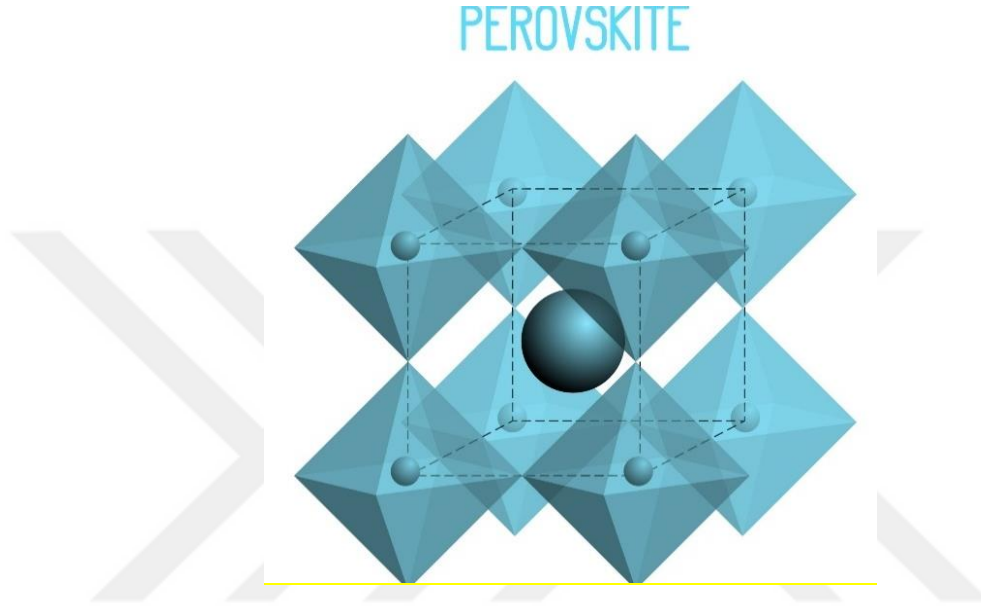
Bu sayede elde edilebilecek gerçek en büyük gücü ölçer. Daha yüksek bir doldurma faktörü, verimliliğin artmasına ve şönt direncinin (R_{sh}) artırılması ve seri direncin (R_s) düşürülmesiyle hücrenin çıkış gücünün teorik maksimum değerine yaklaşmasına neden olur.

1.5. Perovskit Güneş Hücreleri

Doğal bir mineral olan kalsiyum titanat ($CaTiO_3$), Rusya'nın klorit açısından zengin dağı olan Ural dağlarında Gustav Rose tarafından 1939 yılında keşfedilmiştir. Bu mineral adını Rus mineralog Lev Perovski'den almıştır. Perovskitenin yapısı, $CaTiO_3$ ile

aynı kristal yapıya sahip bir malzemeyi ifade eder (Liu ve ark., 2019). İdeal bir kübik yapıya sahip olan perovskite genel olarak ABX_3 yapısına sahiptir. Burada “A” tek değerlikli bir katyon, “B” iki değerlikli bir katyon ve “X” her ikisine de bağlanan bir anyondur. Perovskit güneş hücreleri için 'A' genellikle metilamonyum (MA, CH_3NH_3) veya formamidinyumdur (FA, $CH(NH_2)_2$), 'B' genellikle kurşundur (Pb_2) ve 'X' genellikle iyot (I), brom (Br-) veya klor (Cl-) gibi halojenürdür (Li ve ark., 2018).

İdeal perovskit yapısı Şekil 1.6’da görülmektedir.



Şekil 1.6. Perovskit yapısı

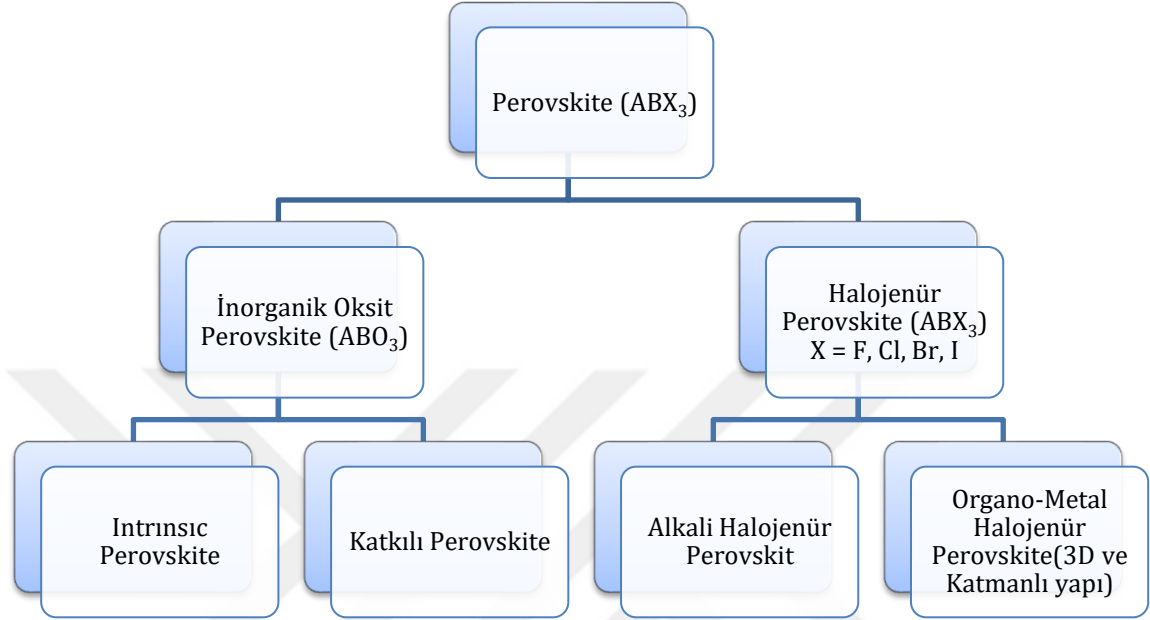
Perovskit’ nin kristalografik yapısı ve kararlılığı, aşağıda formülü verilen Goldschmidt tolerans faktörü t ile belirlenir (Green ve ark., 2014).

$$t = \frac{r_A + r_X}{\sqrt{2}(r_B + r_X)} \quad (1.9)$$

Bu formülde r_A , r_B ve r_X iyonların etkin yarıçaplarını temsil eder. Perovskit kristalleri için tolerans faktörü $0,8 \leq t \leq 1$ aralığındadır, burada t ’nin 1 olması mükemmel bir kübik sistemi gösterir. $t < 0,8$ koşulu, A bölgesi katyonunun çok küçük olduğu anlamına gelirken, $t > 1$ koşulu, A katyonunun çok büyük olduğu anlamına gelir. Her iki koşul da perovskite oluşumunu belirler ve farklı kristal yapılara yol açmaktadır (Travis ve ark., 2016).

Perovskitlerin çeşitli avantajları vardır. A, B ve X iyonlarını değiştirerek birçok farklı yapı oluşturma olasılığı, Şekil 1.7’de gösterildiği gibi büyük bir perovskit ailesi oluşturur. Bu olay perovskitlerin bant boşluklarının A, B ve X bileşiklerini değiştirerek ayarlanabilmesi gerçeğini ortaya koymaktadır (Gao ve ark., 2014). Perovskitlerin bant

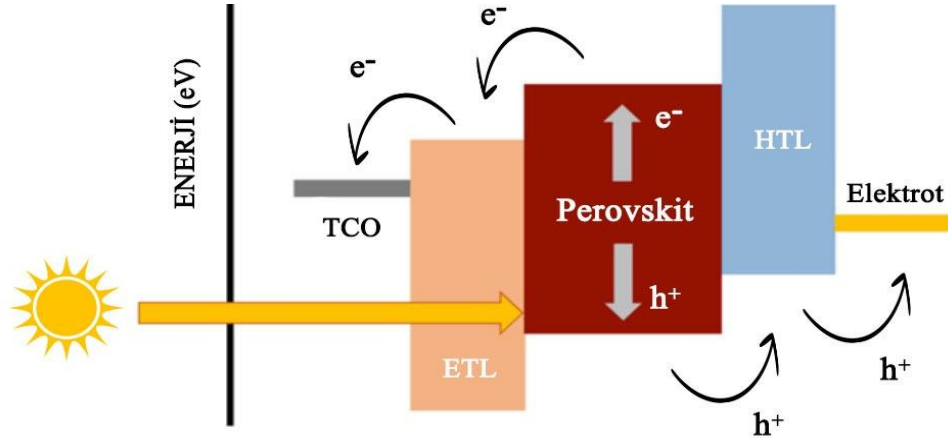
aralıkları sayesinde, düşük uyarma bağlama enerjisi, yüksek dielektrik sabiti ve yüksek absorpsiyon katsayıları gibi benzersiz özelliklerinden dolayı, güneş hücreleri, lazerler (Xing ve ark., 2014), ışık yayan diyotlar (Yu ve ark., 2016), transistörler gibi çeşitli optoelektronik uygulamalar için kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.7. Perovskit ailesi

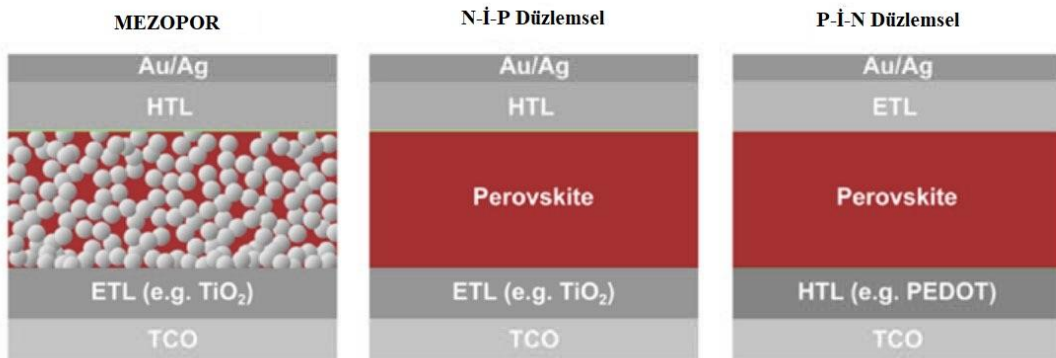
1.6. Perovskit Güneş Hücreleri Çalışma Prensibi ve Yapısı

Perovskit güneş hücreleri (PGH), p-n bağlantılı güneş hücrelerine benzer şekilde çalışmaktadır. PGH' leri ışığa maruz kaldığında, perovskit tabakası, bant aralığına uyan dalga boyundaki fotonları emer. Fotonların absorpsiyonu ile elektronlar perovskit ait iletim bandına uyarılır ve aynı zamanda değerlik bandında yük taşıyıcıları olarak kabul edilen boşluklar bırakır. Bu elektronlar ve boşluklar, elektron taşıma katmanı (ETL) ve boşluk taşıma katmanı (HTL) tarafından toplanır. Serbest elektronlar perovskit tabakasından ETL' ye geçer ve genellikle indiyum kalay oksit (ITO) veya flor katkılı kalay oksit (FTO) olan şeffaf iletken okside (TCO) ulaşır. Bununla eş zamanlı olarak, boşluklar HTL' ye gider ve metal elektrota ulaşır. TCO ve metal elektrotlar bağlanır, bu da fotoakımı oluşturan harici devre boyunca elektron akışı ve sonunda elektronların ve boşlukların rekombinasyonu ile sonuçlanır (Saliba ve ark., 2018).



Şekil 1.8. Perovskite güneş hücrelerinde elektron ve boşluk durumu (Wang ve ark., 2019)

PGH' leri mezogözenekli ve düzlemsel yapılarda üretilebilir. Mezogözenekli yapıda, perovskit malzeme, mezogözenekli bir metal oksit iskelet yapısına katmanına bağlıdır. Bu iskeletin amacı, fotojenlenmiş elektronların ETL' ye transferine yardımcı olmaktır. Bu yapı oluşumunda işlem süreçleri yüksek sıcaklıkta altında yapılmaktadır. Mezogözenekli cihaz yapısı ilk keşiflerde yaygın olarak kullanılsa da son zamanlarda basitliği nedeniyle düzlemsel yapı daha fazla ilgi görmektedir. Tipik düzlemsel cihaz yapısı, TCO ve metal elektrotlarla HTL ve ETL arasında sıkıştırılmış bir perovskit soğurucu katmandan oluşur. Düzlemsel yapı iki farklı konfigürasyona sahip olabilir. Düzenli (n-i-p) düzlemsel yapıda, n-tipi ETL, TCO' nun üzerine kaplanır ve ışık önce ETL' ye ulaşırken, ters (p-i-n) yapıda, p-tipi HTL, TCO' nun üzerine kaplanır ve ışık önce HTL' ye ulaşır (Wang ve ark., 2019).

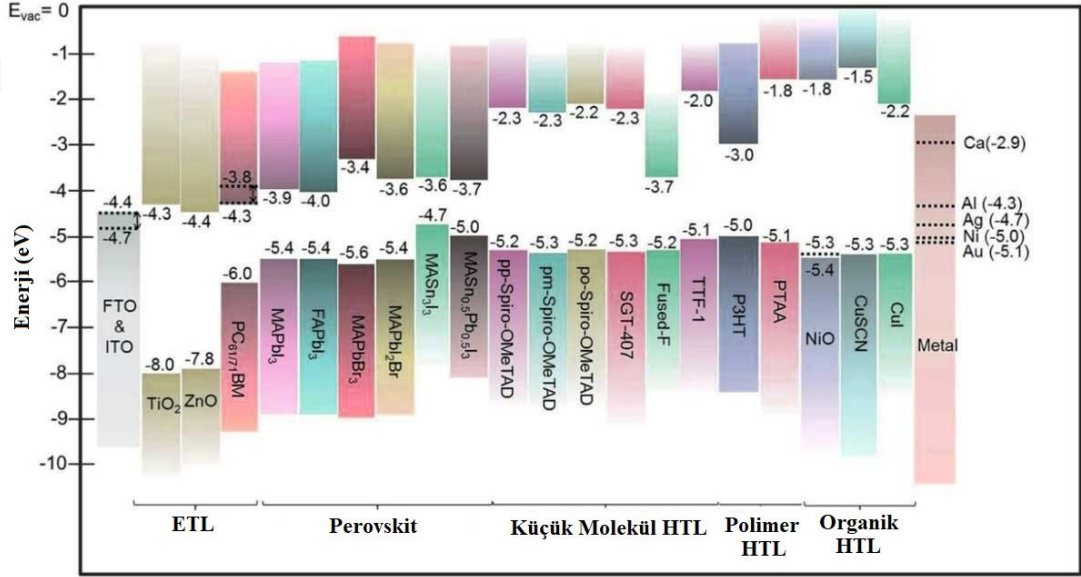


Şekil 1.9. Perovskit güneş hücrelerinin farklı yapıları (Cheng ve ark., 2020)

Hücre performansı, taşıma katmanlarının seçimi ile büyük ölçüde ilişkilidir. Verimli yük geçişi ve iyi taşıma özelliklerine sahip taşıma katmanları, yüksek

performanslı bir hücreye yol açar. İyi bir taşıma katmanı, perovskit ile düzgün bant dizilimi, görünür bölgede yüksek geçirgenlik, yüksek taşıyıcı hareketliliği, yüksek stabilite, kolay ve düşük maliyetli işlenebilirlik gibi özelliklere sahip olmalıdır (Cheng ve ark., 2020). ETL, delik aktarımını bloke ederken, fotojenlenmiş elektronları perovskit' ten TCO' ya veya metal elektrota gönderir. Ayrıca ETL, perovskit filmin yüzey modifikasyonunda ve yük rekombinasyonunun hafifletilmesinde rol oynar (Mohamad Noh ve ark., 2018). Elektron taşınmasını kolaylaştırmak ve yerleşik potansiyeli artırmak için ETL' nin perovskit ile uyumlu enerji seviyelerine sahip olması gerekir (Zheng ve ark., 2019). En yaygın kullanılan ETL' ler, n-i-p yapısı için titanyum dioksit (TiO_2) ve kalay oksittir (SnO_2) ve p-i-n yapısı için [6,6]-fenil-C61-bütirik asit metil esterdir ($PC_{61}BM$). Bu malzemelerin dışında fulleren ve türevleri, metal oksitler, küçük organik moleküller ve polimerler de ETL olarak kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2018). ETL' lerin elektron çıkarma ve taşıma özellikleri, pasivasyon ve katkı maddeleri veya nanopartiküller kullanılarak daha da geliştirilebilir.

HTL ise, elektron taşınmasını bloke ederken, perovskit' den metal elektrota veya TCO' ya fotojenlenmiş boşluklar taşır. Kontakta yük geçindeki artışa ve açık devre voltajının artmasına neden olan yük rekombinasyonunu azaltır (Wang ve ark., 2018). Ek olarak HTL, neme dayanıklı bir katman veya metal iyonu difüzyon bariyeri görevi görebileceğinden hücrenin bozulmasını önleyebilir (Kung ve ark., 2018). Ayrıca, perovskite tabakasının daha iyi kaplanmasını kolaylaştırır. En sık kullanılan HTL' ler, n-i-p yapısı için Spiro-OMeTAD ve poli[bis(4-fenil) (2,5,6-trimetilfenil)amin] (PTAA) ve p-i-n yapısı için ise poli (3,4-etilen dioksitiyofen):poli (4-stirensülfonat) (PEDOT:PSS)'tir. Bu malzemelerin yanı sıra küçük moleküller, polimerler ve inorganik moleküller de HTL olarak kullanılır (Chueh ve ark., 2015).



Şekil 1.10. Çeşitli ETL' lerin ve HTL' lerin enerji seviyelerinin şematik gösterimi (Chueh ve ark., 2015)

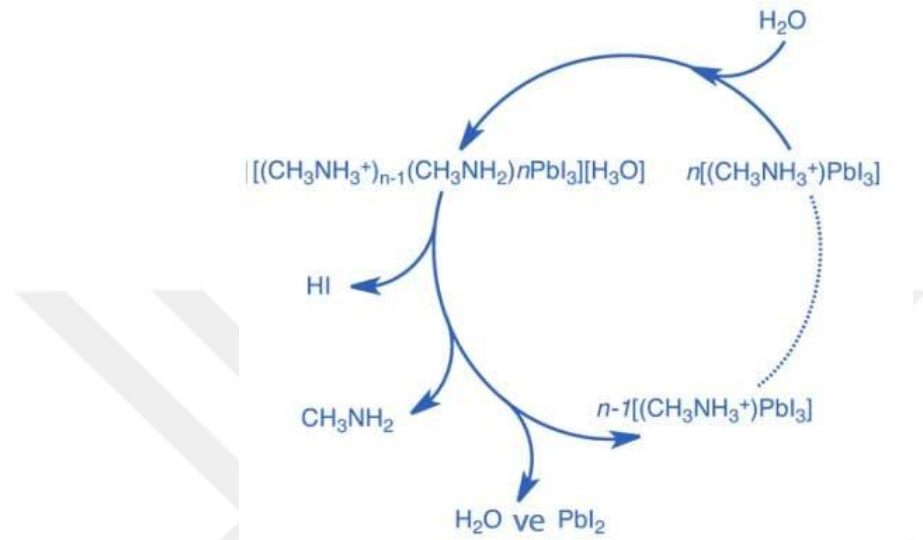
1.7. Perovskit Güneş Hücrelerindeki Bazı Zorluklar

Perovskit güneş hücrelerinin tüm avantajlarına rağmen, hala aşılması gereken bazı problemleri vardır. PGH' lerinin ana problemi, perovskitlerin kararsız olmasıdır. Perovskitler hava, nem, ısı ve ışıktan etkilenebilen oldukça hassas malzemelerdir. En kararlı PGH' sinin bir yıllık ömrü olduğu bildirilirken, silikon güneş hücreleri için bu süre 25 yıldan fazladır (Grancini ve ark., 2017). Diğer önemli bir problem ise, güneş hücrelerinin J-V ölçümü sırasında gözlemlenen histerezis olgusudur. Ticarileştirmeye yol açabilecek kararlı ve histerezis içermeyen PGH' leri elde etmek için günümüzde araştırmalar ve çalışmalar halen devam etmektedir.

1.7.1. Stabilite

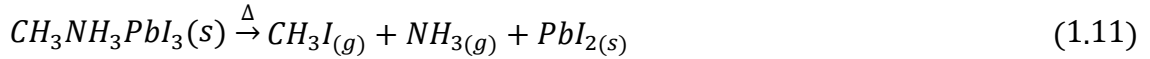
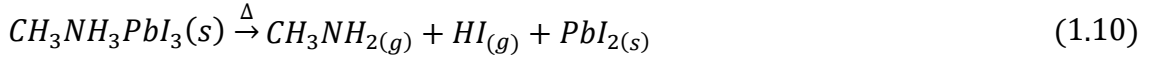
Güneş hücrelerinin kararlılığı, yüksek sıcaklıklarda hafif ıslatma, sıcaklık döngüsü (-40 ila 85 °C), termal ve bağıl nem gibi standart testlerle belirlemektedir. Ayrıca, ince film fotovoltaiik hücrelerin standartlarına göre verimlilik kayıpları, ilk ölçümden 1000 saatlik bir süre sonra tekrar ölçüldüğünde ilk verimlerinin maksimum %10' u kadar azalacak şekilde olmalıdır (Reese ve ark., 2011). Perovskit güneş hücreleri, hem içsel kararsızlığın hem de ortam koşullarına bağlı dışsal kararsızlığın neden olduğu kararlılık sorunlarından etkilenmektedir (Osterwald ve McMahon, 2009). Oksijen ve nemnin neden olduğu dışsal kararsızlık aynı zamanda ışık, ısı ve elektriksel gibi olayların

neden olduğu içsel kararsızlık, PSC'lerin bozulmasına yol açabilmektedir. Nem, perovskit yapısındaki hidrojen bağlarını kıran ve perovskit malzemesinin bozulmasına neden olan hidratlı bileşikler oluşturan kimyasal reaksiyonları indükler. Kimyasal reaksiyonlarla birlikte $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) perovskit için önerilen bozunma süreci Şekil 1.11'de gösterilmektedir (Frost ve ark., 2014).



