

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TULYUM KATKILI CsPbI₂Br ESASLI İNORGANİK PEROVSKİT GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebubekir CAMIZCI

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK 2025

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TULYUM KATKILI CsPbI₂Br ESASLI İNORGANİK PEROVSKİT GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ebubekir CAMIZCI
210815101**

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU

OCAK 2025

TEZ ONAYI

Ebubekir CAMIZCI tarafından hazırlanan “**TULYUM KATKILI CsPbI₂Br ESASLI İNORGANİK PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**”

adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:

Prof. Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU

Jüri Üyeleri

İmza:

Prof. Dr. Güven ÇANKAYA

Prof. Dr. Aydın RÜŞEN

Prof. Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU

Tez Savunma Tarihi: 02/01/2025

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Murat MAYDA
Enstitü Müdürü



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Ebubekir CAMIZCI







Biricik aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez sürecim boyunca beni destekleyen, sahip olduğu bilgi ve deneyimleri ile eğitimimi yönlendiren saygı değer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin tamamlanmasındaki katkıları ve destekleri için kendilerine müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Deneysel süreçlerde her ihtiyacım olduğunda yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Alaa KAMO ve İbrahimhan DİLCİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Prof Dr. Aydın RÜŞEN, Doç. Dr. Adem SARILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali TOPÇU ve Arş. Gör. Hasan YÜNGEViŞ'e teşekkürü borç bilirim. Lisansüstü eğitimim boyunca her zaman beni destekleyen ve her daim yanımda olup bana inanan aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışma Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "11-M-21" nolu proje kapsamında desteklenmiştir. İlgili proje kapsamında sağladıkları destekler için teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans öğrenim döneminde sağlamış oldukları burs desteği ile akademik eğitimime katkı sağladıkları için TÜBİTAK'a çok teşekkür ederim.

Ocak 2025

Ebubekir CAMIZCI
(Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOLLER.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
ABSTRACT	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Perovskit Yapılarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	5
2.2 Perovskit Güneş Hücreleri: Yapı ve Performans İyileştirme Stratejileri	6
2.3 İnorganik CsPbI ₂ Br Perovskit Yapısı	9
3. MATERYAL ve METOD.....	13
3.1 Malzemelerin Temin Edilmesi	13
3.2 Perovskit Güneş Hücrelerinin Üretimi	13
3.3 Hücrelerin ve Filmlerin Karakterizasyonu	16
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	17
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	31
6. KAYNAKÇA	33
ÖZGEÇMİŞ.....	38



KISALTMALAR

ABX ₃	: Perovskit yapısı
Ar	: Argon
BCP	: Bathokuproin
C ₆₀	: Fulleren
CdTe	: Kadmiyum tellür
CIGS	: Bakır indiyum galyum selenit
DMF	: Dimetilformamit
DMSO	: Dimetil sülfüroksit
e ⁻ -h ⁺	: Elektron-boşluk
FA	: Formamidinyum
FF	: Dolum faktörü (Fill Factor)
FTO	: Flor katkılı kalay oksit kaplı cam
HI	: Hidroiodik asit
HTL	: Boşluk iletim malzemesi
ITO	: İndiyum kalay oksit
I-V	: Akım-Voltaj
MA	: Metilamonyum
MAI	: Metil amonyum iyodür
P3HT	: Poli(3-hekzil)tiyofen
PbI ₂	: Kurşun iyodür
PCBM	: 6,6-fenil C61 bütirik asit metil ester,
PEDOT:PSS	: Poli (3, 4-etilendioksitiyofen):poli (stiren sülfonat)
PGH	: Perovskit güneş hücresi
PTAA	: Poli[bis(4-fenil)(2,5,6-trimetilfenil)amin
Rpm	: Dakikadaki devir sayısı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SnO ₂	: Kalay oksit
Spiro-OMeTAD	: 2,2',7,7'-tetrakis (N,N-di-p-metoksifenil-amin) 9,9-spirobifluorene
TiO ₂	: Titanyum (IV) izopropoksit
UV	: Ultra viyole



SEMBOLLER

%	: Yüzde
~	: Yaklaşık
°C	: Santigrat Derece
µL	: Mikrolitre
µm	: Mikrometre
cm	: Santimetre
e ⁻	: Elektron
E _g	: Optik bant aralığı
eV	: Elektron-volt
E _v	: Değerlik Bant Enerjisi
h ⁺	: Boşluk
J _{sc}	: Kısa-Devre Akım Yoğunluğu
m ²	: Metrekare
mA	: Miliamper
mg	: Miligram
µL	: Mikrolitre
mmol	: Milimol
<i>n_d</i>	: İdealite faktörü
nm	: Nanometre
T	: Sıcaklık
t	: Tolerans faktörü
V	: Volt
V _{oc}	: Açık Devre Gerilimi
ε	: Mikro-gerilim (micro-strain)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

- Çizelge 2.1** : Mevcut çalışmaya ait ve literatürdeki farklı lantanit katkıları ile yapılan güneş hücrelerinin verimlilik değerleri **11**
- Çizelge 4.1** : Kontrol ve farklı Tm- katkı oranlarına sahip inorganik PGH'lerin fotovoltaj parametreleri. **24**





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1** : Türkiye'nin güneş enerjisi ısı haritası (Sergun, 2016) 2
- Şekil 2.1** : NREL sertifikasına sahip yeni jenerasyon güneş hücrelerine ait verimlilik grafiği (NREL, 2024). 4
- Şekil 2.2** : Perovskit molekülünün ABX₃ yapısı (Liu ve diğerleri, 2019) 5
- Şekil 2.3** : Perovskit Güneş Hücresi, (a) n-i-p ve (b) p-i-n mimarisi. 8
- Şekil 3.1** : FTO aşındırma işlemi. 13
- Şekil 3.2** : Alttaşların temizliğinde kullanılan ultrasonik banyo (sol) ve UV-O₃ cihazı (sağ). 14
- Şekil 3.3** : Glovebox ortamında büyütülmüş perovskit tabakası. 15
- Şekil 4.1** : Kontrol ve farklı Tm-katkı oranlarında CsPbI₂Br perovskit filmlerine ait (a) XRD, (b,c) XRD-kararlılık, (d) XRD ana pik ve (e) Mikro-gerilim grafikleri. 18
- Şekil 4.2** : Kontrol ve farklı Tm-katkı oranlarında CsPbI₂Br perovskit filmlerine ait (a) UV-Vis, (b) Enerji bant aralığı/kristal boyutu grafiği. 19
- Şekil 4.3** : Kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı CsPbI₂Br perovskit filmlerine ait (a) XPS-survey ve (b,c,d,e,f) XPS elemental analizi..... 20
- Şekil 4.4** : CsPbI₂Br perovskit filmine ait kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı (a,b) SEM ve (c,d) parçacık boyutu histogramı analizleri 21
- Şekil 4.5** : CsPbI₂Br perovskit filmine ait kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı (a,b) kesit-SEM ve (c) EDX görüntüleri..... 22
- Şekil 4.6** : (a) Cihaz yapısının şematik diyagramı, (b) farklı mol% Tm-katkı oranlarına sahip CsPbI₂Br PGH'lerinin J–V eğrileri, (c) Kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı cihazların düz ve ters taramalarında elde edilen şampiyon J-V eğrileri, (d) Kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı cihazların EQE spektrumları ve entegre akım yoğunluğu, (e) Sırasıyla kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı cihazlar için kararlı durum güç çıkışı (SPO), (f) Fill Faktörü (FF) S-Q sınırı, ölçülen FF ve yük taşıma kaybı olmaksızın maksimum FF ile sırasıyla yük taşıma kaybından (koyu kırmızı alan) ve ışımaz kayıp (gri alan) grafikleri. 23
- Şekil 4.7** : (a) (sadece-elektronlu) cihazların karanlık akım yoğunluk-voltaj eğrileri, (b) Her iki perovskit filmin sabit durum fotoluminesans (PL) spektrumları, (c) Her iki perovskit filmin zaman çözünürlüklü fotoluminesans (TRPL) spektrumları, (d) ışık yoğunluğunun logaritmik fonksiyonu olarak VOC, (e) Mott-Schottky eğrileri, (f) Karanlık ortamda kontrol ve 0,75 mol% Tm katkılı cihazların Nyquist çizimleri. Uydurma için kullanılan eşdeğer devre şeması ekte gösterilmiştir. 25
- Şekil 4.8** : (a) Zamana karşı temas açısı ölçümü, (b) Tm katkılı, (c) kontrol hücrelerin yeni üretilmiş ve oda sıcaklığında bir saat bekletildikten sonraki XRD ölçümleri, (d) Her iki kapsüllenmemiş cihazın eldiven-kutusuna 85 °C sıcaklıkta sürekli aydınlatma altında foto-stabilite testleri ve (e) Her iki kapsüllenmemiş cihazın oda sıcaklığında bağıl nem (50-55 RH) altında nem-stabilite testleri. 28



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TULYUM KATKILI CsPbI₂Br ESASLI İNORGANİK PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ebubekir CAMIZCI

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU

Ocak, 2025, 64 sayfa

Son yıllarda dünya nüfusundaki hızlı artış ve endüstriyel faaliyetlerin ivmelenecek artmasıyla insanlığın enerjiye olan ihtiyacı önemli ölçüde artmıştır. Bu artan talebi karşılamak için fosil yakıtların daha fazla tüketilmesi çevre üzerinde ciddi zararların oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş hücreleri büyük önem kazanmıştır. Güneş hücresi alanında birçok araştırma yapılmış ve farklı türlerde birçok hücre yapısı geliştirilmiştir. Bu bağlamda evrensel çalışmalar dikkate alındığında perovskit güneş hücrelerinin (PGH) yüksek elektron hareketliliği, yüksek taşıyıcı difüzyon uzunluğu, yüksek absorpsiyon katsayısı, ayarlanabilir bant aralığı ve benzersiz elektromanyetik özelliklere sahip olması nedeniyle verimlilik konusunda hızla gelişim göstererek organik-inorganik hibrit perovskit güneş hücrelerinde güç çevrim oranı (PCE) %26,7 seviyesine kadar ulaşılmıştır. Organik-inorganik hibrit PGH'lerin tüm bu geliştirmelerine rağmen içerisindeki uçucu organik katyonlar, metilamonyum (MA) ve formamidinyumda (FA) termal dengesizlik ve zayıf uzun vadeli kararlılık sorunlarına neden olmaktadır. Bu durum, araştırmaları tamamen inorganik alternatifleri incelemeye itmektedir. Bu bağlamda üstün termal kararlılık ve yüksek performans sergilediği rapor edilen inorganik CsPbI₂Br perovskit güneş hücrelerinin aynı zamanda kusur kaynaklı ışısız rekombinasyonu ve iyon göçünü önemli ölçüde baskıladığı geçmiş çalışmalarda aktarılmıştır. Bu çalışmada, inorganik CsPbI₂Br perovskit yapısının verimlilik ve kararlılık parametrelerini geliştirmek amacıyla B-site heterovalent katkı maddesi olarak lantanit (Ln)-tabanlı tulyum (Tm³⁺) iyonları farklı oranlarda yapıya dahil edilmiştir. Ayrıca üretilen PGH'ler, kararlılık seviyesini maksimize etmek amacıyla tamamen inorganik (FTO/SnO₂/CsPb_{1-x}Tm_xI₂Br/CuSCN/r-GO/Au) mimariye sahiptir. Yapılan deneyler sonucunda Tm³⁺ katkısı ile üretilen hücrelerde, ışısız rekombinasyonunun bastırılması, iyileştirilmiş kristalite ve faz stabilizasyonunun kontrol edilmesiyle elde edilen %17,47 verimlilik değeri 400 saatlik kararlılık testinde %5'in altında azalma gösterirken, kontrol hücreler 320 saatin sonunda %70'lik bir verimlilik kaybı sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: İnorganik Perovskit, Tulyum, Kararlılık, İnce Film, B-site Katkı



ABSTRACT

MsThesis

DEVELOPMENT OF THULIUM-DOPED CsPbI₂Br-BASED INORGANIC PEROVSKITE SOLAR CELLS

Ebubekir CAMIZCI

**Karamanoğlu Mehmetbey University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Supervisor: Prof.Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU

January, 2025, 64 pages

In recent years, the rapid increase in the world population and the acceleration of industrial activities have significantly increased the energy need of humanity. The increased consumption of fossil fuels causes serious damage to the environment. For this reason, solar cells have gained great importance. In this context, perovskite solar cells (PGH) have shown rapid improvement in efficiency values due to their high electron mobility, high carrier diffusion length, high absorption coefficient, adjustable band gap and unique electromagnetic properties leads the power conversion efficiencies (PCE) in organic-inorganic hybrid perovskite solar cells up to 26.7%. Despite all these developments in organic-inorganic hybrid PGHs, volatile organic cations in methylammonium (MA) and formamidinium (FA) cause thermal instability and poor long-term stability problems. In this study, lanthanide (Ln)-based thulium (Tm³⁺) ions were incorporated into the perovskite structure at different ratios as B-site heterovalent dopants in order to improve the efficiency and stability parameters of the inorganic CsPbI₂Br perovskite structure. In addition, the produced PGHs have a completely inorganic (FTO/SnO₂/CsPb_{1-x}Tm_xI₂Br/CuSCN/r-GO/Au) architecture in order to maximize the stability level. By incorporating Tm³⁺ into the perovskite structure, an 17.47% efficiency was achieved, attributed to the suppression of nonradiative recombination, improved crystallinity and phase stabilization, and less than 5% degradation was observed after 400-hour stability test, while the control cells exhibited an 70% efficiency loss after 320 hours.

