

بررسی اثر تغییر اندازه نانوذرات دی‌اکسید تیتانیم بر کارایی سلول خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه طبیعی انار

فاطمه جعفری ندوشن^۱، عباس بهجت^۲، علیرضا خوشرو^۳، مارال قشنی^۱

۱. گروه پژوهشی فوتونیک، مرکز تحقیقات مهندسی، دانشگاه یزد، یزد

۲. گروه اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

۳. گروه تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه یزد، یزد

پست الکترونیکی: abehjat@yazd.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۱۵)

چکیده

در این تحقیق پس از ساخت و مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه موجود در آب انار اثر تغییر اندازه نانوذرات بلوری دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2) بر کارایی سلول بررسی شده است. از نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر و همچنین مخلوط آن دو به نسبت مساوی در فوتوالکتروود با ساختار تک لایه استفاده کردیم. بهترین کارایی برای سلول ساخته شده با مخلوط نانوذرات با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر به دست آمد. همچنین کارایی سلول‌های دارای فوتوالکتروود با ساختار دولایه نیز بررسی شد. از مخلوط نانوذرات ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر TiO_2 به عنوان اولین لایه و از TiO_2 با اندازه‌های ۱۰۰ و ۴۰۰ نانومتر به عنوان پراکننده و دومین لایه در فوتوالکتروود استفاده کردیم. برای سلول ساخته شده با استفاده از TiO_2 با اندازه ۴۰۰ نانومتر بازدهی بهتری به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی، نانوذرات، دی‌اکسید تیتانیم، رنگ‌دانه طبیعی انار

۱. مقدمه

انرژی است، سال‌هاست که سلول‌های فوتوولتائیک^۱ برای تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته به کار می‌روند. سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه، که برای اولین بار توسط گراتزل و همکارانش در سال ۱۹۹۱ توسعه داده شدند [۱]، از نسل سوم سلول‌های فوتوولتائیک به شمار می‌آیند. این سلول‌ها در سال‌های اخیر به علت سهولت

افزایش مصرف انرژی به دلیل ازدیاد جمعیت و رشد فناوری و به دنبال آن بالا رفتن قیمت انرژی در جهان و نگرانی از اتمام سوخت‌های فسیلی، جستجوی گزینه‌های جدید انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر را ایجاب می‌کند. انرژی خورشیدی یکی از پاک‌ترین و در دسترس‌ترین منابع تأمین

استفاده شد. PEDOT:PSS یک پلیمر رسانا است و خاصیت کاتالیزوری خوب و رسانندگی نسبتاً بالایی دارد و در مقایسه با پلاتین بسیار ارزان تر می باشد [۸]. در این جا ابتدا به بررسی اثر اندازه نانو ذرات TiO_2 در فوتوالکتروود با ساختار تک لایه می پردازیم و سپس اثر اندازه این نانو ذرات را به عنوان پراکننده در فوتوالکتروود با ساختار دولایه بررسی خواهیم کرد.

۲. روش آزمایش

۲.۱. آماده کردن زیرلایه ها

از شیشه لایه نشانی شده با ایندیوم آلیبده شده با قلع (ITO)، با مقاومت سطحی ۱۵ اهم بر سانتی متر مربع به عنوان زیرلایه استفاده شد، زیرلایه های ITO را با آب و صابون شستشوداده و درون یک بشر قرار دادیم و با محلول آب دوبار تقطیر، استون و اتانول، هر کدام به ترتیب به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک شستشو دادیم. سپس در کوره با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا خشک شود. پس از خشک شدن شیشه های ITO، طرف رسانای آن را با مولتی متر مشخص کرده و برای لایه نشانی آماده شدند.

۲.۲. آماده سازی رنگ دانه

از آب انار که از میوه انار تازه به دست آمده به عنوان حساس کننده استفاده شد. بدین منظور به آب انار چند قطره HCl اضافه کردیم تا PH محلول به یک برسد. سپس با استفاده از کاغذ صافی محلول رنگ دانه یکنواختی به دست آمد.

