

بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ با استفاده از لایه سدکننده دوتایی و ساخت الکتروود مقابل WO₃/PANI به روش الکتروشیمیایی

احمد ذاتی‌رستمی*

دانشکده علوم و مهندسی، گروه فیزیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از دو لایه سدکننده روی هم از جنس اکسید روی و اکسید تیتانیوم بازدهی سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داده شد. این لایه‌های سدکننده که با استفاده از روش کندوپاش بسامد رادیویی ساخته شده‌اند، توانسته‌اند بازدهی سلول‌های خورشیدی را از ۴/۹٪ به ۷/۱٪ افزایش دهند. این نتیجه که توسط آنالیزهای IPCE, J-V, FESEM, XRD و EIS تایید شده است، برای افزایش هر چه بیشتر کاربرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ می‌تواند بسیار موثر باشد. همچنین نتایج EIS در حالت خاموش نشان می‌دهد که مقاومت انتقال بار سلول با لایه‌نشانی دو لایه سدکننده ZnO و TiO₂ از مقدار ۶۳ تا مقدار ۹۰ اهم افزایش می‌یابد که به معنی کاهش میزان باز ترکیب در سطح لایه‌ها است. همچنین با استفاده از روش ولتامتری چرخه‌ای به ساخت الکتروودهای مقابل WO₃/PANI و ترکیب این دو یعنی WO₃/PANI پرداختیم. این الکتروودها به جای الکتروود مقابل Pt که به صورت معمول در سلول‌های حساس شده با رنگ به وفور دیده می‌شود، استفاده شدند. نتایج نشان می‌دهند علی‌رغم اینکه الکتروودهای WO₃ و PANI خود به تنهایی عملکردی به خوبی Pt ندارند اما سلول ساخته شده از ترکیب WO₃/PANI با داشتن جریان مدار بسته ۱۸/۰۰ mA/cm²، ولتاژ مدار باز ۶۸۵ mV و FF معادل ۵۵٪ دارای بازده ۶/۷۸٪ است که نسبت به سلول ساخته شده با الکتروود مقابل Pt با بازده ۶/۰۳٪ عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ، اکسید تیتانیوم، لایه سدکننده، الکتروود مقابل.

۱- مقدمه

(DSSC) دارای مزایای منحصربفردی مانند قیمت بسیار پایین، سهولت ساخت و سازگاری با طبیعت هستند که این نسل از سلول‌های خورشیدی را جهت تامین انرژی در موقعیت مناسبی قرار می‌دهد. یکی از موانعی که در برابر راه سلول‌های رنگدانه‌ای وجود دارد، باز ترکیب حامل‌های تولید

بی‌شک سلول‌های خورشیدی نقش مهمی در تامین انرژی آینده بشریت ایفا خواهند کرد. در میان گونه‌های مختلف سلول‌های خورشیدی، سلول‌های حساس شده با رنگ

* عهده‌دار مکاتبات: احمد ذاتی‌رستمی

نشانی: ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، گروه فیزیک، واحد ساری

تلفن: ۰۱۱-۳۴۶۳۸۰۹۶، دورنگار: ۰۱۱-۳۴۶۳۸۰۹۶، پست الکترونیکی: ahmad.zati@gmail.com

سدکننده از جنس SnO_2 می‌توان تا ۱۲٪ افزایش بازدهی نسبت به حالت بدون لایه سدکننده کسب کرد [۹]. ساسیده‌ها و همکارانش در سال ۲۰۱۷ از لایه سد ZnO در سلول‌های حساس شده به رنگ بر پایه نانوذرات ZnO استفاده کردند و توانستند بازده سلول را از ۱/۲۷٪ تا ۲/۵۷٪ ارتقا دهند [۱۰]. در سال ۲۰۲۰ لو و همکارانش توانستند با استفاده از آلایش همزمان N و I در TiO_2 و استفاده از آن به عنوان لایه سد، بازده سلول خورشیدی خود را تا مقدار ۶/۸٪ افزایش دهند. همچنین مانی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش کندوپاش یک لایه سدکننده از جنس NiO به منظور کاربری در سلول خورشیدی حساس شده با رنگ تهیه کردند که بازدهی سلول را تا مقدار ۶/۸٪ افزایش داد [۱۱].

تا پیش از این، از مواد و روش‌های مختلفی در ساخت لایه سدکننده استفاده شده است. معمولاً از موادی نظیر TiO_2 ، ZnO ، SnO_2 و ... که با استفاده از روش‌های لایه‌نشانی چرخشی، حرارتی، کندوپاش و الکتروشیمیایی لایه‌نشانی شده‌اند به عنوان لایه سدکننده استفاده می‌شود [۱۴-۱۲]. در انتخاب لایه سدکننده، ضخامت و نوع ماده دو عامل تعیین کننده هستند و معمولاً پس از انتخاب نوع ماده، ضخامت لایه آن جهت استفاده به عنوان لایه سدکننده بهینه می‌شود. ضخامت لایه سدکننده باید به حدی زیاد باشد که از نفوذ الکتروولت به FTO جلوگیری کند، از طرف دیگر باید به قدری کم باشد که تاثیر مقاومتی در مسیر شارش جریان نداشته و عملکرد سلول را مختل نکند [۱۵، ۴]. روشی بهتر که می‌تواند علاوه بر ضخامت مورد نظر خواص تراپردی بهتری برای حامل‌ها بدست دهد، استفاده از دو لایه سدکننده بر روی هم است. یکی از این دو لایه ضخامت مورد نیاز و دیگری خواص تراپردی بهتر را تامین می‌کند و می‌تواند مشکل بازترکیب حامل‌ها در DSSC ها را تا مقدار زیادی مرتفع کند.

همچنین با توجه به قیمت تمام شده بالای الکتروود پلاتین، محققان امروزه مواد جایگزینی به عنوان الکتروود مقابل

شده بوسیله نور آن‌ها در فصل مشترک الکتروولت و الکتروود است [۱]. این بازترکیب از کنار هم قرار گرفتن گونه‌های الکتروولت و الکترون‌های FTO و همچنین در بین حفره‌های نانوذرات نیمه‌هادی و الکترون‌های FTO رخ داده و بازدهی سلول را به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲]. همان‌طور که می‌دانیم، نانوذرات مورد استفاده در DSSC ها دارای ماهیتی نیمه متخلخل هستند [۳]. به همین دلیل، الکتروولت از میان سوراخ‌های آن عبور کرده و با FTO تماس می‌یابد. همچنین، به دلیل چینش نواری نزدیک الکتروود با نیم‌سانا، بازترکیب الکترون حفره‌ای میسر می‌شود. یک راه حل منطقی جهت رفع این مشکلات بازترکیبی، استفاده از یک لایه نازک سدکننده سلب بین نانوذرات و FTO است [۴]. به این ترتیب الکتروولت دیگر با FTO برخورد نمی‌کند. همچنین لایه سلب نسبت به نانوذره دارای گاف کوچکتری است که می‌تواند مانند یک سد پتانسیل بین الکتروود و نانوذره عمل نماید.

استفاده از لایه سدکننده در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ سابقه طولانی ندارد. اولین بار در سال ۲۰۰۱ چن و همکارانش از یک لایه Nb_2O_5 برای جلوگیری از بازترکیب‌های سطحی بر روی نانوذرات TiO_2 استفاده کردند و توانستند بازده سلول را از ۳/۶٪ تا مقدار ۵٪ افزایش دهند [۵]. در سال ۲۰۰۲ پالومارس و همکارانش با استفاده از لایه سدکننده Al_2O_3 توانستند تا ۴ برابر میزان بازترکیب‌ها را کمتر کنند و ۳۰٪ به افزایش بازدهی خود کمک کنند [۶]. در سال ۲۰۰۳ کمرون و پیتیر با استفاده از روش اسپری پایرولیز یک لایه فشرده از TiO_2 را بر روی FTO تهیه کردند و با استفاده از آنالیز EIS به مطالعه اساسی بر روی خواص این لایه در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ پرداختند [۷]. در سال ۲۰۰۹ کیم و کون با همکاری یکدیگر به مطالعه لایه بلاک CdO در ساختار سلول خورشیدی حساس شده با رنگ پرداختند و مکانیزم کارکرد لایه سدکننده و کاربردهای آن را بررسی کردند [۸]. دانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ نشان دادند با تغییر ضخامت لایه