Keywords: Inorganic Perovskite, Thulium, Stability, Thin Film, B-site Doping



1. GİRİŞ

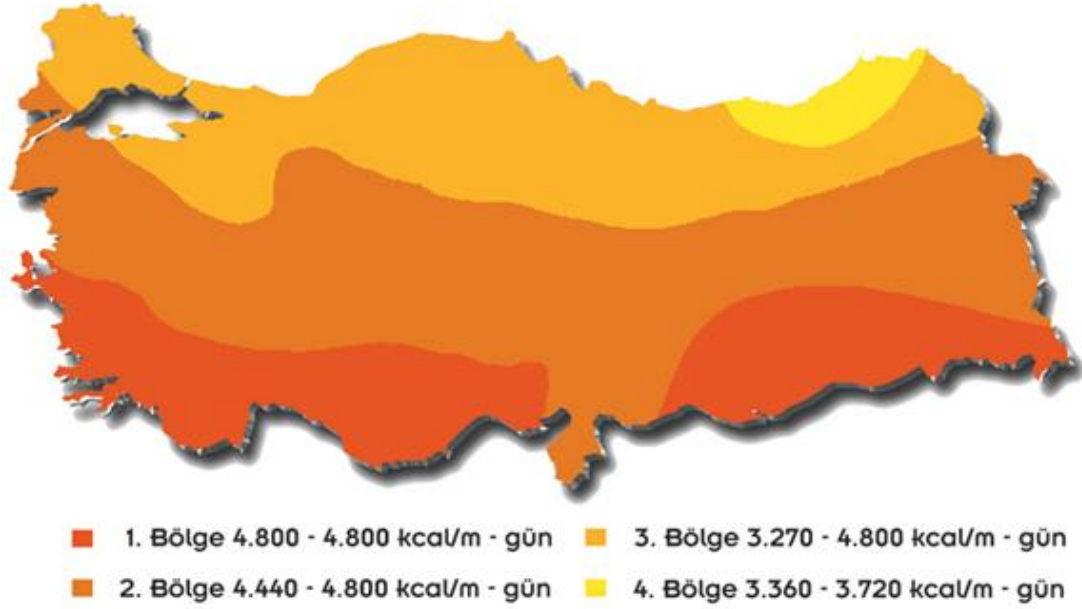
Son yıllarda dünya nüfusundaki hızlı artış ve endüstriyel faaliyetlerin ivmelenerek yoğunlaşması insanlığın enerjiye olan ihtiyacını önemli ölçüde artırmıştır. Bu artan talebi karşılamak için fosil yakıtların daha fazla tüketilmesi çevre üzerinde ciddi zararların oluşmasına neden olmaktadır. Karbon salınımlarındaki artış, iklim değişikliği ve doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel sorunlar, enerji üretim yöntemlerinin sürdürülebilir ve çevre dostu hale getirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Fosil yakıtların çevreye olan, küresel ısınmayı tetikleyen sera gazlarının salınımı, su kaynaklarının kirlenmesi, hava kirliliği ve biyolojik çeşitliliğin zarar görmesiyle olumsuz etkilenen ekosistem bozulmalarıdır. Dünyamızda fosil yakıtların sınırlı olması ve duyulan ihtiyaç sebebiyle giderek daha fazla kullanılması sonucunda çevresel zararlarının katlanarak arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca bu limitli enerji kaynaklarına olan bağımlılığın sürdürülebilir olmadığı insanlığın ortak kanaatidir. Bu nedenle, son yıllarda evrensel açıdan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırım hızla artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğaya zarar vermeden sürdürülebilir enerji üretmeye olanak tanır ve fosil yakıtların yarattığı olumsuz etkilerden kaçınma imkânı sunar.

1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Güneş Enerjisinin Stratejik Önemi

Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi için kullanılması, çevresel faktörlerin yanında enerjide dışa bağımlı ülkelerin karşılaştığı ekonomik ve politik sorunlara potansiyel bir çözüm olması açısından büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda ülkemizde de 12. Kalkınma planında bahsedildiği üzere enerji arzının sürdürülebilir, güvenli ve kabul edilebilir maliyetle elde edilmesi amaçlanmaktadır. Alternatif yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'nin coğrafi şartları göz önüne alındığında Yengeç Dönencesi ile Ekvator Bölgesi arasında yer alması nedeniyle Şekil 1.1'de de belirtildiği üzere özellikle Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu bölgelerindeki uzun gün sürelerinin yanında

güneşin yeryüzüne daha dik açılarda ulaşması ülkemizin güneş enerjisi açısından oldukça verimli şartlara sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.1 : Türkiye'nin güneş enerjisi ısı haritası (Sergun, 2016).

Bu kapsamda ülkemizde sürdürülmekte olan güneş hücresi alanındaki ARGE çalışmaları ile enerji sektöründe dışa bağımlılığın azaltılması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmalar, yerli ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasıyla birlikte enerji arzının güvenliğini sağlama yolunda önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

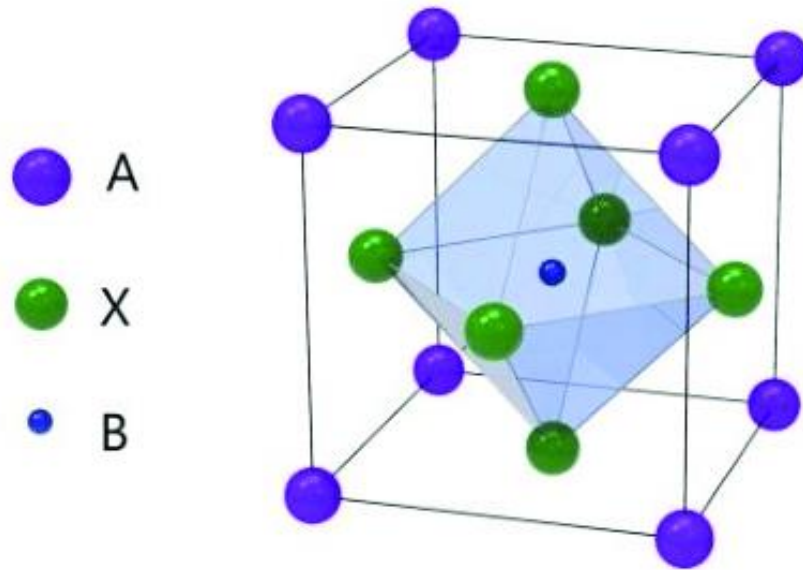
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Güneş enerjisi alanında 1950'li yıllarda I. nesil güneş hücreleri olarak bilinen silisyum (Si) ve galyum arsenik (GaAs) tabanlı güneş hücreleriyle başlayan araştırmalar 1980'den sonraki yıllarda ise ince film tabanlı bakır indiyum selenyum (CIS) veya bakır indiyum galyum selenyum (CIGS), kadmiyum tellür (CdTe) ve amorf silisyum (a-Si) çalışmalarıyla II. nesil güneş hücrelerine evrilmiştir (Green ve diğerleri, 2002). 1991 yılında O'Regan ve Grätzel tarafından keşfedilen boya duyarlı güneş hücreleri (BDGH) veya III. Nesil güneş hücreleri olarak adlandırılmıştır (O'regan ve Gratzel, 1991). III. Nesil güneş hücrelerinde kararlılık, maliyet ve verimlilik açısından bir önceki nesillere göre ilerleme katedilmiş olmasına rağmen sıvı elektrolit bazlı BDGH'lerinde kullanılan yüksek maliyetli rutenyum bazlı boyalar ve platin (Pt) karşıt elektrotlar bu hücrelerin ticarileşmesi yolunda sorun teşkil etmektedir. Ayrıca diğer bir BDGH türü olan katıhal BDGH'lerin yapısında bulundurduğu yoğun gözenekler nedeniyle literatürdeki elde edilmiş en yüksek verimlilik oranları %10-12 seviyelerinde kalmıştır (Rahman ve diğerleri, 2023). Geçmişten günümüze güneş hücresi alanında yapılan tüm bu çalışmalar neticesinde verimlilik, kararlılık ve maliyet konularında kayda değer gelişmeler elde edilmiş olsa da henüz fosil yakıtlara denk bir alternatif bulunamamıştır. Ancak 2012 yılında Lee ve arkadaşları tarafından ilk defa katıhal güneş hücresinde perovskit yapısı soğurucu tabaka olarak kullanılarak %9 verim elde edilmiştir (Kim ve diğerleri, 2012). Bu yeni keşfedilen güneş hücresi türü, yüksek elektron hareketliliği, taşıyıcı difüzyon uzunluğu, absorpsiyon katsayısı, ayarlanabilir bant aralığı ve yüksek elektromanyetik özellikleri gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bu özellikler sayesinde, BDGH'lerinin düşük verimlilik sorununu aşarak günümüzde en yaygın kullanılan silisyum tabanlı güneş hücrelerine alternatif olma potansiyeli göstererek güneş hücresi çalışmalarının yeni odağı haline getirmiştir.

2.1 Perovskit Yapılarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Perovskit, temelinde 1839 yılında Alman bilim insanı Gustav Rose tarafından keşfedilmiş bir minareldir. Ancak bu yapı üzerindeki önemli araştırmalar Rus mineralog Lev Perovski tarafından yapılması sebebiyle perovskit olarak adlandırılmıştır (Park ve diğerleri, 2015). Perovskit yapılarının güneş hücresi içerisinde kullanımı ise ilk olarak 2009 yılında Miyasaka ve ekibi tarafından 2009 yılında boya duyarlı malzeme olarak kullanılmıştır. Bu deneyde elde edilen hücrenin verimlilik değeri %3,8 olarak rapor edilmiştir. Katıhal güneş hücre teknolojisinin gelişmesi ile perovskite 2012 yılında ilk katıhal güneş hücresinde ışık soğurucu tabaka olarak kullanılmıştır (Kojima ve diğerleri, 2009).

Perovskit güneş hücreleri yüksek elektron hareketliliği, yüksek taşıyıcı difüzyon uzunluğu, yüksek absorpsiyon katsayısı, ayarlanabilir bant aralığı, benzersiz optik, termal ve elektromanyetik özelliklere sahip olması nedeni ile verimlilik konusunda hızlı gelişim göstermiştir ve verimlilik konusundan 2012'den beri hızla gelişim göstermiştir (Lee ve diğerleri, 2012). Düşük malzeme maliyeti, imalat kolaylığı perovskit güneş hücrelerinin tercih sebebi olmuştur. Perovskit molekülü ABO_3 veya ABX_3 yapısına sahiptir ve her iki yapı da doğal perovskit minerali olan $CaTiO_3$ ile aynı kristalografik yapıya sahiptir (Şekil 2.3). Burada A: İnorganik/Organik katyon (Metilamonyum, Formamidyum, Cs^+ , Rb^+), B: Metal katyon grubu (Ge, Sn ve Pb) ve X: Halojen grubu (Cl^- , Br^- ve I^-) şeklinde oluşabilir (Lee ve diğerleri, 2012).



Şekil 2.2 : Perovskit molekülünün ABX_3 yapısı (Liu ve diğerleri, 2019).

Günümüzde PGH ile elde edilen en yüksek PCE değeri %26,7 ile organik-inorganik hibrit hücreler ile elde edilmiştir (NREL, 2024). Ancak bu yüksek verimliliğe sahip organik-inorganik hibrid güneş hücreleri, MA (metilamoniyum) ve FA (formamidinyum) organik katyonlarının uçuculuğundan dolayı oldukça kararsızdırlar (Li ve diğerleri, 2023). İnorganik PGH'lerinde ise bu organik katyon bileşiklerin yerine sadece Cs, Rb gibi inorganik katyonların kullanılması nedeniyle kararlılık problemi kısmen giderilebilmiştir.

2.2 Perovskit Güneş Hücreleri: Yapı ve Performans İyileştirme Stratejileri

Güneş hücresi alanında birçok araştırma yapılmış ve farklı türlerde birçok hücre yapısı geliştirilmiştir. Bu bağlamda evrensel çalışmalar dikkate alındığında perovskit güneş hücrelerinin yüksek elektron hareketliliği, yüksek taşıyıcı difüzyon uzunluğu, yüksek absorpsiyon katsayısı, ayarlanabilir bant aralığı ve benzersiz elektromanyetik özelliklere sahip olması nedeniyle verimlilik konusunda hızla gelişim göstererek güç çevrim oranı günümüzde Şekil 2.1'de görüldüğü üzere %26,7 seviyesine kadar ulaşılmıştır (Green ve diğerleri, 2021).

Perovskit güneş hücreleri yapı bakımından normal yapılı (n-i-p) ve ters yapılı (p-i-n) olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 2.3). Bu yapıları birbirinden ayıran fark elektron transfer tabakası (ETL) ile hol transfer tabakasının (HTL) yer değişmesine dayanır. P-i-n yapılı hücrelerde hol transfer tabakası geçirgen iletken oksit (TCO) tabaka ile perovskit soğurucu tabaka arasında yer alırken n-i-p yapılı mimaride bu durum tam tersidir. Bu yapılar kullanım amacına göre tercih edilse de p-i-n yapılı perovskite güneş hücreleri, genellikle düşük sıcaklıklarda işlenebilen HTL malzemelerinin kullanımı sayesinde üretim maliyetlerini ve karmaşıklığını azaltır. Ayrıca ters yapıdaki cihazlar olarak bilinen bu mimari, iyon hareketi ve yüzey yeniden birleşim kayıplarını minimize ederek daha uzun vadeli kararlılık sunar.

n-i-p yapıya sahip perovskit güneş hücreleri Şekil 2.2'de görüldüğü üzere her biri özgün işleve sahip bir dizi katmandan oluşur. Cihazın temelini ışığın geçişine izin veren cam alttaş tabaka oluşturur. Bu tabaka cihazın mekanik desteğini sağlarken optik geçirgenlik açısından da kritik bir rol oynar. Literatürde cam, en yaygın kullanılan alttaş malzemesi olarak öne çıkar; özellikle yüksek sıcaklıklara dayanımı sayesinde

tercih edilen bir seçenek haline getirir. Alternatif olarak esnek uygulamalar için polimer bazlı malzemeler de kullanılır (Zhang ve diğeri, 2023).

Cam alttaş üzerine, geçirgen iletken oksit (TCO) tabaka kaplanır. Bu katman, ışık perovskit soğurucu tabakaya ulaşmasını sağlarken aynı zamanda bir elektriksel temas görevi görür. Bu katmanda en yaygın kullanılan yapılardan olan indiyum kalay oksit (ITO), yüksek optik geçirgenlik, daha düşük elektriksel direnç avantajı ve düşük sıcaklık işlemleri için sıkça tercih edilirse de flor katkılı kalay oksit (FTO) alttaşlar, yüksek sıcaklık süreçlerine dayanıklılığı, düşük maliyeti ve kimyasal kararlılığı nedeniyle birçok uygulamada öne çıkmaktadır (Afre ve diğeri, 2018).

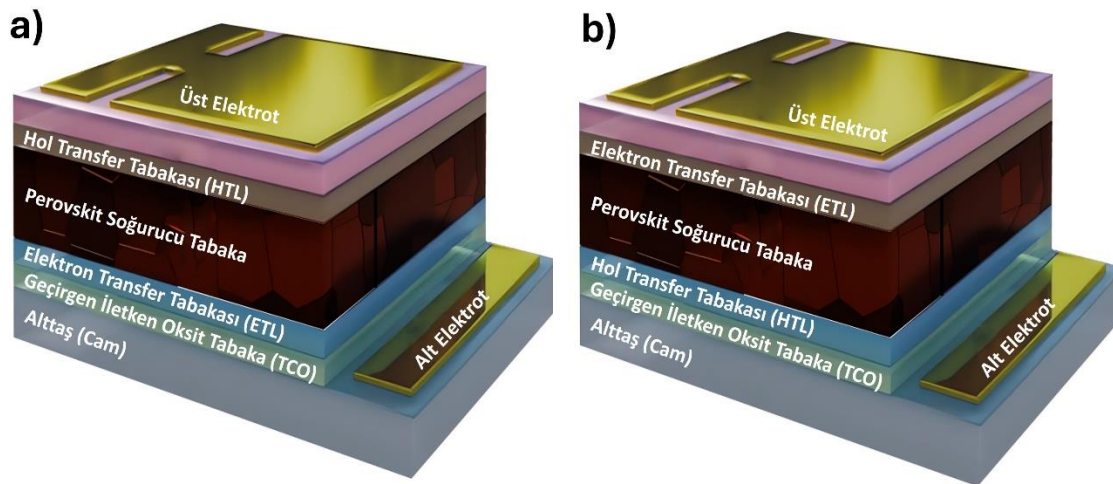
TCO tabakanın ardından, elektron transfer tabakası (ETL) yer alır. Bu katman, perovskit soğurucu tabakadan elektronları toplayarak alt kontak yönüne iletir ve deliklerin geri akışını önler. ETL yapısı için düşük iş fonksiyonu ve yüksek elektron mobilitesi nedeniyle SnO₂ gibi inorganik malzemeler yaygın olarak tercih edilir. Alternatif olarak, PCBM (fenil-C₆₁-bütirik asit metil ester) gibi organik malzemeler çözeltiyle işlenebilir yapıları sayesinde öne çıkar. PCBM yapısının BCP (bathokuproin) ile kombinasyonu, SnO₂'ye göre daha yüksek elektron mobilitesi ve perovskit katmanıyla daha uyumlu enerji seviyelerine olanak sağlar. Bu sayede taşıyıcı toplama verimliliğini artırır ve rekombinasyon kayıplarını azaltarak daha yüksek verimlilik ve stabilite sağlar (Chen ve diğeri, 2017).

