



# Bakır Katkılı TiO<sub>2</sub> Fotoanotların Boya Duyarlı Güneş Pilleri Performansı Üzerindeki Etkisi

Erdi Akman<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (BİLTEM), Karaman, Türkiye

<sup>2</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nano-Teknoloji Ar-Ge Laboratuvarı, Karaman, Türkiye  
(ORCID: 0000-0000-0000-0000)

(İlk Geliş Tarihi 8 Ocak 2020 ve Kabul Tarihi 22 Şubat 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.672079)

**ATIF/REFERENCE:** Akman, E. (2020). Bakır Katkılı TiO<sub>2</sub> Fotoanotların Boya Duyarlı Güneş Pilleri Performansı Üzerindeki Etkisi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 129-135.

## Öz

Bu çalışmada, farklı oranlarda (Cu) katkı TiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları hazırlanmış ve hazırlanan bu nanoparçacıklar boya duyarlı güneş pilleri (BDGP)'nde yarıiletken fotoanot olarak kullanılmıştır. Katkısı yapılan farklı oranlarda ki Cu iyonlarının TiO<sub>2</sub> fotoanotları üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla X-ışını difraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve UV-vis spektrofotometre analizleri kullanılmıştır. Ayrıca yapılan Cu katkısının BDGP performansı üzerindeki etkisini belirlemek için akım-gerilim analiz sistemleri kullanılmıştır. Yapılan XRD ve SEM analizlerinde Cu iyonlarının TiO<sub>2</sub> yapısına yerleştiği anlaşılmıştır. Elde edilen fotovoltajik sonuçlara göre ise, saf TiO<sub>2</sub> BDGP ile karşılaştırıldığında ideal katkı oranının % 1'lik Cu katkı oranı olduğu ve bu katkı oranı ile akım yoğunluğunun 10.83 mA.cm<sup>-2</sup> değerinden 13.36 mA.cm<sup>-2</sup> değerine yükseldiği, pillerin güç dönüşüm veriminin ise % 4.59 değerinden % 5.26 değerine ulaştığı saptanmıştır. Üretilen BDGP'inde akım yoğunluğunda ki kayda değer bu artış ideal Cu oranının katkısı ve Cu katkıli fotoanodun boyayı tutma kabiliyetini artırması ile ilgilidir. Elde edilen bu sonuçlar BDGP'nde Cu iyonlarının ideal katkısı, üretilen pillerin verim değerini artırma konusunda etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** BDGP, Titanyum Dioksit (TiO<sub>2</sub>), Cu katkısı, Güneş Pili Verimi.

## The Effect of Copper Doped TiO<sub>2</sub> Photoanodes on Dye Sensitized Solar Cells Performance

### Abstract

In this study, Cu doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles with different ratios are produced and are employed as semiconductor materials of photoanode to improve the photovoltaic performance of dye sensitized solar cells (DSSCs). X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), and UV-vis spektrofotometre analysis are used to characterize the influence of copper dopant with different concentrations on the TiO<sub>2</sub> photoanodes. Also, the effect of dopant on photovoltaic performance of DSSCs were analyzed by current-voltage analysis systems. XRD and SEM analysis revealed that Cu ions settled in TiO<sub>2</sub> structure. According to obtained photovoltaic results, the ideal Cu concentration of 1.0 at.%, the current density rised from 10.83 to 13.36 mA.cm<sup>-2</sup>, power conversion efficiencies increased from 4.59% up to 5.26% as compared to the bare DSSC. The significantly enhanced current density of the produced DSSCs was found to be related to the ideal Cu dopant amount and dye hold ability in Cu doped TiO<sub>2</sub> photoanode. These results showed that the doping of ideal copper ratio in DSSCs an effective way to increase in the conversion efficiency of DSSCs.

**Keywords:** DSSCs, Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>), Cu Doping, Solar Cells Efficiency.

## 1. Giriş

Gelişen sanayi, artan nüfus, daha fazla enerji tüketimi yapan sistemlerin geliştirilmesi ile beraber enerji tüketimindeki artış ve geleneksel enerji kaynaklarının hızla tükeniyor olması gelecek nesiller için enerji kaynağı endişesi doğurmuştur. Bu endişelerin giderilmesi adına geleneksel enerji kaynaklarına alternatif enerji kaynakları geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu enerji kaynakları arasında bulunan ve gelecekte en büyük enerji kaynağı potansiyeli olarak görülen yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında ise güneş pilleri sahip oldukları avantajlardan dolayı bir adım öne çıkmaktadırlar. Güneş pilleri ise kendi aralarında belirli parametreler göz önüne alınarak gruplandırılmıştır. Bu gruplandırmalar arasında yer alan yüksek verimliliğe sahip ve ticari boyut kazanmış Si tabanlı güneş pilleri ile Ga-As güneş pilleri en yaygın olarak kullanılan türlerdir. (Akman ve ark., 2013). Bu güneş pillerinin yüksek verimlilikte olması, yüksek kararlılık gösterip uzun süre kullanılıyor olması ve ticari olarak kullanılması en büyük avantajlarından. Fakat bu pillerin üretim yöntemlerinin pahalı olması, hammadde işlenmesinin zor ve maliyetli bir işlem olması, üretim altyapısının kurulma işlemleri pahalı olmasından dolayı bilim insanları daha uygun maliyetli güneş pili sistemlerinin geliştirilmesine yönelmişlerdir (Oztürk ve ark., 2017; Akman ve ark., 2013).

