بررسی بازدهی سلول‌های خورشیدی رنگینه ای انعطاف پذیر با الکترودهای گرافیت، طلا و پلاتین

مهدی ملکشاهی بیرانوند*[۱و] ، محمد حسین بازرگان[۲] ، علی نعمتی خراط[۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۸۹/۹/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۸۹/۱۲/۱۴

چکیده:

سلول خورشیدی رنگینه ای انعطاف پذیر از خانواده سلول های خورشیدی لایه نازک و نسل جدید سلولهای فتوولتائیک می باشد که درسال های اخیر به علت سهولت ساخت و هزینه مناسب مورد توجه قرار گرفته اند. فرایند فتوولتائیک در سلول های حساس شده با رنگینه(Dye)، مدل شبیه سازی شده فتوسنتز در گیاهان می باشد که انرژی حاصل از آن در تطابق کامل با محیط زیست می باشد. در این پژوهش روش ساخت این سلول ها و بررسی عملکرد آنها با الکترودهای مقابل مختلف مورد مطالعه قرار گرفت، که منجر به ساخت سلول هایی با ابعاد ۲۵×۲۵ میلیمترگردید. جهت ساخت این سلول ها از روش لایه گذاری دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و رونشینی رنگینه روتنیوم استفاده گردید. به منظور آنالیز و بررسی فیلم دی اکسید تیتانیوم، الکترودهای مقابل(Counter electrode) و محلول رنگینه از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی(SEM)، آنالیز میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM) و آنالیز طیف سنجی جذبی استفاده شد. راندمان سلول های ساخته شده با الکترود مقابل گرافیت، طلا و پلاتین تحت تابش منبع نوری با توان ۱۰۰۰ وات بر متر مربع به ترتیب ۰/۳۶ ،۰/۵۵ و۰/۸۱ درصد محاسبه گردید.

کلمات کلیدی:
سلول خورشیدی رنگینه ای انعطاف پذیر، الکترد مقابل، نانوکریستال دی اکسید تیتانیوم

۱) تهران، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده شیمی
۲) تهران، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران
۳) تهران، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده شیمی
* نویسنده مسئول، mahdi.malekshahi@gmail.com

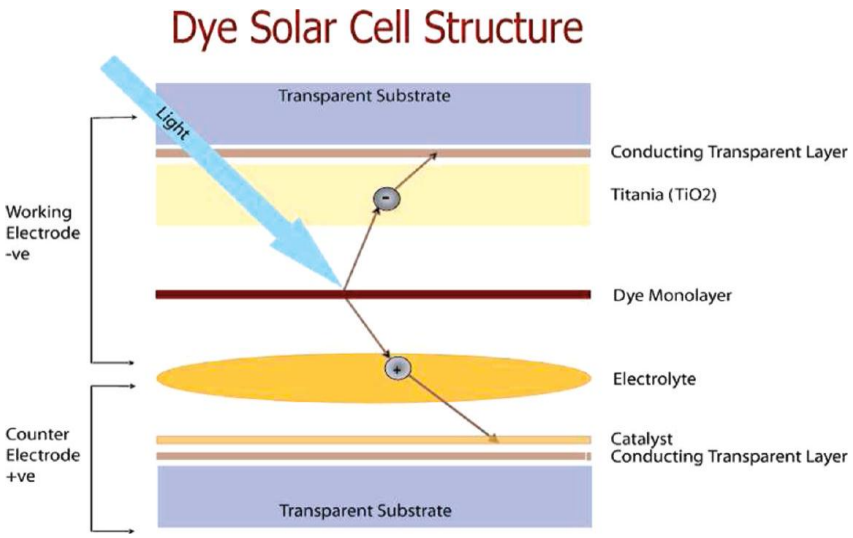
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

مقدمه

این سلول ها از قدمت چندانی برخوردار نبوده و اولین بار در سال ۱۹۹۱ تحت عنوان سلول خورشیدی رنگینه ای بر پایه ی نانوساختار تیتان یا به اختصار سلول خورشیدی رنگینه ای توسط گراتزل(Gratzel) در انستیتو علمی پژوهشی لوزان سوئیس مطرح شدند. این سلول ها به دلیل قدرت رقابتی بالا می توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای سلول های پایه ی سیلیکونی مطرح باشند[۱].

این سلول ها بر اساس فرایند فوتوالکتروشیمیایی (photo electro chemical) کار می کنند، که مدل شبیه سازی شده از فتوسنتزگیاهان است. دراین سلول ها، عملکرد رنگینه های شیمیایی و طبیعی شباهت زیادی به عملکرد کلروفیل گیاهان دارد، که توانایی جذب نور و انتقال انرژی از حالت پایدار الکترونی به حالت تحریک شده آن را دارند[۲].

