
Araştırma Makalesi / Research Article

Elektro Eğirme Yöntemiyle Üretilen TiO₂-RGO Kompozit Tabanlı Kuantum Nokta Duyarlı Güneş Pilleri

Mesut YALÇIN*

*Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis
(ORCID: 0000-0002-6171-3018)*

Öz

Bu çalışmada öncelikle modifiye Hummers metodu kullanılarak grafen oksit (GO) üretilmiştir. Üretilen grafen oksit kimyasal yolla indirgenerek, indirgenmiş grafen oksit (RGO) sentezlenmiştir. Sentezlenen RGO ve TiO₂ çözeltileri kullanılarak tek adım elektro eğirme yöntemi ile saf TiO₂ ve TiO₂-RGO tabanlı fotoanot yüzeylere sahip kuantum nokta duyarlı güneş pilleri üretilmiştir. Üretilen güneş pillerinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) ölçümleri yapılmıştır. Saf TiO₂ fotoanota sahip güneş pilinin kısa devre akımı yoğunluğu 0,672 mA/cm², TiO₂-RGO kompozit fotoanota sahip güneş pilinin ise 0,770 mA/cm² olarak ölçülmüştür. Ayrıca güneş pillerinin admitans spektroskopisi 10 kHz-1MHz frekans aralığında ölçülmüştür. Üretilen güneş pillerinin kapasite-voltaj (C-V), iletkenlik-voltaj (G-V) karakteristikleri seri direnç etkisi dikkate alınarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektro eğirme yöntemi, kuantum nokta duyarlı güneş pili, TiO₂, Grafen

TiO₂-RGO Composite Based Quantum Dot Sensitized Solar Cells via Electrospinning Technique

Abstract

In this study, graphene oxide (GO) was prepared by the modified Hummers method. Later the synthesized graphene oxide was reduced to reduced graphene oxide (RGO) by the chemical reduction process. In summary, the pure TiO₂ and TiO₂-graphene composite photoanode based quantum dot sensitized solar cells have been fabricated by the one-step method of electrospinning technique. The solar cells fabricated have been measured short current density (J_{sc}) and open-circuit voltage (V_{oc}). The short current densities of TiO₂ and TiO₂-RGO-based composite quantum dot solar cells are 0,672 mA/cm² and 0,770 mA/cm², respectively. In addition, admittance spectroscopy of solar cells were measured in a variable frequency ranges of 10 kHz-10 MHz. The fabricated of solar cells were investigated the capacitance-voltage (C-V), conductance-voltage (G/ω-V) characteristics by attention the series resistance (R_s) effect.

Keywords: Electrospinning technique, quantum dot sensitized solar cell, TiO₂, Grafen

1. Giriş

Grafit [1], siyah karbon [2], gözenekli karbon [3], karbon nanotüp [4, 5] ve grafen [6-8] gibi karbon tabanlı malzemeler çok çeşitli optoelektronik cihazlarda kullanılacak potansiyele sahip dikkat çekici malzemelerdir [9, 10]. Grafen; bal peteği örgü şeklinde, sp² karbon atomu bağlarından oluşan bir atom kalınlığında, ince tabaka şeklinde bir yapıdır. Grafen, çok çeşitli karbon tabanlı malzemeleri üretmek için kullanılacak temel bir malzeme olması bakımından son yıllarda malzeme bilimi ve katı hal fiziği alanında çalışan araştırmacıların gözde malzemelerinden biridir. Grafen, çok çeşitli karbon tabanlı malzemeleri üretmek için kullanılacak temel bir malzemedir. Tek tabaka halindeki grafen son derece ince bir yapıda olup, beyaz ışığın yaklaşık %2,3'ünü soğurabilme özelliğine sahiptir [11]. Ayrıca, grafen sahip olduğu yüksek iletkenlik, mekanik direnç ve ayarlanabilen bant aralığı [12] gibi özellikleri sayesinde, kompozit bir yapı içerisinde kullanılacak potansiyele sahip uygun bir karbon tabanlı

*Sorumlu yazar: mesut1974@gmail.com

Geliş Tarihi: 24.06.2020, Kabul Tarihi: 13.07.2020

malzemedir. Bu nedenle; TiO_2 gibi oksit bir yarı iletken grafen katkılayarak üretilecek kompozit bir yapı, kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin fotoanot malzemesi olarak verimli bir şekilde kullanılabilir. Grafen katkılı kompozit malzemeler kullanılarak üretilen fotoanotlar sayesinde, kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin fotovoltaik özellikleri önemli ölçüde artırılabilir mi?

Üretilen kompozit yapı içerisindeki grafen, sahip olduğu özellikleri nedeniyle yapı içerisinde yeni elektron taşıma yolları oluşturur. Oluşan bu ilave yollar elektronların enjeksiyonunu hızlandırarak yük rekombinasyonlarını önemli ölçüde azaltır [13]. Rekombinasyonların azalması özellikle kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin verimliliğini artırmada en önemli rolü üstlenen parametredir. Dolayısıyla grafen katkılı kompozitler sayesinde daha verimli kuantum nokta duyarlı güneş pili üretimi yapılabilir. Grafen katkılı kompozit malzemeler çoğunlukla hidrotermal [14, 15], elektro eğirme [16], solvotermal [17] gibi farklı yöntemler kullanılarak üretilir. Üretilen bu kompozit malzemeler çoğunlukla bir macun kıvamına getirilerek, farklı tekniklerle şeffaf iletken camlar üzerine kalın bir film şeklinde kaplanır. Oluşan bu kalın filmler kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin fotoanotunu oluşturur. Bu süreç oldukça uzun bir zamanı ve hassas deneyleri gerektirir. Ancak elektro eğirme yöntemi kullanılarak grafen katkılı nanokompozit yapılar tek seferde ve daha kolay bir şekilde iletken camlar üzerine kaplanabilir. Böylece daha uygun, hızlı ve büyük ölçekli fotoanot yüzeyler üretmek mümkün olabilir.