Uygun maliyetli güneş pili sistemleri olarak nitelendirilen sistemler “üçüncü nesil güneş pilleri” adı altında toplanmıştır. Bu pil çeşitleri arasında yer alan boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) ise üretim maliyetinin uygun olması ve nispeten yüksek verimli güneş hücreleri olması sebebiyle öne çıkmaktadır. BDGP’ni çekici kılan diğer bir nokta ise üretim kolaylığı ve düşük maliyetli altyapı sistemlerinin kurulabiliyor olmasıdır. Bu çekici özelliği sayesinde BDGP üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Oztürk ve ark., 2017; Akin ve ark., 2014; Tang ve ark., 2014) Sandiviç (katmanlı) şeklinde bir yapıya sahip olan BDGP’ni bir fotoanot (genellikle  $TiO_2$  veya ZnO yarıiletkenleri ve duyarlaştırıcı boya), elektrolit ve karşıt elektrot oluşturmaktadır. Bu üç yapının en önemli parçası olan fotoanot kısmı, tasarlanan aygıtın akım yoğunluğundan boya malzemesinin tutunmasına kadar birçok parametreyi belirlemektedir. Fotoanot malzemesi olarak da en yaygın kullanılan yarıiletken titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) malzemesidir (Akin ve ark., 2016).

İdeal bir fotoanotta olması gereken özellikler sırasıyla hızlı/verimli yük taşıma ve düşük elektron rekombinasyon davranıştır. Fakat  $TiO_2$  fotoanot uygulamalarında yüksek elektron-hol çifti rekombinasyonu ve nispeten düşük elektron taşınması gibi elverişsiz özelliklerinden dolayı aygıt performansının artırılması konusunda engel olarak kabul edilmektedir (Ates Sonmezoglu et al., 2016). Bu elverişsiz durumların giderilmesi adına  $TiO_2$  fotoanoduna çeşitli modifikasyon işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerden bazıları ise farklı tavlama sıcaklıklarının uygulanması, farklı üretim yöntemlerinin denenmesi ve birbirinden farklı özelliklerde olan katkı malzemesi ile modifikasyon işlemleridir. Bu işlemler arasında bulunan katkı prosesi yaygın olarak kullanılan bir seçenektir (Roose ve ark., 2015; Öztürk ve ark., 2017). Yapılan literatür çalışmalarında  $TiO_2$  fotoanoduna yapılan katkı ile beraber fotoanodun yük taşıma kapasitesinin arttığı ve rekombinasyon oranının azaldığı tespit edilmiştir (Zhou ve ark., 2016; Roose ve ark., 2015).

$TiO_2$  fotoanodunu modifiye ederken farklı türlerde elementler kullanılmaktadır. Kullanılan elementlerin türüne bağlı olarak  $TiO_2$  fotoanodunun belirli özellikleri geliştirilmiş veya gelen ışığın daha verimli kullanılması sağlanmıştır. Örneğin lantanit ailesi elementi olarak bilinen Eu, Tb, Er ve Ce gibi elementler kullanılarak gelen ışığın ultraviyole (UV) ve kızılötesi (NIR) bölgelerini görünür bölgeye dönüştürerek daha yüksek oranda ışığın kullanılması sağlanmaktadır (Yao ve ark., 2016; Zalas ve Klein, 2012). Böylelikle lantanit grubundaki elementlerin katkısıyla beraber güneş pilleri için en önemli parametre olan akım yoğunluğu veya açık devre voltaj parametreleri geliştirilmektedir. Ayrıca, literatür çalışmalarında görüleceği üzere demir (Fe), alüminyum (Al), karbon (C) gibi elementler de katkılanarak  $TiO_2$  fotoanodunun başta akım akım yoğunluğu olmak üzere belirli özellikleri iyileştirilerek pil performansının artırıldığı bilinmektedir (Li ve ark., 2016; Liu, 2014).

