فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۶، شماره‌ی ۴، زمستان ۱۳۹۶

بررسی نانو کامپوزیت $G/RGO-ZnO-TiO_2$ با شکل ظاهری متفاوت ZnO و تاثیر آن بر عملکرد سلول خورشیدی حساس شده با رنگ

سارا عباسپور[۱]، امیر عباس نوربخش[۲*]، رضا ابراهیمی کهریزسنگی[۱]، حمید غیور[۱]

[۱] مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

[۲] دانشکده فنی مهندسی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، اصفهان، ایران

* anourbakhs@yahoo.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۱ مهر ۱۳۹۶

پذیرش: ۶ اسفند ۱۳۹۶

کلید واژه:

سلول خورشیدی حساس شده با رنگ، نانو ذرات TiO_2، نانو میله‌ها و نانو ذرات ZnO، اکسید گرافن احیا شده (RGO)، گرافن (G)

چکیده:

در تحقیق حاضر نقش شکل ظاهری نانو ذرات (NP)[۱] تیتانیا و اکسید روی و نانو میله‌های (NR)[۲] اکسید روی به همراه گرافن بر خواص سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا به ترتیب نانو ذرات TiO_2 به نانو میله‌ها و نانو ذرات ZnO پوشانده شده بر روی گرافن (G)[۳] و اکسید گرافن احیا شده (RGO)[۴] بر روی شیشه اکسید قلع دوپ شده با فلورین (FTO) با استفاده از دستگاه Dip coating، لایه نشانی شدند. سپس نانو کامپوزیت‌های لایه نازک ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در محلول رنگدانه N719 حساس سازی شده و در مرحله بعد نانوکامپوزیت‌های لایه نازک (فوتوآند) با الکترود پلاتینی ساخته شده به هم متصل گردیدند و الکترولیت از طریق حفرات موجود در الکترود پلاتینی به داخل سلول تزریق و مورد استفاده قرار گرفتند. جهت شناسایی از آنالیزهای فازی، ریز ساختاری، خواص الکتریکی و شاخصه‌های نوری از روش‌های FT-IR، XRD، FE-SEM، EIS، EDX و IV استفاده گردید. نتایج نشان داد که نه تنها شکل ظاهری لایه ZnO، بلکه نوع فرآیند پوشش TiO_2 بر خواص نانوکامپوزیت‌های $G/RGO)-ZnO-TiO_2$ تاثیر می‌گذارد. با توجه به نتایج بدست آمده نانو کامپوزیت $RGO-ZnO(NP)-TiO_2(NP)$ که در آن TiO_2 بر روی نانو ذرات ZnO پوشش داده شده بودند دارای بازده بالاتری نسبت به نمونه $RGO-ZnO(NR)-TiO_2(NP)$ با حضور نانو میله ZnO می‌باشد، همچنین حضور گروه‌های عاملی موجود بر سطح فوتوآند، به دلیل حضور RGO در این نمونه‌ها، دارای هدایت الکتریکی و بازده پایین‌تری هستند، نتایج بدست آمده از نانو کامپوزیت $G-ZnO-TiO_2$ نتیجه فوق را تایید نمود.

[1] Nanoparticles
[2] Nano rods
[3] Graphene
[4] Reduced graphene oxide

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

۱- مقدمه

با افزایش تقاضای صنعت و رشد جمعیت در طی چند دهه‌ی اخیر و همچنین برای بهبود زندگی مردم، نیاز به انرژی افزایش یافته است. بنابراین با رشد تقاضای صنعت و افزایش آلودگی زمانی پیش خواهد آمد که نه تنها کشف منابع تجدیدپذیر یک نیاز ضروری است بلکه دوست دار محیط زیست بودن آن نیز، یک نیاز ضروری خواهد بود. یک روش رایج برای استفاده از منابع تجدید پذیر همچون خورشید، استفاده از سلول‌های خورشیدی می‌باشد، که از انواع مختلف این سلول می‌توان به سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) اشاره نمود که این سلول‌ها دوست دار محیط زیست می‌باشند [۱].

سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ بر اساس تحریک نوری مولکول‌های رنگدانه‌ای که در سطوح نانو ذرات جذب شده‌اند کار می‌کنند یکی از اجزای اصلی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، فوتوآند می‌باشد که عموماً تشکیل شده از اکسیدهای نیمه هادی است. وقتی سطح یک ماده‌ی نیمه‌هادی مثل: TiO_2, SnO_2, ZnO, CdSe و ... تحت تابش نوری با انرژی برابر یا بیشتر از انرژی شکاف باند خودش قرار می‌گیرد، این انرژی الکترون‌های باند ظرفیت ماده را برانگیخته می‌کند. نتیجه‌ی این برانگیختگی، انتقال الکترون از باند ظرفیت به باند هدایت و ایجاد حفره با بار مثبت در باند ظرفیت و الکترون با بار منفی در باند هدایت می‌شود [۲]. افزودن کربن به شکل‌های مختلف از جمله به صورت‌های نانو لوله‌های کربن، گرافن و غیره بصورت متداول در سال‌های اخیر در بخش‌های مختلف (فوتوآند و الکترود شمارشگر) سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه مورد استفاده قرار گرفت[۳-۵]. گرافن و گرافن اکساید احیا شده به دلیل هدایت بالا، سطح ویژه بالا [۶] و شفافیت نوری و فعالیت جذبی بالا[۷] یک ماده امیدوارکننده در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی بوده است.

فوتوآند به عنوان عملکردی دوگانه به کار می‌رود که به بارگیری رنگدانه و انتقال الکترون‌های رنگدانه به جریان خارجی کمک می‌کند، بنابراین به یک مساحت سطح زیاد برای اطمینان از بارگیری بالای رنگدانه جهت ایجاد جریان خارجی نیازمند است. علاوه بر این سرعت انتقال بالای بار، برای دست‌یابی به راندمان جمع آوری الکترون مورد نیاز می‌باشد. این دو خاصیت ویژگی‌های یک فوتوآند ایده‌آل می‌باشد [۸].

فوتوآند بر پایه نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) از رایج‌ترین فوتوآندهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای است،که به دلیل در دسترس بودن، نسبتا ارزان قیمت می‌باشد. اما به دلیل مرزدانه‌های بسیاری که دارد، دارای برخی محدودیت‌ها همچون بازترکیب الکترون و حفره و عدم بازده خوب در ناحیه‌ی مادون قرمز می‌باشد. لذا تحقیقات بسیاری برای بهبود فوتوآندهای بر پایه TiO_2 انجام شده است[۹].

ZnO یک نیمه هادی با شکاف باند وسیع است که دارای خواص فیزیکی و انرژی پیوند ساختاری مشابه با TiO_2 می‌باشد، دارای تحریک الکترونی بیشتری ($۲۰۵-۳۰۰\ Cm^2V^{-1}S^{-1}$) نسبت به TiO_2 ($۰/۱-۴\ Cm^2V^{-1}S^{-1}$) که منجر به انتقال الکترون بیشتر و در نتیجه کاهش بازترکیب در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای می‌شود. TiO_2 به دلیل موقعیت نوار رسانش مشابه با ZnO و تعامل بهتر با رنگدانه و محلول‌های

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

الکترولیت کـه بـصورت متـداول در DSSC بکـار مـی‌رونـد در مقایسه با اکسید روی، نامزد بهتری برای اصـلاح سـطح اکـسید روی می‌باشد [۱۰-۱۳].

کیو و یانگ در سال ۲۰۱۳، به بررسی و ساخت سـلول‌هـای خورشیدی رنگدانه‌ای بر پایه‌ی نانو میله‌های ZnO پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول نانو میله‌ها، سطح بیشتری برای جذب رنگ را فراهم می‌سازد و باعث افـزایش بازده خواهد شد [۱۴].