دستگاه فراصوت همزده شد تا محلولی شفاف تهیه شود. پس از آن ۰/۵ g آنیلین (مرکب با خلوص ۹۹/۹٪) به محلول فوق اضافه شد و به مدت ۱۰ دقیقه به شدت هم خورد. محلول الکترولیت در یک سلول متداول ۳ الکترودی با الکترود کار ITO، الکترود کمکی پلاتین و الکترود مرجع Ag/AgCl قرار گرفت. با جاروب پتانسیل بین ۰/۵ V-۱/۵ V با گام‌های ۵۰ mV عملیات لایه نشانی PANI انجام پذیرفت. برای سنتز لایه اکسید تنگستن، ۵۸۰ mg سدیم تنگستات دو آب (Na₂WO₄ · 2H₂O) در ۳۵ mL آب مقطر حل شد و ۰/۷ mL آب اکسیژنه (H₂O₂ 35%) به محلول اضافه شد. سپس ۰/۳ mL اسید نیتریک به صورت قطره قطره به محلول فوق اضافه شد. این محلول به مانند چیدمان PANI درون سلول الکتروشیمیایی ۳ الکترودی قرار گرفت و با استفاده از کرنوآمپرومتری در ولتاژ ثابت ۰/۴۷ V- به مدت ۳۰ دقیقه آزمایش انجام پذیرفت. برای سنتز الکتروکامپوزیت PANI و WO₃ ابتدا ۵۸۰ mg سدیم تنگستات داخل ۲۵ mL آب مقطر حل شد، سپس ۰/۷ mL آب اکسیژنه به آن اضافه شد. پس از آن ۰/۳ mL اسید نیتریک به صورت قطره‌ای به آن اضافه شد. در انتها ۰/۰۸۳ mL آنیلین به ۱۵ mL از محلول فوق اضافه گردید و به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه فراصوت قرار گرفت. سپس داخل سلول سنتز الکتروشیمیایی ۳ الکترودی قرار گرفت و با گام‌های ۵۰ mV در بازه پتانسیلی ۰/۵ V-۱/۵ V به روش ولتامتری چرخه‌ای الکترود مقابل ساخته شد.

به منظور ساخت سلول، ابتدا از نانوذرات TiO₂ سنتز شده به روش سل-ژل استفاده کردیم تا فوتوآنود را بسازیم. در این فرآیند، نانوذرات اکسید تیتانیوم به همراه اسید سیتریک و اتیلن گلیکول مخلوط شدند و به مدت ۳ ساعت هم خوردند تا خمیری مناسب جهت لایه‌نشانی بدست آید. خمیر TiO₂ به روش دکتر بلید بر روی شیشه FTO لایه‌نشانی شد، سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ °C حرارت دید. پس از سرد شدن این لایه، داخل محلول رنگدانه N719 به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شد. پس از خشک شدن این فوتوآنود،

پیشنهاد داده‌اند که می‌توان از این میان به نانو ساختارهای کربنی، گرافن اکساید، ترکیبات غیرآلی کبالت و مس، اکسید تنگستن (WO₃) و ترکیبات آلی از جمله PEDOT و پلی آنیلین (PANI) اشاره کرد [۱]. در این میان ترکیب آلی پلی آنیلین که از رسانندگی مطلوبی برخوردار است و نوعی پلیمر نیمرسانا تلقی می‌شود توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این ماده با داشتن نرخ تبادل الکترون بالا، پایداری شیمیایی خوب در نزدیکی الکترولیت سلول خورشیدی یعنی I₃/I⁻ و خواص الکتروکاتالیتی بالا گزینه‌ای مناسب برای کاربری به عنوان الکترود مقابل است. همچنین اکسید تنگستن با داشتن خواص الکتروکاتالیتی مناسب و ویژگی‌های ترابرد الکترونی خوب می‌تواند گزینه دیگر جایگزینی برای الکترود Pt باشد.

در این مقاله، ما از دو لایه سدکننده اکسید روی و اکسید قلع که هر دوی آن‌ها توسط لایه‌نشانی کندوپاش RF لایه‌نشانی شده‌اند، جهت بهبود خواص سلول استفاده می‌کنیم که این ساختار تا به امروز بدیع است. همچنین با استفاده از روش ولتامتری چرخه‌ای به ساخت الکترودهای مقابل PANI، WO₃ و ترکیب کامپوزیتی آن‌ها به اختصار WO₃/PANI پرداخته‌ایم. سپس با ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگ بر پایه اکسید تیتانیوم (TiO₂) از این الکترودهای مقابل در سر هم کردن سلول خورشیدی استفاده کردیم. همچنین برای مقایسه نتایج، یک سلول خورشیدی حساس شده با رنگ با الکترود Pt ساختیم که نقش سلول کنترل را ایفا می‌کند.

۲- فعالیت‌های تجربی

لایه پلی آنیلین با روش ولتامتری چرخه‌ای تولید شد. در این روش ابتدا یک زیرلایه ITO به دقت با آب و اتانول شستشو داده شد. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه فراصوت تمیز شد. الکترولیت ظرف سنتز از ترکیب ۰/۳۳ mL اسید سولفوریک و ۰/۵ g سدیم دودسیل سولفات در ۸۵ mL آب مقطر تشکیل شد. سپس به مدت ۵ دقیقه محلول داخل

رنگدانه‌های اضافی مطمئن شویم. سپس با استفاده از فاصله ساز سرلین فضای محدودی به مساحت 0.2 cm^2 روی سطح فوتوآند ایجاد شد تا الکتروود مقابل پلاتین روی آن قرار گیرد. با حرارت دهی کوتاه مدت این ساختار در دمای 120°C اتصال عایق مطلوب بین آند و کاتد توسط ذوب شدن سرلین برقرار شد. الکتروود پلاتین توسط یک سوراخ کن میکرومتری به دو سوراخ مجهز شد که از طریق آن الکتروولیت I/I_3 به داخل سلول تزریق شد. و سپس سوراخ‌ها عایق و سلول آماده کار شد.

۳- نتایج و بحث

پارامتر به منظور بررسی ساختار بلوری نانوذرات سنتز شده از نمونه TiO_2 آنالیز XRD تهیه کردیم. شکل ۱ بیانگر طیف پراش پرتو X مربوط به پودری است که پس از مرحله بازیخت در ساخت خمیر از آن بهره جستیم. تمام قله‌ها مربوط می‌شود به فاز تراگونال TiO_2 که با تقریب بسیار بالایی می‌توان آن را منطبق بر شماره کارت فاز آناتاز JCPDS 01-073-1764 دانست. آنچنان که مشاهده می‌شود هیچ فاز ناخالصی و یا حضور سایر اکسیدها در ماده دیده نمی‌شود. با استفاده از رابطه دبی شرر می‌توان اندازه بلورک‌ها را که پارامتر مهمی برای خواص تراپردی الکترون است به سادگی توسط رابطه زیر بدست آورد [۱۶]:

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (1)$$

در این رابطه λ طول موج اشعه ایکس به کار رفته، β ، FWHM هر قله و θ زاویه پراش است. به این ترتیب اندازه میانگین برای راستاهای مختلف ماده سنتز شده برابر 25 nm اندازه گیری می‌شود. این اندازه می‌تواند نوید بخش ترابرد و رسانندگی بسیار مناسبی برای سلول خورشیدی حساس شده به رنگ به حساب آید.

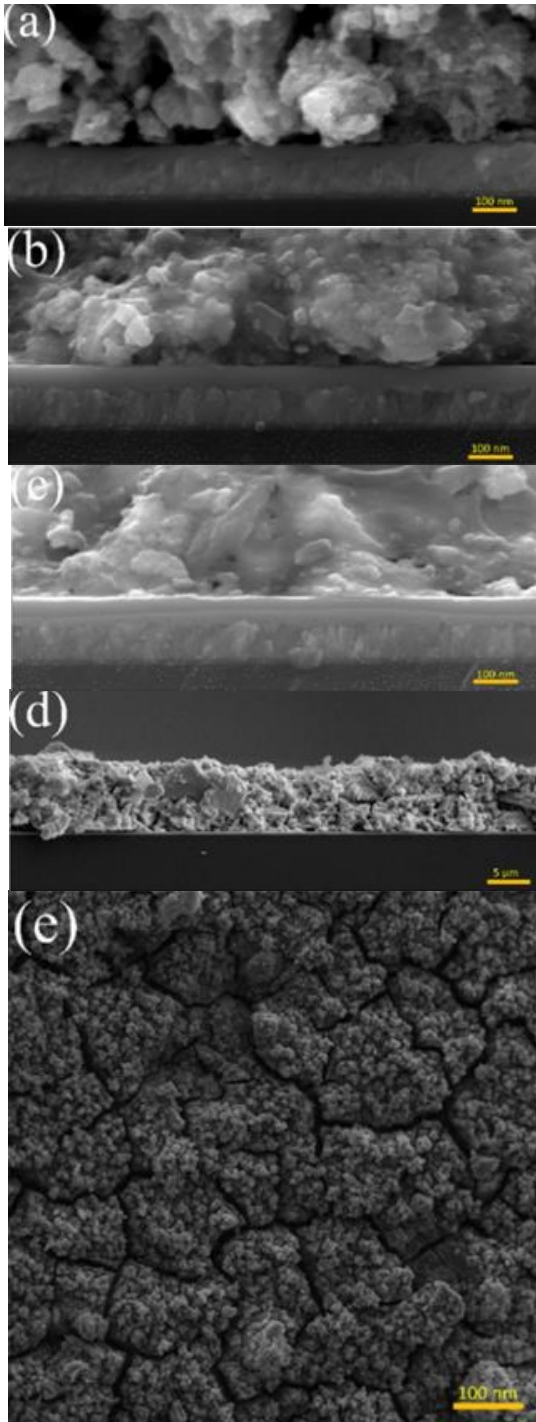
الکتروودهای مقابل مختلف با استفاده از فاصله انداز surlyn بر روی فوتوآند قرار گرفت و فضای بین دو الکتروود با الکتروولیت دید-تری یدید پر شد.

