

## بررسی ویژگی نوری-الکتریکی و تعیین بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی سلول خورشیدی دووجهی رنگ‌دانه‌ای به کمک فیلم نانوساختار پلی‌آنیلین/تیتانیوم اکسید

علیرضا بهرامیان<sup>۱\*</sup>، انسیه کرمی<sup>۲</sup> و داریوش وشایی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار دانشگاه صنعتی همدان، گروه مهندسی شیمی، همدان، ایران

۲- فارغ التحصیل مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی همدان، گروه مهندسی شیمی، همدان، ایران

۳- دانشیار دانشگاه کارولینای شمالی، دانشکده مهندسی الکترونیک و کامپیوتر، کارولینای شمالی، آمریکا

دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۷، بازنگری: آذر ۱۳۹۷، پذیرش: آذر ۱۳۹۷

**چکیده:** در این پژوهش، ویژگی نوری-الکتریکی و بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی سلول خورشیدی دو وجهی حساس به رنگ‌دانه N719 متشکل از فیلم پلی‌آنیلین (PANI) و فیلم نانوساختار تیتانیوم اکسید ( $TiO_2$ ) مورد بررسی قرار گرفته است. الکتروود متقابل بر پایه PANI طی فرایند بسیارش آنیلین با کاتالیست اسیدی تهیه شد. درحالی‌که فیلم  $TiO_2$ ، به‌عنوان فتوآند، در دامی پایین به‌کمک روش شیمیایی سل-ژل و فرایند لایه‌نشانی غوطه‌وری ساخته شد. بالا بودن مقدار عبوردهی نوری سلول ساخته‌شده، سبب شد تا بر اثر تابش نور از دو وجه، چگالی بالاتری از مولکول‌های رنگ، طی فرایند فتوشیمیایی برانگیخته شوند. افزایش بازدهی تبدیل سلول در حضور رنگ‌دانه مولکولی بر پایه روتنیم، با نام تجاری N719، تا مقدار ۸۲۲٪ در مقایسه با سلول مشابه ساخته‌شده با الکتروود پلاتین (با بازدهی ۷۷٪) مناسب‌تر است. هزینه پایین ساخت و بالا بودن عبوردهی نوری تا ۷۱٪ در ناحیه نور مرئی، امکان استفاده از الکترودهای PANI و  $TiO_2$  با ریختی ویژه را برای ساخت سلول‌های خورشیدی دووجهی، در مقیاس صنعتی، فراهم می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای، فیلم نانوساختار، فیلم پلی‌آنیلین/تیتانیوم اکسید، بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی، عبوردهی نوری

### مقدمه

اکسایش-کاهش، الکترولیت مایع آلی و یک الکتروود متقابل است [۱ تا ۴]. به‌طور معمول، فتوآند از جنس یک اکسید از فلزهایی مانند تیتانیوم، روی، نقره و طلا و الکتروود متقابل از شیشه رسانا شامل اینیومین قلع اکسید (ITO) یا فلئوئور قلع اکسید (FTO)، ورقه پلاتین و مواد پایه کربنی ساخته و موجب تسریع فرایند اکسایش-کاهش می‌شود [۵ تا ۷]. به‌کارگیری الکتروود پلاتین

امروزه سلول‌های خورشیدی دووجهی رنگ‌دانه‌ای (DSSCs) به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان جایگزین برای سلول‌های خورشیدی رایج استفاده می‌شوند. این سلول‌ها، فرایند آماده‌سازی ساده، هزینه ساخت پایین و بازدهی قابل قبولی دارند. به‌طور کلی، ساختار اصلی یک سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای شامل فتوآند، یک زوج

ساخت فیلم‌های نازک با رسانایی الکتریکی مطلوب و فعالیت کاتالیستی بالا بررسی شده‌اند تا جایگزین الکترودهای گران‌قیمت پلاتینی و غیرشفاف از نوع کربنی شوند [۱۹]. PANI به علت هزینه کم، رسانایی الکتریکی مطلوب، مقاومت مکانیکی مناسب و پایداری محیطی، شرایط بی‌مانندی را برای انتخاب به‌عنوان الکترودمتقابل دارد. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که PANI در سولفونیک‌اسید با نسبت مولی ۲ به ۱ حل شده و ترکیب به‌دست آمده رسانایی مطلوبی برابر با  $400 \text{ S/cm}$  و مدول یانگ بالایی برابر با  $2 \text{ GPa}$  دارد. این درحالی است که فیلم‌های PANI با ساختار ایفای شکل، رسانایی الکتریکی برابر با  $600 \text{ S/cm}$  را نشان داده‌اند [۲۰ و ۲۱]. با توجه به این ویژگی ویژه، پژوهش‌ها بر به‌کارگیری PANI برای ساخت تجهیزهای نوین نانوالکترونیک و ذخیره انرژی متمرکز شده‌اند [۲۲]. رنگ‌سنجی روشی و تحلیل مکانیکی پویا نشان می‌دهد بین زنجیرهای PANI، زمانی که در دمای بالاتر از  $400 \text{ K}$ ، گرمادهی می‌شوند، پیوندهای شبکه‌ای متقاطع رخ می‌دهد [۲۳]. شر و همکارانش [۲۴] گزارش کردند که واکنش پیوند متقاطع بین نیتروژن‌های ایمین و حلقه‌های کوئینوید، یک ساختار نوع "فنازین" دوبعدی را برای PANI نتیجه می‌دهد. رسانایی الکتریکی به دلیل نقص‌های ساختاری در زنجیرهای شاخه‌ای یا پیوند متقاطع، کاهش می‌یابد که سبب کاهش پیوند فیزیکی در شاخه اصلی PANI می‌شود. بررسی‌های قابل‌توجهی به‌ویژه در اثر گرمادهی، واکنش شیمیایی و مقدار حلال باقیمانده بر ویژگی‌های ساختاری، الکتریکی و نوری فیلم‌های PANI انجام شده است [۲۵ و ۲۶]. بررسی‌های اخیر به‌کارگیری نانوالیافی PANI را برای ساخت ناندستگاه‌های الکترونیک پربازده پیشنهاد می‌کنند. هرچند که عملکرد الکتروکاتالیستی نانوالیافی PANI هنوز نیازمند بهبود ساختاری است. بیشتر پژوهش‌های نوین در خصوص ترکیب فیلم‌های PANI و اکسیدهای فلزی برای افزایش بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی فیلم‌های نانوساختار در راستای افزایش انتقال الکترون بین لایه‌ها است. به‌دلیل نزدیکی کاف انرژی  $\text{TiO}_2$  ( $3.2 \text{ eV}$ ) و پلی‌آنیلین ( $2.8 \text{ eV}$ ) که فرایند انتقال بار و برانگیختگی الکترونی را در تابش نور تسریع می‌کند

به‌دلیل آنکه ازجمله گران‌ترین فلزهای کمیاب است، به‌عنوان عاملی محدودکننده برای کاربری تجاری آن در ساخت سلول‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ بشمار می‌رود. در بیشتر پژوهش‌ها، تشویق به جایگزینی این فلز گران‌بها با دیگر مواد ارزان‌تر شده است تا قیمت نهایی سلول خورشیدی ساخته‌شده را تا حد امکان کاهش دهند. سامانه‌های برپایه تیتانیم اکسید ( $\text{TiO}_2$ ) از زمان نخستین معرفی آن‌ها در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسط Oregan و Gratzel تاکنون توجه بسیاری از پژوهشگران را به‌خود جلب کرده‌اند [۸]. ویژگی فیزیکی ویژه فیلم‌های نازک  $\text{TiO}_2$  طی این سال‌ها بیشتر به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها بررسی شده است [۸]. برای مثال، فیلم‌های نازک نانوساختار  $\text{TiO}_2$  به دلیل مقدار بازتابش بالای نور، پایداری شیمیایی بالا و کاف انرژی معادل  $3.2$  و  $3.7$  الکترون ولت، در فازهای روتایل و آناتاز انتخاب مناسبی برای واکنش‌های همراه با انتقال الکترون به‌حساب می‌آیند. عملکرد یک سلول خورشیدی بر پایه  $\text{TiO}_2$  تحت تأثیر مقدار عبوردهی نوری، ضخامت فیلم، ریخت‌شناسی سطحی و ساختار بلوری آن قرار می‌گیرد [۹ تا ۱۱].