ایرانژاد و همکارانش در سال ۲۰۱۱، به بررسی اثر ضـخامت پوسـته TiO_2 در فوتوآنـد ZnO nanorod -TiO_2 NP هسته – پوسته در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هنگامی که نمونـه فاقـد پوسـته TiO_2 می‌باشد، به دلیـل بازترکیـب، بـازده کمتـری از خـود نشان می‌دهد. و همچنین نشان دادند که افـزایش ضـخامت پوسته تا حدی می‌تواند باعث افزایش بازده شود اما تـا یـک ضخامت خاص و بعد از آن ضخامت، به دلیل کاهش سـطح تماس و در نتیجه جذب رنـگ کمتـر، باعـث کـاهش بـازده خواهد شد [۱۵].

در سال ۲۰۱۴، ژوه و همکارانش به ساخت فوتوآند بـر پایـه ZnO nanorod-TiO_2 NP، با دمای پایین در سـلول‌هـای خورشیدی رنگدانه‌ای پرداختند و نـشان دادنـد کـه بـا یـک ضخامت بهینه از پوسته TiO_2 با ضـخامت حـدود ۲۰ nm، می‌تواند باعث به تـاخیر انـداختن بازترکیـب شـده و باعـث افزایش بازده شود [۱۶].

محمـود و همکـارانش در سـال ۲۰۱۵، بـا اسـتفاده از نـانو کامپوزیت گرافن-TiO_2، توانستند با کاهش باند گپ TiO_2 توسط گرافن، بازده سلول‌های خورشـیدی رنگدانـه‌ای را تـا ۲۶٪ نسبت به نمونه پایه خود، افـزایش دهنـد [۱۷] آلـیم و همکارانش در سـال ۲۰۱۵، بـا افـزودن ۳٪ وزنـی GO بـه TiO_2 با ساختار آناتاز و سپس احیـای آن توسـط نـور UV، توانستند خاصـیت فوتوکاتالیـستی TiO_2 را بـا جلـوگیری از بازترکیـب الکتـرون و حفـره بهبـود بخـشند [۱۸] در سـال ۲۰۱۲، لیو و همکارانش، خاصیت فوتوکاتالیـستی کامپوزیـت گـرافن-ZnO را تحـت نـور UV جهـت کـاهش Cr(VI)، مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند کـه افـزایش خاصیت فوتوکاتالیستی با توجه به شدت نـور جـذب شـده و کاهش بازترکیب الکتـرون و حفـره در ZnO توسـط اضـافه نمودن RGO به ZnO، انجام پذیرفته است [۱۹].

جوه را [۲۰] و همکارانش در سـال ۲۰۱۵ بـه بررسـی‌هـای فوتوکاتالیستی نانو کامپوزیت RGO-ZnO-TiO_2 پرداختنـد و نشان دادند که فعالیت فوتوکاتالیستی این نـانو کامپوزیـت در مقایسه با ZnO یا TiO_2 خالص و یـا کامپوزیـت -TiO_2 ZnO بهبود یافته اسـت کـه علـت ایـن افـزایش خاصـیت فوتوکاتالیستی، به شدت نـور جـذب شـده بیـشتر و کـاهش بازترکیب الکترون و حفره نسبت داده شد.

مدهاون و همکارانش برای اولین بار در سال ۲۰۱۳، کامپوزیـت نانو فیبر RGO-ZnO-TiO_2 را بـرای کاربردهـای پزشـکی و فوتوولتائیک گزارش کردند. سپس به عنوان یک آزمـون بـرای کاربردهای فوتوولتائیک، این کامپوزیت را به عنوان فوتوآنـد در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای استفاده کردند نشان دادند کـه با افزودن گرافن به فوتوآند بر پایه RGO-ZnO، بـازده سـل از ۲/۷ ٪ به ۳/۷ ٪ افزایش پیدا کرد [۲۱].

همچنین تحقیقات نشان داد کامپوزیت RGO-TiO_2-ZnO خاصیت فوتوکاتالیستی بهتری از ZnO خالص یا کامپوزیـت

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

RGO-ZnO دارا می‌باشد و خاصیت فوتوکاتالیستی RGO-TiO_2-ZnO به نسبت TiO_2 در ترکیب بستگی دارد و با ۱٪ وزنی بیشترین خاصیت فوتوکاتالیستی را نشان داد و افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی به شدت نور جذب شده و کاهش بازترکیب الکترون و حفره ZnO همراه TiO_2 نسبت داده می‌شود [۲۲].

در تحقیق حاضر به بررسی افزودن TiO_2 به نانو کامپوزیت RGO-ZnO با دو شکل ظاهری نانو ذره و نانومیله ZnO و مقایسه آن با نانو کامپوزیت G-ZnO-TiO_2 بر بازده سلول خورشیدی حساس شده با رنگ به عنوان فوتوآندهای سلول خورشیدی پرداخته شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- سنتز نانو ذرات اکسید گرافن GO

ابتدا با استفاده از روش هامر اصلاح شده نانوصفحات اکسید گرافن سنتز شد و سپس با استفاده از روش‌های احیا، اکسید گرافن (GO) به اکسید گرافن احیا شده (RGO) تبدیل گردید [۲۳]. یکی از روش‌های احیای اکسید گرافن استفاده از نور UV و دما بوده که در پژوهش حاضر از این دو مورد استفاده شده است.

۲-۱-۱- تهیه سل از نانو ذرات اکسید گرافن و گرافن و لایه نشانی آنها بر روی شیشه FTO

برای تهیه سل با غلظت ۰/۵ ٪ (درصد وزنی) از اکسید گرافن، ۰/۲ گرم از پودر اکسید گرافن سنتز شده در ۴۰ میلی لیتر اتانول حل گردید. جهت لایه نشانی از دستگاه Dip coating استفاده گردید، برای این کار سرعت ورود دستگاه به داخل محلول روی ۱۰۰ mm/min و مدت زمان نگهداری داخل محلول ۱ دقیقه تنظیم گردید، این کار برای تمام نمونه‌ها ۳ مرتبه انجام گرفت که البته برای انجام هر دفعه، به نمونه زمان داده می‌شد تا سطح نمونه خشک و لایه بعدی زده شود. جهت احیا اکسید گرافن نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۴۰۰ °C در اتمسفر آرگون تحت حرارت قرار گرفتند. جهت لایه نشانی گرافن بر روی شیشه FTO (Sigma Aldrich, 15 Ohm) مطابق با اکسید گرافن عمل کرده است.

۲-۲- سنتز نانو ذرات اکسید روی ZnO و لایه نشانی نانو ذرات ZnO بر روی GO و G

برای سنتز نانو ذرات ZnO در مرحله اول به صورت مجزا در یک بشر ۵/۲گرم هیدروکسید سدیم (MERCK) را در ۳۰ میلی لیتر اتانول حل کرده و سپس در یک بشر دیگر ۱۴/۷۵ گرم استات روی ۲ آبه (99%, Sigma Aldrich) را در ۶۰ میلی لیتر اتانول حل کرده و به صورت مجزا به مدت ۱ ساعت در التراسونیک (در محیط آبی) قرار داده. سپس این دو محلول با هم مخلوط شده و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه تحت هم زدن قرار گرفت[۲۴]. نمونه تحت خلا در دمای ۴۰ °C خشک گردید، بعد از تهیه پودر مورد نظر مطابق قسمت ۲-۱ سل مورد نظر تهیه گردید و بر روی شیشه FTO که یک لایه GO و G پوشش داده شده لایه نشانی شد.