۳.۲. تهیه الکترولیت

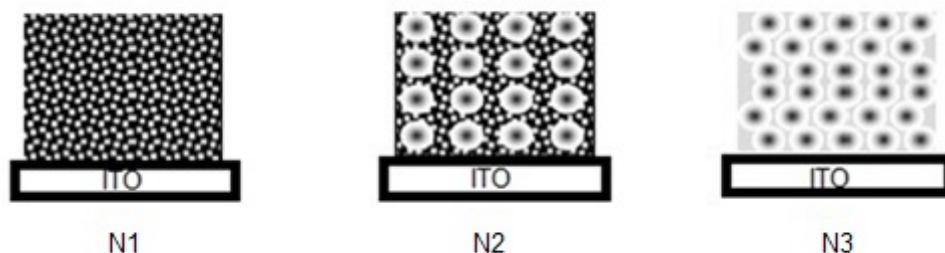
معمولاً الکترولیت مایع از حلال با گراندروی پایین مانند استونیتریل و زوج اکسایش-کاهش یدید و تری یدید تشکیل شده است. در این پژوهش، از استونیتریل به عنوان حلال و پتاسیم یدید (KI) و ید (I_2) به عنوان زوج اکسایش-کاهش استفاده شد. برای تهیه الکترولیت از محلول ۰/۰۵ مولار پتاسیم یدید و ۰/۵ مولار یدید در استونیتریل استفاده شد.

ساخت و کارایی مناسب، مورد توجه قرار گرفته اند. سلول های خورشیدی رنگ دانه ای از سه بخش فوتوالکتروود، الکترود مقابل و الکترولیت، که عمدتاً بر پایه زوج اکسایش-کاهش یدید/تری یدید می باشد، تشکیل شده اند [۲]. فوتوالکتروود این سلول ها از یک نوع نیم رسانا نانوساختار (در اکثر موارد نانوذرات دی اکسید تیتانیوم) که با یک لایه رنگ جاذب نور مریی پوشیده شده، تشکیل شده است [۳]. تا به حال رنگ دانه های بر پایه فلز روتینیوم مانند رنگ دانه تجاری N_{719} بهترین کارایی را داشته اند [۴]، اما مهمترین مشکل این نوع رنگ دانه ها قیمت بالای آنها می باشد. رنگ دانه های طبیعی که از قسمت های مختلف گیاهان مانند گل، برگ، ساقه، میوه و حتی ریشه گیاهان به دست می آید، به علت ارزان بودن و منابع فراوان و کارایی نسبتاً قابل قبول به عنوان حساس کننده، جایگزین مناسبی برای رنگ دانه های صنعتی گران قیمت می باشند [۵]. در این تحقیق از آب میوه انار به عنوان حساس کننده در ساخت سلول خورشیدی رنگ دانه ای استفاده کرده ایم. آب انار دارای رنگ دانه آنتوسیانین^۱ می باشد. این رنگ دانه جاذب نور در ناحیه مریی است و با داشتن گروه های -OH در ساختار خود پیوند نسبتاً خوبی با نانوذرات TiO_2 برقرار می کند [۶]. رنگ ترکیبات آنتوسیانین به pH محیط بستگی دارد، در محیط اسیدی قرمز، در محیط خنثی بنفش و در محیط قلیایی آبی رنگ است. آزمایش های متعدد نشان داده است که آنتوسیانین موجود در گیاهان مختلف کارایی متفاوتی در DSCs در نقش حساس کننده دارد [۵]. این رنگ دانه جذب نانوبلورهای دی اکسید تیتانیوم شده و موجب انتقال سریع الکترون پس از برانگیخته شدن رنگ دانه می شود.

