

## Perovskit Güneş Hücrelerinde Li-TFSI Katkılı TiO<sub>2</sub> Elektron Transfer Tabakasının Optimizasyonu

**Makale Bilgisi / Article Info**  
Alındı/Received: 18.12.2023  
Kabul/Accepted: 22.06.2024  
Yayımlandı/Published: 20.08.2024

### Optimization of Li-TFSI Doped TiO<sub>2</sub> Electron Transfer Layer in Perovskite Solar Cells

Muhittin UNAL<sup>1</sup>  Seckin AKIN<sup>1,2</sup>  Bekir BAYNAL<sup>3</sup>  Murat EBİC<sup>1,4,\*</sup> 

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, İleri Malzemeler ve Fotovoltaik Laboratuvarı (LAMPS), Konya, Türkiye.

<sup>2</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye.

<sup>3</sup> Karaman İl Millî Eğitim Müdürlüğü, Karaman, Türkiye

<sup>4</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karaman, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Perovskit güneş hücrelerinin (PGH) performansını arttırmak için optimize edilmiş elektron transfer tabakaları (ETT) kritik bir rol oynamaktadır. ETT'nin optoelektronik özellikleri, bant enerjisi ve tuzak yoğunluğu, PGH'nin performansını belirleyici bir şekilde etkilemektedir. Ancak, genellikle PGH'lerinde kullanılan titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ETT'nin düşük elektron hareketliliği iyileştirilmesi gereken bir sorundur. Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (x: 0, 5, 10, 15 mg/ml) lityum bis(triflorometansülfonil)imid (Li-TFSI) tuzu döndürerek-kaplama tekniği ile TiO<sub>2</sub> tabanlı ETT'ye katkılanmıştır. TiO<sub>2</sub>-Li-TFSI katkısının morfolojik, yapısal ve optik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. FTO/c-TiO<sub>2</sub>/mp-TiO<sub>2</sub>-Li-TFSI/CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br/spiro-OMeTAD/Ag hücre mimarisi kullanılarak elde edilen Li-TFSI katkılı PGH'nin fotovoltaik ve optoelektronik özellikleri katkısız hücreler ile karşılaştırılmıştır. Li-TFSI katkısı, hücrelerdeki elektron transferini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Saf PGH'de %18,16'lık bir güç dönüşüm verimliliği (GDV) elde edilirken, 10 mg/ml Li-TFSI katkılı PGH'de %19,98'lik en yüksek GDV değeri elde edilmiştir. Bu çalışma, Li-TFSI katkısıyla TiO<sub>2</sub> ETT'nin optoelektronik özelliklerinin optimize edildiği ve yüksek verimli PGH'lerin geliştirilmesi için umut vadeden bir çalışma olarak değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Perovskit güneş hücreleri; Elektron transfer tabakası; TiO<sub>2</sub>; Katkılama; Li-TFSI,

#### Abstract

Optimized electron transfer layer (ETL) play a crucial role in achieving higher performance in perovskite solar cells (PSCs). The optoelectronic properties of ETL, such as band energy and trap density, significantly influence the performance of PSCs. However, the low electron mobility of commonly used titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) ETL in PSCs remains a challenge that needs improvement. In this study, lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (Li-TFSI) salt is added to TiO<sub>2</sub>-based ETL at different concentrations (x: 0, 5, 10, 15 mg/ml) by spin-coating technique. Photovoltaic and optoelectronic properties of Li-TFSI-modified PSCs were compared with bare PSCs using the FTO/c-TiO<sub>2</sub>/mp-TiO<sub>2</sub>-Li-TFSI/CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br/spiro-OMeTAD/Ag cell architecture. The TiO<sub>2</sub>-Li-TFSI modification shows a significant enhancement in the morphological, structural, and optical properties of the PSCs. The Li-TFSI contribution significantly improved the electron transfer. While bare PSC achieves a power conversion efficiency (PCE) of 18,16%, the 10 mg/ml Li-TFSI-modified PSCs reached the highest PCE of 19,98%. This study signifies a promising step towards the development and commercialization of highly efficient PSCs by optimizing the optoelectronic properties of TiO<sub>2</sub> ETL through Li-TFSI salt modification.

**Keywords:** Perovskite solar cells; Electron transfer layer; TiO<sub>2</sub>; Doping; Li-TFSI.

#### 1. Giriş

Organik-inorganik halojenür perovskit malzeme tabanlı perovskit güneş hücreleri (PGH'ler), on yıl gibi kısa bir sürede ulaştığı %26,1 güç dönüşüm verimliliği (GDV) ile olağanüstü bir gelişim sergileyerek umut verici fotovoltaik teknolojilerden biri haline gelmiştir (Min vd. 2021, Ozkaya vd. 2023, Chen vd. 2023). Bu değer, tek kristalli silikon (mc-Si) güneş hücrelerinin elde ettiği verim değerine yaklaşırsa da teorik olarak öngörülen Shockley-Queisser limitinden hala uzaktır (Wu vd. 2022, Akman vd. 2021). Hücrelerin GDV değerindeki ilerleme, kısa devre akım yoğunluğunun (J<sub>sc</sub>) bu teorik değere yaklaşması nedeniyle

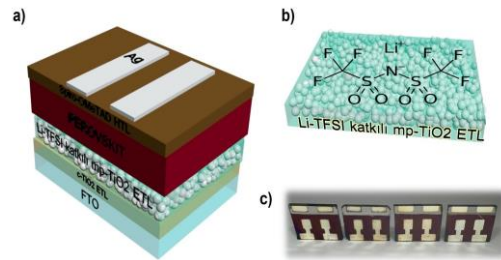
ağırlıklı olarak açık devre voltajı (V<sub>oc</sub>) ve dolun faktörü (FF) parametreleri tarafından belirlenmektedir (Zhao vd. 2018, Ye vd. 2019, Jiang vd. 2019). Yük taşıma ve ekstraksiyon süreçlerinde istenmeyen yük kayıplarına bağlı olarak perovskit/elektron transfer tabakası (ETT) arayüzünde gerçekleşen yük taşıyıcıların yeniden birleşmesi (rekombinasyon) olayı V<sub>oc</sub> ve FF parametrelerini düşüren olaylardan bir tanesidir. Bu bağlamda; mevcut sorunun çözümü konusunda yoğun ve ilerici çalışmalar rapor edilmektedir (Caprioglio vd. 2021, Zhang vd. 2021, Krishna vd. 2021, Chen vd. 2020). PGH'ler genellikle ETT, boşluk transfer tabakası (HTL), aktif