Şekil 1.11. Perovskit' nin neme bağlı bozunma diyagramı (Frost ve ark., 2014)

Bu reaksiyonlar tersine çevrilebilir olsa da, perovskit nem tarafından doymun hale geldiğinde işlem geri döndürülemez olacak ve MAPbI_3 bileşiği MAI ve PbI_2 'ye parçalanacaktır (Frost ve ark., 2014). PGH'lerinin nem direncini artırmak için nemi bloke eden bir HTL kullanmak, perovskit ve HTL arasında ince bir blokaj tabakası kullanmak veya hidrofobik karbon elektrot kullanmak gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ortamdaki oksijen perovskit yapısındaki MA^- , Pb^+ , I^- iyonları ile reaksiyona girerek yük bariyerleri oluşturur. Dahası, oksijen molekülleri, film yüzeyinde PGH'lerinin bozulmasına yol açan Pb-O bağları oluşturabilir (Mazumdar ve ark., 2021). Nemin yanı sıra oksijenin zararlı etkileri, PGH'lerinin kapsüllenmesiyle büyük ölçüde azaltılabilir. Isı ayrıca, aşağıdaki denklemde görüleceği üzere, perovskite bozulmasının tersinir ve tersinmez kimyasal reaksiyonlarını da indükler. MAPbI_3 perovskit yapısı, inert bir atmosfer altında $85\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ayrıştırılabilir. Ayrıca, yaklaşık $54\text{-}57\text{ }^\circ\text{C}$ 'de, MAPbI_3 , tolerans faktörünü (t) değiştirerek tetragondan kübik bir faz geçişi yaşar. T değeri optimum aralığın dışına çıkarsa, termal etkiler kafes bozulmasından dolayı bozulmaya neden olabilir. Yaygın olarak kullanılan HTL Spiro-OMeTAD dâhil olmak üzere organik HTL'lerin çoğu, termal kararsızlıktan etkilenmektedir (Duan ve Uddin, 2022).



MAPbI₃ perovskit ayrıca hafif aydınlatma ile indüklenen bir fotokimyasal bozunmaya da maruz kalabilir. Yüksek enerjili fotonlar, MAPbI₃'ün PbI₂ ve MAI' ye ayrışmasına yol açan MAPbI₃ perovskit' deki kimyasal bağları kırabilir. Işık aydınlatması yalnızca perovskiti ayrıştırmakla kalmaz, aynı zamanda cihaz yapısında kullanılan Spiro-OMeTAD gibi bazı malzemeleri de bozmaktadır (Duan ve Uddin, 2022).

Günümüzde kapsülleme, perovskit malzemelerin bileşim mühendisliği, çok boyutlu perovskitler, çözücü mühendisliği, arayüzey mühendisliği ve pasivasyon gibi PGH' lerinin uzun vadeli kararlılığını artırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

1.8. Organik Güneş Hücreleri (OGH)

Organik fotovoltaikler, güneş ışığı enerjisini elektriğe dönüştürmek için polimerler ve küçük moleküller gibi organik malzemeleri kullanan cihazlardır. Organik malzemeler, sınırsız erişilebilirliğe sahip çevre dostu malzemelere dayalı enerji üretimi için ekonomik olarak mümkün olan kalıcı bir teknolojiyi geliştirme potansiyeline sahiptir (Lu ve ark., 2015). Organik güneş hücreleri ilk olarak tek katmanlı olarak üretilmiş, ancak tek katmanlı organik güneş hücrelerinden yüksek verim alınmasında bazı sorunlar yaşanmıştır. İki elektrot arasındaki n-tipi veya p-tipi organik malzeme, tek katmanlı organik güneş hücreleri yük üretimi için yetersiz olmuştur (Kim ve ark., 2014). Ek olarak, ortaya çıkan yüklerin ayrılma verimliliğinin çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle ilerleyen zamanlarda çift katmanlı güneş hücreleri çalışılmaya başlanmıştır. İki katmanlı organik güneş hücrelerinde hem konjuge polimer hem de fulleren türevi yapıların donör ve alıcı katmanlar olarak kullanılması, yük ayırımının etkinliğini artırmasına rağmen, yüklerin elektrotlara iletilmesinde sorunlar yaşanmaya devam etmekteydi (Park ve ark., 2009). Bu, konjuge polimerleri ve fullerenleri aktif bir katmanda karıştırarak toplu hetero eklemli organik güneş hücrelerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

1.8.1. Tek Katmanlı Organik Güneş Hücreleri

En eski organik güneş hücresi, farklı çalışma fonksiyonlu elektrotlara sahip iki metal arasına sıkıştırılmış tek bir foto iletken malzemeye dayanmaktadır (Kearns ve Calvin, 1958). Organik bir hücrede, organik hücrenin simetrisi nedeniyle bir Schottky

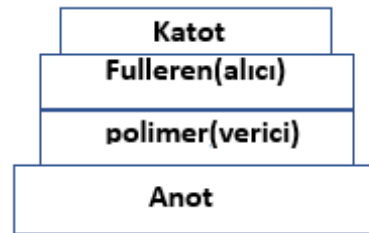
bariyer oluşumuyla sonuçlanan bir fotovoltaiik etki ortaya çıkabilir. Bu bariyer, p-tipi (delik taşıyıcı) organik bileşen ile katot (elektron taşıyıcı) olarak düşük iş fonksiyonlu metal arasında oluşturulur. Eksiton ayrışması katot arayüzünde meydana gelir, ancak eksitonlar tamamen serbest değildir ve sıkı bir şekilde bağlanır. Bu nedenle, yalnızca ayrışma arayüzüne ulaşan eksitonlar bölünebilir ve yük taşıyıcıları oluşturabilir (Hong ve ark., 2007). Aktif tabaka tarafından ışık absorpsiyonunun bir sonucu olarak, fotoaktif tabakadaki serbest yük konsantrasyonunun düşük olduğu gözlenmektedir.



Şekil 1.12. Tek katmanlı güneş hücresi

1.8.2. Çift Katmanlı Organik Güneş Hücreleri

Güneş hücreleri yalnızca tek bileşenli OGH' lere sahip değildir, aynı zamanda hibrit heteroeklem ve farklı yapılara sahip diğer OGH' leri de içerir. Bu hücrelerin verimlilikleri, geleneksel OGH' lerden daha büyüktür, bu nedenle daha popülerdirler. 1986' da ilk olarak OGH' lerinin heteroeklem yapıları çalışılmaya başlanmıştır (Tang, 1986). Çift katmanlı heteroeklemler OGH' leri, farklı organik yarı iletken malzemelerin iki farklı katmanı veya bölgesi arasında iki boyutlu bir arayüz oluşturabilmektedirler. İki katmanda kullanılan malzemeler, farkı mümkün olduğu kadar büyük kılar, böylece elektrik alan, eksitonları ayırmak için yeterince büyük ve tek katmanlı OGH' lerinden daha verimli olur. Bununla birlikte, bir polimer filmin 100 nm'nin üzerinde yeterli ışığı absorplaması gerekmektedir. Böyle bir kalınlık için, sadece az sayıda eksiton, heteroeklem arayüzüne ulaşabilir. Bu sorunu çözmek için, yığın heteroeklemler OGH olarak adlandırılan yeni bir heteroeklemler OGH sınıfı tasarlanmıştır.



Şekil 1.13. Çift katmanlı güneş hücresi

1.8.3. Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri

OGH' lerinin aktif katmanı, bir karışım yapısı oluşturarak iki malzemeden oluşmaktadır. Bileşenler, iki polimer veya iki farklı moleküldür. Verici malzeme ve alıcı malzeme, eksitonların kolayca ayrıldığı ve sıkı bir temas yüzeyinde dağıldığı, ayırma verimliliğini artıran ve sonuç olarak performansın artmasına yol açan bir sistemi oluşturmaktadır (Yi ve ark., 2009). Elektron alıcıları için bir çift katman veya bir karışım halinde birleştirilmiş fulleren türevleri yaygın olarak kullanılır ve bu malzemeler, 2 eV' den daha az genişlikte bant aralığını kapsayan güçlü absorpsiyon tepe noktalarına sahip olmaları gerekmektedir. Bu tür hücreler, konjuge polimer sisteminin foto-indüklenmiş elektron transfer teorisini kullanır ve kopolimer, fulleren türevlerini belirli bir oranda heteroeklemlerle karıştırır (Lemaire ve ark., 2005). İki malzemenin birbirine karışması nedeniyle, aralarındaki boyut çok küçüktür, bu da eksitonun ayırma verimliliğini artırır. Bu nedenle, heterosiklik katmandaki eksitonlar, serbest yükler oluşturmak için etkili bir şekilde ayrılabilir. Bu nokta da organik güneş hücrelerinin gelişimi son birkaç yılda büyük ilerleme kaydetmiştir.

1.8.4. Organik Güneş Hücreleri Çalışma Prensibi

Bir organik güneş hücresinin çalışma prensibi, temel olarak dört işlemle açıklanabilir. İlk olarak, ışık, aktif katmandaki fotoaktif malzeme tarafından soğurulur. Işık soğurulduğu zaman, elektronlar daha yüksek bir enerji seviyesine (LUMO) iletilerek daha düşük enerji seviyesinde (HOMO) ya geçerek boşluklar bırakır. Eksiton adı verilen elektron ve delik çiftleri bu şekilde oluşur (Zhang ve ark., 2010). Ardından, eksitonlar donör-alıcı arayüzünü yayar. Bu noktada, elektronların ve deliklerin yeniden birleşmesini önlemek için difüzyon uzunluğu önemlidir ve yaklaşık 5-20 nm olmalıdır (Tanaka ve ark., 2011). Ayrıca, eksitonların serbest yüklere ayrılması için, elektronlar ve delikler arasındaki Coulomb etkisinin üstesinden gelecek bir itici kuvvete ihtiyaç vardır. Eksitonlar difüzyonundan sonra birbirlerinden ayrılırlar. Bununla birlikte, eksiton bağlanma enerjisi, HOMO-LUMO bant aralığı arasındaki farktan daha yüksekse, yük ayrımı gerçekleşmeyecektir. Bu, yük ayrımı için çok önemli bir noktadır. Bu serbest yükler, ara yüzey katmanlarının yardımıyla karşılık gelen elektrotlarda toplanır. Elektrotların çalışma işlevi de bu işlem için önemli bir parametredir. Etkin yük toplanması için donör parçanın HOMO enerji seviyesinin anot malzemesinin iş fonksiyonundan düşük olması ve alıcı maddenin LUMO seviyesinin katodun iş

fonksiyonundan yüksek olması gerekir (Tanaka ve ark., 2011). Bu noktada, karşılıklı gelen elektrotlardaki yüklerin toplanması elektrik üretimine neden olur.

1.8.5. Hücre Performansını Etkileyen Parametreler

Güç dönüştürme verimliliği (PCE) olarak bilinen geleneksel OGH' ların performansları, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve doldurma faktörü (FF) olan üç ana parametreye güçlü bir şekilde bağlıdır. Dış potansiyeli olmayan devreden geçen akım J_{sc} olarak tanımlanır. Açık devre gerilimi, devreden akım geçmediği andaki maksimum gerilimdir. Diğer terim ise güneş hücresinin ne kadar kaliteli olduğu hakkında bilgi veren dolgu faktörüdür. Son olarak, cihaz performanslarının verim hesabı, denklemi Bölüm 1.4' te verildiği şekilde hesaplanmıştır.

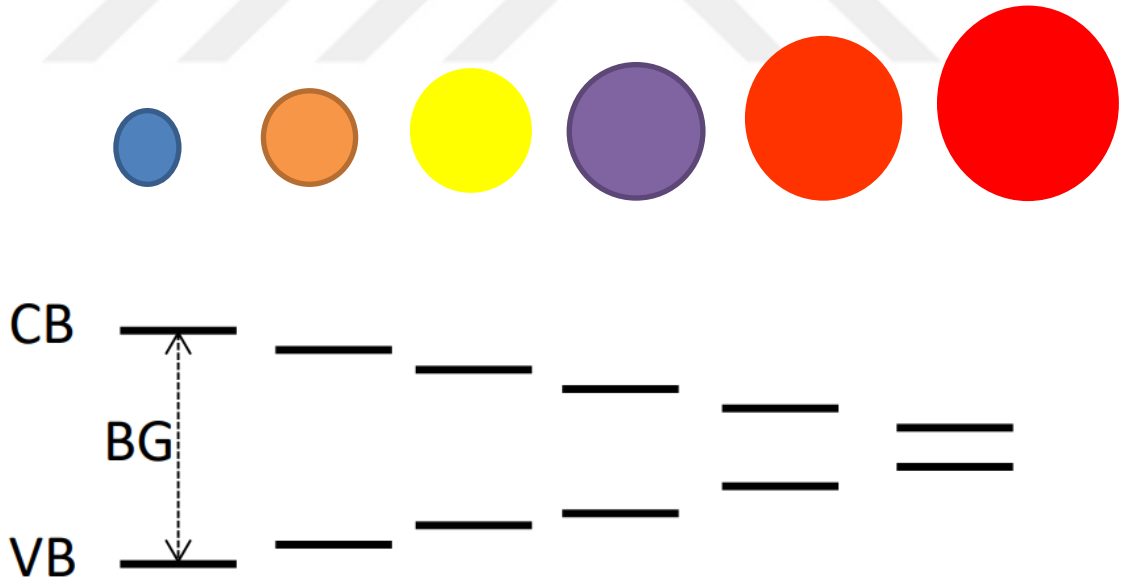
Kısa Devre Akım Yoğunluğu (J_{sc}): J_{sc} , sıfır potansiyelde karşılık gelen elektrotlarda üretilen ve toplanan yüklerin sayısını veren bir terimdir. Diğer bir deyişle devrede uygulanan potansiyel değerin sıfır ($V_{oc}=0$) olduğu andaki maksimum akım yoğunluğudur (Fung ve Choy, 2013).

Açık Devre Gerilimi (V_{oc}): Açık devre gerilimi, kullanılabilir akım olmadığı bir güneş hücresinden çekilen maksimum gerilim olarak tanımlanır. Donörün HOMO seviyesi ve alıcı parçanın LUMO enerji seviyesi, yani aktif tabaka ile doğrudan ilişkisi olan donörün HOMO enerji seviyesi ayarlanarak yüksek bir V_{oc} değeri elde edilir. Daha önceki çalışmalar, V_{oc} ' un iki elektrotun iş fonksiyonu farklılıklarından elde edildiğini ve metal-yalıtkan-metal (MIM) modeliyle açıklandığını ima eder (Mihailtchi ve ark., 2003).

Doldurma Faktörü (FF): Cihazın güç dönüştürme verimini etkileyen diğer bir parametre ise dolum faktörüdür. Yük taşıyıcıların göçü ile rekombinasyon arasında bir ilişki vardır. Yükler yeniden birleştirildiğinde düşük FF değeri elde edilir. Ayrıca J-V eğrisinin şekli de önemlidir ve FF karakterini belirler. FF, güneş hücresinden gelen maksimum gücün V_{oc} ve J_{sc} ' ye oranıyla ifade edilir. Dikdörtgen bir J-V eğrisinde oluşturulduğunda ideal bir FF değeri %100 olmaktadır (Trukhanov ve ark., 2015).

1.9. Kuantum Noktaları (KN)

Kuantum noktaları (KN), 1980 yılında Rus fizikçi Alexei Ekimov tarafından Vavilov Devlet Optik Enstitüsünde çalışırken katılarda keşfedilmiştir. KN' lar, boyut olarak 10 nanometreden (yaklaşık 100 hidrojen atomu) daha küçük yarı çaplı iletken parçacıklardır (Putz, 2020). KN' lar, kuantum sınırlama etkileri nedeniyle onları diğer parçacıklardan farklı bir yere koyan benzersiz optik ve elektronik özelliklere sahiptir. KN' lar, suda çözünürlük, ihmal edilebilir sitotoksisite, kolay sentez, kolay işlevselleştirme, kimyasal inertlik, iyi floresans emisyonu ve foto-ağartma direnci gibi üstün özelliklere sahiptir. Floresans özellikleri bakımından KN' ların boyutlarına göre farklı renkte ışık yaya bilmektedirler. Geniş bir spektral absorpsiyona ve yüksek absorpsiyon katsayılarına sahip KN' lar, fotokatalitik aktiviteyi artırabilir. KN' lar, güneş hücrelerinin fotoanodunda hassaslaştırıcılar olarak da kullanılabilirler. KN' lar ultraviyole (UV) ışıkla aydınlatıldığında, KN' ların değerik bandındaki elektron uyarılır ve iletim bandına geçiş gerçekleşir. Uyarılan elektron değerik bandına geri düşerek enerjisini ışık şeklinde serbest bırakır. Bu ışığın rengi değerik ve iletim bantları arasındaki enerji farkına bağlıdır. Bant diyagramı Şekil 1.12'de gösterilmiştir (Panfil ve ark., 2018).

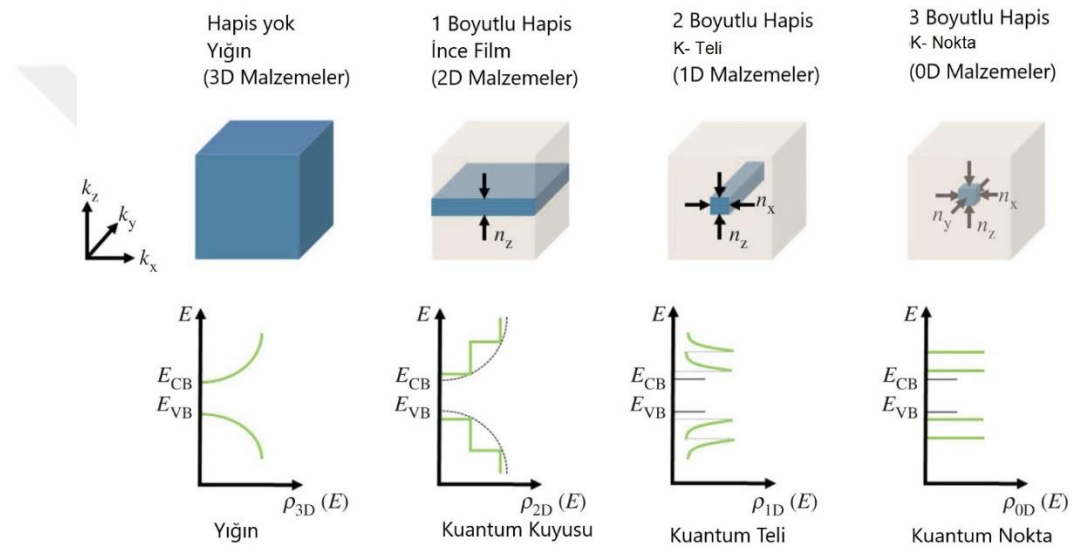


Şekil 1.14. KN' ların boyutlarına göre bant aralıkları

1.9.1. Kuantum Noktanın Yapısı

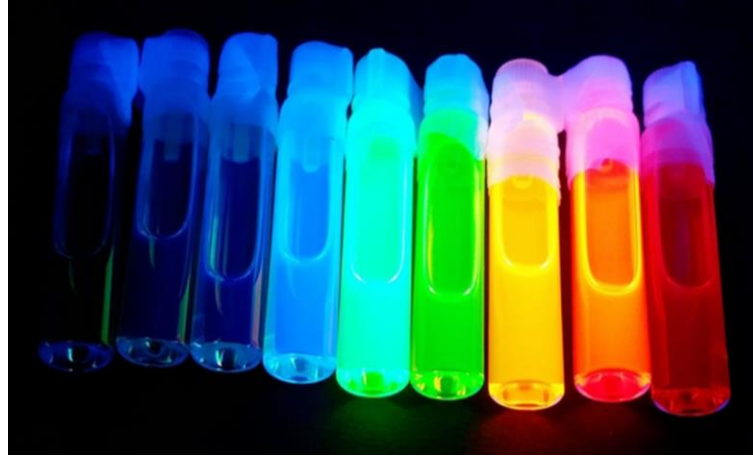
Yarı iletken kristallerin boyutu elektron ve delik arasındaki uzaklık olarak adlandırılan eksiton-bohr yarıçapından çok daha büyüktür. Kuantum noktalarında, bu

mesafe eksiton-bohr yarıçapından küçük veya eşittir. Böylece, kristallerin enerji seviyeleri ayrık bir şekilde davranır. Bu tür ayrık enerji seviyelerine sahip olmak, kuantum sınırlama etkisi olarak adlandırılır. Nano ölçekte malzemeler farklı şekillerde üretilebilir. Kuantum sınırlama etkisi, kuantum noktasını özel bir malzeme yapar. Kuantum noktaları 0 boyutlu nanoparçacıklardır, bu nedenle elektron herhangi bir yönde serbestçe hareket edemez. Her üç uzamsal yönde uygulanan sınırlama nedeniyle, kuantum noktaları yapay atomlar gibi davranır (Edvinsson, 2018). Kuantum hapsedme etkisine göre, nanomalzemelerin şekil ve enerji seviyelerindeki değişim Şekil 1.13'te karşılaştırılmıştır.



