

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329657917>

Perovskit Güneş Hücreleri ve Kararsızlık Problemleri

Article in Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi - December 2018

DOI: 10.29048/makufebed.428570

CITATIONS

0

READS

238

2 authors, including:



Gökhan Yılmaz

Mehmet Akif Ersoy University

16 PUBLICATIONS 34 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



PEROVSKİT (CH₃NH₃PbI₃) İNCE FİLMİN TERMAL KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARARSIZLIK MEKANİZMALARININ ELEKTRİKSEL VE OPTOELEKTRONİK YÖNTEMLER İLE BELİRLENMESİ [View project](#)



MAKÜ FEBED
ISSN Online: 1309-2243
<http://dergipark.gov.tr/makufebed>
DOI: 10.29048/makufebed.428570

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9(Ek Sayı 1): 297-304 (2018)
The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University 9(Supplementary Issue 1): 297-304 (2018)

Derleme Makale / Review Paper

Perovskit Güneş Hücreleri ve Kararsızlık Problemleri

Gökhan YILMAZ^{1*}, Çağlar ÖZKÖK²

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Burdur

²Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur

Geliş Tarihi (Received): 30.05.2018, Kabul Tarihi (Accepted): 08.08.2018

✉ *Sorumlu Yazar (Corresponding author*): gyilmaz@mehmetakif.edu.tr*

☎ +90 248 2132775 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Elektrik enerjisinin doğaya zarar vermeden ve sürdürülebilir bir formda üretimini sağlamak gelecek nesillerimiz için bir zorunluluktur. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları sürdürülebilir bir kaynaktır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en potansiyeli yüksek kaynak ise güneştir. Literatürde en yaygın olarak çalışılan güneş hücreleri ise Silisyum tabanlı güneş hücreleridir. Ancak Silisyum tabanlı güneş hücrelerinin üretimi zor ve maliyetlidir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için literatürde organik güneş hücreleri üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Ancak organik güneş hücrelerinin piyasada bulunan Silisyum tabanlı güneş hücrelerine göre Güç Enerji Dönüşümü (PCE) değerleri çok düşüktür. Aynı zamanda organik tabanlı güneş hücreleri silisyum tabanlı güneş hücreleri ile karşılaştırıldığında daha kararsız olduğu gözlenmektedir. Organik güneş hücresi ailesi literatüründe üzerine çalışmalar yapılmaya devam edilmekte olan önemli konulardan birisi de Perovskit güneş hücreleridir. Perovskit güneş hücreleri ilk üretimlerinden (~2009) çok kısa bir zaman sonrasında (~2015) PCE değeri ~%20'leri geçerek silisyum tabanlı hücreler ile karşılaştırılabilir duruma gelmiştir. Ancak Perovskit güneş hücresi üretimden sonra kararsızlık problemi yaşamaktadır. Üretimi kolay, maliyeti düşük ve doğa dostu bir ürün olan Perovskit güneş hücreleri kararsızlık problemlerinin aşılmasından sonra gelecekte ticari güneş hücresi olma potansiyeli yüksek bir malzemedir. Bu çalışmada Perovskit güneş hücrelerinin ilk üretiminden günümüze kadar geçen sürede özellikle kararsızlık problemleri üzerine literatürde yayınlanan çalışmaların bir derlemesi hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Perovskit güneş hücreleri, Kararsızlık problemi, Spin kaplama tekniği, Termal buharlaştırma tekniği, İki adımlı daldırarak kaplama tekniği

Perovskite Solar Cells and Instability Problems

ABSTRACT

It is a necessity for our generations to produce electricity in a sustainable form that does not damage nature. In this context, renewable energy sources are a sustainable resource. The most potentially high source of renewable energy sources is the sun. The most commonly studied solar cells in the literature are silicon-based solar cells. However, the production of silicon-based solar cells is difficult and costly. To overcome these obstacles, it is seen that studies have been made on organic solar cells in the literature. However, the Power Conversion Efficiency (PCE) values are very low compared to the silicon-based solar cells in the organic solar cells market. At the same time, organic-based solar cells are more unstable compared to silicon-based solar cells. One of the important issues that continue to be studied in the organic solar cell family literature is Perovskite solar cells. Perovskite solar cells have become comparable to silicon-based cells by passing ~ 20% of the PCE value in a very short time (~ 2015) from their initial production (~

2009). However, Perovskite encounters a problem of instability after solar cell production. Perovskite, an easy-to-produce, cost-effective and environmentally friendly product, is a potentially high-value material to become a commercial solar cell in the future after the problems of instability in solar cells have been overcome. This study consists of a compilation of the studies published in the literature on the problems of instability especially during the period from the first production of Perovskite solar cells to the present day.

