

بررسی اثر روش لایه نشانی دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) بر عملکرد سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه (DSSC)

فرشته مومنی^{۱*}، مهرداد کاشفی تربتی^۲

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

*fereshteh.momeni@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۱۰)

چکیده

جزء اصلی در یک سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه (DSSC) فتوالکتروود است که شامل زیرلایه‌ی پوشیده شده با یک اکسید نیمه رسانا می‌باشد. در این تحقیق اثر دو روش لایه نشانی دکتر بلید و پوشش‌دهی چرخشی بر عملکرد و بازده DSSC مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که در روش پوشش‌دهی چرخشی، تخلخل و جذب رنگدانه کمتر از روش دکتر بلید است، اما به علت ایجاد یک پوشش کم ترک و پیوسته بازده DSSC بیشتر از روش دکتر بلید است.

واژه‌های کلیدی:

سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه، روش دکتر بلید، روش پوشش‌دهی چرخشی.

۱-مقدمه

جذب کرده‌اند [۶]. اولین DSSC در سال ۱۹۹۱ توسط گرتزل و ارگان ساخته شد [۷]. یک DSSC از یک فتوالکتروود شامل زیرلایه پوشش داده شده با اکسید نیمه رسانا با گاف انرژی زیاد و الکتروود مقابل شامل زیرلایه پوشش داده شده با یک کاتالیزگر (معمولا پلاتین) ساخته می‌شود که فضای بین دو الکتروود با الکتروولیت حاوی زوج ریداکس (معمولا زوج آیدید-تری آیدید) پر می‌گردد [۸]. اکسید نیمه رسانایی که معمولا استفاده می‌شود دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) با گاف انرژی $3.1 eV$ است که نور را در ناحیه‌ی فرابنفش جذب می‌کند اما نسبت به نور مرئی شفاف است [۹-۱۰]. بنابراین یک تک لایه از رنگدانه به

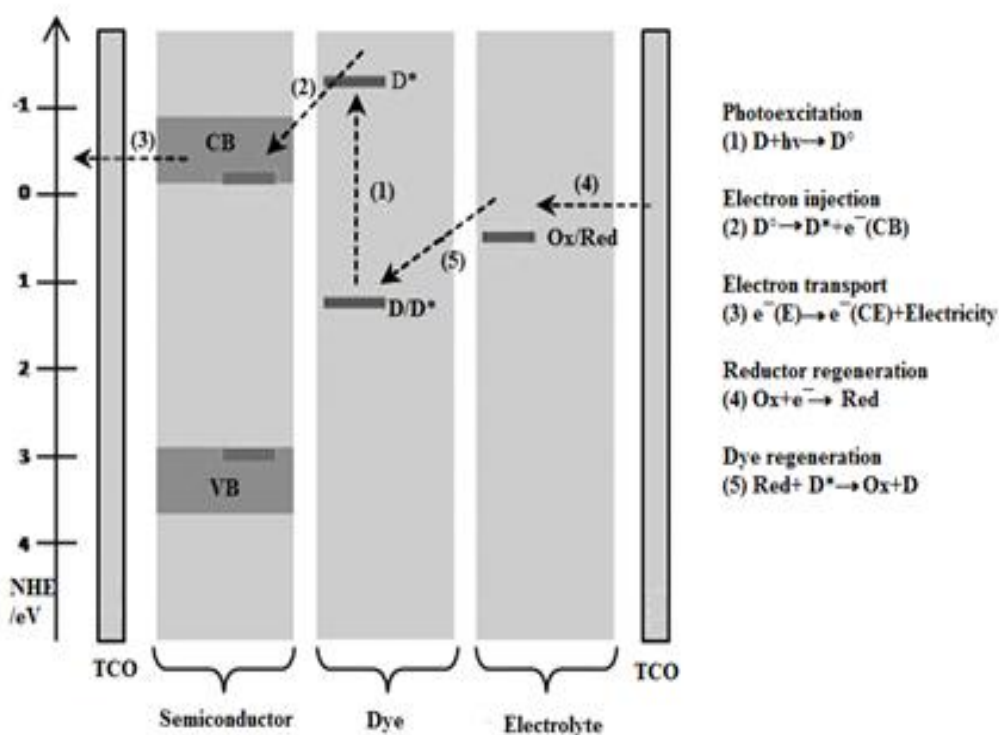
رشد جمعیت جهان و صنعتی شدن آن، نیاز به انرژی الکتریکی را روز به روز افزایش می‌دهد. محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و مشکلات مربوط به دفع زباله‌های هسته‌ای و خطرات نیروگاه‌های اتمی سبب شده‌اند تا بشر به دنبال جایگزینی برای این منابع انرژی برای تولید الکتریسیته باشد [۱-۴]. انرژی خورشید که منبع رایگان، پاک و تجدیدپذیر انرژی به شمار می‌رود، از طریق سلول‌های خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. تبدیل نور خورشید به الکتریسیته اثر فتوولتائیک نامیده می‌شود [۵]. در میان سلول‌های خورشیدی مختلف، سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه^۱ (DSSC) به خاطر بازده بالا، فرآیند ساخت آسان و هزینه‌ی تولید کم توجه زیادی را به خود