Bu çalışmada tek adım elektro eğirme yöntemi kullanılarak TiO_2 -RGO kompozit yapılar üretilmiş ve üretilen kompozitler şeffaf iletken camlar üzerine yine aynı yöntemle kaplanarak kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin fotoanotları oluşturulmuştur. Oluşturulan fotoanot yüzeyler SILAR (iyonik tabakaların sıralı olarak kaplanması ve reaksiyonu) yöntemi kullanılarak CdS kuantum noktalar ile kaplanmıştır. Böylece kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin fotoanotları üretilmiştir. Üretilen güneş pillerinin akım-gerilim karakterizasyonu AM 1.5 G (100 mW/cm^2) standart şartlar altında KEITHLEY-4200 yarı iletken karakterizasyon cihazı ile yapılarak güneş pillerinin fotovoltaik parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca pillerin kapasiteleri ölçülmüş ve sıvı eklem yaklaşımı kullanılarak seri dirençleri 10 kHz-1MHz aralığında hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

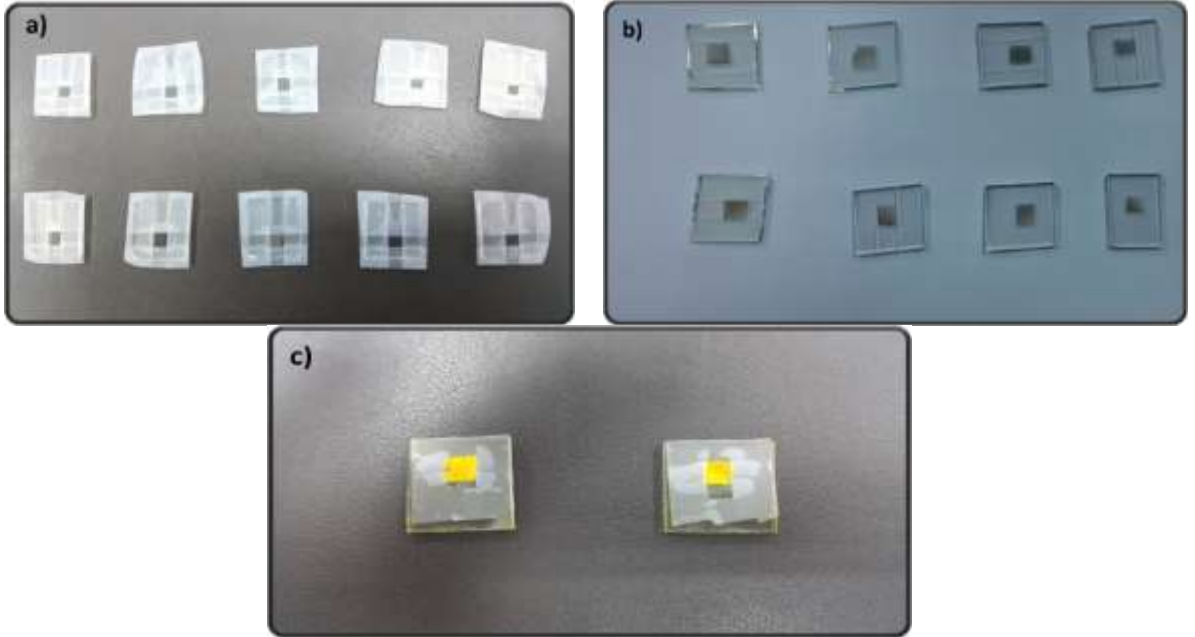
2.1. TiO_2 -RGO/CdS Fotoanot Hazırlama

Öncelikle, 0,5 g polivinil piroidon (PVP) 3 mL metanol içerisine ilave edilerek tamamen çözünmesi sağlandı. Daha sonra 1 mL asetik asit içerisine 1 mL titanyumisopropoxide (TIP) damla damla eklenerek karıştırıldı. TIP çözeltisi başlangıçtaki PVP çözeltisine eklenerek karıştırma işlemine devam edildi. Modifiye Hummers metodu [18] kullanılarak üretilen grafen oksit indirgenmesi ile elde edilen ağırlıkça % 0,5 indirgenmiş grafen oksit (RGO), su ve etanol karışımı içerisinde tamamen çözüne kadar karıştırıldı. Tamamen çözünen RGO çözeltisi TIP ve PVP' den oluşan çözelti içerisine damla damla eklenerek, şeffaf bir çözelti elde edilene kadar karıştırıldı. Böylece TiO_2 -RGO çözeltisi oluşturuldu. Fotoanot yüzeyler için 1x1 cm ebatlarında FTO camlar kesildi. Kesilen camlar etanol, aseton ve deiyonize su ile temizlenerek azot gazı ile kurutuldu. FTO camların $0,25 \text{ cm}^2$ 'lik kısmı açıkta kalacak şekilde bantlandı. Üretilen TiO_2 -RGO çözeltisi elektro eğirme işleminin yapılabilmesi için bir şırıngaya dolduruldu. Şırınga iğnesi ile FTO yüzey arasındaki mesafe 10 cm olacak şekilde ayarlanarak, iğne ucu ile FTO yüzey arasına uygulanan yüksek gerilim (7 kV) altında, çözeltinin iğne ucundan akış hızı 1 mL/h olacak şekilde ayarlanarak, FTO yüzeye TiO_2 -RGO çözeltisi elektro eğirme yöntemiyle direk olarak kaplandı [19]. Kaplanan filmler $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat fırımlandı. Şekil 1'de gösterilen FYTRONIX FY 7000 ELECKROSPUN SYSTEM elektro eğirme sistemi kullanılarak, FTO yüzeyler TiO_2 -RGO ile kaplanarak güneş pillerinin fotoanotları üretildi.