soğurucu perovskit tabakası ve metal kontaklar olmak üzere çeşitli tabakaların eklem oluşumundan meydana gelir (Ma vd. 2023). ETT ve perovskit tabakalar arasındaki arayüzey durumları, hücre performansı ve kararlılığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Kavan vd. 2014, İlyasov vd. 2015). Bu nedenle, ETT'nin optimize edilmesi, arayüzey durumlarının iyileştirilmesi ve perovskit soğurucu tabakanın enerji seviyeleriyle uyumlu yeni ETT malzemeleri geliştirilmesi, PGH performansını artırmak için önemlidir (Kruszyńska vd. 2022, Chavan vd. 2023, Gil vd. 2023). ETT hücre mimarisinde foton iletimi, yük çıkarma, elektron taşınması ve boşlukların engellenmesi gibi önemli işlevleri yerine getirir. Bu nedenle yüksek optik geçirgenlik, uygun enerji seviyesi hizalaması ve yüksek elektron hareketliliği ETT malzemeleri için en önemli parametrelerdir (Nagaraj vd. 2021, Valadi vd. 2021). Ayrıca, hücre mimarisinde ETT olarak kullanılan malzemelerin yüksek kararlılık sunması ve düşük maliyetli olması da beklenir (Akin vd. 2020). PGH'lerde bugüne kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>), kalay dioksit (SnO<sub>2</sub>), çinko oksit (ZnO) gibi inorganik ve fenil-C61-bütrik asit metilester (PCBM) gibi organik ETT malzemeleri yoğun bir şekilde kullanılmıştır (Ebiç 2023). TiO<sub>2</sub>, üstün özellikleri nedeniyle optoelektronik uygulamalarda en yaygın kullanılan inorganik ETT malzemelerinden biridir (Ebiç vd. 2022). Anataz formundaki TiO<sub>2</sub>, geniş bir bant aralığına (~3,2 eV), uygun iletkenlik bant (CB) enerjisine, iyi termal ve kimyasal kararlılığa sahip bir *n*-tipi yarı iletken olarak bilinir (Iraj vd. 2016). Bu özelliklerinden dolayı güneş hücreleri başta olmak üzere birçok optoelektronik uygulamada kullanılır. Ancak, TiO<sub>2</sub> ETT'nin elektron mobilitesinin düşük olması (0,1 - 1 cm<sup>2</sup>/V<sup>1</sup> s<sup>1</sup>), üretim sıcaklığının yüksek olması (~450 °C) ve uzun vadede hücrelerin kararlılığını zayıflatan yüksek fotokatalitik aktivite gibi belirgin dezavantajlara sahip olması, yüksek performanslı ve uzun dönem kararlı PGH'lerin elde edilmesini engellemektedir (Sadegh vd. 2016). TiO<sub>2</sub>'nin ultraviyole (UV) ışın ile aktive olan fotokatalitik özelliği ve düşük elektron hareketliliği gibi dezavantajlarından kurtulmak amacıyla bugüne kadar katkılama mühendisliği temelinde birçok katkı maddesi (Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Cr<sup>+3</sup>, Zn<sup>+2</sup>, Cu<sup>+2</sup>, Y<sup>+3</sup>) kullanılarak optoelektronik ve morfolojik özellikleri geliştirilmiştir (Teimouri vd. 2020).

Son yıllarda ise hidrofilik özelliğe sahip Li-TFSI organik tuzunun ETT malzemesine katılanmasının, ETT'nin optoelektronik özelliklerini iyileştirerek PGH performansında etkili olması sebebiyle yaygın olarak kullanıldığı dikkati çekmektedir (Patel vd. 2023, Liu vd. 2017, Giordano vd. 2016). Liu ve arkadaşları Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT'nin, optik özellikleri olumsuz etkilemeden elektron tuzak yoğunluğunu önemli ölçüde azaltabildiğini

göstermiştir. Perovskit filmdeki elektronların Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT ile katkısız TiO<sub>2</sub>'ye göre daha verimli bir şekilde ekstrakte edilebildiğini tespit etmiştir (Liu vd. 2017). Giordano ve arkadaşları Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> elektrotların elektronik tuzak durumlarını azaltarak, daha hızlı elektron taşınmasını sağlamış ve hücrenin GDV değerini ihmal edilebilir bir histerezis ile %17'den %19'a çıkararak üstün elektronik özellikler sergilediğini göstermiştir (Giordano vd. 2016).

Bu çalışmada ise, Li-TFSI tuzunun PGH mimarisindeki etkisini incelemek amacıyla gözenekli TiO<sub>2</sub> (mp-TiO<sub>2</sub>) ETT malzemesine farklı oranlarda (5, 10, 15 mg/ml) katkılama işlemi yapılarak hücre üretimleri gerçekleştirilmiştir. Li-TFSI katkılı mp-TiO<sub>2</sub> kullanılarak üretilen PGH'lerin fotovoltaiik parametrelerinin yanı sıra üretilen filmlerin morfolojik, optik ve yapısal özellikleri katkı oranının bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır.



**Şekil 1.** a) Hücre mimarisini ve b) Li-TFSI katkılama sürecinin şematik görüntüleri. c) Bu çalışma kapsamında üretilen hücrelere ait bir görüntü.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada üretilen hücre mimarisini ve Li-TFSI katkılama sürecinin şematik görünümü ile üretilen hücrelere ait görüntü Şekil 1'de sunulmuştur. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel süreçler aşağıda maddeler halinde detaylı olarak sunulmuştur.

### 2.1 LiTFSI Katkılı c-TiO<sub>2</sub> ve mp-TiO<sub>2</sub> ETT Filmlerin Hazırlanması

Hücre üretiminde kullanılan flor katkılı kalay oksit (FTO) altaşlar deterjanla temizlenmesinin ardından sırasıyla deiyonize su, izopropanol (IPA) ve etanol ile 15'şer dakika boyunca ultrasonik banyo içerisinde temizlenmiştir. Kurutulan altaşlar kaplanmadan önce 15 dakika boyunca ultraviyole- ozon (UV-O<sub>3</sub>) işlemine tabi tutulmuştur. Kompakt TiO<sub>2</sub> (c-TiO<sub>2</sub>) ETT filmleri elde etmek amacıyla susuz etanol içinde hazırlanan titanyum diizopropoksit bis(asetilasetonat) öncü çözeltisi, 450 °C'de sprey proliz yöntemiyle FTO altaşlar üzerine kaplanmıştır. Püskürtme işlemi sonrasında FTO altaşlar 450 °C'de 30 dakika tavlansak oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen c-TiO<sub>2</sub> filmler üzerine mp-TiO<sub>2</sub> ETT filmler etanol içinde seyreltilmiş TiO<sub>2</sub> pasta kullanılarak 20 sn ve 4000

dev/dk hızında döndürerek kaplama tekniği ile kaplanmıştır. Elde edilen mp-TiO<sub>2</sub> ETT tabakası 100 °C'de 10 dakika kurutulduktan sonra 450 °C'de 30 dakika tavlanaştır. ETT filmlere Li-TFSI katkılanma işlemi için Li-TFSI başlangıç malzemesi asetonitril içinde farklı konsantrasyonlarda çözülürülerek hazırlanmıştır. Bu çözeltiler 1,8 x 2,6 cm<sup>2</sup> boyutlarındaki FTO/c-TiO<sub>2</sub>/mp-TiO<sub>2</sub> filmler üzerine 3000 dev/dk dönme hızında döndürerek kaplama tekniği ile kaplanmıştır. Li-TFSI katkılı filmler 450 °C'de 30 dakika süreyle ikinci bir tavlama işlemine maruz bırakılmıştır. 150 °C'ye kadar soğutulan filmler perovskit çözeltilisinin kaplanması için azot atmosferli kapalı bir ortam (glovebox) içerisine transfer edilmiştir.

### 2.2 Perovskit Tabakasının Hazırlanması

CsI, MABr, PbBr<sub>2</sub>, FAI ve Pbl<sub>2</sub> perovskit öncülleri stokiometrik oranlarda hazırlanarak, 4:1 hacim oranına sahip 1 ml N,N-dimetilformamid (DMF) ve dimetilsülfoksit (DMSO) çözücülerinde çözülürülmüştür. Elde edilen saf ve Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT filmler üzerine CsFAMAPbl<sub>2</sub>Br kompozisyonundaki üçlü katyon perovskit çözeltisi tek adımda döndürerek kaplama işlemiyle 1000 dev/dk dönme hızında 10 saniye ve 4000 dev/dk dönme hızında 30 saniye olacak şekilde kaplanmıştır. Dönme işleminin bitimine son 10 saniye kala 150 µl anti-solvent (klorobenzen) damlatılarak kristallenme süreci kontrol edilmiştir. Kaplama işlemi tamamlanan filmler 100 °C'de 45 dakika boyunca tavlama işlemi gerçekleştirilerek siyah fazlı perovskit filmler elde edilmiştir.