DSSC دارد [۱۴]. برای به دست آوردن بازده بالا در DSSC لازم است لایه‌ی دی‌اکسید تیتانیوم مساحت سطح بالایی داشته باشد، یعنی میزان تخلخل‌های آن زیاد باشد، زیرا سبب جذب بیشتر مولکول‌های رنگدانه و به تبع آن افزایش نور برداشت می‌شود [۱۵]. علاوه بر این اتصال خوب بین نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و چسبندگی خوب آن‌ها به زیرلایه، به منظور کاهش باز ترکیب الکترون‌های تولید شده توسط نور با تری‌آیدید موجود در الکترولیت و اطمینان از هدایت الکتریکی خوب ضروری است [۱۶]. بنابراین روش لایه نشانی خمیر دی‌اکسید تیتانیوم به علت تاثیرگذاری بر میزان تخلخل‌ها و همچنین اتصال نانوذرات به زیرلایه، اثر زیادی بر بازده DSSC دارد. در این تحقیق دو روش لایه نشانی دکتر بلید و پوشش‌دهی چرخشی به منظور بررسی تاثیرگذاری هر یک بر بازده DSSC با هم مقایسه شدند.

سطح نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم متصل می‌شود که می‌تواند نور را در ناحیه‌ی مرئی جذب کند. وقتی نور خورشید به DSSC می‌تابد رنگدانه اکسید شده و یک الکترون به نوار رسانش اکسید نیمه رسانا تزریق می‌کند. رنگدانه‌ی اکسید شده توسط یون‌های آیدید (I^-) احیا می‌شود. تری آیدید (I_3^-) حاصل از اکسید شدن آیدید نیز در الکتروود مقابل پلاتینی احیا می‌شود [۱۱]. شکل (۱) دیاگرام انرژی و واکنش‌های یک DSSC را نشان می‌دهد [۱۲]. بازده یک DSSC با استفاده از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید [۱۳]:

$$\eta = J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF / P_{in} \quad (1)$$

در رابطه‌ی قبل، J_{sc} ، V_{oc} ، FF و P_{in} به ترتیب چگالی جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز، فاکتور پرشدگی و توان ورودی هستند. طبیعت و مورفولوژی لایه‌ی TiO_2 تاثیر زیادی بر بازده