Yapılan bu çalışmada ise BDGP’nin performansında belirleyici bir rol oynayan  $TiO_2$  fotoanoduna farklı oranlarda Cu elementinin katkısı yapılarak üretilen güneş hücrelerinin performansına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; boya ile duyarlaştırılmış saf  $TiO_2$  yapısı ile elde edilmiş güneş hücresine kıyasla, katkılanan % 1’lik Cu oranı ile yapılan güneş hücresinde akım yoğunluğunun % 23 artış gösterdiği, verimin ise yaklaşık % 15 gelişim gösterdiği anlaşılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

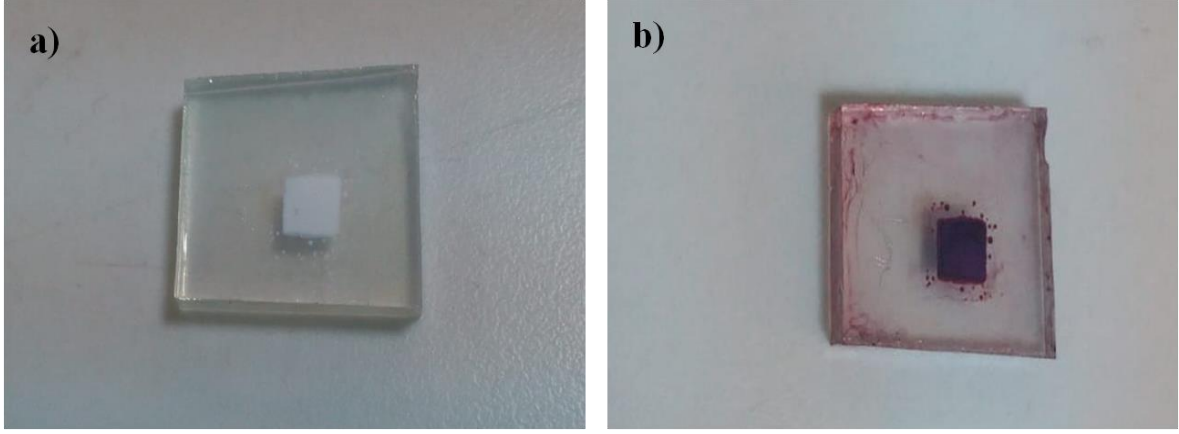
Pasta hazırlamada kullanılan  $TiO_2$  nano-toz (P25), titanyum tetra-izopropoksit (TTIP, % 99.0), etanol (% 99.5), etil selüloz, acetic acid, katkı malzemesi olarak bakır (II) klorür, boya kaynağı N-719 olarak bilinen Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II), elektrolit kaynağı olarak Potasyum iyodür ve iyot, karşıt elektrolit kaynağı olarak chloroplatinic acid hexahydrate ve alttaş olarak da flor katkılı kalay oksit (FTO) ticari olarak Sigma-Aldrich üzerinden temin edilmiştir.

### 2.2. Saf $TiO_2$ ve Cu Katkılı $TiO_2$ Sentezi

Saf  $TiO_2$  ve Cu katkılı  $TiO_2$  sentezi sol jel yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Sentezlenme basamakları kısaca özetlenecek olursa; belirli miktarda alınan  $TiO_2$  nano-toz bir beherde etanol ile iyice karıştırılıp tam çözünmesi (büyük partikül kalmayacak şekilde) sağlandıktan sonra çok az miktarda TTIP katılarak pastanın jel kıvamına gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra bir miktar etil selüloz iki damla asidik asit damlatılarak karıştırılmaya devam edilmiştir. Bu karıştırma işlemiyle beraber  $TiO_2$  pastası çekilmeye hazır hale getirilmiştir. Diğer taraftan ise önceden iki farklı beher içerisinde etanol içerisinde çözdürülmüş bakır (II) klorür ile aynı işlemler kullanılarak % 1 ve % 5 oranında Cu katkılı  $TiO_2$  pasta hazırlanmıştır.