برای ساخت نانوذرات تیتانیا (TiO_2) ابتدا مقدار $35/5 \text{ g}$ titanium tetraisopropoxide (TTIP) را به 100 mL اتانول خالص اضافه کردیم. و در دمای اتاق به مدت ۳ ساعت بر روی همزن مغناطیسی به شدت هم زدیم و pH محلول را توسط محلول HNO_3 بر روی ۲ کنترل کردیم. محلول بدست آمده به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط پیرسازی شد و سپس به مدت ۱۲ ساعت در دمای 80°C خشک‌سازی بر روی انجام گرفت. پس از آن به مدت ۲ ساعت در دمای 500°C با نرخ افزایش دمایی $2^\circ \text{C}/\text{min}$ آئیل شد.

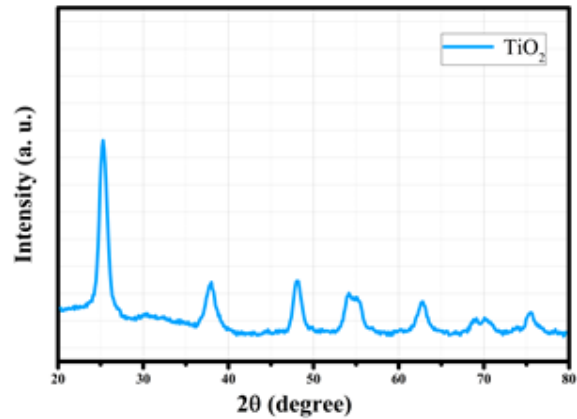
دو لایه سدکننده TiO_2 و ZnO توسط روش کندوپاش و به ترتیب بر روی شیشه ی پوشیده با FTO لایه‌نشانی شدند. جهت انجام این کار ابتدا اکسید تیتانیوم با استفاده از هدف تیتانیومی و با توان 100 W در فشار 3 mTorr بر روی زیرلایه FTO لایه‌نشانی شد. ضخامت این لایه توسط سامانه ضخامت سنجی کوارتزی در حدود 25 nm تنظیم شد. پس از لایه‌نشانی TiO_2 ، لایه ZnO نیز با هدفی از جنس اکسید روی با توان 100 W و در فشار 5 mTorr روی لایه اکسید تیتانیومی قبلی لایه‌نشانی شد. ضخامت این لایه نیز حدود 25 nm تنظیم گشت.

به منظور ساخت سلول ابتدا خمیر TiO_2 بر روی زیر لایه‌های $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2$ ، FTO/ZnO ، FTO به روش دکتر بلید زده شد. سپس لایه‌ها در دمای 450°C به مدت ۴۰ دقیقه حرارت دیدند و به صورت طبیعی سردسازی شدند. پس از خنک شدن تا دمای 70°C ، لایه‌ها از کوره در آمده و به داخل محلول رنگ N719 قرار گرفت. این شرایط به مدت ۲۴ ساعت و در تاریکی مطلق ادامه داشت. پس از مرحله رنگ آمیزی، فوتوآنها از دل رنگ بیرون کشیده شدند و با محلول اتانول به مدت ۵ دقیقه شسته شده تا از حذف

است که هر ذره TiO_2 در این حالت تقریباً از یک بلورک واحد تشکیل شده است و ذرات از بلورک‌های کوچکتری تشکیل نشده‌اند.



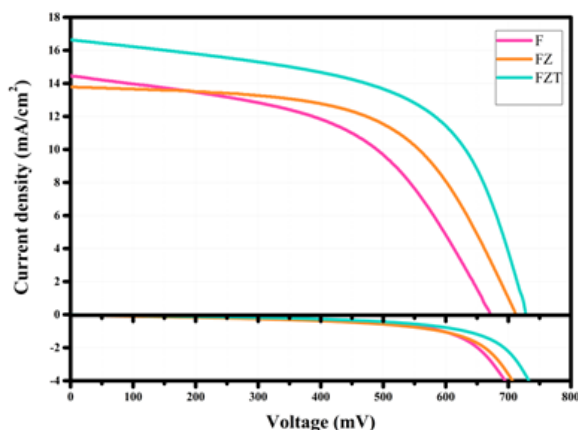
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی اثر میدانی از، (a) سطح مقطع FTO ، (b) سطح مقطع FTO/ZnO ، (c) سطح مقطع $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2$ ، (d) سطح مقطع فوتوآند و (e) سطح فوقانی فوتوآند.



شکل ۱: طیف پراش پرتوی ایکس نانوذره سنتز شده.

شکل ۲ تصاویر FESEM مربوط به فوتوآند‌های مختلف را در حالت Top و Cross section نشان می‌دهد. شکل ۲a-c به ترتیب بیانگر سطح مقطع فوتوآند‌های تشکیل شده با لایه متخلخل TiO_2 بر روی زیرلایه FTO/ZnO ، $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2$ است. شکل ۲d نمای عرضی فوتوآند دارای خمیر متخلخل اکسید تیتانیوم و ۲e به ترتیب سطح فوقانی فوتوآند دارای دو لایه سدکننده را نشان می‌دهند. آنچه‌ان که از شکل‌های ۲a-c مشخص است ضخامت لایه پروس TiO_2 تقریباً در همه نمونه‌ها یکسان و برابر با ۱۰ میکرون است.

این ضخامت بهینه شده‌ای است که با توجه به طول پویش آزاد الکترون‌ها و تجربیات محققان دیگر برای استخراج بیشترین توان از سلول خورشیدی حساس شده به رنگ در نظر گرفته می‌شود. برای جذب رنگدانه‌های بیشتر در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ، از نانوذرات یا نانو ساختارهای مختلف استفاده می‌شود. استفاده از نانوذرات این قدرت را به سلول می‌دهد تا در ابعاد بسیار کم و محدود سطح مقطع تماس بیشتری نصیب آن شود و به این ترتیب با جذب رنگدانه‌های بیشتر میزان جریان تولیدی بیشتری را داشته باشیم. همچنین با توجه به تصویر e مشاهده می‌شود که اندازه تقریبی نانوذرات TiO_2 برابر ۲۵ nm است که این مقدار با مقدار اندازه بلورک بدست آمده از رابطه دمای شرر برابری می‌کند. یکسان شدن این دو کمیت بیانگر این حقیقت



شکل ۳: منحنی‌های مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده با لایه‌های سدکننده مختلف در حالت تحت تابش (بالا) و تاریک (پایین).

جدول ۱: پارامترهای فوتوولتائیک سلول‌های ساخته شده.