۲-۳- تهیه زیر لایه اکسید روی و رشد نانومیله‌های اکسید روی بر روی RGO

برای سنتز زیر لایه ZnO با غلظت ۰/۰۲ مولار، ۰/۴۴ گرم استات روی دو آبه را در ۱۰۰ میلی لیتر اتانول حل کرده و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

به مدت نیم ساعت تحت التراسونیک پراکنده شد و بعد از پوشش دهی بر روی شیشه FTO که یک لایه RGO بر روی آن قرار گرفته به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۳۵۰°C قرار داده شد و در ادامه برای ساخت محلول برای رشد نانو میله‌های ZnO، ابتدا ۲/۹۷ گرم نیترات روی (MERCK) در ۲۰۰ میلی لیتر آب دو بار تقطیر حل گردید و نیم ساعت در دمای اتاق هم زده شد، سپس ۱/۴ گرم هگزامتیل تترا آمین به محلول اضافه گردید و ۱۵ دقیقه هم زده شد، در این مرحله محلول برای رشد نانو میله‌ها آماده شده. سپس داخل محفظه اتوکلاو ریخته شد و شیشه FTO پوشش داده شده با RGO با زاویه ۴۵ درجه درون محفظه اتوکلاو قرار داده شد، سپس واکنش طی ۲ ساعت در دمای ۹۶ درجه قرار داده، در نهایت با مقدار بسیار کمی آب دوبار تقطیر شسته شد تا ذرات واکنش نکرده اضافی شسته شوند.

۲-۴- سنتز نانو ذرات اکسید تیتانیوم TiO_2 و لایه نشانی نانو ذرات TiO_2 بر روی نمونه‌های RGO-ZnO (NR)، RGO-ZnO (NP) و G-ZnO (NP)

ابتدا ۵ میلی لیتر تیتانیوم ایزوپروپکساید (Sigma-Aldrich) در ۱۰۰ میلی لیتر ایزوپروپیل الکل (MERCK) پراکنده کرده و به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق هم زده شد، سپس به صورت ناگهانی ۴۰۰ میلی لیتر آب دو بار تقطیر به محلول فوق اضافه شد و به مدت ۳ ساعت تحت عملیات پیرسازی قرار گرفت و بر روی نمونه‌ها مطابق جدول ۱ پوشش داده شد. و سپس به مدت ۲ ساعت تحت اتمسفر آرگون در دمای ۴۵۰ درجه قرار گرفت و در نهایت به مدت ۲۱ ساعت تحت نور UV برای احیا اکسید گرافن قرار گرفت و در ادامه ۲۴ ساعت در محلول رنگدانه آلی بر پایه فلز روتنیوم N719 (شرکت شریف سولار کد DYE-N719S-10ML) حساس سازی شدند. در مرحله بعد، الکترودهای فوتوآند و شمارشگر (الکترود پلاتینی شامل نانوذرات پلاتین بر روی FTO شرکت شریف سولار کد ELD-PT-1) به هم متصل گردیده و الکترولیت استاندارد شامل جفت اکسایش / کاهش و حلال I3-/I- آن استونیتریل (شرکت شریف سولار کد ELT-ACN-I-10ML) از طریق حفرات موجود در الکترود پلاتینی به داخل سلول تزریق گردید.

جدول ۱- کد نمونه‌های فوتوآند سلول خورشیدی حساس شده با رنگ

کد نمونه‌ها	اسم نمونه‌ها
۱	RGO-ZnO(NR)-TiO_2(NP)
۲	RGO-ZnO(NP)-TiO_2(NP)
۳	G-ZnO(NP)-TiO_2(NP)

۲-۵- روش‌های آنالیز و شاخصه‌یابی فوتوآندهای ساخته شده

در کار تحقیقاتی حاضر جهت بررسی الگوی تفرق اشعه X از دستگاه (XRD) با لامپ مس D8ADVANCE, Germany با طول موج 1/5406 °A و فیلتر نیکل، برای FT-IR از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis مدل JASCO V-670 (190-2700 nm), Japan، برای DRS-UV از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis مدل JASCO V-670 (190-2700 nm), Japan، جهت طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) از دستگاه Princeton Applied Research مدل PARSTAT

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

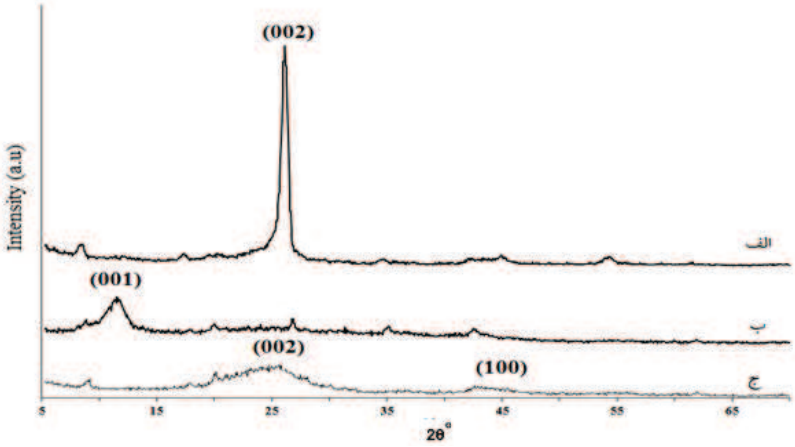
[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

2273، برای SEM از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل (LEO 435VP)، برای FE-SEM از دستگاه میکروسکوپ گسیل میدانی به همراه توزیع انرژی پرتوی ایکس (EDX) مدل MIRA3TESCAN-XMU، برای بررسی اثر فوتوولتائیک فوتوآندهای سلول خورشیدی از دستگاه اندازه‌گیری I-V سلول خورشیدی IRASOL) و برای احیا نمونه‌ها از لامپ UV 300W استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی آنالیز فازی (XRD)، گرافیت، اکسید گرافن (GO) و اکسید گرافن احیا شده (RGO)

شکل ۱ الگوی پراش پرتو اشعه x گرافیت، اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد گرافیت (شکل الف ۱)، دارای یک پیک قوی در $2\theta = 26^\circ$ بوده که مربوط به صفحه (۰۰۲) می‌باشد. اکسید گرافن (شکل ب۱) نیز دارای پیک شاخصی در $2\theta = 11^\circ$ بوده که مربوط به صفحه (۰۰۱) می‌باشد. این صفحه تاکید کننده ساختار گرافن به همراه گروه‌های عاملی اکسیژن دار می‌باشد[۲۵]. همچنین پیک شاخص مربوط به گرافیت در اکسید گرافن (شکل ب۱) مشاهده نمی‌گردد [۲۶]، که این الگو نشان دهنده‌ی اکسیداسیون گرافیت و سنتز صحیح اکسید گرافن است. شکل (ج ۱) مربوط به اکسید گرافن احیا شده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد دارای یک پیک پهن در محدوده $2\theta = 20^\circ - 27^\circ$ مربوط به صفحه (۰۰۲) و یک پیک در $2\theta = 44/5^\circ$ مربوط به صفحه (۱۰۰) بوده و همچنین پیک شاخص مربوط به اکسید گرافن در این الگوکاهش یافته است[۲۷].