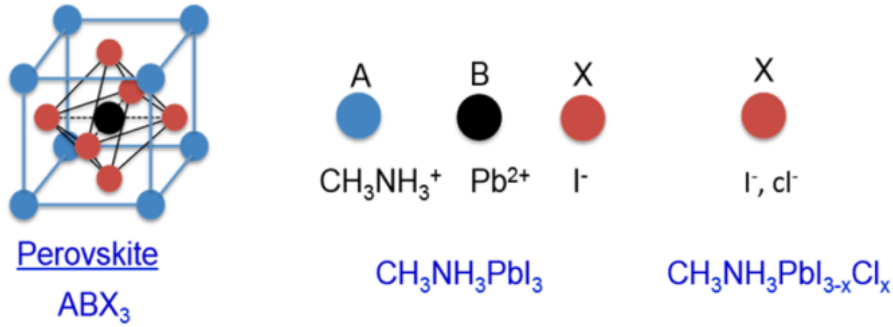
Keywords: Perovskite solar cells, Instability problem, Spin coating technique, Thermal evaporation technique, Two step dip coating technique

GİRİŞ

Perovskit ismini Rus mineralojist L.A.Perovskit'den almıştır. Bakır oksit Perovskit yapılarının yüksek sıcaklık süperiletken malzemelerde kullanımından sonra Perovskit malzemelere teknolojik açıdan büyük ilgi duyulmaya başlanmıştır (Bednorz ve Müller, 1986). Buna ek olarak kristalografik yapısındaki kristal örgü boyutundaki artışla yarıiletkenlerden metale geçiş yapısının anlaşılması ile organik tabanlı tabaka Halide Perovskitler elektronik uygulamalar açısından önemli bir malzeme haline gelmiştir (Mitzi ve ark., 1994). Perovskitler ile ilgili bir diğer önemli bulgu ise boyutundaki artışa bağlı olarak (2D-3D) yasak

enerji aralığındaki azalmadır (Kojima ve ark., 2009). Bu durum Perovskitleri güneş hücreleri uygulamalarında özellikle de dar enerji bant aralıkları uygulamalarında potansiyeli yüksek bir malzeme haline getirmiştir. Kendine özel kristal formülü olan Perovskitler Şekil 1'de görüleceği gibi ABX₃ formülü ile belirtilmektedir. ABX₃ formülü incelendiğinde A yerine Metil Amonyum (CH₃NH₃) B yerine Kurşun (Pb) ve X yerine Klor (Cl), Brom (Br) ya da İyot (I) kullanıldığı görülmektedir. Yapıda kullanılan malzemelere kimyasal açıdan bakılacak olunursa geniş bir organik katyon metilamonyum (CH₃NH₃), küçük katyon kurşun (Pb) ve halojen anyon olarak Klor (Cl), Brom (Br) ya da İyot (I) kullanıldığı görülmektedir.

Organometal Halide Perovskites



Şekil 1. Perovskit Malzemesinin Yapısı (Zhihua ve ark. 2013)

İlk Perovskit güneş hücresi denemesinde CH₃NH₃PbX₃ (X = Br, I) yapısındaki Perovskit güneş hücresinde X yerine Brom (X=Br) kullanıldığında %3,1, X yerine İyot (X=I) kullanıldığında %3,8 verimlilik değerine ulaşılmıştır (Kojima ve ark., 2009). Verimlilik değerinin bu denli düşük olması ve sıvı elektrolitlerin kararsız olması durumu Perovskitler üzerindeki ilgiyi azaltmıştır. Kojima'nın çalışmasından yaklaşık 2 yıl sonra Park ve çalışma arkadaşları 2-3nm ebatlarındaki CH₃NH₃PbI₃ kristal adacıları %6,5 verim değerinde kuantum nokta Perovskit güneş hücreleri üretmişlerdir (Im ve ark., 2011a). Edgar ve çalışma arkadaşları CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ hetero-elem yapısının hem ışık toparlayıcı hem de hole transfer malzemesi olduğunu göstermiştir (Etgar ve ark., 2012). CH₃NH₃PbI₃ malzemesi solüsyon tabanlı üretilen diğer

yarıiletken malzemelere kıyasla daha uzun bir difüzyon sızma mesafesine (100-300nm) sahip olduğu Xing ve Stranks'ın çalışmalarında gösterilmiştir (Xing ve ark., 2013). Ancak organo kurşun halide güneş hücrelerinde kullanılan sıvı elektrolit kontakların polar çözücülerle çözünmesi malzemenin kararsızlık probleminin temelini oluşturmaktadır. İlk Perovskit güneş hücresindeki performans düşüşünün sebebi literatürde sıvı elektrolit içinde çözündürülmesinden kaynaklı olduğu belirtilmiştir (Lee ve ark., 2012). Kim ve çalışma arkadaşlarının 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada mikron altındaki mezoskopik TiO₂ tabakanın üzerine CH₃NH₃PbI₃ nanoparçacıklar büyütülmüş ve gözenekli olan yapı spiro-MeOTAD ile doldurmuştur (Kim ve ark., 2012). Elde edi-

