

بررسی اثر تغییر اندازه نانوذرات دی اکسید 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 دی اکسید تیتانیوم (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 فوتوالکترود 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 فوتوالکترود 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 فوتوالکترود 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، دی اکسید تیتانیم، رنگدانه طبیعی انار

۱. مقدمه

انرژی است، سال‌هاست که سلول‌های فوتوولتاییک^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 فوتوولتاییک 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 ایجاد می‌کند. انرژی خورشیدی یکی از پاک‌ترین و در دسترس‌ترین منابع تأمین

۱. Photovoltaic

استفاده شد. PEDOT:PSS یک پلیمر رسانا است و خاصیت کاتالیزوری خوب و رسانندگی نسبتاً بالایی دارد و در مقایسه با پلاتین بسیار ارزان‌تر می‌باشد [۸]. در این جا ابتدا به بررسی اثر اندازه نانو ذرات TiO_2 در فوتوالکترود با ساختار تک‌لایه می‌پردازیم و سپس اثر اندازه این نانوذرات را به عنوان پراکننده در فوتوالکترود با ساختار دولایه بررسی خواهیم کرد.

۲. روش آزمایش

۲.۱. آماده کردن زیرلایه‌ها

از شیشه لایه‌نشانی شده با ایندیوم آلیایده شده با قلع (ITO)، با مقاومت سطحی ۱۵ اهم بر سانتی‌متر مربع به عنوان زیرلایه استفاده شد، زیرلایه‌های ITO را با آب و صابون شستشوداده و درون یک بشر قرار دادیم و با محلول آب دوبار تقطیر، استون و اتانول، هرکدام به ترتیب به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک شستشو دادیم. سپس در کوره با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا خشک شود. پس از خشک شدن شیشه‌های ITO، طرف رسانای آن را با مولتی‌متر مشخص کرده و برای لایه‌نشانی آماده شدند.

۲.۲. آماده سازی رنگ‌دانه

از آب انار که از میوه انار تازه به‌دست آمده به عنوان حساس‌کننده 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 رنگ‌دانه یکنواختی به‌دست آمد.

۳.۲. تهیه الکترولیت

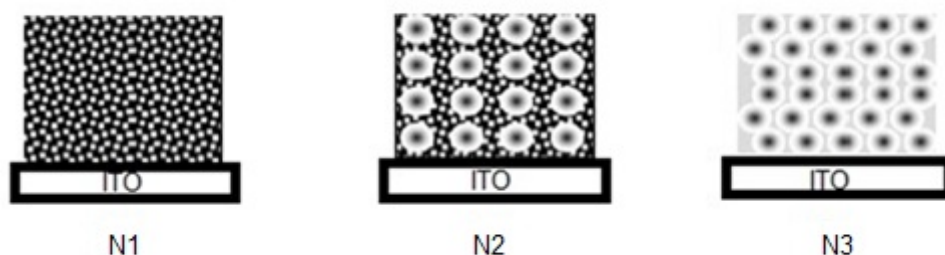
معمولاً الکترولیت مایع از حلال با گرانیروی پایین مانند استونیتریل و زوج اکسایش-کاهش یدید و تری‌یدید تشکیل شده است. در این پژوهش، از استونیتریل به عنوان حلال و پتاسیم‌یدید (KI) و ید (I_2) به عنوان زوج اکسایش-کاهش استفاده شد. برای تهیه الکترولیت از محلول ۰/۰۵ مولار پتاسیم یدید و ۰/۵ مولار یدید در استونیتریل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