### 2.3 HTL ve Ag Tabakalarının Hazırlanması

Oda sıcaklığına soğutulan perovskit filmler üzerine büyütülecek HTL film için Spiro-OMeTAD (2,2',7,7'-tetrakis (N,N-di-p-metoksifenil-amin)9,9'-spirobiuoren) başlangıç malzemesi 1 mL klorobenzen içerisinde Li-TFSI (1 mL asetonitril içinde 520 mg Li-TFSI stok çözeltisi) ve 4-tert-Butilpiridin (TBP) katkı maddelerinin katkılanmasıyla hazırlanmıştır. Elde edilen Spiro-OMeTAD çözeltisi 20 saniye sürede ve 4000 dev/dk hız ile döndürerek kaplama tekniğiyle perovskit tabakasının üzerine kaplanmıştır. En son üst kontak malzemesi olarak gümüş (Ag) karşıt elektrot malzemesi yüksek vakum altında termal buharlaştırma yoluyla Spiro-OMeTAD HTL üzerine ~100 nm kalınlıkta kaplanarak PGH üretimi tamamlanmıştır.

### 2.4 Karakterizasyon Çalışmaları

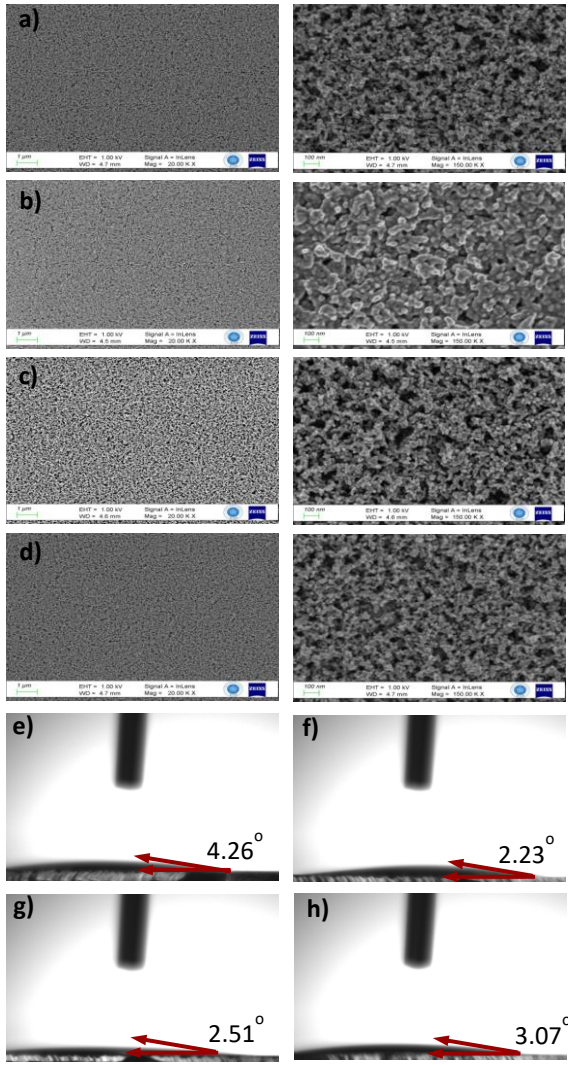
UV-vis-NIR spektrometresi (LAMBDA 1050, Perkin Elmer) ile saf ve Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT ve filmlerin ve CsFAMAPbl<sub>2</sub>Br perovskit filmlerin optik geçirgenlik ve soğurum spektrumları kaydedilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) (Bruker D8 ADVANCE) sistemi ile perovskit filmlerin

kristal özellikleri incelenmiştir. İnce filmlerin yüzeyleri alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) (S5500, Hitachi) ile analiz edilmiştir. Damla şekli analizörü (DSA100, KRÜSS) kullanılarak temas açısı ölçümü ile ETT filmlerin yüzey hidrofiliği değerlendirilmiştir. Hücrelere ait akım yoğunluğu-voltaj (J-V) karakteristikleri ABET Sun3000 güneş simülatörü ile 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddeti altında Keithley 2400 sourcemeter kullanılarak ölçülmüştür.

### 3. Bulgular

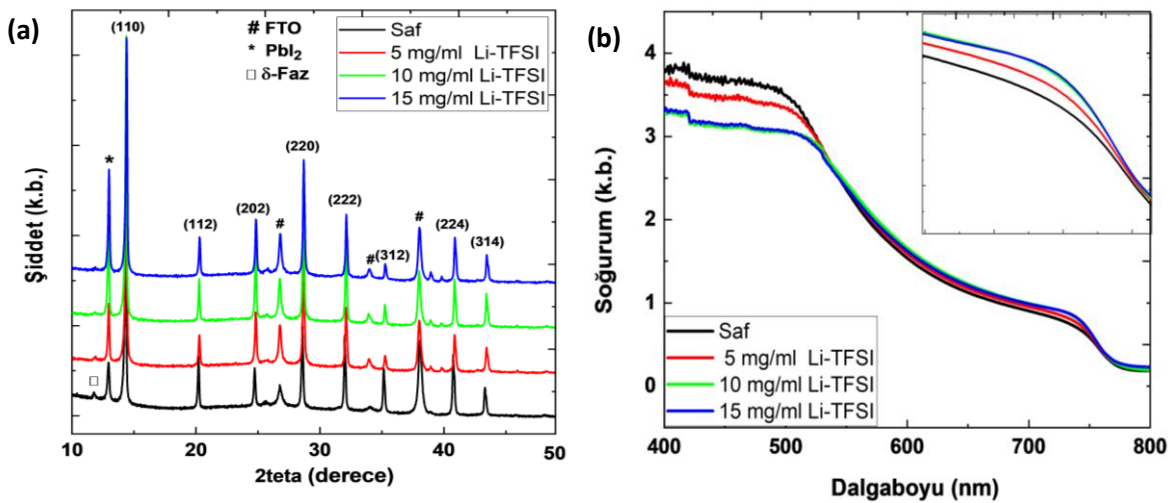
Üretilen saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmlerin yüzey morfolojileri SEM analizi ile incelenmiştir (Şekil 2 (a-d)). Farklı büyütme oranlarında alınan SEM görüntülerinden ETT filmlerin gözenekli yapıda olması nedeniyle belirgin bir farklılık görülmemektedir. Ayrıca, filmlerin yüzey görüntüsünde akım kaçığına sebep olabilecek iğne deliklerinin ve/veya aglomerasyonların bulunmadığı da görülmektedir. ETT filmlerin ıslanabilirlik davranışları üzerine büyütülecek perovskit filmlerin büyüme kinetikleri açısından önemli bir rol oynamaktadır. Ortam koşullarında gerçekleştirilen temas açısı ölçümleri Şekil 2 (e-h)'de sunulmuştur. Saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı ETT filmlerin temas açısı görüntüleri incelendiğinde saf TiO<sub>2</sub> ETT filmin 4,26° açı ile en yüksek değeri verdiği görülürken Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı ETT filmlerde bu değer 2°-3° arasında değişmektedir. Bu durum Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı ETT filmlerin yüzeyinin kısmen daha iyi hidrofilik davranışa sahip olduğunu göstermekte olup, perovskit tabakanın ETT yüzeyinde daha iyi bir ıslanabilirlik sergileme potansiyeli olduğu anlamına gelmektedir. Bir diğer ifade ile üçlü katyon CsFAMAPbl<sub>2</sub>Br perovskit filmlerin Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT yüzeylerine homojen olarak büyütülebilmesi için oldukça elverişli olduğu tespit edilmiştir.