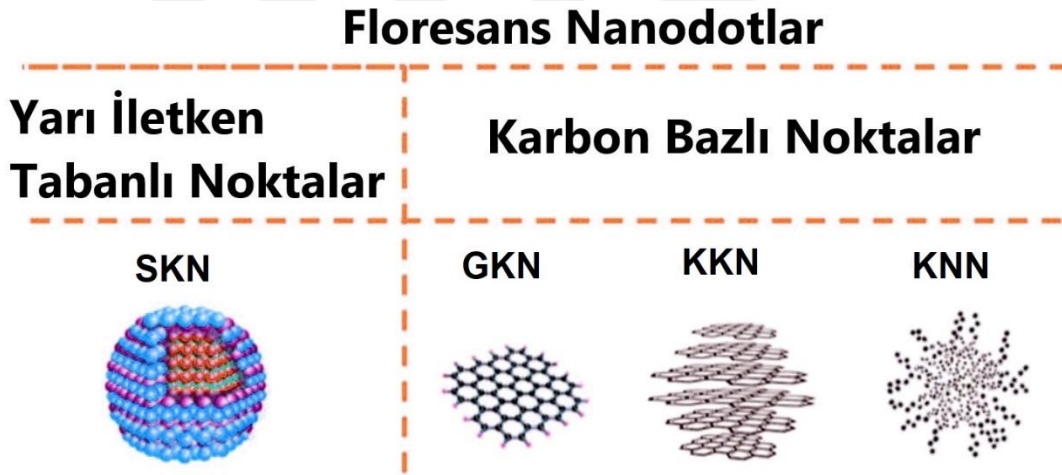
Şekil 1.15. Kuantum Hapsedilme Etkisi ve Enerji Bandı Yapısı (Edvinsson, 2018).

Kuantum sınırlaması, kuantum plakası bir boyutta, kuantum telinde iki boyutta ve kuantum noktasında üç boyutta mevcuttur. Kuantum noktalarının emisyon özellikleri, nanokristalin boyutu kontrol edilerek manipüle edilebilir (Cayuela ve ark., 2016). Şekil 1.16' te, farklı emisyon renklerine sahip kuantum noktalarının resmi görülmektedir.



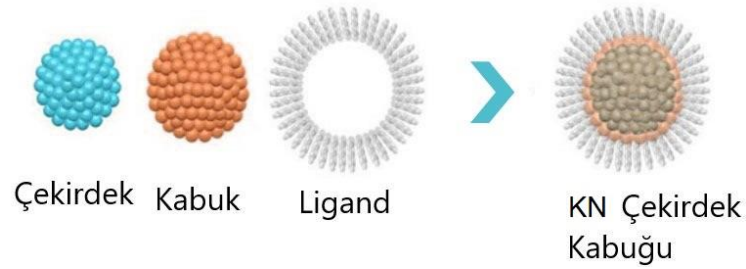
Şekil 1.16. KN' ların emisyon rengi değişimi.

Floresans kuantum noktaları, Şekil 1.17'te görüldüğü gibi temel malzeme nedeniyle iki gruba ayrılır. Yarı iletken tabanlı noktalar (SKD), Grafen Kuantum Noktaları (GKD), Karbon Kuantum Noktaları (KKN) ve Karbon Nano Noktaları (KNN).



Şekil 1.17. Temel malzemelerine göre nanodotlar (Cayuela ve ark., 2016).

Kuantum noktalarının yapısı genellikle yarı iletken tabanlı noktalarda bir çekirdek, kabuk ve pasifleştirici maddelerden (ligandlar) oluşur. Karbon bazlı kuantum noktalarında, karbon elementinin çeşitli konfigürasyonları çekirdek olarak kabul edilir (Cayuela ve ark., 2016).



Şekil 1.18. KN' ların Temel Yapısı (Zhou ve ark., 2017)

Yarı iletken kuantum noktaları (SKD' ler), kabuğun ve ligandların farklı yapılarıyla işlevselleştirilebilir (Zhou ve ark., 2017). Günümüzde optik ve elektronik özelliklerinden dolayı en çok üretilen kuantum noktaları CdSe, CdTe, CdS, InAs, GaN, PbS, PbSe, ZnS' dir. Karbon kuantum noktaları, genellikle işlevsel gruplarla (-COOH ve -OH) kenar düzlemlerinde sp² ve sp³ hibritleştirilmiş karbon atomlarından oluşan yarı küresel nanoparçacıklardır. Karbon kuantum noktalarının (KKN) boyutu büyük ölçüde hazırlama yöntemlerine bağlıdır, ancak başlangıç malzemelerinden bağımsızdır. Sentez işlemi sırasında reaksiyon sıcaklığı ve süresi değiştirilerek farklı KKN partikül boyutları elde edilebilir

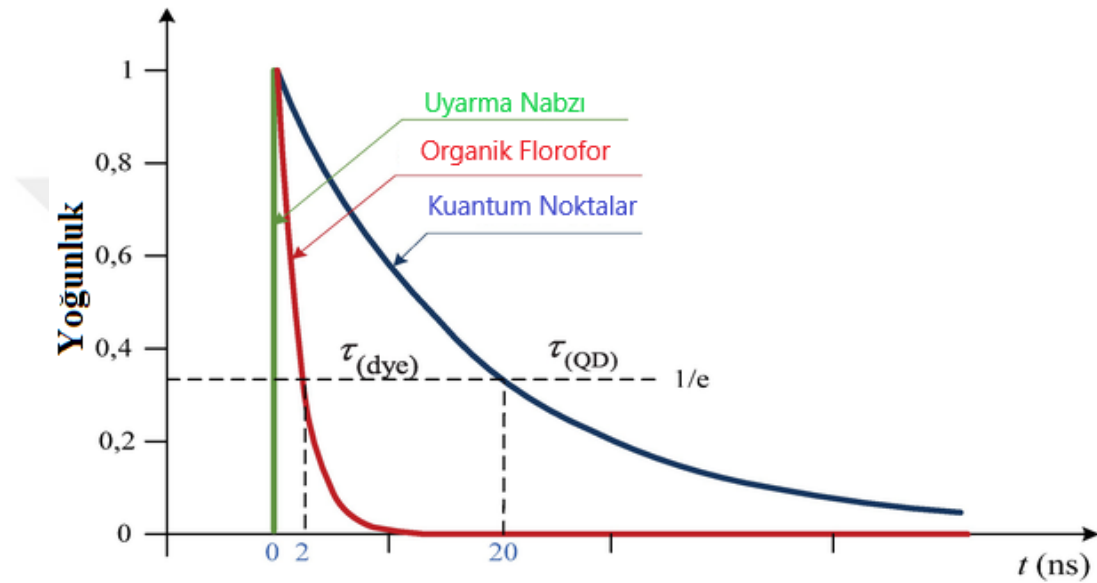
1.9.2. Kuantum Noktaların Optik Özellikleri

Kuantum noktaları, ayarlanabilir optik özelliklerinden dolayı çok sayıda uygulamaya sahiptir. Yüksek parlaklık, uzun floresan süresi, ışıkla ağartma direnci ve ayarlanabilir dalga boyu gibi optik özelliklerini kontrol etmek için KN' ların doğasını anlamak gerekir. Emisyon fotonunun dalga boyu, kuantum noktasının yapıldığı malzemeye değil, aynı zamanda boyutuna da bağlıdır. Kuantum noktasının boyutunu kontrol etme yeteneği, insan gözünün algıladığı ışığın rengini de belirleyen emisyon dalga boyunun manipüle edilmesini sağlar (Brkić, 2018). Küçük boyut, renk spektrumunun mavi ucuna daha yakinken, büyük boyut kırmızıya daha yakındır. KN' ların özelliklerini detaylı bir şekilde aydınlatılmak için ileri karakterizasyon yöntemleri gereklidir. En yaygın optik karakterizasyon testleri, fotoluminesans ve optik absorpsiyondur.

KN' ların en yaygın özelliklerinden biri de Stokes kayması olarak adlandırılan absorpsiyona göre fotoluminesans kırmızıya kaymasıdır. Stokes kayması, KN' ların en yüksek uyarma ve en yüksek emisyon dalga boyları arasındaki farktır. Emisyon enerjisi (dalga boyu) tipik olarak uyarma enerjisinden daha düşüktür. KN' ların eksitasyon ve

emiyon spektrumları arasındaki büyük kayma, KN' ların tüm emiyon spektrumları tespit edilebildiği için tespit hassasiyetini artırır (Brkić, 2016).

Diğer bir optik özellik olan ömür, KN' nın ışık kaynağından bir fotonu soğurduğu an ile emiyon anı arasındaki bir gecikmedir. KN' nın boyutu aynı zamanda floresan ömrünü de belirler. Elektron delik çifti enerji seviyelerinde tutulabilir. Daha büyük noktalar daha yakın aralıklı enerji seviyelerine sahiptir. Bu nedenle, elektron delik çiftleri daha büyük KN' larda daha uzun bir ömre sahiptir.

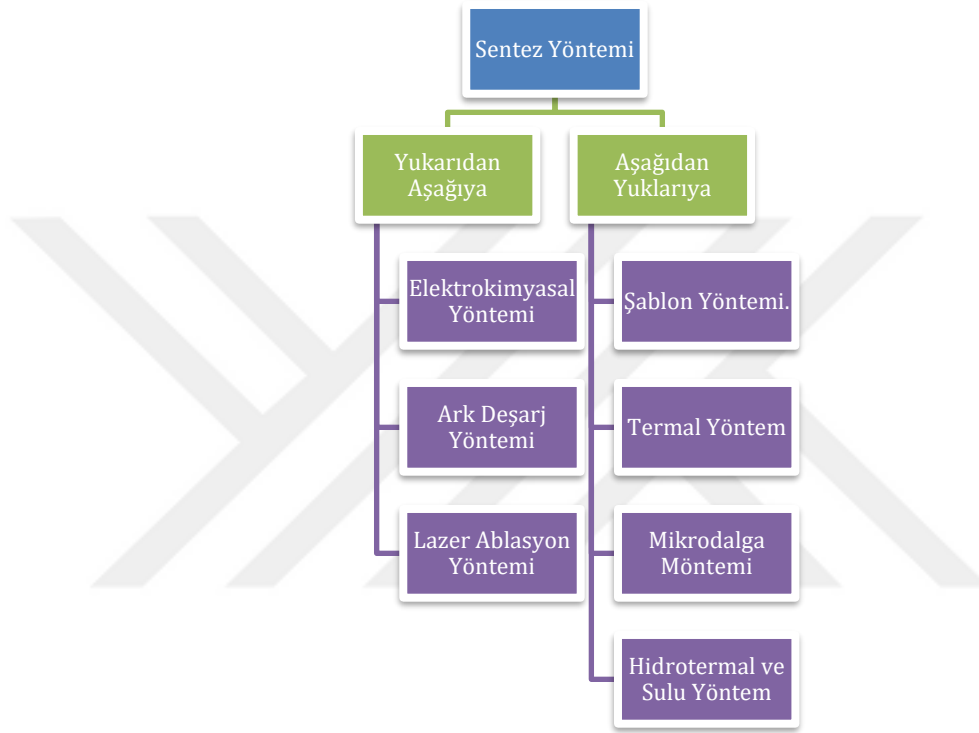


Şekil 1.19. Zamana bağlı floresans süreleri

Floresan KN' ların netliğini ve parlaklığını arttırmak için, toplam uyarma ve emiyon bantları arasındaki örtüşme en aza indirilmelidir. Bu ayrıca yayılan ışığın yakındaki KN' lara yeniden emilmesini de önler. Geniş absorpsiyon spektrumları sayesinde, tüm kuantum noktalarının tek bir ışık kaynağı ile aynı anda uyarılması ve uygun bir uyarma dalga boyu seçilerek örnek otofloresansının en aza indirilmesi mümkün hale gelir. KN' ların molar uyarılma katsayısı organik boyalardan çok daha büyüktür. Bu nedenle KN' lar biyomedikal görüntüleme uygulamalarında da geniş bir potansiyele sahiptir. Kuantum verimi, yayılan foton sayısının soğurulan fotonlara oranı olarak tanımlanır. Kuantum noktaları, uyarma ışığının emisyona dönüştürülmesi açısından nispeten verimlidir. Kuantum verimi genellikle %50'nin üzerindedir (Brkić, 2016).

1.9.3. Kuantum Noktaların Sentez Yöntemleri

KN' ların sentez işlemi için yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımlar olarak adlandırılan iki ana yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar, şemada gösterildiği gibi birkaç farklı sentez yöntemini içerir. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, malzemelerin parçalanmasıyla ilgiliyken, aşağıdan yukarıya yaklaşım, malzeme büyümesi için atomların birleştirilmesiyle ilgilidir (Rocco ve ark., 2023).



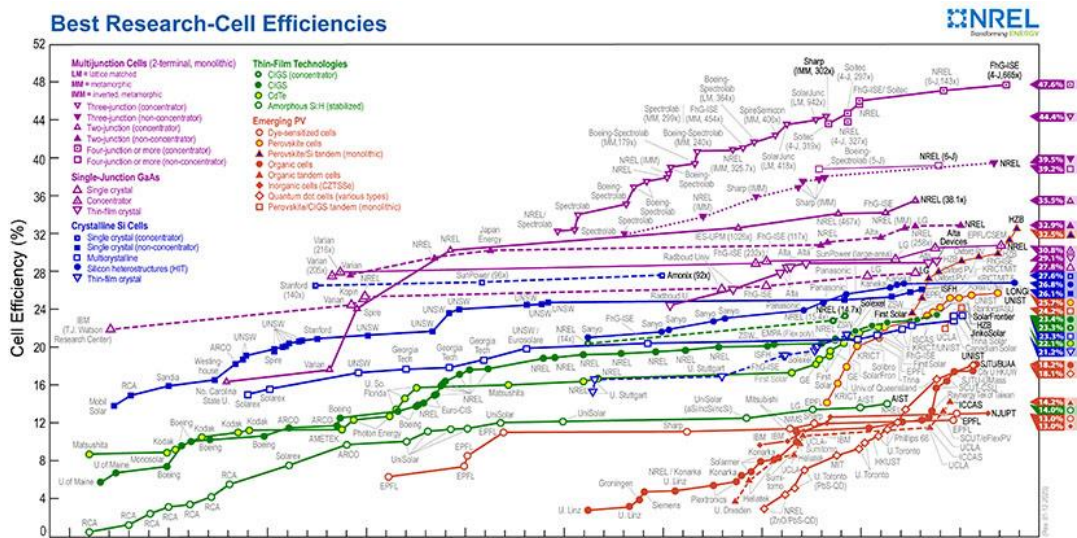
Şekil 1.20. KN' ların sentez yöntemleri

Yukarıdan aşağıya yaklaşım, yapıları daha küçük parçalara ayırmaya dayanır. Bu yapılar organik, inorganik, saf madde veya her türlü malzeme kombinasyonunda olabilir. Amaç her zaman bölmek ve verimli bir şekilde kullanmaktır. Bu yaklaşımda aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır; ark deşarj yöntemi, elektrokimyasal yöntem ve lazer ablasyon yöntemi. Aşağıdan yukarıya yaklaşım ise, bir yapı inşa etmek için küçük parçaların kombinasyonuna dayanır. Bu parçalar atomlar, polimerler, moleküller veya işlevsel bir yapının parçası olabilecek herhangi bir şey olabilir. Temel amaç küçük parçaları bir araya getirerek işlevsel bir yapı oluşturmaktır. Aşağıdan yukarıya sentez yöntemlerinden bazıları şu şekilde sıralanabilir; hidrotermal/solvotermal yöntem, mikrodalga yöntemi, termal yöntem ve şablon yöntemi (Rocco ve ark., 2023).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Perovskit malzemeler geniş absorpsiyon spektrumları, yüksek optik absorpsiyon katsayısı, ayarlanabilir bant aralığı, delikler ve elektronlar için uzun taşıyıcı difüzyon mesafesi gibi istenen optik ve elektronik özellikleri sunduğundan, son on yılda PGH' leri diğer fotovoltaik teknolojiler arasında önemli ölçüde geliştirmiştir.

PGH' leri, önde gelen silikon güneş hücreleri ile karşılaştırılabilir performansla güç ürettikleri ve maliyetinin silikon güneş hücrelerinden daha düşük olduğu için PV teknolojisinin geleceğidir. PGH' lerinin muazzam potansiyeli, bu hücrelerin verimliliğinin on yıl içinde %3,8' den %25,2' ye çıkması görülmektedir (Roy ve ark., 2020). Bu gelişimlere kısaca göz attığımızda ilk PGH, 2009 yılında boya duyarlı güneş hücresi olarak üretildiği görülmektedir. Ancak bu hücrelerin en büyük problemi stabilitesinin çok zayıf olması olarak rapor edilmiştir. Bu hücrelerin EDV' si yaklaşık %3 olarak belirlenmiştir (Kojima ve ark., 2009). 2011 yılında ise MAPbI₃ ile PGH' si oluşturulmuştur. Bu hücreler performans olarak daha iyi ancak, sıvı elektrolit nedeniyle çok kararsız olarak rapor edilmiştir (Im ve ark., 2011). Ardından 2012 yılında, tamamen katı halli ilk PGH % 9,7 verimlilikle oluşturulmuştur. Bu çalışma perovskit güneş hücreleri için adeta bir kilometre taşı olmuştur, çünkü bu hücreler hem verimli hem de kararlıdır (Kim ve ark., 2012). Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan verimlilik tablosuna göre bugüne kadar en yüksek verimlilik %25,7 olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.1 Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan Güneş hücrelerinin verimliliklerinin karşılaştırılmalı tablosu (NREL, 2023).

PGH' lerinin %25' in üzerine ulaşan EDV' si, düşük maliyetli geniş alan cihazları geliştirme olasılığı ve çözelti süreçleri ile işlenebilirliği nedeniyle, günümüzde araştırmacılar bu teknolojiye odaklanmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, fotovoltaik pazarında PGH' lerinin rekabetçi bir alternatif haline gelmesindeki en büyük sorunlardan biri, yüksek performanslı cihazların uzun vadeli kararlılık sağlamak için inert atmosfer altında üretilmesidir ve bu da daha büyük ölçekli üretimi sınırlandırmaktadır. PGH' lerinin performansını iyileştirmek için, farklı perovskit tabakası bileşimleri, çözücü yıkama işlemi (Kim ve ark., 2012), arayüzey mühendisliği (Kim ve ark., 2019), katkı kullanımı ve yüzey pasivasyonu dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, kuantum noktalarının (KN), boyutlarını kontrol ederek ayarlanabilir bant aralıkları, yüksek fotostabiliteleri, yüzey işlevselleştirmeleri nedeniyle bir katkı maddesi olarak kullanılmak üzere iyi bir seçim olduğunu göstermiştir, bu da optoelektronik cihazlar üretmek için gelişmiş ışık toplama özelliklerine sahip olmalarına yol açmıştır (Chan ve ark., 2017). Ayrıca, KN' lar güneş hücresi yapısına delik taşıma katmanı (HTL) veya elektron taşıma katmanı (ETL) olarak uygulanabilir (Agada ve ark., 2022). Özellikle, karbon kuantum noktalarının (KKN), gelişmiş yük taşıma özellikleri ile birlikte yüzey kusurlarının azaltılması için PGH konfigürasyonunda etkili bir malzeme olduğu kanıtlanmıştır (Wen ve ark., 2020). Hetero-atomların katkılanması oldukça esnek işlevselleştirme ve KKN' ların hazırlanmasına yönelik çeşitli yöntemlerin, oksijen içeren fonksiyonel gruplara bol miktarda kuantum noktası sağladığı gözlenmiştir (Dong ve ark., 2012). KKN' ları atomik katkılarla (örneğin, bor, kükürt, nitrojen, vb.) katkılanması, içsel özelliklerini ayarlamak için ana stratejilerden biridir. Zang ve ark. KK' ların optik özelliklerini ayarlamak için solvotermal yöntemle azot katkılı KKN' lar hazırlamışlar ve işlevselleştirilmiş aminonun yüksek fotolüminesans kuantum verimi (PL-QY) ve mükemmel stabilite gösterdiğini bildirmişlerdir (Zhang ve ark., 2012).

Şimdiye kadar, iyileştirilmiş özelliklere sahip KN' ların geliştirilmesinde önemli çabalar sarf edilmiştir. Bununla birlikte, PGH' lerinde potansiyel uygulamalarına ilişkin çalışmalar şaşırtıcı bir şekilde çok sınırlıdır.

Kırbıyık Kurukavak ve ark. yaptığı çalışmalarda, metil amonyum kurşun iyodür (MAPbI_3) perovskit aktif tabakasına nitrojen katkılı KKN' ler (N-KKN) ve bor katkılı KKN' lar (B-KKN) ilave edilmiştir. Yapılan çalışmada N-KKN' ler $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ çözeltisinde bir katkı maddesi kullanıldığında, ışınımsız yük rekombinasyonunun azaldığını ve soğurucu katmandaki tuzak durumlarının pasifleştirildiğini göstermiştir. Ek olarak, morfolojik karakterizasyon sonuçları, perovskit yüzeylerdeki kristalleşme

problemlerinin ve kusurların, perovskit solüsyonunda N-KKN katkısı ile kolayca çözülebileceğini göstermiştir. Morfolojik ve elektriksel değişiklikler nedeniyle yük taşıma özelliklerinin iyileştirilmesi sayesinde, N-KKN' ların hacimce %3 oranın katkılanmasıyla %14' lük bir verime ulaştıkları görülmektedir. Bu çalışmada yüksek verimli perovskit güneş hücresi üretimi için etkili ve yeni bir katkı maddesi önermektedirler (Kırbyık ve ark., 2020).