Cihazın ana katmanı perovskit soğurucu tabakadır. Bu katman, güneş ışığını soğurarak yük taşıyıcı çiftlerin oluşumunu sağlar. CsPbI₂Br gibi perovskit malzemeler, yüksek kararlılık ve uygun bant aralığı özellikleri nedeniyle yoğun şekilde araştırılmıştır. Ancak elde edilen bilgiler ışığında CsFAMAPbI₂Br yapısı CsPbI₂Br'e göre daha geniş band aralığına ve daha iyi termal kararlılığa sahiptir, bu nedenle daha yüksek verimlilik ve kararlılık seviyelerine olanak sağlar. Ayrıca, FA (formamidinium) ve MA (methyllumonium) yapıları soğurucu tabakanın taşıyıcı mobilitesini artırarak daha iyi elektronik özellikler sunar, böylece cihazın genel performansını iyileştirir (Alfaifi ve diğeri, 2019).

Perovskit katmanının ardından HTL yapı film yüzeyine kaplanır. HTL, perovskit tabakasında oluşan holleri toplar ve bir sonraki katmana iletirken elektronların geri akışını engeller. Bu tabaka için PEDOT:PSS gibi organik malzemeler tercih edilebilir,

çünkü çözeltiyle işlenebilir ve düşük sıcaklıklarda kaplanabilir ancak organik yapıların kararlılık problemleri nedeniyle NiO_x gibi inorganik çözümler aranmaktadır. Özellikle inorganik HTL'ler, yüksek enerji seviyesi uyumu ve termal kararlılıklarıyla literatürde sıkça yer bulur. Özellikle delafosit yapıların elde edilen veriler ışığında NiO_x 'e kıyasla daha yüksek optik geçirgenlik ve delik iletim kapasitesi sunarak verimlilik değerlerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Akin ve diğerleri, 2019). Ayrıca, delafosit HTL'lerin enerji seviyeleri perovskitlerle daha iyi eşleşir ve bu da taşıyıcı yeniden birleşimini azaltarak cihaz performansını büyük ölçüde stabilize eder.

Son olarak cihazın iki tarafında yer alan alt ve üst kontaklar soğurucu tabakada oluşan elektron ve holleri toplayarak elektriksel devreyi tamamlama ile görevlidir. Genellikle altın veya gümüş gibi yüksek iletkenlik seviyelerine sahip metaller tercih edilir.



Şekil 2.3 : Perovskit Güneş Hücresi, (a) n-i-p ve (b) p-i-n mimarisi.

2.3 İnorganik CsPbI_2Br Perovskit Yapısı

CsPbBr_3 perovskit yapıları, diğer alternatif inorganik tabanlı perovskitlere göre yüksek faz kararlılığına sahiptir ancak bu yapıların bant aralığı çok büyüktür. CsPbI_3 'ün ise bant aralığı daha küçük olmasına karşılık faz kararlılığı zayıftır (Wang ve diğerleri, 2017). Bu nedenle, farklı dezavantajlara sahip bu yapılara alternatif olarak karışık halojen perovskit ($\text{CsPbI}_{3-x}\text{Br}_x$) yapısı, faz kararlılığı ve uygun bant seviyesi sayesinde

araştırmacıların yeni odağı haline gelmiştir. Sutton ve ekibi, x 'i 0 ila 3 arasında olan $CsPbI_{3-x}Br_x$ malzemelerini inceleyerek, bant aralığının x değerinin artmasıyla azaldığını, ayrıca bu yapıların içeriğindeki iyodür (I) ve bromür (Br) oranlarının kısmen değiştirilmesiyle oda sıcaklığında kararlı perovskit fazı elde edilebildiğini rapor etmişlerdir (Zhang ve diğerleri, 2018). Halojen yapılarındaki oransal değişimlere imkan sunması nedeniyle geliştirilmiş etkili tolerans faktörü ve daha düşük faz geçiş sıcaklığı sunan bu yapının faz kararlılığı önemli ölçüde artırılabilmiştir. İnorganik $CsPbI_2Br$ ve organik alternatif perovskitlerin kararlılığı karşılaştırıldığında, $CsPbI_2Br$ 'nin yüksek sıcaklıklarda bile (85-180 °C) kararlı olduğu gözlemlenmiştir (Li ve diğerleri, 2018). Beklendiği üzere, bu ümit verici sonuçlar daha fazla araştırmacının $CsPbI_2Br$ PGH'lerine odaklanmasını sağlıyor. $CsPbI_2Br$ inorganik perovskit yapısı literatürde ilk olarak güneş pili cihazlarında kullanıldığında %9,8'lik beklenmedik bir verimlilik elde etti. Ardından, kristal morfolojisi kontrolü, tane sınırı pasifleştirme, arayüz mühendisliği ve cihaz yapısı optimizasyonu gibi çeşitli yöntemlerle verimlilik hızla %17'ye çıkarıldı ve bu hızlı gelişim nedeniyle yapı etrafında daha fazla çalışma yürütülerek tüm inorganik cihazlar için bir araştırma merkezi haline geldi (Li ve diğerleri, 2017). İnorganik $CsPbI_2Br$ PGH'lerin cihaz kararlılığı hibrit organik bileşenden daha iyi olsa da, PCE'leri hala hibrit perovskit cihazların gerisinde kalmaktadır. Enerji seviyesi eşleştirme, katkılama yoğunluğunun optimize edilmesine ve enerji kaybı en aza indirilmiş yüksek performanslı $CsPbI_2Br$ PGH'ler için yük taşıma ve toplama iyileştirmesine konularında daha fazla çalışma yapılmalıdır. Örneğin, Mali ve arkadaşları 2021 yılında inorganik soğurucu tabaka ile ürettikleri FTO/c-TiO₂/mp-TiO₂/ $CsPbI_2Br$ /P3HT/Au mimarisine sahip PGH ile elde edilen %17,5 PCE değerini, atmosferik ortamda ve 65 °C'de 400 saat sonra başlangıç verimlilik değerinin %75'ten fazlasını muhafaza edebildiğini rapor etmişlerdir (Mali ve diğerleri., 2021).

Son yıllarda inorganik PGH'lerinin UV (morötesi) veya NIR (kızılötesi) soğurum bölgelerinin daha etkin olarak kullanılan görünür bölgede ışıma yaparak, hücre içerisindeki ışık hasadını arttırması ve yapı içerisindeki kurşun (Pb) iyonlarıyla kıyaslandığında daha küçük iyonik yarıçapa sahip olması nedeniyle lantanit iyonları PHG'lerine katkılama çalışmaları yapılmıştır (Fang ve diğerleri, 2023). Bu durumda, inorganik perovskit güneş hücrelerinin en büyük dezavantajlarından biri olan düşük akım yoğunluğu değerinin iyileştiği ve termodinamik olarak kabul edilebilir oranda

kararlı bir kübik faz yapısı elde edildiği görülmüştür. Miyasaka ve arkadaşları ortam koşullarında fotoaktif siyah (α) CsPbI₃ fazının kararlılık sorununu gidermek amacıyla CsPbI₃ soğurucu tabaka içerisine Eu³⁺ lantanitini grubu elementini katkılayarak %6 üzerinde PCE değerine ulaşılmıştır. Siyah (α) CsPbI₃ fazının sarı faza dönüşümü oda sıcaklığında ve açık hava koşullarında 30 günün üzerinde önlendiği rapor edilmiştir. (Miyasaka ve diğerleri, 2018).

Çizelge 2.1’de lantanit grubu elementlerinin perovskit yapısında B-site katkısı olarak kullanıldığı çalışmalar gösterilmektedir. Chen ve arkadaşları La³⁺ elementini LaCl₃ molekülünü DMF ve DMSO çözücülerinde 4:1 oranında karıştırarak sentezlemiştir. Elde edilen veriler ışığında yapıya eklenen La³⁺ katkısı, soğurucu tabakanın α fazına yatkınlığını arttırmıştır. Bu sayede kararlılığı artırılmış hücrenin 400 saatlik atmosfer ortamında %90 PCE değerini korumuştur. Hücrenin sahip olduğu verimlilik değeri %8,03 olarak rapor edilmiştir (Chen ve diğerleri, 2020).

Soğurucu tabakaya Sm³⁺ katkısı uygulanmıştır. Tanecik sınır boşluklarını azaltmayı ve verimliliği yükseltmeyi amaçlayan araştırmacılar optimum katkı oranını tespit ederek %15,68 verimlilik değerine ulaşmıştır. Elde edilen inorganik hücrenin artırılmış kararlılık seviyesi ile enkapsüle edilmeden atmosfer şartlarında yapılan kararlılık testinde 200 saatte başlangıç verimlilik değerinin %85’ini korumuştur (Patil ve diğerleri, 2020). Eu²⁺ elementinin yüksek kararlılığı sayesinde soğurucu tabakaya katkılандığında hücreye atmosfer ortamında yüksek ölçüde dayanım kazandırıldığı aktarmaktadır. Ayrıca bu katkıyla elde edilen yapı hava ortamında sürekli ısıtma etkisinde kararlılığını büyük ölçüde koruyabilmiştir. Ayrıca Eu²⁺ katkısının hücreye daha geniş dalga boyu aralığında ışık soğurma kabiliyeti kazandırdığı aktarılmaktadır. Bu sayede elde edilen hücre %13,71 verimlilik seviyesine ulaşmıştır (Xiang ve diğerleri, 2019).

Bir diğer çalışmada yapıya katılanan Gd³⁺ nanoparçacıkları ile yapının parçacık boyutu azaltılmıştır ve bu sayede soğurucu tabakanın α fazındaki kararlılığının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tespit edilen optimum katkı oranı ile dayanımı artırılan yapı, atmosfer şartlarında kararlılık testine tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçta Gd³⁺ katkısı ile üretilen hücrenin 1200 saatte %90 verimlilik değerini koruduğu gözlemlenmiştir. Hücrenin sahip olduğu verimlilik değeri %16,24 seviyesine ulaşmıştır (Pu ve diğerleri, 2022). Tb³⁺ katkılı CsPb_{1-x}Tb_xI₂Br kuantum

noktaları, $TbCl_3$ stok yapısına eklenen DMSO çözücüsü ile çözdürülerek elde edilmiştir. Yapıya eklenen Tb^{3+} atomları soğurucu tabakada daha pürüzsüz ve sıkı bir yapı oluşuma sebep olmuştur. Elde edilen hücre küçük ölçekli üretimde %14,42 verimlik değerine ulaşmıştır ve atmosfer ortamında 600 saatlik ölçümde başlangıç verimlilik değerinin %90 seviyesini muhafaza etmiştir (Mali ve diğerleri, 2022).

Sıradaki çalışmada, Nd^{3+} nanoparçacık katkısı ile soğurucu tabakanın kararlılığının yanında verimlilik değerinin de yükseltilmesi amaçlanmıştır. Nd^{3+} katkısı ile oluşturulan $CsPbI_2BrNd^{3+}$ yapısının kristal boyutunun ve mobilitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıdaki boşluklara yerleşen Nd^{3+} elementi ile soğurucu tabakanın kristalitesi artmıştır. Bu sayede hücrenin verimlilik değeri %15,01 seviyesine ulaşmıştır (Shen ve diğerleri, 2022).

Çizelge 2.1 : Mevcut çalışmaya ait ve literatürdeki farklı lantanit katkıları ile yapılan güneş hücrelerinin verimlilik değerleri.

Katkı	Katkı Oranı (%)	J_{sc} ($mA\ cm^{-2}$)	V_{oc} (V)	FF	PCE (%)	Kaynakça
La^{3+}	2,0	11,66	1,12	0,61	8,03	Chen ve diğerleri, 2020
Sm^{3+}	3	15,9	1,29	0,76	15,68	Patil ve diğerleri, 2020
Eu^{2+}	5	14,63	1,22	0,76	13,71	Xiang ve diğerleri, 2019
Gd^{3+}	0,4	16,09	1,22	0,83	16,24	Pu ve diğerleri, 2022
Tb^{3+}	5	14,97	1,25	0,77	14,42	Mali ve diğerleri, 2022
Nd^{3+}	2	16,01	1,25	0,75	15,01	Shen ve diğerleri, 2022
Tm^{3+}	0,75	16,52	1,29	0,82	17,47	Bu Çalışma



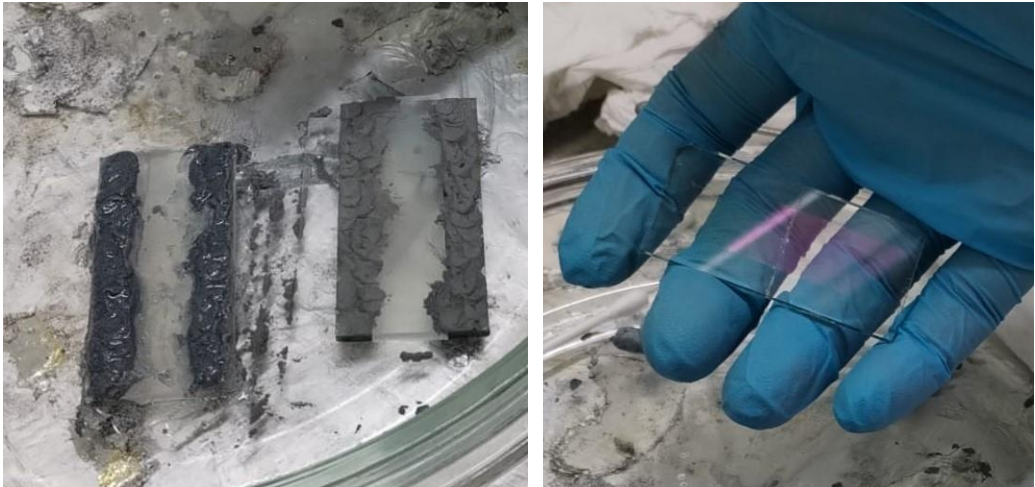
3. MATERYAL ve METOD

3.1 Malzemelerin Temin Edilmesi

N, N-dimetilformamid (DMF) ve Dimetil sülfoksit (DMSO) TCI'dan temin edilmiştir. Sezyum iyodür (CsI) (%99,999), kurşun bromür ($PbBr_2$) (\geq %98), kurşun iyodür (PbI_2), CuSCN (%98) ve dietil sülfür (%98) Sigma Aldrich'ten satın alınmıştır. Tülyum (II) iyodür (ultra kuru, %99,99) Thermo Scientific Chemicals'dan satın alınmıştır. SnO_2 koloidal çözeltileri Alfa'dan satın alınmıştır. İndirgenmiş grafen oksit (pul boyutu 0,1-1 μm , pul kalınlığı $<1nm$, saflık $>$ %99) Ossila firmasından satın alınmıştır. Diğer kimyasallar ticari olarak mevcuttur ve daha fazla saflaştırma yapılmadan doğrudan kullanılmıştır.