Yüksek faz saflığı ve kristalliğin yanı sıra daha düşük tane sınırı yoğunluğu hücre performansını ve kararlılığını önemli ölçüde artırmaktadır (Akman vd. 2021, Sadegh vd. 2023). Li-TFSI katkısının kristal yapıya etkisini tespit etmek amacıyla saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmler üzerine kaplanan CsFAMAPbl<sub>2</sub>Br perovskit filmlere ait kristal özellikler XRD analizi ile belirlenmiştir. Şekil 3 (a)'da görüleceği üzere 2θ: 11,8°'de saf TiO<sub>2</sub> ETT /perovskit filmde baskın olarak görülen ve istenmeyen sarı faz olarak bilinen delta (δ) fazına ait pikin artan Li-TFSI katkısı ile azalarak 10 mg/ml değerinden sonra kaybolduğu görülmektedir. Bu durum δ fazının yok olmasıyla hem hücre performansının iyileşeceği hem de daha kararlı yapıların elde edileceğini işaret etmektedir. 2θ: 12,8° değerinde ise perovskit filmin kimyasal kompozisyonundan kaynaklanan Pbl<sub>2</sub> fazına ait pik görülmektedir. Artan Li-TFSI katkısı ile baskın hale gelen bu pikin hücre verimine olumlu katkı sunduğu literatürden bilinmektedir (Ma vd. 2022).



**Şekil 2.** a) Saf, b) 5 mg/ml, c) 10 mg/ml, d) 15 mg/ml konsantrasyona sahip Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT filmlerin farklı büyütmelerdeki yüzey SEM görüntüleri. e) Saf, f) 5 mg/ml, g) 10 mg/ml, h) 15 mg/ml konsantrasyona sahip Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT filmlerin temas açısı görüntüleri.

Tüm filmlerin CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br perovskit fazı ile eşleşen literatür ile uyumlu olarak 2 $\theta$ : 14,6°, 20,3°, 24,8°, 28,7°, 32,1°, 35,2°, 40,9° ve 43,4° değerlerinde sırasıyla (110), (112), (202), (220), (222), (312), (224) ve (314) yönelimlerinde kırınım pikleri verdiği görülmektedir (Bu vd. 2017, Liv vd. 2018, Tien vd. 2023). Ayrıca, kırınım desenlerinde 2 $\theta$ : 26,8°, 34,2° ve 37,9° de görülen piklerin ise FTO alttaş kaynaklı olduğu bilinmektedir (Cid vd. 2013, Xia vd. 2016). Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> filmler saf TiO<sub>2</sub> filmler ile karşılaştırıldığında daha iyi bir kristal kaliteye işaret eden daha şiddetli kırınım pikleri sunduğu görülmektedir. Saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmlerin üzerine kaplanan CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br perovskit filmlerin optik özelliklerini incelemek amacıyla 400-800 nm dalga boyu aralığında soğurum spektrumları alınmış ve Şekil 3 (b)'de sunulmuştur. Tüm perovskit filmlerin yaklaşık 770 nm dalga boyunda ilgili perovskit kompozisyonu ile uyumlu olacak şekilde karakteristik soğurum kenarı verdiği görülmektedir. Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmler üzerine büyütülen perovskit filmlerin saf TiO<sub>2</sub> ETT üzerine büyütülen perovskit filme kıyasla uzun dalga boyu değerlerinde (>500 nm) kısmen daha yüksek bir soğurum şiddeti sunduğu tespit edilmiştir. Bu durum Li-TFSI katkısının perovskit filmin büyüme kinetiğini değiştirmesi ve daha iyi bir kristalografik kalite sunması ile ilişkilendirilebilir. Bu sonuç, Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmler üzerine büyütülen perovskit filmlerin hücre mimarisinde önemli bir avantaj sunabileceğini göstermektedir, çünkü güneş spektrumunun en etkin olduğu bölgede daha yüksek bir soğurum sağlamaktadır. Diğer taraftan, <500 nm dalga boyu altında Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmler üzerine büyütülen perovskit filmlerin saf film ile kıyaslandığında daha düşük soğurum şiddeti sergilediği görülmektedir.



**Şekil 3.** Saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmler üzerine büyütülen CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br perovskit filmlerin a) XRD desenleri ve b) soğurum spektrumları.

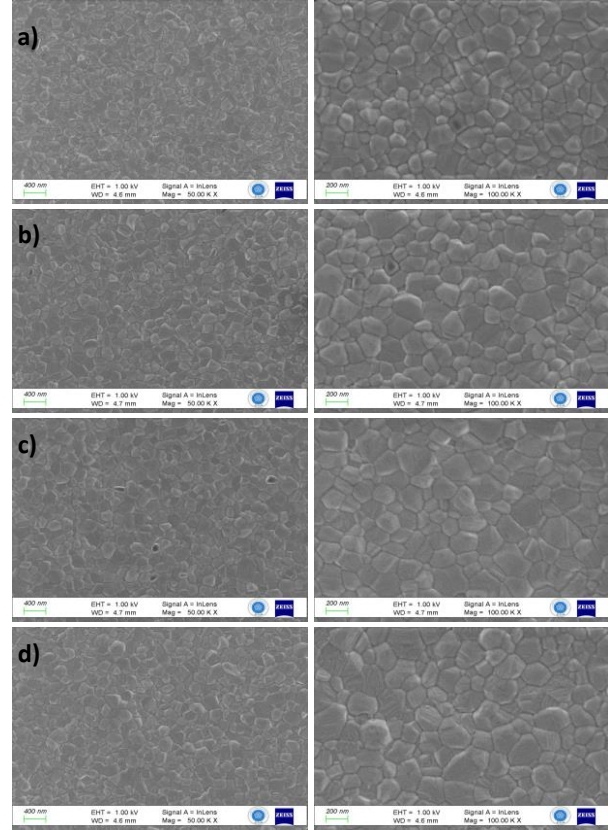


Her ne kadar 400-500 nm aralığı görünür bölgede kalsa da <400 nm altındaki yüksek enerjili UV bölge perovskit filmlerin bozunumunu tetiklemesi sebebiyle perovskit mimarisinde soğurumun tercih edilmediği bölge olarak bilinmektedir (Han vd. 2020, Zhao vd. 2024). Bu sebeple hedef filmlerin kontrol filmlere kıyasla daha iyi bir UV ışık kararlılığı sunma potansiyeli olduğu da söylenebilir. Sonuç olarak uzun dalga boyu değerlerinde soğurumun artması önemli bir kazanım olsa da düşük dalga boyu değerlerinde bir miktar düşüş görülmektedir. Bu durum, hücreye ait fotovoltaiik parametrelerde (özellikle J<sub>sc</sub>) önemli bir değişim beklenmediği şeklinde yorumlanabilir.

CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br perovskit soğurucu tabakanın saf TiO<sub>2</sub> ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT filmlerin yüzeyindeki büyüme kinetiğini anlamak amacıyla ilgili filmlere ait farklı büyütme oranlarında alınan SEM görüntüleri Şekil 4'te sunulmuştur. Yüzey SEM görüntülerinden görüleceği üzere CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br soğurucu tabakası saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> tabakaları üzerine homojen bir şekilde kaplanmıştır. Şekil 4 (a)'da verilen saf perovskit filme ait SEM görüntüsünün akım kaçaklarına sebep olacak şekilde derin tane sınırları içerdiği görülürken; Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT üzerine büyütülen perovskit filmlerin daha sıkı bir morfolojide büyüdüğü söylenebilir. Ayrıca Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT üzerine büyütülen perovskit filmlerin tane boyutunun kontrol filmine kıyasla kısmen daha büyük olduğu görülmektedir. Filmlere ait tüm analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br perovskit filmlerin Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT yüzeyinde daha iyi optik, morfolojik ve yapısal özellikler sunacak şekilde bir büyüme sergilediği sonucuna varılmaktadır.