B-KKN katkılanmasıyla geliştirilen bir diğer güneş hücresi çalışmasında, ultraviyoleyi mavi ışığa dönüştürebilen B-KKN, gelişmiş fotovoltaik performans için MAPbI₃ tabanlı PGH' lerinde bir katkı maddesi olarak kullanılmıştır. B-KKN malzemesinin başarılı sentezinden sonra, MAPbI₃ soğurucu katmana hacimce %5 katkılanmasının perovskit kristallerinin tane sınırlarını pasifleştirebileceğini, kristalliği ve tane boyutlarını geliştirebileceği görülmüştür. Ek olarak, optik ve fotovoltaik özellikler, B-KKN eklenmesinin, rekombinasyon kayıplarını azaltırken yük taşıma özelliklerini ve delik ekstraksiyonunu verimli bir şekilde geliştirebileceğini göstermiştir. Kontrol cihazına kıyasla, en iyi çalışan hücrenin verimini %10,4' ten %12,7' ye çıkarıldığı rapor edilmiştir. B-KKN katkı maddeleri ile ters çevrilmiş p-i-n yapıları PGH oluşturmaya yönelik bu yaklaşım, gelecekteki uygulamalar için verimli ve kararlı perovskit fotovoltaiklerin hazırlanması için basit bir yol sunmaktadır (Kırbyık Kurukavak ve ark., 2022). Bu durum perovskit tabakasına floresans hetero-atom katkılı KKN' ların eklenmesinin, PGH' lerinin yük taşıma özelliklerini ve stabilitelerini iyileştirdiğini göstermiştir.

Organik güneş hücrelerine baktığımızda 1986 yılında OGH' lerde büyük bir atılım görülmektedir. Kodak Company' den Dr. Deng, inorganik güneş hücrelerini taklit etmek için iki tür organik yarı iletken malzeme kullandı. Bu sayede güneş hücrelerinin fotovoltaik dönüşüm verimi %1'e ulaştığı gözlenmektedir (Tang, 1986). Çok yüksek olmasa da, tek bileşenli hücreler için önemli bir sıçrama olmuştur. Çift katmanlı heteroeklem yapısı ise günümüzde OGH' lerin araştırmaların da temel olmaya devam etmektedir. 1992 yılında Sarıçiftçi C60 yüzeyindeki konjugasyon yapısı nedeniyle, uyarılmış elektronların organik donör yarı iletkenden C60 molekülüne hızla enjekte edilebildiğini ancak tersinin yavaş olduğunu keşfetmiştir. Bu şekilde, yük ayrımının kolay ve rekombinasyonun zor olması düşünülmüştür. Bu nedenle, C60 mükemmel bir yük alıcı görevi görebilmektedir. Ve bu bir elektrik akımı oluşturur (Sariciftci ve ark., 1993). Sarıçiftçi bu temele dayanarak 1993 yılında poli(fenilen-vinilen) ve C60 çift katmanlı heteroeklemlili hücre yapmıştır. İlk yapılan çalışmalardan beri, elektron alıcısı

C60 olan çift katmanlı heteroeklemlili güneş hücreleri çalışılmaya devam edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda heteroeklem yapılar çalışılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalar OGH' lar için büyük bir atılım olmuştur. 1994 yılında Heeger ve Yu ilk olarak C60 türevi [6,6]-fenil C61 bütirik asit metil ester (PC61BM) ve poli[2-metoksi-5-(2'-) tanıtarak güneş hücrelerini oluşturmak için heteroeklem yapı yöntemini kullanmışlardır. Etil-heksiloksi-1,4-fenilen vinilen (MEH-PPV) kullanılarak hazırlanan hücrelerden üç boyutlu iç içe geçmiş yapıya sahip aktif katman elde edilmiş ve enerji dönüşüm oranı %2,9 olduğu gözlenmiştir(Yu ve ark., 1994). Son yıllarda, OGH' ların gelişimi birçok yönden ilerlemiştir. Heteroeklem yapısı, OGH hücrelerinin yapısında en çok çalışılan yapıdır ve bu yapıyı kullanan OGH cihazlarının PCE' si %1'den yaklaşık %19'a çıkarılmıştır(Yuan ve ark., 2022). Sun ve ark. poli(5,7-bis(4-dekanil-2-tienil)-tieno(3,4-b)diatiazol-' de ışık kaynaklı arayüzey eksiton ayrışmasını ve yük rekombinasyonunu araştırmışlardır. 2011' de kuantum-kimyasal hesaplamalar yoluyla bir OGH için (tiyofen-2,5) ve PCBM heteroeklem yapıları kullanılmıştır (Li ve ark., 2011). Daha sonra, 2013' te OGH' lar için harici elektrik alanına bağlı fotoindüklenmiş yük transferini analiz etmişlerdir. Sonuçlarına bakıldığında, alanın temel olarak elektronik geçiş enerjisini ve yük aktarımı uyarılmış durumlar için yük aktarımı etkilediğini, ancak uyarılmış durumlar, için yeniden düzenleme enerjisi ve serbest enerji için elektron geçiş enerjisi üzerinde çok az etkisi olduğunu gösterilmiştir (Yu ve ark., 1995). Heteroeklem kavramı önerildikten sonra ise, fulleren ve türevleri, o dönemde OGH araştırmasının ana akımı haline gelen geçerli alıcılar olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, görünür bölgedeki zayıf soğurma ve kısıtlı bant aralığı modifikasyonu ile sınırlı olan fotovoltaiik performansları, %12,5'lik en iyi PCE ile beklentilerin altında kalmıştır (Li ve ark., 2017). O zamandan beri, bu zorlukların üstesinden gelmek için, fulleren olmayan alıcılar hızla gelişmiş ve mevcut araştırma odağı haline gelmiştir. Fulleren olmayan alıcılar tasarlanmış ve ilk olarak OGH' ların PCE' sini %13'e kadar arttırmıştır. Fulleren olmayan akseptörler, bant aralığı ayarlana bilirliliği, düzlemsellik, kristallik ve %17-20' lik daha yüksek verimliliklere ulaşmışlardır. Hou ve ark. tek bağlantılı bir OGH' da %19' luk PCE elde etmek için üçlü harmanlama stratejisini kullanarak fulleren olmayan OGH' ların rekorunu kırmıştır (Cui ve ark., 2021).

Günümüzde OGH' lar üzerine birçok çalışma vardır, ancak OGH' lar için bazı teknik sorunlar hala mevcuttur. Ana sorun, düşük verimliliğidir, çünkü organik malzemeler arasındaki etkileşim çok zayıftır. Ek olarak, aktif malzemeler genellikle

kararsızdır bu da düşük kararlılığa ve kısa ömre sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu çözülemeyen sorunlar karşısında, çalışmalar halen hızla devam etmektedir.

Çalışmamızda kullanılan fosfor (P), elektron bakımından zengin bir yapıya sahip olduğu için yüksek reaktivite gösterir. Bu nedenle, fosforun KKN' lara (P-KKN) dahil edilmesi, yeni optik özellikler getirecektir. Ek olarak, yüksek performanslı PGH' lerinin üretimi için P-KKN' ların katkılanmasının etkisine ilişkin çalışmalar yapılmamıştır. Literatüre göre, MAPbI_3 perovskit tabakasında, mükemmel bir çekirdek birim görevi gören elektronca zengin fosfor ile katkılama sayesinde P-KKN' ların eklenmesinin elektron açısından zengin bir sistem sağlayabileceği öngörülmüştür. Fosfor, bir alıcı olarak hareket eden azotun aksine, ikame kusurları oluşturan bir n-tipi donör gibi davranır. Böylece fosfor, KKN yüzeyinde aktif noktalar sağlayabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada solvotermal yöntemle sentezlenen P-KKN' ların p-i-n yapıları PGH' lerinde ve organik güneş hücrelerinde yeni katkı maddesi olarak kullanılması denenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında yeni bir katkı malzemesi sınıfı olan koloidal kuantum noktalar (KN)' lar sentezlenerek perovskit güneş hücrelerinin üretiminde kullanılmıştır. Bu çalışmaların amacı hetero-atom katkılı KKN' lar kullanarak oldukça kararlı ve yüksek verimli kurşun halojenür PGH' leri ve iyileştirilmiş OGH' leri üretmektir. Yüksek verimli PGH ve OGH üretmek için sentezlenen bu nano yapılar katkı malzemesi olarak her iki güneş hücresi konfigürasyonunda da fotoaktif katmanın içerisinde. Aşağıda detaylıca sentez basamakları ve hücrelerin üretim şekilleri açıklanmıştır.

3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

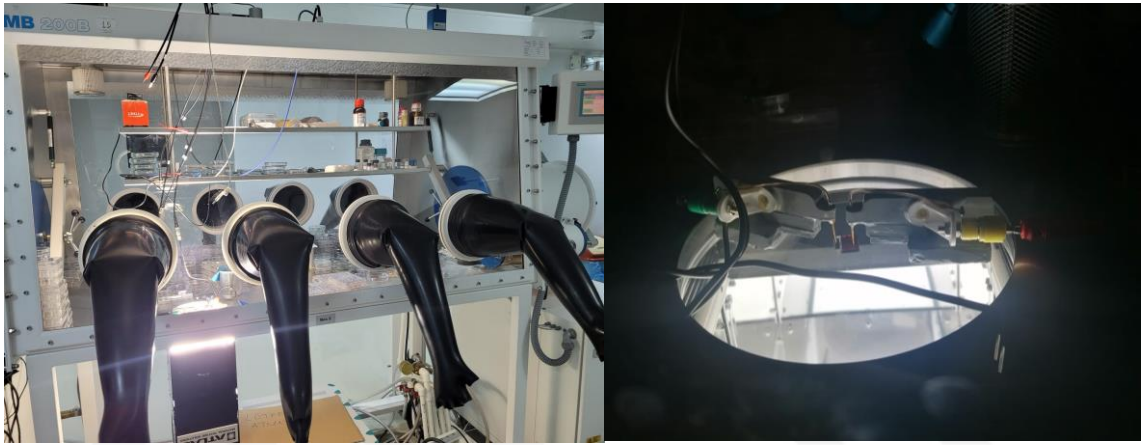
Bu tez çalışmaları sırasında güneş hücrelerinin üretimleri için indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam yüzeyler kullanılmıştır. Cihaz üretimleri ve yüksek verim sağlanması için yüzeylerin temizliği çok önemlidir. Yüzey temizlikleri için Hellmanex (Hellma III Liquid, alkalin sıvı temizleyici), saf su, aseton (Sigma-Aldrich) ve isopropanolden (Sigma-Aldrich) yararlanılmıştır. Güneş hücreleri için boşluk iletim tabakası olarak literatürde sıklıkla kullanılan PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) kullanılmıştır. OGH' lerinin üretimi için elektron iletim tabakası olarak ise TiO_2 tabakası üretiminde hazırlanan çözeltide titanyum (IV) izopropoksit (%99,9, Sigma-Aldrich) ve asetil aseton (%99,5, Sigma-Aldrich) kimyasalları kullanılmıştır.

Perovskit çözeltisini hazırlamak için $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (Lumtec), PbI_2 (%99,9, Alfa Aesar), γ -bütiralakton (GBL, susuz, Sigma Aldrich), dimetilformamit (DMF, Sigma Aldrich) ve dimetilsülfoksit (DMSO, Sigma Aldrich) ve asetonitril (Sigma Aldrich) kullanılmıştır. P3HT (poli(3hekziltiyofen-2,5-diil), Lumtec) ve PCBM (6,6-fenil C61 bütirik asit metil ester, Lumtec) saflaştırma yapılmaksızın klorbenzen (Sigma Aldrich) kullanılarak çözelti haline getirilmiştir. BCP (2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) Lumtec) saflaştırılma yapılmaksızın isopropanol (Sigma-Aldrich) kullanılarak çözelti haline getirilmiştir.

3.2 Kullanılan Karakterizasyon Yöntemleri

3.2.1. Akım-Voltaj (J-V) Grafiklerinin Elde Edilmesi

Hücrelerin performans parametrelerini ortaya koyan akım yoğunluğu-voltaj (J-V) ölçümleri oda sıcaklığında Keithley 2400 kaynak metre ve MBraun M200 glovebox entegre AM 1,5 ATLAS güneş simülatörü ile 1.5 AM hava kütlesi altında 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti ile yapılmıştır. J-V ölçümleri için, metal kontakların aktif alanı olarak belirlenen $0,023 \text{ cm}^2$ 'lik maskeler kullanılmıştır.

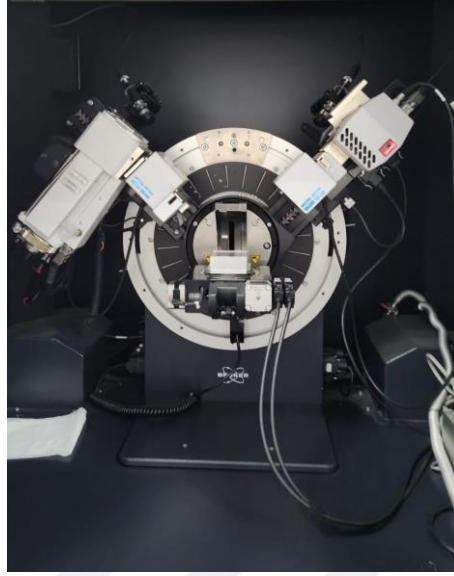


Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan glovebox ve solar simülatör sistemi

3.2.2. KNN' ların ve İnce Filmlerin Yapısal, Optik ve Morfolojik Karakterizasyonları

X-Işını Kırınım Metodu (XRD): XRD Minimum numune hazırlama gerektiren saf ve çok bileşenli karışımların tahribatsız, hızlı kalitatif ve kantitatif analizidir. X-ışınları kırınımı, malzemelerin fizikokimyasal özellikleri (yani amorf/kristal yapılar, kristal kafes parametreleri, bileşim profili, vb.) hakkında kesin bilgi elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. XRD dalga boylarının angstrom aralığı ve bunların atomik düzeyde nüfuz etmeye yönelik aşırı enerjileri göz önüne alındığında, bu teknik, nanomalzemelerin ve nanoyapıların çeşitli özelliklerini araştırmak için etkili bir araçtır (Falsafi ve ark., 2020). KKN' ların ince filmler üzerindeki yapısal etkisi, katkı oranına göre kristal yapıdaki değişimleri belirlemek için perovskit ince filmlerin XRD karakterizasyonunun yapılması önemlidir. Bu tez çalışmasında KKN' lar ile katkılamış ince filmlerin yapısal

analizleri Bruker D8 Advance markalı XRD cihazı tarafından yapılmıştır. Kullanılan cihazın resmi aşağıdaki görülmektedir.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan XRD cihazı

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM): AFM son 20 yıldaki gelişiminin malzeme bilimi, yüzey bilimi ve biyolojinin çeşitli alanları üzerinde büyük etkisi olmuştur ve artık yüzeylerin yapısal karakterizasyonu için rutin bir görüntüleme aracı haline gelmiştir (Wilson ve Macpherson, 2009). AFM' nin benzersiz özelliklerinden biri, uç ile numune arasındaki etkileşimleri yüksek hassasiyet ve benzersiz uzamsal çözünürlükle ölçme kapasitesidir. Bu çalışmada NT-MDT marka AFM cihazı kullanılarak hücrelerin yüzey özellikleri incelenmiştir. Kullanılan AFM cihazının resmi Şekil3.4 de görülmektedir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan AFM cihazı

Fotoluminesans (PL): KKN' ların optik özelliklerini ve kuantum verimini araştırmak amacıyla PL ölçümleri yapılmıştır. PL ölçümlerinde numuneler UV-LED lamba kullanılarak 200-600 nm uyarma dalga boyunda bir Perkin Elmer LS-55 marka fotoluminesan spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür.

UV-Görünür Bölge (UV-Vis) Absorpsiyon Spektroskopisi: Hazırlanan KKN' ların ve yüzeylerin UV-Vis absorpsiyon spektrumları optik özelliklerini elde etmek için Biochrom Libra S22 marka cihaz ile 200-800 nm dalga boyu aralığında ölçülmüştür.

Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM): SEM, mikro yapı morfolojisi ve kimyasal bileşim karakterizasyonlarının incelenmesi ve analizi için mevcut olan çok yönlü araçlardan biridir. SEM bilimsel araştırmalar için büyük önem taşımaktadır. Bu noktada sentezlenen KKN' ların yapısal karakterizasyonları bilinmesi gereklidir (Zhou ve ark., 2006). Hazırlanan çözeltilerin hücreler üzerinde varlığını ortaya çıkarmak için SEM-EDX haritalama tekniğı gerçekleştirilmiştir. Yapısal karakterizasyon ölçümü için Zeiss Evo marka cihaz kullanılmıştır.

Geçirimli Elektron Mikroskopu (TEM): TEM, nanomalzemelerin karakterizasyonu için yararlı bir tekniktir. Parçacık boyutunu, şeklini ve dağılımını belirlemek için kullanılan nicel bir yöntemdir. TEM aynı zamanda diğer morfolojik karakterizasyon cihazlarına göre daha yüksek çözünürlüğe sahiptir (Padhi ve Behera, 2022). Bu tekniğın dezavantajı, yüksek vakum altında olduğundan ince numune kesiti gerekliliğı ve numune hazırlamanın zaman alıcı olmasıdır (Juffmann ve ark., 2017). Bu çalışmada çözeltilerin TEM görüntüleri JEOL JEM 2100 FHRTEM markalı cihaz tarafından kaydedilmiştir.

Dış Kuantum Verimi (External Quantum Efficiency, EQE): EQE, hücre tarafından toplanan yük taşıyıcılarının sayısı ile gelen fotonların sayısı arasındaki oran olarak tanımlanır. EQE' nin spektral şekli, fotoakım üretim sürecinin verimliliğini ortaya çıkarır ve hücre içindeki kayıp mekanizmaları hakkında fikir verir (Ananda, 2017). EQE, kaynak ışık olarak 300 W Xenon lambalı bir ölçüm sistemi (Newport QE-PV-SI) tarafından dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

3.3. Kaplama Teknikleri

3.3.1. Spin Kaplama Yöntemi

İnce film ve kaplama bilimi ve teknolojisi, antik tarihin metal çağlarına kadar uzanan açık ara en eski yöntemlerden biridir. Tarih boyunca, dayanıklılık, mekanik dayanım ve optik görünüm gibi istenen özellikleri elde etmek için farklı malzeme ve sıvılardan oluşan kaplamalar uygulamışlardır. Yıllar geçtikçe, kaplama endüstrisi giderek daha da gelişerek günümüz teknolojisinin önemli bir sınıfına dönüşmüştür (Nazarpour, 2013). Spin-kaplama, gerekli kalınlıkta üniform kaplamalar üretmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Uzun yıllar öncesinden beri, spin kaplama yoluyla ince filmler biriktirilmektedir. Bu yöntemde, alt tabaka düzenlenmiş bir yüksek hızda döndürülmeden önce alt tabakanın merkezine küçük bir damla kaplama malzemesi konulur. Alt tabaka, döndürülerek kaplama işlemi sırasında, kaplanacak bölgeye paralel olması gereken bir eksen etrafında döner. Sonuç olarak, kaplama malzemesi alt tabakanın kenarına doğru dağıldığında ve sonunda buradan uzaklaştıkça yüzeyde ince bir kaplama filmi oluşur. Aslında döndürerek kaplama 4 ana başlıktan oluşmaktadır. İlki sıvı dağılımı, ikincisi döndürme, üçüncü kısım kararlı sıvı çıkışı son kısım ise buharlaşma ağırlıklı kurutmadır (Paras ve Kumar, 2022). Bu yöntemde hacim, döndürme hızı, döndürme süresi, çözeltinin viskozitesi ve derişimi film kalınlığını etkileyen temel parametrelerdir. Kontrollü film kalınlığı, üniform yüzey, düşük işletme maliyeti, hızlılık vb. spin kaplama tekniğinin başlıca avantajlarından bazılarıdır (Paras ve Kumar, 2022). Bu aşamada ince filmler kaplanıp hücre oluşumu tamamlanır. Kaplanan yüzeyler üzerindeki çözücülerini uzaklaştırmak amacıyla ısıtma işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan döndürerek kaplama cihazı

3.3.2 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi (PVD)

PVD, vakum altında bir yüzey üzerine ince bir malzeme tabakası biriktirmek için kullanılan bir tekniktir. PVD, buhar elde etmek için yoğunlaştırılmış bir fazın püskürtülmesine veya buharlaştırılmasına dayanır. Bu kavramda PVD kaplamayı 3 adımda açıklamak mümkündür (Faraji ve ark., 2018);

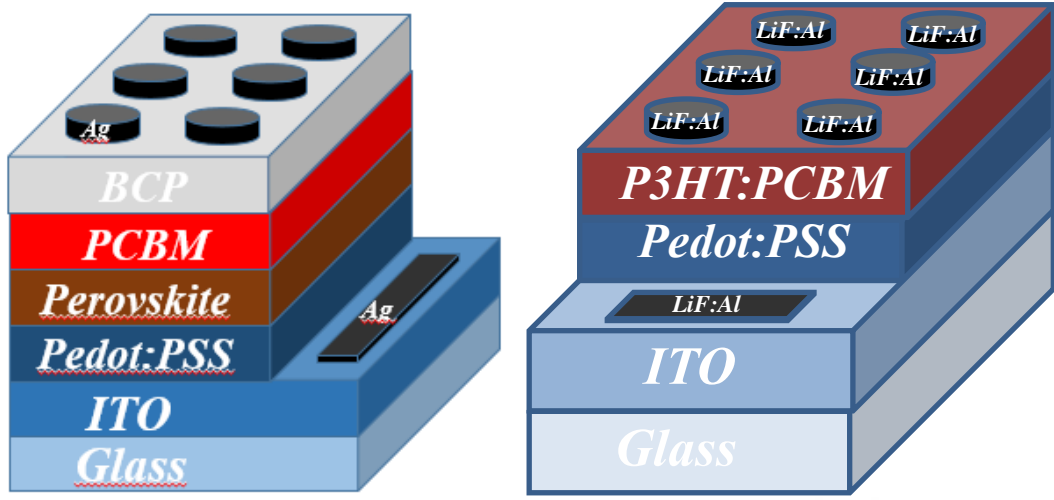
- Yüzey üzerine biriktirilecek malzeme fiziksel yollarla buhara dönüştürülür.
- Buhar, kaynaktan yüzey tabakaya kadar düşük basınçlı bölgeye taşınır.
- Buhar, ince bir film oluşturmak için alt tabaka üzerinde birikmeye uğrar.