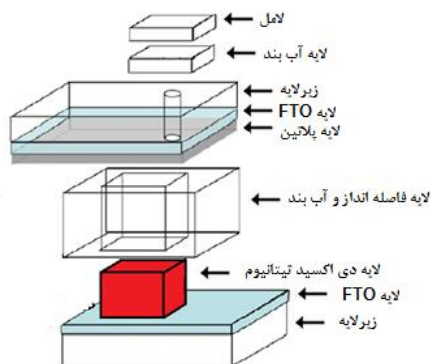


شکل (۱): دیاگرام انرژی و واکنش‌ها در یک DSSC

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

برای ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه از زیرلایه با پوشش اکسید هادی شفاف از نوع FTO با ابعاد ۱/۵×۱/۵ cm (TEC-15, Dyesol)، رنگدانه‌ی کمپلکس روتینیوم ۵۳۵ (N719) (solaronix)، الکترولیت استاندارد بر پایه ید، پودر دی اکسید تیتانیوم P25 (Aerosil, Japan)، ترایتون X-100، (aplichem) به منظور پراکنده کردن نانوذرات TiO₂ در خمیر، استیل استون (Merck) به منظور نگه داشتن نانوذرات TiO₂ در حالت کلوئیدی، اتانول (Merck)، تتراکلرید تیتانیوم (Hopkin & Williams) و هیدروکسید سدیم استفاده شد.



شکل (۲): اجزای DSSC و ترتیب قرار گرفتن آنها

۲-۳- روش‌های مشخصه‌یابی سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه

ضخامت لایه‌ی دی اکسید تیتانیوم توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات (CMM, baces 3D) اندازه‌گیری شد. طیف جذب فرابنفش- مرئی توسط دستگاه طیف‌سنج فرابنفش- مرئی (agilent8453) به دست آمد. واجدبی رنگدانه‌ی جذب شده به وسیله‌ی فتوالکترودها به مدت ۲ ساعت در محلول ۰/۱ مولار هیدروکسید سدیم در مخلوط آب و اتانول (با نسبت مساوی) صورت پذیرفت. مشخصات جریان- ولتاژ تحت تابش استاندارد (AM1.5) با استفاده از پتانسیواستات (palmSens) اندازه‌گیری شد. مورفولوژی لایه‌ی دی اکسید تیتانیوم نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (LEO 1450VP (35 KV)) بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

روش لایه نشانی TiO₂ اثرات زیادی بر ویژگی‌های لایه‌ی ایجاد شده و در نتیجه بازده سلول خورشیدی رنگدانه‌ای دارد. برای بررسی اثر روش ساخت لایه TiO₂ روی بازده DSSC، از روش پوشش‌دهی چرخشی و دکتر بلید برای ایجاد لایه‌های با ضخامت مساوی استفاده شد. سپس دو روش از لحاظ ریزساختار، مقدار جذب رنگدانه و بازده سلول مبتنی بر هر کدام مقایسه شدند. مشخصات هر کدام از این دو نمونه در جدول (۱) آمده است.

۲-۲- ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه

برای تهیه خمیر TiO₂، ۲ گرم پودر P25 با ۸ میلی‌لیتر اتانول، ۰/۸ میلی‌لیتر استیل استون و ۰/۱ میلی‌لیتر ترایتون X-100 به مدت ۴۸ ساعت توسط همزن مغناطیسی مخلوط شد [۱۷]. دو فتوالکترودها با روش دکتر بلید [۱۸] و پوشش‌دهی چرخشی (۲۴ ثانیه - ۱۷۰۰ rpm - Modern technology Development - S.C.S.86)) تهیه و سپس در دمای ۴۵۰°C تف‌جوشی شدند. مساحت لایه‌ی دی اکسید تیتانیوم در تمام فتوالکترودها، ۰/۲۵ سانتیمتر مربع بود. فتوالکترودهای سرد شده در کوره مجدداً تا دمای ۷۰°C گرم شدند و به مدت ۲۰ ساعت در محلول رنگدانه قرار گرفتند. برای ساخت الکترودها مقابل با پوشش پلاتینی، یک قطره محلول ۵ میلی مولار H₂PtCl₆ روی زیرلایه‌ی هادی با دو سوراخ به منظور تزریق الکترولیت، لایه نشانی و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۶۰°C تف‌جوشی شد. فتوالکترودها و الکترودها مقابل توسط یک لایه چسب دو طرفه به هم متصل شدند. الکترولیت از طریق سوراخ‌های موجود در الکترودها مقابل به فضای بین دو الکترودها تزریق شد. سپس سوراخ‌ها توسط یک تکه چسب دو طرفه و لامل بسته شدند تا از خروج و تبخیر الکترولیت جلوگیری شود. ترتیب و نحوه‌ی قرار گرفتن اجزای DSSC در شکل (۲) نشان داده شده است.