3.2 Perovskit Güneş Hücrelerinin Üretimi

Altaş olarak yaklaşık 10 ohm/sq dirence sahip FTO kaplı camlar kullanılacaktır. İlk olarak hücre üretimi için 1:4 oranında karıştırılan hidroklorik asit (HCl) ve de-iyonize su çözeltisi ile FTO yüzeyine dökülen çinko tozu tepkimesi sonucunda altaşların kenar kısımları FTO tabakasından arındırılacaktır.



Şekil 3.1 : FTO aşındırma işlemi.

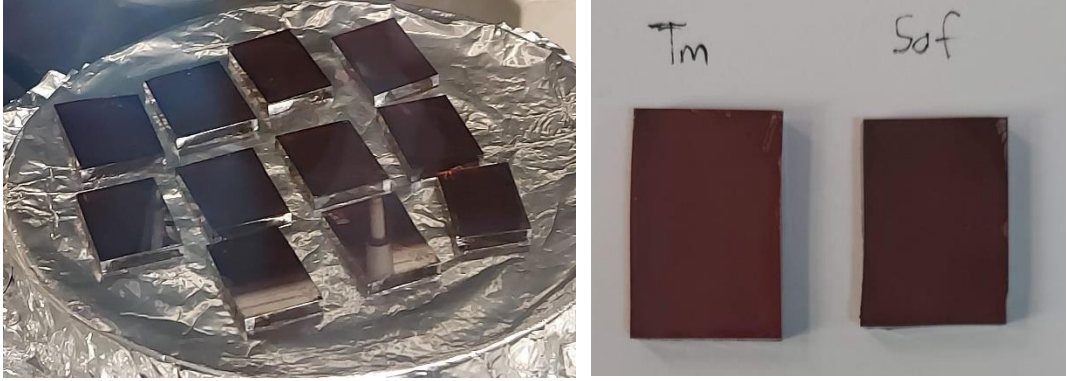
Aşındırılmış flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplı cam alt tabakalar, sırasıyla deterjanlı de-iyonize su, saf deiyonize su, aseton ve etanol ile 15 dakika boyunca sonikasyon işlemi altında temizlenmiştir. Daha sonra tüm numuneler 20 dakika süreyle ultraviyole ozon ile muamele edilmiştir.



Şekil 3.2 : Altaşların temizliğinde kullanılan ultrasonik banyo (sol) ve UV-O3 cihazı (sağ).

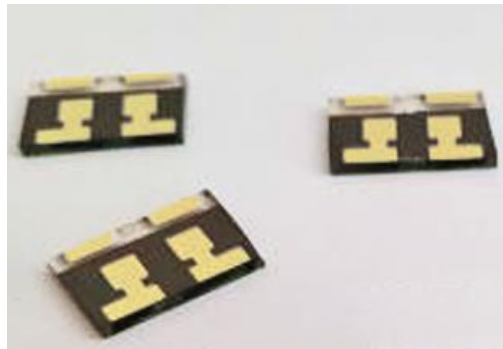
SnO₂ kolloidal çözeltisi de-iyonize su ile %2,67'ye seyreltilmiş ve oda sıcaklığında 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra, 50 µL SnO₂ çözeltisi FTO altaşlarına damlatılıp 30 saniye boyunca 4000 rpm'de döndürülerek kaplanmıştır. Daha sonra filmler 150 °C'de 30 dakika tavlansın, 15 dakika UV-ozon altında muamele edildikten sonra ve hemen eldivenli kutusuna (glove-box) transfer edilmiştir. CsPbI₂Br perovskit öncü çözeltisi, 1 ml DMSO'da 312 mg CsI, 277 mg PbI₂ ve 220 mg PbBr₂'den hazırlanmıştır. Bu çözelti 75 °C'de bir gece boyunca karıştırılmış ve ardından 0,22 µm şırınga filtresi kullanılarak filtrelenmiştir. Farklı katkı konsantrasyonları, TmI₂'nin saf DMSO'da çözülmesi zor olduğundan, 2:1 hacim oranında DMF ve DMSO'dan oluşan bir çözücüde çözündürülmüş ve istenen miktarda 0,2 M TmI₂ stok çözeltisinin eklenmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmada Tm elementi, 0, 0,25, 0,5, 0,75 ve 1,00 oranında katılanmıştır. Elde edilen yapılar sırasıyla CsPbI₂Br, CsPb_{0.975}Tm_{0.025}I₂Br, CsPb_{0.95}Tm_{0.05}I₂Br, CsPb_{0.925}Tm_{0.075}I₂Br ve CsPb_{0.9}Tm_{0.1}I₂Br olarak etiketlenmiştir. Daha sonra perovskit çözeltisi, sırasıyla 1000 ve 3000 rpm'de 10 ve 30 saniye boyunca iki kademeli spin kaplama işlemi ile SnO₂ tabakası üzerine döndürülerek kaplanmıştır. Perovskit film daha sonra ortam

koşullarında sıcak bir plaka üzerinde 280 °C'de 10 dakika tavlanarak koyu kahverengi renkli kristalin CsPbI_2Br ve $\text{CsPb}_{1-x}\text{Tm}_x\text{I}_2\text{Br}$ ince filmler oluşturulmuştur.



Şekil 3.3 : Glovebox ortamında büyütülmüş perovskit tabakası.

Ayrıca, 30 mg CuSCN 1 mL dietil sülfürde çözdürülerek boşluk taşıyıcı malzemesi (HTL) hazırlanmış ve perovskit tabakasına 2000 rpm'de 30 saniye boyunca döndürülerek kaplanmıştır. Filmler daha sonra 10 dakika boyunca 80 °C'de ısıtılmasına tabi tutulmuştur. 80 nm altın elektrotların CuSCN tabakasına termal buharlaştırılmasından önce, indirgenmiş grafen oksit incecik bir tabakası (~10 nm kalınlığında), 3000 rpm'de öncül çözeltilerle (klorobenzende 1 mg/mL, 30 dakika boyunca sonikasyona tabi tutulmuş) döndürülerek kaplanma yoluyla CuSCN tabakasına biriktirilmiştir ve 0,09 cm^2 aktif alana sahip tamamen inorganik perovskit güneş hücrelerinin üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 3.4 : Altın buharlaştırılmış perovskit güneş hücresi.

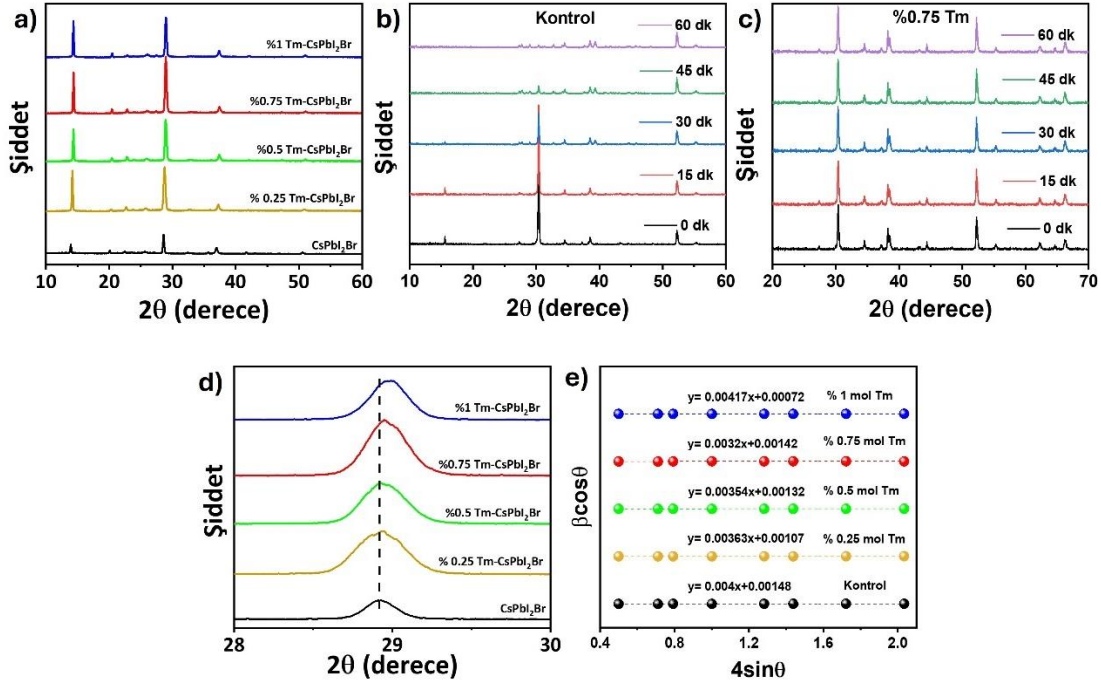
3.3 Hücrelerin ve Filmlerin Karakterizasyonu

X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri, 1,5410 Å Cu K α 'ya sahip bir Bruker D8 Advance kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Filmlerin ve hücrelerin üstten görünüm ve kesit morfolojileri, yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (HR-SEM) (Hitachi, SU-500) kullanılarak incelenmiştir. Filmlerin optiksel özellikleri 300-900 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrofotometresi (Shimadzu 2600) ile değerlendirilmiştir. Fotoluminesansı (PL), 460 nm'de uyarma ile Edinburgh Instruments FLS920P floresan spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzeylerin hidrofilitesi, ortam sıcaklığında temas açısı ölçümü (CAM) ile zamana bağlı olarak değerlendirilmiştir. SCLC ölçümleri, karanlık koşullarda yalnızca elektron içeren aygıtların (FTO/SnO₂/Perovskit/PCBM/Au) akım yoğunluğu-voltaj (J-V) karakteristiklerinin toplanmasıyla gerçekleştirilmiştir. J-V eğrileri cihazlara harici bir potansiyel önyargısı uygulanarak ve fotoakım Keithley-4200 Yarıiletken Karakterizasyon Sistemleri yardımıyla 10 mV/s tarama hızında kaydedilmiştir. Işık kaynağı olarak, lambanın emisyon spektrumunu AM 1.5G standardına uydurmak için Schott K113 Tempax güneş ışığı filtresiyle (Præzisions Glas & Optik GmbH) donatılmış 450 W'lık bir Xenon lamba (Oriol) kullanılmıştır. Işık yoğunluğu, kızılötesi cutoff filtresiyle donatılmış kalibre edilmiş bir Si referans diyot (KG-3, Schott) kullanılarak belirlenmiştir. Hücreler siyah metal bir maske ile maskelenmiştir. Dış kuantum verimliliği (EQE) spektrumu, 300 W Xenon lamba, Si dedektörü ve monokromatör içeren Enli-Tech sistemi kullanılarak dalga boyunun bir fonksiyonu olarak kaydedilmiştir. Nem kararlılığı testi, kapsüllenmemiş cihazlardan yüksek nem (60 \pm 10%) ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kapsüllenmemiş hücrelerin ışığa karşı kararlılık testi ise, VMPP'de voltajı sabitleyerek (ISOS-L-1I protokolünde açıklandığı gibi) sürekli tek güneş ışığı altında maksimum güç noktasında (MPP) gerçekleştirilmiştir. MPP izleme profilleri, 85 °C'de azot ortamında beyaz ışık yayan diyot (LED) ile izlenmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

İlk olarak, Tm iyonlarının CsPbI₂Br perovskit kristal yapısının gerilme ve kristalleşme süreci üzerindeki etkilerini X-ışını kırınımı (XRD) ölçümlerini kullanarak incelenmiştir ve Şekil 4.1(a)'da sunulmuştur. Benzer kırınım pikleri, sırasıyla 14,60° ve 29,48°'de, değişen % mol oranlarında hem kontrol hem de Tm katkılı filmlerde gözlenmiştir. Bu bölgeler, kararsız fazlar içermeyen α -fazlı CsPbI₂Br kübik perovskitin (100) ve (200) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir (Yan ve diğerleri, 2018).

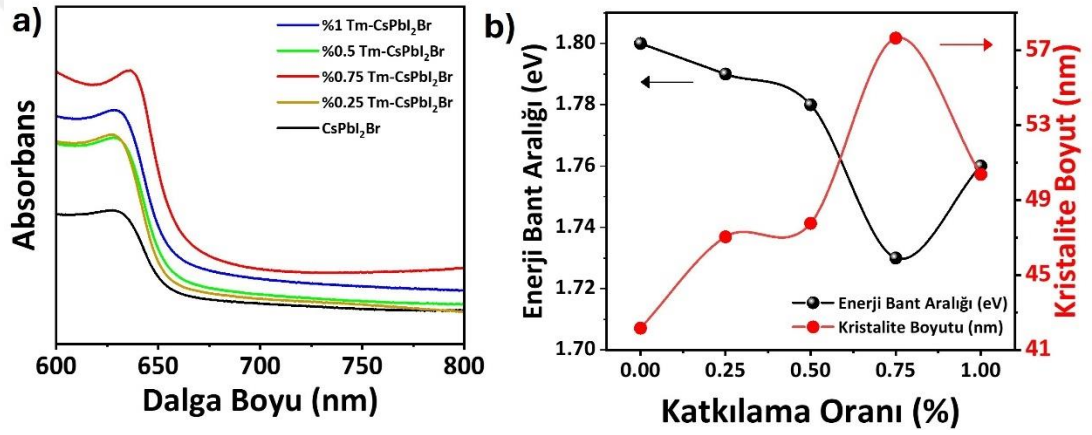
Tm³⁺ iyonlarının kristal kafese dahil edilmesinin, ikincil faz ve yapıdan ayrılan PbI₂ oluşumu olmaksızın XRD piklerinin yoğunluklarında makul bir artışla sonuçlandığını göstermektedir; bu da CsPbI₂Br filmlerinin kristalliğini iyileştirdiği ancak kristal yapılarını değiştirmedikleri anlamına gelir (Azpiroz ve diğerleri, 2015). Tm iyonlarının CsPbI₂Br ince filmlerinin faz kararlılığı üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için, kapsülleme ve azot gazı olmaksızın oda sıcaklığında, ortam koşullarında (40 ± 5% RH) belirli aralıklarla ölçülen kontrol ve %0,75 Tm katkılı ince filmlerin XRD örüntüsü incelenmiştir. Şekil 4.1(b,c)'de açıkça görüldüğü gibi, kontrol filmleri sadece 30 dakika içinde fotoaktif α -fazından kararsız δ -fazına tamamen dönüşmüş, ancak Tm katkılı perovskit filmler 60 dakika sonra XRD deseninde belirgin bir değişiklik olmaksızın ilk üretildiği durumdaki filmle aynı kalmıştır. Faz kararlılığındaki bu gelişme, yalnızca film morfolojisinin iyileştirilmesine bağlı olarak kristal kafesteki içsel kusurların bastırılmasıyla değil, aynı zamanda uygun bir tolerans faktörü oluşumunun varlığıyla da açıklanabilir; bu sayede, artırılmış kristalliğin yük taşınmasını teşvik etmesi ve tuzak yoğunluğunu azaltması sağlanır (An ve diğerleri, 2024).