در مقایسه با ذره‌های کروی با سطوح صاف، ساختارهای دوبعدی شامل نانوصفحه‌ها و نانوساختارهای سه‌بعدی  $\text{TiO}_2$ ، در حالت خوشه‌های گل-شکل و گل‌کلمی شکل مقدار ویژگی فتوکاتالیستی بیشتری از خود نشان می‌دهند [۱۲ تا ۱۴]. در مورد سلول‌های خورشیدی بر پایه  $\text{TiO}_2$  یا با مواد پایه کربنی مانند کربن فعال، گرافیت و نانولوله‌های کربنی به‌عنوان الکترودمتقابل، لازم است تا ضخامت فیلم به چند میلی‌متر برسد تا فعالیت کاتالیستی مناسبی به‌دست آید. بدیهی است، افزایش ضخامت باعث کاهش مقدار عبوردهی فیلم خواهد شد در صورتی که لایه نازکی از پلاتین بر شیشه به‌عنوان الکترودمتقابل به‌کارگرفته شود، افزون بر قیمت بالا، بازتابش نوری بالایی خواهد داشت که بازدهی سلول را کاهش خواهد داد. از این رو، به‌کارگیری بسپارهای رسانا مانند  $9.9$ -دی‌اکتیل‌فلوئورن-بنزوتیازول (F8BT) [۱۵]،  $3.4$ -اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن [۱۶]، پلی‌فنیلن وینیل [۱۷]،  $2$ ،  $2$ -به‌یس  $3.4$ -اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن [۱۸] و پلی‌آنیلین (PANI) در

### بخش تجربی

مواد

تیتانیم تتر-ا-یز و پر و پوکساید (۹۹٪، TTIP)، آمونیم پروکسی دی سولفات  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ، هیدروفلوئوریک اسید (۴۰٪ HF)، هیدروکلریدریک اسید (۳۷٪ HCl)، آنیلین (۹۹٫۵٪، ASC)، ۱-متیل-۲-پیرولیدینون (NMP)، روتینیم (II) ۵۳۵ به یس TBA (N719) سولارونیکس، رنگ دانه تجاری N719 (دی ایزوتوسیانات-بیس (۲-۳" پیپریدیل-۴"-۳" دیکربوکسیلات))، روتینیم (II) به یس (تتراپوتیل آمونیم)، ۱،۲-دی-متیل-۳-پروپیل ایمیدازولیم دیدید (DMPImI)، ید (۹۹٫۸٪ ACS،  $\text{I}_2$ )، لیتیم دیدید آیدروس (LiI)، ۴-ترشیو-بوتیل پیریدین (۹۶٪، TBP)، استونیتریل آیدروس (۹۹٫۸٪)، پروپیلن کربنات و اتانول خالص از شرکت سیگما-آلدریچ خریداری شدند.

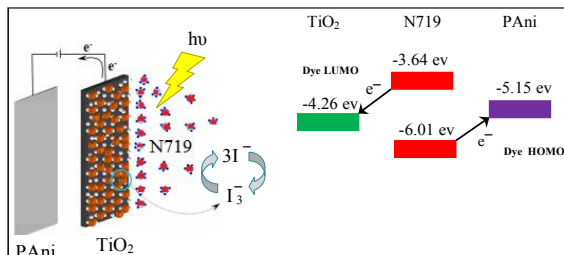
#### روش تهیه شیمیایی

نانوذره‌های  $\text{TiO}_2$  طی واکنش آبکافت شیمیایی با فرایند سل-ژل تهیه شدند. برای این منظور، ابتدا محلول اسیدی HF با غلظت ۰٫۵ مولار تهیه شده و TTIP حل شده در اتانول قطره‌قطره به محلول اسیدی افزوده و به مدت ۴ ساعت در دمای  $80^\circ\text{C}$  در ظرف در بسته تحت هم‌زدن شدید و بازروانی گرمایی قرار گرفت. پس از هم‌زدن و بازروانی، محلولی یکنواخت و شیری‌رنگ تشکیل شد. آب یون‌زدوده به آرامی به محلول شیری‌رنگ افزوده تا حجم محلول به مقدار اولیه آن برسد. محلول به‌دست‌آمده برای ۱۶ ساعت در دمای  $50^\circ\text{C}$  به آرامی تحت هم‌زدن قرار گرفت تا واکنش آبکافت کامل شده و محلول آبی کم‌رنگی ایجاد شود. بسپارش  $0.55\text{ mmol}$  آنیلین در محلول آبی  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  و HCl در دمای اتاق در حال هم‌زدن شدید طی ۱۲ ساعت انجام شد. غلظت اولیه  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  و HCl به ترتیب ۰٫۲۵ و ۰٫۵ مولار بود. پودر PANI جامد به‌دست آمده به‌ترتیب با آب یون‌زدوده و اتانول شسته شد. ذره‌های جامد به‌دست آمده صاف و به‌تدریج تحت شرایط خلأ در دمای  $55^\circ\text{C}$  خشک شدند. در پایان، NMP به‌عنوان حلال به پودر به‌دست آمده افزوده شد تا محلول ۱۰ درصد وزنی PANI تهیه شود. ترکیب به‌دست آمده به مدت

و موجب افزایش بازده تبدیل سلول خورشیدی می‌شود. افزایش فعالیت فتوکاتالیستی فیلم  $\text{PANI}/\text{TiO}_2$  بیشتر برپایه تراز انرژی بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده (HOMO) و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال شده (LUMO) است. همچنین، کمینه نوار رسانایی، در نزدیکی تراز انرژی LUMO مولکول رنگ و بالاتر از کمینه نوار رسانایی برای  $\text{TiO}_2$  قرار می‌گیرد، درحالی‌که بیشینه نوار ظرفیت بسیار بالاتر از تراز HOMO قرار دارد [۲۷]. در صورتی‌که، فیلم  $\text{PANI}/\text{TiO}_2$  در معرض نور مرئی قرار گیرد، هر دو ماده فوتون‌های دریافتی را در سطح خود جذب می‌کنند و سپس جدایی بار اتفاق می‌افتد. از آنجاکه نوار رسانایی  $\text{TiO}_2$  و تراز LUMO ترکیب PANI برای انتقال بار به‌خوبی همخوانی دارند، الکترون‌ها تحت تأثیر تابش نور مرئی از نوار جذب  $\pi-\pi^*$  فیلم PANI برانگیخته و به‌آسانی در نوار رسانایی فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  وارد می‌شوند. درحالی‌که، الکترون‌ها در نوار ظرفیت به فیلم PANI منتقل می‌شوند و پشت سر خود حفره برجای می‌گذارند که باعث افزایش واکنش اکسایش-کاهش در الکترومد مقابل می‌شود. به دلیل تابش نور از دو سمت فیلم شفاف تعداد بیشتری از مولکول‌های رنگ می‌توانند برانگیخته شوند و در نتیجه بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی سلول خورشیدی را افزایش دهند. در کارهای پیشین، ویژگی‌های ترمودینامیکی، دینامیکی و گرمایی-مکانیکی فیلم PANI با زیر لایه  $\text{TiO}_2$  تهیه‌شده در شرایط تهیه شیمیایی در دمای کمتر از ۳۷۸ K مورد بررسی قرار گرفت [۲۶ و ۲۸].