FTO/c-TiO<sub>2</sub>/mp-TiO<sub>2</sub>/CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br/Spiro-OMeTAD/Ag hücre mimarisinde üretilen PGH'lerin fotovoltaiik özellikleri 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında test edilmiştir. Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkısının hücre performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı ETT filmler üzerine hazırlanan hücrelerin fotovoltaiik performansı Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5(a)'da sunulan J-V karakteristiklerinden elde edilen saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı hücrelerin fotovoltaiik performans değerleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Saf TiO<sub>2</sub> ETT ile üretilen hücreden 23,98 mA.cm<sup>-2</sup> J<sub>sc</sub> değeri ile %18,16 GDV elde edilirken, en yüksek verim değerine (%19,98) 24,13 mA.cm<sup>-2</sup> J<sub>sc</sub> değeri ile 10 mg/ml konsantrasyona sahip Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> tabanlı hücre ile ulaşılmıştır. Hücre performansının artan Li-TFSI katkısı ile belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Li-TFSI katkısı ile hücrelerin açık V<sub>oc</sub> ve FF parametrelerinde de belirgin bir artış gözlenmiştir. Saf hücrede V<sub>oc</sub> değeri 1,03 V iken Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı hücrelerde bu değer 1,07 V

değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, saf TiO<sub>2</sub> ETT tabanlı hücre %73,75 FF değeri sunarken 10 mg/ml Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT tabanlı hücre için bu değer %78,69 olarak elde edilmiştir. Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> katkılı PGH'nin performansındaki bu artış Li<sup>+</sup> ve TFSI<sup>-</sup> iyonlarının ETT/perovskit arayüzeyinde ve perovskit filmler üzerinde etkili bir şekilde kusurları pasifleştirerek yük transferini iyileştirmesine atfedilebilir.



Şekil 4. a) Saf, b) 5 mg/ml, c) 10 mg/ml ve d) 15 mg/ml konsantrasyona sahip Li-TFSI katkılı ETT filmler üzerine büyütülen perovskit filmlerin farklı büyütmelerdeki yüzey SEM görüntüleri.

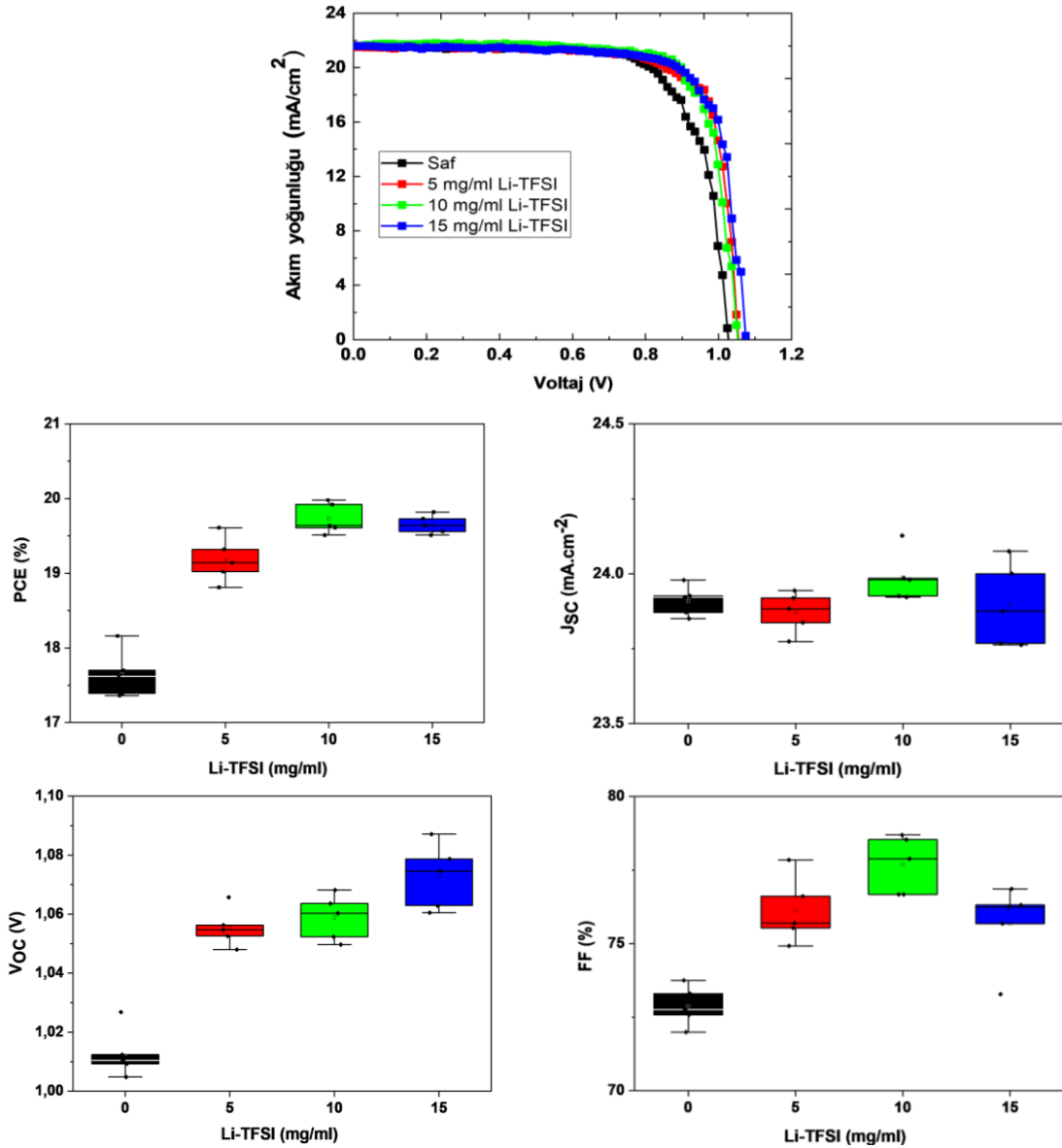
Çizelge 1. Saf ve farklı konsantrasyonlarda Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT tabanlı hücrelere ait fotovoltaiik parametreler.

ETT	J <sub>sc</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	GDV (%)
Saf TiO <sub>2</sub>	23,98±	1,03±	73,75±	18,2±
	0,05	0,01	0,68	0,3
5 mg/ml Li-TFSI	23,88±	1,05±	77,84±	19,6±
	0,07	0,01	1,14	0,3
10 mg/ml Li-TFSI	24,13±	1,05±	78,69±	20,0±
	0,08	0,01	0,98	0,2
15 mg/ml Li-TFSI	24,00±	1,07±	76,86±	19,8±
	0,14	0,01	1,40	0,1

Son olarak elde edilen fotovoltaiik performans değerlerinin tekrarlanabilirliğini göstermek amacıyla her oran için en az 4 hücre üretilerek fotovoltaiik parametreleri analiz edilmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı katkı maddeleri kullanılarak hazırlanan TiO<sub>2</sub> ETT tabanlı hücelere ait fotovoltaik performans parametreleri (2019-2023 yılları arasında rapor edilen çalışmalar).