مساحت سطح ویژه و میزان تخلخل افزایش می‌یابد [۲۰]. بنابراین با توجه به مساوی بودن ضخامت و مساحت لایه‌ی TiO_2 در هر دو روش می‌توان نتیجه گرفت در نمونه‌ی D.B.Et میزان تخلخل و حفرات بیشتر است. در پوشش‌دهی چرخشی، خمیر به صورت فشرده روی زیرلایه پخش می‌شود. تبخیر حلال در خلال چرخش با سرعت زیاد، سبب کاهش میزان تخلخل می‌شود. شکل (۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از سطح دو نمونه را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴-الف) می‌توان دید نمونه‌ی ساخته شده به روش دکتر بلید در بزرگنمایی $1000\times$ دارای ترک‌های فراوان، عمیق و طویل است. اما برخلاف آن در نمونه‌ی ساخته شده به روش پوشش‌دهی چرخشی در همین بزرگنمایی (شکل (۴-ب)) ترک‌ها بسیار کمتر هستند. عمق و طول این ترک‌ها هم نسبت به ترک‌های موجود در لایه‌ی TiO_2 ساخته شده با روش دکتر بلید کمتر است.

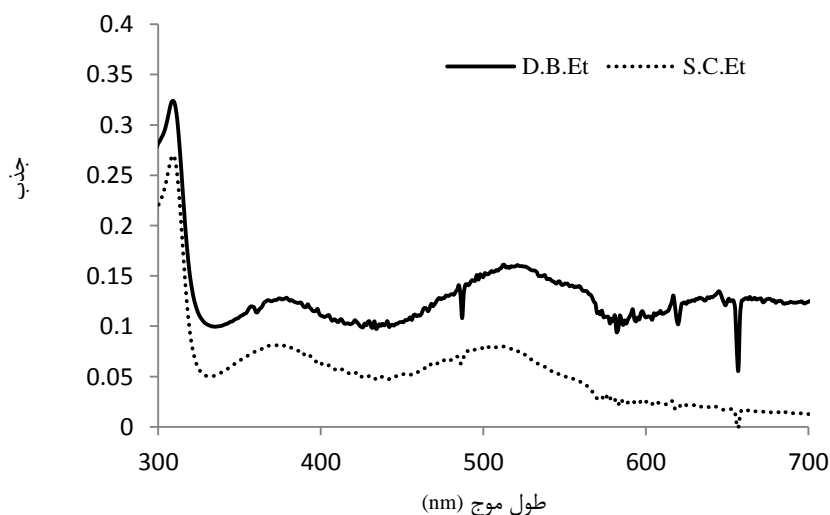
جدول (۱): مشخصات نمونه‌های تهیه شده به روش دکتر بلید و پوشش‌دهی

چرخشی			
نام نمونه	روش لایه نشانی	ضخامت	دمای تف‌جوشی
D.B.Et	دکتر بلید	$11 \pm 1 \mu m$	$450^\circ C$
S.C.Et	پوشش‌دهی چرخشی	$11 \pm 1 \mu m$	$450^\circ C$

شکل (۳) طیف جذب دو نمونه را نشان می‌دهد. برای تعیین مقدار رنگدانه‌ی جذب شده از قانون بی‌یر-لمبرت استفاده شد [۱۹]. این قانون حالتی را بیان می‌کند که غلظت ماده در محلول متناسب با جذب است:

$$\text{جذب} = \text{طول سلول} \times \text{غلظت} \times \text{ضریب استهلاک نور}$$