Üretilen fotoanotlar SILAR yöntemi kullanılarak CdS kuantum noktalar ile kaplandı. Öncelikle, 0,3 M $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 10 mL etanol içerisindedir, 0,3 M Na_2S ise 10 mL de iyonize su içerisindedir ayrı ayrı çözüldü. Fotoanotlar öncelikle $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ çözeltisine 3 dakika daldırıldı. Daha sonra etanol ile yıkanarak 3 dakika Na_2S çözeltisine daldırıldı. Tekrar etanol ile yıkanarak $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 10 dakika kurutuldu. Böylece bir SILAR döngüsü tamamlandı [20]. Bu işlem 3 SILAR döngüsü olacak şekilde tekrarlandı. Fotoanot yüzeyler CdS ile kaplandıktan sonra $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat fırımlandı. Böylece CdS kuantum nokta ile kaplanmış fotoanotlar üretilmiş oldu. Maskelenen, üretimi yapılan ve CdS ile kaplanmış fotoanotlar sırasıyla Şekil 2'de gösterildi.



Şekil 1. Elektro eğirme sistemi



Şekil 2. a) Maskelenmiş FTO camlar b) TiO₂-RGO filmler c) CdS kuantum nokta kaplanmış filmler

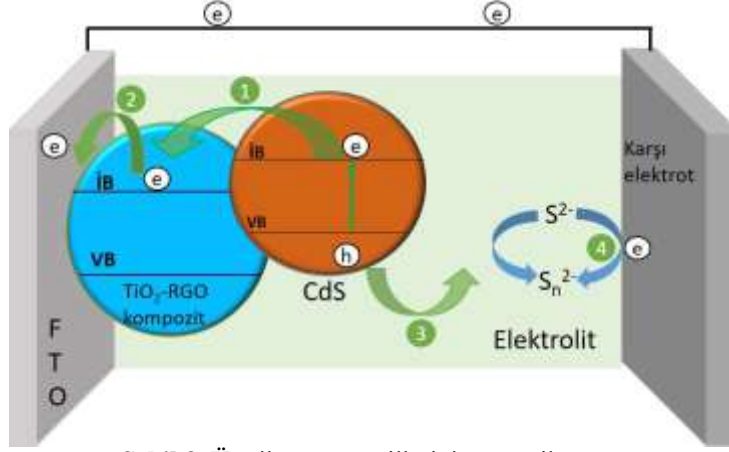
2.3. Elektrolit Hazırlama

Öncelikle 7 ml etanol ve 3 ml'de iyonize su karışımı içerisinde 0,5 M Na₂S eklendi. Na₂S tamamen çözünene kadar karıştırıldı. Karıştırma işlemi sürerken, çözeltiliye 2 M kükürt eklendi. Çözelti tamamen şeffaf olana kadar karıştırma işlemine devam edildi. Daha sonra 0,2 M KCl eklenerek 1 saat daha karıştırıldı [21]. Böylece sıvı elektrolit üretildi.

2.4. Kuantum Nokta Duyarlı Güneş Pili Üretimi

Elektro eğirme yöntemiyle FTO yüzey üzerine kaplanmış TiO₂-RGO kompozit üzerine CdS kuantum noktaların bağlanmasıyla oluşturulan fotoanot ile Pt karşıt elektrot arasına sıvı elektrolit doldurularak, kuantum nokta duyarlı güneş pilleri üretildi. Üretilen güneş pillerinin şematik yapısı Şekil 3'te