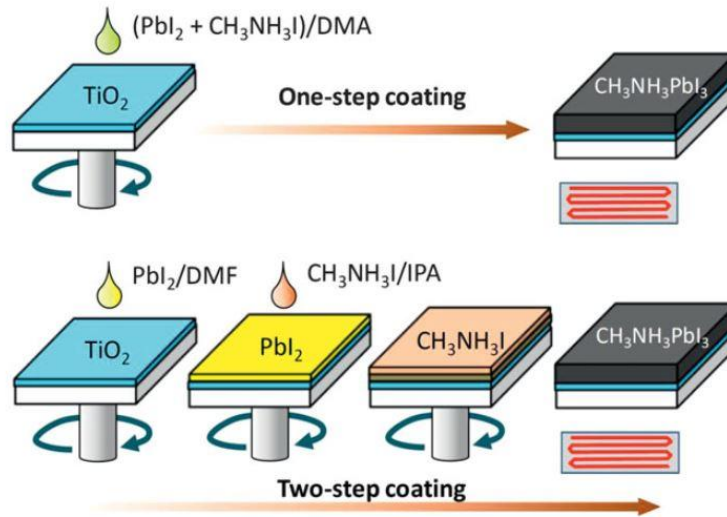
len Perovskit güneş hücresinin karakterizasyonu standart AM 1.5 ışınımı altında yapılmıştır. Kim ve çalışma arkadaşlarının üretmiş oldukları Perovskit güneş hücresi 500 saat kararlılık ve %9,7 verimlilik değerlerine ulaşmıştır (Kim ve ark., 2012). 2012'nin ortalarına doğru Snaith ve çalışma arkadaşları $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-xCl}_x$ kaplama ve TiO_2 katmanı yerine Al_2O_3 kullanılarak %10,9'luk PCE elde etmeyi başarmışlardır (Lee ve ark., 2012). Daha sonraki çalışmada ise Seok ve çalışma arkadaşları spiro-MeOTAD yerine Polytriarylamine (PTAA) kullanarak $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-xBr}_x$ kaplama ile %12,3 PCE'ne sahip Perovskit üretmişlerdir (Noh ve ark., 2013). Gratzel ve çalışma arkadaşları Perovskit mimarisinde farklı bir yaklaşım kullanarak nano-gözenekli $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{spiro-MeOTAD}/\text{Au}$ yapı mimarisini kullanmışlar ve %15 PCE ile üretimi sağlamışlardır (Mei ve ark., 2014). Snaith ve çalışma arkadaşları ise solüsyon tabanlı üretimin aksine termal buharlaştırma yöntemi ile $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-xCl}_x$ kaplama, spiro-MeOTAD ve TiO_2 kullanarak %15,4 PCE ile Perovskit güneş hücresi üretmişlerdir (Liu ve ark., 2013). Seok ve çalışma arkadaşları mezo-gözenekli TiO_2 , $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-xBr}_x$ kaplama ve PTAA kullanarak %16,2 PCE'ne sahip Perovskit üretmişlerdir (Green ve ark., 2014). Jeon ve çalışma arkadaşlarının 2015 yılında yayınladıkları makalede Metilamonyum(MA) ve Formamidinyum(FA) birleştirerek standart ışık altında ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) %18 PCE'ye ulaştıkları belirtilmiştir (Jeon ve ark., 2015). Zou ve çalışma arkadaşları düşük sıcaklıkta ve laboratuvar atmosferinde oluşturdukları Perovskit güneş hücrelerini geri besleme ölçümleri yaparak %19,3 PCE'ye ulaştıklarını belirtmiştir (Zhou ve ark., 2014). Martin A. Green ve çalışma arkadaşlarının 2015 yılında hazırlamış oldukları dünya güneş hücresi verimlilik tablosunda Kore Kimyasal Teknolojiler Araştırma Merkezinde (KRICT) üretilen ve PCE

değeri %20,1 olan Perovskit üretildiği belirtilmiştir (Green ve ark., 2015). Ancak yüzey alanı çok küçük olduğundan ($0,1\text{cm}^2$) standart rekor verim listesine girememiştir. Yine Green ve çalışma arkadaşlarının 2017 yılının Kasım ayında hazırlamış oldukları dünya güneş hücresi verimlilik tablosunda KRICT üretilen ve PCE değeri %20 olan Perovskit üretildiği belirtilmiştir (Green ve ark., 2018).

PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Spin Kaplama Yöntemi

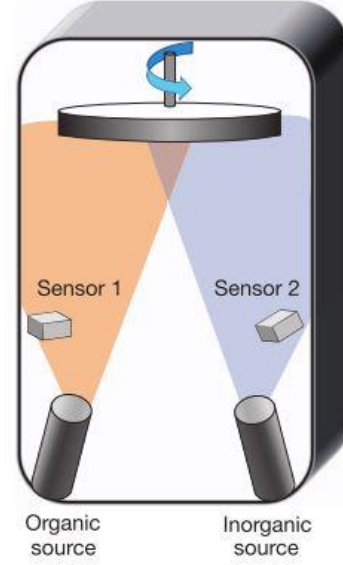
Spin kaplama yöntemi homojen ince film üretimi açısından geleneksel olarak kullanılan ucuz, kolay ve çözücü bağımlı bir yöntemdir. Perovskite güneş hücresi üretiminde de farklı katmanların üretilmesinde bir ya da birden fazla adımlı olarak kullanılan kolay bir yöntemdir. Şekil 2'de görüleceği gibi taban malzeme spin kaplama yüzeyine sabitlenmekte ve solüsyon malzeme belirlenen mililitrelerde (ml) taban malzemenin üzerine damlatılmaktadır. Kaplanmak istenen solüsyon spin kaplama cihazının rotasyonel dönme hareketinden dolayı homojen olarak yüzeye yayılmakta ve fazlalık malzeme merkezkaç kuvveti ile taban malzemeden uzaklaştırılmaktadır. Spin kaplama yöntemi ile cam, plastik kuartz ve silicon gibi birçok farklı taban malzeme üzerine Perovskit güneş hücresi üretmek mümkündür. Burada önemli olan parametreler ise solüsyon ve çözücüye bağlı olarak taban malzeme seçimi, taban malzeme sıcaklığının belirlenmesi ve spin kaplama cihazının hızının belirlenmesidir.