CELL	Voc (V)	JSC (MA/CM2)	FF (%)	PCE (%)
F cell	670	14.51	50	4.9
FZ cell	711	13.78	58	5.7
FZT cell	727	16.63	59	7.1

اما به دلیل ضخامت خود این لایه، می‌تواند عبور الکترون‌ها را از نانوذرات TiO_2 به FTO با مشکل مواجه سازد. به این ترتیب آنچنان که در جدول ۱ ملاحظه می‌کنید با اینکه میزان V_{oc} برای سلول FZ افزایش یافته است، در همین حال از میزان جریان J_{sc} آن کاسته شده است. البته بازده این سلول به دلیل داد و ستد بین جریان و ولتاژ و FF تا حدودی بهبود یافته است و به مقدار $6/5$ رسیده است. در واقع به دلیل ترابرد بهتر لایه ZnO می‌توان انتظار داشت که سلول FF بالاتری داشته باشد. با این حال حضور لایه چگال ZnO نیز ممکن است از نشر گونه‌های الکترولیت و رنگدانه به داخل خود جلوگیری نکند. در واقع رنگدانه‌ها در حین عملیات رنگرزی می‌توانند به عمق کم لایه ZnO نفوذ کنند و اثر سدکنندگی آن را تحت‌الشعاع قرار دهند. از طرفی افزایش ضخامت ZnO را نمی‌توان توصیه کرد چون به دلیلی که پیش‌تر ذکر شد باعث کاهش شدید جریان خواهد شد. به این ترتیب با اضافه

این امر کمک می‌کند تا مرزدانه‌های کمتری در ماده تشکیل شود و از پراکندگی‌های بی‌مورد در مرزدانه‌ها جلوگیری شود و در نتیجه خاصیت تراپردی الکترون بهبود یابد. این امر کمک می‌کند تا جریان اتصال کوتاه سلول و در کل جریان گذرنده از سلول ارتقا یابد و به بازدهی‌های بالاتر دست یابیم. از تصویر ۲b می‌توان تشخیص داد که یک لایه بسیار نازک ما بین FTO و مواد متخلخل تشکیل شده است که همان لایه سدکننده ZnO است. ضخامت این لایه تقریباً 50 nm طبق شکل تخمین زده می‌شود. شکل ۲c اما به وضوح حضور هر دو لایه TiO_2 و ZnO به صورت لایه چگال را تایید می‌کند. در این حالت می‌توان از مرز مشترک بین TiO_2 و ZnO مطمئن بود و اطمینان حاصل کرد که این مواد به داخل هم پخش نشده اند. شکل ۲e نیز کیفیت بالای لایه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. بعد از سر هم کردن سلول‌های مختلف آن‌ها را توسط شبیه‌ساز خورشیدی و ردیاب I-V مورد ارزیابی قرار دادیم تا با بدست آوردن منحنی مشخصه هر سلول، عملکرد آن را نیز بررسی کنیم. نمودار شکل ۳ منحنی J-V را برای سه سلول سر هم شده FTO/TiO_2 NP، $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2$ NP و $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{TiO}_2$ NP تحت شرایط تابش یک خورشید و همچنین حالت تاریک نشان می‌دهد که آن‌ها را به اختصار با سلول‌های F، FZ و FZT نشان می‌دهیم. مشخصات فوتوولتائیک سلول‌ها در جدول شماره ۱ درج شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سلول خورشیدی بدون لایه سدکننده دارای ولتاژ مدار باز 707 mV ، جریان اتصال کوتاه 17 mA/cm^2 و ضریب پرشدگی 55% است. با اضافه کردن لایه سدکننده ZnO بر روی سطح FTO آنچنان که انتظار می‌رفت ولتاژ مدار باز سلول‌ها کمی زیاد می‌شود و به مقدار 720 mV می‌رسد که به این خاطر است که لبه نوار رسانش ZnO در این حالت کمی بالاتر از TiO_2 قرار می‌گیرد. در این شرایط لایه چگال ZnO نقش یک سدکننده را بازی می‌کند و از بازگشتن الکترون‌ها و باز ترکیب آن‌ها با گونه‌های الکترولیت جلوگیری می‌کند.

نمودار شکل ۴ طیف IPCE را برای سه سلول FZ، F و FZT نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سلول FZT از میزان IPCE بیشتری نسبت به دو سلول دیگر در محدوده طیفی نوری برخوردار است. با این حال سلول FZ علی‌رغم داشتن بازده بیشتر نسبت به F دارای IPCE کمتری در این محدوده است. البته که این نتیجه دور از انتظار نیست و با نتایج حاصل از طیف مشخصه J-V سلول‌ها سازگاری دارد. در واقع همانطور که می‌دانیم، جریان اتصال کوتاه هر سلول متناسب است با انتگرال سطح زیر منحنی IPCE آن سلول (۱۸) به عبارت دقیق‌تر:

$$J_{sc} = q \int \phi(\lambda) \cdot IPCE(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

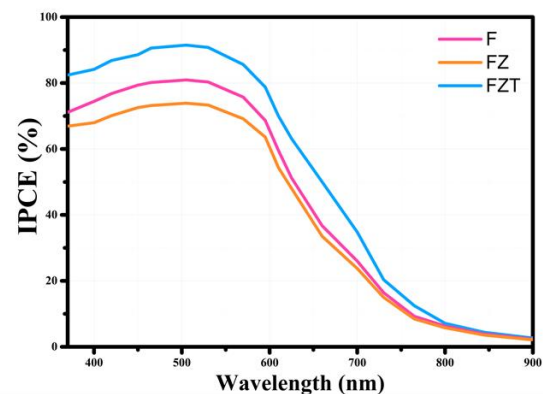
که در آن q بار الکترون و ϕ ، شار فوتونی در هر طول موج است. به این ترتیب با استفاده از شار فوتونی طیف AM1.5 و IPCE هر سلول، میزان جریان اتصال کوتاه برای سلول‌های F، FZ و FZT به ترتیب برابر است با ۱۴، ۱۳ mA/cm² و ۱۶ mA/cm². همانطور که مشاهده می‌شود سلول FZ دارای IPCE کمتری نسبت به F است که این پدیده به دلیل کمتر بودن جریان اتصال کوتاه سلول FZ نسبت به F به وقوع پیوسته است.

برای بررسی هر چه بهتر سلول خورشیدی و فوتوآندهای مختلف و خواص تراپردی و انتقال بار آن‌ها، از سلول‌ها آنالیز EIS تهیه کردیم. در این آنالیز سلول در حالت خاموش قرار گرفته و با اعمال ولتاژ اختلالی ۱۰ mV در بازه فرکانسی ۰/۱ Hz تا ۱ MHz رفتار امپدانس آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون را می‌توان در منحنی‌های نایکوئیست شکل ۵ مشاهده کرد که برای سه سلول FZ، F و FZT به تصویر درآمده‌اند.

در این نمودارها ۳ نیم دایره دیده می‌شود که در سه ناحیه فرکانسی مختلف قرار دارند. ناحیه با فرکانس‌های کم مربوط می‌شود به سهم پخش نرنستیان در الکترولیت که نیم دایره تقریباً محو شده سمت راست را تبیین می‌کند. به علت سهم

کردن لایه سدکننده دومی از جنس TiO₂ می‌توان از نشت گونه‌ها جلوگیری کنیم.

آنچنان که انتظار داریم سلول FZT همچنان که Voc بالایی دارد، خاصیت انتقالی الکترونی بهبود یافته‌ای نیز از خود نمایش می‌دهد که باعث شده جریان اتصال کوتاه آن تا مقدار زیاد ۱۹ mA/cm² افزایش یابد. این مقادیر به همراه FF بهبود یافته ۶۰ درصدی باعث افزایش بازدهی به میزان ۳۰٪ نسبت به سلول بدون اصطلاحات سطحی F تا مقدار ۷/۱٪ شده است. در تحقیقی مشابه، کوهستانیان و همکارانش با استفاده از لایه سدکننده ZnO که به وسیله روش کندوپاش تهیه شده بود توانستند بازده سلول خورشیدی حساس شده به رنگ مبتنی بر TiO₂ را تا مقدار ۵/۱٪ افزایش دهند [۱۲]. همچنین جئونگ و کیم در تحقیقی مشابه با استفاده از لایه نشانی لایه سد TiO₂ بر روی FTO به روش کندوپاش بازده سلول را تا مقدار ۴/۴٪ ارتقا دادند [۱۷].



شکل ۴: نتایج آنالیز IPCE سلول‌های ساخته شده.

به منظور مقایسه عملکرد سلول‌های ساخته شده در شرایط مختلف از آن‌ها آنالیز IPCE تهیه نمودیم. در این آنالیز، سلول ساخته شده در حالت اتصال کوتاه قرار می‌گیرد و در مراحل مختلف در برابر طول موج‌های مختلف نوری AM1.5 قرار داده می‌شوند. با قرائت جریان در هر مرحله و مشخص بودن تعداد فوتون‌ها در هر طول موج می‌توان IPCE را که به صورت نسبت الکترون‌های استخراج شده از سلول به فوتون‌های وارد شده به سلول تعریف می‌شود بدست آورد.