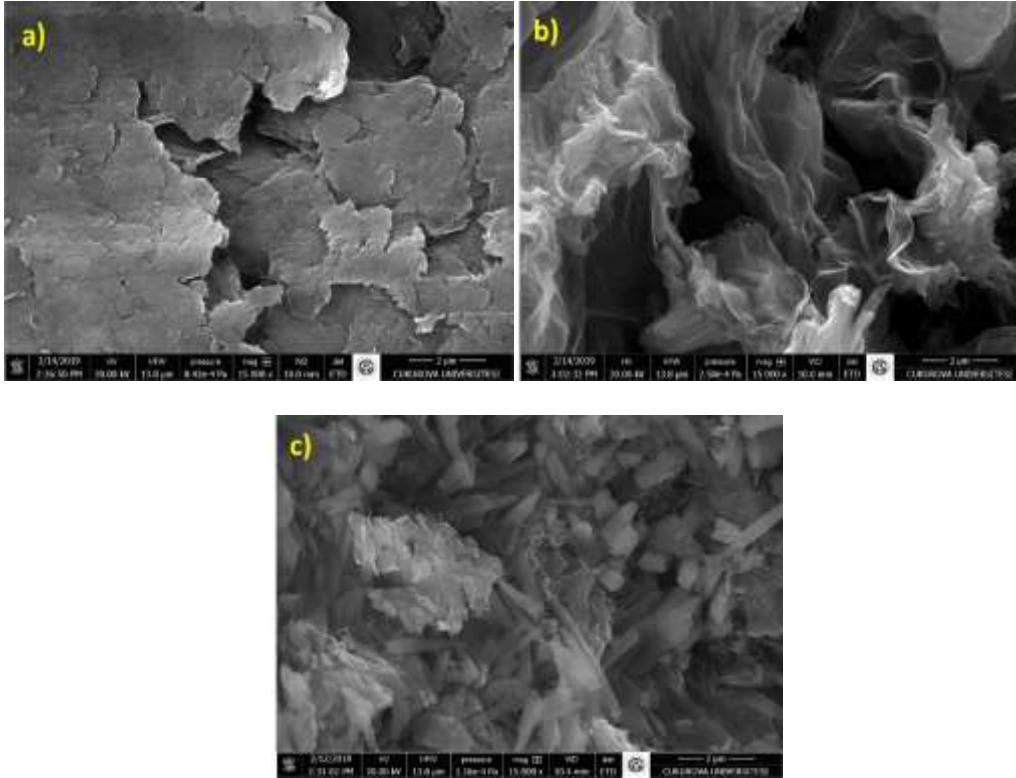
gösterildi. Bir kuantum nokta duyarlı güneş pilinde, CdS kuantum noktalar, ışık ile aydınlatıldığında uyarılan elektronlar kompozit yapının iletkenlik bandına geçer ve grafenin etkisiyle rekombinasyona uğramadan hızlı bir şekilde FTO yüzeye oradan da karşı elektrota ulaşır. Karşı elektrota ulaşan elektron, yükseltgenmiş olan elektrolitin indirgenmesini sağlar. Böylece bu döngü tekrarlanarak devam eder. Bu döngünün sürmesi dış devrede bir akımın oluşmasını sağlayarak, güneş pilini çalıştırır.



Şekil 3. Üretilen güneş pillerinin şematik yapısı

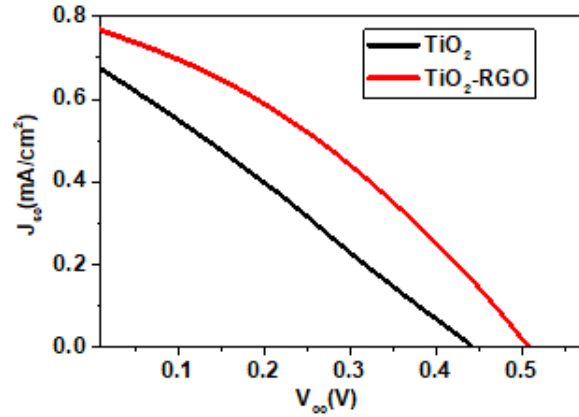
3. Bulgular ve Tartışma

Üretilen grafen oksit, indirgenmiş grafen oksit ve TiO_2 -RGO kompozit yapıların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4'te sırasıyla verildi. Grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit birbirine benzer yapıda olsa da, indirgenme sonrasında tabakaların daha incelendiği ve belirginleştiği gözlemlendi. Oluşan bu tabakalı yapının artması, grafen oksitin başarılı bir şekilde indirgenmiş olduğunu bir göstergesidir. TiO_2 -RGO'nun görüntüleri incelendiğinde, voltajın etkisiyle fiber benzeri çubuk yapıların oluştuğu gözlemlendi.



Şekil 4. a) GO'nun b) RGO'nun c) TiO_2 -RGO'nun taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüleri

Özetle bu çalışmada, elektro eğirme yöntemiyle üretilen TiO₂-RGO tabanlı fotoanotlara sahip kuantum nokta duyarlı güneş pilleri üretildi. Üretilen güneş pillerinin akım-gerilim (I-V) ölçümleri solar simülatöre bağlı KEITHLEY-4200 yarı iletken karakterizasyon cihazı ile yapıldı. Güneş pillerinin akım yoğunluğu-açık devre gerilimi (J_{sc}-V_{oc}) grafikleri Şekil 5'te verildi. Grafik incelendiğinde, TiO₂ fotoanota sahip güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğunun 0,672 mA/cm², açık devre geriliminin ise 0,444 V olduğu, TiO₂-RGO kompozit fotoanota sahip güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğunun 0,77 mA/cm², açık devre geriliminin ise 0,509 V olduğu görüldü. Hem kısa devre akım yoğunluğunun hem de açık devre geriliminin arttığı gözlemlendi. Bu artış, yapı içerisindeki grafen sayesinde oluşan ilave elektron taşınım yolları sayesinde rekombinasyonların azalmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Güneş pillerinin verimini düşüren mekanizma pili oluşturan tabakalar arasında gerçekleşen istenmeyen rekombinasyonlardır. Grafen sayesinde oluşan bu yeni elektron taşıma yolları elektronların hızlı bir şekilde taşınmasını sağlayarak, rekombinasyonları baskılamış ve akım yoğunluğunun artmasına neden olmuş olabilir [22, 23].