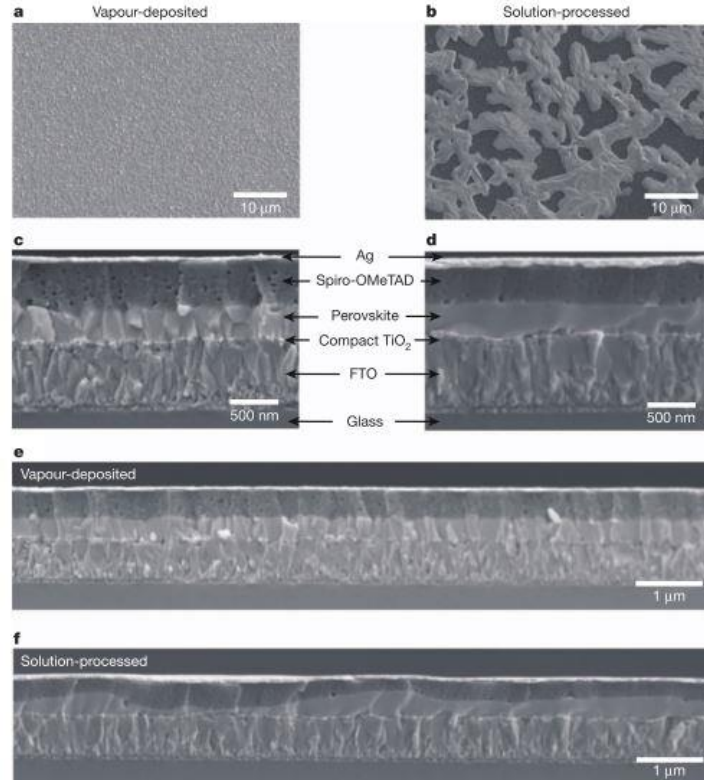
Şekil 2. Spin kaplama yöntemi ile Perovskit güneş hücresi üretimi (Lee ve Park, 2015)

Termal Buharlaştırma Tekniği

Termal buharlaştırma yöntemi ince film üretim tekniklerinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Yöntem temel olarak vakum altında ($\sim 10^{-6}$ mBar) buharlaştırılmak istenilen malzemelerin yüksek sıcaklıkta buharlaştırılarak taban malzeme üzerine büyütülmesi ilkesine dayanır. Perovskit güneş hücrelerinde ilk olarak 2013 yılında Liu ve çalışma arkadaşları tarafından uygulanmıştır (Liu ve ark., 2013). Şekil 3'de şematik gösterimi bulunan termal buharlaştırma yöntemini Liu ve çalışma arkadaşları 10-5 mBar basınç seviyesinde Metilamanyum İyodür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$) ve Kurşun Klorid (PbCl_2) organik ve inorganik tuzlarını eş zamanlı ve iki farklı kaynaktan 4:1 molar oranında olacak şekilde buharlaştırarak FTO (Fluorine Katkılı Kalay Oksit) taban malzeme üzerine büyütmüşlerdir. Şekil 4'den de görüleceği gibi solüsyon yöntemine kıyasla termal buharlaştırma yöntemi ile kristal hacim oranı çok daha yüksek Perovskit güneş hücreleri üretmek mümkündür.



Şekil 3. Termal buharlaştırma yöntemi ile Perovskit güneş hücresi üretimi (Liu ve ark., 2013)

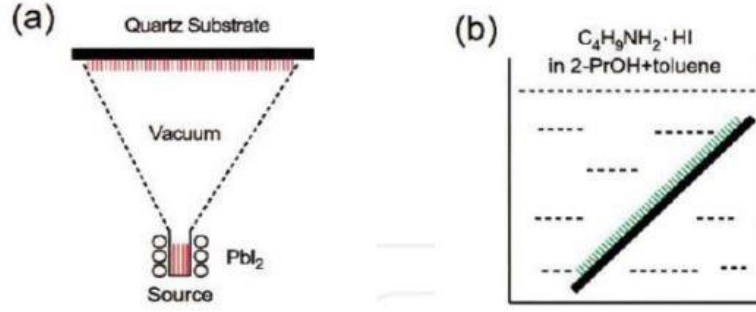


Şekil 4. Termal buharlaştırma yöntemi ile büyütülmüş Perovskit güneş hücresinin a) tepeden c) kesit alanından e) geniş kesit alanından SEM görüntüsü, Solüsyon işlemi ile büyütülmüş Perovskit güneş hücresinin b) tepeden d) kesit alanından f) geniş kesit alanından SEM görüntüsü (Liu ve ark., 2013).