Katkı	J <sub>sc</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	GDV (%)	Ref.
B	23,71	1,10	78,6	20,5	Shi vd., 2019
Li-TFSI	24,13	1,05	78,7	20,0	Bu çalışmada
Ta	22,45	1,13	77,0	19,6	Chen vd., 2022
Ce	22,26	1,11	78,1	19,3	Jin vd., 2022
Ga	21,88	1,14	77,0	19,2	Mali vd., 2019
W	24,24	1,12	69,2	18,9	Wang vd., 2021
Re	23,15	0,93	50,0	18,6	Afzali vd., 2020
Ag	21,70	1,00	75,4	16,5	Chen vd., 2019
Sn	20,80	1,07	74,0	16,4	Su vd., 2020
Co	24,08	1,03	65,0	15,8	Nguyen vd., 2020
Al	24,06	0,97	67,0	15,3	Moshfeghi vd., 2022
Zr	23,66	0,92	56,8	12,4	Qureshi vd., 2021
Er	18,22	0,96	66,0	11,5	Venkatachalam vd., 2019
Nd	7,51	1,60	83,5	10,1	Gao vd., 2023
Ca	19,28	0,83	61,2	9,8	Arshad vd., 2022
Mg	16,02	0,98	59,0	9,4	Ghazanfarpour vd., 2023
Nb	16,98	0,78	54,0	7,2	Bidaki vd., 2022
S	13,90	1,00	43,2	6,0	Abd Mutalib vd., 2022



**Şekil 5.** Saf ve Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT tabanlı hücelere ait a) J-V karakteristikleri. Her oran için elde edilen parametrelerinin tekrarlanabilirliğini gösteren histogram verileri: b) GDV, c) J<sub>sc</sub>, d) V<sub>oc</sub>, e) FF değerleri.

Şekil 5 (b-e)'de verilen histogram verilerinden tüm hücrelerin iyi bir tekrarlanabilirlik sunduğu ve parametrelerdeki değişimin en iyi performans sunan hücreler ile aynı trendi sergilediği görülmektedir. Bu durum yüksek güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik sunan perovskit hücrelerin büyük ölçekli üretimi ve ticarileşme potansiyeli açısından ümit vericidir.

Çizelge 2'de farklı katkı maddeleri katkılanarak hazırlanan TiO<sub>2</sub> ETT tabanlı hücrelere ait fotovoltaj performans parametreleri sunulmuştur. Li-TFSI:TiO<sub>2</sub> ETT ile %19,98'lik bir GDV değeri elde edilen bu çalışmanın literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında oldukça iyi bir performans sergilediği değerlendirilmektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, Li-TFSI katkısının mp-TiO<sub>2</sub> ETT filmlerin optik, yapısal ve morfolojik özelliklerinin yanı sıra üretilen hücrelerin fotovoltaj performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Li-TFSI katkılı TiO<sub>2</sub> ETT filmlerde taşıyıcıların rekombinasyonunun azaldığı ve yük transferinin iyileştiği elde edilen fotovoltaj sonuçlardan gözlemlenmiştir. Saf TiO<sub>2</sub> ETT ile üretilen CsFAMAPbI<sub>2</sub>Br hücre mimarisinde %18,16'lık bir GDV elde edilirken, 10 mg/ml Li-TFSI katkılı hücrede %19,98'lik bir GDV değerine ulaşılmıştır. Bu çalışmanın, katkılama mühendisliği ile optimize edilen ETT'lerin daha yüksek performans sunan PGH'lerin geliştirilmesine yönelik ilerici çalışmaları teşvik edebileceği öngörülmektedir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak  
Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak  
Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak  
Yazar 4: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### 5. Kaynaklar

Abd Mutalib, M.; Ahmad Ludin, N.; Su'ait, M.S.; Davies, M.; Sepeai, S.; Mat Teridi, M.A.; Mohamad Noh, M.F.; Ibrahim, M.A., 2022. Performance-enhancing sulfur-doped TiO<sub>2</sub> photoanodes for perovskite solar cells. *Applied Sciences*, **12(1)**, 429. <https://doi.org/10.3390/app12010429>

Afzali, M., Mostafavi, A., & Shamspur, T., 2020. Performance enhancement of perovskite solar cells by rhenium doping in nano-TiO<sub>2</sub> compact layer. *Organic Electronics*, **86**, 105907. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105907>

Akin, S., Arora, N., Zakeeruddin, S. M., Grätzel, M., Friend, R. H., & Dar, M. I., 2020. New strategies for defect passivation in high-efficiency perovskite solar cells. *Advanced Energy Materials*, **10(13)**, 1903090. <https://doi.org/10.1002/aenm.201903090>

Akman, E., & Akin, S., 2021. Poly (N, N'-bis-4-butylphenyl-N, N'-bisphenyl) benzidine-based interfacial passivation strategy promoting efficiency and operational stability of perovskite solar cells in regular architecture. *Advanced Materials*, **33(2)**, 2006087. <https://doi.org/10.1002/adma.202006087>

Akman, E., Shalan, A. E., Sadegh, F., Akin, S., 2021. Moisture-resistant FAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cell with 22.25% power conversion efficiency through pentafluorobenzyl phosphonic acid passivation. *Chemistry Sustainability Energy Materials*, **14(4)**, 1176-1183. <https://doi.org/10.1002/cssc.202002707>

Arshad, Z., Shakir, S., Khoja, A. H., Javed, A. H., Anwar, M., Rehman, A., Farrukh, S., 2022. Performance analysis of calcium-doped titania (TiO<sub>2</sub>) as an effective electron transport layer (ETL) for perovskite solar cells. *Energies*, **15(4)**, 1408. <https://doi.org/10.3390/en15041408>

Bu, T., Liu, X., Zhou, Y., Yi, J., Huang, X., Luo, L., Xiao, J., Ku, Z., Peng, Y., Huang, F., Zhong, J., 2017. A novel quadruple-cation absorber for universal hysteresis elimination for high efficiency and stable perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, **10(12)**, 2509-2515. <https://doi.org/10.1039/C7EE02634J>

Bidaki, A. Z., Abdizadeh, H., Pourshaban, E., Shadabroo, M. S., & Golobostanfard, M. R., 2022. Comparing the planar and porous Nb-doped TiO<sub>2</sub> photoanode of triple cation perovskite solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **138**, 106259. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106259>

Caprioglio, P., Cruz, D. S., Caicedo-Dávila, S., Zu, F., Sutanto, A. A., Peña-Camargo, F., Neher, D., 2021. Bi-functional interfaces by poly (ionic liquid) treatment in efficient pin and nip perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, **14(8)**, 4508-4522. <https://doi.org/10.1039/D1EE00869B>

Chavan, R. D., Bończak, B., Kruszyńska, J., Mahapatra, A., Ans, M., Nawrocki, J., Prochowicz, D., 2023. Molecular engineering of azahomofullerene-based electron transporting materials for efficient and stable perovskite solar cells. *Chemistry of Materials*, **35(19)**, 8309-8320. <https://doi.org/10.1002/aenm.201903090>