Şekil 5. TiO₂ ve TiO₂-RGO fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin J_{sc}-V_{oc} grafiği

Üretilen güneş pillerinin I, P_{max}-V_{oc} grafikleri çizilerek Şekil 6'da verildi. Grafikte P_{max} değerinin pik yaptığı noktadan yararlanılarak V_{max} değeri hesaplandı. Grafikler incelendiğinde grafen katkılı kompozit tabanlı güneş pilinin ürettiği gücün saf TiO₂'ye göre önemli ölçüde arttığı gözlemlendi. Bu artış Şekil 7'de çizilen P_{max}-V_{oc} grafiğinde açıkça görülmektedir. Ancak sadece akım ve gerilim ölçümü bir güneş pilinin karakterizasyonu için yeterli değildir. Üretilen güneş pillerinin dolun faktörleri (FF) ve güç dönüşüm verimlerinin (η) hesaplanması gerekir. Güneş pillerinin dolun faktörü aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [24].

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

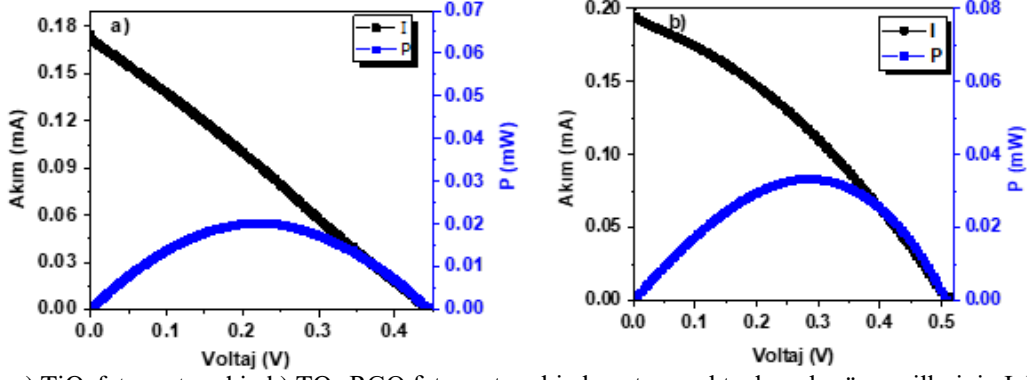
Bu eşitlikte, V_{max} maksimum güç noktasındaki voltajı, I_{max} maksimum güç noktasındaki akımı, V_{oc} açık devre gerilimini, I_{sc} ise kısa devre akımını ifade eder. Bir güneş pilinin verimi ise eşitlik 2'den yararlanılarak hesaplanabilir [24].

$$\eta = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{ışık}} \quad (2)$$

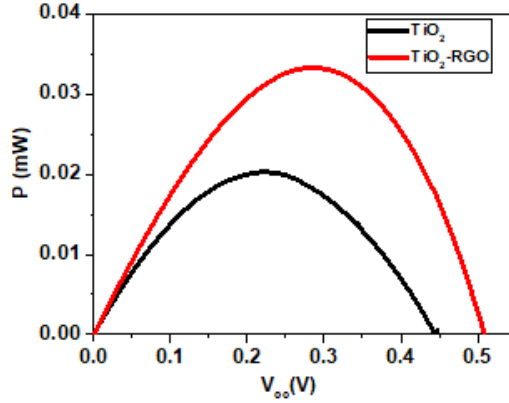
Bu eşitlikte J_{sc} kısa devre akım yoğunluğu olup, kısa devre akımının (I_{sc}) fotoanot yüzey alanına bölümünden elde edilir. P_{ışık} ise standart ölçümlerin yapılması için kullanılan aydınlatma şiddeti olup değeri 100 mW/cm² dir. Güneş pillerinin hesaplanan fotovoltajik parametreleri Tablo 1'de verildi. Tablo incelendiğinde grafen katkısının güneş pillerinin fotovoltajik parametrelerini artırdığı gözlemlendi.

Tablo 1. TiO₂ ve TiO₂-RGO fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin fotovoltajik parametreleri

Fotoanot	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
TiO ₂	0,672	0,444	0,25	0,07
TiO ₂ -RGO	0,770	0,509	0,32	0,12

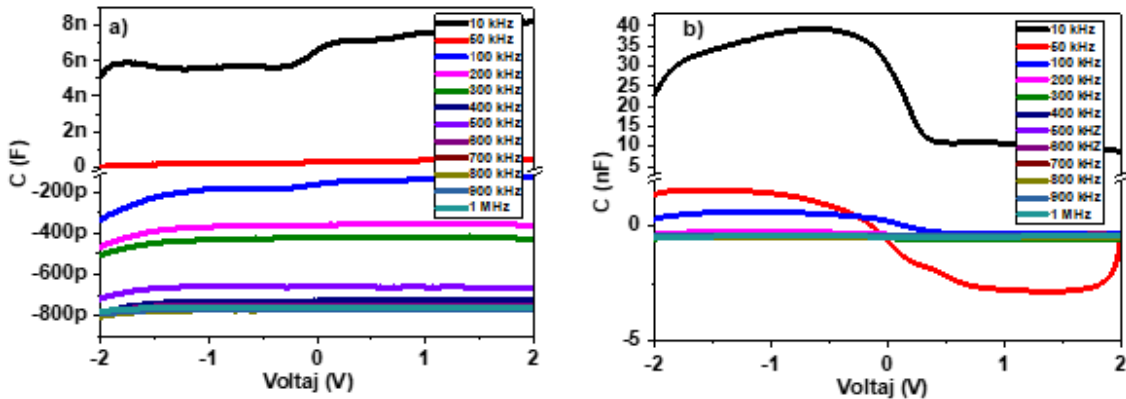


Şekil 6. a) TiO_2 fotoanota sahip b) $\text{TO}_2\text{-RGO}$ fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin I , P_{\max} - V_{oc} grafikleri