شکل ۱- الگوی پراش اشعه X (XRD) نمونه‌های الف) گرافیت، ب) اکسید گرافن، ج) اکسید گرافن احیا شده

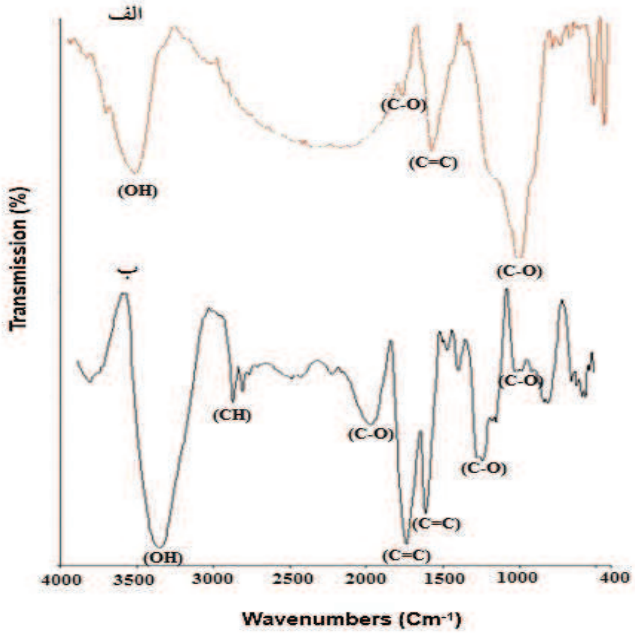
۳-۲- بررسی طیف FTIR ، اکسید گرافن احیا شده و گرافن

شکل ۲ آنالیز FTIR نمونه‌های اکسید گرافن احیا شده زیر نور UV به همراه دما و گرافن را در محدوده‌ی طول موج‌های Cm^{-1} ۴۰۰۰-۴۵۰ نشان می‌دهد. نمونه‌ها در طول موج Cm^{-1} ۳۴۲۰، دارای یک پیک بزرگ بوده که مربوط به ارتعاش کششی OH- (گروه هیدروکسیل) موجود بر سطح جاذب است. همچنین پیک Cm^{-1} ۱۰۷۰و ۱۲۲۵

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

مربوط به گروه عاملی C-O می‌باشد که در گرافن از شدت کمتری برخوردار است و همچنین پیک مربوط به پیوند C=C در طول موج ۱۶۲۰ Cm^{-1} از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد[۲۸-۲۹].



شکل ۲- طیف FTIR نمونه‌های الف) گرافن اکساید احیا شده زیر نور UV به همراه دما، ب) گرافن

۳-۳- بررسی الگوی تفرق اشعه X، از نانو ذرات پوشش داده شده جهت تهیه فوتوآند

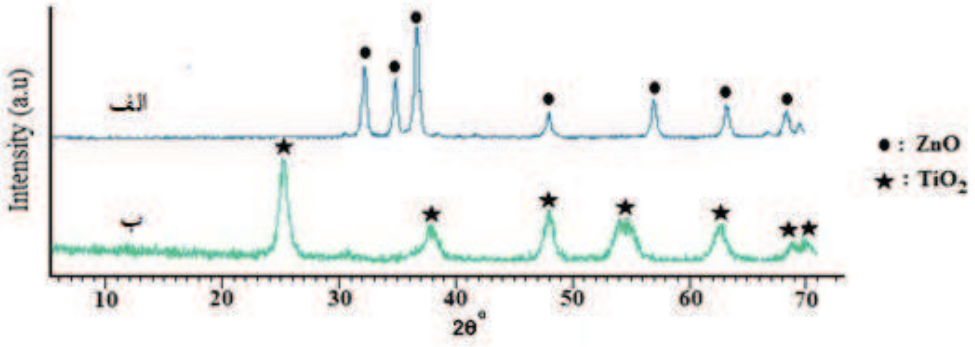
شکل ۳ الگوی پراش پرتو اشعه x، نانو ذرات TiO_2و ZnO را نشان می‌دهد. همانطور که در a شکل۲ مشاهده می‌گردد حضور فاز ورتزایت اکسید روی و فاز آناتاز اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد. همچنین اندازه کریستال‌های ذرات با استفاده از معادله شرر محاسبه گردید که به ترتیب TiO_2= ۱۱ nm و ZnO= ۳۰ nm می‌باشد.

۳-۴- بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های فوتوآند FTO-RGO، FTO-RGO- ZnO (NR) و FTO-RGO-ZnO (NP)

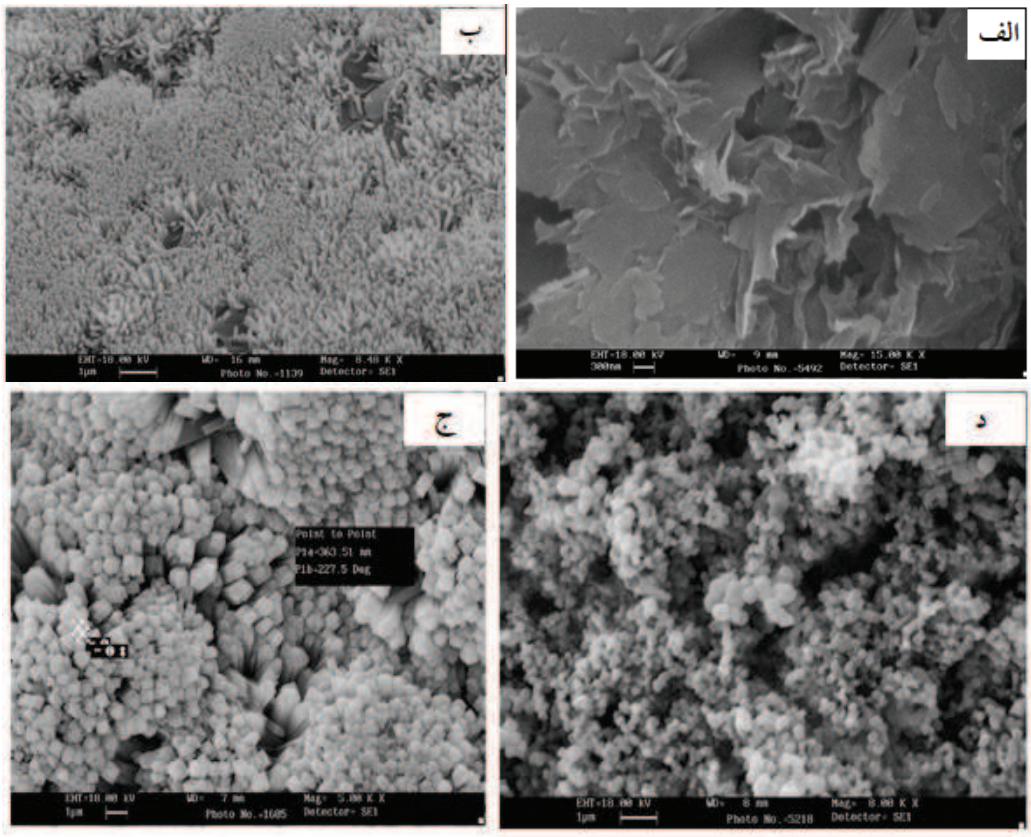
تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (SEM) از مقطع نمونه‌های فوتوآند FTO-RGO، FTO-RGO- ZnO(NR) و FTO-RGO-ZnO(NP) در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۴ الف) قابل مشاهده است گرافن اکسید احیا شده به صورت لایه‌ای وجود دارد، شکل (۴ ب و ج) مربوط به نانو میله‌های ZnO و شکل (۴ د) مربوط به نانو ذرات ZnO بر روی سطح شیشه FTO که دارای پوشش RGO است، می‌باشند.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]