بخش دیگر سلول، شامل بستر رسانای شفاف(Transparent Conductive Oxide) پوشش داده شده با یک کاتالیست الکترونی مانند پلاتین، طلا یا گرافیت است که آن را الکترود مقابل می نامند. در نهایت، محلول الکترولیت شامل یک زوج اکسایشی-کاهشی که شامل یدید-تری یدید (I^-/I_3^-) می باشد بین دو الکترود را احاطه می کند.



شکل۱: شماتیک کلی از بخش های مختلف سلول خورشیدی رنگینه ای

بستر های پلیمری یا شیشه ای رسانای استفاده شده در ساخت سلول های خورشیدی به طور معمول با لایه ای از اکسید قلع-فلوئور یا اکسید ایندیم- قلع به روش لایه نشانی رسوب گذاری شیمیایی بخار(Chemical Evaporation Deposition) یا اسپاترینگ(Sputtering) پوشش داده می شوند. ضخامت لایه پوشش داده در حدود ۱۰۰ نانومتر می باشد و پوشش اعمال شده باید دارای تفرق نور بالا، قابلیت گذردهی نور و رسانایی الکتریکی باشد[۵].

رنگینه ی مناسب در ساخت این سلول ها بایستی قابلیت جذب نور در ناحیه مرئی را داشته باشد. وجود گروههایی از قبیل کربوکسیل یا فسفونات در ساختار مولکولی رنگینه موجب پیوند مناسب تر رنگینه به سطح نیمه هادی می شوند. چنین

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

اتصالی علاوه بر تضمین چسبندگی باعث تسهیل در تزریق الکترون از رنگینه به نوار رسانش نیمه هادی شده و بازده سلول را افزایش می دهد . یک مولکول رنگینه ایده آل، در بازه زمانی متعارف کارکرد سلول خورشیدی که ۲۰ سال است (معادل با 10^8 بار سیکل گردش الکترون) باید بدون تغییر زیاد در راندمان سلول ، کارایی داشته باشد[۶].

محلول الکترولیت در سلول خورشیدی رنگینه ای شامل زوج اکسایش- کاهش (یدید-تری یدید) در یک حلال می باشد. وظیفه ی الکترولیت احیاء مولکول رنگینه در سلول می باشد که به نوعی یک حدواسط احیاء کننده بین ملکول های رنگینه و الکترود مقابل است[۷].

الکترود مقابل ، الکترود اکسایش- کاهش نامیده می شوند و مکمل الکترولیت در سلول خورشیدی رنگینه ای می باشد. این الکترود ، نقش کاهش تری یدید به یدید را در الکترولیت دارد و در واقع باعث موازنه شدن الکترون ها در این بخش از سلول می شود. فلز پلاتین با مقاومت الکتریکی خیلی کم و قابلیت احیاء کنندگی بالا، انتخاب بسیار مناسبی در پوشش الکترود مقابل است. عملکرد لایه کاتالیست به ضخامت و مرفولوژی سطح و روش پوشش وابسته است. روشهای معمول پوشش دهی پلاتین شامل پوشش به روش الکتروشیمیایی، رسوب دهی بخار و اسپاترینگ بر روی بستر رسانا می باشد. بهترین پوشش باید دارای سطح یکنواخت، پایداری مکانیکی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و انعکاس نور بالا (شبیه به آینه) باشد. علاوه بر فلز پلاتین، طلا و گرافیت نیز می توانند به عنوان کاتالیست کننده الکترونی در ای سلول ها به کار روند ولی این دو خاصیت احیاء کنندگی کمتری نسبت به پلاتین دارند[۸].

مکانیسم چرخه الکترون در سلول های خورشیدی رنگینه ای به شرح زیر است (شکل ۲)[۹]:

۱) در مرحله اول نور خورشید به رنگینه برخورد می کند و توسط آن جذب می شود. در این حالت الکترون موجود در رنگینه توسط نور خورشید برانگیخته می شود و متعاقباً الکترون برانگیخته به نوار رسانش TiO_2 تزریق می شود:

$$Dye + h\upsilon \rightarrow Dye^*$$

$$Dye^* \rightarrow Dye^+ + e^-(TiO_2)$$

۲) رنگینه اکسید شده متعاقباً توسط یک الکترولیت الکترون دهنده که شامل یدید/ تری یدید کاهش پیدا می کند، یا به عبارت ساده تر الکترون از دست رفته رنگینه برای تولید جریان الکتریسیته توسط الکترولیت سلول جبران می شود. که این امر باعث می شود چرخه انتقال الکترون همچنان ادامه یابد.