در این پژوهش، نوعی سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای دووجهی با ترکیب الکترومد مقابل PANI نانوالیافی و فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  مرجانی شکل به‌عنوان فتواند به‌روش غوطه‌وری ساخته شد. مقدار بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی سلول خورشیدی دوطرفه ساخته‌شده با رنگ‌دانه مولکولی ۷۱۹ N تحت تابش نور مرئی از سمت جلو و پشت سلول مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، عملکرد فتوولتاستجی سلول دووجهی ساخته‌شده، بررسی شد. در نهایت نشان داده شد که ریخت سطحی بی‌مانند PANI و  $\text{TiO}_2$  نقش بسزایی در بهبود ویژگی الکتریکی و نوری سلول ساخته‌شده دارند.

ساخته شده و نمودار سطح انرژی مواد تشکیل دهنده آن را نشان می دهد. برپایه شکل ۱، زوج اکسایش-کاهش رایج استفاده شده، دید/ تری دید است که در الکترولیت مایع آلی قرار دارد.



شکل ۱ ساختار سلول خورشیدی دووجهی رنگ دانه ای ساخته شده در این پژوهش و نمودار سطح انرژی مواد تشکیل دهنده آن

#### مشخصه یابی سلول

ریخت شناسی و ساختار سطحی فیلم های نانوساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam Scan V ۲۳۰۰ بررسی شد. ضخامت فیلم های نازک نانوساختار  $TiO_2$  و PANI با ارتفاع سنج نوری ZeScope اندازه گیری شد. مقدار عبوردهی فیلم ها با استفاده از طیف نورسنج مدل UV-vis Hitachi ۳۱۴۰ در ناحیه ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ nm تعیین شد. مساحت سطح فیلم های تهیه شده با روش BET استفاده از دستگاه Micromeritics ASAP ۲۰۲۰ تعیین شد. توزیع اندازه تخلخل با روش BJH به روش همدمای جذب-واجذب نیتروژن محاسبه شد. روش ولتاسنجی چرخه ای (CV) در یک سل الکتروشیمیایی سه الکترودی (با نرخ روبش  $50 \text{ mV/s}$  تحت گستره پتانسیل از  $-0.4$  تا  $1 \text{ V}$ ، شامل فیلم نانوساختار  $TiO_2/FTO$  و یا ورقه پلاتین به عنوان الکترودهای متقابل،  $Ag/AgCl$  به عنوان الکترود اشباع مرجع و PANI/FTO به عنوان الکترود کاره) به کار گرفته شد. محلول الکترولیت شامل ترکیبی از گونه های شیمیایی استونیتریل  $10 \text{ mM}$ ،  $LiI$  یک میلیمولار و  $LiClO_4$   $0.1 \text{ M}$  بود. طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در دستگاه الکتروشیمیایی مدل CHI ۶۰۰E انجام شد [۲۲، ۲۹ تا ۳۱]. بازده تبدیل فوتون تاییده شده به سلول خورشیدی، در حالت AC، بر یک سامانه

دو ساعت در دمای اتاق تحت همزدن قرار گرفت تا محلولی یکنواخت با رنگ سبز قهوه ای به دست آید.

#### ساخت فیلم های PANI و $TiO_2$

فیلم های نانوساختار PANI و  $TiO_2$  طی دو مرحله آماده شدند. در مرحله اول، شیشه های FTO با ضخامت  $2/3 \text{ mm}$  به عنوان پیش ماده در حمام فراصوت اتانول به مدت  $10$  دقیقه تمیز شدند. فیلم نازک  $TiO_2$  طی فرایند غوطه وری به کمک دستگاه لایه نشانی غوطه وری با سرعت کشش  $0.5 \text{ cm/min}$  به دست آمد. فیلم های تهیه شده، ابتدا تحت دمای  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  در آون الکترونیکی پیش گرم شده و سپس به آرامی تا دمای اتاق سرد شدند. همین فرایند دوباره تکرار و فیلم های به دست آمده در کوره تحت دمای  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  تحت خلأ با شیب  $3 \text{ }^\circ\text{C/min}$  گرم و سپس، به آرامی سرد شدند. میانگین ضخامت فیلم نانوساختار مرجانی شکل  $TiO_2$  برابر یک میکرومتر تعیین شد. در مرحله دوم، فیلم PANI با دستگاه لایه نشانی غوطه وری با سرعت کشش  $1 \text{ cm/min}$  بر سطح لام شیشه ای از جنس FTO به عنوان پیش ماده تهیه شد. در نهایت، به فیلم PANI پوشش داده شده بر سطح سوبسترا در کوره تحت شرایط خلأ در دو دمای  $45$  و  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  گرما داده شدند تا فیلم های PANI مورد نظر به دست آید. ضخامت فیلم های پلی آیلین بسته به سرعت لایه نشانی بین  $80$  تا  $120 \text{ nm}$  تعیین شد.

#### ساخت سلول خورشیدی

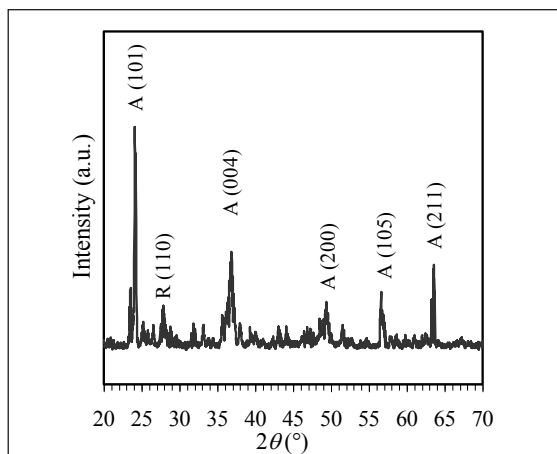
ابتدا فیلم های نانوساختار  $TiO_2$  به عنوان فتوآند به صورت جداگانه در محلول حاوی رنگ دانه مولکولی N719 با غلظت  $0.3 \text{ mM}$  به مدت  $24$  ساعت غوطه ور شدند. سپس، با محلول اتانول شسته و تحت خلأ در دمای  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  خشک شدند. سلول DSSC، با پیوند فتوآند  $TiO_2$  و پلاتین یا PANI به عنوان الکترود متقابل، ساخته شد. ترکیب شیمیایی مایع الکترولیت درون سلول شامل  $0.5 \text{ M LiI}$  مولار،  $60 \text{ mM I}_2$  میلی مولار،  $0.5 \text{ M PTBP}$  مولار در استون و پروپیلن کربنات بود. شکل ۱ ساختار DSSC