İki Adımlı Daldırarak Kaplama Yöntemi

Şekil 5'de şematik gösteriminden anlaşılacağı gibi üretim yöntemine iki adımlı denmesinin sebebi ilk adımda metal halide filmin spin kaplama ya da termal buharlaştırma yöntemi ile oluşturulmasından kaynaklıdır. İkinci adımda ise birinci adımda elde edilen malzeme organik

katyonlar içeren solüsyona daldırılarak Perovskit yapısı oluşturulması sağlanır. Bu yöntemde doğru çözücülerin seçilmesi büyük önem arz etmektedir. Daldırma solüsyonunda organik tuz çözünebilmesi ancak taban malzemeye önceden kaplanmış metal halide film çözünmemesidir (Mitzi, 2001).



Şekil 5. İki adımlı daldırarak kaplama yöntemi (Mitzi, 2001)

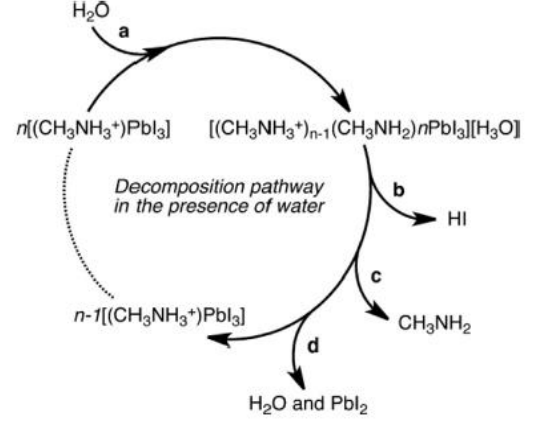
Perovskit Güneş Hücrelerinde Kararsızlık Problemi

Perovskit güneş hücreleri %~20'lik PCE değerine ulaşmasına rağmen üretimden kısa bir zaman sonra verimlilik değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durum Perovskit güneş hücrelerinde kararsızlık mekanizması olarak bilinmektedir. Kararsızlık probleminin temel kaynağı olarak havadaki su buharı, oksijen, ışık ve sıcaklık gösterilmektedir. 2011 yılındaki çalışmalarda Perovskit güneş hücreleri üretiminden 10 dakika sonra %80 oranında bozunuma uğradıkları rapor edilmiştir (Im ve ark., 2011b). 2012 yılındaki çalışmalarda ise spiro-MeOTAD tabanlı Perovskit güneş hücreleri üretilerek kararlılık durumları dakikalardan 500 saate kadar çıkartılmıştır (Noh ve ark., 2013). 2013 yılındaki çalışmalarda Al₂O₃ tabanlı Perovskit güneş hücrelerinde 1000 saat kararlılık durumuna ulaşıldığı rapor edilmiştir (Leijtens ve ark., 2013). Kararsızlık mekanizmasının çözümüne yönelik çalışmalarda Mei ve çalışma arkadaşları TiO₂ tabakasının üzerine ZrO₂ tabakasını büyütüştür. Elde edilen yapının üstüne kapsülasyon olarak gözenekli karbon ince film büyütümleridir. Mei ve çalışma arkadaşlarının uygulamış oldukları bu 3 tabakalı yöntem sayesinde güneş ışığında 1008 saat kararlı Perovskit güneş hücresi üretilmesine imkan sağlamıştır (Mei ve ark., 2014). Zhou ve çalışma arkadaşları mezo-gözenekli TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/C hetero-e-klem mimarisi ile spiro-MeOTAD kullanmadan ve iletken arka kontak yerine düşük sıcaklıkta indirgenmiş karbon elektrot ekleyerek büyütülen Perovskit güneş hücresi ise karanlıkta, oda sıcaklığında ve laboratuvar atmosferinde 2000 saat kararlılık göstermiştir (Zhou ve ark., 2014).