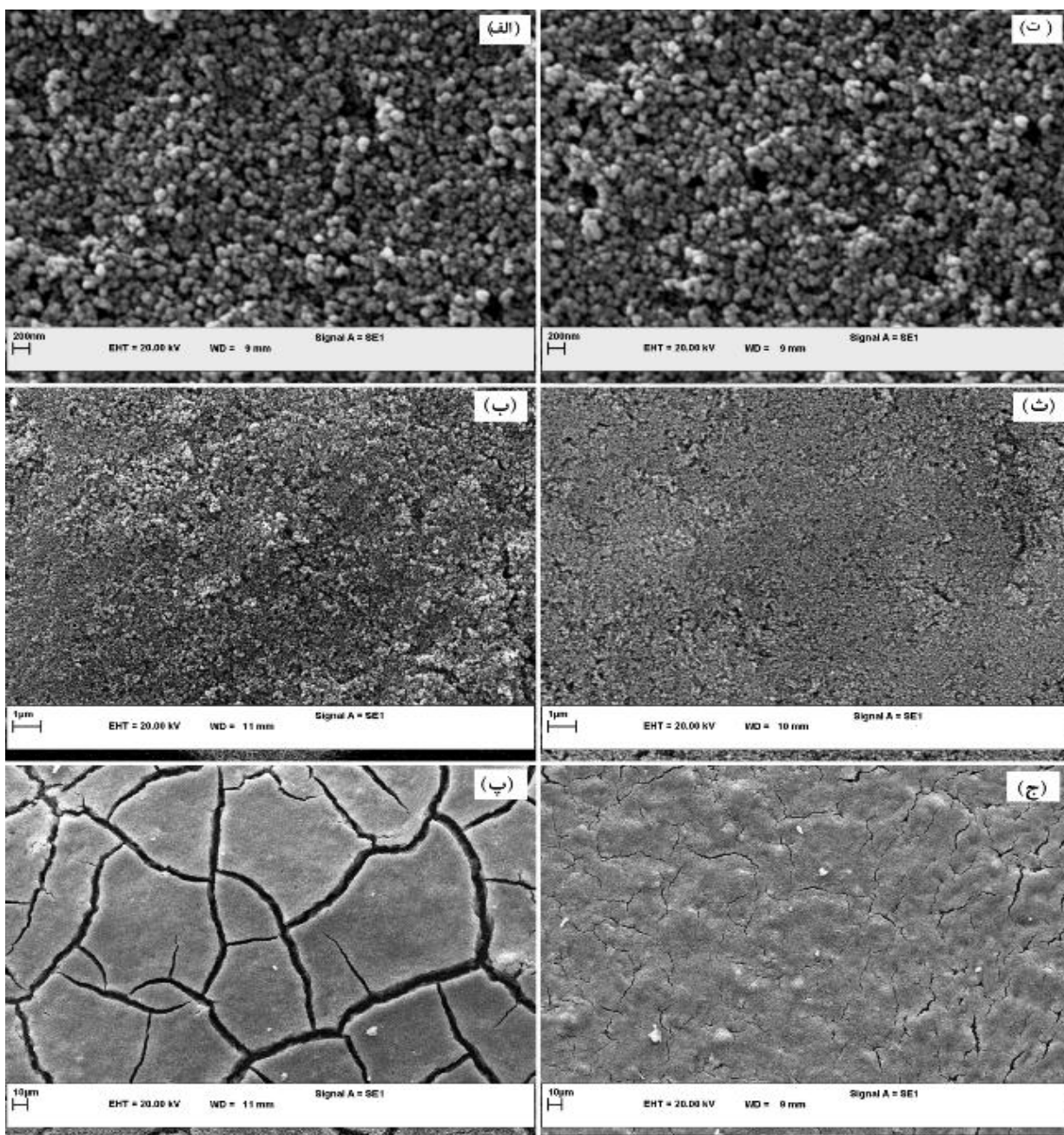
مقدار رنگدانه‌ی جذب شده توسط هر نمونه در جدول (۲) آمده است. می‌توان دید مقدار رنگدانه‌ی جذب شده توسط نمونه‌ی D.B.Et ($16/9 \times 10^{-8}$ مول بر سانتیمتر مربع) دو برابر مقدار رنگدانه‌ی جذب شده توسط نمونه‌ی S.C.Et ($8/45 \times 10^{-8}$ مول بر سانتیمتر مربع) است. مقدار رنگدانه‌ی جذب شده با افزایش