ساخت و کارایی مناسب، مورد توجه قرار گرفته‌اند. سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای از سه بخش فوتوالکترود، الکترود مقابل و الکترولیت، که عمده‌ترین پایه زوج اکسایش-کاهش یدید/تری‌یدید می‌باشد، تشکیل شده‌اند [۲]. فوتوالکترود این سلول‌ها از یک نوع نیم‌رسانا نانوساختار (در اکثر موارد نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم) که با یک لایه رنگ جاذب نور مریی پوشیده شده، تشکیل شده است [۳]. تا به حال رنگ‌دانه‌های بر پایه فلز روتینیوم مانند رنگ‌دانه تجاری Nv_{19} بهترین کارایی را داشته‌اند [۴]، اما مهمترین مشکل این نوع رنگ‌دانه‌ها قیمت بالای آنها می‌باشد. رنگ‌دانه‌های طبیعی که از قسمت‌های مختلف گیاهان مانند گل، برگ، ساقه، میوه و حتی ریشه گیاهان به دست می‌آید، به علت ارزان بودن و منابع فراوان و کارایی نسبتاً قابل قبول به عنوان حساس‌کننده، جایگزین مناسبی برای رنگ‌دانه‌های صنعتی گران‌قیمت می‌باشند [۵]. در این تحقیق از آب میوه انار به عنوان حساس‌کننده در ساخت سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای استفاده کرده‌ایم. آب انار دارای رنگ‌دانه آنتوسیانین^۱ می‌باشد. این رنگ‌دانه جاذب نور در ناحیه مریی است و با داشتن گروه‌های OH- در ساختار خود پیوند نسبتاً خوبی با نانوذرات TiO_2 برقرار می‌کند [۶]. رنگ ترکیبات آنتوسیانین به pH محیط بستگی دارد، در محیط اسیدی قرمز، در محیط خنثی بنفش و در محیط قلیایی آبی رنگ است. آزمایش‌های متعدد نشان داده است که آنتوسیانین موجود در گیاهان مختلف کارایی متفاوتی در DSCs در نقش حساس‌کننده دارد [۵]. این رنگ‌دانه جذب نانوبلورهای دی‌اکسیدتیتانیوم شده و موجب انتقال سریع الکترون پس از برانگیخته شدن رنگ‌دانه می‌شود.

در الکترود مقابل سلول‌های خورشیدی به طور معمول از پلاتین به عنوان کاتالیزور استفاده می‌شود اما پلاتین با وجود رسانندگی بالا و خاصیت کاتالیزوری خوب، بسیار گران‌قیمت می‌باشد [۷]. در این تحقیق از مخلوط PEDOT:PSS^۲ و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان کاتالیزور در الکترود مقابل

۱. Anthocyanin

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



شکل ۱. طرح نمادین از سه فوتوالکترود لایه نشانی شده، با نانوذرات TiO_2 با اندازه های مختلف: N۱: ۲۵ نانومتر، N۲: مخلوط ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر با نسبت های مساوی، N۳: ۱۰۰ نانومتر.

۱). به منظور ساخت، فوتوالکترود خمیر دی اکسید تیتانیوم را با روش دکتر بلید، روی زیر لایه های تمیز ITO لایه نشانی 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 فوتوالکترودها به مدت ۱۵ ساعت در رنگدانه انار با PH یک قرار گرفت. نمونه ها پس از بیرون آوردن از رنگدانه به منظور حذف رنگدانه های اضافی به مدت ده دقیقه در اتانول قرار داده شد. (ب) در این بخش از مخلوط نانوذرات TiO_2 با اندازه های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر به عنوان اولین لایه، و از نانوذرات TiO_2 با اندازه های ۱۰۰ نانومتر و یا 400°C نانومتر به عنوان پراکننده گر (دومین لایه) بر روی سطح فوتوالکترود استفاده شد.

برای آماده سازی فوتوالکترود، خمیر TiO_2 مانند بخش قبل آماده شد، سپس خمیر TiO_2 که از مخلوط نانوذرات با اندازه های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر به نسبت مساوی تهیه شده، و با روش دکتر بلید بر سطح زیر لایه های ITO لایه نشانی 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 اندازه های ۱۰۰ و 400°C نانومتر که با روش قبل تهیه شده بودند با روش دکتر بلید بر روی لایه زیرین، لایه نشانی شدند و به مدت نیم ساعت در کوره در دمای 450°C درجه بازپخت داده شد (شکل ۲). پس از بازپخت، فوتوالکترودها به مدت ۱۵ ساعت در رنگدانه انار با PH یک قرار گرفتند. نمونه ها پس از بیرون آوردن از رنگدانه به منظور حذف رنگدانه های اضافی به مدت ده دقیقه در اتانول قرار داده شدند.