Şekil 4.1 : Kontrol ve farklı Tm-katkı oranlarında CsPbI₂Br perovskit filmlerine ait (a) XRD, (b,c) XRD-kararlılık, (d) XRD ana pik ve (e) Mikro-gerilim grafikleri.

Tm iyonlarının CsPbI₂Br filminin kristal kafesi üzerindeki etkisini açıklamak amacıyla, her iki film için (200) kristal desenlerinin tepe konumlarını ve kalıntı gerilimi incelenmiştir. Şekil 4.1(d)'deki (200) kırınım tepe noktası, Tm³⁺ konsantrasyonundaki artışla %0,75 mol'e kadar önemli bir değişim göstermemektedir, ancak daha sonra %0,1 mol'de büyük açılara doğru hafifçe kayma göstermektedir ve bu da Tm³⁺ iyonlarının esas olarak kristal kafese aralıklı iyonlar olarak dahil edilebileceğini ve/veya tane sınırlarında yer alabileceğini göstermiştir. Daha küçük iyonik yarıçaplı B-site katkı maddelerinin artan konsantrasyonları tarafından tetiklenen bu kafes büzülme davranışı, daha önce bildirilen çalışmayla tutarlıdır (Wang ve diğerleri, 2024). Williamson-Hall analizi kullanılarak tüm perovskit filmlerindeki kalıntı gerilimdeki varyansı göstermektedir (Şekil 4.1(e)) ve mikro-gerilim (ϵ) değerleri, W-H grafiğinin eğimi kullanılarak Williamson-Hall denklemlerine göre kontrol ve katkı oranı için sırasıyla daha azdan daha çok doğru ϵ cinsinden 4×10^{-3} , 3.63×10^{-3} , 3.54×10^{-3} , 3.2×10^{-3} , 4.17×10^{-3} olarak belirlenmiştir (Williamson ve diğerleri, 1953). Daha büyük mikro-gerilim değeri, kristal kafeste yalnızca %1 mol Tm konsantrasyonlarında basınçlı bir gerilimin varlığını doğrular, tersine, daha düşük katkı oranlarındaki daha küçük değerler, tavlama işlemi sırasında termal genişleme ve

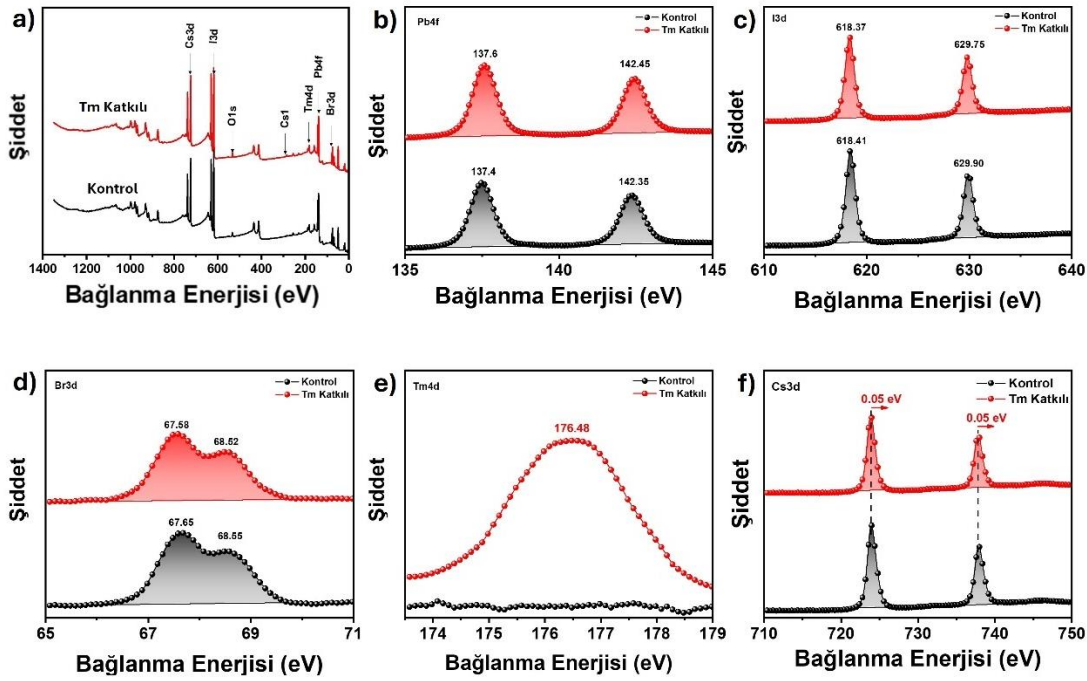
büzülme ile indüklenen içsel kafes gerilimini azaltır (Wang ve diğerleri, 2022). Yukarıdaki sonuçlar, %1 mol'den daha az Tm^{3+} iyonlarının dahil edilmesinin, sadece inorganik perovskit filminin kararlılığını değil, aynı zamanda yüzey kalıntı gerginliğini ve içsel kusuru azaltarak kristalliliğini de iyileştirdiğini, buna karşın %1 mol ve üzerinin, aralıklı birikim yoluyla basınç gerginliğini artırarak kafes gerginliği ve bozulma oluşumuna yol açtığını göstermektedir (Wang ve diğerleri, 2024). Bu bulgular ışığında, Tm iyonlarının dahil edilmesiyle oluşan kompozisyonel homojenlik nedeniyle yüzey geriliminin azalmasını, kalıntı gerilimden güçlü bir şekilde etkilenen perovskit faz kararlılığını artırdığını söyleyebiliriz (Kim ve diğerleri, 2020).



Şekil 4.2 : Kontrol ve farklı Tm-katkı oranlarında CsPbI₂Br perovskit filmlerine ait (a) UV-Vis, (b) Enerji bant aralığı/kristal boyutu grafiği.

Tüm perovskit filmler için UV-vis absorpsiyon spektrumları Şekil 4.2(a)'da gösterilmiştir. Beklendiği gibi, Tm iyonlarının dahil edilmesinin absorpsiyon yoğunluğunu %0,75 mol'e kadar önemli ölçüde artırabileceğini görebiliriz, bu etki Tm-katkı oranı %1 mol'e ulaştığında kademeli olarak azalmıştır. Absorpsiyon iyileştirmesi, yukarıda belirtilen azaltılmış gerginliğe dayalı yüksek kristallilikle tutarlı olan iyileştirilmiş film kalitesini doğrular. Absorpsiyondaki bu iyileştirmenin bir başka nedeni de Tm^{3+} iyonlarının inorganik perovskit konak matrisinde bir yukarı dönüşüm lüminans merkezi olarak hareket etmesiyle açıklanabilir (Nonat ve Charbonnière, 2020).

Özellikle, Tm^{3+} iyonlarının dahil edildiği perovskit filmler daha güçlü bir yakın-kızılötesi kayma (650 nm'den 670 nm'ye) sergiler ve bu da perovskit güneş hücrelerinde daha fazla ışık toplama kapasitesi ve fotoakım olduğunu gösterir. Dahası, karşılık gelen tauc grafikleri ve Schreer denklemi ile hesaplanan kristalit boyutu ile türetilen enerji bant aralığındaki değişim Şekil 4.2(b)'de gösterilmiştir. Kontrol için 1,90 eV'lik bant aralığı değeri, tekli ve tandem fotovoltaikler için güneş enerjisinin daha verimli bir şekilde toplanmasını sağlayacak olan Tm katyon inklüzyonuyla yaklaşık 1,83 eV'ye düşürülmüştür. Bant aralığının daralması, B-site katyonlarının Pauling elektronegatiflik değerleri arasındaki farka atfedilebilir (Pauling, 1960).

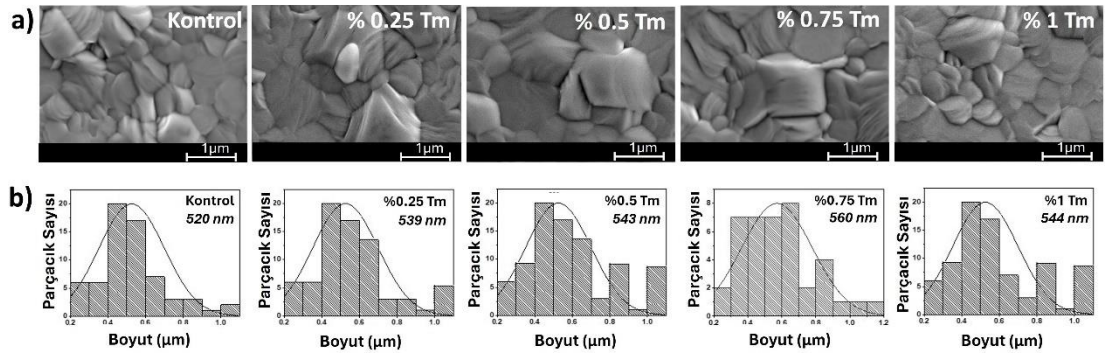


Şekil 4.3 : Kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı $CsPbI_2Br$ perovskit filmlerine ait (a) XPS-survey ve (b,c,d,e,f) XPS elemental analizi.

Tm^{3+} iyonları ve $CsPbI_2Br$ arasındaki kimyasal etkileşim hakkında daha fazla bilgi edinmek için kontrol ve 0,75 mol% Tm katkılı perovskit filmlerinin X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ölçümleri incelenmiştir. Şekil 4.3(a), her iki perovskit filminin düşük çözünürlüklü XPS tarama spektrumlarını göstermektedir, grafik yakından incelendiğinde perovskit filmlerde Cs, Pb, Br, I ve Tm elementlerinin varlığını açıkça ortaya koyar. Şekil 4.3(b,c,d,e,f), sırasıyla Pb, I, Br, Tm ve Cs dahil olmak üzere $CsPbI_2Br$ 'deki farklı elementlerin bağlanma enerjisindeki değişimi

gösterir. Ayrıca, Tm 4d karakteristik tepe noktaları 176,5 eV'de Şekil 4.3(e)'de görülebilir ve bu konum Tm³⁺ ile ilişkilidir (Ding ve diğerleri, 2024).

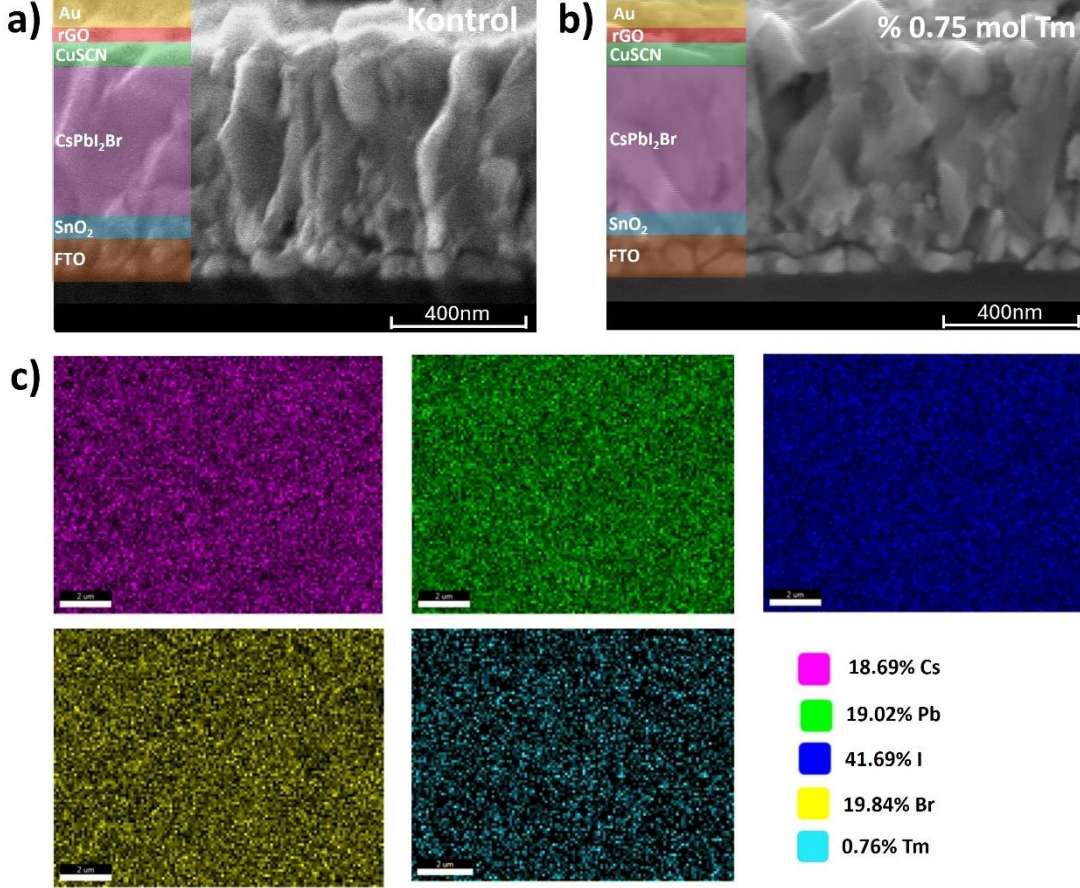
Kontrol film ile karşılaştırıldığında, tüm elementlerin bağlanma enerjisi tepeleri Tm³⁺ iyonlarının dahil edilmesiyle hafifçe daha yüksek enerjiye doğru kaymaktadır. Pb4f tepelerinin bağlanma enerjisinde 0,22 eV'lik bir kayma, Tm iyonlarının Pb iyonlarıyla yer değiştirdiğini ortaya koymaktadır ve bu da Tm elementinin CsPbI₂Br kafesine etkili bir şekilde dahil edildiğini doğrulamaktadır. Daha da önemlisi, Tm³⁺ iyonları, kaymalarının neredeyse aynı olması durumunun kanıtlandığı gibi, I ve Br ile güçlü kimyasal etkileşimlere sahiptir. Bu sonuçtan, Tm katyonlarının, yığın içindeki halojen göçüyle ilişkili olan CsPbI₂Br filminin yüzeyindeki halojen boşluklarını pasifleştirdiğini söyleyebiliriz, çünkü bunlar, üç pozitif yüklü Tm³⁺ katyonunun daha yüksek elektron afinitesi nedeniyle oluşan daha güçlü bir Lewis asidinden kaynaklanan, Pb²⁺'dan daha az koordineli iyonlarla (örn., I⁻, Br⁻) veya antisite kusurlarıyla (örn., PbX₃⁻, PbX₄²⁻, PbX₆⁴⁻, X = I, Br) daha güçlü elektrostatik etkileşimler sergilerler (Zhao ve diğerleri, 2022; Sun ve diğerleri, 2019).