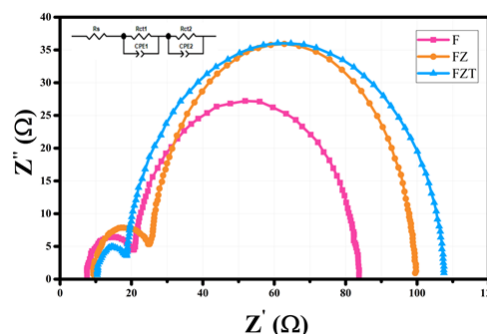
است. به این ترتیب همانطور که انتظار داریم با افزایش مقاومت انتقال بار سهم جریان عبوری نیز کم شود که این امر در منحنی مشخصه جریان ولتاژ سلول FZ به وضوح دیده می شود. اما با لایه نشانی لایه چگال TiO_2 بر روی لایه سدکننده ZnO مقدار مقاومت انتقال بار بین نانوذرات TiO_2 و FTO کمتر شده و 9Ω پایین می آید.

جدول ۲: مقاومت های انتقال بار ناشی از آنالیز EIS.

CELL	$R_{CT1} (\Omega)$	$R_{CT2} (\Omega)$	$R_s (\Omega)$
F cell	14.5	63	7.5
FZ cell	17	74.5	9.3
FZT cell	9	90	10.4

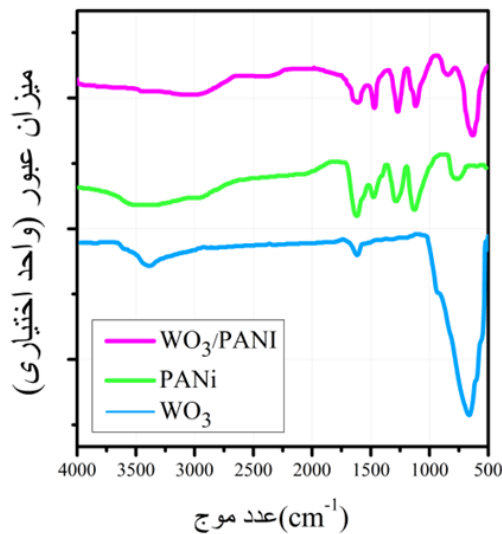
این بدین معنی است که مقاومت انتقال بار کمتری وجود دارد و در نتیجه جریان بیشتری می تواند از سلول عبور کند. از این جهت تطابق خوبی بین نتایج EIS و مشخصات فوتولتائیک سلول برقرار است. با وجود اینکه از نانوذرات یکسانی برای ساخت همه سلول ها استفاده کردیم با این حال نیم دایره میانی در نمودار نایکوئست برای سلول های F، FZ و FZT یکسان نیست و انتقال بار متفاوتی را نتیجه می دهد. علت این امر حضور خود لایه سدکننده است. هنگامی که آنالیز در حالت خاموش انجام می شود، الکترون ها از طریق FTO به سمت TiO_2 حرکت می کنند و سپس در آنجا در نزدیکی FTO به سمت گونه های الکترولیت حرکت می کنند. در این حالت R_{CT2} که بیانگر مقاومت انتقال بار بین TiO_2 و الکترولیت است، به صورت عمده از مقاومت باز ترکیب تشکیل می شود و زیاد شدن میزان مقاومت R_{CT2} در حالت خاموش بیانگر کم شدن هر چه بیشتر باز ترکیب الکترون ها است. همانطور که از جدول ۲ مشاهده می شود، مقاومت R_{CT2} برای سلول های F، FZ و FZT به ترتیب برابر، ۶۳، ۷۴/۵ و 90Ω است. در واقع این نشان می دهد که میزان باز ترکیب های سلول FZT نسبت به FZ و F کمتر است. این سلول همانطور که نتایج J-V نشان دادند می تواند عملکرد بهتری در تبدیل انرژی داشته باشد.

بالای انتقال الکترونی توسط گونه های الکترولیت، امیدانس واربورگ حضور چندانی در این سامانه ها نخواهند داشت و به این ترتیب این نیم دایره تقریباً حذف خواهد شد. نیم دایره میانی که در فرکانس های میانی قرار دارند مربوط می شود به تبادل الکترون بین TiO_2 و گونه های الکترولیت و مولکول رنگ و در نهایت دایره کوچک تر سمت چپ که در فرکانس های بالا قرار دارد سهم ترکیبی انتقال الکترون بین الکتروود مقابل و الکترولیت و انتقال بار بین TiO_2 و FTO را در برمی گیرد. البته چون در تمام سلول ها از الکتروود مقابل یکسان Pt استفاده کردیم انتظار داریم تفاوت در این ناحیه صرفاً متأثر از تفاوت در مرز بین TiO_2 و FTO باشد و اگر چه اعداد به دست آمده گویای مشخصات فیزیکی واقعی مرز TiO_2 و FTO نیستند ولی به صورت کیفی توان مقایسه را به ما می دهند. با استفاده از مدار معادل به تصویر کشیده شده در داخل شکل ۵ و برازش منحنی های نایکوئست با این مدار معادل مقادیر مقاومت انتقال بار را برای لایه های مختلف سلول ها محاسبه کردیم که در جدول ۲ دیده می شوند.



شکل ۵: منحنی نایکوئست و مدار معادل حاصل از آنالیز EIS سلول های ساخته شده.

همانطور که مشاهده می شود در سلول بدون لایه سدکننده مقاومت انتقال بار بین TiO_2 و FTO در حدود 14.5Ω است. با اضافه شدن لایه سدکننده ZnO روی FTO مقدار مقاومت انتقال بار به میزان 17Ω افزایش یافته است که این نشان می دهد لایه ZnO در نقش یک لایه سدکننده عمل کرده است و انتقال بار بین دو لایه TiO_2 و FTO را مشکل تر ساخته



شکل ۶: نمودار طیف FTIR الکترودهای مقابل مختلف.

پیک مشاهده شده در برای بررسی تاثیر الکتروود مقابل در سلول خورشیدی حساس شده به رنگ ابتدا باید از جنس الکتروود مقابلی که لایه‌نشانی کردیم مطمئن می‌شدیم. به این منظور از آنالیز FTIR برای تشخیص نوع ماده لایه‌نشانی شده بر روی ITO بهره جستیم. به این منظور، ابتدا لایه نشانداده شده توسط روش الکتروشیمیایی را تراشیده و به صورت پودر در آورده. با ترکیب پودر مورد نظر و KBr توسط دستگاه پرس قرصی تقریباً شفاف تولید می‌شود که از آن به عنوان لایه عبوری در آنالیز FTIR استفاده می‌کنیم. ماده KBr در محدوده مورد نظر پیک جذبی ندارد و به این ترتیب شفاف است و می‌تواند به تولید قرص کمک کند. شکل ۶ نمودار طیف FTIR را برای سه نمونه WO_3 ، PANi و ترکیب $WO_3/PANI$ بین عدد موج 500 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} نشان می‌دهد. نمونه‌های استاندارد پلاتین چون به صورت تجاری خریداری شده‌اند را در این آنالیز مورد بررسی قرار نداده‌ایم. در نمودار مربوط به WO_3 یک پیک (دره) بسیار گود در ناحیه بین 500 cm^{-1} تا 1000 cm^{-1} دیده می‌شود که بیانگر پیوندهای بین W و O است [۱۹]. به صورت دقیق‌تر پیک اصلی ظاهر شده در 670 cm^{-1} بیانگر پیوند کششی W-O است. پیک بسیار ضعیفی که در 940 cm^{-1} ظاهر شده است، بیانگر پیوند کششی $W=O$ است. این حالت معمولاً وقتی رخ

برای بررسی تاثیر الکتروود مقابل در سلول خورشیدی حساس شده به رنگ ابتدا باید از جنس الکتروود مقابلی که لایه‌نشانی کردیم مطمئن می‌شدیم. به این منظور از آنالیز FTIR برای تشخیص نوع ماده لایه‌نشانی شده بر روی ITO بهره جستیم. به این منظور، ابتدا لایه نشانداده شده توسط روش الکتروشیمیایی را تراشیده و به صورت پودر در آورده. با ترکیب پودر مورد نظر و KBr توسط دستگاه پرس قرصی تقریباً شفاف تولید می‌شود که از آن به عنوان لایه عبوری در آنالیز FTIR استفاده می‌کنیم. ماده KBr در محدوده مورد نظر پیک جذبی ندارد و به این ترتیب شفاف است و می‌تواند به تولید قرص کمک کند.