۴.۲. آماده سازی الکترود مقابل

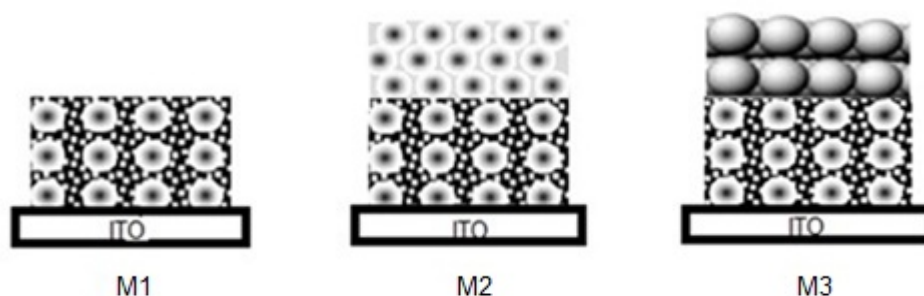
برای آماده سازی الکترود مقابل، 0.2°C گرم از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با اندازه ۱۰۰ نانومتر با 0.5°C میلی لیتر محلول PEDOT:PSS مخلوط شد و به مدت ۱۰ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار گرفت، تا محلول نسبتاً یکنواختی بدست آمد. سپس محلول بدست آمده به روش لایه نشانی چرخشی با سرعت 4500°C دور بر دقیقه و مدت زمان 60°C ثانیه روی زیر لایه های تمیز ITO لایه نشانی شد. سپس در کوره و در دمای 100°C درجه به مدت دو ساعت پخت داده شد.

۵.۲. تهیه خمیر TiO_2

برای آماده سازی خمیر دی اکسید تیتانیوم، 0.35°C گرم از پلی اتیلن گلیکول (PEG، 6000°C) در 1°C میلی لیتر اسید نیتریک با PH حدود 3.5°C حل شد. سپس 0.5°C 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 میلی لیتر اتانول به محلول اضافه شد و به مدت 30°C 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. آماده سازی فوتوالکترود

(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، فوتوالکترود استفاده شد (شکل



شکل ۲. طرح نمادین از سه فوتوالکتروکود لایه نشانی شده با نانوذرات $\text{TiO}_2/\text{M1}$ ، مخلوط ذرات ۲۵ و ۱۰۰ نانومتری TiO_2 با نسبت های مساوی (یک لایه)، $\text{M1}/\text{M2}$ به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون و TiO_2 با اندازه ۱۰۰ نانومتر به عنوان لایه پراکنده گر، $\text{M1}/\text{M3}$ به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون و TiO_2 با اندازه ۴۰۰ نانومتری به عنوان لایه پراکنده.

شرایطی اندازه گیری می شود 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 الکترون های تولید شده و باز ترکیب داخلی الکترون ها و حفره ها بستگی دارد [۱۰]. عامل گنجایش با نسبت بیشینه توان (P_{max}) تقسیم بر حاصل ضرب ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه مشخص می شود:

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

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 می شود و با چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و عامل گنجایش طبق رابطه زیر بستگی دارد [۱۱]:

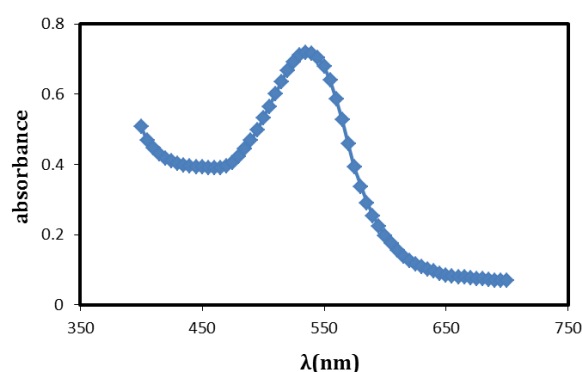
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \quad (2)$$

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

۴. نتایج و بحث

۴.۱. طیف جذب

طیف جذب رنگ دانه انار مورد استفاده به عنوان حساس کننده با استفاده از UV-Vis گرفته شد (شکل ۳). همان طور که شکل ۳ نشان می دهد این رنگ دانه دارای بیشینه جذب