در الکترود مقابل سلول های خورشیدی به طور معمول از پلاتین به عنوان کاتالیزور استفاده می شود اما پلاتین با وجود رسانندگی بالا و خاصیت کاتالیزوری خوب، بسیار گران قیمت می باشد [۷]. در این تحقیق از مخلوط PEDOT:PSS و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم به عنوان کاتالیزور در الکترود مقابل

۱. Anthocyanin

۲. Poly(3,4-Ethylendioxythiophene)-Poly(Styrene Sulfonate)



شکل ۱. طرح نمادین از سه فوتوالکتروود لایه‌نشانی شده، با نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های مختلف: N1: ۲۵ نانومتر، N2: مخلوط ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر با نسبت‌های مساوی، N3: ۱۰۰ نانومتر.

۱). به منظور ساخت، فوتوالکتروود خمیر دی‌اکسیدتیتانیوم را با روش دکتر بلید، روی زیر لایه‌های تمیز ITO لایه‌نشانی شد و در کوره قرار گرفت تا در دمای 450°C درجه سانتیگراد به مدت نیم ساعت پخت داده شود. پس از پخت هنگامی که دمای کوره به 80°C درجه سانتیگراد رسید فوتوالکتروودها به مدت ۱۵ ساعت در رنگ‌دانه انار با PH یک قرار گرفت. نمونه‌ها پس از بیرون آوردن از رنگ‌دانه به منظور حذف رنگ‌دانه‌های اضافی به مدت ده دقیقه در اتانول قرار داده شد. (ب) در این بخش از مخلوط نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر به عنوان اولین لایه، و از نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های ۱۰۰ نانومتر و یا ۴۰۰ نانومتر به عنوان پراکننده‌گر (دومین لایه) بر روی سطح فوتوالکتروود استفاده شد.

برای آماده‌سازی فوتوالکتروود، خمیر TiO_2 مانند بخش قبل آماده شد، سپس خمیر TiO_2 که از مخلوط نانوذرات با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر به نسبت مساوی تهیه شده، و با روش دکتر بلید بر سطح زیرلایه‌های ITO لایه‌نشانی شد. سپس به مدت یک ساعت در کوره و در دمای 120°C درجه پخت داده شد. در مرحله بعد خمیر نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های ۱۰۰ و 400°C نانومتر که با روش قبل تهیه شده بودند با روش دکتر بلید بر روی لایه زیرین، لایه‌نشانی شدند و به مدت نیم ساعت در کوره در دمای 450°C درجه بازپخت داده شد (شکل ۲). پس از بازپخت، فوتوالکتروودها به مدت ۱۵ ساعت در رنگ‌دانه انار با PH یک قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از بیرون آوردن از رنگ‌دانه به منظور حذف رنگ‌دانه‌های اضافی به مدت ده دقیقه در اتانول قرار داده شدند.

۴.۲. آماده‌سازی الکتروود مقابل

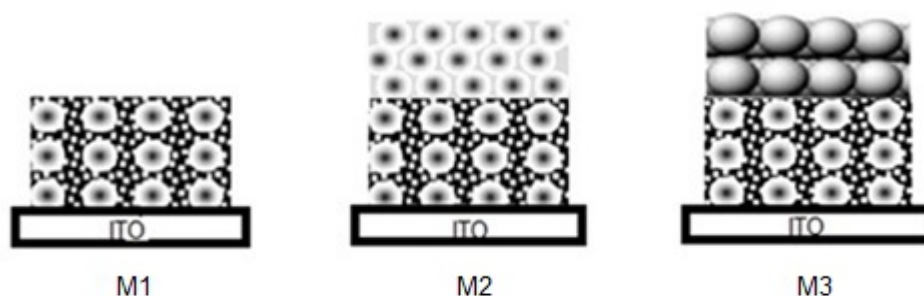
برای آماده‌سازی الکتروود مقابل، 0.2 گرم از نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با اندازه ۱۰۰ نانومتر با 0.5 میلی‌لیتر محلول PEDOT:PSS مخلوط شد و به مدت ۱۰ ساعت روی هم‌زن مغناطیسی قرار گرفت، تا محلول نسبتاً یکنواختی بدست آمد. سپس محلول بدست آمده به روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت 4500 دور بر دقیقه و مدت زمان 60 ثانیه روی زیرلایه‌های تمیز ITO لایه‌نشانی شد. سپس در کوره و در دمای 100°C درجه به مدت دو ساعت پخت داده شد.