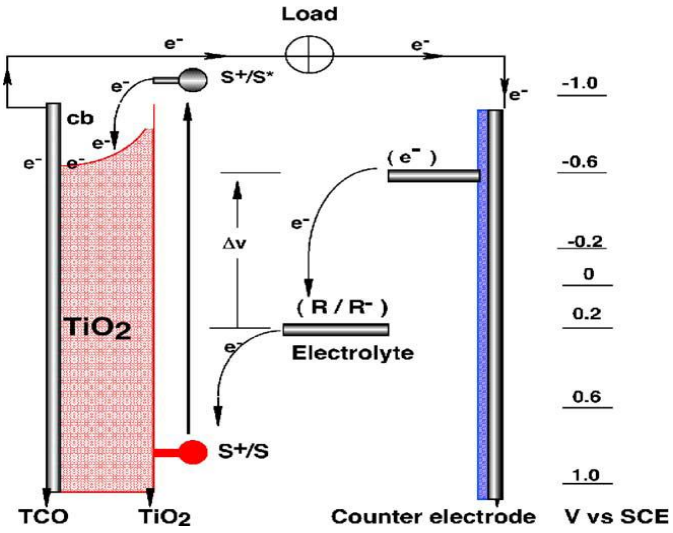
$$2\ Dye^+ + I_3^- \rightarrow 2\ Dye + 3\ I^-$$

۳) الکترون تزریق شده به نوار رسانش تیتانیم دی اکسید متعاقباً از میان این نیمه رسانا به مدار اتصال خارجی جریان می یابد.

۴) سپس مجدداً الکترون توسط جریان به الکترود مقابل بر می گردد و باعث احیاء ید می شود و الکترون هایی که در مرحله اول به رنگینه داده شده بودند را جبران کنند و چرخه کامل شود.

$$I_3^- + 2e^-(Pt) \rightarrow 3I^-$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]



شکل۲: چرخه انتقال الکترون در سلول خورشیدی رنگینه ای

روش تحقیق و آزمایش

سنتز نانو ذرات آناتاز دی اکسید تیتانیوم به روش سل- ژل

در یک بالن مقدار ۶۲mL آب مقطر و ۲۰mL استیک اسید تحت شرایط حمام یخ در بازه زمانی ۲۰ دقیقه با هم مخلوط می کنیم. به طور جداگانه ۹/۵ mL تیتانیم بوتوکساید(Titanium (IV) butoxide) و ۲/۵mL ۲- پروپانول را باهم مخلوط کردیم، سپس این مخلوط به صورت قطره قطره در بازه زمانی ۳۰ دقیقه تحت شرایط به همزدن شدید به محلول اولیه اضافه کردیم. محلول شفاف بدست آمده تحت شرایط رفلاکس به مدت ۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد هم زده شد. شرایط هیدروترمال برای نانو کریستال های سنتزی دمای ۲۳۰ درجه ی سانتی گراد و مدت زمان ۱۲ ساعت می باشد. پس از این شرایط رسوب حاصل را ابتدا با استفاده از روش سانتریفوژ صاف کردیم، سپس آن را با آب مقطر چندین بار شستشو دادیم. رسوب حاصل به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا کاملاً خشک شود.

ساخت محلول رنگینه

محلول رنگینه مورد استفاده در این پژوهش با نام تجاری535-4TBA از شرکت سولارونیکس خریداری شد . محلول ۲۰ppm این رنگینه از انحلال ۲۰ میلی گرم از آن در ۱۰۰ میلی لیتر اتانول ۹۹/۹۹٪ تهیه گردید.

ساخت فوتوالکترود

لایه نشانی فیلم دی اکسید تیتانیوم، به روش غلطکی انجام شد. بعد از شناسایی سطح رسانای پلیمر، در مرحله بعد جهت کنترل ضخامت لایه پوششی از چسب 3M با ضخامت تقریبی ۵۰ میکرون استفاده گردید. بر روی ناحیه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

محدود شده پلیمر توسط چسب، چند قطره خمیر دی اکسید تیتانیوم توسط قطره چکان اضافه شد. فرایند لایه نشانی TiO_2 با استفاده از یک میله شیشه ای صاف انجام گردید. بعد از این مراحل فرایند زینترینگ بر روی الکترود انجام گردید. عملیات حرارتی بر روی الکترود در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در آون انجام گردید. بعد از لایه نشانی فیلم دی اکسید تیتانیوم و عملیات زینتر شدن، به منظور حساس سازی فوتوالکترود آن را در محلول ppm ۲۰ رنگینه روتینیومی قرار دادیم. مدت زمان انجام فرایند حساس سازی در دمای اتاق برای فوتوالکترود به مدت ۲۴ ساعت می باشد.