Bu noktada PVD işlemleri birkaç nanometre ile binlerce nanometre aralında olabilmektedir. Bu çalışmada güneş hücrelerin üretimlerinin tamamlanması ve elektriksel özelliklerinin ölçülebilir hale getirilmesi amacıyla PVD tekniği kullanılarak aygıt yüzeyine Ag kaplanmış ve böylece anot ve katot kontaklar oluşturulmuştur. Bu noktada kaplama yapılan cihaz fotoğrafları Şekil 3.5 de görülmektedir.



Şekil 3.5. Fiziksel buhar biriktirme cihazı

3.4 Güneş Hücrelerinin Hazırlanması



Şekil 3.6. P-KKN dopantlı perovskit/organik güneş hücresi konsepti

3.4.1. Cihaz Yüzeylerinin Hazırlanması ve Temizlenmesi

Büyük boyutlarda üretilen ITO kaplı camlar hücre oluşturulması amacıyla 1,5*1,5 boyutlarda kesilmiştir. Sonrasında sırasıyla hellmanex çözeltisi, deiyonize su, aseton ve isopropanol ile ultrasonik banyoda 10 dk boyunca temizlenmesi sağlanmıştır. Temizlik işleminin ardından yüzeyler azot gazı ile kurutulmuştur. Böylece camlar kaplama için hazır hale gelmiş olacaktır.

UV-ozon veya O₂ plazma ön işlemi, organik kirleticileri polimer yüzeylerden uzaklaştırmak ve yapışmayı iyileştirmek için oldukça etkili bir fotokimyasal oksidasyon işlemidir. Bu noktada aşağıdaki tabloda UV-Ozon ve plazma temizliğin avantajları ve dezavantajları verilmektedir (Man Lung ve ark., 2009; Kohli, 2015; Liu ve ark., 2016; Šimončicová ve ark., 2019; Thanu ve ark., 2019).

Çizelge 3.1. Yüzey temizleme yöntemleri

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Plazma Temizleme	Düşük sıcaklıkta işlem	Düşük çalışma alanı
	Ortam havasında plazma üretimi	Yatırım maliyetleri
	Düşük işletme maliyeti	Adaptasyon
	Kısa işlem süresi	mekanizmaları Etkili dozun belirlenmesi
	Çevre dostu	Plazma penetrasyon derinliği Sistem bağımlılığı
UV-O₃ Temizlik	Kısa işlem süresi (ısınma yok)	Organik yüzeyler zarar görmeden temizlenemez
	Kullanımı basit	Ön temizlik gereklidir
	Düşük işletme maliyetleri	Düşük çalışma yeri
	Düşük bakım süresi	Güvenlik önlemi olmalı
	Moleküler seviyedeki organik kirleticilerin etkili bir şekilde çıkarılması	çünkü UV Işığı
	Ultra temiz yüzey	kullanılmakta

Bu doğrultuda kurutulan camların yüzeydeki organik atıkların temizlenmesi ve yüzeyin aktif hale getirilmesi amacıyla Diener Plasma System Femto Pcce markalı oksijen plazma cihazından faydalanılmıştır. Kullanılan plazma cihazı aşağıdaki şekilde görülmektedir.

Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan O₂ Plazma cihazı

3.5. Çalışmada Kullanılan Çözeltilerin Hazırlanması

PEDOT:PSS Hazırlanışı: Güneş hücreleri için boşluk iletim tabakası olarak literatürde de sıklıkla kullanılan PEDOT:PSS sulu çözeltisi ticari olarak satın alınarak (Clevios PVP Al 4083) kullanılmıştır. Alınan çözelti 24 saat boyunca karıştırılarak homojen olması sağlanmıştır.

Perovskit Çözeltisinin Hazırlanması: Perovskit çözeltisini hazırlamak için literatürde bulunan bir MAPbI₃ çözeltisi tercih edilmiştir (Seo ve ark., 2014). Çözelti gama-bütürolakton (GBL) çözücüsü kullanılarak hazırlanan 1,23 eş molardaki PbI₂ ve MAI malzemeleri karıştırılması ile hazırlanmıştır. Karıştırılmaya alınan çözelti 50 °C' de gece boyunca karıştırıldıktan sonra kaplama yapılmadan önce 2 saat boyunca 70 °C' de karıştırılarak ısıtılmıştır.

6,6-fenil C61-bütirik asit metil ester (PCBM) Çözeltilerinin Hazırlanması: Güneş hücrelerinin üretiminin tamamlanması için elektron iletim katmanı olarak PCBM kullanılmıştır. Bu çalışmada PCBM herhangi bir sıcaklık uygulanmadan kütlece %1 ve %2' lik oranında klorobenzen içerisinde hazırlanmıştır. Çözeltiler hazırlandıktan sonra oda sıcaklığında 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Kullanmadan hemen önce filtreden geçirilerek kaplamada kullanılmıştır.

P3HT: PCBM Çözeltisinin Hazırlanması: OGH' lerinde poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) ve PCBM karışımı en çok kullanılan yığın yapıdır. Yapılan çalışmada kloroform: klorobenzen (1:1) içindeki aktif tabaka çözeltisi, P3HT ve PCBM' i ağırlıkça % 1,0 : 0,6 oranında 40 mg/mL konsantrasyonda çözerek hazırlanmıştır. 24 saat boyunca 50°C de karıştırılmıştır.

BCP: Bu çalışmada uygun enerji seviyelerinin ayarlanabilmesi için BCP isopropanol içerisinde %0,5 oranında hazırlanmış olup 24 saat boyunca sıcaklık uygulanmadan karıştırılmıştır.

3.6. P-KKN' ların Sentezi

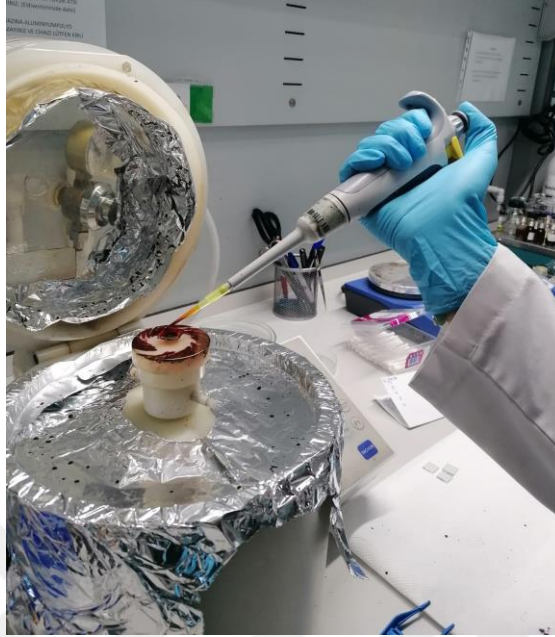
P-KKN' ları sentezlemek için solvotermal yöntem uygulanmıştır. İlk olarak 1,5 g sitrik asit, 1,5 g üre, 5 mL konsantre H₃PO₄ çözeltisi ve 100 mL DMF içerisinde hazırlanarak oda sıcaklığında 20 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra çözelti teflon kaplı otoklavda 180 °C'de 24 saat bekletilmiştir. Oda sıcaklığında soğutulan otoklav içerisindeki çözeltinin P-KKN' ların oluşumunu gösteren şeffaf koyu kahverengi bir çözeltiliye dönüştüğü görülmüştür. Son olarak sentezlenen KKN' ların çözücüden ayrılması için 6000 rpm' de 30 dakika santrifüj edilmiş ve tortu ultra saf su ile yıkanarak saflaştırılmıştır. Ayırma ve yıkama işlemleri en az üç kez tekrarlanmıştır. Elde edilen P-KKN' lar kurutulmuş ve sonraki kullanımlar için 4 °C' de karanlık ortamda muhafaza edilmiştir. P-KKN katkı çözeltisinin hazırlanması için, kurutulmuş ürün 10 mg/mL konsantrasyonunda DMF içinde çözülmüştür. Her iki hücre konfigürasyonunda aktif tabaka katkılama yapılmadan önce, P-KKN 0,22 µm' lik PVTE filtre ile filtrelenmiştir.

3.7 Perovskit Güneş Hücrelerinin Kaplamaları

PEDOT:PSS Kaplaması: PEDOT:PSS çözeltisi Laurell marka WS-400BZ-GNPP/LITE model döngüsel kaplama cihazı kullanılarak ITO yüzey üzerine 3 basamak ta kaplanmıştır. Sırasıyla 1500 rpm 15 saniye, 2000 rpm 50 saniye ve 3000 rpm 2 saniye olarak kaplanmıştır. Kaplanan yüzeyler 10 dakika boyunca 140°C'de ısıtılmıştır.

Perovskit Çözeltisinin Kaplanması: Farklı P-KKN' ların katkılanmasıyla hazırlanan perovskit çözeltileri döngüsel kaplama cihazı kullanılarak iki basamakta kaplanmıştır. 1000 rpm 10 saniye ve 5000 rpm 30 saniye olarak kapanan perovskit çözeltisine dinamik olarak son 10 saniye kala toluen damlatılmıştır. Kaplanan yüzeyler 20 dakika boyunca 100°C'de tavlansmıştır. Toluene eklenen yüzeylerin kaplama işlemi bittikten sonra siyah ve yüksek yansıtıcılıkta olması beklenmiştir.

PCBM Çözeltisinin Kaplanması: Hazırlanan PCBM çözeltisi döngüsel kaplama cihazı ile iki basamakta kaplanmıştır. Sırasıyla 1500 rpm 17 saniye ve 2000 rpm 17 saniye statik olarak kaplanan yüzeyler 1 dakika boyunca 90 °C’de ısıtılmıştır.



Şekil 3.8. PCBM kaplama

BCP Çözeltisinin Kaplanması: Hazırlanan BCP çözeltisi döngüsel kaplama cihazı ile üç basamakta kaplanmıştır. Sırasıyla 1000 rpm 2 saniye, 2000 rpm 2 saniye ve 4000 rpm 40 saniye statik olarak kaplanan yüzeylere ısıtılmıştır.

3.8. Organik Güneş Hücrelerinin Kaplamaları

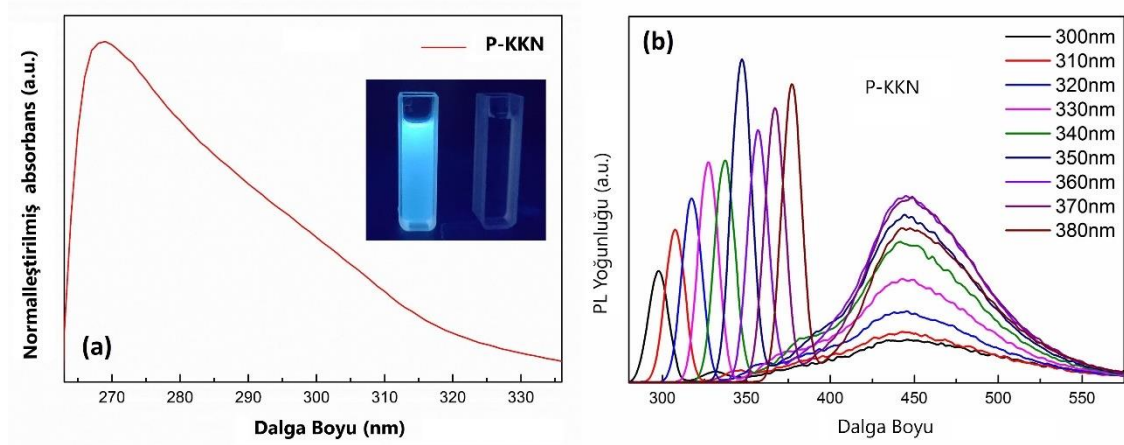
PEDOT: PSS Kaplaması: PEDOT: PSS çözeltisi yine ITO yüzey üzerine 2000 rpm 60 saniye döndürülerek tek basamakta kaplanmıştır. Kaplanan Yüzeyler 30 dakika boyunca 120°C’de ısıtılmıştır.

P3HT: PCBM Çözeltisinin Kaplanması: Hazırlanan P3HT: PCBM çözeltisi döngüsel kaplama cihazı ile tek basamakta kaplanmıştır. 2000 rpm 60 saniye statik olarak kaplanan yüzeyler 30 dakika boyunca 120°C’de ısıtılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. P-KKN Karakterizasyonu

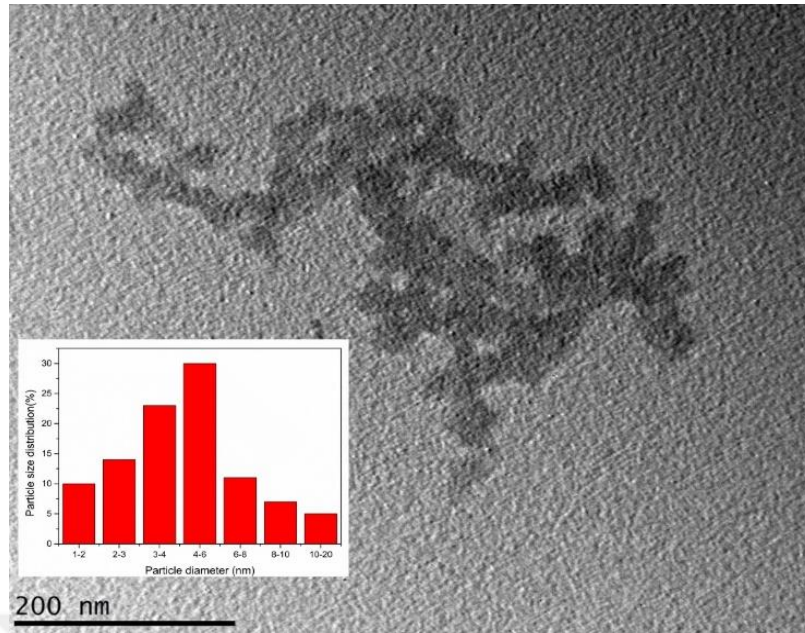
Sentez sonrası elde edilen KN' ların optik ve elektriksel özelliklerinin aydınlatılması çok önemlidir. Sentezlenen P-KKN' ların optik özelliklerini anlamak için UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi ve PL teknikleri kullanılmıştır.



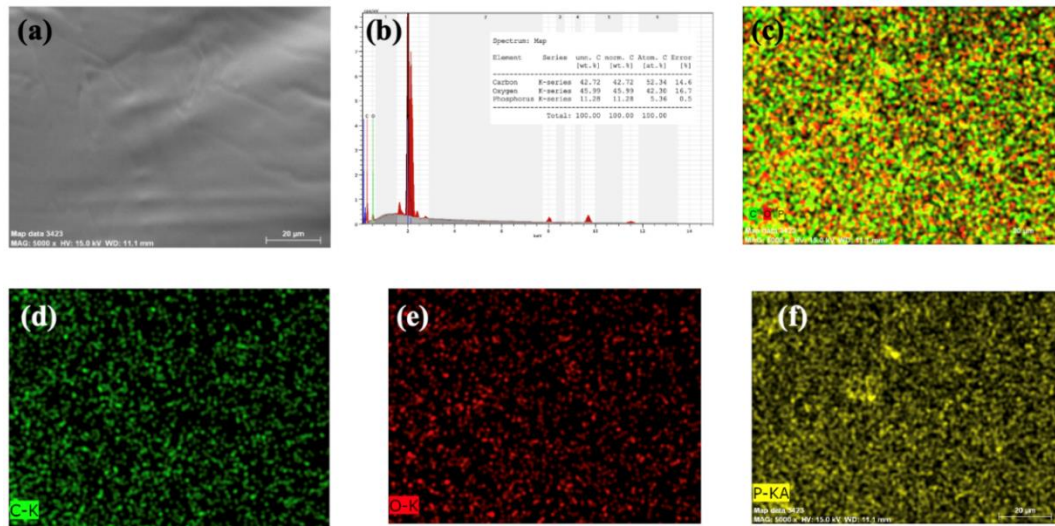
Şekil 4.1. P-KKN' nin UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve (b) PL spektrumları

P-KKN' ların absorpsiyon spektrumları ve P-KKN' ların PL spektrumları sırasıyla Şekil 4.1 (a) ve (b)' de gösterilmiştir. P-KKN' ların absorpsiyon piki yaklaşık olarak 270 nm de gözlenmiştir. Bu zirve, C=O, P=O ve C=P grupları dahil olmak üzere fonksiyonel grupların $n-\pi^*$ elektronik geçişi ile ilgilidir. Hazırlanan P-KKN çözeltisi, UV lambası altında (yaklaşık 365 nm'de) güçlü mavimsi floresans emisyonu vermiştir ve bu mavimsi floresans özelliği sentezlenen KKN' ların yaklaşık 3-6 nm gibi küçük boyutlara ulaştığını göstermektedir. Ek olarak, P-KKN' ların PL spektrumları, 300 nm' den 380 nm' ye kadar uyarma dalga boylarında olarak incelenmiştir. Şekil 4.1 (b)' de UV ışığı altında parlak mavi ışıkla ilişkilendirilen yaklaşık 450 nm civarındaki pikte gözlenmiştir

Morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için sentezlenen P-KKN' ların SEM ve TEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.2' de verilen TEM görüntüsü, homojen olarak dağıtılmış küresel şekilli P-KKN' ları göstermektedir. Şekil 4.2' de ayrıca P-KKN' ların parçacık boyutu dağılımı (%) grafiği verilmiştir ve ortalama parçacık çapının 4-6 nm olduğu belirlenmiştir. Ortalama parçacık çapı, P-KKN' ların kuantum boyutlu nanomalzemeler olarak başarıyla sentezlendiğini göstermektedir.



Şekil 4.2. P-KKN' ların temsili TEM görüntüsü

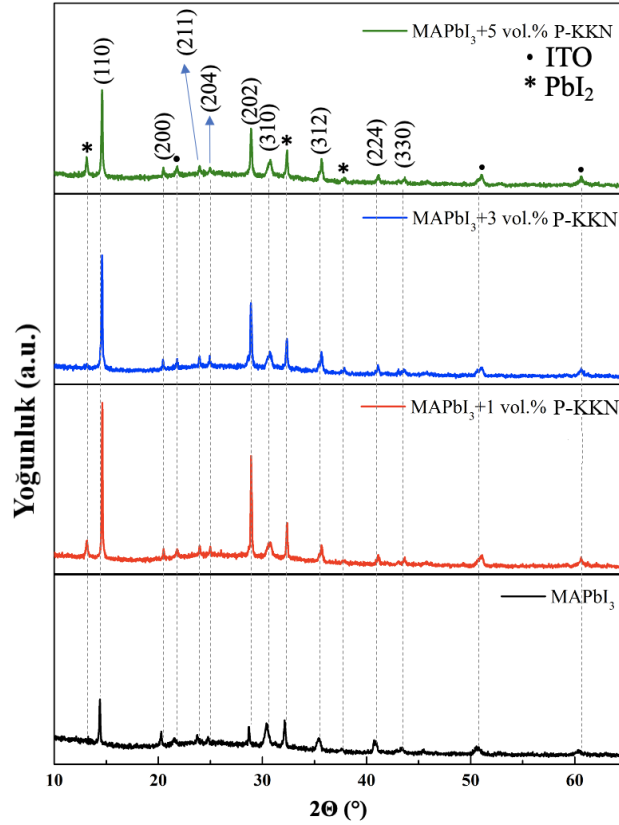


Şekil 4.3. (a) Temsili SEM görüntüsü, (b) P-KKN' ların (c) örtüşen, (d) karbon, (e) oksijen ve (f) fosfor görüntüsünün EDX modeli ve EDX renk eşlemesi.

P-KKN' lardaki fosfor elementi katkısı, SEM-EDX haritalama tekniği ile karakterize edilmiştir. Hazırlanan P-KKN' ların SEM-EDX sonucuna göre, P-KKN' ların içerisinde ağırlıkça fosfor oranı %11,28 karbon oranı %42,72 ve oksijen oranı %45,99 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, fosfor katkılı KKN' ların başarıyla sentezlendiğini açıkça göstermektedir.

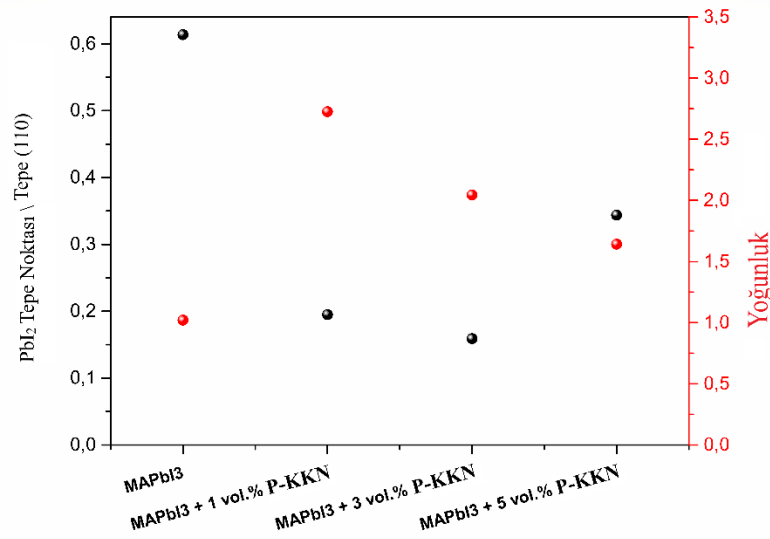
4.2. Perovskit İnce Filmlerinin Karakterizasyonu

P-KKN' ların katkılanmasıyla hazırlanan PGH' lerde fotovoltaik performans artışının kökenini aydınlatmak için MAPbI₃ ince filmlerinin optik, morfolojik ve yapısal özellikleri araştırılmıştır.