Şekil 4.4 : CsPbI₂Br perovskit filmlerine ait kontrol ve 0,25, 0,5, 0,75, 1 mol% Tm-katkılı (a) SEM ve (b) parçacık boyutu histogramı analizleri.

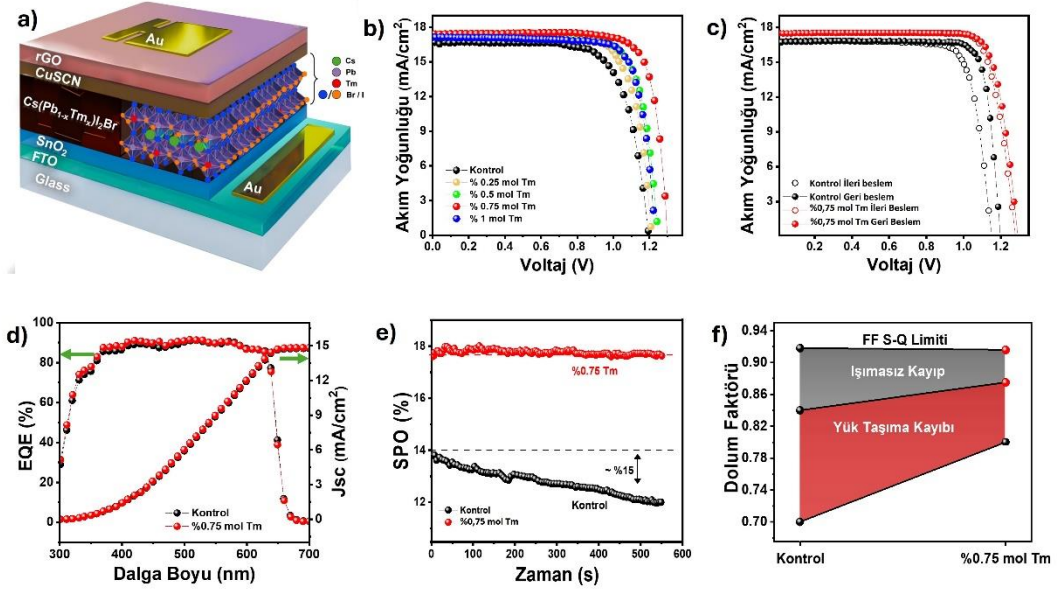
Tm³⁺ B-site katyonlarının CsPbI₂Br perovskit filmlerinin morfolojisine ve kalitesine nasıl etki ettiğini incelemek amacıyla kontrol ve farklı oranlarda Tm-katkılı filmlerin üstten görünüm taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.4 (a)'da sunulmaktadır. Tm iyonları içeren perovskit, kontrole kıyasla daha büyük tane boyutuna sahip daha yoğun paketlenmiş bir film sergiler. Şekil 4.4 (b)'de karşılık gelen tane boyutu dağılımını göstermektedir. Kontrol filminin ortalama tane boyutu yaklaşık 520 nm iken, 0,75 %mol Tm³⁺ iyon katkılı perovskit filmininki yaklaşık 560 nm'dir. Ayrıca, kontrol hücrenin kesit-SEM görüntüsü düzensiz bir dikey düzenleme ve

belirgin tane sınırları gösterirken, Tm katkılı perovskit kristalleri dikey yönde iyi düzenlenmiştir ve tane sınırları Şekil 4.5(a,b)'de kolayca gözlemlenmemektedir. Bu sonuçlar, Tm^{3+} iyonlarının, cihazda sızıntı akımlarını bastırmak ve ışmasız rekombinasyonu azaltmak için faydalı olan yüksek kaliteli bir film elde etmek için perovskit kristalleşmesini desteklediğini göstermektedir (Hu ve diğerleri, 2024; Akın ve diğerleri, 2020).



Şekil 4.5 : CsPbI₂Br perovskit filmine ait kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı (a,b) kesit-SEM ve (c) EDX görüntüleri.

Ayrıca, perovskit bileşimindeki Tm^{3+} iyonlarının dağılımını değerlendirmek için enerji dağılımlı spektroskopi (EDX) haritalaması incelenmiştir. Şekil 4.5(c)'de gösterildiği gibi, Cs, Pb, I, Br ve Tm dahil olmak üzere elementler tüm film boyunca homojen bir şekilde dağılmıştır. Ayrıca, Tm^{3+} görüntüsünü incelediğimizde, tane sınırları boyunca biriktiği yönündeki bulgularımızın doğrulandığı görülmektedir. Tane sınırlarında biriken Tm^{3+} iyonlarının çekirdeklenme oranını kontrol ederek daha büyük tanecik boyutu için kristal büyüme teşvik edebileceği durumuyla açıklanabilir (Eperon ve diğerleri, 2015).



Şekil 4.6 : (a) Cihaz yapısının şematik diyagramı, (b) farklı mol% Tm-katkı oranlarına sahip CsPbI₂Br PGH'lerinin J–V eğrileri, (c) Kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı cihazların düz ve ters taramalarında elde edilen şampiyon J-V eğrileri, (d) Kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı cihazların EQE spektrumları ve entegre akım yoğunluğu, (e) Sırasıyla kontrol ve 0,75 mol% Tm-katkılı cihazlar için kararlı durum güç çıkışı (SPO), (f) Fill Faktörü (FF) S-Q sınırı, ölçülen FF ve yük taşıma kaybı olmaksızın maksimum FF ile sırasıyla yük taşıma kaybindan (koyu kırmızı alan) ve ışımsız kayıp (gri alan) grafikleri.

Şekil 4.6(a)'da gösterildiği gibi FTO/SnO₂/CsPb_{1-x}Tm_xI₂Br/CuSCN/r-GO/Au'dan oluşan tamamen inorganik bir cihaz mimarisi ürettik. 100 mW.cm² ışık şiddeti altında farklı Tm³⁺ iyon oranlarıyla ölçümden elde edilen akım yoğunluğu-voltaj (J-V) özellikleri Şekil 4.6(b)'de gösterilmektedir ve ayrıntılı fotovoltaik parametreler Çizelge 4.1'de sunulmaktadır. Bu bulgular ışığında, CsPbI₂Br PGH'lerde B-Site dopantı olarak optimum doping oranının 0,75 mol% olarak kabul edilebileceği düşünülmektedir. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, kontrol hücresi için V_{OC} değeri 1,2 V, J_{SC} değeri 16,72 mA.cm⁻² ve dolum faktörü (FF) %70 sergileyerek %14,04 verimlilik değeri göstermiştir. Öte yandan,

En iyi sonucu gösteren hücre ile optimum cihaz ile V_{OC} değeri 1,29 V, J_{SC} değeri 16,52 mA.cm⁻² ve FF değeri %82 ile %17,47'lik en iyi verimlilik değerine ulaşmıştır. Bu, önerilen mimarinin tamamen inorganik CsPbI₂Br PGH'ler için iyi çalıştığını ve Tm³⁺ B-site katkısının, film kalitesinin iyileştirilmesi, kusurların pasifleştirilmesi ve

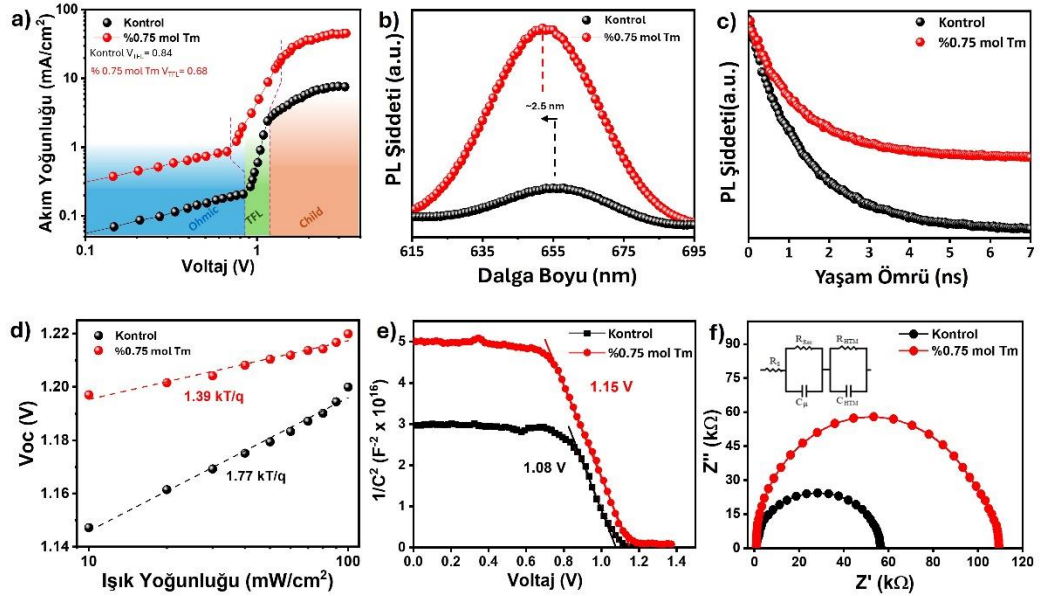
ışmasız rekombinasyonun bastırılması nedeniyle ışık hasadı yeteneğinin artmasına atfedilebilir. Ayrıca, Şekil 4.6(c)'de ters ve düz yönlerde taranan cihazlar için gösterildiği üzere, histerezis endeksi hesaplandığında (Culu ve diğerleri, 2022), 0,75 mol% Tm-katkısı eklendikten sonra kontrol hücresinde hesaplanan 0,0939'dan 0,0390'a düşmüştür ve 0,75 mol% Tm³⁺ katkısının kontrol hücreleriyle karşılaştırıldığında histereziste kayda değer bir iyileşmeye yol açtığını göstermektedir. Bu sonuç, kusurların bastırılması ve halojenür bazlı iyon göçüyle ilgili yukarıda belirtilen hipotezi desteklemektedir (Liu ve diğerleri, 2024).

Çizelge 4.1 : Kontrol ve farklı Tm-katkı oranlarına sahip inorganik PGH'lerin fotovoltaik parametreleri.

PGH		V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	PCE (%)
Kontrol	Şampiyon	1,20	15,82	0,74	14,04
	Ortalama	1,19±0.01	15,71±0.11	0,73 ±0.01	13,64±0.40
%0.25	Şampiyon	1,21	16,34	0,76	15,02
	Ortalama	1,20±0.01	16,26±0.08	0,75±0.01	14,63±0,41
%0.5	Şampiyon	1,23	16,36	0,78	15,69
	Ortalama	1,21±0,02	16,33±0,12	0,76±0,02	15,01±0,78
%0.75	Şampiyon	1,29	16,52	0,82	17,47
	Ortalama	1,28±0.01	16,43±0,08	0,80±0,02	16,82±0,66
%1	Şampiyon	1,22	16,12	0,80	15,73
	Ortalama	1,20±0,02	16,08±0,05	0,79±0,01	15,24±0,51

Tm⁺³ iyonlarının dahil edildiği/edilmediği tamamen inorganik PGH'lerin harici kuantum verimliliği (EQE) grafikleri Şekil 4.6(d)'de gösterilmiştir. Kontrol cihazıyla karşılaştırıldığında, Tm katyon katkılı inorganik güneş hücreleri, özellikle 450 – 600 nm bölgesinde daha yüksek kuantum verimliliği sergiler. Bu durum, gelişmiş emilim kabiliyetine, daha büyük tane boyutlarının oluşumuna ve rekombinasyon kaybının azalmasına atfedilebilir. EQE spektrumlarının entegre edilmesinden elde edilen J_{sc}

değerleri, kontrol ve Tm katkılı PGH'ler için sırasıyla 14,82 ve 15,87 mA.cm⁻²'dir ve J-V eğrilerinden ölçülen J_{sc} ile oldukça uyumludur. Her iki PGH'nin sabit durum güç çıkışı (SPO), ortam koşullarında 1-güneş aydınlatması altında 550 saniye boyunca Maksimum Güç Noktası voltajında izlenmiştir ve Tm³⁺ iyonlarının yapıya dahil edilmesiyle elde edilen sonuç yaklaşık %17,7 iken kontrol hücresi Şekil 4.6(e)'de görüldüğü üzere ~%15'lik bir kayıpla %12 seviyelerine gerilemiştir. FF'deki artışın altında yatan nedenleri anlamak için, ışısız taşıyıcı rekombinasyonu ve yük taşıma kayıpları prensiplerine dayanan yarı-ampirik bir yaklaşım kullanarak FF değerlerini tahmin edilmiştir (Green, 1982). Hem ışısız kayıp hem de yük taşıma kaybını göz önünde bulundurarak, kontrol ve Tm katkılı cihazların deneysel FF değerlerini sırasıyla 0,68 ve 0,79 olarak hesaplanmıştır; bu değerler ölçülen FF değerleriyle (~2%'den az) iyi uyumaktadır. Şekil 4.6(f)'deki bu sonuçlar, Tm³⁺ iyonlarının B-site katyonu olarak sadece ışısız rekombinasyonu önlemekle kalmayıp aynı zamanda cihaz içinde yük taşımayı da artırdığını doğrulamaktadır.



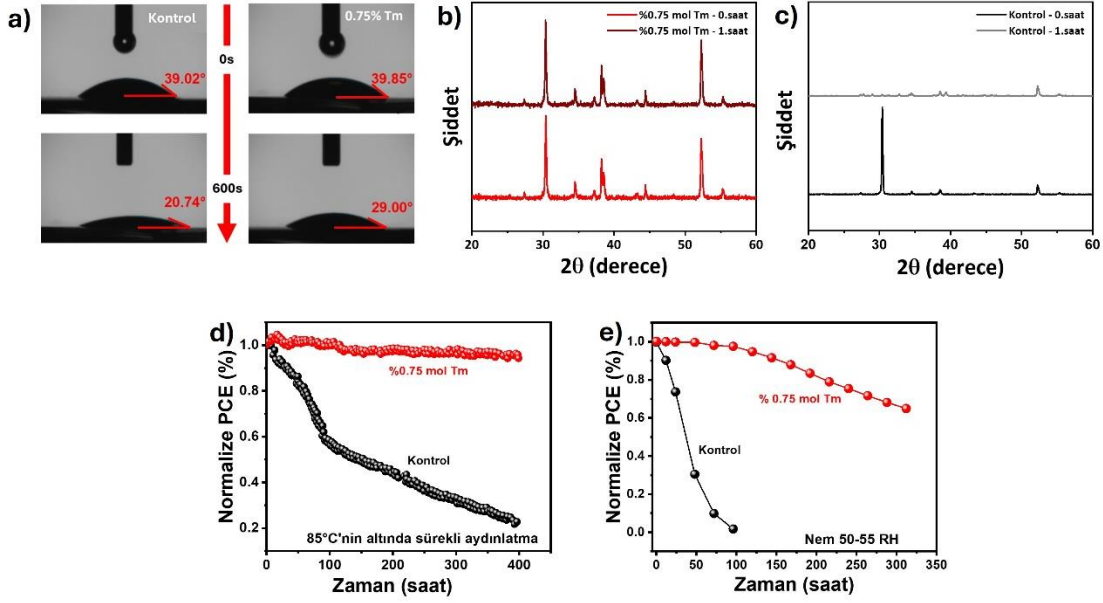
Şekil 4.7 : (a) (sadece-elektronlu) cihazların karanlık akım yoğunluk-voltaj eğrileri, (b) Her iki perovskit filmin sabit durum fotolüminesans (PL) spektrumları, (c) Her iki perovskit filmin zaman çözünürlüklü fotolüminesans (TRPL) spektrumları, (d) ışık yoğunluğunun logaritmik fonksiyonu olarak V_{oc} , (e) Mott-Schottky eğrileri, (f) Karanlık ortamda kontrol ve 0,75 mol% Tm katkılı cihazların Nyquist çizimleri. Uydurma için kullanılan eşdeğer devre şeması ekte gösterilmiştir.