Şekil 7. TiO_2 ve $\text{TO}_2\text{-RGO}$ fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin P - V_{oc} grafiği

Üretilen güneş pillerinin 10 kHz-1MHz aralığındaki kapasite-voltaj (C-V) grafikleri Şekil 8’de verildi. Kapasite ölçümü, fotoanaot yüzeyi üzerinde biriken yük miktarının tahmin edilmesi açısından oldukça önemlidir. Kapasitenin artması yük ayrımının gerçekleşerek iletkenlik bandı üzerinde elektronların biriktiği anlamına gelir. TiO_2 fotoanaot yüzeye sahip güneş pilinin kapasitesi 10 kHz’den sonra negatife kaymıştır. Kapasitenin negatife kayması indüktif bir davranıştır. Bu davranış, FTO’dan TiO_2 ’ye enjekte olan elektronlar ile açıklanabilir [25]. Elektronların FTO üzerinden dış devreye akması istenirken, oluşan bu geri yük transferi rekombinasyonların artmasına neden olur. Rekombinasyonların artması TiO_2 fotoanota sahip güneş pilinin veriminin düşmesine sebep olur. $\text{TiO}_2\text{-RGO}$ tabanlı güneş pilinin kapasite değeri, yüksek frekanslarda düşse de negatif değer almaz. Kapasitenin pozitif değer alması; yük ayrımı sonucu oluşan elektronların, kompozit fotoanaot malzemenin iletkenlik bandında biriktiğinin bir göstergesidir. [26]. Elektronların iletkenlik bandında birikmesi, yük transferinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesine ve dolayısıyla rekombinasyonların azalmasına karşılık gelir. Azalan rekombinasyon oranı güneş pilinin veriminin artmasına neden olur.



Şekil 8. a) TiO_2 fotoanota sahip b) $\text{TO}_2\text{-RGO}$ fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin C-V grafiği

Güneş pillerinin iletkenlikleri (G) bir sıvı eklem yaklaşımı kullanılarak ölçüldü. Ayrıca seri direncin etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş iletkenlik (G_{ADJ}) değerleri hesaplanarak, G - V ve G_{ADJ} - V grafikleri çizildi. Grafikler Şekil 9'de gösterildi. G_{ADJ} eşitlik 3 kullanılarak hesaplandı.

$$G_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + (\omega C_m)^2)a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3)$$

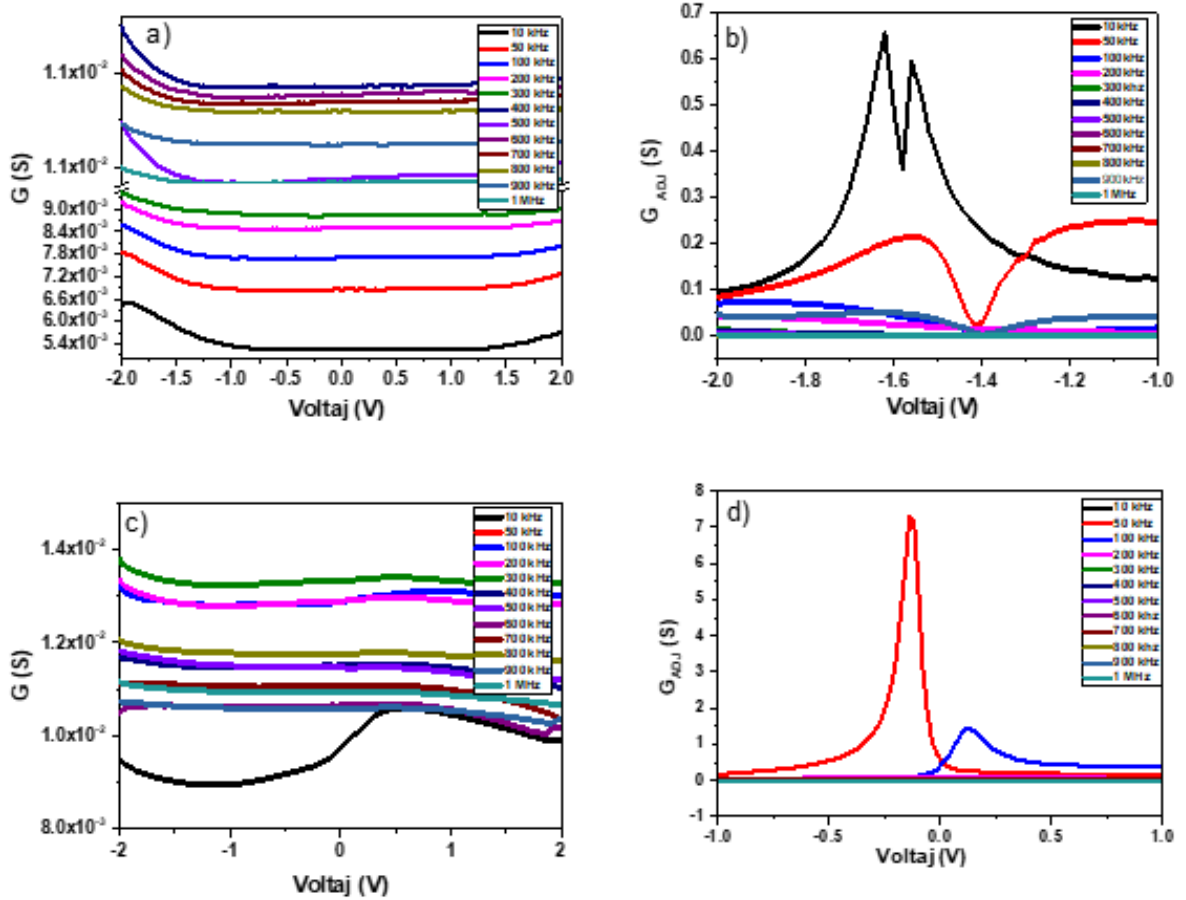
Burada G_m ve C_m sırasıyla ölçülen iletkenlik ve kapasite, ω açısal frekanstır. Eşitlikteki a ifadesi ise seri dirence bağlı bir parametredir. Bu ifade aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$a = G_m - (G_m^2 + (\omega C_m)^2).R_s \quad (4)$$