Şekil 4.4. Farklı hacim ilavesi ile hazırlanan MAPbI₃ ince filmlerinin XRD desenleri

Şekil 4.4'de P-KKN' ların katkılanmasıyla hazırlanmış MAPbI₃ katmanının XRD modeli ile P-KKN katkısı olmayan MAPbI₃' ün XRD modeliyle karşılaştırılması gösterilmektedir. Açıkça göstermektedir ki, MAPbI₃ düzlemlerine karşılık gelen açılar 14,5°, 2,4°, 23,9°, 24,9°, 28,8°, 32,3°, 35,6°, 41,0°, 43,6°, 50,6° ve 60,4° 2θ değerlerinde tanımlanmış ve kırınım tepe noktaları sırasıyla (110), (200), (211), (202), (220), (310), (312), (224) ve (330) dur (Budiawan ve ark., 2022). XRD karakterizasyonuna göre, artan kristal boyutundan dolayı P-KKN katkı maddesinin perovskit ince filmi üzerinde olumlu etki gösterdiği iyi bir şekilde ayırt edilebilmektedir. İhmal edilebilir miktarda PbI₂ kalıntısı, kusur durumlarını pasifleştirerek perovskit performansını artırabilir, ancak doğal kararsızlığı nedeniyle filmin nemli ortamlarda ve ışık altında bozulmasına neden olabilmektedir.



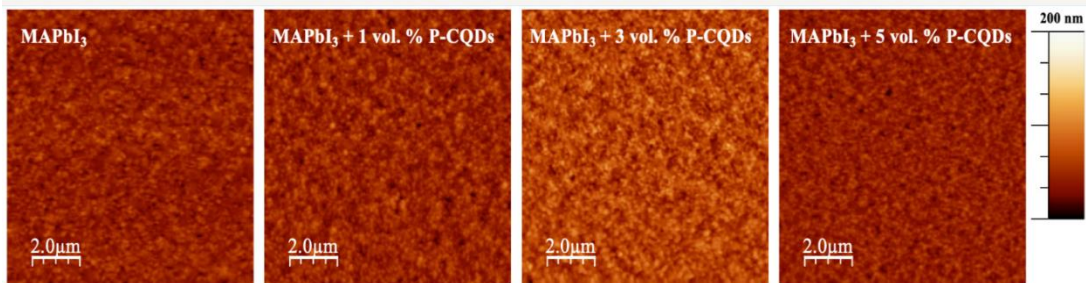
Şekil 4.5. PbI₂ zirvesinin ve perovskit (110) zirvesinin (kırmızı noktalar) XRD yoğunluklarının ve perovskit (siyah noktalar) düzlemlerinin (110) maksimum yoğunluklarının oranları

Perovskit (110) düzleminin yoğunluk oranları ve PbI₂ sinyalleri Şekil 4.5' de sunulmaktadır. Bu sonuca göre, hacimce %1 ve hacimce %5 P-KKN ilave edilen filmlerdeki PbI₂ miktarı, hacimce %3 P-KKN ilave edilen filmlerden daha yüksektir. Öte yandan, P-KKN' ların hacimce %0 ilave edildiği filmde PbI₂ içeriği gözlenmemektedir. Perovskit filme P-KKN' ların eklenmesinin, perovskitlerin pik yoğunluklarını artırmaya yol açtığı söylenebilir, P-KKN' ların eklenmesinin perovskit kristalleşmesini iyileştirdiğini ve daha büyük taneler ile sonuçlandığını gösterir. Bu sonuçlarda çizelge 4.1' de daha net olarak görülmektedir. Ek olarak, perovskit filmlerin kristal boyutlarının hacimce %0, %1, %3 ve %5 ilavesi için sırasıyla 54,42 nm, 82,89 nm, 71,55 nm ve 61,56 nm olduğu ölçülmüştür. Bu sonuçlar göstermektedir ki, P-KKN' ların eklenmesinden sonra perovskit filmlerin kristalleşmesi genel eğilimde iyileşmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı P-KKN konsantrasyonları ile hazırlanan perovskite filmlerin ortalama pürüzlülük (Ra), tane boyutu dağılımı ve kristal boyutu değerleri.

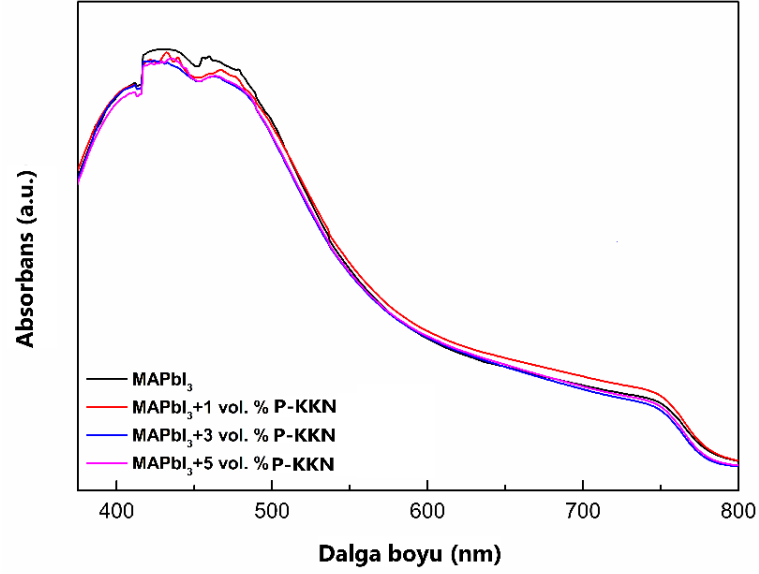
	Kristal Boyutu (nm)	R _a (nm)	Tane Boyut Dağılımı (nm)
MAPbI ₃	54.42	6.268	35.496
MAPbI ₃ + hac. %1 P-KKN	82.89	9.320	51.726
MAPbI ₃ + hac. %3 P-KKN	71.55	9.002	45.710
MAPbI ₃ + hac. %5 P-KKN	61.56	7.925	41.371

P-KKN' ların perovskit film tabakasının yüzey morfolojisi üzerindeki etkisini anlamak için AFM görüntüleri kaydedilmiştir. Şekil 4.6, P-KKN' ların eklenmesiyle hazırlanmış MAPbI₃ katmanının morfolojisini göstermektedir. Çizelge 4.1' de görüldüğü gibi ortalama pürüzlülük (Ra) değerlerinin %0, %1, %3 ve %5 P-KKN katkılanması için 6,268 nm, 9,320 nm, 9,002 nm ve 7,925 nm olarak ölçülmüştür. MAPbI₃ katmanının P-KKN katkı maddesinin % hacmindeki artış ile R_a değerindeki genel artış görülmektedir. Diğer yüzeylere göre, hacimce %1 oranında P-KKN ilave edilen yüzey en yüksek Ra değerine sahiptir (Xu ve ark., 2021). Artan yüzey pürüzlülüğü, daha iyi ışık Emilimi ve saçılımına sebep olmaktadır. Tüm bunlara ek olarak AFM görüntüleri üzerinden yazılım vasıtasıyla yüzeylerin tane boyut dağılımları hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.1' de paylaşılmıştır. Bu dağılım, hacimce %0 P-KKN ilavesi için 35,496 nm' den %1, %3 ve %5 P-KKN ilavesi için sırasıyla 51,726 nm, 45,710 nm ve 41,371 nm' ye çıkmıştır. P-KKN katkılama işleminin perovskit filmlerde tahrikli bir yük taşıma mekanizmasına yol açabilecek tane boyutunu arttırdığı, perovskit filmlerin tane sınırlarını ve taşıyıcı rekombinasyonunu azalttığı söylenebilir (Xu ve ark., 2021) . Bu nedenle, P-KKN' ların katkılama işlemi ile PGH' ların fotovoltaiik parametreleri geliştirilebilir.

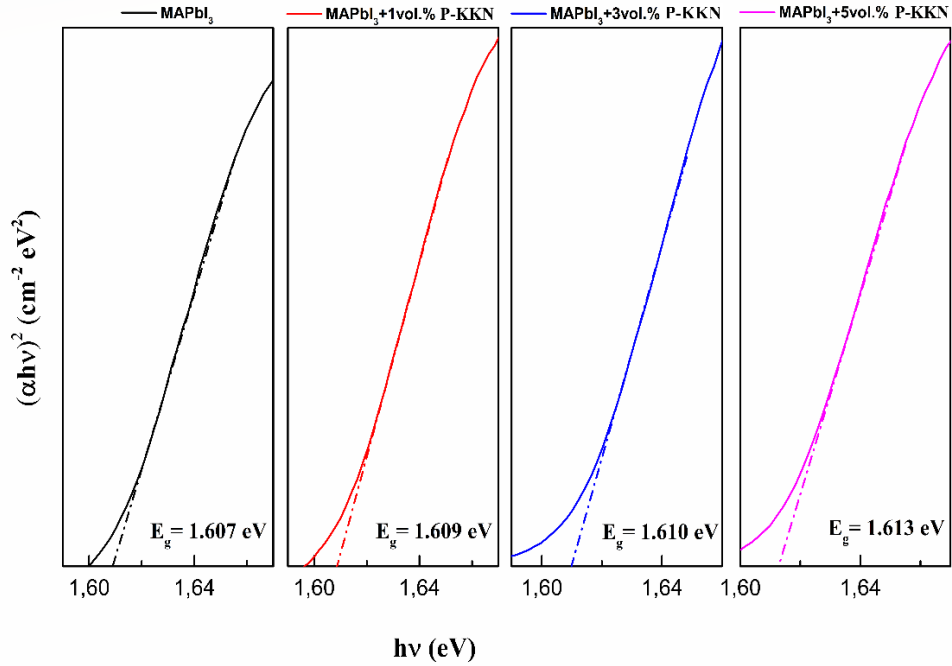


Şekil 4.6. Perovskite solüsyonunda (a) %0, (b) %1 , (c) %3 ve (d) %5 hacim oranında P-KKN içeren MAPbI₃ ince filmlerinin 2D AFM görüntüleri.

P-KKN katkı maddesinin perovskit ince filmlerin optik ve fotofiziksel özellikleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için UV-Vis absorpsiyon spektrumları ölçülmüştür ve sonuçlar Şekil 4.7' de verilmiştir. Perovskit çözeltisine P-KKN' ların eklenmesiyle, 500-800 nm ışık soğurma aralığında hafif bir artış gözlenmiştir. Bu artışa dayanarak perovskit soğurucu katmanın foto-hasat etme kabiliyetinde küçük bir gelişme olduğu söylenebilir. Bu, benzer MAPbI₃ film kalınlığına sahip P-KKN' ların dâhil edilmesiyle elde edilen daha iyi kristallığe ve daha yüksek tane boyutlarıyla da ilişkilendirilebilmektedir.



Şekil 4.7. Farklı % P-KKN' ların eklenmesiyle hazırlanan MAPbI₃ ince filmlerin UV-vis absorpsiyon spektrumları.



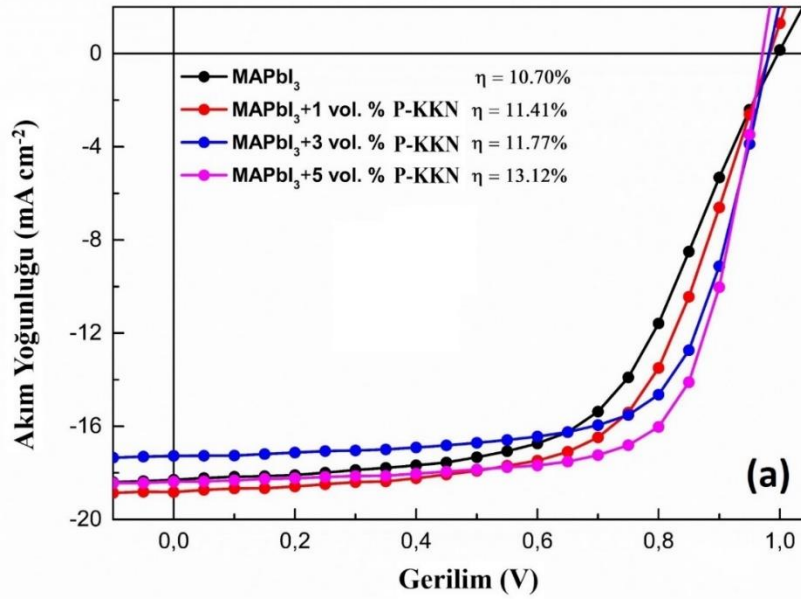
Şekil 4.8. Farklı % P-KKN' ların eklenmesiyle hazırlanan MAPbI₃ ince filmlerin absorpsiyon eğrilerinden çıkarılan Tauc grafikleri.

MAPbI₃ 'e P-KKN' ların katkılanmasıyla hazırlanan filmlerin optik bant boşluklarını belirlemek için $(\alpha hv)^2$ ye karşı hv grafiği kullanılmıştır. Burada α absorpsiyon katsayısı, hv gelen foton enerjisi ve A ise sabit bir değerdir. UV-Vis absorpsiyon spektrumlarına göre E_g değerlerinde hafif bir artışa neden oldu. P-KKN' ların

MAPbI₃' ün bileşimini etkilemediği, ancak soğurma bölgesinde soğurucu tabakanın ışık soğurmasını artırdığı gözlemlenmiştir.

4.3. Perovskit Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu

İnce filmlerin karakterizasyonunun ardından P-KKN katkılama işleminin fotovoltajik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla güneş hücreleri üretilmiş ve solar simülatör aracılığıyla karakterize edilmiştir. Bu cihazların J-V eğrileri Şekil 4.9' da kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve FF gibi fotovoltajik karakteristikleri Çizelge 4.2' de listelenmiştir. J-V eğrilerine bakıldığında P-KKN katkılama işlemi ile birlikte eğrilerin kapsadığı alan genişlemiştir. Bu iyileşme artan FF değerini işaret etmektedir. P-KKN' ların eklenmesiyle tüm numunelerin FF değerleri %58,81' den %73,44'e önemli ölçüde yükselmiştir. Artan FF değerleri, muhtemelen perovskit yüzeyinde azalan PbI₂ birikiminden kaynaklanmaktadır, bu da perovskit ve yük taşıma katmanları arasında daha iyi yük ekstraksiyonu sağlamaktadır (Li ve ark., 2022). Hücre verimliliklerine bakıldığında ise hacimce %5 P-KKN ilavesiyle hazırlanan cihazın %13,12 ile en yüksek verimi verdiği görülmüştür.



Şekil 4.9. P-KKN' lar eklenerek/eklenmeden hazırlanan en iyi performans gösteren cihazların J-V eğrileri

Çizelge 4.2. En iyi PCE'lere sahip farklı konsantrasyondaki P-KKN' ların PGH' larının fotovoltaiik parametreleri

Yüzeyler	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA cm ⁻²)	J _{sc} - EQE (mA cm ⁻²)	FF (%)	EDV (%)
MAPbI ₃	0.995	18.293	17.850	58.81	10.705
MAPbI ₃ + hac. %1 P-KKN	0.988	18.820	18.020	61.44	11.4075
MAPbI ₃ + hac. %3 P-KKN	0.987	17.334	17.832	68.82	11.774
MAPbI ₃ + hac. %5 P-KKN	0.972	18.378	18.831	73.44	13.119

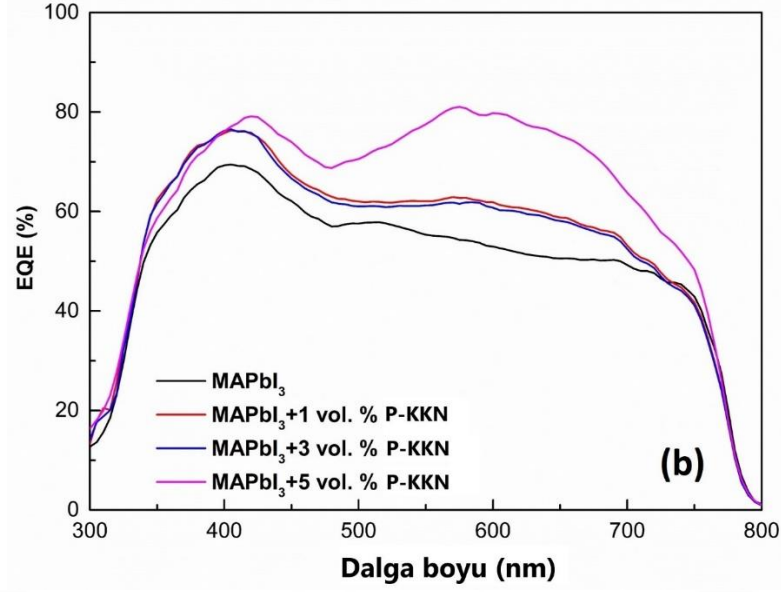
P-KKN' lardaki fonksiyonel gruplar (hidroksil grupları gibi), negatif iyodür iyonları ile hidrojen bağları oluşturabilir ve kristal oryantasyonunun modülasyonuna ve tuzak durumu yoğunluğunun en aza indirilmesine izin veren perovskit kristalleşmesini yavaşlatarak çekirdeklenme bölgeleri oluşturabilir.

İyot boşluğu gibi perovskite kusurlarının pasifleştirilmesiyle, elektron açısından zengin P-KKN' ların eklenmesi ayrıca yük taşıma özelliklerini de geliştirmiştir. Ayrıca, J_{sc} değerleri, hacimce %3 P-KKN katkı maddesi içeren cihaz dışında, kontrol cihazından biraz daha yüksektir. PGH' lar P-KKN' ların eklenmesiyle daha fazla fotonun emilmesine sebep olmaktadır. Hacimce %3 P-KKN katkı maddesine sahip cihaz için bu durum istisna olabilir.

Çizelge 4.3. P-KKN' ların farklı konsantrasyonlarında PGH' lerinin seri direnci (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) değerleri.

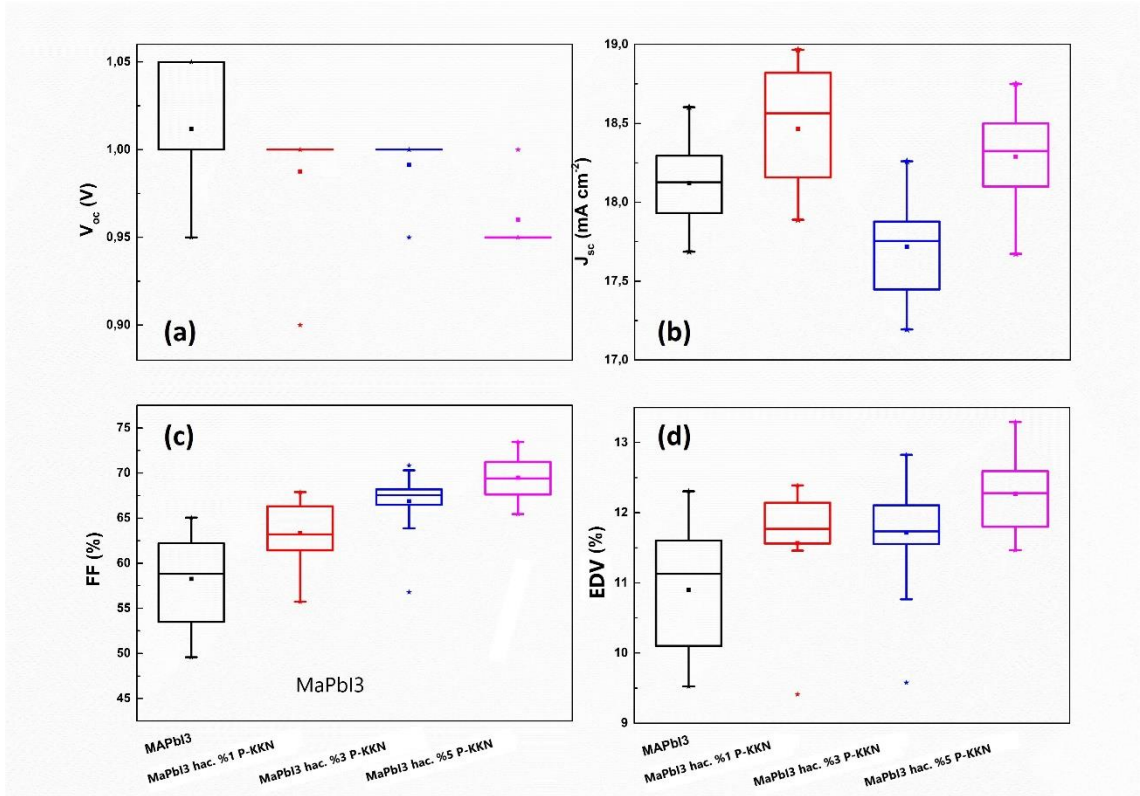
Yüzeyler	R _s (Ω cm ⁻²)	R _{sh} (Ω cm ⁻²)
MAPbI ₃	18,95	1023,72
MAPbI ₃ + hac. %1 P-KKN	12,74	1090,43
MAPbI ₃ + hac. %3 P-KKN	8,83	1314,58
MAPbI ₃ + hac. %5 P-KKN	6,36	1404,49

R_{sh} değerleri, kontrol cihazı için 1024 Ω cm⁻² iken sırasıyla artan hacimce % P-KKN ilavesi için 1090 Ω cm⁻², 1315 Ω cm⁻² ve 1405 Ω cm⁻²'ye değişmiştir. R_s değerleri kontrol cihazı için 19 Ω cm⁻²'den artan hacimce % P-KKN ilavesi için 13 Ω cm⁻², 9 Ω cm⁻² ve 6 Ω cm⁻²'ye düşmüştür. Bu sonuçlar cihaz performansları ile uyumludur.