مشکل از نانوذره‌های  $\text{TiO}_2$  با اندازه ۲۰ تا ۳۰ nm و ضخامت  $94 \pm 5$  nm بر سطح شیشه FTO را نشان می‌دهد. در شکل ۳-ب مقادیر زیادی از ساختارهای مرجانی شکل به دست آمده از نانوذره‌های  $\text{TiO}_2$  که به صورت تصادفی کنار یکدیگر چیده شده‌اند، بر سطح فیلم قابل مشاهده است. تعیین دقیق اندازه ساختارهای متخلخل مرجانی به علت تجمع غیریکنواخت ذره‌ها و توزیع گسترده آن‌ها مشکل است ولی اندازه بیشتر آن‌ها می‌تواند در گستره ۲۰۰ تا ۷۰۰ nm قرار گیرند. قابل توجه است که این تجمع‌ها از قرارگیری چندین لایه روی یکدیگر تشکیل شده‌اند که ساختارهای جالبی با توجه به شکل بی‌ماندشان، دارند. اندازه ساختارهای مرجانی شکل  $\text{TiO}_2$  در لایه‌های متفاوت فیلم تغییر می‌کند. تصویر SEM با بزرگنمایی بالا نشان داد که سطح ساختارهای مرجانی شکل از اجتماع نانوذره‌ها دارای توزیع اندازه یکنواخت در قالب ساختارهای بیضی شکل کشیده تشکیل شده‌اند. نانوذره‌ها در گستره اندازه ۲۵ تا ۴۰ nm و میانگین اندازه حفره‌ها ۱۴ تا ۱۹ nm قرار دارند. ساختارهای حفره‌دار مشاهده شده به طور معمول از اجتماع نانوذره‌ها به وجود می‌آیند و به افزایش مساحت سطح ویژه فیلم کمک می‌کنند. تصویر TEM فیلم PANI خشک شده در دماهای  $45^\circ\text{C}$  و  $200^\circ\text{C}$  که به ترتیب دماهایی پایین تر و بالاتر از دمای حالت گذار شیشه‌ای این ماده ( $105^\circ\text{C}$ ) هستند، به ترتیب در شکل‌های ۳-ج و ۳-د مشاهده می‌شوند. همان طور که از این شکل‌ها مشخص است، ساختار سطحی فیلم PANI به اندازه کافی متراکم نیست و ساختارهای متخلخل متوالی به صورت درهم آمیخته مشاهده می‌شوند. همچنین، می‌توان دید که افزایش دمای خشک کردن از  $45^\circ\text{C}$  به  $200^\circ\text{C}$  به پیوستن نانوالیاف کمک می‌کند و منجر به تشکیل ساختارهای سطحی غیریکنواخت تری می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود فیلم PANI نانوالیاف متشکل از رشته‌های بسیاری میله‌ای شکل با قطر ۲۰ تا ۴۰ nm و اندازه طولی بالای ۵۰۰ nm است. انتظار می‌رود که حجم فضای خالی بر سطح فیلم PANI بر اثر پدیده پیوند بین‌ساختاری بسیار کاهش یابد،

اندازه‌گیری IPCE محاسبه شد. یک لامپ زنون با توان ۷۵ W به عنوان منبع نور اصلی برای پرتو تکفام و لامپ هالوژنی ۷۵ W و ۱۲ V به عنوان منبع نور فرعی استفاده شدند. عملکرد فتوولتایی سلول با استفاده از تجزیه‌گر سلول خورشیدی کلاس A به کمک منبع نور با استاندارد AM ۱.۵ G و شدت  $100 \text{ mW/cm}^2$  اندازه‌گیری شد. شدت تابش نور تابیده شد با یک سلول خورشیدی سیلیکونی مرجع فیلتر شده ۵ KG و اسنجیده شد.

### نتیجه‌ها و بحث

شکل ۲ الگوی XRD ساختار بلوری فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  را نشان می‌دهد. سطوح ۱۰۱، ۰۰۴، ۲۰۰، ۱۰۵ و ۲۱۱ مشخص شده در الگوی XRD مرتبط با فاز آناتاز  $\text{TiO}_2$  بوده که به عنوان ساختار بلوری غالب در فیلم به دست آمده، مشخص است. وجود پیک ضعیف ۱۱۰ در الگوی XRD نشانگر درصد وزنی پایینی از فاز روتایل در ساختار  $\text{TiO}_2$  است.

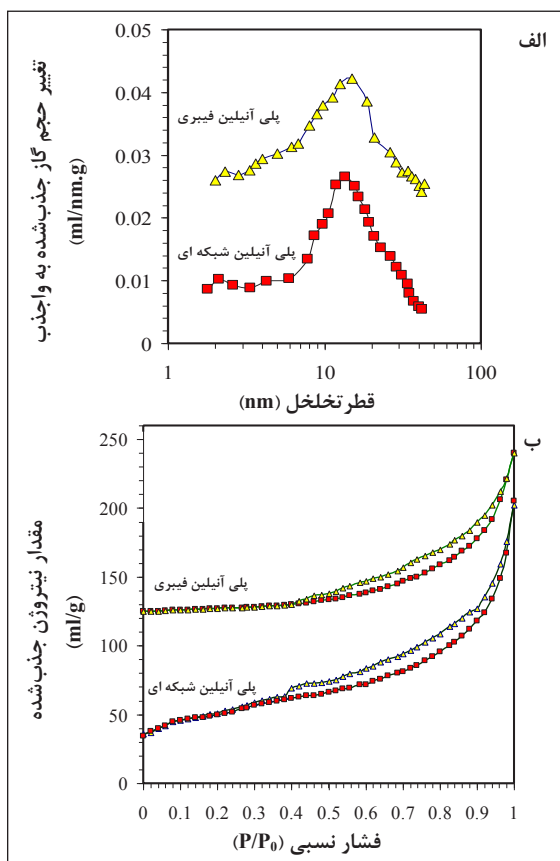


شکل ۲ الگوی XRD تهیه شده از فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$

شکل ۳ تصویرهای SEM فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  و ساختارهای مرجانی شکل  $\text{TiO}_2$  و تصویرهای TEM فیلم PANI را نشان می‌دهد. شکل ۳-الف تصویر فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  گرمادهی شده در دمای  $400^\circ\text{C}$  را نشان می‌دهد. این فیلم، سطحی یکنواخت

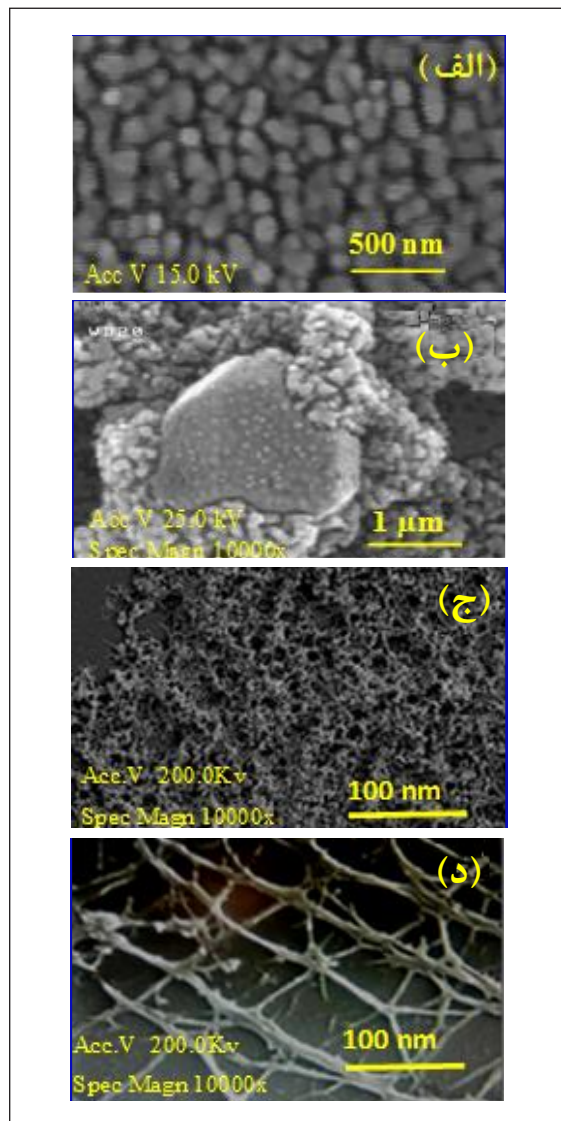


شکل ۴-الف، منحنی همدمای جذب-وا جذب نیتروژن و شکل ۴-ب منحنی توزیع اندازه تخلخل سطحی فیلم PANI نانوالیافی در دمای خشک کردن  $45^{\circ}\text{C}$  و فیلم با ساختار شبکه‌ای متقاطع در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. براساس اندازه‌گیری BET مساحت سطحی فیلم PANI با ساختار نانوالیافی و شبکه‌ای متقاطع به ترتیب  $222\text{ m}^2/\text{g}$  و  $173\text{ m}^2/\text{g}$  پیش‌بینی شده که نشان از افزایش مساحت سطح فیلم بسیار با ساختار نانوالیافی شکل متخلخل دارد. براساس روش BJH نیز قطر تخلخل میانگین فیلم PANI نانوالیافی و شبکه‌ای متقاطع به ترتیب  $11.9\text{ nm}$  و  $14.6\text{ nm}$  تخمین زده شد. بنابراین، انتظار می‌رود فیلم PANI نانوالیافی به دلیل مساحت سطح بالا، قابلیت جذب نور و بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی بالایی داشته باشد.



