



Investigation of the Utilization of ZrO₂/WO₂NR Nanocomposite on the Performance of Dye-sensitized Solar Cells Based on Semi-solid State Electrolyte of Cesium Tin Iodide (III)

Mahsa Mahdavinia¹, Gholamreza Kiani^{2*}, Ayub Karimzad Ghavidel³

¹PhD Student, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

²Associate Professor, Department of Organic and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

³Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 02.20.2022

Revised: 05.05.2022

Accepted: 06.07.2022

Keyword:

Dye-sensitized Solar Cell
Semi-solid Electrolyte
Zirconium Oxide/Tungsten
Nanorods Nanocomposite
Henna
Cesium Tin Iodide

*Corresponding Author:

Gholamreza Kiani

Email: g.kiani@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

The aim of this research was to design and fabricate a natural dye-sensitized solar cell using a semi-solid electrolyte and substituting a platinum electrode with Zirconium oxide/Tungsten oxide nanorods (ZrO₂/WO₂NR) nanocomposite for reducing costs. To prepare the semi-solid electrolyte, a combination of three substances, cesium iodide (CsI), tin iodide (SnI) and tin fluoride (SnF₂), were used. The result of this compound was cesium tin iodide (CsSnI_{3-x}F_x), which due to the high mobility of the cavity equal to 585 cm²V⁻¹S⁻¹ and the ability to dissolve in organic solvents, can be a good alternative to liquid electrolyte replacement. The photoanode structure was examined by scanning electron microscopy. The effect of black and simple henna was investigated by UV-visible spectroscopy to select the dye. The counter electrode was fabricated by ZrO₂/WO₂NR nanocomposite by micro-spray method. The results showed that natural henna dye offered better performance with the peak absorption at 665 nm. The utilization of ZrO₂/WO₂NR nanocomposite in addition to good catalytic properties showed a voltammetric cycle similar to platinum, which resulted in longer life and stabilization of output power over time. The performance evaluation of the fabricated sample indicated the open circuit voltage of 0.17 V, the short circuit current of 4.08 mA and the efficiency of 0.95%, which was 2 times higher than in comparison with liquid electrolyte-based cells.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Nowadays, human societies are coping with two main problems: the limited resources of fossil fuels and the environmental pollution caused by the consumption of these fuels. Therefore, to reduce the environmental consequences, the need to use renewable energy sources such as solar energy is felt more than in the past. Among the different generations of available solar cells, the dye-sensitized type has attracted much attention due to its advantages such as low manufacturing cost, flexibility, lightweight, non-toxicity, and need for low light. However, the existence of liquid iodide/tri-iodide compound as an electrolyte in the structure of these cells is accounted for their major disadvantages, because the leakage of liquid electrolyte, its corrosive nature, and poor stability threatens the cell health. These problems make the commercialization of the technology of dye-sensitized solar cells based on liquid electrolytes difficult. To this end, non-corrosive and non-volatile semi-solid electrolytes is introduced to compensate for these defects and can be considered as an appropriate substitute for liquid electrolytes. The main objectives of this research were improving solar cell efficiency and reducing manufacturing costs. Investigation of the effect of using cesium tin iodide (CsSnI₃) as a semi-solid electrolyte in a dye-sensitized solar cell and the application of a nanocomposite based on tungsten dioxide/zirconium oxide nanorods instead of a platinum opposite electrode are the principal innovations of this work.

Methodology

After preparing ITO conductive glass as a substrate, to synthesize high pure anatase titanium dioxide nanoparticles and fabricate a photoanode, first titanium powder (containing a combination of 30% rutile phase and 70% anatase phase) was poured into sodium hydroxide solution in two steps. Then, it was homogenized by a magnetic stirrer, and heated at 130 °C for 20 hours in an autoclave. The obtained suspension pH was adjusted to equal 1.5 by adding HNO₃. The materials were heated again at 240 °C for 12 hours in an autoclave to get the active titanium anatase structure. The obtained solution was filtered and dried, and then 0.5 g of the synthesized powder was made into a paste by Triton X-100 and polyethylene glycol in acetic acid. The deposition of TiO₂ nanoparticles on the photoanode was performed by the doctor blade coating method. Finally, the coated electrode was slowly heated for annealing under airflow in three steps at 150 °C for 15 minutes, 320 °C for 10 minutes, and 500 °C for 30 minutes to remove the polymer gradually from the structure, and maintain the pure titanium anatase nanoparticles. The dyes were prepared from two samples of ordinary henna and black henna by the Soxhlet extraction method. To sensitize, the photoanode was placed within the dye solution for 18 hours. In the preparation of CsSnI₃-xFx electrolyte, first, cesium iodide, tin iodide, and tin fluoride were mixed and heated in a vacuum chamber at 450 °C for 30 minutes. Then, the remaining powder was dissolved in acetonitrile. To dope, 5% wt.% of tin fluid doping agent was dissolved in the same solvent so that the electrolyte in the solution phase was ready to be injected into the cell. After injection, the cell was dried at room temperature under the