Şekil 4.10. En iyi performans gösteren cihazların EQE spektrumları.

P-KKN katkılı cihazlar için EQE spektrumları kontrol cihazından biraz daha yüksek olduğu gözlenmektedir. P-KKN' ların eklenmesinin, rekombinasyon sürecini baskılayabileceği ve ayrıca azalan yük tuzağı yoğunluğuna bağlı olarak foton kaynaklı taşıyıcıların toplanmasını iyileştirebileceği sonucuna varılabilir. Kontrol cihazının EQE eğrisine bakıldığında 500 nm'nin üzerinde bir düşüş göstermiştir. Aynı bölgede hacimce %1 ve %3 P-KKN katkı maddesi ile hazırlanan cihazlarda hafif bir artış gözlenirken, hacimce %5 P-KKN katkı maddesi ile hazırlanan cihazda önemli bir iyileşme görülmüştür. Bu bölgedeki bir artış, temel olarak rekombinasyon nedeniyle perovskit yüzeyindeki artan yük ekstraksiyonu ile ilgilidir. Bu sonuçla, P-KKN katkı maddesinin perovskit kusurlarını pasifleştirdiği söylenebilir.



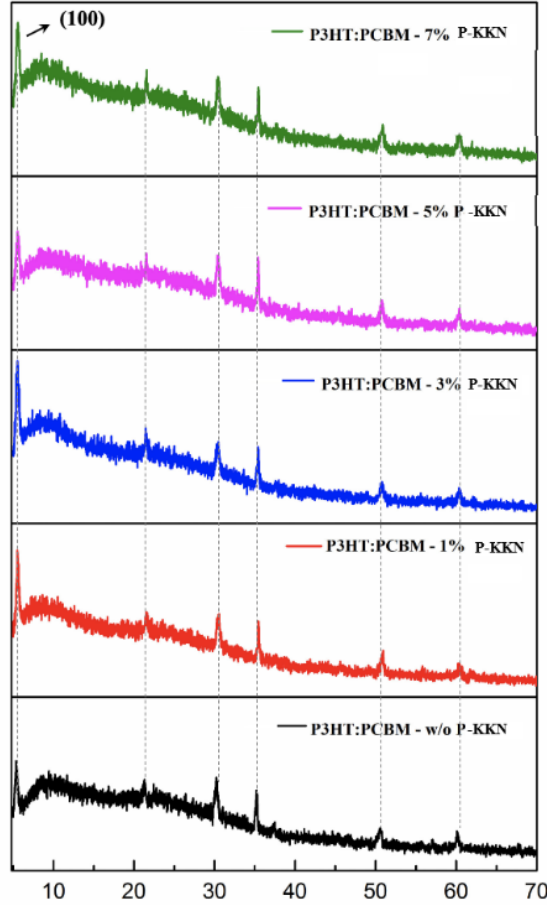
Şekil 4.11. Farklı P-KKN yüzdeleri ile hazırlanan 20 cihazın (a) V_{OC} , (b) J_{SC} , (c) FF ve (d) PCE'sinin J-V ölçümlerinin istatistiksel dağılımları

Şekil 4.11, perovskit katmanlarında eklenen farklı P-KKN yüzdeleri ile hazırlanan 20 cihazın fotovoltaiik özelliklerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Uygun hacimde P-KKN' ların eklenmesinden sonraki ortalama FF ve EDV değerleri, kontrol cihazında FF için %19,25 (%58,22 ila %69,43) ve PCE' ler için %12,7 (%10,89 ila %12,27) oranında daha yüksektir. MAPbI3'ün uygun enerji bandı boşluk değerlerinin yanı sıra, perovskit ince filmlerin kusur pasivasyonu, daha iyi tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek ve geri yük rekombinasyonunu baskılayarak fotovoltaiik performansı iyileştirmek için önemlidir.

4.4. P3HT:PCBM İnce Filmlerinin Karakterizasyonu

Organik güneş hücreleri (OGH), muadillerine, özellikle inorganik olanlara iyi bir alternatiftir. OGH' lerinde kullanılan organik yarı iletkenler ucuz, hafif ve çözelti teknikleriyle kolayca işlenebilir olduğundan, OGH' leri giderek fotovoltaiik endüstrisinde önemli bir yer edinmektedir. İyi bilindiği gibi, boşluk hareketliliği, P3HT fazının kristalliğinin iyileştirilmesiyle geliştirilebilir. P3HT' nin kristalleşme gelişimi üzerine P-KKN katkılanmasının etkisini incelemek için tüm P3HT: PCBM katmanlarının XRD desenleri kaydedilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.12' de görülmektedir. P-KKN' ların artan hacim

yüzdesi ile P3HT' nin kristalliğinde kayda değer bir artış gözlenmiştir. P3HT:PCBM filmlerinin ortalama kristal boyutları, Çizelge 4.4' de verilmiştir. Açık bir şekilde, fotoaktif karışıma sırasıyla hacimce %1, %3, %5, %7 P-KKN' ların eklenmesi üzerine kristal boyutları 15,177 nm' den 15,728 nm, 16,202 nm, 14,693 nm ve 15,901 nm' ye yükselmiştir. Bu durum yığın hetero-eklem filminin kristalliği üzerinde P-KKN katkısının olumlu etkisini göstermemiştir.



Şekil 4.12. Farklı hacimce P-KKN katkısı ile hazırlanan P3HT: PCBM ince filmlerinin XRD desenleri.

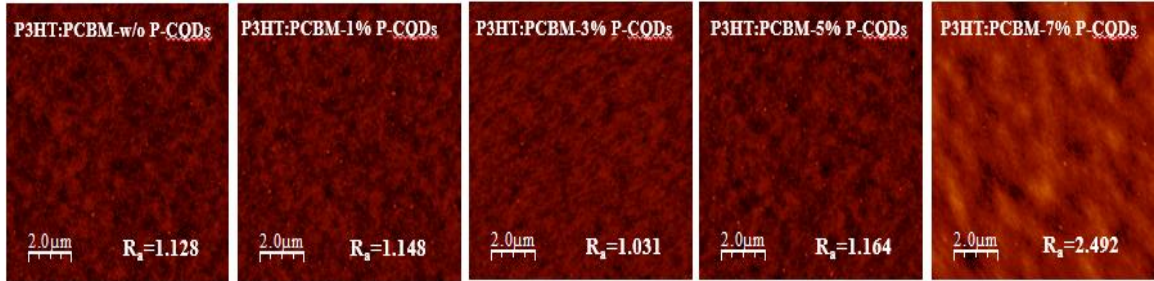
Çizelge 4.4' te hacimce %3 P-KKN ilavesi ile hazırlanan P3HT:PCBM ince filminin kristal boyutu 16,202 nm olarak elde edilmiştir. Artan kristal boyutu P3HT:PCBM katmanının yük taşıyıcı hareketliliğinin, dolayısıyla OGH' sinin fotovoltaj performansının P-KKN' ların eklenmesiyle iyileştirilebileceğini göstermiştir. KKN' lar, kristal sp^2 grafit çekirdekler tarafından düzenlenen yarı küresel nanomalzemeler olduğundan, KKN' lar kristalliği artırmaya yardımcı olabilir. P3HT' nin kristalliğini artırmak için çözücü tipi ve ısıl işlem gibi farklı parametreler kullanılabilir. Bu çalışmada P-KKN katkılı ve katkısız tüm cihazlarda aynı koşullar kullanılmıştır. Bu

nedenle, doğrudan P-KKN' ların eklenmesiyle ilgili kristalliğin iyileştirmesinin olduğu söylenebilir.

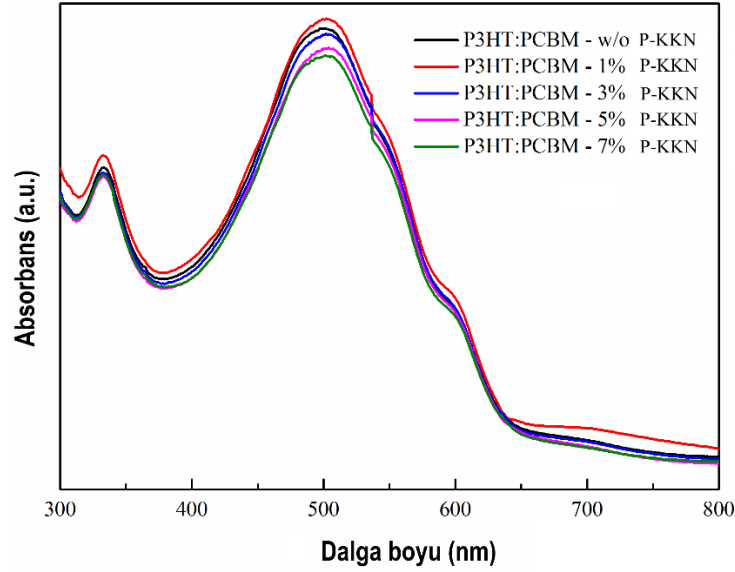
Çizelge 4.4. Farklı P-KKN konsantrasyonları ile hazırlanan organik filmlerin ortalama pürüzlülük (R_a), tane boyutu dağılımı ve kristal boyutu değerleri.

	R_a (nm)	Tane Dağılımı (nm)	Kristal Boyutu (nm)
P3HT: PCBM	1,128	8,974	15,177
P3HT: PCBM – %1 P-KKN	1,148	9,172	15,728
P3HT: PCBM – %3 P-KKN	1,031	10,503	16,202
P3HT: PCBM – %5 P-KKN	1,164	9,369	14,693
P3HT: PCBM – %7 P-KKN	2,492	13,018	15,901

Fotoaktif katmanın morfolojisi, nihai cihazın elektriksel özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu nedenle P3HT:PCBM filmlerin morfolojisi AFM tekniği ile incelenmiş ve yükseklik görüntüleri Şekil 4.13' te gösterilmiştir. Ayrıca AFM yazılımı ile ölçülen R_a değerleri Çizelge 4.4' te özetlenmiştir. P3HT: PCBM filmleri 1,128 nm'den 1,031 nm' ye (P3HT: PCBM-%3 P-KKN) düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 4.13. P3HT: PCBM çözeltisinde %0, %1, %3, %5, %7 hacim oranında P-KKN içeren ince filmlerin 2D AFM görüntüleri.



Şekil 4.14. Hacimce farklı oranlarda P-KKN' ların eklenmesiyle hazırlanan P3HT:PCBM ince filmlerin UV-Vis absorpsiyon spektrumları.

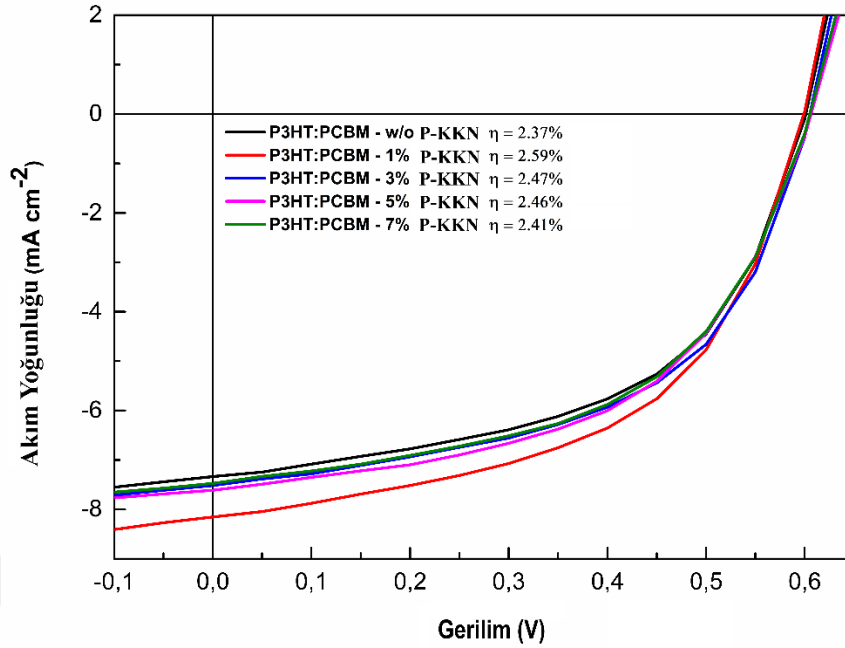
Foto aktif katmandaki P-KKN konsantrasyonunun optik özellikler üzerindeki etkisi, Şekil 4.14' de görülen UV-Vis absorpsiyon spektrumları ile belirlenmiştir. P-KKN' ların eklenmesinden sonra, tüm P3HT:PCBM ince filmleri, yaklaşık 330 nm ve 510 nm'de iki güçlü absorpsiyon zirvesi göstermektedir. P-KKN' ların artan katkı hacmi yüzdesi daha yüksek absorpsiyona sebep olmaktadır. Bununla birlikte, P-KKN' ların katkı hacminin daha fazla artması ince filmlerde aglomerasyona neden olabilir ve bu nedenle absorpsiyonun azalmasına neden olabilir. Şekilde görüldüğü gibi, en yüksek absorpsiyon hacimce %1 P-KKN' ların katkılı P3HT:PCBM ince filmde gözlenmiştir. Bu durum hazırlanan P3HT:PCBM filmi üzerinde bazı bölgelerin aglomerasyon sebebi ile homojen olmaması ile ilgili olabilmektedir. Bu homojen olmama, ince film morfolojisinin kalitesini düşürebilir.

Sonuç olarak, foto aktif karışımda P-KKN' ların varlığı ve hacim yüzdesi, imal edilen cihazların optik soğurma özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.

4.5. Organik Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu

P-KKN katkısının ve oranının OGH' leri üzerindeki etkisinin incelemesi amacıyla güneş hücreleri üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Akım yoğunluğu-gerilim (J-V) eğrileri Şekil 4.15' de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen fotovoltajik özellikler Çizelge 4.5' de listelenmiştir. Görüldüğü gibi, P-KKN içermeyen OGH' lerinin FF değerleri düşüktür (%53,83). Dolayısıyla EDV de düşüktür (%2,373). P-KKN' ların eklenmesinin ardından

P-KKN' lara sahip cihazların verimi önemli ölçüde iyileştirilmiştir ve optimize edilmiş cihaz performansı %2,589' e ulaşmıştır.



Şekil 4.15. P-KKN' lar eklenerek cihazların J-V eğrileri.

Hacimce %1 oranında P-KKN eklenerek hazırlanan cihaz $8,152 \text{ mA cm}^{-2}$ J_{sc} , $0,59 \text{ V}$ V_{oc} ve %53,01 FF olarak elde edildi. İstisnai olarak, hacimce %1 P-KKN ile hazırlanan cihazın FF değerinin (53,01) P-KKN' sız OGH' lara kıyasla daha düşük olduğu gözlenebilir. Bu düşüş, optik absorpsiyon verilerinin bulgularıyla iyi bir uyum içinde olan P3HT: PCBM aktif katmanındaki P-KKN' ların toplanma alanıyla ilgili morfolojik düzensizliğe atfedilebilir. Genel olarak, P-KKN' ların eklenmesinin fotoaktif katmanda ohmik teması, yük oluşumunu ve ekstraksiyon verimliliğini iyileştirdiğini göstermektedir.

Çizelge 4.5. En iyi PCE' lere sahip farklı konsantrasyondaki P-KKN' larının OGH' lerinin fotovoltaik parametreleri

Yüzeyler	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
P3HT: PCBM	0,601	7,336	53,83	2,373
P3HT: PCBM – %1 P-KKN	0,599	8,152	53,01	2,589
P3HT: PCBM – %3 P-KKN	0,605	7,516	54,28	2,468
P3HT: PCBM – %5 P-KKN	0,607	7,612	53,27	2,461
P3HT: PCBM – %7 P-KKN	0,605	7,474	53,35	2,413

Rsh değerleri, kontrol cihazı için 395,1 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ iken sırasıyla artan hacimce % P-KKN ilavesi için 363,11 $\Omega \text{ cm}^{-2}$, 425,89 $\Omega \text{ cm}^{-2}$, 384,17 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ ve 397,14 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ 'ye değişmiştir. R_s değerleri kontrol cihazı için 13,55 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ 'den artan hacimce % P-KKN ilavesi için 20,72 $\Omega \text{ cm}^{-2}$, 13,71 $\Omega \text{ cm}^{-2}$, 16,75 $\Omega \text{ cm}^{-2}$, 15,93 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ 'ye değişmiştir. Bu sonuçlar cihaz performansları ile uyumludur.

Çizelge 4.6. P-KKN'ların farklı konsantrasyonlarında OGH'lerinin seri direnci (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) değerleri.

Yüzeyler	R_s ($\Omega \text{ cm}^{-2}$)	R_{sh} ($\Omega \text{ cm}^{-2}$)
P3HT: PCBM	395,1	13,55
P3HT: PCBM – %1 P-KKN	363,11	20,72
P3HT: PCBM – %3 P-KKN	425,25	13,71
P3HT: PCBM – %5 P-KKN	384,17	16,75
P3HT: PCBM – %7 P-KKN	397,14	15,93

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmaların ilkine baktığımızda, perovskit soğurucu tabakanın özelliklerinin iyileştirilmesi için yeni bir nano malzemenin katkılanması yöntemi benimsenmiştir. P-KKN katkılanmasının yüzey kusurlarının azalması, gelişmiş yük iletimi ve aynı zamanda bastırılmış geri yük rekombinasyonu ile MAPbI₃ güneş hücrelerinde performans iyileşmesini teşvik edeceği belirlenmiştir.

Performans artışının ardında yatan etmenlerin belirlenmesi için ince filmlerin morfolojik, yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. İnce filmlerin karakterizasyonu ve elektron bakımından zengin P-KKN' ların, MAPbI₃' te bir çekirdek birim görevi görerek kusurları pasifleştirebildiğini ve perovskit kristalleşmesini modüle edebildiğini görülmüştür. Uygun hacimde P-KKN' ların eklenmesi tane sınırlarını pasifleştirerek daha iyi yüzey kaplaması oluşturmaya yol açmıştır. Perovskite katmanına hacimce %5 oranında P-KKN eklenmesi, fotovoltaiik performansta %10,71' den %13,12' ye önemli bir artış sağlamıştır.

Organik güneş hücreleri için yapılan çalışmaya baktığımızda OGH' lerinin performansını iyileştirmek için bir katkı maddesi olarak kullanımı literatüre sunulmuştur. P3HT:PCBM katmanındaki P-KKN katkısının % hacim (%0, %1, %3, %5 ve %7) optimizasyonu incelenmiştir. P-KKN' ları fotoaktif katmana dahil edilerek, ince filmlerdeki yük ayrımı ve aktarımı geliştirilmiştir. Bu, P3HT' nin geliştirilmiş kristalliği ve optik absorpsiyon özellikleri ile başarılmıştır. Daha iyi kristallik ve daha yüksek ışık soğurulması, yük taşıyıcı hareketliliğini ve yük ayrımından sonra iletimi geliştirmiştir. Morfoloji ve optik özelliklerdeki bu ikili ilerleme, hetero-atom katkılı KKN' nın potansiyel kullanımına ışık tutmaktadır.

5.2. Öneriler

Günümüz dünyasında ve gelecekte güneş hücrelerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu noktada her geçen gün yeni konfigürasyonlar, yeni kimyasallar ve yeni yöntemler bulunmaya devam edilmektedir. Güneş hücrelerindeki asıl önemli nokta ticarileşmedir. Bu noktada yapılan çalışmalar ve düzenlemeler her geçen gün hızlanmaktadır. Bu tez çalışmasında literatüre iki farklı hücre konfigürasyonunda

kullanılabilecek yeni bir katkı malzemesi kazandırılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak ileride farklı hetero-atom katkılanması ile hazırlanan yüksek floresans özelliğine sahip KKN' ların sentezi ve güneş hücrelerinin verimliliği üzerindeki etkisinin incelenmesi geliştirilebilir. Aynı zamanda perovskit güneş hücreleri fosfor katkılı kuantum noktalar kullanılarak endüstriyel ölçekte üretilebilir aynı zamanda bu hücreler aslında iklim koşullarına ne kadar dayanıklı ve aslında en önemli durum ticari uygulamalar için uygun mu sorularına cevaplar arandığında bir basamak olarak yapılan çalışmalar kullanılabilir. Bu noktada literatürde karbon kuantum noktaların özellikle perovskit güneş hücrelerinde kullanımı üzerinde çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ara yüzey modifikasyon işlemleri sonucu stabiliteyi ve verimi arttıran yeni bir güneş hücresi bu noktada literatüre kazandırılmıştır.