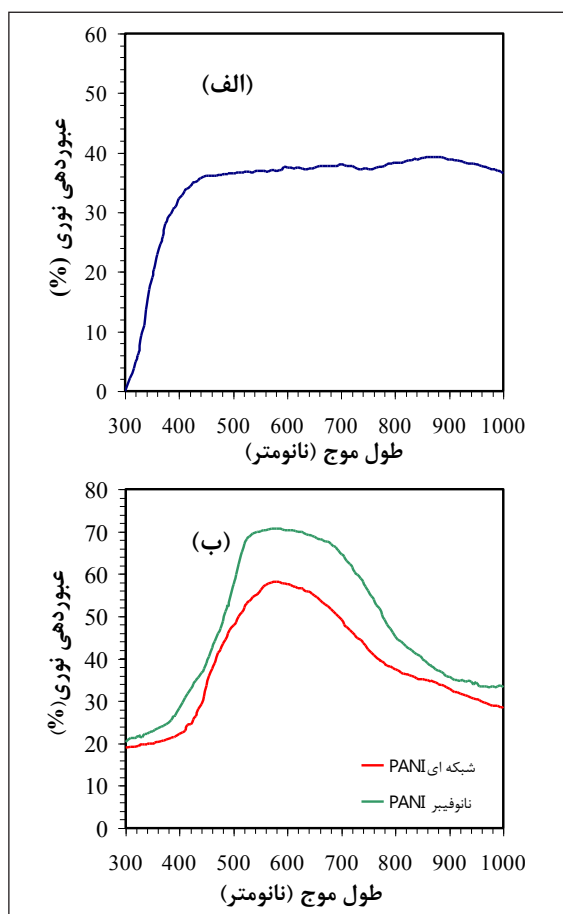
شکل ۴ (الف) منحنی همدمای جذب-وا جذب نیتروژن و (ب) منحنی توزیع اندازه تخلخل سطحی فیلم PANI نانوالیافی و شبکه‌ای متقاطع

بنابراین، شکل نانوالیافی و ساختار متخلخل فیلم PANI منجر به تشکیل ساختار نانوالیافی شده که عملکرد کاتالیستی محلول الکترولیت یدید/تریید را افزایش می‌دهد. در حقیقت، مساحت سطح بالای فیلم PANI منجر به افزایش چگالی‌های جریان کاتالیستی بزرگ‌تری در واحد سطح می‌شود، چرا که نسبت سطح به حجم بالاتری برای کاهش گونه یدید ایجاد می‌شود.



شکل ۳ تصاویر SEM فیلم (الف) نانوساختار  $\text{TiO}_2$  و (ب) ساختارهای مرجانی شکل فیلم  $\text{TiO}_2$  و (ج) تصاویر TEM از فیلم PANI خشک‌شده در دماهای  $200^{\circ}\text{C}$  (د) و  $45^{\circ}\text{C}$

گفته شده الکترون‌های بیشتری از حالت پایه (HOMO) به حالت برانگیخته (LUMO) مولکول‌های رنگ بر سطح فیلم  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی شکل در مدت نوردهی منتقل شده که به افزایش جدایش بار و فرایندهای انتقال الکترون می‌انجامد. لازم به یادآوری است که نقطه ضعف اصلی هر دو سلول عدم جذب کامل نور به خاطر مقدار عبوردهی فیلم  $\text{TiO}_2$  و ضریب تجزیه مولی پایین رنگ‌دانه مولکولی در طول موج‌های بالاتر از  $600 \text{ nm}$  است. در واقع چالش بزرگ به کارگیری رنگ‌های پایه روتینی می‌ماند N719 عدم وجود قله جذب در نواحی سرخ و نزدیک فروسرخ و قیمت بالای ساخت آن‌هاست.

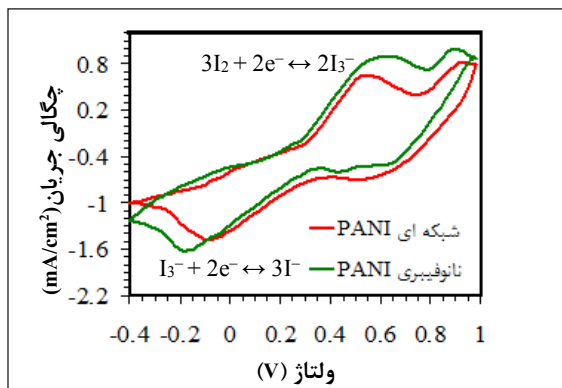


شکل ۵ مقدار عبوردهی نوری فیلم‌های نازک نانوساختار با دستگاه طیف‌سنجی (الف) PANI-UV-Vis با ساختارهای شبکه‌ای و الیافی، (ب)  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی

ویژگی نوری فیلم‌های نازک PANI و  $\text{TiO}_2$  با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی UV-Vis اندازه‌گیری شد. در شکل ۵-الف مقدار عبوردهی نوری فیلم PANI نانوالیافی لایه‌نشانی شده بر شیشه FTO با فیلم PANI شبکه‌ای متقاطع در گستره نور مرئی مقایسه شده است. بالاترین مقدار عبوردهی نوری فیلم‌های PANI شبکه‌ای متقاطع و نانوالیافی به ترتیب در گستره  $480 \text{ nm}$  تا  $705 \text{ nm}$  و  $465 \text{ nm}$  تا  $780 \text{ nm}$  به دست آمد. فیلم PANI نانوالیافی در ناحیه مرئی بالاترین عبور را در حدود ۷۱٪ نشان داد که مشخص شد این ساختار گزینه بهتری نسبت به PANI با ساختار شبکه‌ای (با مقدار عبوردهی ۵۸٪) و الکتروکاتالیز (با مقدار عبوردهی نوری نزدیک به صفر) به عنوان الکتروکاتالیز برای ساخت DSSC دووجهی است. شکل ۵-ب طیف عبوری فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  گرما دهی شده در  $400^\circ \text{C}$  را نشان می‌دهد. این طیف نشان داد که مقدار عبوردهی نوری فیلم  $\text{TiO}_2$  کمتر از ۳۸٪ است. مقدار عبوردهی نوری فیلم به طور نمایی در بالاتر از  $395 \text{ nm}$  افزایش می‌یابد و مقدار به نسبت پایداری به بیشینه مقدار خود (حدود ۸۰٪) می‌رسد. کاهش شدید مقدار عبوردهی نوری که به طور تقریب در کمتر از ناحیه  $395 \text{ nm}$  رخ می‌دهد، به علت جذب نور به خاطر برانگیختگی الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانایی فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی شکل است.

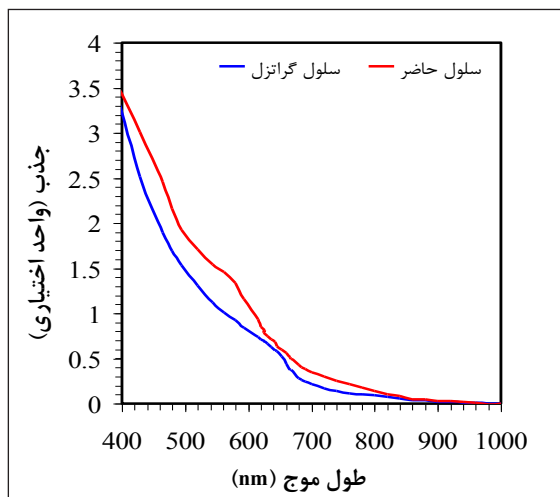
شکل ۶ نتایج طیف پاسخ نوری DSSC دووجهی ساخته شده شامل الکتروکاتالیز PANI با ساختار نانوالیافی و فیلم  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی شکل به عنوان فتوآند با به کارگیری رنگ‌دانه مولکولی N719 با غلظت اولیه  $0.3 \text{ mM}$  را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده با سلول مرجع DSSC بررسی شده توسط گراتزل [۱] مقایسه شده است. اندازه‌گیری‌های جذب نوری نشان داد که سلول حاضر در ناحیه  $558 \text{ nm}$  در مقایسه با سلول گراتزل افزایش جزئی در مقدار جذب رنگ نشان می‌دهد و در ناحیه قرمز و نواحی نزدیک فروسرخ عملکرد سلول پیشنهادی در جذب نور بهتر است. در نواحی طیف

پیک کاتدی مشخص است که در الکتروکاتالیست ساختار شبکه‌ای متقاطع، و به‌ویژه الکتروکاتالیست متقابل PANI نانوالیافی، چگالی جریان اکسایش-کاهش بالاتر و در نتیجه فعالیت الکتروکاتالیستی بالاتری برای کاهش یون‌های تری‌یدید به یدید در مقایسه با الکتروکاتالیست پلاتین وجود دارد.