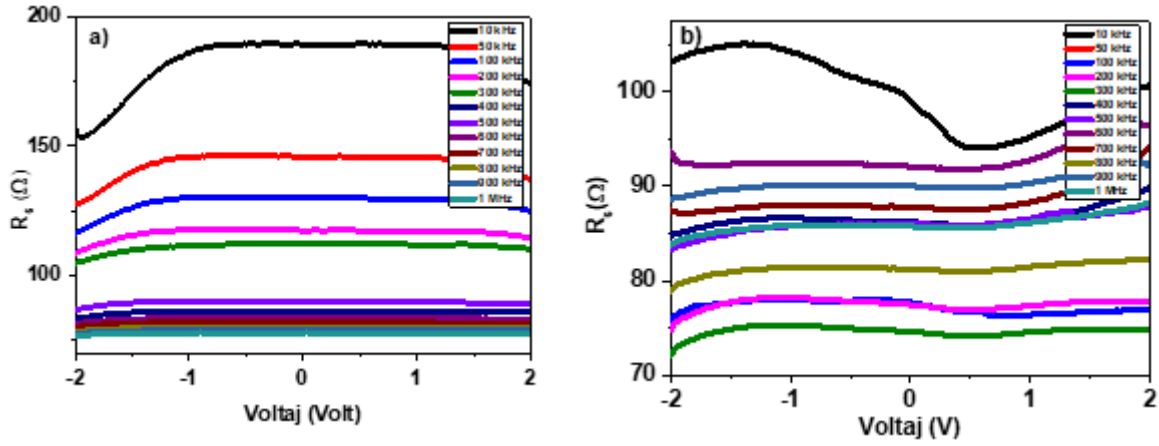
Grafikler incelendiğinde grafen katkısının iletkenliği önemli ölçüde artırdığı gözlemlendi. Grafenin iletkenliğinin yüksek olması kompozit malzemenin iletkenliğinin artmasına neden olur. Üretilen güneş pillerinin seri dirençleri sıvı eklem yaklaşımı kullanılarak hesaplandı. Seri direnç (R_s) değerleri eşitlik 5 yardımıyla hesaplandı.

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (5)$$

Fotoanotların R_s - V grafikleri Şekil 10'da verildi. Grafen katkısı ile iletkenliğin artması kompozit malzemenin seri direncinin düşmesine sebep olur. Seri direnç, tabakalar arasında oluşan ve güneş pilinin verimini düşüren bir etkidir. Seri direncin düşmesi güneş pilinin verimini artıran sebeplerden biridir.



Şekil 9. TiO_2 fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pilinin a) G - V b) G_{ADJ} - V ve TiO_2 -RGO fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pilinin c) G - V d) G_{ADJ} - V grafikleri



Şekil 10. a) TiO₂ fotoanota sahip b) TiO₂-RGO fotoanota sahip kuantum nokta duyarlı güneş pillerinin R_s-V grafikleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada elektro eğirme yöntemi kullanılarak saf TiO₂ ve TiO₂-RGO kompozit fotoanotlara sahip kuantum nokta duyarlı güneş pilleri üretildi. Elektro eğirme yöntemi sayesinde, filmler FTO yüzeylere direk ve homojen bir şekilde kaplandı. Üretilen pillerin fotovoltmik ölçümleri yapılarak gerekli parametreleri hesaplandı. Grafen katkılmasının, yapı içerisinde ilave elektron taşıma yolları oluşturarak rekombinasyonları baskıladığı ve böylece güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğunu, açık devre gerilimini, dolun faktörünü ve güç dönüşüm verimini artırdığı belirlendi.

Yazarların Katkısı

Çalışmada tüm katkı yazara aittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Hashimoto H., Muramatsu Y., Nishina Y., Asoh H. 2019. Bipolar anodic electrochemical exfoliation of graphite powders. *Electrochemistry Communications*, 104: 106475.
- [2] Long C.M., Nascarella M.A., Valberg P.A. 2013. Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution*, 181: 271-286.
- [3] Sun Q., Li Y.-D., Liu L., Feng Z.-B., Lu P., Wang Z.-R., Zhang X. 2019. Heat-treatment-assisted approach towards scalable synthesis of mesoporous carbons for high-performance lithium-sulfur battery. *Materials Letters*, 246: 165-168.
- [4] Popov V.N. 2004. Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 43 (3): 61-102.
- [5] Siddiqui M.T.H., Nizamuddin S., Baloch H.A., Mubarak N.M., Al-Ali M., Mazari S.A., Bhutto A.W., Abro R., Srinivasan M., Griffin G. 2019. Fabrication of advance magnetic carbon nano-materials and their potential applications: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7 (1): 102812.