شکل ۳- الگوی پراش اشعه XRD (X) **نمونه‌های الف)** ZnO، **ب)** TiO_2



شکل ۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

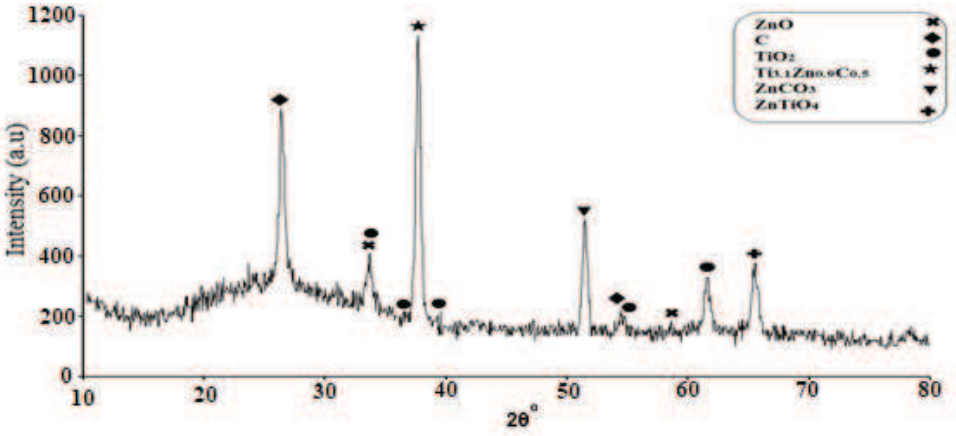
نمونه الف) FTO-RGO، **ب و ج)** FTO-RGO-ZnO(NR)، **د)** FTO-RGO-ZnO(NP)

۳-۵- پـــراش‌هـــای اشـــعه X (XRD) نمونه‌های FTO-RGO-ZnO-TiO_2

شکل ۵ پراش پرتو ایکس فوتوآند RGO-ZnO-TiO_2 را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه دارای تمامی فازهای تشکیل دهنده این نانو کامپوزیت شامل فازهای ZnO، TiO_2، C و ترکیبات بین فازی $ZnTiO_4$ و... می‌باشد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]



شکل ۵- نمودار پراش پرتو X(XRD) نمونه $RGO-ZnO-TiO_2$

۳-۶- بررسی ریز ساختار نمونه‌های فوتوآند RGO-ZnO (NP)-TiO_2 (NP) و G-ZnO(NP)-TiO_2(NP) توسط آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) به همراه EDX

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از سطح و مقطع به همراه طیف سنجی توزیع انرژی پرتو ایکس (EDX) از دو قسمت نمونه‌های فوتوآند ۲ و ۳ که در شکل مشخص شده است به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد بر روی سطح نمونه ذرات TiO_2 (شکل الف ۶) با نظم خاصی پوشش داده شده‌اند. همچنین در شکل ۷ مربوط به نمونه $G-ZnO-TiO_2$ مشاهده می‌گردد، با توجه به نتایج آزمون توزیع انرژی پرتوی ایکس (EDX) حضور تمام ترکیبات مورد استفاده در این نمونه شامل G، ZnO و TiO_2 را نشان می‌دهد و نیز کاملا مورد انتظار و تائید کننده سنتز موفقیت آمیز این ترکیبات است.

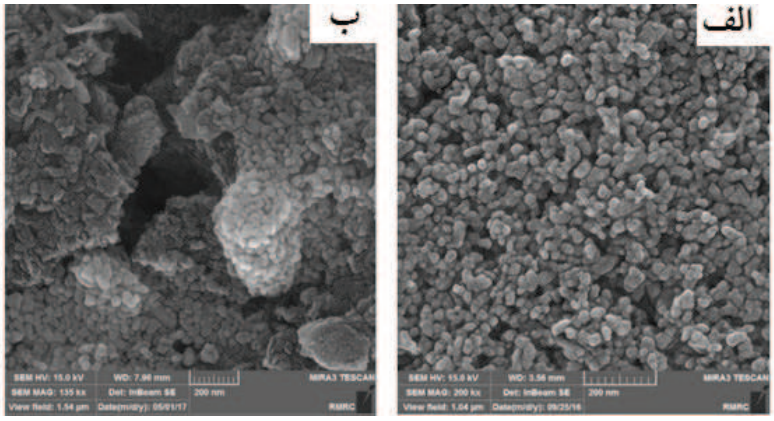
۳-۷- بررسی و مقایسه خواص فوتوآندهای ۳ لایه‌ایی FTO-RGO- ZnO (NR) -TiO_2 (NP)، FTO- RGO- ZnO (NP) -TiO_2 (NP) و FTO- G- ZnO (NP)-TiO_2 (NP)

۳-۷-۱- مقایسه طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول‌های خورشیدی با فوتوآندهای ۳ لایه‌ایی FTO-RGO-ZnO (NR)- TiO_2 (NP)، FTO- RGO- ZnO (NP)-TiO_2 (NP) و FTO- G- ZnO (NP)-TiO_2 (NP)

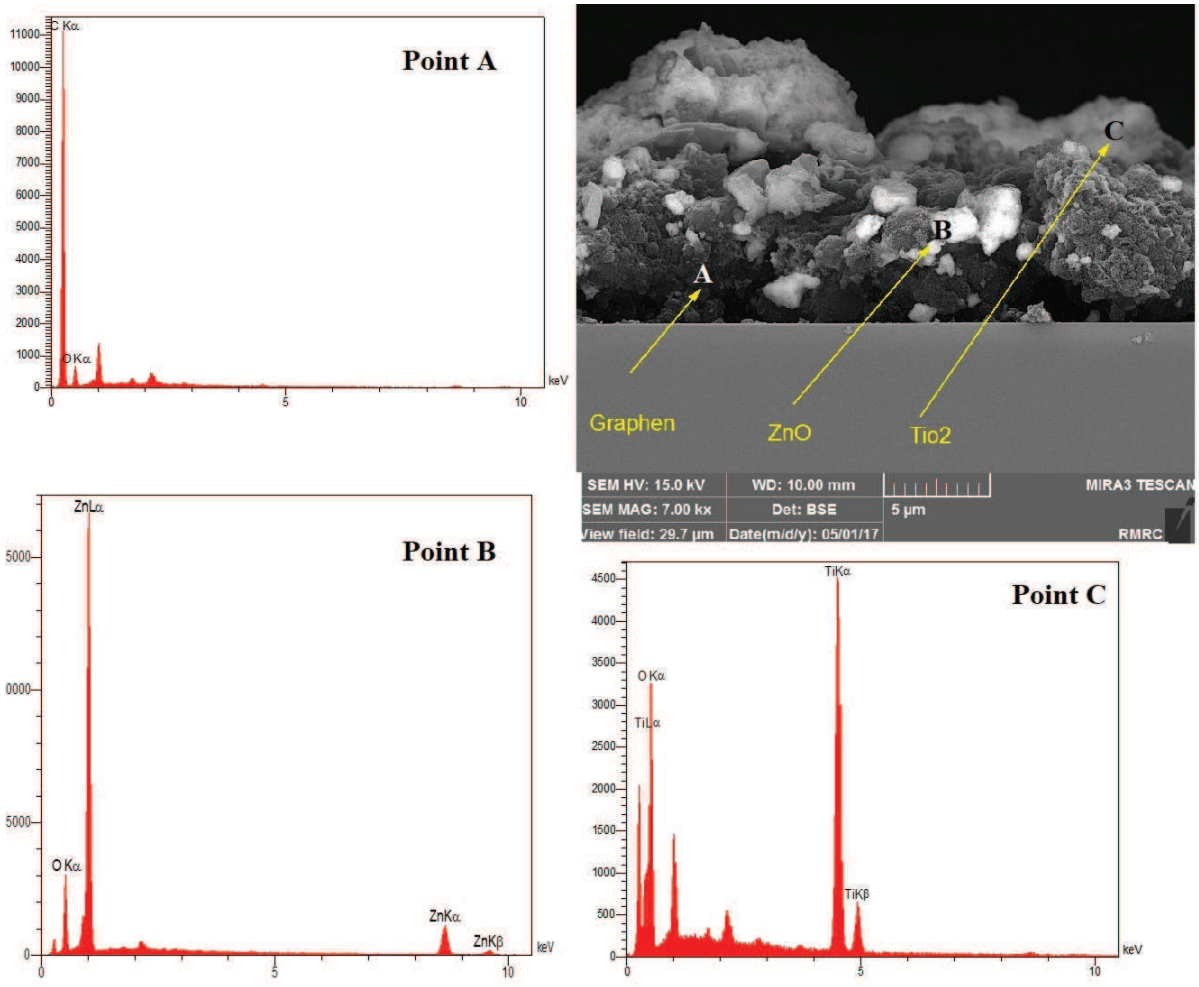
در شکل ۸ و ۹ نمودار نایکویست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول‌های خورشیدی با فوتوآندهای۳ لایه ایی مشاهده می‌گردد، نتایج نشان می‌دهد نمونه فوتوآند FTO-G-ZnO(NP)-TiO_2(NP) دارای مقاومت کمتری و هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به بقیه نمونه است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]