شکل ۷ منحنی CV در بررسی فعالیت الکتروکاتالیستی DSSC ساخته شده با الکتروکاتالیست متقابل PANI الیافی و شبکه‌ای متقاطع در الکترولیت مایع شامل LiI، یدید استونیتریل و  $\text{LiClO}_4$  (به ترتیب با غلظت‌های ۱، ۰، ۱ و ۱۰۰ میلی مولار)

شکل ۸ عملکرد فتوولتاسنجی سلول DSSC بر پایه فیلم نانوساختار  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی شکل و الکتروکاتالیست متقابل PANI و پلاتین تحت تابش نور با توان  $100 \text{ mW/cm}^2$  را نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ (J-V) سلول با هر یک از الکتروکاتالیست متقابل پلاتین، PANI شبکه‌ای متقاطع و PANI نانوالیافی در حضور  $0.3 \text{ mM}$  مولار رنگ‌دانه مولکولی N719 تحت تابش نور از دو وجه نشان داده شده است. نتایج فتوولتاسنجی DSSC ساخته شده در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. براساس شکل ۸-الف سلول ساخته شده PANI نانوالیافی، چگالی جریان برابر با  $13.7 \text{ mA/cm}^2$ ، ولتاژ مدار برابر با  $0.734 \text{ V}$  و بازده تبدیلی برابر با  $8.22\%$  را نشان داد. در حالی که، مقدار بازده در حضور الکتروکاتالیست متقابل بر پایه پلاتین و فیلم PANI با ساختار شبکه‌ای متقاطع به ترتیب  $7.75\%$  و  $7.81\%$  بود. نتایج شکل ۸-الف نشان می‌دهد بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی سلول ساخته شده بر



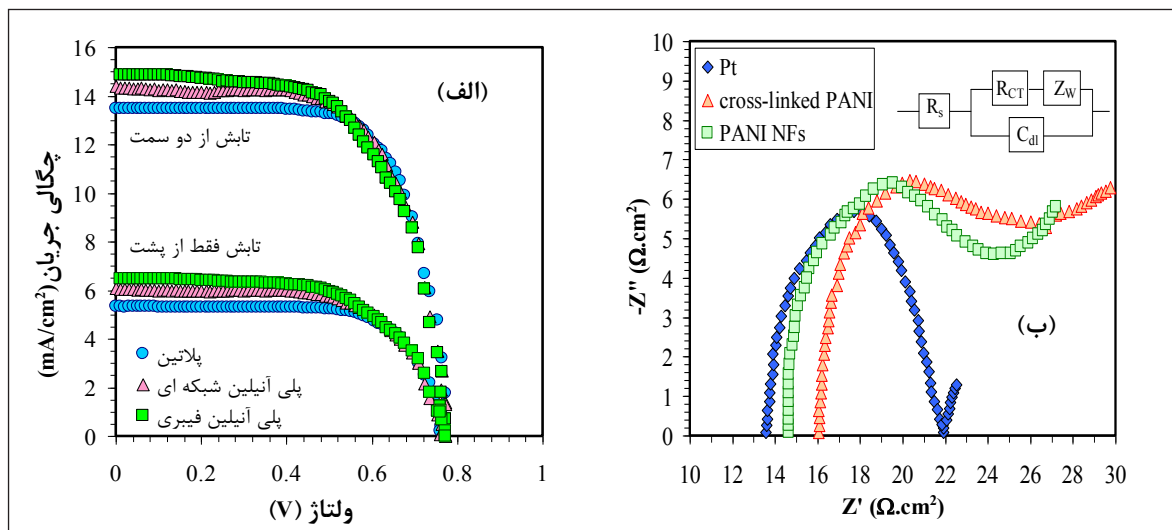
شکل ۶ طیف پاسخ نوری DSSC دووجهی ساخته شده شامل الکتروکاتالیست متقابل PANI با ساختار نانوالیافی و فیلم  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی شکل با استفاده از رنگ‌دانه مولکولی N719 با غلظت اولیه  $0.3 \text{ mM}$

PANI دو ساختار الیافی و شبکه‌ای متقاطع را نشان می‌دهد که به‌طور پیوسته در الکترولیت مایع شامل گونه  $10 \text{ mM}$  LiI، یدید استونیتریل یک میلی مولار و محلول  $0.1 \text{ mM}$   $\text{LiClO}_4$ ، عملکرد در گستره پتانسیل  $-0.4$  تا  $1$  ولت ثبت شده است. عملکرد الکتروکاتالیستی الکتروکاتالیست متقابل FTO/PANI و الکتروکاتالیست متقابل PANI و ورقه پلاتین با الکتروکاتالیست مرجع  $\text{Ag/AgCl}$  در  $0.1 \text{ M}$   $\text{KCl}$  اشباع غوطه‌ور در محلول الکترولیت مورد بررسی قرار گرفت. کالیبره شدن دستگاه با استفاده از محلول فروسین به‌عنوان استاندارد انجام شد. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، پیک‌های چگالی جریان کاتدی و آندی الکتروکاتالیست متقابل PANI ساختار نانوالیافی از مقدار آن برای الکتروکاتالیست متقابل PANI با ساختار شبکه‌ای متقاطع و ورقه پلاتین بالاتر است. بررسی منحنی‌های ولتاسنجی چرخه‌ای نشان می‌دهد که الکتروکاتالیست متقابل PANI نانوالیافی چگالی جریان کاتدی و آندی به ترتیب برابر با  $0.98 \text{ mA/cm}^2$  و  $1.61 \text{ mA/cm}^2$  دارد که در مقایسه با سایر الکتروکاتالیست‌ها به‌کارگرفته شده مقادیر بالاتری هستند. این در حالی است که الکتروکاتالیست متقابل شبکه‌ای متقاطع چگالی جریان کاتدی کمتری برابر با  $0.82 \text{ mA/cm}^2$  و چگالی جریان آندی برابر با  $1.49 \text{ mA/cm}^2$  دارد. از موقعیت



دارای مقادیر بالای  $R_s$  و  $R_{ct}$  به ترتیب برابر با  $15.11 \Omega \text{cm}^2$  و  $4.39 \Omega \text{cm}^2$  است که نسبت به سایر الکترودها عملکرد نامناسبی از خود نشان می‌دهد. الکتروده پلاتین در حضور رنگ‌دانه مولکولی N719 مقدار متوسط  $R_s$  برابر با  $12.89 \Omega \text{cm}^2$  و مقدار پایین  $R_{ct}$  برابر با  $2.84 \Omega \text{cm}^2$  دارد. الکتروده PANI با ساختار نانوالیافی، به‌طور تقریب مقادیر مشابهی از  $R_s$  و  $R_{ct}$  نسبت به الکتروده پلاتین، به ترتیب با  $13.01 \Omega \text{cm}^2$  و  $3.14 \Omega \text{cm}^2$  دارد. شکل ۸-ب یک مدار معادل برای مدل‌سازی امپدانس سلول DSSC را نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که  $R_{ct}$  الکتروده PANI نانوالیافی به مقدار کمی بیشتر از مقدار آن برای پلاتین و به‌ویژه الکتروده PANI شبکه‌ای متقاطع است. افزایش فعالیت الکتروکاتالیستی واکنش اکسایش-کاهش و بهبود نسبت شار جریان گذرنده نسبت به سطح را می‌توان به مساحت سطحی بالای الکتروده PANI با ساختار نانوالیافی، به دلیل طبیعت متخلخل آن، نسبت داد که از نتایج تحلیل‌های SEM، TEM و BET مشخص است. انتظار می‌رود با طراحی سلول حاضر و بهینه‌سازی شدت نور تابیده‌شده به آن بتوان در آینده افق روشن‌تری را برای ساخت و طراحی DSSC دووجهی در مقیاس صنعتی ترسیم کرد.