### 2.3. BDGP'nin Üretimi

Hazırlanmış saf ve katkılı  $TiO_2$  pastalar maske yardımıyla flor katkılı kalay oksit (FTO) iletken camları üzerine tek kat çekilerek önce oda sıcaklığında 5 dk bekletildi sonra  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 5 dk kurumaya bırakıldı. Daha sonra kuruyan sıcaklığının düşmesi için pasta temiz bir zemin üzerinde bekletildikten sonra pastanın üzerine bir kat daha çekim yapılarak önceki işlemin aynısı uygulandı. Kuruyan  $TiO_2$  pastalar daha sonra kristallenmesi ve yüzeye tutunmalarının artırılması amacıyla  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat tavlama yapıldı. Pastalar soğuduktan sonra metanol içinde çözdürülmüş N-719 boya çözeltisine gömüldü ve karanlık koşullar altında 18 saat boyanın içinde bekletilmiştir. Filmleri boya içerisinde 18 saat bekletildikten sonra temiz metanol içerisinde birkaç kez daldırıp çıkararak tutunmayan boya moleküllerinin yüzeyden düşürülmesi sağlandı. Pilin diğer parçaları olan iyodür elektrolit ( $I^3-/I^-$ ) ve karşıt elektrot olan platin (Pt) (Sonmezoglu ve ark., 2014 ve Tas ve ark., 2017) çalışmaları referans alınarak üretilmiştir. Şekil 1'de % 1 katkılı  $Cu:TiO_2$  fotoanodunun N-719 boya çözeltisine daldırılmadan önceki ve daldırdıktan sonraki görüntüsünün dijital resimleri verilmiştir. Şekil 1b'de de görüldüğü gibi boyanın fotoanot üzerine iyi bir şekilde tutunma gösterdiği gözlemlenmiştir. Üretilen tüm fotoanotların aktif alanı  $0.16\text{ cm}^2$  alana sahip standart maske kullanımı yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Hazırlanan % 1 Cu katkılı  $TiO_2$  fotoanodunun boyaya daldırılmadan a) önceki b) 18 saat boyada bekledikten sonraki görüntüsü

### 2.4. Karakterizasyon Teknikleri

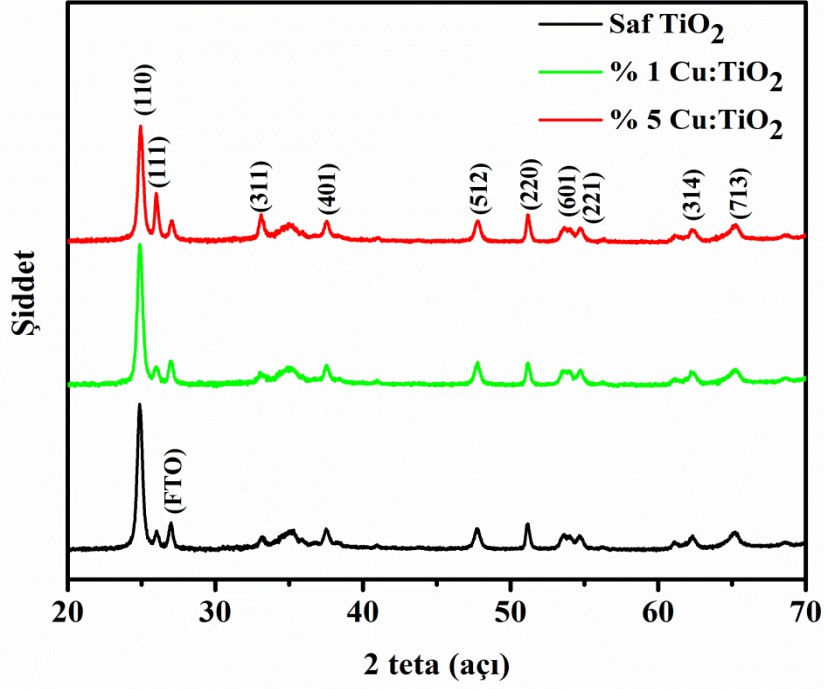
Üretilen fotoanotların kristal yapıları Bruker D8 Advance with DAVINCI model X-ışınları difraktometre (XRD) ile analiz edilmiştir. Fotoanotların yüzey morfolojileri Hitachi marka SU500 model alan emisyonlu-taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) yardımıyla karakterize edilmiştir. Filmlerin optiksel ölçümleri SHIMADZU UV-vis ile alınmıştır. Hücrelerin akım-gerilim analizleri ise oda sıcaklığında Keithley 2400 model sistem yardımıyla  $100\text{ mW.cm}^{-2}$  aydınlatma şiddeti altındaki ölçülmüştür.

## 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

### 3.1. Yapısal Özellikler

Üretilen  $TiO_2$  fotoanotlarının fazlarının ve kristalite kalitesinin belirlenmesi adına XRD analizleri yapılmıştır. Elde edilen saf  $TiO_2$  ve Cu katkılı  $TiO_2$  fotoanotlarının XRD desenleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 elde edilen desenler XRD kütüphanesi yardımıyla yapılan eşleştirmeler neticesinde tüm piklerin (JCPDS no:00-0046-1238) saf  $TiO_2$  pikleriyle yüzde yüz eşleşme gösterdiği tespit edilmiştir.  $TiO_2$  piklerinin dışında Cu veya  $CuO$  gibi ikincil bir faza ait pikler ise gözlemlenmemiştir. Şekil 2 dikkatlice incelendiğinde ise katkı ile beraber baskın pik olan (110) yönelimindeki pikin şiddetinde kısmi azalmaların olduğu gözlemlenmektedir. Bu azalma miktarı artan katkı ile birlikte artış göstermektedir. Pik şiddetindeki bu azalma  $TiO_2$  kristal yapısında Cu iyonlarının yerleşmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Tang ve ark., 2013).