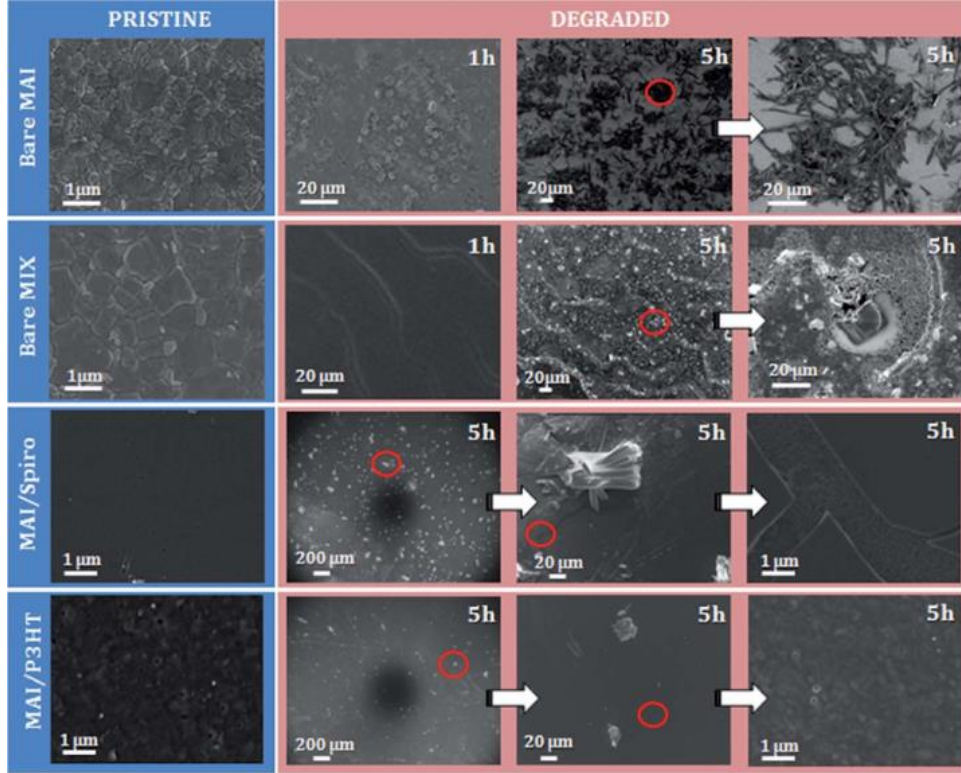
Nem ve Oksijen

Literatürde Perovskite güneş hücrelerinin belirli bir oranın üzerinde ve belirli bir süre nem ve oksijene maruz kalmalarına bağlı olarak geri dönüşümsüz olarak bozulduğunu ifade eden birçok kaynak bulunmaktadır. Belirli bir limitin üzerindeki oksijen ve nem güneş hücresinin içerisinde oksidasyona sebep olmaktadır. Bu konu ile ilgili olarak literatürde karanlıkta ve kuru hava atmosferinde tutulan Perovskit hücrelerinde kayda değer bir bozunma olmadığına dair çalışmalar bulunmaktadır (Kim ve ark., 2012; Lee ve ark., 2012). Bu durum gösteriyor ki karanlıkta ve kuru atmosferde oksijen Perovskit malzemenin kararlılığına etki etmemektedir. Ancak yine literatürdeki çalışmalar suyun Perovskit hücrenin kararlılığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Buna ek olarak polar çözücülerin de Perovskit yapılarında bozunmaya sebep oldukları belirtilmiştir (Suarez ve ark., 2014). En genel kullanılan HTM (Boşluk transfer malzemesi, Hole Transfer Material), spiro-OMeTAD su ortamında kararsızdır. Kamat ve çalışma arkadaşları soğurucu tabakada suyun bulunmasının kristal yapıyı etkilediğini buna bağlı olarak Perovskit soğurma spektrumunda taban ve uyarılmış durumlarda belirgin değişiklikler oluşturduğunu ortaya koymuşlardır (Christians ve ark., 2015). Literatürdeki bir diğer çalışmada bozunma etkisinin havadaki nem oranı ile olduğu vurgulanmaktadır. Bahsedilen çalışmada onlarca gün %50 nem atmosferinde duran malzemenin 3 gün %80 nem atmosferinde beklemesi ile bozunma oranında belirgin bir artış olduğu vurgulanmıştır (Yang ve ark., 2015). Frost ve çalışma arkadaşları su molekülünün üretim esnasında birçok farklı

kademede etkili olarak bozunmaya sebep olacağını belirlemiştir. Bu kapsamda Şekil 6'da belirtilen kimyasal reaksiyonun malzemede bozunmanın kaynağı olabileceğini vurgulamışlardır (Frost ve ark., 2014).



Şekil 6. Perovskit güneş hücresi suyun oluşturduğu bozunma döngüsü (Frost ve ark., 2014)



Şekil 7. SEM ile gözlemlenen Perovskit güneş hücresindeki suyun sebep olduğu bozunmalar (Salado ve ark., 2017)

Benzer şekilde su molekülünün Perovskit güneş hücresi üzerindeki etkisini inceleyen Salado ve çalışma arkadaşları 1 saat ve 5 saatlik zaman dilimlerinde su moleküllerinin malzemede gözle görülür bir şekilde bozunmaya neden olduğunu göstermişlerdir. Şekil 7'de su moleküllerinin farklı yapılarıdaki Perovskit hücre üzerinde oluşturduğu etkinin SEM görüntüleri görülmektedir (Salado ve ark., 2017).

Işık

Diğer birçok güneş hücresi uygulamasında olduğu gibi UV ışık Perovskit güneş hücrelerinde de bozunmaya neden olmaktadır (Hinsch ve ark., 2001; Jørgensen ve ark., 2008). Leijtens ve çalışma arkadaşları Perovskit güneş hücrelerinde UV ışıktan kaynaklı bozunmanın sebebi olarak TiO₂ tabakası olduğunu belirtmişlerdir (Leijtens ve ark., 2013). Leijtens ve çalışma arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada UV kapsülasyonu olan ve olmayan 2

çeşit Perovskit hücre 5 saat boyunca 1 güneş ışığı şiddetinde (AM1,5) ışığa maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak UV kapsülasyonu olan hücre çok daha hızlı bir şekilde bozunma göstermiştir (Leijtens ve ark., 2013). Buna bağlı olarak Perovskit güneş hücrelerinde UV ışıktan kaynaklı olarak oluşan bozunmanın sebebi TiO₂ tabakasında oluşan yüzey kimyası olarak nitelendirilmektedir (Bisquert ve ark., 2008; Schwanitz ve ark., 2007).