پایه پلاتین، هنگامی که نور تنها از سمت جلو تابیده می‌شود، برابر با  $6.72\%$  و هنگامی که سلول تنها از پشت تحت تابش قرار گیرد، برابر با  $2.84\%$  است که با مقادیر گزارش شده در سایر مقالات همخوانی دارد [۳۰ و ۳۱]. این مقادیر برای سلول ساخته‌شده با الکتروده PANI نانوالیافی، هنگامی که از سمت جلو و پشت تحت تابش نور قرار گرفته به ترتیب برابر با  $7.06\%$  و  $3.41\%$  به‌دست آمد. افزایش بازده سلول حاضر را می‌توان به عواملی همچون بالابودن ظرفیت پخش نور در فیلم  $\text{TiO}_2$  مرجانی شکل و قابلیت بالای جذب نور در لایه‌های فیلم PANI مرتبط دانست. نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی DSSC ساخته‌شده برای بررسی ویژگی‌های الکترودهای متقابل و عملکرد منحنی مشخصه آن نیز انجام شده و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودارهای نایکویست متناظر به‌دست آمده از مقاومت سری نسبی ( $R_s$ ) و مقاومت انتقال بار ( $R_{ct}$ ) سلول با الکترودهای متقابل PANI با ساختارهای نانوالیافی و شبکه‌ای متقاطع، و همچنین، الکتروده پلاتین در حضور رنگ‌دانه مولکولی N719 با غلظت  $0.3 \text{ mM}$  میلی‌مولار به‌دست آمد. همان‌طور که در شکل ۸-الف نشان داده شده است الکتروده PANI با ساختار شبکه‌ای متقاطع، در حضور رنگ‌دانه مولکولی N719



شکل ۸ منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ DSSC دووجهی ساخته‌شده شامل الکتروده متقابل PANI نانوالیافی و فیلم  $\text{TiO}_2$  مرجانی شکل در حضور رنگ‌دانه مولکولی N719 با غلظت اولیه  $0.3 \text{ mM}$  (الف) و منحنی نایکویست سل به همراه مدار معادل آن (ب)

جدول ۱ نتایج فتولتاسنجی DSSC ساخته شده

بازده (%)	ضریب پرشدگی (FF)	Rct ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	Rs ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	جهت تابش	الکتروود متقابل
۶٫۷۲	۰٫۷۲۳	-	-	۱۲٫۷۸	۰٫۷۲۷	جلو	پلاتین
۲٫۸۴	۰٫۷۸۴	-	-	۵٫۳۳	۰٫۶۷۹	پشت	
۷٫۷۵	۰٫۷۰۶	۲٫۹۲	۱۲٫۸۹	۱۴٫۷۹	۰٫۷۴۲	جلو و پشت	
۵٫۹۱	۰٫۷۲۸	-	-	۱۳٫۱۹	۰٫۶۱۶	جلو	پلی آنیلین شبکه‌ای متقاطع
۳٫۰۳	۰٫۷۴۹	-	-	۶٫۰۳	۰٫۶۷۱	پشت	
۷٫۸۱	۰٫۷۰۰	۴٫۳۹	۱۵٫۰۹	۱۵٫۴۵	۰٫۷۲۲	جلو و پشت	
۷٫۰۶	۰٫۷۱۲	-	-	۱۳٫۶۰	۰٫۷۲۹	جلو	پلی آنیلین نانوالیافی
۳٫۴۱	۰٫۷۶۴	-	-	۶٫۴۸	۰٫۶۸۹	پشت	
۸٫۲۲	۰٫۶۸۸	۳٫۱۴	۱۳٫۰۱	۱۶٫۱۷	۰٫۷۳۸	جلو و پشت	

## نتیجه‌گیری

ویژه بالای نانوفیبرهای PANI منجر به افزایش بازدهی تبدیل فتوالکتروشیمیایی سلول حاضر تا مقدار ۸٫۲۲٪ شد که در مقایسه با سلول مشابه ساخته شده با الکتروود پلاتین (بازده ۷٫۷۵٪)، مناسب‌تر است. براساس نتایج ولتاسنجی چرخه‌ای و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، الکتروود ساخته شده از PANI نانوالیافی فعالیت کاتالیستی بالاتر و مقاومت انتقال بار کمتری در سطح مشترک الکتروود/ الکتروولیت از خود نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها موجب بهبود چگالی جریان پیوند کوتاه الکتروود PANI نانوالیاف ( $7.16 \text{ mA/cm}^2$ ) در مقایسه با الکتروود PANI با ساختار شبکه‌ای متقاطع ( $45.15 \text{ mA/cm}^2$ ) و پلاتین ( $79.4 \text{ mA/cm}^2$ ) می‌شود. افزون بر این، الکتروود PANI نانوالیافی، بیش‌ترین مقدار عبوردهی نوری (حدود ۷۱٪) در ناحیه مرئی را نشان می‌دهد که تولید DSSC دووجهی از آن را ممکن می‌سازد. همچنین، پخش نور فوق‌العاده  $\text{TiO}_2$  با ساختار مرجانی شکل و مساحت سطح ویژه بالای نانوالیاف پلی‌آنیلین در بهبود ویژگی سلول ساخته شده نقش مؤثری دارند.

در این پژوهش، بازده تبدیل فتوالکتروشیمیایی و ویژگی نوری-الکتريکی سلول خورشیدی دووجهی رنگ‌دانه‌ای بر پایه روتینیم با نام تجاری N719 و متشکل از فیلم پلی‌آنیلین (PANI) شفاف ترکیب شده با فیلم نانوساختار تیتانیم اکسید ( $\text{TiO}_2$ ) مورد بررسی قرار گرفته است. الکتروود متقابل برپایه PANI طی فرایند بسپارش آنیلین با کاتالیست اسیدی تهیه شد. درحالی‌که فیلم  $\text{TiO}_2$ ، به‌عنوان فتوآند، در دمای پایین طی فرایند شیمیایی سل-ژل و با روش فرایند لایه‌نشانی روشن غوطه‌وری ساخته شدند. تصاویر SEM و TEM نشان دادند که فیلم‌های PANI خشک شده در دماهای  $45^\circ\text{C}$  و  $200^\circ\text{C}$  به ترتیب ساختارهای نانوالیافی و شبکه‌ای متقاطع دارند. مساحت سطح فیلم‌های PANI نانوالیافی و شبکه‌ای متقاطع به ترتیب برابر با  $222 \text{ m}^2/\text{g}$  و  $173 \text{ m}^2/\text{g}$  به دست آمد. شفاف بودن سلول ساخته شده سبب می‌شود تا بر اثر تابش نور از دو وجه، چگالی بالاتری از مولکول‌های رنگ‌دانه، طی فرایند فتوشیمیایی برانگیخته شوند. پخش بالای نور تابیده شده با ساختارهای  $\text{TiO}_2$  مرجانی شکل و مساحت سطح