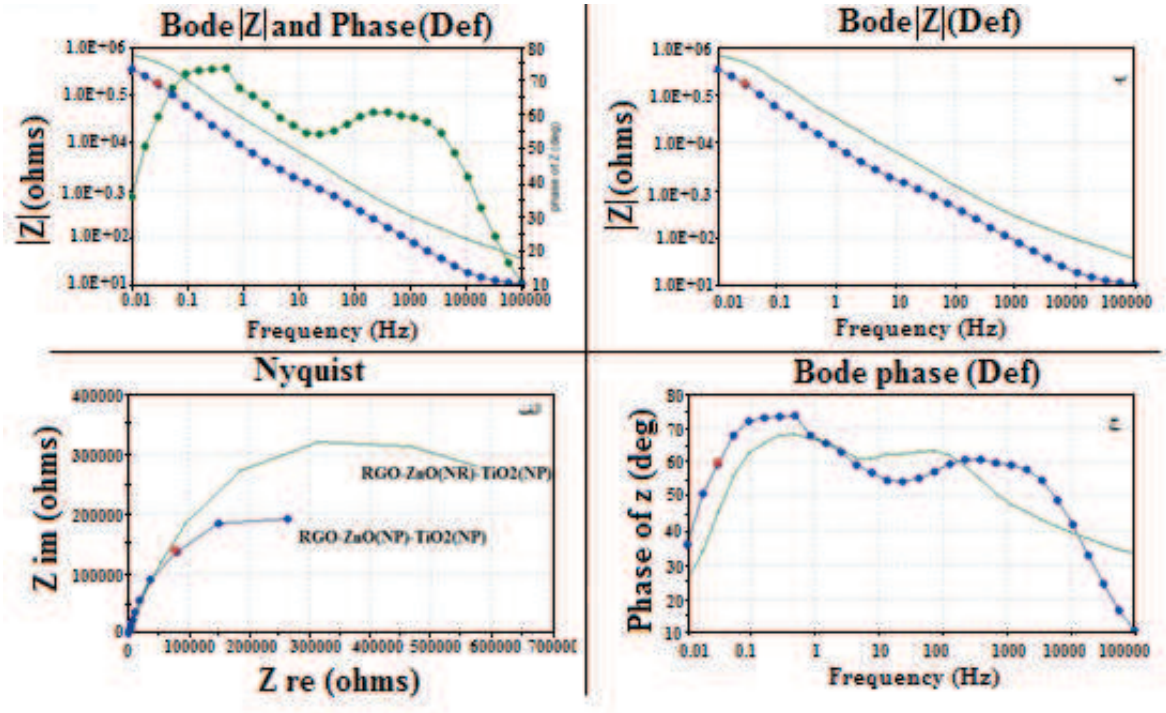
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از سطح الف) نمونه ۲ ب) نمونه ۳



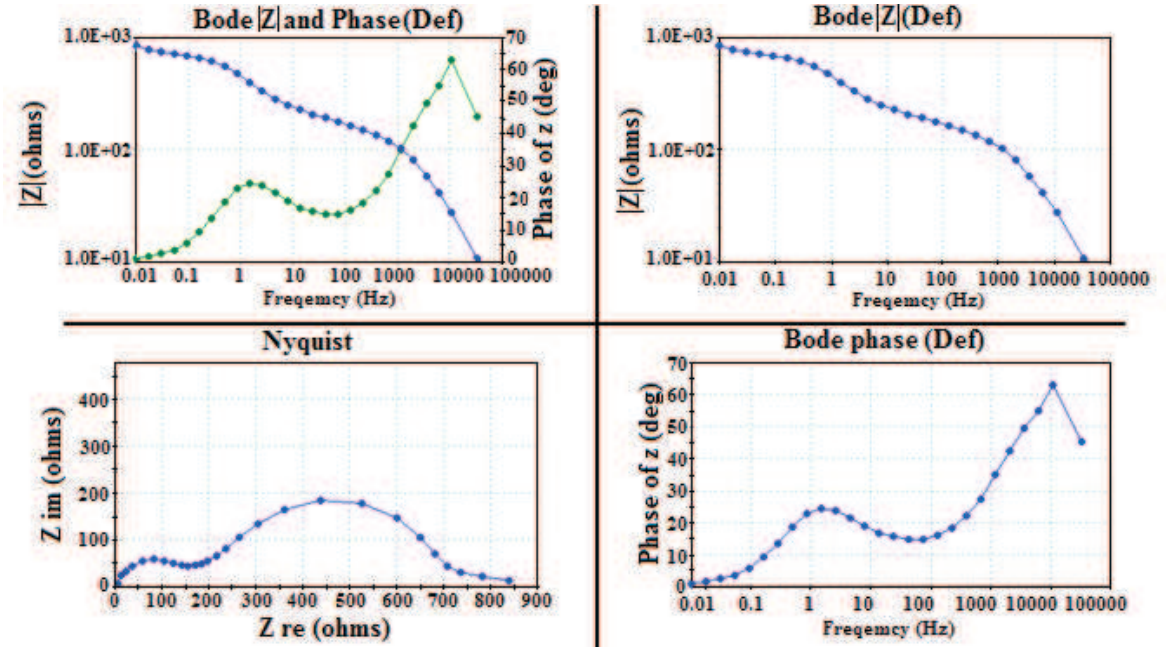
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از سطح مقطع نمونه G-ZnO-TiO_2 به همراه EDX

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]



شکل ۸- الف) نمودار نایکویست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول‌های خورشیدی با فوتوآندهای ۳ لایه‌ایی FTO-RGO-ZnO(NR)-TiO_2(NP) و FTO-RGO- ZnO(NP)-TiO_2(NP)، ب) منحنی بد

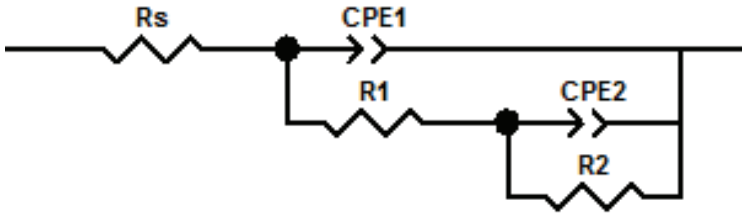


شکل ۹- نمودار نایکویست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول‌های خورشیدی با فوتوآند ۳ لایه‌ایی FTO-G-ZnO(NP)-TiO_2(NP)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