KAYNAKLAR

- Agada, F., Abbas, Z., Bakht, K., Khan, A. M., Farooq, U., Bilal, M., Arshad, M., Khan, A. F., Kamboh, A. H. ve Shaikh, A. J., 2022, A step forward toward quantum dots based perovskite solar cells in an ambient environment, *Optical Materials*, 129, 112538.
- Ananda, W., 2017, External quantum efficiency measurement of solar cell, p.
- Badawy, W. A., 2015, A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots, *Journal of Advanced Research*, 6 (2), 123-132.
- Barnes, P. R. F., Anderson, A. Y., Koops, S. E., Durrant, J. R. ve O'Regan, B. C., 2009, Electron Injection Efficiency and Diffusion Length in Dye-Sensitised Solar Cells Derived from Incident Photon Conversion Efficiency Measurements, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113 (28), 12615-12615.
- Brkić, S., 2016, OPTICAL PROPERTIES OF QUANTUM DOTS, 5.
- Brkić, S., 2018, Applicability of quantum dots in biomedical science, *Ionizing radiation effects and applications*, 21.
- Budiawan, W., Chen, H.-C., Mohapatra, A., Singh, A., Wang, P.-C., Wong, K.-T. ve Chu, C.-W., 2022, Core-twisted tetrachloroperylene diimide additives improve the crystallinity of perovskites to provide efficient perovskite solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 243, 111779.
- Cayuela, A., Soriano, M. L., Carrillo-Carrión, C. ve Valcárcel, M., 2016, Semiconductor and carbon-based fluorescent nanodots: the need for consistency, *Chemical Communications*, 52 (7), 1311-1326.
- Chan, K. M., Xu, W., Kwon, H., Kietrys, A. M. ve Kool, E. T., 2017, Luminescent Carbon Dot Mimics Assembled on DNA, *Journal of the American Chemical Society*, 139 (37), 13147-13155.
- Chen, C. J., 2011, Physics of solar energy, John Wiley & Sons, p.
- Chen, H., Lu, C., Liu, Z., Shen, C. ve Sun, M., 2022. Multi-Response Optimisation of Automotive Door Using Grey Relational Analysis with Entropy Weights. *Materials* 15, 15. Erişim Adresi.
- Cheng, M., Zuo, C., Wu, Y., Li, Z. A., Xu, B., Hua, Y. ve Ding, L., 2020, Charge-transport layer engineering in perovskite solar cells, *Science Bulletin*.
- Choubey, P. C., Oudhia, A. ve Dewangan, R., 2012, A review: Solar cell current scenario and future trends, *Recent Research in Science and Technology*, 4 (8).
- Chueh, C.-C., Li, C.-Z. ve Jen, A. K. Y., 2015, Recent progress and perspective in solution-processed Interfacial materials for efficient and stable polymer and organometal perovskite solar cells, *Energy & Environmental Science*, 8 (4), 1160-1189.
- Cui, Y., Xu, Y., Yao, H., Bi, P., Hong, L., Zhang, J., Zu, Y., Zhang, T., Qin, J. ve Ren, J., 2021, Single-junction organic photovoltaic cell with 19% efficiency, *Advanced Materials*, 33 (41), 2102420.
- Dey, B. K., Khan, I., Mandal, N. ve Bhattacharjee, A., 2016, Mathematical modelling and characteristic analysis of Solar PV Cell, *2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 1-5.
- Dong, Y., Wang, R., Li, H., Shao, J., Chi, Y., Lin, X. ve Chen, G., 2012, Polyamine-functionalized carbon quantum dots for chemical sensing, *Carbon*, 50 (8), 2810-2815.

- Duan, L. ve Uddin, A., 2022, Defects and stability of perovskite solar cells: a critical analysis, *Materials Chemistry Frontiers*, 6 (4), 400-417.
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N. ve Seshadri, B., 2013, Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review, *Energy Procedia*, 33, 311-321.
- Edvinsson, T., 2018, Optical quantum confinement and photocatalytic properties in two-, one- and zero-dimensional nanostructures, *Royal society open science*, 5 (9), 180387.
- El-Ahmar, M. H., El-Sayed, A. H. M. ve Hemeida, A. M., 2016, Mathematical modeling of Photovoltaic module and evaluate the effect of various parameters on its performance, *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 741-746.
- Falsafi, S. R., Rostamabadi, H. ve Jafari, S. M., 2020, Chapter Nine - X-ray diffraction (XRD) of nanoencapsulated food ingredients, In: *Characterization of Nanoencapsulated Food Ingredients*, Eds: Jafari, S. M.: Academic Press, p. 271-293.
- Faraji, G., Kim, H. S. ve Kashi, H. T., 2018, Introduction, In: *Severe Plastic Deformation*, Eds: Faraji, G., Kim, H. S. ve Kashi, H. T.: Elsevier, p. 1-17.
- Frost, J. M., Butler, K. T., Brivio, F., Hendon, C. H., van Schilfhaarde, M. ve Walsh, A., 2014, Atomistic Origins of High-Performance in Hybrid Halide Perovskite Solar Cells, *Nano Letters*, 14 (5), 2584-2590.
- Fung, D. D. S. ve Choy, W. C. H., 2013, Introduction to organic solar cells, *Organic Solar Cells: Materials and Device Physics*, 1-16.
- Gao, P., Grätzel, M. ve Nazeeruddin, M. K., 2014, Organohalide lead perovskites for photovoltaic applications, *Energy & Environmental Science*, 7 (8), 2448-2463.
- Grancini, G., Roldán-Carmona, C., Zimmermann, I., Mosconi, E., Lee, X., Martineau, D., Nabey, S., Oswald, F., De Angelis, F., Graetzel, M. ve Nazeeruddin, M. K., 2017, One-Year stable perovskite solar cells by 2D/3D interface engineering, *Nature Communications*, 8 (1), 15684.
- Grätzel, M., 2001, Photoelectrochemical cells, *nature*, 414 (6861), 338-344.
- Green, M. A., Ho-Baillie, A. ve Snaith, H. J., 2014, The emergence of perovskite solar cells, *Nature Photonics*, 8 (7), 506-514.
- Gunawan, J., Permatasari, P. ve Tilt, C., 2020, Sustainable development goal disclosures: Do they support responsible consumption and production?, *Journal of Cleaner Production*, 246, 118989.
- Hong, Z. R., Huang, Z. H. ve Zeng, X. T., 2007, Utilization of copper phthalocyanine and bathocuproine as an electron transport layer in photovoltaic cells with copper phthalocyanine/buckminsterfullerene heterojunctions: Thickness effects on photovoltaic performances, *Thin Solid Films*, 515 (5), 3019-3023.
- Hoppe, H. ve Sariciftci, N., 2007, Polymer Solar Cells, In, Eds, p. 1-86.
- Husain, A. A. F., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N. ve Pandey, S. S., 2018, A review of transparent solar photovoltaic technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 779-791.
- 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.
- Juffmann, T., Koppell, S. A., Klopfer, B. B., Ophus, C., Glaeser, R. M. ve Kasevich, M. A., 2017, Multi-pass transmission electron microscopy, *Scientific Reports*, 7 (1), 1699.
- Kearns, D. ve Calvin, M., 1958, Photovoltaic effect and photoconductivity in laminated organic systems, *The Journal of chemical physics*, 29 (4), 950-951.

- 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., Moser, J. E., Grätzel, M. ve Park, N.-G., 2012, Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%, *Scientific Reports*, 2 (1), 591.
- Kim, H., Nam, S., Jeong, J., Lee, S., Seo, J., Han, H. ve Kim, Y., 2014, Organic solar cells based on conjugated polymers : History and recent advances, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31 (7), 1095-1104.
- Kim, J., Lee, Y., Yun, A. J., Gil, B. ve Park, B., 2019, Interfacial Modification and Defect Passivation by the Cross-Linking Interlayer for Efficient and Stable CuSCN-Based Perovskite Solar Cells, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11 (50), 46818-46824.
- Kırbyık, 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, 154897.
- Kırbyık Kurukavak, Ç., 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.
- Kohli, R., 2015, Chapter 2 - UV-Ozone Cleaning for Removal of Surface Contaminants, In: *Developments in Surface Contamination and Cleaning*, Eds: Kohli, R. ve Mittal, K. L., Oxford: William Andrew Publishing, p. 71-104.
- 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.
- Kung, P. K., Li, M. H., Lin, P. Y., Chiang, Y. H., Chan, C. R., Guo, T. F. ve Chen, P., 2018, A review of inorganic hole transport materials for perovskite solar cells, *Advanced Materials Interfaces*, 5 (22), 1800882.
- Lemaury, V., Steel, M., Beljonne, D., Brédas, J.-L. ve Cornil, J., 2005, Photoinduced Charge Generation and Recombination Dynamics in Model Donor/Acceptor Pairs for Organic Solar Cell Applications: A Full Quantum-Chemical Treatment, *Journal of the American Chemical Society*, 127 (16), 6077-6086.
- Li, M.-J. ve Tao, W.-Q., 2017, Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry, *Applied Energy*, 187, 203-215.
- Li, M., Gao, K., Wan, X., Zhang, Q., Kan, B., Xia, R., Liu, F., Yang, X., Feng, H. ve Ni, W., 2017, Solution-processed organic tandem solar cells with power conversion efficiencies > 12%, *Nature Photonics*, 11 (2), 85-90.
- Li, S., Zhang, C., Song, J.-J., Xie, X., Meng, J.-Q. ve Xu, S., 2018. Metal Halide Perovskite Single Crystals: From Growth Process to Application. *Crystals* 8, 5. Erişim Adresi.
- Li, S., Yang, F., Chen, M., Yang, J., Jiang, L., Sun, Y., Nirmala Graced, A., Jain, S. M. ve Liu, H., 2022, Additive engineering for improving the stability of tin-based perovskite (FASnI₃) solar cells, *Solar Energy*, 243, 134-141.
- Li, Y., Pullerits, T., Zhao, M. ve Sun, M., 2011, Theoretical Characterization of the PC60BM:PDDTT Model for an Organic Solar Cell, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 (44), 21865-21873.
- Liang, M., Xu, W., Cai, F., Chen, P., Peng, B., Chen, J. ve Li, Z., 2007, New Triphenylamine-Based Organic Dyes for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (11), 4465-4472.

- Lingamallu, G. ve Kanaparthi, R. K., 2013, Are porphyrins an alternative to ruthenium(II) sensitizers for dye-sensitized solar cells?, *Current science*, 104.
- Liu, J., He, L., Wang, L., Man, Y., Huang, L., Xu, Z., Ge, D., Li, J., Liu, C. ve Wang, L., 2016, Significant Enhancement of the Adhesion between Metal Films and Polymer Substrates by UV–Ozone Surface Modification in Nanoscale, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (44), 30576-30582.
- Liu, J., Yao, M. ve Shen, L., 2019, Third generation photovoltaic cells based on photonic crystals, *Journal of Materials Chemistry C*, 7 (11), 3121-3145.
- Lu, L., Zheng, T., Wu, Q., Schneider, A. M., Zhao, D. ve Yu, L., 2015, Recent Advances in Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells, *Chemical Reviews*, 115 (23), 12666-12731.
- Man Lung, S., Jing, L., Peng Cheng, M. ve Kim, J.-K., 2009, Cleaning and Functionalization of Polymer Surfaces and Nanoscale Carbon Fillers by UV/Ozone Treatment: A Review, *Journal of Composite Materials*, 43 (14), 1537-1564.
- Mazumdar, S., Zhao, Y. ve Zhang, X., 2021, Stability of Perovskite Solar Cells: Degradation Mechanisms and Remedies, *Frontiers in Electronics*, 2.
- Mihailetchi, V. D., Blom, P. W. M., Hummelen, J. C. ve Rispens, M. T., 2003, Cathode dependence of the open-circuit voltage of polymer: fullerene bulk heterojunction solar cells, *Journal of Applied Physics*, 94 (10), 6849-6854.
- Mohamad Noh, M. F., Teh, C. H., Daik, R., Lim, E. L., Yap, C. C., Ibrahim, M. A., Ahmad Ludin, N., Mohd Yusoff, A. R. b., Jang, J. ve Mat Teridi, M. A., 2018, The architecture of the electron transport layer for a perovskite solar cell, *Journal of Materials Chemistry C*, 6 (4), 682-712.
- Mohanta, P., Patel, J., Bhuvra, J. ve Gandhi, M., 2015, A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It, *International Journal of Computational Engineering Science*, 2, 2394-2444.
- Nazarpour, S., 2013, Introduction: What are Coatings?, In: Thin Films and Coatings in Biology, Eds: Nazarpour, S., *Dordrecht: Springer Netherlands*, p. 1-9.
- Ossai, A. N., Ezike, S. C., Timtere, P. ve Ahmed, A. D., 2021, Enhanced photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells-based Carica papaya leaf and black cherry fruit co-sensitizers, *Chemical Physics Impact*, 2, 100024.
- Osterwald, C. ve McMahon, T., 2009, History of Accelerated and Qualification Testing of Terrestrial Photovoltaic Modules: A Literature Review, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17, 11-33.
- Padhi, S. ve Behera, A., 2022, Chapter 17 - Biosynthesis of Silver Nanoparticles: Synthesis, mechanism, and characterization, In: Agri-Waste and Microbes for Production of Sustainable Nanomaterials, Eds: Abd-Elsalam, K. A., Periakaruppan, R. ve Rajeshkumar, S.: Elsevier, p. 397-440.
- Panfil, Y. E., Oded, M. ve Banin, U., 2018, Colloidal quantum nanostructures: emerging materials for display applications, *Angewandte Chemie International Edition*, 57 (16), 4274-4295.
- Paras ve Kumar, A., 2022, Anti-Wetting Polymeric Coatings, In: Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers, Eds: Hashmi, M. S. J., *Oxford: Elsevier*, p. 786-795.
- Park, S. H., Roy, A., Beaupré, S., Cho, S., Coates, N., Moon, J. S., Moses, D., Leclerc, M., Lee, K. ve Heeger, A. J., 2009, Bulk heterojunction solar cells with internal quantum efficiency approaching 100%, *Nature Photonics*, 3 (5), 297-302.

- Philipps, S. P., Bett, A. W., Horowitz, K. ve Kurtz, S., 2015, Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology, *National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)*.
- Putz, M. V., 2020, New Frontiers in Nanochemistry: Concepts, Theories, and Trends: Volume 2: Topological Nanochemistry, CRC Press, p.
- Reese, M. O., Gevorgyan, S. A., Jørgensen, M., Bundgaard, E., Kurtz, S. R., Ginley, D. S., Olson, D. C., Lloyd, M. T., Morvillo, P., Katz, E. A., Elschner, A., Haillant, O., Currier, T. R., Shrotriya, V., Hermenau, M., Riede, M., R. Kirov, K., Trimmel, G., Rath, T., Inganäs, O., Zhang, F., Andersson, M., Tvingstedt, K., Lira-Cantu, M., Laird, D., McGuinness, C., Gowrisanker, S., Pannone, M., Xiao, M., Hauch, J., Steim, R., DeLongchamp, D. M., Rösch, R., Hoppe, H., Espinosa, N., Urbina, A., Yaman-Uzunoglu, G., Bonekamp, J.-B., van Breemen, A. J. J. M., Girotto, C., Voroshazi, E. ve Krebs, F. C., 2011, Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (5), 1253-1267.
- Rocco, D., Moldoveanu, V. G., Feroci, M., Bortolami, M. ve Vetica, F., 2023, Electrochemical Synthesis of Carbon Quantum Dots, *ChemElectroChem*, e202201104.
- Roy, P., Kumar Sinha, N., Tiwari, S. ve Khare, A., 2020, A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status, *Solar Energy*, 198, 665-688.
- Saga, T., 2010, Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production, *NPG Asia Materials*, 2 (3), 96-102.
- Saliba, M., Correa-Baena, J.-P., Wolff, C. M., Stolterfoht, M., Phung, N., Albrecht, S., Neher, D. ve Abate, A., 2018, How to Make over 20% Efficient Perovskite Solar Cells in Regular (n-i-p) and Inverted (p-i-n) Architectures, *Chemistry of Materials*, 30 (13), 4193-4201.
- Sariciftci, N. S., Braun, D., Zhang, C., Srdanov, V. I., Heeger, A. J., Stucky, G. ve Wudl, F., 1993, Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells, *Applied physics letters*, 62 (6), 585-587.
- Seo, J., Park, S., Chan Kim, Y., Jeon, N. J., Noh, J. H., Yoon, S. C. ve Seok, S. I., 2014, Benefits of very thin PCBM and LiF layers for solution-processed p-i-n perovskite solar cells, *Energy & Environmental Science*, 7 (8), 2642-2646.
- Sharma, S., Jain, K. K. ve Sharma, A., 2015, Solar cells: in research and applications—a review, *Materials Sciences and Applications*, 6 (12), 1145.
- Šimončicová, J., Kryštofová, S., Medvecká, V., Ďurišová, K. ve Kaliňáková, B., 2019, Technical applications of plasma treatments: current state and perspectives, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103 (13), 5117-5129.
- Sözen, A., Arcaklioğlu, E., Özalp, M. ve Kanit, E. G., 2005, Solar-energy potential in Turkey, *Applied Energy*, 80 (4), 367-381.
- Sui, M., Chu, Y. ve Zhang, R., A review of technologies for high efficiency silicon solar cells, 012026.
- Sui, M., Chu, Y. ve Zhang, R., 2021, A review of technologies for high efficiency silicon solar cells, *Journal of Physics: Conference Series*, 1907 (1), 012026.
- Tanaka, K., Fukui, Y., Moritake, N. ve Uchiki, H., 2011, Chemical composition dependence of morphological and optical properties of Cu₂ZnSnS₄ thin films deposited by sol-gel sulfurization and Cu₂ZnSnS₄ thin film solar cell efficiency, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (3), 838-842.

- Tang, C. W., 1986, Two-layer organic photovoltaic cell, *Applied physics letters*, 48 (2), 183-185.
- Thanu, D. P. R., Srinadhu, E. S., Zhao, M., Dole, N. V. ve Keswani, M., 2019, Chapter 8 - Fundamentals and Applications of Plasma Cleaning, In: *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques*, Eds: Kohli, R. ve Mittal, K. L.: Elsevier, p. 289-353.
- Travis, W., Glover, E. N. K., Bronstein, H., Scanlon, D. O. ve Palgrave, R. G., 2016, On the application of the tolerance factor to inorganic and hybrid halide perovskites: a revised system, *Chemical Science*, 7 (7), 4548-4556.
- Trukhanov, V. A., Bruevich, V. V. ve Paraschuk, D. Y., 2015, Fill factor in organic solar cells can exceed the Shockley-Queisser limit, *Scientific Reports*, 5 (1), 11478.
- Wang, K., Olthof, S., Subhani, W., Jiang, X., Cao, Y., Duan, L., Wang, H., Du, M. ve Frank Liu, S. L., 2019, Novel Inorganic Electron Transport Layers for Planar Perovskite Solar Cells: Progress and Prospective, *Nano Energy*, 68, 104289.
- Wang, Y., Yue, Y., Yang, X. ve Han, L., 2018, Toward long-term stable and highly efficient perovskite solar cells via effective charge transporting materials, *Advanced Energy Materials*, 8 (22), 1800249.
- Wen, Y., Zhu, G. ve Shao, Y., 2020, Improving the power conversion efficiency of perovskite solar cells by adding carbon quantum dots, *Journal of Materials Science*, 55 (7), 2937-2946.
- Wilson, N. R. ve Macpherson, J. V., 2009, Carbon nanotube tips for atomic force microscopy, *Nature Nanotechnology*, 4 (8), 483-491.
- Wu, H., Hao, Y. ve Ren, S., 2020, How do environmental regulation and environmental decentralization affect green total factor energy efficiency: Evidence from China, *Energy Economics*, 91, 104880.
- Xing, G., Mathews, N., Lim, S. S., Yantara, N., Liu, X., Sabba, D., Grätzel, M., Mhaisalkar, S. ve Sum, T. C., 2014, Low-temperature solution-processed wavelength-tunable perovskites for lasing, *Nature Materials*, 13 (5), 476-480.
- 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.
- Yi, Y., Coropceanu, V. ve Brédas, J.-L., 2009, Exciton-Dissociation and Charge-Recombination Processes in Pentacene/C60 Solar Cells: Theoretical Insight into the Impact of Interface Geometry, *Journal of the American Chemical Society*, 131 (43), 15777-15783.
- Yu, G., Pakbaz, K. ve Heeger, A. J., 1994, Semiconducting polymer diodes: Large size, low cost photodetectors with excellent visible-ultraviolet sensitivity, *Applied physics letters*, 64 (25), 3422-3424.
- Yu, G., Gao, J., Hummelen, J. C., Wudl, F. ve Heeger, A. J., 1995, Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions, *Science*, 270 (5243), 1789-1791.
- Yu, J. C., Kim, D. B., Jung, E. D., Lee, B. R. ve Song, M. H., 2016, High-performance perovskite light-emitting diodes via morphological control of perovskite films, *Nanoscale*, 8 (13), 7036-7042.
- Yuan, J., Zhang, C., Qiu, B., Liu, W., So, S. K., Mainville, M., Leclerc, M., Shoaee, S., Neher, D. ve Zou, Y., 2022, Effects of energetic disorder in bulk heterojunction organic solar cells, *Energy & Environmental Science*, 15 (7), 2806-2818.
- Zhang, M., Wang, H. ve Tang, C. W., 2010, Effect of the highest occupied molecular orbital energy level offset on organic heterojunction photovoltaic cells, *Applied physics letters*, 97 (14), 143503.

- Zhang, W., Wang, Y. C., Li, X., Song, C., Wan, L., Usman, K. ve Fang, J., 2018, Recent advance in solution-processed organic interlayers for high-performance planar perovskite solar cells, *Advanced Science*, 5 (7), 1800159.
- Zhang, X., Liu, L., Chi, F., Wang, K., Lin, K. ve Wang, Y., 2022, Theoretical investigation of lattice-matched III-NV/Si double-junction solar cells, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55 (47), 475104.
- Zhang, Y.-Q., Ma, D.-K., Zhuang, Y., Zhang, X., Chen, W., Hong, L.-L., Yan, Q.-X., Yu, K. ve Huang, S.-M., 2012, One-pot synthesis of N-doped carbon dots with tunable luminescence properties, *Journal of Materials Chemistry*, 22 (33), 16714-16718.
- Zheng, S., Wang, G., Liu, T., Lou, L., Xiao, S. ve Yang, S., 2019, Materials and structures for the electron transport layer of efficient and stable perovskite solar cells, *Science China Chemistry*, 62 (7), 800-809.
- Zhou, J., Liu, Y., Tang, J. ve Tang, W., 2017, Surface ligands engineering of semiconductor quantum dots for chemosensory and biological applications, *Materials Today*, 20 (7), 360-376.
- Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L. ve Joy, D., 2006, Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM), In: *Scanning microscopy for nanotechnology*, Eds: Springer, p. 1-40.