- [1] Grätzel, M.; Nature 414, 338-344, 2001.
- [2] \* شهیدی زندگی، مهدی؛ گلستانی، قاسم؛ غلامحسین زاده، محمدرضا؛ نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، شماره ۹ (۳)، ۴۱-۳۳، ۱۳۹۶.
- [3] Lim, J.W.; Cho, D.Y.; Kim, J.; Na, S.I.; Kim, H.K.; Solar Energy Materials and Solar Cells 107, 348-354, 2012.
- [4] Chen, Q.; Zhou, H.; Hong, Z.; Luo, S.; Duan, H.S.; Wang, H.H.; Liu, Y.; Li, G.; Yang, Y.; Journal of the American Chemical Society 136, 622-625, 2014.
- [5] Parisi, M.L.; Maranghi, S.; Basosi, R.; Renewable and Sustainable Energy Reviews 39, 124-138, 2014.
- [6] Chen, W.; Liu, Y.; Luo, J.; Sun, J.; Gao, L.; Materials Letters 67, 60-63, 2012.
- [7] Hou, Y.; Wang, D.; Yang, X.H.; Fang, W.Q.; Zhang, B.; Wang, H.F.; Lu, G.Z.; Hu, P.; Zhao, H. J.; Yang, H.G.; Nature Communications 4, 1583-1590, 2013.
- [8] O'Regan, B.; Grätzel, M.; Nature 353, 737-740, 1991.
- [9] Masuda, Y.; Ohji, T.; Kato, K.; Crystal Growth & Design 10, 913-922, 2009.
- [10] Wu, J.J.; Yu, C.C.; The Journal of Physical Chemistry B 108, 3377-3379, 2004.
- [11] Ma, Z.; Guo, Q.; Mao, X.; Ren, Z.; Wang, X.; Xu, Ch.; Yang, W.; Dai, D.; Zhou, Ch.; Fan, H.; Yang, X.; The Journal of Physical Chemistry C 117, 10336-10344, 2013.
- [12] Prabakar, S.; Bumby, C.W.; Tilley, R.D.; Chemistry of Materials 21, 1725-1730, 2009.
- [13] Sun, Z.; Kim, J.H.; Zhao, Y.; Bijarbooneh, F.; Malgras, V.; Lee, Y.; Kang, Y.-M.; Dou, S.X.; Journal of the American Chemical Society 133, 19314-19317, 2011.
- [14] Lee, S.H.; Kwon, J.; Kim, D.Y.; Song, K.; Oh, S.H.; Cho, J.; Schubert, E.F.; Park, J.H.; Kim, J.K.; Solar Energy Materials and Solar Cells 132, 47-55, 2015.
- [15] Yoon, K.J.; Park, J.S.; Lee, S.J.; Song, M.; Shin, I.A.; Lee, J.W.; Gal, Y.S.; Jin, S.H.; Journal of Polymer Science Part A 46, 6762-6769, 2008.
- [16] Patten, H.V.; Ventosa, E.; Colina, A.; Ruiz, V.; López-Palacios, J.; Wain, A.J.; Lai, S.C.S.; Macpherson, J.V.; Unwin, P.R.; Journal of Solid State Electrochemistry 15, 2331-2339, 2011.
- [17] Moslin, R.M.; Espino, Ch.G.; Swager, T.M.; Macromolecules 42, 452-454, 2008.
- [18] Kiya, Y.; Iwata, A.; Sarukawa, T.; Henderson, J.C.; Abruña, H.D.; Journal of Power Sources 173, 522-530, 2007.
- [19] Tai, Q.; Chen, B.; Guo, F.; Xu, Sh.; Hu, H.; Sebo, B.; Zhao, X.-Zh.; ACS Nano 5, 3795-3799, 2011.
- [20] Pomfret, S.J.; Adams, P.; Comfort, N.; Monkman, A.P.; Polymer 41, 2265-2269, 2000.
- [21] Lim, T.H.; Oh, K.W.; Kim, S.H.; Solar Energy Materials and Solar Cells 101, 232-240, 2012.
- [22] Stejskal, J.; Sapurina, I.; Trchová, M.; Konyushenko, E.N.; Macromolecules 41, 3530-3536, 2008.
- [23] Pan, L.; Yu, G.; Zhai, D.; Lee, H.R.; Zhao, W.; Liu, N.; Wang, H.; Tee, B.C.K.; Shi, Y.; Cui, Y.; Bao, Z.; PNAS 109, 9287-9292, 2012.
- [24] Scherr, E.M.; MacDiarmid, A.G.; Manohar, S.K.; Masters, J.G.; Sun, Y.; Tang, X.; Druy, M.; Glastokowski, P.J.; Cajipe, V.B.; Fischer, J.E.; Cromack, K.R.; Jozefowicz,

- M.E.; Ginder, J.M.; McCall, R.P.; Epstein, A.J.; *Synthetic Metals* 41, 735–738, 1991.
- [25] Pawar, S.G.; Patil, S.L.; Chougule, M.A.; Raut, B.T.; Sen, Sh.; Patil, V.B.; *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials* 60, 979–987, 2011.
- [26] Bahramian, A.; *Applied Surface Science* 311, 508–520, 2014
- [27] Chung, I.; Lee, B.; He, J.; Chang, R.P.H.; Kanatzidis, M.G.; *Nature* 485, 486–490, 2012.
- [28] Bahramian, A.; *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52, 14837–14846, 2013.
- [29] Arredondo, B.; Romero, B.; Del Pozo, G.; Sessler, M.; Veit, C.; Würfel, U.; *Solar Energy Materials and Solar Cells* 128, 351–356, 2014.
- [30] Sarker, S.; Seo, H.W.; Kim, D.M.; *Chemical Physics Letters* 585, 193–197, 2013.
- [31] Wang, Q.; Moser, J.E.; Grätzel, M.; *The Journal of Physical Chemistry B* 109, 14945–14953, 2005.

## Study of Optical-electrical Properties and Determination of Photoelectrochemical Conversion Efficiency in Bifacial Dye-Sensitized Solar Cell Using Polyaniline/TiO<sub>2</sub> Nanostructured Film

Ali Reza Bahramin<sup>1,\*</sup>, Ensieh Karami<sup>2</sup>, Daryoush Vashae<sup>3</sup>

1. Associate Prof., Hamedan University of Technology, Department of Chemical Engineering, Hamedan, Iran
2. Graduated from Chemical Engineering, Hamedan University of Technology, Chemical Engineering Department, Hamedan, Iran
3. Associate Prof. at the University of North Carolina, School of Electronic and Computer Engineering, North Carolina, USA

Received: April 2018, Revised: November 2018, Accepted: November 2018

**Abstract:** In this study, the optical-electrical properties and photoelectrochemical conversion efficiency of a bifacial sensitized solar cell containing of Polyaniline (PANI) deposited on TiO<sub>2</sub> nanostructured film have been investigated. The PANI-based counter electrode was prepared by polymerization of aniline with an acid catalyst, while TiO<sub>2</sub> film, as a photo-anode, was prepared at low temperature by the sol-gel chemical route and dip-coating process. The transparency of the prepared cell makes it possible to excite a higher density of color molecules through photochemical processes due to light exposure from both sides. Also due to the high light scattering by TiO<sub>2</sub>-coral-like nanostructures and the high surface area of PANI nanofibers, it is expected that more electron transfer occurs between layers. These factors led to an increase in the conversion efficiency of the prepared cell in the presence of ruthenium-based molecules based on the N719 dye up to 22.8%, which is more appropriate than that of a similar cell made with platinum electrodes (with a yield of 7.75%). The low cost of manufacturing and the high optical transmission of up to 71% in the visible light region allow the use of PANI and TiO<sub>2</sub> electrodes with special morphology to produce bifacial solar cells in an industrial scale.

**Keywords:** Dye sensitized solar cell, Nanostructured film, Polyaniline/TiO<sub>2</sub> film, Photoelectrochemical conversion efficiency, Optical transmittance