۵.۲. تهیه خمیر TiO_2

برای آماده‌سازی خمیر دی‌اکسیدتیتانیوم، 0.35 گرم از پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG، ۶۰۰۰) در ۱ میلی‌لیتر اسید نیتریک با PH حدود 3.5 حل شد. سپس 0.5 گرم از پودر نانوذرات TiO_2 به محلول اضافه شد، و به مدت یک ساعت روی هم‌زن مغناطیسی قرار گرفت تا محلول یکنواختی به دست آید. در این مرحله یک میلی‌لیتر اتانول به محلول اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه در اولتراسونیک قرار گرفت. سپس این محلول به مدت یک ساعت روی هم‌زن مغناطیسی قرار گرفت تا خمیر کاملاً یکنواخت با چسبندگی مناسب به دست آید.

۶.۲. آماده‌سازی فوتوالکتروود

(الف) در این مرحله از نانوذرات TiO_2 با دو اندازه ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر (آنا تا ز خالص، از شرکت آلد ریچ) و همچنین مخلوط آنها به نسبت مساوی در ساخت، فوتوالکتروود استفاده شد (شکل



شکل ۲. طرح نمادین از سه فوتوالکتروکود لایه‌نشانی شده با نانوذرات $\text{TiO}_2/\text{M1}$ ، مخلوط ذرات ۲۵ و ۱۰۰ نانومتری TiO_2 با نسبت‌های مساوی (یک‌لایه)، $\text{M1}/\text{M2}$ به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون و TiO_2 با اندازه ۱۰۰ نانومتر به عنوان لایه پراکنده‌گر، $\text{M1}/\text{M3}$ به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون و TiO_2 با اندازه ۴۰۰ نانومتری به عنوان لایه پراکنده.

شرایطی اندازه‌گیری می‌شود که پتانسیل اعمال شده، برابر صفر ولت باشد، چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) برابر با جریان اتصال کوتاه تقسیم بر مساحت ناحیه فعال سلول است. جریان اتصال کوتاه به میزان زیادی به الکترون‌های تولید شده و بازترکیب داخلی الکترون‌ها و حفره‌ها بستگی دارد [۱۰]. عامل گنجایش با نسبت بیشینه توان (P_{max}) تقسیم بر حاصل ضرب ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه مشخص می‌شود:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (1)$$

مهمترین مشخصه برای ارزیابی عملکرد یک سلول خورشیدی بازده تبدیل نور به الکتریسیته است. بازده به صورت نسبت بیشترین توان الکتریکی خروجی به توان تابشی فرودی روی سطح سلول خورشیدی بیان می‌شود و با چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و عامل گنجایش طبق رابطه زیر بستگی دارد [۱۱]:

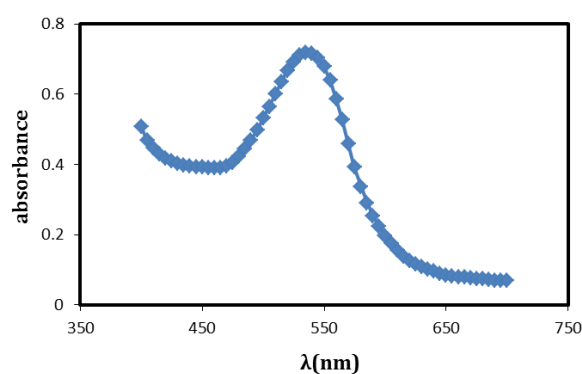
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \quad (2)$$

بنابراین برای افزایش بازده یک سلول خورشیدی باید حاصل ضرب سه کمیت فوق افزایش پیدا کند.