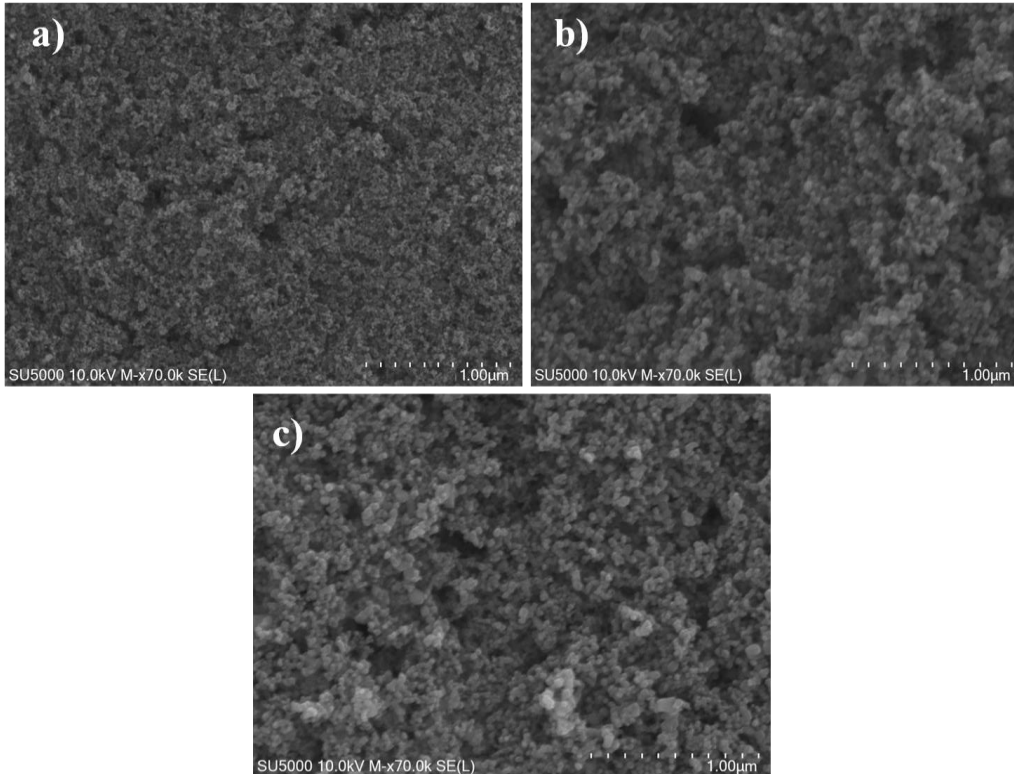
XRD desenlerinde elde edilen eğriler kullanılarak Scherrer denklemi yardımıyla saf  $TiO_2$  ve Cu katkılı  $TiO_2$  numunelerinin kristalite boyutları belirlenmiştir. Elde edilen saf  $TiO_2$ , % 1 Cu katkılı  $TiO_2$  ve % 5 Cu katkılı  $TiO_2$  numuneleri için kristalite boyutları sırasıyla  $20.8\text{ Å}$ ,  $19.5\text{ Å}$  ve  $17.1\text{ Å}$  elde edilmiştir. Artan katkı oranlarıyla beraber kristalite boyutlarında azalma olmuştur. Bu azalmanın sebebi Cu iyonlarının katkısıyla beraber yeni tane sınırlarının meydana gelmesi ve bu tane sınırlarıyla beraber kristalite boyutunun büyümesini engellenmesinden kaynaklanmaktadır (Sahu ve Biswas, 2011).



Şekil 2. Üretilen saf  $\text{TiO}_2$ , % 1 Cu katkılı  $\text{TiO}_2$  ve % 5 Cu katkılı  $\text{TiO}_2$  fotoanotların XRD desenleri