CsPbI₂Br inorganik perovskitlerde Tm³⁺ iyonlarının pasifleştirme etkilerini nicel olarak değerlendirmek için, Şekil 4.7(a)'da gösterilen, yalnızca elektron içeren cihazların karanlık J–V karakteristiklerini toplayarak ve uzay yükü sınırlı akımı (SCLC) ölçerek tuzak yoğunluğu ve taşıyıcı hareketliliği analiz edilmiştir. Tm katkılı cihazlar ($1,77 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), kontrol cihazlarına ($2,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) kıyasla daha düşük elektron tuzak yoğunlukları göstermektedir; bu durum büyük olasılıkla Tm³⁺ iyonlarının yüzey veya içsel kusurları pasifleştirme etkisinden kaynaklanmaktadır. Mott-Gurney denklemi kullanılarak hesaplanan Tm katkılı cihazların elektron hareketliliği, kontrol cihazına ($4,77 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$) kıyasla $7,147 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ 'e yükselmiştir; bu da Tm içeren cihazların daha yüksek taşıyıcı hareketliliği sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, kararlı durum fotoluminesans (PL) ve zamanla-çözünürlüklü PL (TRPL) ölçümleri, Tm³⁺ iyonlarının CsPbI₂Br filmlerindeki yük rekombinasyon dinamikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılır.

Şekil 4.7(b)'de görüldüğü gibi, Tm³⁺ katkılı CsPbI₂Br filmi, kontrol filmine kıyasla belirgin bir iyileştirme ve maviye kaymış (blue-shift) tepe pozisyonları sergilemekte ve bu da Tm³⁺ iyonlarının tuzak yoğunluğunu etkili bir şekilde azaltabileceğine kanıt gösterilebilir (Han ve diğerleri, 2020). Bu durum, XPS bulgularında bahsedildiği gibi halojen iyonlarıyla güçlü etkileşimler sayesinde gerçekleşiyor (Mali ve diğerleri, 2019). Bu bulguları gösterdiği güçlü etkileşimleri daha detaylı incelemek ve perovskit tabakasındaki taşıyıcı mobilitesi ve rekombinasyonunu incelemek amacıyla TRPL ölçümleri (Şekil 4.7(c)) alınmıştır ve Tm-katkılı perovskit filmler için PL bozunma eğrileri, çift-üstel (biexponential) bir fonksiyon kullanılarak analiz edilmiştir. Kontrol filmleriyle karşılaştırıldığında, yüzey-ışmasız rekombinasyona bağlı τ_1 ömürlerini 1,46'dan 1,54 ns'ye ve toplu rekombinasyona bağlı τ_2 ömürlerini 0,61'den 0,70 ns'ye hafifçe artış gösterdiği gözlemlenmiştir, bu durum Tm³⁺ iyonlarının ışmasız rekombinasyonu etkili bir şekilde engelleyebileceğini ve CsPbI₂Br filminin taşıyıcı ömrünü uzatabileceğini göstermektedir (Yuan ve diğerleri, 2019). Tm katyonunun taşıyıcı rekombinasyon mekanizması üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla, her iki cihaz için farklı ışık yoğunlukları altında voltaj bağımlılıklarını incelenmiştir. kBT/q biriminin eğiminden türetilen ideallite faktörü, V_{OC} kaybının tuzak kaynaklı ışmasız rekombinasyon tarafından domine edilip edilmediğine dair fikir vermektedir.

Şekil 4.7(d)'deki V_{OC} 'nin ışık yoğunluğuna göre eğimi $1,77 \text{ kBT/q}$ 'dan (kontrol) $1,39 \text{ kBT/q}$ (Tm -katkılı) seviyesine düşmektedir ve bu da Tm^{3+} iyonlarının açık devre koşulları altında tuzak kaynaklı ışısız Shockley-Read-Hall rekombinasyonunu etkili bir şekilde önlediğini göstermektedir.

Ayrıca, Şekil 4.7(e)'de görüldüğü gibi yerleşik potansiyeli (V_{bi}) belirlemek için Mott-Schottky analizleri gerçekleştirilmiştir. J-V eğrilerinden türetilen V_{OC} değerlerine benzer şekilde, Tm -dahil PGH'lerin V_{bi} 'sinin $1,15 \text{ V}$ olduğu bulunmuştur; bu, kontrol cihazınkinden ($1,08 \text{ V}$) daha yüksektir. Nispeten daha yüksek V_{bi} değeri, taşıyıcı rekombinasyonunu önlemek için genişleyen bir tükenme bölgesi ve yük ayrımı için artan bir itici güç anlamına gelir (Chen ve diğerleri, 2019; Zhang ve diğerleri, 2018). Bu durum, artan V_{OC} 'nin temel nedeni olabilir. Ek olarak, Tm iyonlarının $CsPbI_2Br$ PGH'lerinin yük taşıyıcı rekombinasyonu üzerindeki etkileri hakkında bilgi sağlamak için elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri ve ilgili Nyquist grafiklerini ve eşdeğer devre modeli Şekil 4.7(f)'de sunulmuştur. Tm -katkılı cihazların, kontrol cihazından daha düşük seri direnç (R_s) ve çok daha yüksek rekombinasyon direnci (R_{rec}) sergilediği bulunmuştur, bu da Tm^{3+} iyonlarının tuzak pasivasyonu yoluyla taşıyıcı rekombinasyonunu önemli ölçüde azaltabileceğini ve ayrıca yük taşıyıcılarının taşınmasını teşvik edebileceğini düşündürmektedir. Sistem tasarımı için kullanılan eşdeğer devre şeması grafik içerisinde belirtilmiştir (Yang ve diğerleri, 2018).



Şekil 4.8 : (a) Zamana karşı temas açısı ölçümü, (b) Tm katkılı, (c) kontrol hücrelerin yeni üretilmiş ve oda sıcaklığında bir saat beklendikten sonraki XRD ölçümleri, (d) Her iki kapsüllenmemiş cihazın eldiven-kutusunda 85 °C sıcaklıkta sürekli aydınlatma altında foto-stabilite testleri ve (e) Her iki kapsüllenmemiş cihazın oda sıcaklığında bağıl nem (50-55 RH) altında nem-stabilite testleri.

Tm^{3+} iyonlarının yapıya dahil edilmesinin PGH kararlılığı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, filmler üzerinde ortam koşullarında 10 dakikaya kadar su temas açısı testleri yürütülmüştür ve Şekil 4.8(a)'da sunulmuştur. Tm^{3+} iyonlarının yapıya dahil edilmesinin su temas açısında belirgin bir değişikliğe yol açmamasına rağmen, 10 dakika sonra kontrol filmlerine kıyasla daha büyük su temas açısı sergiledi, bu durumun da artan hidrofobiklik özelliği ile perovskit filme nemin nüfuz etmesini önlediği anlamına geliyor. Yeni üretilmiş ve bir saat sonrasında (azotsuz ortam), Tm-katkılı ve kontrol perovskit filmlerinin XRD desenleri sırasıyla Şekil 4.8(b,c)'de gösterilmiştir. Sonuçlar, Tm katkılı filmin bir saat sonra bile fotoaktif siyah α -fazını koruduğunu, ancak kontrol filminin tamamen kararsız sarı faza dönüştüğünü göstermektedir. Güçlü kanıtlar, Tm^{3+} iyonlarının dahil edilmesiyle perovskit filminin faz kararlılığında, çoğunlukla iyon göçünün baskılanması ve kusur pasifleşmesine atfedilen önemli bir artış olduğunu göstermektedir (Li ve diğerleri, 2024). Şekil 4.8(d)'de gösterildiği gibi, her iki cihazda da herhangi bir kapsülleme olmaksızın 85°C sıcaklıkta azot dolu bir eldiven-kutusu içinde foto stabilite testi gerçekleştirilmiştir. 400 saat ışık altında bekletmenin ardından, kontrol cihazlarının verimliliği başlangıç

değerinin %21,4'üne düşerken, Tm katkılı cihazlar başlangıç değerlerinin %96'sını koruyabilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.8(e)'de gösterildiği gibi, her iki kapsüllenmemiş cihazda da %50-55 RH bağıl nem oranına sahip oda sıcaklığında bir nem kararlılığı testi gerçekleştirilmiştir. Tm içeren cihazlar, 320 saat sonra başlangıç verimliliğinde ~%70'lik etkileyici bir kararlılık gösterirken kontrol cihazların yalnızca 100 saatte keskin bir şekilde sifıra düştüğü görülmektedir. Tm katkılı cihazların sahip olduğu yüksek kararlılık, iyon göçünün baskılanarak faz ayırımına ve böylece perovskit filmlerde istenmeyen kimyasal veya fiziksel reaksiyonların büyük ölçüde önlenmesine bağlanabilir (Chen ve diğerleri, 2019). Özellikle, halojen anyonları düşük oluşum enerjileri nedeniyle yapıdan daha kolay ayrılma eğilimindedir ve ışınım altında bu süreci daha da hızlandırabilir, bu da cihazın foto stabilite performansında bir azalmaya neden olabilir (Peng ve diğerleri, 2024).

Yukarıda tartışılan XPS sonuçları kapsamında, halid (iyodür/bromür) iyonları ile Tm^{3+} iyonları arasındaki elektrostatik etkileşimin Pb^{2+} ile olandan daha güçlü olduğu ve dolayısıyla halid göçünün hafifletilmesinin gelişmiş foto stabiliteye katkıda bulunmasının oldukça olası olduğu sonucuna varmamızı sağlar. Ayrıca, ışık maruziyeti sırasında halid kaçıışı veya halid iyonlarının göçü sonucu perovskitin tanecik sınırlarında veya yüzeyinde oluşan anyon boşluk kusurları, SEM görüntüleriyle desteklendiği gibi, yüzeyde veya tanecik sınırlarında lokalize olan Tm^{3+} iyonlarının varlığıyla inhibisyona atfedilebilir. Tm-katkılı cihazın gelişmiş foto stabilitesi, büyük olasılıkla ışıkla uyarılan iyon göçünün baskılanmasına ve tanecik sınırlarında veya yüzeyde halojenür boşluklarının daha etkili bir şekilde ortadan kaldırılmasına atfedilmektedir. Ek olarak su ve/veya oksijen molekülü, sadece perovskit yüzeyindeki veya tanecik sınırlarında delikler ve çatlaklar yoluyla değil, aynı zamanda tanecik sınırlarında biriken koordine olmayan PbI_2 ve/veya halojenür iyonlarının göçüyle oluşan kimyasal reaksiyonlar yoluyla da perovskite nüfuz edebilir ve bunların her ikisi de α -faz bozunmasının stabilizasyonunu tetikleyebilir (Kamat ve diğerleri, 2021; Ahn ve diğerleri, 2024; Akin ve diğerleri, 2019). Yukarıda belirtilen sonuçlarda gösterildiği gibi, Tm^{3+} iyonları, perovskit film yüzeyinde veya tanecik sınırlarında düzgün bir dağılımla etkili koruma sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kristalleşmeyi ve tane büyümesini kontrol ederek her iki bölgedeki kusurları ve iyon göçünü bastırarak perovskit ince film boyunca neme dayanıklı bir yüzey oluşumu sağlayabilir.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

B-site dopantları olarak Tm^{3+} iyonları, yapıya dahil ederek inorganik $CsPbI_2Br$ perovskit filmleri başarıyla modifiye edilmiştir. Son derece kararlı ve verimli tamamen inorganik perovskit güneş hücreleri için soğurucu tabaka olarak, 1 mol% ve altındaki miktarlarda Tm^{3+} iyonlarının perovskit yüzeyindeki içsel kafes gerinimini azalttığı ve halojenür iyonlarıyla güçlü bir şekilde etkileşime girebildiği ve bu sayede kristalleşmeyi ve faz kararlılığını aynı zamanda kontrol ederek büyük tanecikli yapılar elde edilmesi sağlanmıştır. 0,75 mol% Tm^{3+} konsantrasyonuna sahip inorganik PGH'ler, %17,47'lik bir şampiyon PCE ile tamamen inorganik $CsPbI_2Br$ -tabanlı güneş hücrelerinde elde edilen en yüksek değerdir. Daha da önemlisi, Tm^{3+} içeren cihazın operasyonel ve neme karşı kararlılıkları, sırasıyla 400 saat boyunca %96'lık başlangıç verimliliğini ve 320 saat sonra %70'lik verimliliği koruduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın, tulum elementinin veya diğer yüksek değerlikli elementlerin tüm inorganik perovskit malzemelerin türevleriyle bütünleştirilmesi veya faz kararlılığının daha derinlemesine anlaşılması için farklı deneysel/teorik tekniklerin kullanımı ile birlikte, fonksiyonel gruplara göre değişen boşluk taşıyıcı malzemelerin kristalleşme ve çekirdeklenme/büyüme mekanizmalarının daha kararlı ve verimli inorganik bazlı perovskit güneş hücreleri elde edilmesi veya ticarileştirme için bu soğurucu tabakanın üst hücre olarak kullanıldığı tandem hücrelerin üretimi dahil olmak üzere gelecekteki araştırma yönleri için dikkate değer bir rehberlik sağlayacağına inanıyoruz.