مدار معادل‌های مربوط به فوتوآندهای مورد مصرف در سلول خورشیدی حساس شده با رنگ نمونه‌های FTO- RGO- ZnO (NR)- TiO_2 (NP)، FTO- RGO- ZnO (NP)- TiO_2 (NP) و FTO- G- ZnO (NP)-TiO_2 (NP) با استفاده از نرم‌افزار ZView رسم گردید و در شکل ۱۰ آورده شده است. همچنین داده‌های مربوط به طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به محاسبه Zt و با استفاده از مراتب مربوط به مدارهای RLC موازی و متناوب، همچنین با توجه به مدار معادل در نظر گرفته شده (شکل ۱۰)، Zt محاسبه شده به ترتیب در نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ کاهش یافته. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در نمونه ۱ که ZnO با پوشش نانو میله است دارای بیشترین Zt است که این امر مربوط به مقاومت انتقال بار R2 بیشتری نسبت به نمونه ۲ که دارای ZnO با پوشش نانو ذره است می‌باشد و این امر به خاطر متفاوت بودن مورفولوژی‌های ZnO با TiO_2 پوشش داده شده می‌باشد، زمانی که در نمونه ۳ از G به جای RGO استفاده شد مجدد مقدار Zt کاهش یافته که مربوط به عدم حضور گروه‌های عاملی است که باعث شده نمونه ۳ مقاومت انتقال بار R2 کمتری نسبت به نمونه ۲ دارا باشد.



شکل ۱۰- مدار معادل‌های مربوط به فوتوآندهای FTO-RGO-ZnO(NR)-TiO_2(NP)، FTO-RGO- ZnO(NP)-TiO_2(NP) **و** FTO-G-ZnO(NP)-TiO_2(NP)

جدول ۲- داده‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول خورشیدی ساخته شده با فوتوآندهای FTO- RGO- ZnO (NR)- TiO_2 (NP)، FTO- RGO- ZnO (NP)- TiO_2 (NP) **و** FTO- G- ZnO (NP)- TiO_2 (NP)

کد نمونه	Rs	CPE1 (F)	R1	CPE2 (F)	R2	Zt (Ω)
۱	۹/۸۱	$۲/۲۹\times۱۰^{-۶}$	۲۰۷/۶	$۴/۷۴\times۱۰^{-۶}$	$۱/۰۹\times۱۰^{۶}$	۲۳۶۱/۳۷
۲	۱۰/۱	$۱/۴۰\times۱۰^{-۵}$	۲۵۸/۷	$۱/۱۱\times۱۰^{-۵}$	$۵/۷۳\times۱۰^{۵}$	۸۹۶/۱
۳	۱۱/۸۰	$۳/۴۳\times۱۰^{-۵}$	۷۳/۵۸	$۱/۰۲\times۱۰^{-۳}$	۴۷۳/۳	۸۶/۴۱

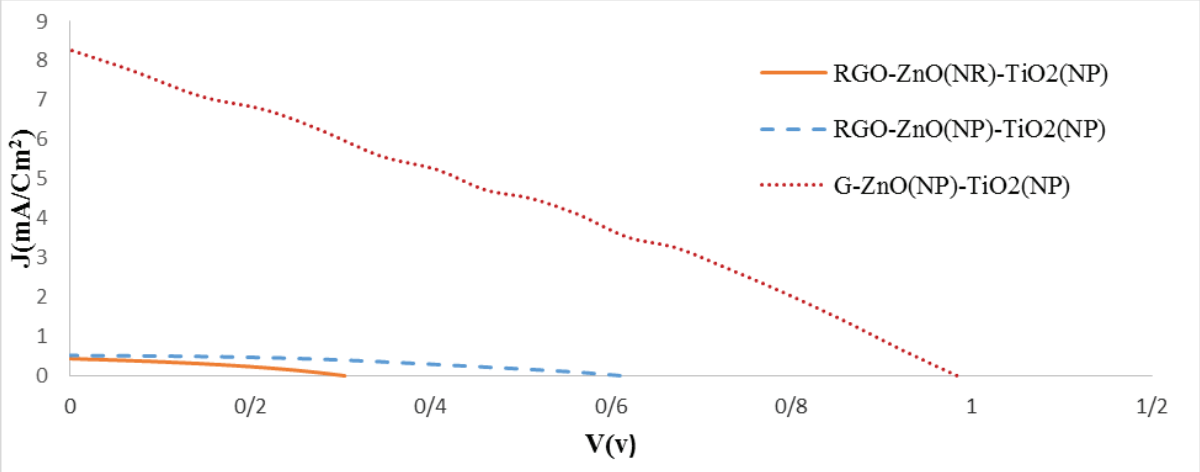
Rs: مقاومت محلول، R1 و R2: مقاومت انتقال بار، CPE1 و CPE2: امپدانس خازنی

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

۳-۷-۲- مقایسه اثر فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی فوتوآندهای ۳ لایه‌ایی FTO- RGO- ZnO (NR)-TiO_2 (NP) و FTO- RGO- ZnO (NP)- TiO_2 (NP) و FTO- G- ZnO (NP)- TiO_2 (NP)

در شکل ۱۱ نمودار جریان- ولتاژ نمونه‌های فوتوآند ۳ لایه‌ایی نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. مشخصه‌های دیگر این نمونه‌ها از قبیل بازده، ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه نیز اندازه‌گیری و محاسبه شده است و در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد نمونه FTO-G-ZnO(NP)-TiO_2(NP) دارای بازده بیشتری نسبت به تمامی نمونه‌های ساخته شده به عنوان فوتوآند می‌باشد، که این موضوع به خاطر عدم حضور گروه‌های عاملی بر روی سطح گرافن و ساختار یکسان نانو ذرات TiO_2 و ZnO است که باعث افزایش چگالی سطحی نمونه‌ها و ایجاد مسیری مناسب جهت حرکت الکترون‌ها در نانو کامپوزیت شده است.



شکل ۱۱- مقایسه مشخصه جریان- ولتاژ سلول‌های ساخته شده با فوتوآندهای FTO-RGO-ZnO(NR)-TiO_2(NP)، FTO-RGO- ZnO(NP)-TiO_2(NP) و FTO-G- ZnO(NP)-TiO_2(NP)

جدول ۳- نتایج حاصل از مشخصه‌یابی جریان -ولتاژ فوتوآندهای FTO-RGO-ZnO(NR)-TiO_2(NP)، FTO-RGO- ZnO(NP)-TiO_2(NP) و FTO-G- ZnO(NP)-TiO_2(NP)

کد نمونه	بازده (ɳ)	ولتاژ Voc	جریان Jsc	فاکتور انباشتگی FF
۱	۰/۰۴	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۳۵
۲	۰/۱۲	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۳۹
۳	۲/۳۱	۰/۹۸	۸/۲۶	۰/۲۸

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان چنین بیان کرد که در یک مقدار مشخص، نانو ذرات ZnO، چگالی سطحی بالاتری نسبت به نانو میله‌ها دارند، بنابراین با افزودن نانو ذرات TiO_2 عملکرد بیشتری از خود نشان داده، چون مسیر مناسب‌تری جهت حرکت الکترون‌ها در اختیار نانو کامپوزیت قرار می‌گیرد. به طور کلی می‌توان چنین بیان کرد نه تنها شکل ظاهری متفاوت ZnO بلکه نوع عامل کربنی RGO، G بر عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ تاثیرگذار می‌باشد. نتایج نشان داد، استفاده از گرافن به عنوان لایه پوششی بر روی شیشه FTO نسبت به گرافن اکسید احیا شده، به همراه نانو کامپوزیت لایه‌ای ZnO-TiO_2، دارای بازده سلول خورشیدی ۲/۳۱ ٪ درمقایسه با ۰/۱۲ ٪ می‌باشد و کاهش بازده سلول خورشیدی به دلیل حضور گروه‌های عاملی موجود بر سطح فوتوآند RGO-ZnO-TiO_2 بوده که می‌تواند عامل کاهش هدایت الکتریکی و کاهش بازده سلول خورشیدی رنگدانه‌ای باشد.