- Chen, S. H., Chan, S. H., Lin, Y. T., & Wu, M. C., 2019. Enhanced power conversion efficiency of perovskite solar cells based on mesoscopic Ag-doped TiO<sub>2</sub> electron transport layer. *Applied Surface Science*, **469**, 18-26.  
<http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.256>
- Chen, H., Liu, T., Zhou, P., Li, S., Ren, J., He, H., Guo, S., 2020. Efficient bifacial passivation with crosslinked thioctic acid for high-performance methylammonium lead iodide perovskite solar cells. *Advanced Materials*, **32(6)**, 1905661.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201905661>
- Chen, K. T., Hsu, C. H., Jiang, S. C., Liang, L. S., Gao, P., Qiu, Y., Lien, S. Y., 2022. Effect of annealing temperature on tantalum-doped TiO<sub>2</sub> as electron transport layer in perovskite solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **69(3)**, 1149-1154.  
<https://doi.org/10.1109/TED.2022.3142652>
- Chen, L., Li, C., Xian, Y., Fu, S., Abudulimu, A., Li, D. B., Yan, Y., 2023. Incorporating potassium citrate to improve the performance of tin-lead perovskite solar cells. *Advanced Energy Materials*, **13(32)**, 2301218.  
<http://doi.org/10.1002/aenm.202301218>
- Cid, C. P., Spada, E. R., & Sartorelli, M. L., 2013. Effect of the cathodic polarization on structural and morphological properties of FTO and ITO thin films. *Applied Surface Science*, **273**, 603-606.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.085>
- Deng, X., Wang, Y., Chen, Y., Cui, Z., & Shi, C., 2019. Yttrium-doped TiO<sub>2</sub> compact layers for efficient perovskite solar cells. *Journal of Solid State Chemistry*, **275**, 206-209.  
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.04.022>
- Ebiç, M., 2023. Perovskite güneş hücreleri için EMIMBF<sub>4</sub> iyonik sıvı katkılı SnO<sub>2</sub> elektron transfer tabakasının düşük sıcaklıkta üretimi ve optimizasyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*, **13 (3)**, 2130-2142.  
<https://doi.org/10.21597/jist.1273053>
- Ebiç, M., Akar, Ş., Akman, E., Özel, F., Akin, S., 2022. SnO<sub>2</sub> elektron transfer tabakasının slot-die tekniği ile üretimi ve optimizasyonu. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, **6 (1)**, 170-182.  
<https://doi.org/10.46460/ijiea.1086169>
- Fuyuki, T., & Matsunami, H., 1986. Electronic properties of the interface between Si and TiO<sub>2</sub> deposited at very low temperatures. *Japanese Journal of Applied Physics*, **25(9R)**, 1288.  
<https://doi.org/10.1143/JJAP.25.1288>
- Gao, T., Sui, H., Zhu, J., Chen, H., Tang, Q., & He, B., 2023. Enhanced electron extraction using neodymium ions doped TiO<sub>2</sub> for all-inorganic CsPbBr<sub>3</sub> perovskite solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, **965**, 171496.  
<http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171496>
- Ghazanfarpour, S., and Dehaj, M. S., 2023. Improvement of the photovoltaic performance of perovskite solar cells by modification of electron transport layer using Mg-doped TiO<sub>2</sub>, Cs<sub>2</sub>Co<sub>3</sub>, and bilayer Mg-doped TiO<sub>2</sub>/Cs<sub>2</sub>Co<sub>3</sub>. *Optical Materials*, **144**, 114312.  
<http://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.017>
- Gil, B., Yun, A. J., Lim, J., Cho, J., Kim, B., Ryu, S., Park, B., 2023. Design of SnO<sub>2</sub> electron transport layer in perovskite solar cells to achieve 2000 h stability under 1 sun illumination and 85°C. *Advanced Materials Interfaces*, **10(11)**, 2202148.  
<https://doi.org/10.1002/admi.202202148>
- Giordano, F., Abate, A., Correa Baena, J.P., Saliba, M., Matsui, T., Im, S.H., et al., 2016. Enhanced electronic properties in mesoporous TiO<sub>2</sub> via lithium doping for high-efficiency perovskite solar cells. *Nature Communications*. **7**, 10379.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms10379>
- Han, C., Zhu, X., Martin, J. S., Lin, Y., Spears, S., & Yan, Y., 2020. Recent progress in engineering metal halide perovskites for efficient visible-light-driven photocatalysis. *Chemistry Sustainability Energy Materials*, **13(16)**, 4005-4025.  
<https://doi.org/10.1002/cssc.202000953>
- Hui, W., Yang, Y., Xu, Q., Gu, H., Feng, S., Su, Z., Zhang, M., Wang, J., Li, X., Fang, J., Xia, F., Huang, W., 2020. Red-carbon-quantum-dot-doped SnO<sub>2</sub> composite with enhanced electron mobility for efficient and stable perovskite solar cells. *Advanced Materials*, **32(4)**, 1906374.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201906374>
- Ilyassov, B., Ibrayev, N., & Nuraje, N., 2015. Hierarchically assembled nanostructures and their photovoltaic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **40**, 885-889.  
<http://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.087>
- Iraj, M., Kolahdouz, M., Asl-Soleimani, E., Esmaeili, E., and Kolahdouz, Z., 2016. TiO<sub>2</sub> nanotube formation by Ti film anodization and their transport properties for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **27**, 6496-6501.  
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-4591-5>
- Jiang, Q., Zhao, Y., Zhang, X., Yang, X., Chen, Y., Chu, Z., Ye, Q., Li, X., Yin, Z., You, J., 2019. Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells. *Nature Photonics*, **13(7)**, 500.  
<https://doi.org/10.1038/s41566-019-0398-2>
- Jin, J., Li, H., Bi, W., Chen, C., Zhang, B., Xu, L., Biao, Dong., Song, H., Dai, Q., 2020. Efficient and stable perovskite solar cells through e-beam preparation of cerium doped TiO<sub>2</sub> electron transport layer, ultraviolet conversion layer CsPbBr<sub>3</sub> and the encapsulation layer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Solar Energy*, **198**, 187-193.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.048>