### 3.2. Yüzey Özellikleri

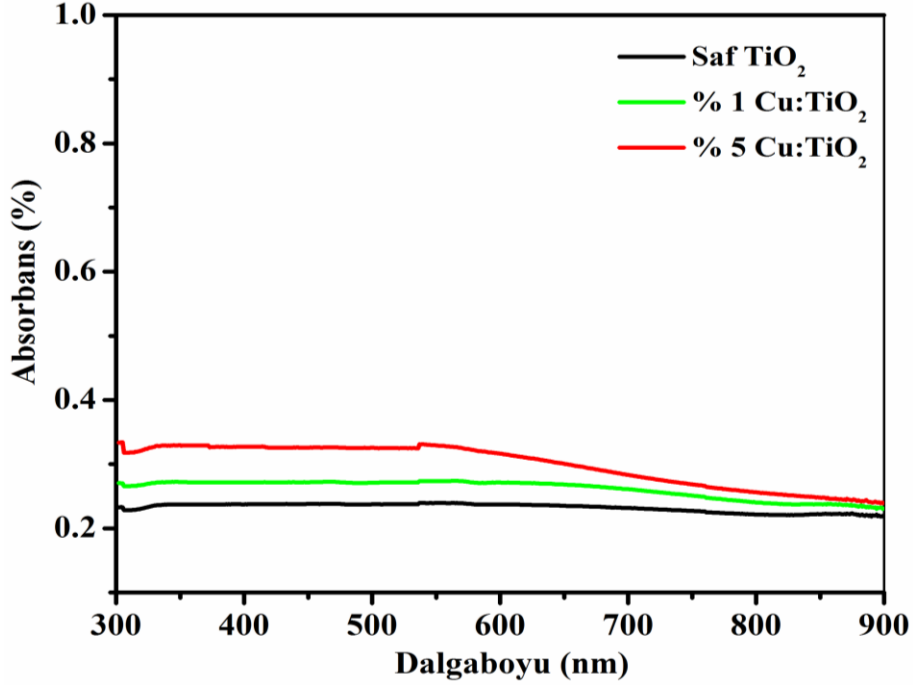
Üretilen fotoanotların yüzey analizlerinin belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. SEM yardımıyla alınan görüntüler Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3a saf  $\text{TiO}_2$ 'nin, Şekil 3b % 1 Cu katkılı  $\text{TiO}_2$ 'nin, Şekil 3c % 5 Cu katkılı  $\text{TiO}_2$ 'nin SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 3a incelendiğinde saf  $\text{TiO}_2$ 'ye ait numunede taneler oldukça homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Yapı içerisine Cu iyonlarının dahil olmasıyla beraber tanelerde büyümelerin arttığı ve kısmi birikmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Şekil 3c'de gösterilen % 5'lik katkıının olduğu fotoanotta tanelerin büyümesinin daha belirgin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3. a) Saf  $\text{TiO}_2$ 'nin b) % 1 Cu katkılı  $\text{TiO}_2$ 'nin, c) % 5 Cu katkılı  $\text{TiO}_2$ 'nin SEM görüntüleri

### 3.3. Optik Özellikleri

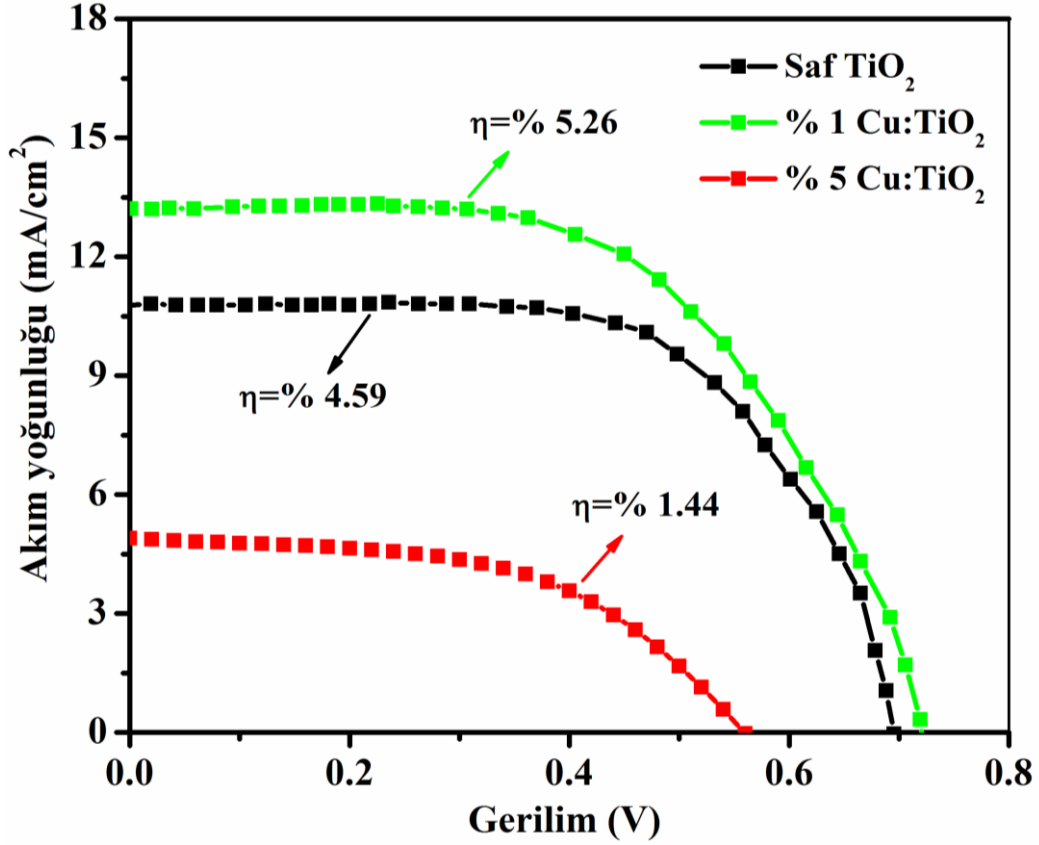
Optiksel analizler aygıt tasarımında önemli bir analiz çeşidi olarak kabul edilmektedir. Özellikle güneş hücrelerinin tasarımında optik analizler aygıt performansı hakkında ön bilgi vermektedirler. Üretilen saf  $TiO_2$  ve Cu katkılı  $TiO_2$  fotoanotların soğurma-dalgaboyu analizleri UV-vis spektrometre yardımıyla ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4'de gösterilmiştir. Elde edilen soğurma-dalgaboyu eğrilerinde herhangi bir pik ve kayma gözlemlenmemiştir. Fakat artan Cu oranıyla beraber soğurma şiddetinde artış meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4. Saf  $TiO_2$  ve Cu katkılı  $TiO_2$  fotoanotların soğurma eğrileri