Sıcaklık

Değişken sıcaklık uygulamaları Perovskit malzemelerin tabakaları için farklı etkiler doğurmaktadır. Belirli sıcaklık değerlerinin üstüne çıkıldığında Perovskit malzemelerde bozunma olurken belirli sıcaklıkların altında malzeme içerisinde kristal yapı oluşmamaktadır. Bu neden ile uygulanacak sıcaklık ve uygulama süresi Perovskit malzemeler için hayati önem taşımaktadır. İki adımlı Perovskit güneş hücreleri üretim süreçlerinde Pbl₂ ve MAI büyütme safhalarında ısı tavlama sıcaklığı filmin kalitesi açısından kritik öneme sahiptir (Bi ve ark., 2014). Bi ve çalışma arkadaşları ısı tavlama işleminin Perovskit yapılar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada Perovskit malzemeler 3 saat boyunca 105 °C ısıtılma işlemine tabii tutulmuşlardır. Uygulama sonunda SEM ve XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Perovskit yapısında kristal yapısının oluşması için ısı tavlama yapmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Hall ölçümleri de bu sonuçları desteklemektedir. Hall ölçümlerinde ısıtılma işlemi uygulaması ile hareketlilik arasında pozitif bir ilişki belirlenmiştir (Bi ve ark., 2014). Buna karşın ısıtılma uygulamasında süre arttıkça Perovskit malzeme de termal bozunmaya uğramakta ve XRD sonuçlarında yapı içerisinde Pbl₂ yapısı ayrılmaya başladığı görülmektedir. Isıtılma işlemi sonrası Perovskit yapısının ayrışması sonucu Pbl₂ belirgin olarak oluşması verim kaybına neden olmaktadır (Bi ve ark., 2014).

Ara Yüzey Etkileşimleri

Perovskit güneş hücrelerinde çevresel faktörlerin (ışık, nem, sıcaklık, oksijen) kararlılık durumunu etkilediği kadar Perovskit güneş hücresinin mimarisinde bulunan katmanlar da bir o kadar kararlılık durumunu etkilemektedir. Kararsız bir metalin organik malzeme ile katot arası difüzyona uğrayarak malzemenin yapısını bozması örnek gösterilebilir. Buna ek olarak Perovskit güneş hücresinde katmanlar arası iyon göçü olması nedeniyle Perovskit malzemesinin özelliğini zamanla bozmakta ve verimini düşürmektedir. Aynı zamanda katmanlar arası difüzyon ve kimyasal etkileşimler de Perovskit güneş hücresinin verimini bozmaktadır (Bella ve ark., 2015).

SONUÇLAR

Literatürde de görüldüğü üzere Perovskit güneş hücreleri verimlilik değerleri açısından ticari muadilleri ile yarışabilir bir malzeme grubudur. Ancak malzemenin sahip olduğu kararsızlık problemi nedeni ile ticari potansiyeli olmasına rağmen fotovoltaik sektöründe kullanılmamaktadır. Bu nedenle Perovskit güneş hücrelerinin kararsızlık problemlerinin belirlenmesi, malzeme mimarisinin geliştirilmesi ve malzemedeki elektriksel iletim mekanizmalarının araştırılması zorunlu hale gelmiştir. Malzemedeki kararsızlık probleminin aşılması ile Perovskit güneş hücreleri fotovoltaik sektörde karşımıza çıkabilecek popüler bir ürün haline gelecektir.

KAYNAKLAR

- Bednorz, J. G., Müller, K. A. (1986). Possible High T_c Superconductivity in the Ba — La — Cu — O System, *193*, 267–271.
- Bella, F., Gerbaldi, C., Barolo, C., Grätzel, M. (2015). Aqueous dye-sensitized solar cells. *Chem. Soc. Rev.*, *44*(11), 3431–3473.
- Bi, C., Shao, Y., Yuan, Y., Xiao, Z., Wang, C., Gao, Y., Huang, J. (2014). Understanding the formation and evolution of interdiffusion grown organolead halide perovskite thin films by thermal annealing. *J. Mater. Chem. A*, *2*(43), 18508–18514.
- Bisquert, J., Fabregat-Santiago, F., Mora-Seró, I., Garcia-Belmonte, G., Barea, E. M., Palomares, E. (2008). A review of recent results on electrochemical determination of the density of electronic states of nanostructured metal-oxide semiconductors and organic hole conductors. *Inorganica Chimica Acta*, *361*(3), 684–698.
- Christians, J. A., Miranda Herrera, P. A., Kamat, P. V. (2015). Transformation of the Excited State and Photovoltaic Efficiency of CH₃NH₃PbI₃ Perovskite upon Controlled Exposure to Humidified Air. *Journal of the American Chemical Society*, *137*(4), 1530–1538.
- Etgar, L., Gao, P., Xue, Z., Peng, Q., Chandiran, A. K., Liu, B., Grätzel, M. (2012). Mesoscopic CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ Heterojunction Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*, *134*(42), 17396–17399.
- Frost, J. M., Butler, K. T., Brivio, F., Hendon, C. H., van Schilfgaarde, M., & Walsh, A. (2014). Atomistic Origins of High-Performance in Hybrid Halide Perovskite Solar Cells. *Nano Letters*, *14*(5), 2584–2590. <http://doi.org/10.1021/nl500390f>
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *23*(1), 1–9.
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Ho-Baillie, A. W. Y. (2018). Solar cell efficiency tables (version 51). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *26*(1), 3–12.
- Green, M. A., Ho-Baillie, A., Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, *8*(7), 506–514.
- Hinsch, A., Kroon, J. M., Kern, R., Uhlendorf, I., Holzbock, J., Meyer, A., & Ferber, J. (2001). Long-term stability of dye-