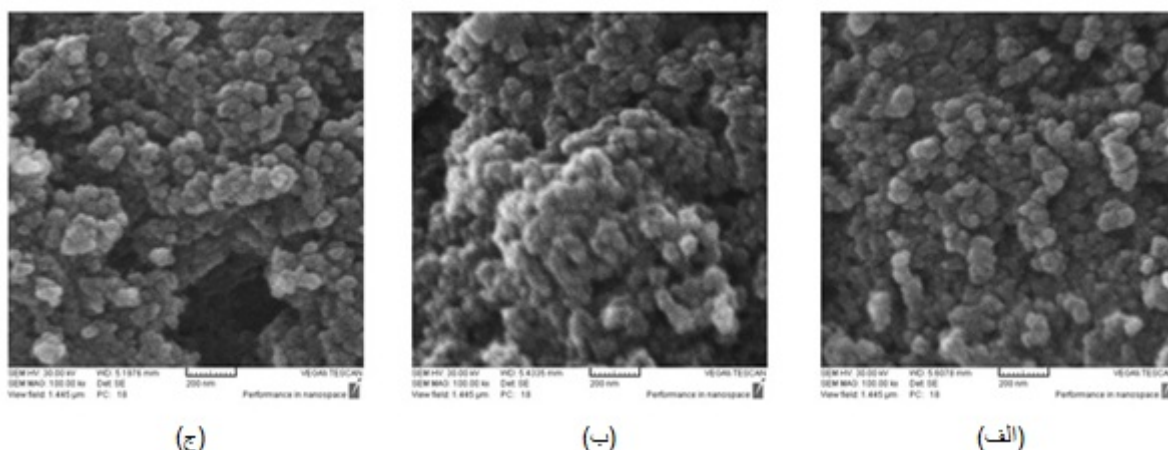
شکل ۳. طیف جذب رنگ دانه موجود در آب انار.

۷.۲. مجتمع کردن سلول

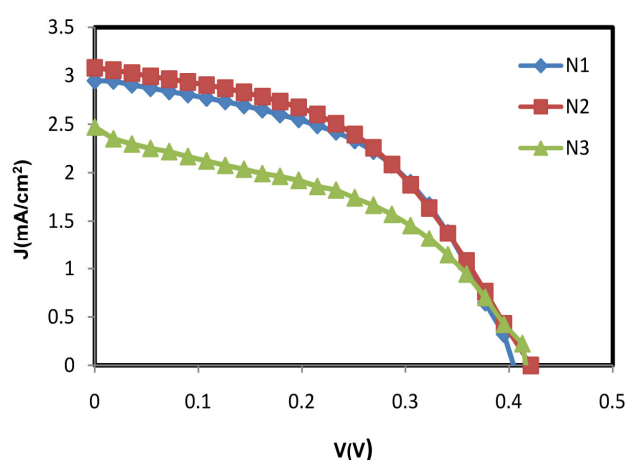
سپس فوتوالکتروکود و الکتروکود مقابل با دو گیره به هم متصل شدند و الکترولیت با کمک یک سرنگ به داخل آن تزریق شد و سلول ساخته شده با استفاده از دستگاه Keithley ۲۴۰۰ و شیبیه ساز خورشیدی 100 mW/cm^2 با 1.5 G AM مشخصه یابی شد.