شکل ۶ نمودار طیف FTIR را برای سه نمونه $PANI$ ، WO_3 و ترکیب $WO_3/PANI$ بین عدد موج 500 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} نشان می‌دهد. نمونه‌های استاندارد پلاتین چون به صورت تجاری خریداری شده‌اند را در این آنالیز مورد بررسی قرار نداده‌ایم. در نمودار مربوط به WO_3 یک پیک (دره) بسیار گود در ناحیه بین 500 cm^{-1} تا 1000 cm^{-1} دیده می‌شود که بیانگر پیوندهای بین W و O است [۱۸، ۱۹]. به صورت دقیق‌تر پیک اصلی ظاهر شده در 670 cm^{-1} بیانگر پیوند کششی W-O است. پیک بسیار ضعیفی که در 940 cm^{-1} ظاهر شده است، بیانگر پیوند کششی $W=O$ است. این حالت معمولاً وقتی رخ می‌دهد که ماده هیدراته باشد [۲۰]. در همین طیف یک پیک کوچک در 1620 cm^{-1} مشاهده می‌شود که به صورت معمول و در اکثر مواقع بیانگر نوسان‌های O-H است [۲۱]. همچنین پیک پهن گسترده شده حول 3400 cm^{-1} بیانگر پیوند کششی O-H و یا جذب سطحی آب است که نشان از حضور فیزیکی آب و یا رطوبت در این ماده می‌دهد و نشان از آبدوستی این ماده است [۲۱]. با بررسی طیف FTIR مربوط به PANi محدوده اثر انگشت متوجه چندین پیک در ناحیه بین 1000 cm^{-1} تا 1700 cm^{-1} می‌شویم که معمولاً پیوندهای آلی را شامل می‌شود. به خصوص پیک تقریباً عمیق در ناحیه 1130 cm^{-1} بیانگر پیوند $NH^+=$ در ساختار پلی‌آنیلین است [۲۲].

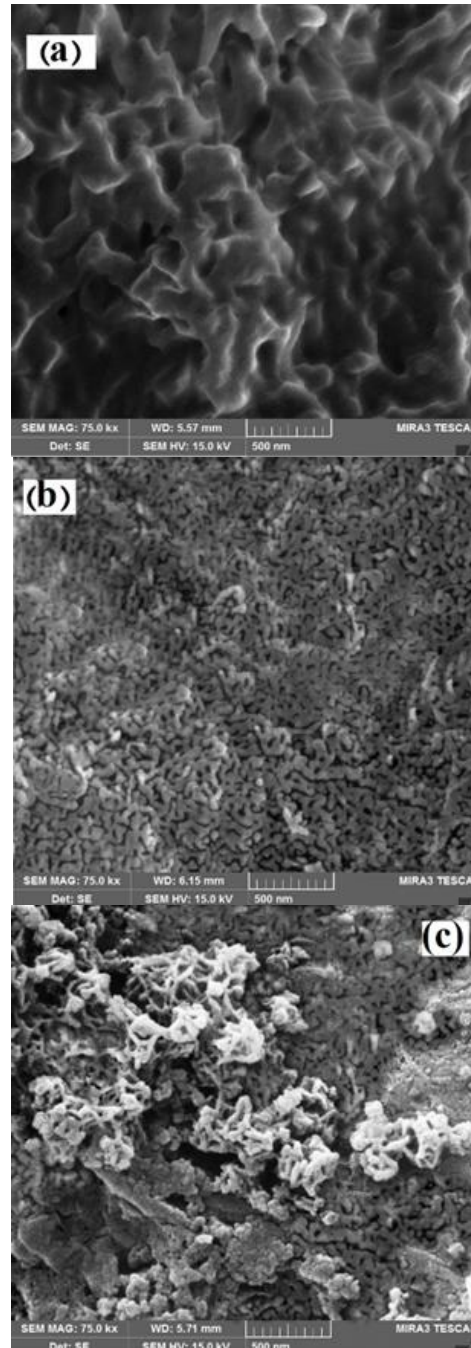
الکتروود مقابل در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ غالباً از پلاتین ساخته می‌شوند و چون معمولاً برای لایه‌نشانی این لایه از روش لایه‌نشانی چرخشی استفاده می‌شود، سطح رویی الکتروودهای مقابل ساخته شده از پلاتین تقریباً هموار است و از زبری چندانی برخوردار نیست. برای درگیر کردن هر چه بهتر الکتروولیت با لایه الکتروود مقابل بهتر است این لایه از سطح مقطع زیادی برخوردار باشد. روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی این خواسته را به خوبی برآورده می‌کند. برای برهمکنش هر چه بهتر الکتروولیت و الکتروود مقابل لازم است که گونه‌های الکتروولیت با ساختار در ابعاد نانوی الکتروود مقابل به خوبی تبادل الکترون انجام دهند تا سرعت انتقال الکترون افزایش یابد. برای بررسی سطح رویی این الکتروودهای مقابل از ریخت‌شناسی آن‌ها استفاده می‌کنیم. ریخت‌شناسی نمونه‌های الکتروود مقابل توسط آنالیز FESEM انجام پذیرفت. شکل ۷ تصاویر این آنالیز را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۷a مشخص است لایه WO_3 با ساختاری اسفنج شکل بر روی ITO شکل گرفته است. همچنین آنچنان که از شکل ۷b بر می‌آید، ساختار PANI تشکیل شده به صورت دانه‌های متمرکز است که البته یکنواختی قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین شکل ۷c آشکار می‌سازد که طبق پیش‌بینی آنالیز FTIR ساختار کامپوزیت $WO_3/PANI$ به صورت فازهای مجزا از هم تشکیل شده‌اند. همانطور که از این تصاویر مشخص است سطح رویی الکتروود مقابل $WO_3/PANI$ دارای ناهمواری‌های بسیار زیادی است و علاوه بر آن سطح تماس بسیار زیادی را نسبت به الکتروود مقابل WO_3 و PANI برای انجام واکنش‌ها در سطح خود محیا می‌کند. سطح رویی الکتروود WO_3 از ذرات بزرگ و تقریباً به هم پیوسته‌ای تشکیل شده است که نفوذ الکتروولیت به آن را سخت می‌کند. الکتروود PANI از ذرات تقریباً یکنواخت ریزتری ساخته شده است، ولی کماکان این ساختار چگال و تقریباً نفوذناپذیر به نظر می‌رسد و علاوه بر آن سطح تماس به خوبی افزایش نیافته است. در نمونه

می‌دهد که ماده هیدراته باشد [۲۰]. در همین طیف یک پیک کوچک در 1620 cm^{-1} مشاهده می‌شود که به صورت معمول و در اکثر مواقع بیانگر نوسان‌های O-H است [۲۱]. همچنین پیک پهن گسترده شده حول 3400 cm^{-1} بیانگر پیوند کششی O-H و یا جذب سطحی آب است که نشان از حضور فیزیکی آب و یا رطوبت در این ماده می‌دهد و نشان از آبدوستی این ماده است [۲۱]. با بررسی طیف FTIR مربوط به PANI در محدوده اثر انگشت متوجه چندین پیک در ناحیه بین 1000 cm^{-1} تا 1700 cm^{-1} می‌شویم که معمولاً پیوندهای آلی را شامل می‌شود. به خصوص پیک تقریباً عمیق در ناحیه 1130 cm^{-1} بیانگر پیوند $=NH^+$ در ساختار پلی‌آنیلین است [۲۲]. پیک مشاهده شده در نزدیکی 1290 cm^{-1} نیز حضور نوسان‌های کششی در ساختار حلقه‌ای آروماتیک C-N را نشان می‌دهد [۲۳]. همچنین پیک ظاهر شده در 1480 cm^{-1} را می‌توان به نوسان‌های کششی C=C در حلقه بنزن منتسب دانست که در ساختار پلی‌آنیلین دیده می‌شود [۲۴]. علاوه بر آن پیک موجود در 1620 cm^{-1} را می‌توان به کوئونوئیدهای C=N نسبت داد [۲۵]. پیوندهای C-H با ارتعاشات خارج از صفحه را می‌توان در عدد موج 830 cm^{-1} مشاهده کرد [۲۵]. به این ترتیب تمامی پیوندها و ارتعاشات موجود در ساختار PANI را می‌توان در طیف FTIR مشاهده کرد و خاطر جمع بود که ساختار تهیه شده با تقریب بسیار خوبی پلی‌آنیلین است. در طیف مربوط به نانو کامپوزیت $WO_3/PANI$ اما پیک‌های مربوط به PANI تکرار شده‌اند و علاوه بر آن پیک مربوط به پیوند کششی W-O در 640 cm^{-1} تشکیل شده است. همچنین اثری از پیک‌های مربوط به $W=O$ نیست و این حاکی از آن است که آبدار بودن کامپوزیت از بین رفته است. نکته قبلی را می‌توان در از بین رفتن پیک‌های مربوط به پیوندهای O-H در طیف نانو کامپوزیت $WO_3/PANI$ در حوالی 3400 cm^{-1} متوجه شد. نمودار FTIR نانو کامپوزیت $WO_3/PANI$ گواه خوبی بر تشکیل فاز جداگانه هر دو ماده WO_3 و PANI است.