ساخت الکترود مقابل با استفاده از بستر پلیمری

در این پژوهش از سه نوع کاتالیست الکترونی متفاوت شامل کربن، طلا و پلاتین به عنوان الکترود مقابل استفاده گردید. برای ساختن الکترود کربن از اسپری گرافیت برای پوشش دهی سطح پلیمر هادی شده استفاده گردید و به منظور حذف محمل وحلال آن، الکترود مقابل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. به منظور نشاندن یک لایه ۳۰ نانومتری از طلا و پلاتین بر روی سطح پلیمر از روش اسپاترینگ تحت شرایط 8×10^{-5} تور با نرخ تبخیر ۰/۲ آنگستروم بر دقیقه و ۱۴ میلی آمپر به مدت ۲۴۰ ثانیه استفاده گردید.

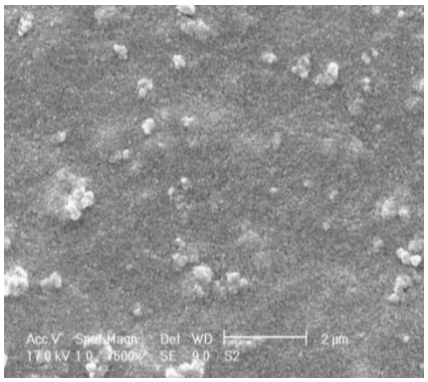
اتصال اجزای مختلف سلول خورشیدی رنگینه ای انعطاف پذیر

برای این کار دو بخش فوتوالکترود و الکترود مقابل بر روی هم قرار داده شدند. بین دو الکترود از یک لایه چسب دو طرفه با ضخامت ۱۰۰ میکرون به عنوان فضا دهنده استفاده گردید. در این حالت در فاصله بین دو الکترود حوضچه ای ایجاد شد که در آن الکترولیت به وسیله یک سرنگ تزریق گردید.

نتایج و تحلیل نتایج

بررسی مورفولوژی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

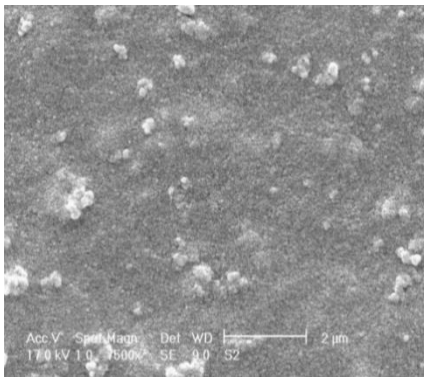
پوشش یکنواخت و عاری از ترک خوردگی فیلم دی اکسید تیتانیوم بر روی سطح فوتوالکترود در شکل (۳) مشخص است.



شکل ۳: تصویر سطح فوتوالکترود در مقیاس ۱ میکرون

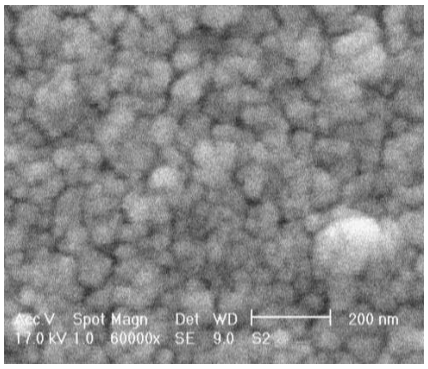
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

همانطوری کـه در شـکل (۴) مشـاهده مـی شـود ذرات مـی تواننـد در هنگـام پوشـش ایجـاد انباشـتگی بـر روی سـطح نماینـد، در این حالـت عـدم یکنـواختی در پوشـش فـیلم دی اکسـید تیتـانیم بـر روی سـطح فوتـو الکتـرود مشـاهده مـی گـردد. بـا مطالعـات انجـام شـده مشـخص گردیـد کـه قبـل از اسـتفاده از خمیـر (سوسپانسـیون) TiO_2 بایسـتی آن را بـه مـدت ۱ سـاعت در حمـام التراسونیک قرار دهیم تـا نـانوذرات کـاملاً یکنواخـت شـوند، در ایـن حالـت اگـر آن را بـر روی سـطح پلیمـر پوشـش دهـیم سـطح کاملاً یکنواخت و عاری از هرگونه کلوخه و ناهمواری بدست می آید.