۴. نتایج و بحث

۱.۴. طیف جذب

طیف جذب رنگ‌دانه انار مورد استفاده به عنوان حساس‌کننده با استفاده از UV-Vis گرفته شد (شکل ۳). همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد این رنگ‌دانه دارای بیشینه جذب



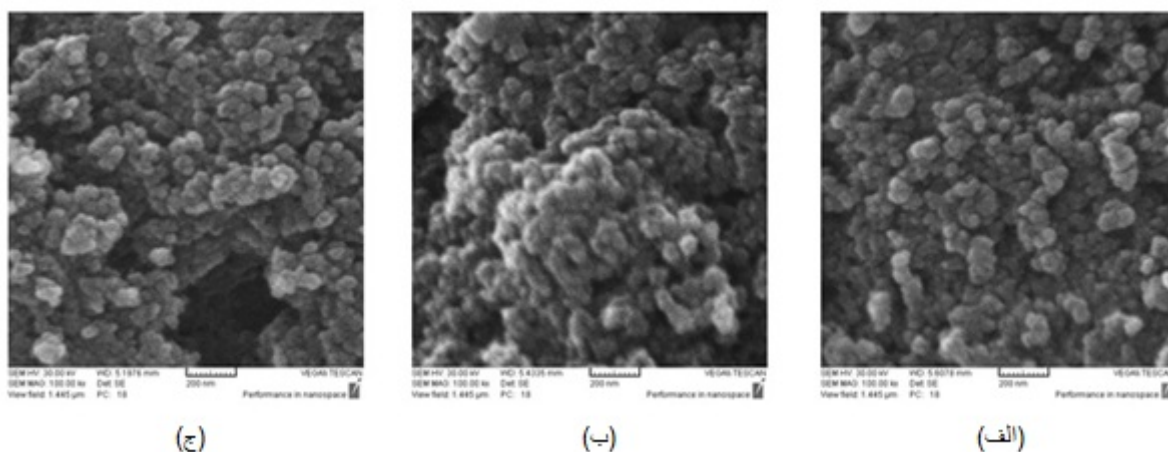
شکل ۳. طیف جذب رنگ‌دانه موجود در آب انار.

۷.۲. مجتمع کردن سلول

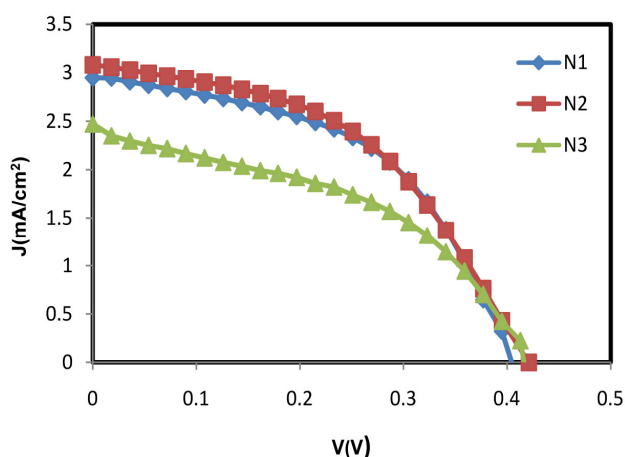
سپس فوتوالکتروکود و الکتروکود مقابل با دوگیره به هم متصل شدند و الکترولیت با کمک یک سرنگ به داخل آن تزریق شد و سلول ساخته شده با استفاده از دستگاه Keithley ۲۴۰۰ و شیبیه‌ساز خورشیدی 100 mW/cm^2 با 1.5 G AM مشخصه‌یابی شد.