مراجع

[1] O. Erdinc, M. Uzunoglu, "Optimum design of hybrid renewable energy systems; overview of different approaches," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, pp. 1412-1425, 2012.

[2] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, and P. Yang, "Nanowire dye-sensitized solar cells," Nature Materials, Vol. 4, pp. 455-459,2005.

[3] Y. Zhu, Sh. Murali, W. Cai, X. Li, J.W. Suk, J. R. Potts, R. S. Ruoff, "Graphene and graphene oxide : Synthesis, Properties, and applications," Advanced Materials, Vol. 22, pp.3906-3924,2010.

[4] http://www.nanoclub.ir/index.php/articles/show/197.

[5] Y. Zhang, H. Li, L. Kuo, P. Dong, F. Yan, "Recent applications of graphene in dye sensitized solar cells," current Opinion in colloid & Interface science, Vol. 20, pp. 406-415,2015.

[6] S. Stankovich, D.A. Dikin, G.H.B. Dommett, K.M. Kohlhaas, E.J. Zimney, E.A. Stach,R.D. Piner, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, "Graphene-based composite materials", Nature, Vol. 442, pp. 282–286, 2006.

[7] F. Schedin, A.K. Geim, S.V. Morozov, E.W. Hill, P. Blake, M.I. Katsnelson, K.S.Novoselov, "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene", Nature Materials, Vol. 6, pp. 652–655, 2007.

[8] M. Ye,X. Wen, M Wang, J. Locozzia,N. Zhang,Ch. Lin,Z. Lin."Recent advances in dye-sensitized solar cells:from photoanodes,sensitizers and electrolytes to counter electrodes". Materials Today, Vol. 18, pp. 155-162, 2015.

[9] V. Sugathan, E. John, K. Sudhakar. "Recent improvements in dye sensitized solar cells: A review". Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 52, pp. 54-64, 2015.

[10] D.Sengupta. "Morphology and film-thickness of photo-anode materials for dye sensitized solar cell application-A revieew".Renewable and sustainable energy review, Vol. 60, pp. 356-376, 2016.

[11] M. Law, L.E. Greene, A. Radenovic, T. Kuykendall, J. Liphardt, P. Yang, "ZnO-Al_2O_3 and ZnO-TiO_2 core–shell nanowire dye-sensitized solar cells," Journal of Physical Chemistry B, Vol, 110 , pp. 22652–22663,2006.

[12] K. Park, Q. Zhang, B.B. Garcia, X. Zhou, Y.-H. Jeong, G. Cao, "Effect of an ultrathin TiO_2 layer coated on submicrometer-sized ZnO nanocrystallite

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

engineering journal, Vol. 183 , pp 238-243, 2012.

[20] F-T. Johra, W-G. Jung. "RGO–TiO_2–ZnO composites: Synthesis, characterization, and application to photocatalysis," Applied Catalysis A: General, Vol. 491, pp. 52–57, 2015.

[21] A.A. Madhavan, A. Mohandas , A. Licciulli, K.P. Sanosh, P. Praveen, R. Jayakumar, S.V. Nair, A.S. Nair, A. Balakrishnan, "Electrospun continuous nanofibres based on TiO_2-ZnO-Graphene composite". RSC Advances, Vol. 3, pp. 25312-25316, 2013.

[22] X. Liu, L. Pan, T. Lv, Z. Sun,"Investigation of photocatalytic activities over ZnO–TiO_2–reduced graphene oxide composites synthesized via microwave-assisted reaction," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 394, pp. 441–444, 2013.

[23] J. Guerrero- Contreras, F. Caballero-Briones." Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variation of the Hummers method," Materials chemistry and physics, Vol. 153, pp. 209-220, 2015.

[24] A.B Kashyout, M. Soliman, M.E Gamal, M. Fathy, "preparation and characterization of nano particles ZnO films for dye- sensitized solar cells," Materials Chemistry and physics, Vol. 90 , pp. 230-233, 2005.

[25] R. Garg, N. Dutta, N. R. Choudhury, "Work function engineering of grapheme," Review Nanomaterials, Vol. 4, pp. 267-300, 2014.

[26] S. Debnath, A. Maity, K. Pillay, "Impact of process parameters on removal of Congo red by graphene oxide from aqueous solution," Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 2, pp. 260-272, 2014.

[27] L. Tang, Y. Wang, Y. Li, H. Feng, J. Lu, J. Li, "Preparation, Structure, and Electrochemical Properties of Reduced aggregates by atomic layer deposition on the performance of dye-sensitized solar cells," Advanced Materials, Vol. 22, pp. 2329–2332, 2010.

[13] L.E. Greene, M. Law, B.D. Yuhas, P. Yang, "ZnO–TiO_2 core–shell nanorod/P3HT solar cells," Journal of Physical Chemistry C, Vol. 111, pp. 18451–18456,2007.

[14] Sh-Y. Kuo, J- F. Yang, "The fabrication and characterization of dye- sensitized solar cells with ZnO nanorods," Conference on lasers and electro-optics, Pacific Rim, 2013.

[15] A. Irannejad, K. Janghorban , O.K. Tan ,H. Huang , C. K. Lim, P.Y . Tan, X. Fang, C .S .Chua, S.M.H. Hejazi, M.M. Shahjamali, M .Ghaffari, "Effect of the TiO_2 shell thickness on the dye-sensitized solar cells with ZnO-TiO_2 core- shell nanorod electrodes" Electrochimica Acta, Vol. 58, pp. 19-24, 2011.

[16] G.K. L Goh, H.Q. Le, T.J. Huang, B.T.T. Hui, "Low temperature grown ZnO@TiO_2 core shell nanorod arrays for dye sensitized solar cell application," Journal of solid state chemistry, Vol. 214, pp.17-23, 2014.

[17] U. Mehmood, Sh. Ahmed, I.A Hussein, Kh. Harrabi. "Improving the efficiency of dye sensitized solar cells by TiO_2-graphene nano composite photoanode," Photonics and nano structures. Vol. 16, pp. 34-42, 2015.

[18] N. Sh. Alim, H. O Lintang, L. Yuliati. "Improved photocatalytic activity of anatase titanium dioxide by reduced graphene oxide," Malaysian journal of fundamental and applied science, Vol. 3, pp. 118-121, 2015.

[19] X. Liu, L. Pan , Q. Zhao , T. Lv, G. Zhu , T. Chen , T. Lu, Zh. Sun , Ch. Sun. " UV- assisted photocatalytic synthesis of ZnO - reduced graphene oxide composite with enhanced photocatalytic activity in reduction of Cr(VI)," Chemical

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]

Graphene Sheet Films," Advanced Functional Materials, Vol. 19, pp. 2782–2789, 2009.

[28] Y. Li , J. Ding, J. Chen, C. Xu, B. Wei, J. Liang, D. Wu, "Preparation of ceria nanoparticles supported on carbon nanotubes" Materials Research Bulletin, Vol. 37, pp. 313-318, 2002.

[29] K. Eun-Young, K. Dong-Suk, A. Byung-Tae, "Synthesis of mesoporous TiO_2 and its application to photocatalytic activation of methylene blue and E. Coli," Bulletin of Korean Chemical Society, Vol. 30, pp. 193-196, 2009.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.5.8]