شکل٤: انباشتگی و رشد ذرات بر روی فوتوالکترود

ساختار اسـفنجی و بسـیار ریـز ذرات دی اکسـید تیتـانیوم در شـکل ۵ قابـل مشـاهده اسـت. انـدازه ذرات زینتـر شـده حـدوداً کمتـر از ۵۰ نـانومتر اسـت و همـانطور کـه مشـاهده مـی شـود بـه هـم پیوسـتگی ذرات بسـیار ریـز، باعـث تشـکیل ناحیـه سـطحی متخلخل بر روی سـطح فوتـوالکترود شـده اسـت. ذرات نانوکریسـتالی دی اکسـید تیتـانیوم زینتـر شـده بـا ایجـاد تمـاس درونـی بـا هـم، اتصـال الکترونیکـی جهـت انتقـال الکتـرون فـراهم آورده انـد. سـاختار متخلخـل، زمینـه مناسـبی را جهـت حسـاس سـازی فوتوالکترود ایجـاد مـی کنـد. بنـابر گزارشـات بهتـرین سـاختار فـیلم نانوکریسـتالی دی اکسـید تیتـانیوم هنگـامی بدسـت مـی آیـد کـه انـدازه ذرات در محـدوده پـائین تـر از ۵۰ نـانومتر بـوده کـه منجـر بـه جـذب بهینـه ی رنگینـه در سـطح آن مـی گـردد. در محدوده ی ذکر شده احتمـال برگشـت الکتـرون تزریـق شـده از نـوار رسـانایی دی اکسـید تیتـانیوم بـه مولکـول هـای رنگینـه نیـز کاهش پیدا می کند.



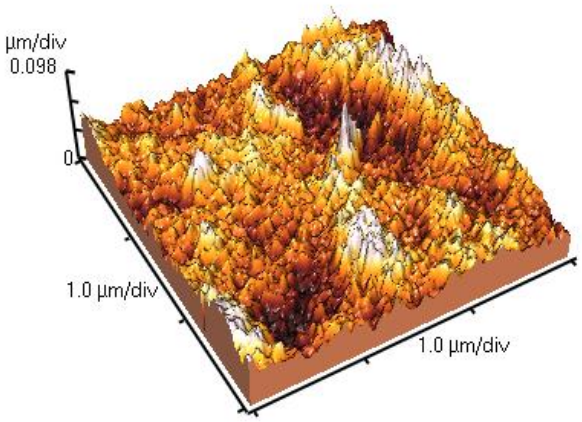
شکل۵- تصویر ساختار اسفنجی از فیلم TiO_2

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

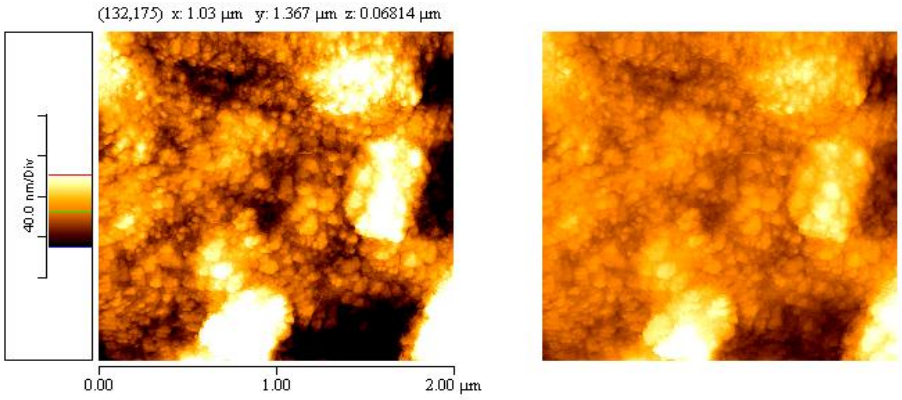
بررسی مورفولوژی سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

میکروسکوپ نیروی اتمی AFM ابزاری قدرتمندی برای شناسایی سطح با قدرت تفکیک فوق العاده بالا است که توانایی تصویر برداری سه بعدی با کیفیت بالا از نمونه را دارا می باشد.

شکل (۶ و ۷) تصاویر AFM فیلم TiO_2 را بعد از عملیات زینترینگ نشان می دهد که تصدیقی بر تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی است. تصاویر دو بعدی و سه بعدی بیانگر رشد ذرات در فیلم ها است. پراکندگی ناهمواری ها در این تصاویر به خوبی دیده می شود. با توجه به اطلاعات میکروسکوپ نیروی اتمی، فاکتور زبری مربعی میانگین که معیاری از زبری سطح است، در حدود۳۳/۲۷ نانومتر است. از این پارامتر می توان برای تعیین خاصیت نوری سطح فوتوالکترود نیز استفاده کرد. هر چه این فاکتور کوچکتر باشد، سطح فیلم پوشش داده شده انعکاس نور بالاتری دارد. هرچه فاکتور زبری مربعی میانگین بیشتر باشد ساختار اسفنجی فیلم بیشتر است و میزان تفرق نور افزایش می یابد. افزایش مقدار جذب مولکول رنگینه با افزایش زبری سطح باعث افزایش میزان جذب نورمی شود. از طرفی تفرق باعث پدیده شکست نور در خلل و فرج فیلم شده و جذب طیف نور به ویژه در مناطق با مینیمم جذب رنگینه افزایش می یابد.