۳. مشخصه‌یابی

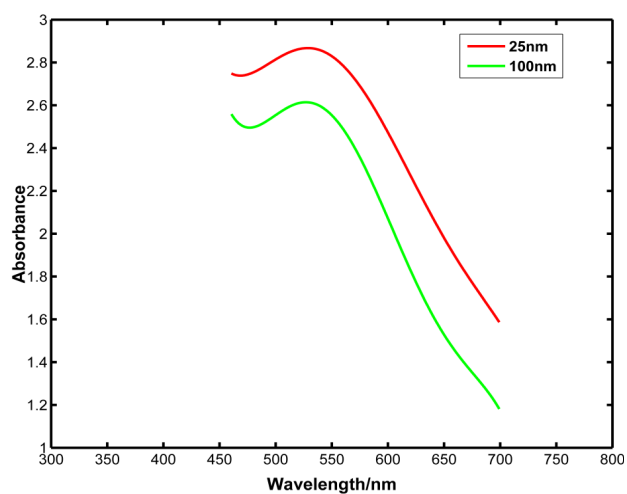
برای مقایسه کارایی سلول‌های ساخته شده از پارامترهای ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه، بازده و عامل گنجایش استفاده می‌شود. ولتاژ سلول هنگامی که جریان آن برابر صفر است را ولتاژ مدار باز می‌نامند. ولتاژ مدار باز را می‌توان تابعی از تفاوت تراز فرمی الکترون‌ها در لایه نانو متخلخل TiO_2 و پتانسیل اکسایش-کاهش الکترولیت دانست [۹]. جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) در



شکل ۴. تصویر SEM گرفته شده از نانوذرات TiO_2 لایه نشانی شده بر روی ITO، (الف) ۱۰۰ نانومتر، (ب) مخلوط ۱۰۰ و ۲۵ نانومتر، (ج) ۲۵ نانومتر.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده با نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های متفاوت، (N1) ۲۵ نانومتر، (N2) مخلوط ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر با نسبت‌های مساوی، (N3) ۱۰۰ نانومتر.



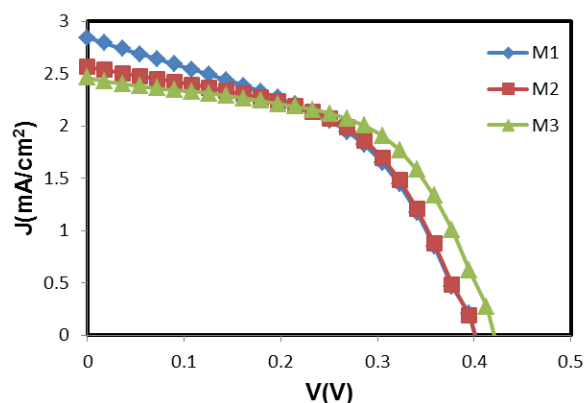
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف جذب فوتوآندهای لایه نشانی شده با نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های متفاوت و حساس شده با رنگدانه انار.

در حدود طول موج ۵۳۰ نانومتر می‌باشد. این طول موج در ناحیه مرئی واقع شده است.

۲.۴. مشخصه جریان-ولتاژ

سه نمونه از سلول‌های خورشیدی با ساختار فوتو الکتروود آورده شده در بند (الف) بخش ۲-۶ (N1, N2, N3) ساخته شد. تصاویر SEM گرفته شده از نانوذرات TiO_2 مورد استفاده در سلول‌ها در اندازه‌ها و ترکیب مختلف لایه نشانی شده بر روی ITO، (الف) ۱۰۰ نانومتر، (ب) مخلوط ۱۰۰ و ۲۵ نانومتر، (ج) ۲۵ نانومتر در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین طیف جذبی گرفته شده از

دو الکتروود لایه نشانی شده با TiO_2 با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه Ocean Optic در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۶ نمودار جریان-ولتاژ مربوط به این نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده نشان داده شده است. مشخصه‌های دیگر این نمونه‌ها از قبیل بازدهی، ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه و عامل گنجایش نیز اندازه‌گیری و محاسبه شده است، و در جدول ۱ نشان داده شده است. بدون تردید اندازه نانوذرات TiO_2 بر انتقال الکترون و همچنین بازترکیب الکترون و حفره تأثیر دارد، بنابراین با تغییر اندازه نانوذرات، بازدهی سلول نیز تغییر می‌کند [۱۲]. هرچه



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده با ساختار M.

نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر (نمونه N_1) که در بخش قبل بهترین کارایی برای آن اندازه‌گیری شد، مجدداً ساخته شد. برای بررسی اثر لایه دوم (لایه پراکننده) در نمونه (اول M_1)، از مخلوط نانوذرات ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر TiO_2 با نسبت‌های مساوی (یک‌لایه)، به‌تنهایی به عنوان انتقال‌دهنده الکترون در فوتوالکتروود استفاده کردیم. در نمونه دوم (M_2) مخلوط نانوذرات ۲۵ و ۱۰۰ نانومتری TiO_2 با نسبت‌های مساوی به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون و نانو ذرات با ابعاد ۱۰۰ نانومتر به عنوان لایه پراکننده‌گر مورد استفاده قرار گرفت. و در نمونه سوم (M_3)، لایه N_1 به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون و نانوذرات با ابعاد ۴۰۰ نانومتری به عنوان لایه پراکننده و دومین لایه بر روی سطح فوتوالکتروود استفاده شد. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌های ساخته شده در شکل ۷ نشان داده شده است. علاوه بر این مشخصه‌های دیگری مانند بازدهی، ولتاژ مدارباز، چگالی جریان اتصال کوتاه و عامل گنجایش نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

با استفاده از نانوذرات با اندازه‌های بزرگ ۴۰۰ نانومتری به عنوان پراکننده‌گر در سطح فوتوالکتروود در این مرحله به دلیل اینکه میزان پراکنندگی نانوذرات، به اندازه آنها، ضریب شکست و شکل نانوذرات نیز بستگی دارد، به نظر می‌رسد استفاده از نانوذرات با اندازه‌های بزرگتر باعث می‌شود که طول مسیر نور در بین نانوذرات TiO_2 افزایش یابد [۱۴] و در نتیجه فوتون بیشتری جذب رنگ‌دانه موجود در سطح نیم‌رسانا شود. بنابراین سلول ساخته شده با ساختار M_3 با استفاده از ذرات

جدول ۱. نتایج حاصل از مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده با نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های متفاوت.

FF	Eff	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{V})$	
۰٫۴۹	۰٫۵۹	۲٫۹	۰٫۴۱	N_1
۰٫۴۶	۰٫۶۱	۳٫۱	۰٫۴۲	N_2
۰٫۴۲	۰٫۴۵	۲٫۵	۰٫۴۲	N_3

اندازه نانوذرات کوچکتر باشد سطح مؤثر نیم‌رسانا در فوتوالکتروود بیشتر می‌شود و در نتیجه جذب سطحی رنگ‌دانه افزایش می‌یابد، که نتایج به دست آمده در شکل ۳ نیز مؤید همین مطلب است. گرچه افزایش مقدار رنگ‌دانه موجود در سطح TiO_2 باعث افزایش جذب فوتون فرودی می‌شود و باعث می‌شود الکترون-حفره بیشتری تولید شود، اما در بین نانوذرات کوچک در مقایسه با نانوذرات بزرگتر مرزهای بیشتری وجود دارد، که باعث افزایش تله‌ها در مسیر الکترون می‌گردد، که به دنبال آن همین امر کاهش کارایی سلول را در پی دارد [۱۳].

با افزایش اندازه نانوذرات، سطح مؤثر نیم‌رسانا در فوتوالکتروود کاهش می‌یابد و بنابراین میزان رنگ‌دانه موجود در سطح TiO_2 کمتر می‌شود، اما سطح تماس بین نانوذرات TiO_2 و زیرلایه اکسید رسانا افزایش می‌یابد [۱۳]، علاوه بر این نانوذرات با اندازه‌های بزرگ در سطح فوتوالکتروود می‌توانند نور فرودی را پراکنده کنند، که باعث به دام انداختن فوتون‌های بیشتر از نور فرودی و در نتیجه ایجاد الکترون-حفره بیشتری می‌شود و از این طریق کارایی سلول را بهبود می‌بخشد [۱۲].