شکل (۳): طیف جذب فرابنفش- مرئی نمونه‌های D.B.Et و S.C.Et

جدول (۲): مقدار رنگدانه‌ی جذب شده توسط نمونه‌های D.B.Et و S.C.Et

مقدار رنگدانه جذب شده (مول بر سانتیمتر مربع)	جذب در طول موج ۵۱۲nm	نام نمونه
$۱۶/۹ \times ۱۰^{-۸}$	۰/۱۶۰۸۷۹	D.B.Et
$۸/۴۵ \times ۱۰^{-۸}$	۰/۰۸۰۲	S.C.Et



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از الف، ب و پ نمونه‌های ساخته شده با روش دکترا بیلد و ت، ث و ج نمونه‌های ساخته شده به روش پوشش دهی چرخشی در بزرگنمایی‌های مختلف

مقدار ولتاژ مدار باز نیز در نمونه‌ی S.C.Et (۰/۷۱ V) نسبت به نمونه‌ی D.B.Et (۰/۷۵ V)، ۰/۴ ولت بیشتر است. این امر می‌تواند با توجه ساختار دو لایه‌ی ایجاد شده با دو روش مختلف توجیه شود. در لایه‌ی ایجاد شده به روش دکتر بلید ترک‌های فراوان و عمیق می‌توانند سبب افزایش مکان‌های باز ترکیب بار شوند که ولتاژ مدار باز را کاهش می‌دهد [۲۳].

برای به دست آوردن فاکتور پرشدگی زیاد، مقاومت سری باید تا اندازه‌ی ممکن کوچک و مقاومت شنت در حد ممکن بزرگ باشد [۲۴]. مقاومت شنت به صورت شیب منحنی جریان-ولتاژ در نقطه‌ی جریان مدار کوتاه و مقاومت سری به صورت عکس شیب منحنی در نقطه‌ی ولتاژ مدار باز تعریف می‌شوند. مقدار فاکتور پرشدگی در نمونه‌ی D.B.Et نسبت به S.C.Et، به علت کمتر بودن مقاومت سری ۰/۴ بیشتر است.

جدول (۳): مشخصات فتوولتائیک نمونه‌های S.C.Et و D.B.Et.

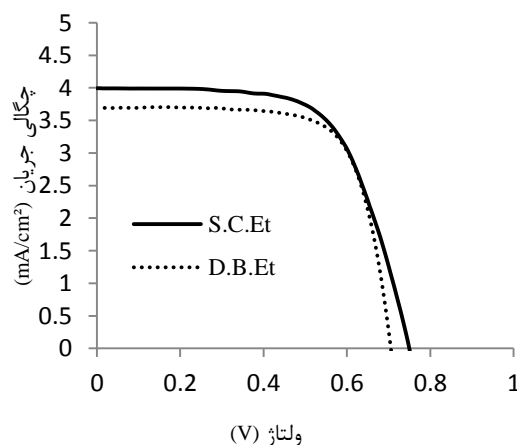
نام نمونه	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
D.B.Et	۳/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۲	۱/۸۸
S.C.Et	۳/۹۹	۰/۷۵	۰/۶۸	۲/۰۳