### 3.4. BDGP'nin Fotovoltaik Performansı

Cu katkısının BDGP üzerindeki etkisini anlamak için farklı Cu katkı oranları ile hazırlanmış  $TiO_2$  fotoanotları ile pil yapımı gerçekleştirildi.  $100 \text{ mW.cm}^{-2}$  aydınlatma şiddeti altındaki ve oda sıcaklığında ölçülen farklı güneş hücrelerine ait akım yoğunluğu-gerilim (J-V) eğrileri Şekil 5'de sergilenmiştir. Şekil 5'de gösterilen sonuçlar irdelendiğinde saf  $TiO_2$  hücrelerine ait akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ )  $10.83 \text{ mA.cm}^{-2}$  iken bu değerler % 1 Cu katkılı  $TiO_2$  için  $13.36 \text{ mA.cm}^{-2}$ , % 5 Cu katkılı  $TiO_2$  için  $4.87 \text{ mA.cm}^{-2}$  olarak elde edilmiştir. Cu katkı oranının düşük olduğu (% 1'lik katkı) hücrede katılan Cu iyonları ile beraber hızlı ve verimli yük taşıma oranının artması ve düşük elektron rekombinasyon etkisiyle  $J_{sc}$ 'nin artış gösterdiği görülmüştür (Chahid ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2016). Ayrıca, Cu iyonlarının  $TiO_2$  filminde, boya malzemesinin tutunma kabiliyetini arttırmasından dolayı  $J_{sc}$  değerinde iyileşmelerin olduğu söylenebilir.  $J_{sc}$ 'deki bu iyileşme ile beraber pil veriminin yaklaşık olarak % 15 (% 4.59'dan % 5.26'ya) gelişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu iki pil için elde edilen açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) değerleri ise sırasıyla 0.70 V ve 0.72 V'tur. Bu iki hücre için elde edilen  $V_{oc}$  değerlerinde çok düşük bir iyileşmenin olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan yüksek oran olan % 5 Cu katkılı hücrede ise hem  $J_{sc}$  hem de  $V_{oc}$  değerinde şiddetli bir azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu azalma yüksek orandaki Cu iyonlarının  $TiO_2$  yapısını bozarak rekombinasyon oranını arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Shalan ve Rashad, 2013).



Şekil 5. Üretilen BDGP2nin akım-gerilim eğrileri

#### 4. Sonuç

BDGP performansında kritik bir göreve sahip olan ve barındırdığı dezavantajlarından dolayı güneş hücrelerinin performansını sınırlandırıcı olarak etki eden TiO<sub>2</sub> tabanlı fotoanotların iyileştirilmesi amacıyla yapı içerisine farklı oranlarda Cu katkısı yapılmıştır. Katkısı yapılan Cu iyonları ile birlikte başta kristal yapı ve yüzey özelliklerinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Katkı ile beraber kristalite boyut düşüş gösterirken, yüzey tane dağılımlarında büyüme ve kısmı kümelenmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Fotoanoda yapılan % 1'lik ve % 5'lik Cu katkısı pil performansını ciddi anlamda etkilemiştir. Şöyle ki yapılan yapılan %1'lik Cu katkısı ile beraber Jsc değeri 10.83 mA.cm<sup>-2</sup>'den 13.36 mA.cm<sup>-2</sup> değerine yükselmiştir. Bu artışın sonucu olarak da %1'lik Cu katkılı hücrenin verim değeri % 4.59'dan % 5.26 değerine yükseltmiştir. Diğer taraftan ise %5'lik Cu katkısı ile beraber pil verimlilik değerinde % 70 civarında bir kayıp olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, BDGP'nin performansı yapılacak ideal katkı oranları ile geliştirilebilir olduğu ve performansın artılmasında katkı işleminin etkili bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır.