بنابراین استفاده از نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های کوچک یا بزرگ، هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشد. بنابراین برای این که سلول ساخته شده هم جذب رنگ‌دانه بهتری داشته باشد و هم این که خاصیت پراکننده‌گری نور از خود نشان دهد، در این تحقیق از مخلوط نانوذرات TiO_2 با دو اندازه ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر هم استفاده کردیم. نتایج بدست آمده نیز بهترین کارایی را برای سلول با این نوع ساختار (N_2) نشان می‌دهد.

(ب) سه نمونه از سلول‌های خورشیدی با ساختار فوتوالکتروود آورده شده در بند (ب) بخش ۲-۶ یعنی مخلوط

آب انار ساخته شد. اثر تغییر اندازه نانو ذرات اکسید تیتانیم در کارایی سلولها بررسی شد. بدین منظور شش ساختار متفاوت برای سلولها طراحی شد. نمونه‌های ساخته شده مشخصه‌یابی شدند. بررسی‌ها نشان می‌دهد سلول‌های خورشیدی دارای فوتوالکترود ساخته شده با مخلوط نانوذرات تیتانیم با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتری از کارایی بهتری در مقایسه با نمونه‌های دارای فوتوالکترود ساخته شده با نانوذرات ۲۵ و ۱۰۰ نانومتری برخوردار می‌باشند. علاوه براین می‌توان در ساختارهای مخلوطی با افزودن لایه پراکنده‌گر ۴۰۰ نانومتری به آنها، کارایی را افزایش داد.

جدول ۲. نتایج حاصل از مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته‌شده در بخش دوم.

	FF	Eff	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc}(V)$	
	۰,۴۷	۰,۵۲	۲,۸	۰,۴۰	M_1
	۰,۵۳	۰,۵۳	۲,۵	۰,۴۰	M_2
	۰,۵۷	۰,۵۸	۲,۵	۰,۴۲	M_2

TiO₂ با اندازه ۴۰۰ نانومتر بازدهی بهتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها (M_1 , M_2) دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه

مراجع

1. B O'Regan and M Gratzel, *Nature* **353** (1991) 737.
2. S K Dhungel, and J G Park, *Renewable Energy* **35** (2010) 2776.
3. N Fuke, A Fukui, A Islam, R Komiya, R Yamanaka, H Harima, and L Han, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **93** (2009) 720.
4. H Zhou, L Wu, Y Gao, and T Ma, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **219** (2011) 188.
5. M R Narayan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16** (2012) 208.
6. G Calogero, J H Yum, A Sinopoli, G D Marco, M Gratzel, and M K Nazeeruddin, *Solar Energy* **86** (2012) 1563.
7. P Balraju, M Kumar, M S Roy, and G D Sharma, *Synthetic Metals* **159** (2009) 1325.
8. W Maiaugree, S Pimanpang, M Towannang, S Saekow, W Jarernboon, and V Amornkitbamrung, *Journal of Non-Crystalline Solids* **358** (2012) 2489.
9. Y Zhang, L Wu, E Xie, H Duan, W Han, and J Zhao, *Journal of Power Sources* **189** (2009) 1256.
10. Z S Wang, H Kawauchi, T Kashima, and H Arakawa, *Coordination Chemistry Reviews* **248** (2004) 1381.
11. J Jiang, J Zhang, F Gu, W Shao, C Li, and M Lu, *Particuology* **9** (2011) 222.
12. L Du, A Furube, K Hara, P Katoh, and M Tachiya, *J. Phys. Chem. C* **114** (2010) 8135.
13. T P Chou, Q Zhang, B Russo, G E Fryxell, and G Cao, *J. Phys. Chem.* **111** (2007) 6296.
14. H J Koo, J Park, B Yoo, K Yoo, K Kim, and N G Park, *Inorganica Chimica Acta* **361** (2008) 677.