- sensitized solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(6), 425–438.
- Im, J.-H., Lee, C.-R., Lee, J.-W., Park, S.-W., Park, N.-G. (2011). 6.5% Efficient Perovskite Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell. *Nanoscale*, 3(10), 4088.
- Jeon, N. J., Noh, J. H., Yang, W. S., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., Seok, S. II. (2015). Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. *Nature*, 517(7535), 476–480.
- Jørgensen, M., Norrman, K., Krebs, F. C. (2008). Stability/degradation of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(7), 686–714.
- 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.
- 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.
- Lee, J.-W., & Park, N.-G. (2015). Two-step deposition method for high-efficiency perovskite solar cells. *MRS Bulletin*, 40(08), 654–659.
- Lee, M. M., Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N., Snaith, H. J. (2012). Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites. *Science*, 338(6107), 643–647.
- Leijtens, T., Eperon, G. E., Pathak, S., Abate, A., Lee, M. M., Snaith, H. J. (2013). Overcoming ultraviolet light instability of sensitized TiO₂ with meso-superstructured organometal tri-halide perovskite solar cells. *Nature Communications*, 4, 1–8.
- Liu, M., Johnston, M. B., Snaith, H. J. (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 501(7467), 395–398.
- Mei, A., Li, X., Liu, L., Ku, Z., Liu, T., Rong, Y., Han, H. (2014). A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability. *Science*, 345(6194), 295–298.
- Mitzi, D. B. (2001). Thin-Film Deposition of Organic-Inorganic Hybrid Materials. *Chemistry of Materials*, 13(10), 3283–3298.
- Mitzi, D. B., Feild, C. A., Harrison, W. T. A., Guloy, A. M. (1994). Conducting tin halides with a layered organic-based perovskite structure. *Nature*, 369(6480), 467–469.
- Noh, J. H., Im, S. H., Heo, J. H., Mandal, T. N., Seok, S. II. (2013). Chemical Management for Colorful, Efficient, and Stable Inorganic–Organic Hybrid Nanostructured Solar Cells. *Nano Letters*, 13(4), 1764–1769.
- Salado, M., Contreras-Bernal, L., Caliò, L., Todinova, A., López-Santos, C., Ahmad, S., Anta, J. A. (2017). Impact of moisture on efficiency-determining electronic processes in perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(22), 10917–10927.
- Schwanitz, K., Weiler, U., Hunger, R., Mayer, T., Jaegermann, W. (2007). Synchrotron-Induced Photoelectron Spectroscopy of the Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO₂/Electrolyte Interface: Band Gap States and Their Interaction with Dye and Solvent Molecules. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(2), 849–854.
- Suarez, B., Gonzalez-Pedro, V., Ripolles, T. S., Sanchez, R. S., Otero, L., Mora-Sero, I. (2014). Supporting Information: Recombination Study of Combined Halides (Cl, Br, I) Perovskite Solar Cells. *J. Phys. Chem. Lett.*, 5(10), 1628–1635.
- Xing, G., Mathews, N., Sun, S., Lim, S. S., Lam, Y. M., Gratzel, M., Sum, T. C. (2013). Long-Range Balanced Electron- and Hole-Transport Lengths in Organic-Inorganic CH₃NH₃PbI₃. *Science*, 342(6156), 344–347.
- Yang, J., Siempelkamp, B. D., Liu, D., Kelly, T. L. (2015). Investigation of CH₃NH₃PbI₃ degradation rates and mechanisms in controlled humidity environments using in situ techniques. *ACS Nano*, 9(2), 1955–1963.
- Zhihua Xu, Kevin Weeks, T. D. R. (n.d.). Perovskite Solar Cells. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/presentation/928b/f102a912a067a6361ebb6bbdf983b2df7af8.pdf>
- Zhou, H., Shi, Y., Dong, Q., Zhang, H., Xing, Y., Wang, K., Ma, T. (2014). Hole-Conductor-Free, Metal-Electrode-Free TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ Heterojunction Solar Cells Based on a Low-Temperature Carbon Electrode. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5(18), 3241–3246.