۳. مشخصه یابی

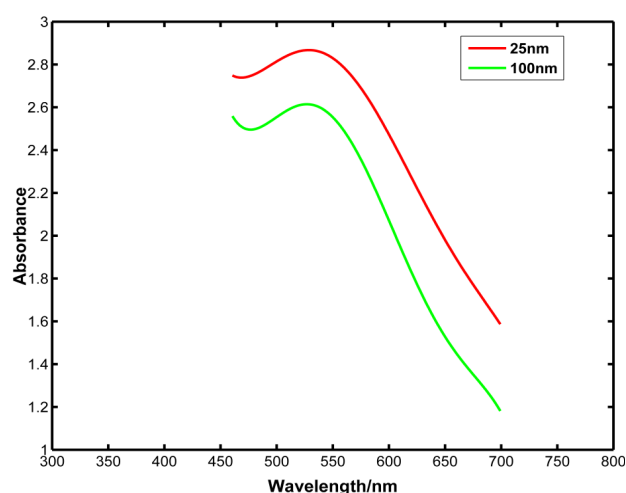
برای مقایسه کارایی سلول های ساخته شده از پارامترهای ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه، بازده و عامل گنجایش استفاده می شود. ولتاژ سلول هنگامی که جریان آن برابر صفر است را ولتاژ مدار باز می نامند. ولتاژ مدار باز را می توان تابعی از تفاوت تراز فرمی الکترون ها در لایه نانو متخلخل TiO_2 و پتانسیل اکسایش-کاهش 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 سلول های ساخته شده با نانوذرات TiO_2 با اندازه های متفاوت، (N1) ۲۵ نانومتر، (N2) مخلوط ۱۰۰ و ۲۵ نانومتر با نسبت های مساوی، (N3) ۱۰۰ نانومتر.



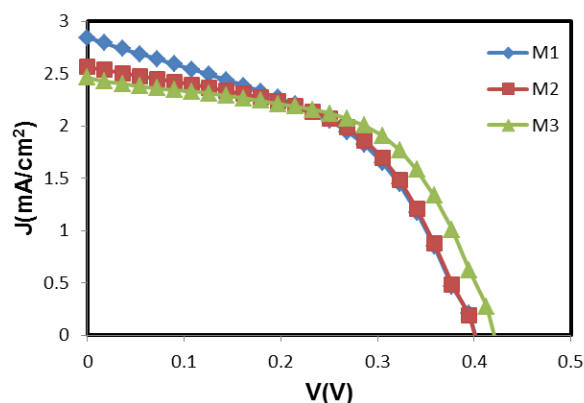
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف جذب فوتوآندهای لایه نشانی شده با نانوذرات TiO_2 با اندازه های متفاوت و حساس شده با رنگ دانه انار.

دو الکترود لایه نشانی شده با TiO_2 با اندازه های 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 نمونه های آزمایشگاهی ساخته شده نشان داده شده است. مشخصه های دیگر این نمونه ها از قبیل بازدهی، ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه و عامل گنجایش نیز اندازه گیری و محاسبه شده است، و در جدول ۱ نشان داده شده است. بدون تردید اندازه نانوذرات TiO_2 بر انتقال الکترون و همچنین باز ترکیب الکترون و حفره تأثیر دارد، بنابراین با تغییر اندازه نانوذرات، بازدهی سلول نیز تغییر می کند [۱۲]. هرچه

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

۲.۴. مشخصه جریان-ولتاژ

سه نمونه از سلول های خورشیدی با ساختار فوتو الکترود آورده شده در بند (الف) بخش ۲-۶ (N1, N2, N3) ساخته شد. تصاویر SEM گرفته شده از نانوذرات TiO_2 مورد استفاده در سلول ها در اندازه ها 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



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مشخصه جریان-ولتاژ

سلول‌های ساخته‌شده با ساختار M.

نانوذرات TiO_2 با اندازه‌های ۲۵ و ۱۰۰ نانومتر (نمونه N_2) 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 فوتوالکترود 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 فوتوالکترود 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 فوتوالکترود در این مرحله به دلیل اینکه میزان پراکندگی 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 ساخته‌شده با ساختار M_3 با استفاده از ذرات

جدول ۱. نتایج حاصل از مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته‌شده 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 فوتوالکترود بیشتر می‌شود و در نتیجه جذب سطحی رنگ‌دانه افزایش می‌یابد، که نتایج به‌دست 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 فوتوالکترود 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 فوتوالکترود 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، هرکدام دارای مزایا و معایبی می‌باشد. بنابراین برای این‌که سلول ساخته‌شده هم جذب رنگ‌دانه بهتری داشته باشد و هم این که خاصیت پراکنده‌گری 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 فوتو الکترود آورده شده در بند (ب) بخش ۲-۶ یعنی مخلوط

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_3

TiO_2 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.