- [6] Yalcin M., Yakuphanoglu F. 2017. Graphene-TiO₂ Nanocomposite Photoanode Based on Quantum Dot Solar Cells. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 12 (3): 254-259.
- [7] Ubani C.A., Ibrahim M.A., Teridi M.A.M., Sopian K., Ali J., Chaudhary K.T. 2016. Application of graphene in dye and quantum dots sensitized solar cell. *Solar Energy*, 137: 531-550.
- [8] Ayesh A.I., Ahmed R.E., Al-Rashid M.A., Alarrouqi R.A., Saleh B., Abdulrehman T., Haik Y., Al-Sulaiti L.A. 2018. Selective gas sensors using graphene and CuO nanorods. *Sensors and Actuators A: Physical*, 283: 107-112.
- [9] Zhu H., Wei J., Wang K., Wu D. 2009. Applications of carbon materials in photovoltaic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93 (9): 1461-1470.
- [10] Tsai T.-H., Chiou S.-C., Chen S.-M. 2011. Enhancement of dye-sensitized solar cells by using graphene-TiO₂ composites as photoelectrochemical working electrode. *Int. J. Electrochem. Sci*, 6 (8): 3333-3343.
- [11] Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M.R., Geim A.K. 2008. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 320 (5881): 1308-1308.
- [12] Park S., Ruoff R.S. 2009. Chemical methods for the production of graphenes. *Nature nanotechnology*, 4 (4): 217.
- [13] Liu J., Tang J., Gooding J.J. 2012. Strategies for chemical modification of graphene and applications of chemically modified graphene. *Journal of Materials Chemistry*, 22 (25): 12435-12452.
- [14] Shen J., Yan B., Shi M., Ma H., Li N., Ye M. 2011. One step hydrothermal synthesis of TiO₂-reduced graphene oxide sheets. *Journal of Materials Chemistry*, 21 (10): 3415-3421.
- [15] Shen J., Shi M., Yan B., Ma H., Li N., Ye M. 2011. Ionic liquid-assisted one-step hydrothermal synthesis of TiO₂-reduced graphene oxide composites. *Nano Research*, 4 (8): 795.
- [16] Zhu P., Nair A.S., Shengjie P., Shengyuan Y., Ramakrishna S. 2012. Facile fabrication of TiO₂-graphene composite with enhanced photovoltaic and photocatalytic properties by electrospinning. *ACS applied materials & interfaces*, 4 (2): 581-585.
- [17] He Z., Guai G., Liu J., Guo C., Loo J.S.C., Li C.M., Tan T.T. Y. 2011. Nanostructure control of graphene-composited TiO₂ by a one-step solvothermal approach for high performance dye-sensitized solar cells. *Nanoscale*, 3 (11): 4613-4616.
- [18] Hummers Jr W.S., Offeman R.E. 1958. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80 (6): 1339-1339.
- [19] Madhavan A.A., Kalluri S., Chacko D.K., Arun T.A., Nagarajan S., Subramanian K.R., Nair A.S., Nair V.S., Balakrishnan A. 2012. Electrical and optical properties of electrospun TiO₂-graphene composite nanofibers and its application as DSSC photo-anodes. *RSC Advances*, 2 (33): 13032-13037.
- [20] Santra P.K., Kamat P.V. 2012. Mn-doped quantum dot sensitized solar cells: a strategy to boost efficiency over 5%. *Journal of the American Chemical Society*, 134 (5): 2508-2511.
- [21] Zhao J., Wu J., Yu F., Zhang X., Lan Z., Lin J. 2013. Improving the photovoltaic performance of cadmium sulfide quantum dots-sensitized solar cell by graphene/titania photoanode. *Electrochimica Acta*, 96: 110-116.
- [22] Kamat P.V. 2012. Boosting the efficiency of quantum dot sensitized solar cells through modulation of interfacial charge transfer. *Accounts of chemical Research*, 45 (11): 1906-1915.
- [23] Mora-Sero I., Gimenez S., Fabregat-Santiago F., Gómez R., Shen Q., Toyoda T., Bisquert J. 2009. Recombination in quantum dot sensitized solar cells. *Accounts of Chemical Research*, 42 (11): 1848-1857.
- [24] Jun H.K., Careem M.A., Arof A.K. 2013. Quantum dot-sensitized solar cells-perspective and recent developments: a review of Cd chalcogenide quantum dots as sensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22: 148-167.
- [25] Yahia I.S., Hafez H.S., Yakuphanoglu F., Senkal B.F., Mottaleb M.A. 2011. Photovoltaic and impedance spectroscopy analysis of p-n like junction for dye sensitized solar cell. *Synthetic metals*, 161 (13-14): 1299-1305.
- [26] Subalakshmi K., Senthilselvan J. 2018. Effect of fluorine-doped TiO₂ photoanode on electron transport, recombination dynamics and improved DSSC efficiency. *Solar Energy*, 171: 914-928.