بازده سلول خورشیدی مبتنی بر فتوالکتروکود ساخته شده با روش S.C.Et که نسبت مستقیم با حاصلضرب چگالی جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز و فاکتور پرشدگی دارد [۱۳]، در نمونه‌ی S.C.Et نسبت به نمونه‌ی D.B.Et، ۰/۱۵ درصد بیشتر است.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی اثر روش لایه‌نشانی TiO_2 بر عملکرد سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه نشان می‌دهد در روش پوشش‌دهی چرخشی به علت فشرده‌تر بودن پوشش، میزان تخلخل و جذب رنگدانه کمتر است، اما به وجود آمدن پوشش کم ترک و کاهش بازترکیب بار در این روش نسبت به روش دکتر بلید، سبب افزایش چگالی جریان مدار کوتاه و بازده بیشتر می‌شود.

منحنی‌های جریان-ولتاژ مربوط به دو روش لایه‌نشانی مختلف در شکل (۵) و مقادیر آن‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس این منحنی‌ها، مقدار چگالی جریان مدار کوتاه نمونه‌ی S.C.Et، ۰/۳ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع بیشتر از نمونه‌ی D.B.Et است. همانطور که قبلاً هم ذکر شد یکی از عوامل موثر بر جریان مدار کوتاه مقدار رنگدانه‌ی جذب شده توسط لایه‌ی TiO_2 است. اما بر اساس شکل (۳) می‌توان دید که مقدار رنگدانه‌ی جذب شده توسط نمونه‌ی D.B.Et بیشتر از نمونه‌ی S.C.Et است. بنابراین انتظار می‌رود چگالی جریان مدار کوتاه آن هم بیشتر باشد، در حالیکه نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصات جریان-ولتاژ خلاف این موضوع را نشان می‌دهد. در اینجا باید تاثیر ساختار لایه‌ی TiO_2 را هم در نظر گرفت. در شکل (۴) به وضوح می‌توان دید که لایه‌ی TiO_2 ساخته شده با روش دکتر بلید دارای ترک‌های فراوان و عمیق است. اما برخلاف آن لایه‌ی ساخته شده با روش پوشش دهی چرخشی ترک‌های کمتر و کم عمق‌تری دارد. وجود ترک‌های عمیق، طولیل و فراوان می‌تواند سبب تماس بیشتر الکترولیت و زیرلایه‌ی FTO و احیای یون‌های تری‌آیدید موجود در آن به وسیله‌ی الکترون‌های تزریق شده به FTO شود [۲۱]. علاوه بر این وجود ترک‌های عمیق و طولانی می‌تواند از انتقال الکترون‌ها در لایه‌ی TiO_2 جلوگیری کند [۲۲].



شکل (۵): منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌های S.C.Et و D.B.Et.

formulation paste and their photovoltaic performance”, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2654–2664, 2012.

- [10] M. Grätzel & A. J. McEvoy, “Principles and Applications of Dye Sensitized Nanocrystalline Solar Cells (DSC)”, Laboratory for Photonics and Interfaces, ICMB-FSB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland, *Asian J. Energy Environ.*, Vol. 5, Issue 3, pp. 197-210, 2004.
- [11] M. Grätzel, “Photovoltaic performance and long-term stability of dye-sensitized mesoscopic solar cells”, *C. R. Chimie*, Vol. 9, pp. 578–583, 2006.
- [12] L. Moreira Gon, V. Bermudez, H. A. Ribeiroa & A. M. Mendes, “Dye-sensitized solar cells: A safe bet for the future”, *Energy Environ. Sci.*, Vol. 1, pp. 655–667, 2008.
- [13] Zh. Wei, “Fabrication of Dye-Sensitized Solar Cells with Enhanced Energy Conversion Efficiency”, Ph.D. Thesis, National university of Singapore, 2011.
- [14] K. J. Hwang, S. J. Yoo, S. H. Jung, D. W. Park, S. Kim & J. W. Lee, “Synthesis and Characterization of Nanostructured Titania Films for Dye-Sensitized Solar Cells”, *Bull. Korean Chem. Soc.*, Vol. 30, No. 1, pp. 172-176, 2009.
- [15] G. J. Yang, C. J. Li, S. Q. Fan & J. C. Gao, “Influence of pore structure on ion diffusion property in porous TiO₂ Coating and photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 3205–3210, 2011.
- [16] H. Chang, H. T. Su, W. A. Chen, K. D. Huang, S. H. Chien, S. L. Chen & C. C. Chen, “Fabrication of multilayer TiO₂ thin films for dye-sensitized solar cells with high conversion efficiency by electrophoresis deposition”, *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 130–136, 2010.
- [17] C. S. Chou, F. C. Chou, Y. G. Ding & P. Wu, “The effect of ZnO-coating on the performance of a dye-sensitized solar cell”, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 1435–1442, 2012.
- [18] C. Lun Yu, “Titanium Dioxide Thick Film Printing Paste For Dye Sensitized Solar Cell”, Case Western Reserve University, 2011.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری پژوهشکده‌ی هوا- خورشید دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر در اختیار گذاشتن بخشی از امکاناتشان تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