شکل٦: تصویر سه بعدی از فیلم نانوکریستالی TiO_2 بعد از عملیات زینترینگ



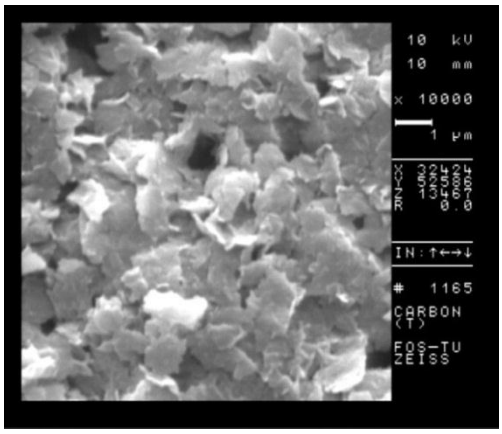
شکل۷: تصویردو بعدی از فیلم نانوکریستالی TiO_2 بعد از عملیات زینترینگ

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

بررسی انجام شده بر روی الکترود مقابل

نشاندن مواد کاتالیست کننده ی الکترونی بروی بستر پلیمری کار حساسی است و بایستی با بیشترین دقت ممکن انجام شود، زیرا اگر کوچکترین آلودگی بر روی این بستر باشد گرافیت، طلا و پلاتین به عنوان کاتالیست کننده ی الکترونی به مرور زمان دچار ترک خوردگی می شوند و در نتیجه نمی توانند به درستی وظیفه ی خود را به عنوان الکترود مقابل انجام دهند. در ضمن کار کردن با بستر پلیمری در هنگام سوار کردن قطعات مختلف سلول خورشیدی بسیار مشکلی است، زیرا این بستر با کوچکترین نیروی خارجی دچار تنش می شود و در نتیجه موادی که بر روی آن نشانده شده اند دچار ترک خوردگی می شوند که به ضرر کارایی سلول است. استفاده از ورقه مسی به جای بستر پلیمر به منظور نشاندن مواد کاتالیست کننده ی الکترونی این گونه مشکلات را برطرف نمود.

استفاده از ورقه مسی از یک طرف مشکلات مربوط به تنش و سختی کار کردن با بستر پلیمری را بر طرف نمود و از طرف دیگر انعطاف پذیری سلول خورشیدی را که مهمترین مزیت برای این نوع سلول ها به شمار می آید، را حفظ نمود. شکل (۸) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح الکترود مسی پوشش داده شده با گرافیت را نشان می دهد. در این شکل به خوبی اتصال بین ذرات کربنی با یکدیگر را بعد از عملیات حرارتی مشاهده می شود.



شکل ۸: گرافیت نشانده شده بر روی ورقه ی مسی

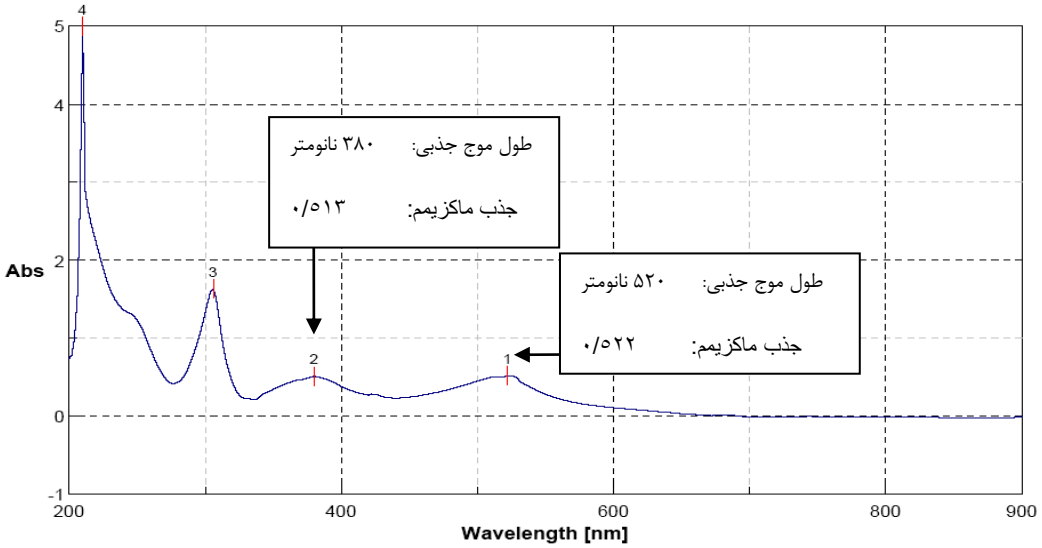
اندازه گیری طیف جذبی محلول رنگینه

طیف جذبی رنگینه روتینیوم به منظور تعیین بیشینه جذب نوری آن توسط دستگاه طیف سنجی جذبی ثبت گردید. با توجه به اطلاعات این دستگاه بیشینه جذب رنگینه در ناحیه مرئی ۴۰۰–۸۰۰ نانومتر مشاهده گردید.