الکتروود ترکیبی $WO_3/PANI$ آنچنان که از تصویر FESEM مشخص است ساختاری از ذرات با پره‌هایی شکل گرفته است که سطح موثر زیادی را تولید می‌کنند و سطح تماس الکتروولیت و الکتروود مقابل را به مراتب بیشتر می‌کنند.

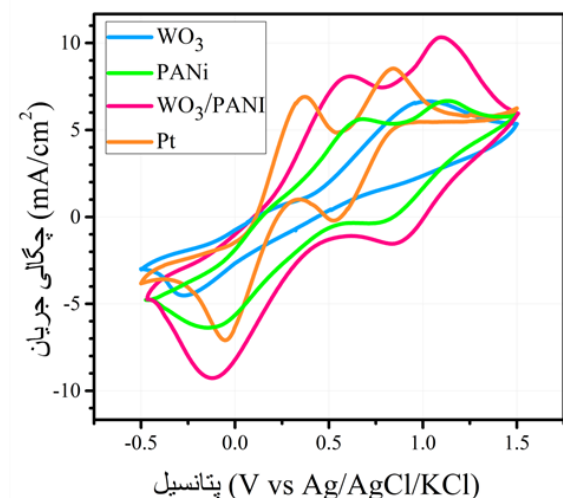
به منظور بررسی ویژگی‌های تراپردی الکترون و خواص الکتروکاتالیتی الکتروودهای مقابل مختلف بکار گرفته شده از آن‌ها طیف EIS تهیه کردیم. برای بررسی هر چه بهتر اثر الکتروود مقابل، از آوردن الکتروود آند خودداری کردیم و با استفاده از سلول متقارن آنالیز EIS را پیش بردیم. به این منظور سلول به شکل $ITO/CE/(I^-/I_3^-)/CE/ITO$ بسته می‌شود تا نیم دایره مربوط به فوتوآند ظاهر نشود. سلول متقارن توجیه بهتری از مقاومت الکتروودها بدست می‌دهد. در این حالت دو الکتروود مقابل مشابه روی ITO لایه‌نشانی می‌شوند و با استفاده از سرلین فضای بین تو الکتروود با الکتروولیت یدید-تری یدید در حلال استونیتریل پر می‌شود. مطالعه آنالیز EIS بر روی این سلول‌های متقارن در حالت تاریک و در پتانسیل مدار باز با اعمال موج سینوسی 10 mV در گستره فرکانسی 0.1 Hz تا 20 kHz صورت گرفته است.

شکل ۸ نمودار نایکویست مربوط به سلول‌های متقارن ساخته شده با الکتروودهای مقابل Pt ، WO_3 ، $PANi$ و $WO_3/PANI$ را نشان می‌دهد. نیم دایره بزرگ مشاهده شده در همه نمونه‌ها بیانگر سینماتیک انتقال الکترون بین الکتروود مقابل و محلول الکتروولیت است که در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد [۲۶]. همچنین خط با شیب ۱ که در فرکانس‌های پایین مشاهده می‌شود بیانگر کنترل انتقال جرم توسط فرآیند پخش گونه‌های الکتروولیت است و به امپدانس وارپورگ مربوط می‌شود. با استفاده از قطر نیم دایره بزرگ می‌توان مقاومت انتقال بار بین الکتروولیت و الکتروود مقابل را بدست آورد. هر چه قطر نیم دایره بزرگ‌تر باشد مقاومت انتقال بار بزرگ‌تر خواهد بود و در نتیجه انتقال بار سخت‌تر رخ می‌دهد. این کمیت آنچنان که از شکل ۸ بر می‌آید و همچنین با نرم‌افزار Zview برازش شده است، برای الکتروودهای مقابل Pt ، WO_3 ، $PANI$ و $WO_3/PANI$ به ترتیب برابر 322 ، 820 ، 618 و $201\ \Omega\text{cm}^2$ تخمین زده می‌شوند. به این ترتیب مقاومت



شکل ۷: تصاویر FESEM الکتروودهای مقابل، $WO_3/PANI$ (c) و $PANI$ (b)، WO_3 (a).

انتقال بار بین الکترولیت و الکتروود مقابل WO₃/PANI کمترین میزان را داراست و می‌تواند نوید بخش انتقال جریان بهتری باشد. همچنین طول از مبدا نمودار نایکوئیست بیانگر مقاومت سری R_s در سلول ساخته شده می‌باشد که برای الکترودهای مقابل WO₃/PANI، PANI، WO₃، Pt، به ترتیب برابر ۲۰، ۵۵، ۴۰ و ۱۲ Ωcm² می‌باشد. این مقاومت سری به صورت مستقیم جریان گذرنده از سلول را کم می‌کند و هر چه کمتر باشد نشان از هدایت سری بهتر سلول خواهد داشت. با توجه به مقاومت سری پایین سلول WO₃/PANI انتظار داریم خواص الکتریکی بهتری از خود نشان دهد.



شکل ۹: منحنی‌های CV مربوط به الکترودهای مقابل مختلف.

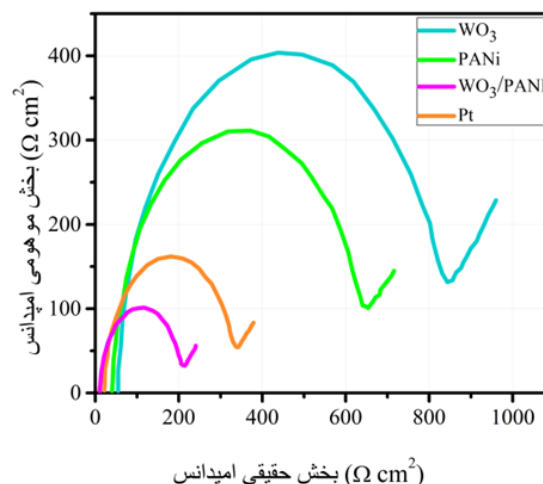
پس از بستن سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ N719 با الکترودهای مقابل Pt، WO₃، PANI و WO₃/PANI اقدام به اندازه‌گیری پارامترهای فوتولتائیک آن‌ها کردیم. به این منظور سلول مورد نظر تحت تابش نور AM1.5 توسط شبیه‌ساز خورشیدی قرار گرفت و نمودار مشخصه آن با استفاده از دستگاه ردیاب I-V ضبط گردید. بازده سلول‌های خورشیدی را می‌توان با استفاده از رابطه:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{in}} \quad (3)$$

اندازه گرفت، که در آن V_{OC} ولتاژ مدار باز J_{SC} چگالی جریان اتصال کوتاه، FF ضریب پرشدگی و P_{in} توان ورودی به سلول است. در طیف AM1.5 مقدار این توان ورودی برابر ۱۰۰ mW/cm² است. شکل ۱۰ نمودار مشخصه سلول‌های بسته شده با الکترودهای مقابل Pt، WO₃، PANI و WO₃/PANI را نشان می‌دهد و پارامترهای فوتولتائیک این سلول‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است.

همانطور که از شکل ۱۰ و جدول ۳ مشخص است، بازده سلول WO₃/PANI با مقدار ۶/۷۸٪ از سلول‌های WO₃،

یک آنالیز بسیار مهم در بررسی الکترودهای مقابل ولتامتری چرخه‌ای یا CV است. شکل ۹ منحنی CV را برای نمونه‌های مختلف الکترودهای مقابل نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ مشخص است ۲ پیک اکسایش و ۲ پیک کاهش در همه‌ی نمونه‌ها دیده می‌شود که به واکنش‌های $I_3^- + 2e^- \rightleftharpoons 3I^-$ و $3I_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2I_3^-$ [۲۷]. چگالی جریان WO₃ به نسبت پایین است ولی در مورد PANI این چگالی جریان با اینکه از پلاتین کمتر است ولی به نسبت قابل ملاحظه است. چگالی جریان الکتروود ترکیبی



شکل ۱۰: نمودار نایکوئیست مربوط به سلول‌های بسته شده با ساختار متقارن با الکترودهای مخالف مختلف.

شکل ۸: نمودار نایکوئیست مربوط به سلول‌های بسته شده با ساختار متقارن با الکترودهای مخالف مختلف.

FESEM می‌توان اینگونه تصور کرد که با تشکیل فاز کامپوزیت $WO_3/PANI$ میزان تخلخل الکتروود مقابل بیشتر شده است که باعث برهمکنش هر چه بهتر زوج‌های ریداکس I^-/I_3^- با الکتروود مقابل است، همچنین از نتایج آنالیز CV دریافتیم که فعالیت الکتروکاتالیتی سلول $WO_3/PANI$ نسبت به حالت PANI بیشتر شده است. از این رو فرآیند کاهش I_3^- می‌تواند سریع‌تر اتفاق بیافتد و باعث افزایش چگالی جریان و ولتاژ مدار باز نسبت به PANI شود.