6. KAYNAKLAR

- Afre, R. A., Sharma, N., Sharon, M., & Sharon, M. (2018). Transparent conducting oxide films for various applications: A review. *Reviews on advanced materials science*, 53(1), 79-89. DOI:10.1515/rams-2018-0006
- Ahn, N., & Choi, M. (2024). Towards Long-Term Stable Perovskite Solar Cells: Degradation Mechanisms and Stabilization Techniques. *Advanced Science*, 11(4), 2306110. DOI:10.1002/advs.202306110
- Akin, S., Akman, E., & Sonmezoglu, S. (2020). FAPbI₃-based perovskite solar cells employing hexyl-based ionic liquid with an efficiency over 20% and excellent long-term stability. *Advanced Functional Materials*, 30(28), 2002964. DOI:10.1002/adfm.202002964
- Akin, S., Altintas, Y., Mutlugun, E., & Sonmezoglu, S. (2019). Cesiumlead based inorganic perovskite quantum-dots as interfacial layer for highly stable perovskite solar cells with exceeding 21% efficiency. *Nano Energy*, 60, 557-566. DOI:10.1016/j.nanoen.2019.03.091
- Akin, S., Sadegh, F., Turan, S., & Sonmezoglu, S. (2019). Inorganic CuFeO₂ delafossite nanoparticles as effective hole transport materials for highly efficient and long-term stable perovskite solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(48), 45142-45149. DOI:10.1021/acsami.9b14740
- Alfaifi, A. H., Dunfield, S. P., Hasse, A. E., Larson, B. W., Reese, M. O., Berry, J., ... & Shaheen, S. E. (2019, October). Investigating the effect of lamination on FAMACs: toward a new phase space of perovskite solar cell fabrication. In *Organic, Hybrid, and Perovskite Photovoltaics XX* (Vol. 11094, pp. 22-28). SPIE. DOI:10.1117/12.2529904
- An, Y., Zhang, N., Zeng, Z., Cai, Y., Jiang, W., Qi, F., ... & Yip, H. L. (2024). Optimizing crystallization in wide-bandgap mixed halide perovskites for high-efficiency solar cells. *Advanced Materials*, 36(17), 2306568. DOI:10.1002/adma.202306568
- Azpiroz, J. M., Mosconi, E., Bisquert, J., & De Angelis, F. (2015). Defect migration in methylammonium lead iodide and its role in perovskite solar cell operation. *Energy & Environmental Science*, 8(7), 2118-2127. DOI:10.1039/C5EE01265A
- Chen, B., Rudd, P. N., Yang, S., Yuan, Y., & Huang, J. (2019). Imperfections and their passivation in halide perovskite solar cells. *Chemical Society Reviews*, 48(14), 3842-3867. DOI:10.1039/C8CS00853A
- Chen, C., Zhang, S., Wu, S., Zhang, W., Zhu, H., Xiong, Z., ... & Chen, W. (2017). Effect of BCP buffer layer on eliminating charge accumulation for high performance of inverted perovskite solar cells. *RSC advances*, 7(57), 35819-35826. DOI:10.1039/C7RA06365B

- Chen, S., Zhang, T., Liu, X., Qiao, J., Peng, L., Wang, J., ... & Lin, J. (2020). Lattice reconstruction of La-incorporated CsPbI₂Br with suppressed phase transition for air-processed all-inorganic perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(10), 3351-3358. DOI:10.1039/C9TC05736F
- Chen, W., Chen, H., Xu, G., Xue, R., Wang, S., Li, Y., & Li, Y. (2019). Precise control of crystal growth for highly efficient CsPbI₂Br perovskite solar cells. *Joule*, 3(1), 191-204. DOI:10.1016/j.joule.2018.11.010
- Culu, A., Kaya, I. C., & Sonmezoglu, S. (2022). Spray-pyrolyzed tantalium-doped TiO₂ compact electron transport layer for UV-photostable planar perovskite solar cells exceeding 20% efficiency. *ACS Applied Energy Materials*, 5(3), 3454-3462. DOI:10.1021/acsaem.1c03848
- Ding, C., Yang, L., Lu, X., Chi, H., Yang, Y., Yuan, J., ... & Zou, Z. (2024). Outstanding CO₂ Photoreduction in Single-Atom Thulium Modified Carbon Nitride. *Advanced Science*, 11(38), 2406329. DOI:10.1002/advs.202406329
- Eperon, G. E., Paternò, G. M., Sutton, R. J., Zampetti, A., Haghighirad, A. A., Cacialli, F., & Snaith, H. J. (2015). Inorganic caesium lead iodide perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(39), 19688-19695. DOI:10.1039/C5TA06398A
- Fang, L., Zhang, Y., Li, T., Wei, Y., Yuan, Y., Zhang, J., & Wang, P. (2023). Helical polycyclic heteroaromatic as hole transport material for perovskite solar cell: remarkable impact of alkyl substitution position. *Advanced Energy Materials*, 13(34), 2301455. DOI:10.1002/aenm.202301455
- Green, M. A. (1982). Accuracy of analytical expressions for solar cell fill factors. *Solar Cells*, 7(3), 337-340. DOI:10.1016/0379-6787(82)90057-6
- Green, M. A. (2002). Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 65-70. DOI:10.1016/S1386-9477(02)00361-2
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., ... & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32(7), 425-441. DOI:10.1002/pip.3831
- Han, Y., Zhao, H., Duan, C., Yang, S., Yang, Z., Liu, Z., & Liu, S. (2020). Controlled n-doping in air-stable CsPbI₂Br perovskite solar cells with a record efficiency of 16.79%. *Advanced Functional Materials*, 30(12), 1909972. DOI:10.1002/adfm.201909972
- Hu, Y., Zhou, Y., Wang, Z., Chen, Q., Xu, H., Sun, T., & Tang, Y. (2024). Crystallization Regulation and Lead Leakage Prevention Simultaneously for High-Performance CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 15(15), 4158-4166. DOI:10.1021/acs.jpcclett.4c00736
- Kamat, P. V., & Kuno, M. (2021). Halide ion migration in perovskite nanocrystals and nanostructures. *Accounts of Chemical Research*, 54(3), 520-531. DOI:10.1021/acs.accounts.0c00749
- Kim, H. S., & Park, N. G. (2020). Importance of tailoring lattice strain in halide perovskite crystals. *NPG Asia Materials*, 12(1), 78. DOI:10.1038/s41427-020-00265-w

- Kim, H. S., Lee, C. R., Im, J. H., Lee, K. B., Moehl, T., Marchioro, A., ... & 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. DOI:10.1038/srep00591
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050-6051. DOI:10.1021/ja809598r
- Li, J.; Yuan, S.; Tang, G.; Li, G.; Liu, D.; Li, J.; Hu, X.; Liu, Y.; Li, J.; Yang, Z.; Liu, S.; Liu, Z.; Gao, F.; Yan, F., High-performance, self-powered photodetectors based on perovskite and graphene. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9(49), 42779-42787. DOI:10.1021/acsami.7b14110
- Li, N.; Zhu, Z.; Li, J.; Jen, A. K. Y.; Wang, L., Inorganic CsPb_{1-x}Sn_xIBr₂ for Efficient Wide- Bandgap Perovskite Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* 2018, 8(22), 1800525. DOI:10.1002/aenm.201800525
- Li, R., Zhang, S., Zhang, H., Wang, Z., Feng, X., Du, Y., ... & Tian, Q. (2024). Customizing Aniline-Derived Molecular Structures to Attain beyond 22% Efficient Inorganic Perovskite Solar Cells. *Angewandte Chemie*, 136(42), e202410600. DOI:10.1002/anie.202410600
- Li, Z., Wu, M., Yang, L., Guo, K., Duan, Y., Li, Y., ... & Liu, Z. (2023). 24.64%-efficiency ma-free perovskite solar cell with V_{oc} of 1.19 V enabled by a hinge-type fluorine-rich complex. *Advanced Functional Materials*, 33(11), 2212606. DOI:10.1002/adfm.202212606
- Liu, Y., Xu, T., Xu, Z., Zhang, H., Yang, T., Wang, Z., ... & Liu, S. (2024). Defect passivation and lithium ion coordination via hole transporting layer modification for high performance inorganic perovskite solar cells. *Advanced Materials*, 36(4), 2306982. DOI:10.1002/adma.202306982
- Mali, S. S., Patil, J. V., & Hong, C. K. (2019). Hot-air-assisted fully air-processed barium incorporated CsPbI₂Br perovskite thin films for highly efficient and stable all-inorganic perovskite solar cells. *Nano Letters*, 19(9), 6213-6220. DOI:10.1021/acs.nanolett.9b02156
- Mali, S. S., Patil, J. V., Rondiya, S. R., Dzade, N. Y., Steele, J. A., Nazeeruddin, M. K., ... & Hong, C. K. (2022). Terbium-Doped and Dual-Passivated γ -CsPb (I_{1-x}Br_x)₃ Inorganic Perovskite Solar Cells with Improved Air Thermal Stability and High Efficiency. *Advanced Materials*, 34(29), 2203204. DOI:10.1002/adma.202203204
- Miyasaka, T. (2018). Development of organic inorganic perovskite high performance solar cells. *Impact*, 2018(11), 63-65. DOI:10.21820/23987073.2018.11.63
- Nonat, A. M., & Charbonnière, L. J. (2020). Upconversion of light with molecular and supramolecular lanthanide complexes. *Coordination Chemistry Reviews*, 409, 213192. DOI:10.1016/j.ccr.2020.213192
- O'regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353(6346), 737-740. DOI:10.1038/353737a0
- Park, N. G. (2015). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. *Materials Today*, 18(2), 65-72. DOI:10.1016/j.mattod.2014.07.007

- Patil, J. V., Mali, S. S., & Hong, C. K. (2020). Boosting the stability of fully-inorganic perovskite solar cells through samarium doped CsPbI₂Br perovskite. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(43), 16364-16371. DOI:10.1021/acssuschemeng.0c05056
- Pauling, L. (1960). *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry* (Vol. 18). Cornell university press.
- Peng, Z., Vincze, A., Streller, F., Le Corre, V. M., Zhang, K., Li, C., ... & Brabec, C. J. (2024). Revealing degradation mechanisms in 3D/2D perovskite solar cells under photothermal accelerated ageing. *Energy & Environmental Science*, 17(21), 8313-8324. DOI:10.1039/D4EE03869J
- Pu, X., Yang, J., Wang, T., Cheng, S., Cao, Q., Zhao, J., ... & Li, X. (2022). Gadolinium-incorporated CsPbI₂Br for boosting efficiency and long-term stability of all-inorganic perovskite solar cells. *Journal of Energy Chemistry*, 70, 9-17. DOI:10.1016/j.jechem.2022.02.004
- Rahman, S., Haleem, A., Siddiq, M., Hussain, M. K., Qamar, S., Hameed, S., & Waris, M. (2023). Research on dye sensitized solar cells: recent advancement toward the various constituents of dye sensitized solar cells for efficiency enhancement and future prospects. *RSC Advances*, 13(28), 19508-19529. DOI:10.1039/D3RA00903C
- Shen, X., Li, Y., Li, H., Wang, Q., Ma, Z., Peng, C., ... & Huang, Y. (2022). Improving inter-phase charge transfer via defect passivation for efficient Quasi-2D (BA)₂(FA)₈Pb₉I₂₈ perovskite solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 138, 106296. DOI:10.1016/j.mssp.2021.106296
- Sun, H., Zhang, J., Gan, X., Yu, L., Yuan, H., Shang, M., ... & Han, L. (2019). Pb-reduced CsPb_{0.9}Zn_{0.1}I₂Br thin films for efficient perovskite solar cells. *Advanced Energy Materials*, 9(25), 1900896. DOI:10.1002/aenm.201900896
- Wang, K.; Lin, Z.; Ma, J.; Liu, Z.; Zhou, L.; Du, J.; Chen, D.; Zhang, C.; Chang, J.; Hao, Y., High-performance simple-structured planar heterojunction perovskite solar cells achieved by precursor optimization. *ACS Omega*, 2017, 2(9), 6250-6258. DOI:10.1021/acsomega.7b01047
- Wang, L., Song, Q., Pei, F., Chen, Y., Dou, J., Wang, H., ... & Chen, Q. (2022). Strain modulation for light-stable n-i-p perovskite/silicon tandem solar cells. *Advanced Materials*, 34(26), 2201315. DOI:10.1002/adma.202201315
- Wang, Z., Xu, T., Li, N., Liu, Y., Li, K., Fan, Z., ... & Xiang, W. (2024). Interfacial engineering with trivalent cations for efficient and stable inverted inorganic perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 17(19), 7271-7280. DOI:10.1039/D4EE02486A
- Williamson, G. K., & Hall, W. H. (1953). X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. *Acta Metallurgica*, 1(1), 22-31.
- Xiang, W., & Tress, W. (2019). Review on recent progress of all-inorganic metal halide perovskites and solar cells. *Advanced Materials*, 31(44), 1902851. DOI:10.1002/adma.201902851
- Yan, L., Xue, Q., Liu, M., Zhu, Z., Tian, J., Li, Z., ... & Cao, Y. (2018). Interface engineering for all-inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells with efficiency over

14%. *Advanced Materials*, 30(33), 1802509. DOI:10.1002/adma.201802509

Yang, F., Hirotani, D., Kapil, G., Kamarudin, M. A., Ng, C. H., Zhang, Y., ... & Hayase, S. (2018). All-Inorganic CsPb_{1-x}Ge_xI₂Br Perovskite with Enhanced Phase Stability and Photovoltaic Performance. *Angewandte Chemie*, 130(39), 12927-12931. DOI:10.1002/ange.201805922

Yuan, S., Qian, F., Yang, S., Cai, Y., Wang, Q., Sun, J., ... & Liu, S. (2019). NbF₅: a novel α -phase stabilizer for FA-based perovskite solar cells with high efficiency. *Advanced Functional Materials*, 29(47), 1807850. DOI:10.1002/adfm.201807850

Zarazua, I.; Bisquert, J.; Garcia-Belmonte, G. (2016). Light-induced space-charge accumulation zone as photovoltaic mechanism in perovskite solar cells. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2, 7(3), 525-528. DOI:10.1021/acs.jpcclett.5b02757

Zhang, J.; Bai, D.; Jin, Z.; Bian, H.; Wang, K.; Sun, J.; Wang, Q.; Liu, S. (2018). 3D–2D–0D Interface Profiling for Record Efficiency All-Inorganic CsPbBrI₂ Perovskite Solar Cells with Superior Stability. *Advanced Energy Materials*, 8(15), 1703246. DOI:10.1002/aenm.201703246

Zhang, M., Li, Z., Gong, Z., Li, Z., & Zhang, C. (2023). Perspectives on the mechanical robustness of flexible perovskite solar cells. *Energy Advances*, 2(3), 355-364. DOI:10.1002/eng2.12087

Zhao, Y., Yavuz, I., Wang, M., Weber, M. H., Xu, M., Lee, J. H., ... & Yang, Y. (2022). Suppressing ion migration in metal halide perovskite via interstitial doping with a trace amount of multivalent cations. *Nature Materials*, 21(12), 1396-1402. DOI:10.1038/s41563-022-01187-1

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ebubekir CAMIZCI

Öğrenim Durumu:

Lise : 2016, Sistem Temel Lisesi

Lisans : 2021, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği (İngilizce)

Yüksek lisans : 2025, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- 2021-2025 yılları arasında Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesinde Nano Teknoloji ve AR-GE Laboratuvarları'nda perovskit güneş hücresi üzerine çalıştı.
- 2022 yılında Karaman NEFAMAK Gıda Mak. San. LTD. ŞTİ.'de Dış Ticaret Mühendisi olarak çalıştı.
- 2022-2023 yılları arasında Saygın Soğutma LTD. ŞTİ.'de AR-GE Mühendisi olarak çalıştı.

Tezden Üretilmiş Proje ve Bütçesi:

- Camızcı E., Sonmezoglu S. 2022. Nadir Toprak Elementleri Katkılı CsPbI2Br İnorganik Perovskitlerin Sentezi ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi, *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi - Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü*, 11-M-21.

Yüksek Lisans / Doktora Tezinden Üretilen Yayınlar, Sunumlar ve Patentler:

- Camızcı E., Sonmezoglu S. 2024. Enhancing Stability of Inorganic Perovskite Solar Cells by Lanthanides-based B-Site Cation. 14. *ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK, MİMARLIK VE TASARIM KONGRESİ*, 28-29 Aralık, 2024 İstanbul, TÜRKİYE.