نمودار مربوط به شکل (۹) آنالیز طیف سنجی جذبی مربوط به رنگینه روتنیوم مورد استفاده در ساخت سلول خورشیدی ر نگینه ای را نشان می دهد. در این نمودار همانطور که مشاهده می شود، پیک های بیشینه جذبی طیف نوری و میزان جذب آنها مشخص شده است. با توجه به اینکه طیف نور مرئی از ۳۸۰ –۸۰۰ نانومتر تغییر می کند، بیشینه طول موج جذبی ۳۸۰ و ۵۲۰ نانومتر در رنگینه روتنیوم به ترتیب با میزان جذب ۰/۵۱۳ و ۰/۵۲۲ دارای اهمیت است. با توجه به

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

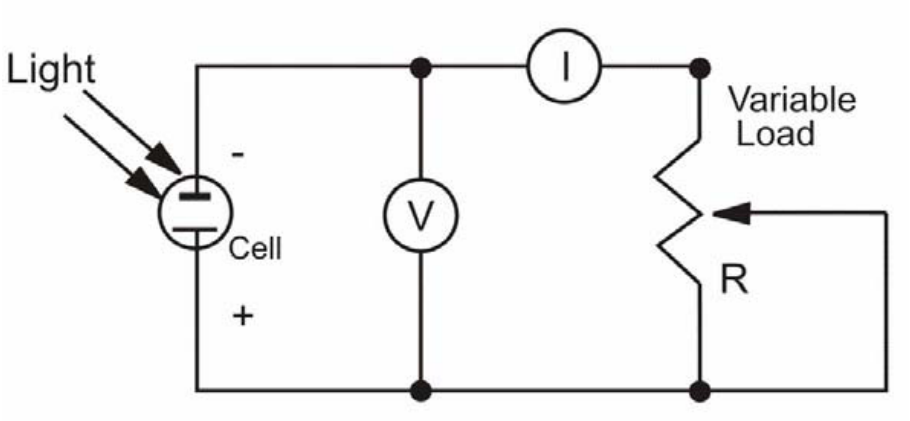
آنـالیز طیـف جـذبی رنگینـه ی روتنیـوم کـه پیـک هـای پهـن جـذبی در نـواحی مرئـی، مخصوصـاً در محـدوده ی ۵۲۰ نـانومتر نشان می دهد می توان نتیجه گرفت که این رنگینه می تواند عملکرد بالایی در سلول خورشیدی داشته باشد.



شکل۹: آنالیز طیف سنجی جذبی مربوط به رنگینه روتنیوم

ابزارآزمون سلول خورشیدی رنگینه ای

جهت اندازه گیری راندمان سلول خورشیدی، از مدار زیر استفاده می شود(شکل ۲-۱۲).



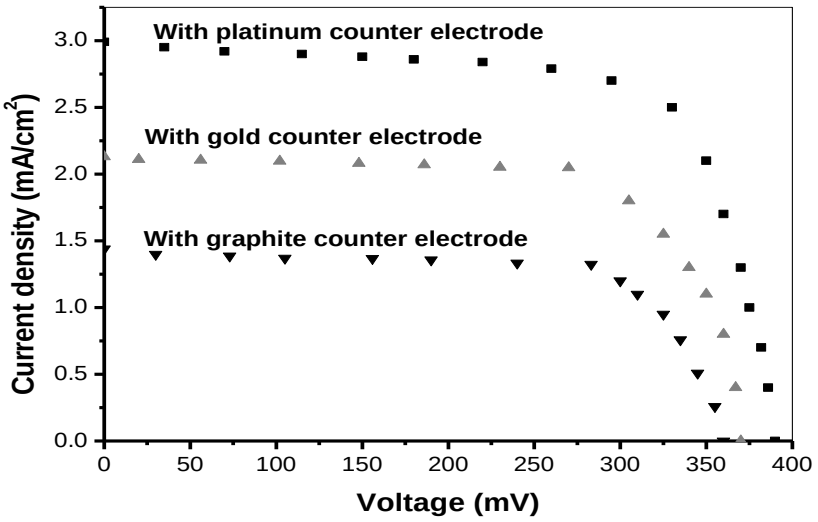
شکل۱۰: مدار استفاده شده جهت اندازه گیری ولتاژ و جریان سلول خورشیدی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

در مدار بالا، ولت متر به صورت موازی و آمپرمتر به صورت سری با سلول خورشیدی بسته شد. مقاومت متغیر ۱۰۰۰- ۰ اهم در مدار قرار گرفت و پروژکتور با لامپ هالوژن ۱۰۰۰ وات به عنوان منبع نور به کار برده شد. به منظور اندازه گیری میزان شدت نور تابشی توسط لامپ هالوژنی از دستگاه سولار پاور متر استفاده گردید. در ابتدا ولتاژ مداری باز V_{op} و جریان مداری کوتاه I_{sc} به صورت اتصال مستقیم ولت متر و آمپرمتر به سلول خورشیدی ثبت گردید، سپس با اتصال مقاومت متغیر، ولتاژ و جریان محاسبه شده به صورت منحنی جریان-ولتاژ ثبت گردید.