#### Kaynakça

- Akin, S., Acikgoz, S., Gulen, M., Akyurek, C., & Sonmezoglu, S. (2016). Investigation of the photoinduced electron injection processes for natural dye-sensitized solar cells: the impact of anchoring groups. *RSC Advances*, 6, 85125-85134.
- Akin, S., Erol, E., & Sonmezoglu S. (2014). Enhancing the electron transfer and band potential tuning with long-term stability of zno based dye-sensitized solar cells by gallium and tellurium as dual-doping. *Electrochimica Acta*, 225, 243-254.
- Akman, E. Akin S, Karanfil, G. & Sonmezoglu, S. (2013). Organik güneş pilleri. *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 14(1), 1-30.
- Chahid, B. S., Santos, D. M., & Alcántara, R. (2019). Dye-sensitized cu-doped tio<sub>2</sub> solar cells with a double flat. *Springer Nature Switzerland*, 940-946.
- Li, R., Zhao, Y., Hou, R., Ren, X., Yuan, S., Lou, Y., Wang, Z., Li, D., & Shi, L. (2016). Enhancement of power conversion efficiency of dye sensitized solar cells by modifying mesoporous TiO<sub>2</sub> photoanode with Al-doped TiO<sub>2</sub> layer. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 319-320, 62-69.
- Liu, Q. P. (2014). Analysis on dye-sensitized solar cells based on Fe-doped TiO<sub>2</sub> by intensity-modulated photocurrent spectroscopy and Mott-Schottky. *Chinese Chemical Letters*, 25, 953-956.
- Ozturk, T., Gulveren, B, Gulen, M., Akman, E., & Sonmezoglu, S. (2017). An insight into titania nanopowders modifying with manganese ions: A promising route for highly efficient and stable photoelectrochemical solar cells. *Solar Energy*, 157, 47-57.
- Roose, B., Pathak, S., & Steiner, U. (2015). Doping of TiO<sub>2</sub> for sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews*, 44, 8326-8349.

- Shalan, A. E., & Rashad, M. M. (2013). Incorporation of  $Mn^{2+}$  and  $Co^{2+}$  to  $TiO_2$  nanoparticles and the performance of dye sensitized solar cell, *Applied Surface Science*, 283, 2013, 975-981.
- Sahu, M., & Biswas, P. (2011). Single-step processing of copper-doped titania nanomaterials in a flame aerosol reactor, *Nanoscale Research Letters*, 6, 441-155.
- Sonmezoglu, O. A., Akin, S., Terzi, B., Mutlu, S., & Sonmezoglu, S. (2016). An effective approach for high-efficiency photoelectrochemical solar cells by using bifunctional dna molecules modified photoanode. *Advanced Functional Materials*, 26, 8776–8783.
- Sonmezoglu, S., Akyurek, C., & Akis, H. (2014). Modification of juglon dye as a sensitiser in dye-sensitised solar cells. *IET Optoelectron*, 8, 270-276.
- Tang, J., Chen, X., Liu, Y., Gong, W., Peng, Z., Cai, T., Luo, L., & Denga, Q. (2013). Samarium-doped mesoporous  $TiO_2$  nanoparticles with improved photocatalytic performance for elimination of gaseous organic pollutants. *Solid State Sciences*, 15, 129-136.
- Tang, X., Liu, X., Zhang, L., Xing, Y., & Tian, Y. (2014). Low crystallinity  $TiO_2$  film with inherent low oxygen vacancy for sensitized solar cells. *Chemical Physics*, 441, 121-127.
- Tas, R., Can, M., & Sonmezoglu, S. (2017). Exploring on photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells using polyaniline as a counter electrode: role of aluminum-solvent interactions. *IEEE Journal Of Photovoltaics*, 7, 792-801.
- Yao, N., Huang, J., Fu, K., Deng, X., Ding, M., & Xu, X., (2016). Rare earth ion doped phosphors for dye-sensitized solar cells applications. *RSC Advances*, 6, 17546-17559.
- Zalas, M., & Klein, M. (2012). The Influence of Titania Electrode Modification with lanthanide ions containing thin layer on the performance of dye-sensitized solar cells. *International Journal of Photoenergy*, 1-8.
- Zhou, L., Wei, L., Yang, Y., Xia, X., Wang, P., Yu, J., & Luan, T. (2016). Improved performance of dye sensitized solar cells using Cu-doped  $TiO_2$  as photoanode materials: Band edge movement study by spectroelectrochemistry. *Chemical Physics*, 475, 1-8.