علاوه بر آن همانطور که از آنالیز EIS مشاهده شد، میزان مقاومت انتقال بار در سلول $WO_3/PANI$ نسبت به سلول‌های دیگر کمتر بود و این اثر نشان از آن دارد که انتقال الکترون به I_3^- نسبت به سلول‌های دیگر سریع‌تر رخ می‌دهد. به این ترتیب جریان گذرنده از سلول افزایش می‌یابد و متعاقباً بازده این سلول بیشتر می‌شود. می‌توان گفت با بهره‌گیری از نیم‌رسانای WO_3 خواص انتقالی PANI بهبود یافته است و در مقایسه با الکتروود Pt عملکرد پایایی را از خود نشان می‌دهد.

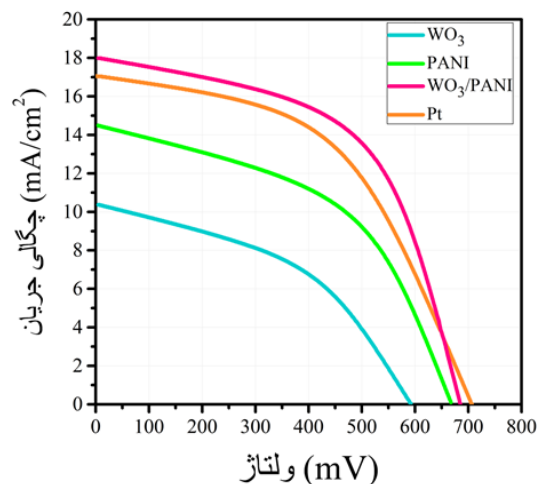
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشان دادیم که استفاده از لایه سدکننده دوتایی می‌تواند روشی مناسب جهت بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی باشد. استفاده از دو لایه سدکننده به جای تک لایه باعث می‌شود تا آزادی عمل بیشتری در استفاده از این روش بدست آید که هم باعث جداسازی بهتر الکتروولیت از FTO و هم موجب هدایت بهتر حامل‌ها می‌شود. این روش که در مطالعه حاضر بازدهی سلول خورشیدی بدون لایه سدکننده را در حدود ۴۵٪ افزایش داد می‌تواند در انواع سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ بکار رفته و بازدهی آن‌ها را افزایش دهد. همچنین با استفاده از تکنیک ولتامتری چرخه‌ای اقدام به ساخت الکتروودهای مقابل WO_3 ، PANI و ترکیب آن‌ها کردیم و با استفاده از این الکتروودها در کنار Pt به عنوان الکتروود مقابل سلول خورشیدی حساس شده با رنگ به مطالعه ویژگی‌های آن‌ها پرداختیم. مواد مورد استفاده ما با در نظر گرفتن اینکه نسبت به پلاتین ارزان‌تر

PANI و Pt با مقادیر ۲/۷۰، ۴/۷۳ و ۶/۰۳٪ بیشتر است. عامل اصلی افزایش بازدهی در سلول $WO_3/PANI$ نسبت به Pt در افزایش FF از ۵۰٪ به ۵۵٪ و همچنین افزایش J_{sc} از ۱۷/۰۷ به ۱۸ mA/cm^2 دانست. اگر چه میزان ولتاژ مدار باز سلول $WO_3/PANI$ نسبت به سلول Pt کمتر است ولی سهم دو عامل FF و J_{sc} به گونه‌ای است که اثر این اختلاف ۲۲ میلی ولتی را جبران کرده است.

نمونه ساخته شده با الکتروود مقابل	$V_{oc}(mV)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF	η (%)
WO_3	۵۹۲	۱۰/۳۷	۴۴	۲/۷۰
PANI	۶۶۷	۱۴/۴۹	۴۹	۴/۷۳
$WO_3/PANI$	۶۸۵	۱۸/۰۰	۵۵	۶/۷۸
Pt	۷۰۷	۱۷/۰۶	۵۰	۶/۰۳

جدول ۳: مشخصات الکتریکی سلول‌های خورشیدی ساخته شده با الکتروودهای مقابل مختلف.



شکل ۱۰: نمودار منحنی مشخصه J-V برای سلول‌های ساخته شده با الکتروودهای مقابل مختلف.

همچنین مشاهده می‌کنیم که با تشکیل نانو کامپوزیت $WO_3/PANI$ سهم چگالی جریان در سلول ساخته شده نسبت به سلول PANI به مراتب بیشتر شده است. با توجه به تصاویر

- [11] P. Mani, S.V. Nair, M. Shanmugam, *Emergent Materials*, **3**, 2020, 117.
- [12] E. Kouhestanian, S.A. Mozaffari, M. Ranjbar, H.S. Sahar-Amoli, *Organic Electronics*, **86**, 2020, 105915.
- [13] M. Amini, R. Keshavarzi, V. Mirkhani, M. Moghadam, *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 2018, 2632.
- [14] E. Kouhestanian, S.A. Mozaffari, M. Ranjbar, H.S. Sahar-Amoli, *Superlattices Microstructures*, **96**, 2016, 82.
- [15] D. Sengupta, P. Das, B. Mondal, K. Mukherjee, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, **60**, 2016, 356.
- [16] K.S. Kim, H. Song, S.H. Nam, S.M. Kim, H. Jeong, W.B. Kim, *Advanced Materials*, **24**, 2012, 792.
- [17] J.A. Jeong, H.K. Kim, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 2011, 344.
- [18] J. Zhao, B. Sun, L. Qiu, H. Caocen, Q. Li, X. Chen, *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 2012, 18380.
- [19] S. Azmat, T. Jan, S. Ilyas, A. Hassan, I. Habib, *Materials Research Express*, **5**, 2018, 115025.
- [20] S. Bai, H. Liu H.J. Sun, Y. Tian, S. Chen, J. Song, *Applied Surface Science*, **338**, 2015, 61.
- [21] M. Abrari, M. Ghanaatshoar, H.R. Moazami, *Journal of Electronic Materials*, **48**, 2019, 445.
- [22] E. Kang, K. Neoh, K. Tan, B. Tan, *Synthetic Metals*, **46**, 1992, 227.
- [23] P.A. Tamirisa, K.C. Liddell, P.D. Pedrow, M.A. Osman, *Journal of Applied Polymer Science*, **93**, 2004, 1317.
- [24] X. Gong, L. Dai, A.W. Mau, H.J. Griesser, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, **36**, 1998, 633.
- [25] R. Tas, M. Can, S. Sonmezoglu, *IEEE Journal of Photovoltaics*, **7**, 2017, 792.
- [26] Z. Han, J. Zhang, Y. Yu, W. Cao, *Materials Letters*, **70**, 2012, 193.
- [27] T.H. Lee, K. Do, Y.W. Lee, S.S. Jeon, C. Kim, J. Ko, *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 2012, 21624.

بودند، عملکردی قابل مقایسه و یا حتی بهتر از پلاتین به نمایش گذاشتند. بازده سلول ساخته شده با الکتروود مقابل WO₃/PANI به مقدار ۶/۷۸٪ رسید که در برابر بازده الکتروود پلاتین ۱۲/۴٪ افزایش داشته است.

مراجع

- [1] A. Moradi, M. Abrari, M. Ahmadi, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **31**, 2020, 16759.
- [2] B. Manikandan, R. John, *AIP Conference Proceedings*, 2020, AIP Publishing LLC.
- [3] M. Kandasamy, *Solar Energy*, **211**, 2020, 789.
- [4] P.N. Anggraini, N.M. Nursam, The effect of screen printed blocking layer on the performance of monolithic DSSC. AIP Conference Proceedings, 2020, AIP Publishing LLC.
- [5] S.G. Chen, S. Chappel, Y. Diamant, A. Zaban, *Chemistry of Materials*, **13**, 2001, 4629.
- [6] E. Palomares, J.N. Clifford, S.A. Haque, T. Lutz, *Chemical Communications*, **14**, 2002, 1464.
- [7] P.J. Cameron, L.M. Peter, *Journal of Physical Chemistry B*, **107**, 2003, 14394.
- [8] M.H. Kim, Y.U. Kwon, *Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 2009, 17176.
- [9] T.T. Duong, H.J. Choi, Q.J. He, A.T. Le, S.G. Yoon, *Journal of Alloys and Compounds*, **561**, 2013, 206.
- [10] S. Sasidharan, S. Soman, S.C. Pradhan, *New Journal of Chemistry*, **41**, 2017, 1007.