بررسی عملکرد سلول خورشیدی رنگینه ای

به منظور آزمون سلول های خورشیدی رنگینه ای ساخته شده با TiO_2 نانوساختار که در این پژوهش تهیه گردید، از الکترود های مقابل مختلف (گرافیت، طلا و پلاتین) بر روی بستر پلیمری استفاده گردید. در نهایت منحنی ولتاژ-آمپر برای سلول های ساخته شده تحت شدت تابش نور ۱۰۰۰ وات بر متر مربع ثبت گردید. شکل (۱۰) منحنی مربوط به سلول ساخته شده با الکترودهای مقابل گرافیت، طلا و پلاتین را نشان می دهد.



شکل ۱۱: نمودار ولتاژ- جریان برای الکترودهای مقابل مختلف بر روی بستر پلیمری

اندازه‌گیری

جدول (۱) نتایج بدست آمده از منحنی های ولتاژ-جریان را برای سلول های ساخته شده را نشان می دهد. همانطور که در این شکل و جدول مشاهده می شود فاکتور گنجایش برای هر سه سلول یکسان است، اما جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مداری باز، جریان ماکزیمم، ولتاژ ماکزیمم و راندمان سلول از گرافیت به طلا و از طلا به پلاتین در حال افزایش است. بنابراین الکترود پلاتین بالاترین بازدهی را برای سلول ما به وجود می آورد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

جدول ۱: اطلاعات بدست آمده از سلول خورشیدی رنگینه با الکترودهای مقابل مختلف بر روی بستر پلیمری

الکترود مقابل	گرافیت	طلا	پلاتین
ولتاژ مداری باز (V_{op}) میلی ولت	۳۶۰	۳۷۰	۳۹۰
جریان مداری کوتاه (I_{sc}) میلی آمپر بر سانتیمتر مربع	۱/۴۴	۲/۱۳	۲/۹۹
ولتاژ ماکزیمم (V_m) میلی ولت	۲۷۰	۳۰۰	۳۳۰
جریان ماکزیمم (I_m) میلی آمپر بر سانتیمتر مربع	۱/۲۰	۲/۰۴	۲/۵۰
فاکتور گنجایش (FF)	۷۰	۷۰	۷۰
راندمان ٪ (η)	۰/۳۶	۰/۵۵	۰/۸۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

منابع

[1] M. Gratzel, B. O'Regan, (1991), "Dye Sensitized Solar Cell," Nature 1991, 353, 737-740.

[2] K. Nazeeruddin, et al., (2004), "Highly Efficient Photonto- Electron Conversion with Mercurochromesensitized Nanoporous Oxide Semiconductor Solar Cells," Solar Energy Materials & Solar Cells, 248, 1317–1328.

[3] Y. Chen , et al., (2007), cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder Nov. 26-28, Tainan, Taiwan.

[4] F.Pichot, et al., (2000), Preparation of Nanocrystalline TiO_2 with Mixed Template and Its Application for Dye-Sensitized Solar Cells , Langmuir, 16, 5626-5630.

[5] J. Chen, et al., (2009), High efficient dye-sensitized solar cells based on carbon black counter electrodes, carbon, 47, 2704 –2708.

[6] M.H. Bazargan, (2009), Performance of Nano Structured Dye-Sensitized Solar Cell Utilizing Natural Sensitizer Operated with Patinum and Carbon Coated Counter Electrodes, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Vol. 4, No. 4, p. 723-727.

[7] D. Zhang, et al., (2008), A new method for manufacturing nanostructured electrodes on plastic substrates, Journal of Nanomaterials, ID 271631, 4 pages.

[8] S.A. Haque, E. Palomares, B.M.Cho, A.N.M. Green, N.Hirata, D.R. Klug, J.R.Durrant. (2005), "Charge Separation Versus Recombination in Dyesensitized Nanocrystalline Solar Cells: the Minimization of Kinetic Redundancy," Journal of American Chemical Society, 127,10, pp 3456- 3462.

[9] K. Hara, et al., (2000), "Highly Efficient Photonto- Electron Conversion with Mercurochromesensitized Nanoporous Oxide Semiconductor Solar Cells," Solar Energy Materials & Solar Cells, 64, pp 115-134.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]