- Kavan, L., Tétreault, N., Moehl, T., & Grätzel, M., 2014. Electrochemical characterization of TiO<sub>2</sub> blocking layers for dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118(30)**, 16408-16418. <http://doi.org/10.1021/jp4103614>
- Krishna, A., Zhang, H., Zhou, Z., Gallet, T., Dankl, M., Ouellette, O., Hagfeldt, A., 2021. Nanoscale interfacial engineering enables highly stable and efficient perovskite photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, **14(10)**, 5552-5562. <https://doi.org/10.1039/D1EE02454J>
- Kruszyńska, J., Ostapko, J., Ozkaya, V., Surucu, B., Szawcow, O., Nikiforow, K., Holdynski, M., Tavakoli, M., Yadav, P., Satapathi, S., Akin, S., Prochowicz, D., 2022. Atomic layer engineering of aluminum-doped zinc oxide films for efficient and stable perovskite solar cells. *Advanced Materials Interfaces*, **9(17)**, 2200575. <https://doi.org/10.1002/admi.202200575>
- Liu, D., Li, S., Zhang, P., Wang, Y., Zhang, R., Sarvari, H., et al., 2017. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells with Li-doped compact TiO<sub>2</sub> layer. *Nano Energy* **31**, 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.11.028>
- Li, X., Chen, Y., Li, L., & Huang, J., 2018. Perovskite thin film consisting with one-dimensional nanowires. *Materials*, **11(9)**, 1759. <https://doi.org/10.3390%2Fma11091759>
- Ma, Z., Huang, D., Liu, Q., Yan, G., Xiao, Z., Chen, D., Huang, Y., 2022. Excess PbI<sub>2</sub> evolution for triple-cation based perovskite solar cells with 21.9% efficiency. *Journal of Energy Chemistry*, **66**, 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.07.030>
- Mali, S. S., Patil, J. V., Kim, H., & Hong, C. K., 2019. Gallium cationic incorporated compact TiO<sub>2</sub> as an efficient electron-transporting layer for stable perovskite solar cells, *Matter* **1**, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.04.001>
- Min, H., Lee, D. Y., Kim, J., Kim, G., Lee, K. S., Kim, J., Paik, J. M., Kim, K. Y., Kim, K., Kim, M., Shin, T., Il Seok, S., 2021. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO<sub>2</sub> electrodes. *Nature*, **598(7881)**, 444-450. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03964-8>
- Moshfeghi, E., and Entezari, M. H., 2022. Enhancement of the photovoltaic performance of perovskite solar cells via sono-synthesis of Al-doped TiO<sub>2</sub> as the electron transport layer. *International Journal of Energy Research*, **46(15)**, 23465-23479. <https://doi.org/10.1002/er.8643>
- Nagaraj, G., Mohammed, M. K., Shekargoftar, M., Sasikumar, P., Sakthivel, P., Ravi, G., Shalan, A. E., 2021. High-performance perovskite solar cells using the graphene quantum dot–modified SnO<sub>2</sub>/ZnO photoelectrode. *Materials Today Energy*, **22**, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100853>
- Nguyen, T. M. H., & Bark, C. W., 2020. Synthesis of cobalt-doped TiO<sub>2</sub> based on metal–organic frameworks as an effective electron transport material in perovskite solar cells. *ACS Omega*, **5(5)**, 2280-2286. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03507>
- Ozkaya, V., Sadegh, F., Unal, M., Alkan, B., Ebic, M., Ozturk, T., Yilmaz, M., Akin, S., 2023. Eco-friendly boost for perovskite photovoltaics: harnessing cellulose-modified SnO<sub>2</sub> as a high-performance electron transporting material. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15(49)**, 57338-57349. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c12698>
- Patel, K., Prochowicz, D., Akin, S., Kalam, A., Tavakoli, M. M., & Yadav, P., 2023. Applications of carbon-based materials for improving the performance and stability of perovskite solar cells. *Energy Technology*, **11(10)**, 2300228. <https://doi.org/10.1002/ente.202300228>
- Sadegh, F., Akin, S., Moghadam, M., Mirkhani, V., Ruiz-Preciado, M. A., Wang, Z., Tavakoli, Graetzel, M., Hagfeldt, A., M., Tress, W., 2020. Highly efficient, stable and hysteresis–less planar perovskite solar cell based on chemical bath treated Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> electron transport layer. *Nano Energy*, **75**, 105038. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105038>
- Sadegh, F., Akman, E., Prochowicz, D., Tavakoli, M. M., Yadav, P., & Akin, S., 2022. Facile NaF treatment achieves 20% efficient ETL-free perovskite solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14(34)**, 38631-38641. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c06110>
- Sadegh, F., Ebic, M., Prochowicz, D., Ans, M., Kruszyńska, J., Satapathi, S., Moghadam, M., Yadav, P., Akin, S., 2023. Acetate-based ionic liquid engineering for efficient and stable CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cells with an unprecedented fill factor over 83%. *Materials Today Physics*, **40**, 101301. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2023.101301>
- Shi, X., Ding, Y., Zhou, S., Zhang, B., Cai, M., Yao, J., Nazeeruddin, M. K., 2019. Enhanced interfacial binding and electron extraction using boron-doped TiO<sub>2</sub> for highly efficient hysteresis-free perovskite solar cells. *Advanced Science*, **6(21)**, 1901213. <https://doi.org/10.1002/advs.201901213>
- Su, T. S., & Wei, T. C., 2020. Co-electrodeposition of Sn-doped TiO<sub>2</sub> electron-transporting layer for perovskite solar cells. *Physica Status Solidi (a)*, **217(1)**, 1900491. <http://doi.org/10.1002/pssa.201900491>
- Tien, C. H., Lai, H. Y., & Chen, L. C., 2023. Methylammonium halide salt interfacial modification of perovskite quantum dots/triple-cation perovskites

- enable efficient solar cells. *Scientific Reports*, **13(1)**, 5387.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-32697-z>
- Qureshi, A. A., Javed, H. M. A., Javed, S., Bashir, A., Usman, M., Akram, A., Raza, S. A., 2021. Incorporation of Zr-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles in electron transport layer for efficient planar perovskite solar cells. *Surfaces and Interfaces*, **25**, 101299.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101299>
- Wang, H., Li, Y., Ba, X., Huang, L., & Yu, Y., 2015. TiO<sub>2</sub> thin films with rutile phase prepared by DC magnetron co-sputtering at room temperature: Effect of Cu incorporation. *Applied Surface Science*, **345**, 49-56.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.106>
- Wang, S., Liu, B., Zhu, Y., Ma, Z., Liu, B., Miao, X., Ma, R., Wang, C., 2018. Enhanced performance of TiO<sub>2</sub>-based perovskite solar cells with Ru-doped TiO<sub>2</sub> electron transport layer. *Solar Energy*, **169**, 335-342.  
<http://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.005>
- Wang, H., Zhao, C., Yin, L., Li, X., Tu, X., Lim, E. G., Zhao, C. Z., 2021. W-doped TiO<sub>2</sub> as electron transport layer for high performance solution-processed perovskite solar cells. *Applied Surface Science*, **563**, 150298.  
<http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150298>
- Wu, Y., Zhu, H., Yu, B. B., Akin, S., Liu, Y., Shen, Z., Pan, L., Cai, H., 2022. Interface modification to achieve high-efficiency and stable perovskite solar cells. *Chemical Engineering Journal*, **433**, 134613.  
<http://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134613>
- Xia, R., Wang, S., Wang, X., Dong, W., & Fang, X. 2016., Fabrication of hierarchical anatase TiO<sub>2</sub> nanostructure for dye-sensitized solar cells. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **16(6)**, 5810-5814.  
<https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12053>
- Valadi, K., Gharibi, S., Taheri-Ledari, R., Akin, S., Maleki, A., & Shalan, A. E., 2021. Metal oxide electron transport materials for perovskite solar cells: a review. *Environmental Chemistry Letters*, **19(3)**, 2185-2207.  
<http://doi.org/10.1007/s10311-020-01171-x>
- Venkatachalam, P., Kalaivani, T., & Krishnakumar, N., 2019. Perovskite sensitized erbium doped TiO<sub>2</sub> photoanode solar cells with enhanced photovoltaic performance. *Optical Materials*, **94**, 1-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.05.039>
- Ye, Q., Zhao, Y., Mu, S., Ma, F., Gao, F., Chu, Z., Yin, Z., Gao, P., Zhang, X., You, J., 2019. Cesium lead inorganic solar cell with efficiency beyond 18% via reduced charge recombination. *Advanced materials*, **31(49)**, 1905143.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201905143>
- Zhang, H., Shi, J., Xu, X., Zhu, L., Luo, Y., Li, D., & Meng, Q., 2016. Mg-doped TiO<sub>2</sub> boosts the efficiency of planar perovskite solar cells to exceed 19%. *Journal of Materials Chemistry A*, **4(40)**, 15383-15389.  
<https://doi.org/10.1039/C6TA06879K>
- Zhang, Z., Gao, Y., Li, Z., Qiao, L., Xiong, Q., Deng, L., Gao, P., 2021. Marked passivation effect of naphthalene-1, 8-dicarboximides in high-performance perovskite solar cells. *Advanced Materials*, **33(31)**, 2008405.  
<https://doi.org/10.1002/adma.202008405>
- Zhao, Y., Tan, H., Yuan, H., Yang, Z., Fan, J. Z., Kim, J., Voznyy, O., Gong, X., Quan, L., Tan, C. S., Hofkens, J., Yu, D., Zhao, Q., Sargent, E. H., 2018. Perovskite seeding growth of formamidinium-lead-iodide-based perovskites for efficient and stable solar cells. *Nature Communications*, **9(1)**, 1607.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04029-7>
- Zhao, N., & Wang, J., 2024. Solar full spectrum management in low and medium temperature light-driven chemical hydrogen synthesis-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **196**, 114368.  
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114368>