- [1] D. I. Klaus Petritsch, “Organic Solar Cell Architectures”, Ph. D. Thesis University of Cambridge, United Kingdom, 2000.
- [2] Z. Yu, “Liquid Redox Electrolytes for Dye-Sensitized Solar Cells”, Ph.D. Thesis, KTH Chemical Science and Engineering, Royal Institute of Technology Stockholm, 2012.
- [3] J. Minutillo, B. Lundgren, J. Lane & J. Widera, “Development of TiO₂ Nanoparticle-Based Solar Cells”, Adelphi University, Garden City, 2007.
- [4] M. SOKOLSKÝ & J. CIRÁK, “Dye-Sensitized Solar Cells: Materials and Processes”, *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 10, No. 3, pp. 78–81, 2010.
- [5] S. Wenger, “Strategies to Optimizing Dye-Sensitized Solar Cells: Organic Sensitizers, Tandem Device Structures and Numerical Device Modeling”, Ph. D. Thesis University of Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Suisse, 2010.
- [6] S. Ito, T. Murakami, P. Comte, P. Liska, C. Grätzel, M. Nazeeruddin & M. Grätzel, “Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%”, *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp. 4613–4619, 2007.
- [7] B. O’Regan & M. Grätzel, “A low-cost, highefficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films”, *Nature*, Vol. 353, pp. 737–740, 1991.
- [8] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide & L. Han, “Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 25, pp. L638–L640, 2006.
- [9] M. R. Mohammadi, R. R. M. Louca, D. J. Fray & M. E. Welland, “Dye-sensitized solar cells based on a single layer deposition of TiO₂ from a new

- overall performance of dye-sensitized solar cells”, *Electrochimica Acta*, Vol. 59, pp. 75- 80, 2012.
- [23] S. Ito, T. N. Murakami, P. Comte, P. Liska, C. Grätzel, M. K. Nazeeruddin & M. Grätzel, “Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%”, *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp. 4613-4619, 2008.
- [24] Ch. Noumissing Sao, “Dye-Sensitized Solar Cells Based on Perylene Derivatives”, Ph.D. Thesis, Kassel University, 2009.
- [19] S. Agarwala, “Nano structured Metal-Oxide Materials for Dye-Sensitized Solar Cells”, Ph.D. Thesis, National university of Singapore, 2011.
- [20] A. El. Tayya, “Dye-sensitized solar cell: parameters calculation and model integration”, *Journal of Electron Devices*, Vol. 11, pp. 616-624, 2011.
- [21] A. Tolvanen, “Characterization and Manufacturing Techniques of Dye-Sensitized Solar Cells”, Master’s Thesis, Helsinki University of Technology, 2003.
- [22] J. Wan, Y. Lei, Y. Zhang, Y. Leng & J. Liu , “Study on TiO₂ photoelectrode to improve the

۶- پی نوشت

-
- [1] Dye-sensitized solar cells