nitrogen gas flow. To fabricate the catalyst composition for coating the opposite electrode, the obtained tungsten oxide nanorod powder with zirconium oxide was dispersed in ethanol. The resulting mixture was milled for 4 hours by the metal balls. After the sonication of suspension for 30 minutes, a viscous composition was obtained, and sprayed on the glass substrate by a micro-spray, then dried at 500 °C for 30 minutes under the blowing of nitrogen gas. Finally, the two active layers of photo-anode and opposite electrodes were assembled, and the electrolyte was injected within the structure.

Results and discussion

Figure 1 shows the current-voltage curve for the fabricated solar cell. Some of the important measured characteristics of the solar cell were also tabulated in Table. 1. As Table 1 indicates, the sensitized solar cell with the ordinary henna presents an open circuit voltage of 0.17 V, short circuit current of 4.08 mA, and efficiency of 0.95%, which are acceptable results. High activity of holes in electrolyte led to a larger short circuit current. Surface functionalization of the semi-solid-state electrolyte of cesium tin iodide (III) by a mineral dopant such as tin difluoride and tin iodide also improved the short circuit current and the efficiency.

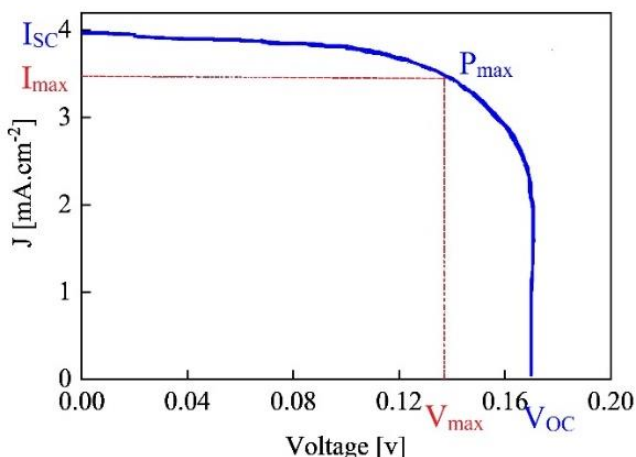


Figure 1. The current-voltage curve of the sensitized solar cell with ordinary henna based on the semi-solid-state electrolyte and opposite electrode of ZrO_2/WO_2 .

Table 1. The characteristics of fabricated solar cell.

Sample	Dye	Electrolyte	Open-circuit voltage (v)	Maximum voltage (v)	Short circuit current (mA)	Maximum current intensity (mA)	Fill Factor	Efficiency (%)
Dye sensitized solar cell	Henna	Cesium Tin Iodide (III)	0.17	0.14	4.08	3.4	68	0.95

Conclusion

In the current research, the characteristics of the inorganic semi-solid electrolyte of tin cesium triiodide in the performance of dye-sensitized solar cells were studied. The effect of using zirconium oxide nanocomposite/tungsten oxide nanorods as opposite electrodes was also investigated. The evaluations showed that using semi-solid electrolytes was appropriate to solve the problem of leakage and weak stability of liquid electrolytes. Comparing the results of this research with other research in this field reveals that application of ordinary henna along with the semi-solid electrolyte of cesium tin triiodide improves the energy conversion efficiency compared to the liquid iodide/triiodide electrolyte. However, using dye along with semi-solid electrolytes causes a severe drop in efficiency. Therefore, it is recommended to utilize the organic dyes in solar cells based on semi-solid electrolytes. The use of zirconium oxide nanocomposite/tungsten oxide nanorods instead of expensive metals such as platinum in the opposite electrode in addition to reducing manufacturing costs, showed an acceptable performance. Finally, sensitizing the solar cell with ordinary henna and using tin cesium tri-iodide semi-solid electrolyte indicated the open-circuit voltage of 0.17 V, short circuit current of 4.08 mA and resulted in an improvement in the efficiency by up to 0.95%.

بررسی تأثیر استفاده از نانوکامپوزیت اکسید زیر کونیوم/نانومیله‌های اکسید تنگستن به عنوان الکتروود مقابل بر عملکرد سلول خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه طبیعی مبتنی بر الکتروولیت حالت نیمه جامد

مهسا مهدوی نیا^۱، غلامرضا کیانی^{۲*}، ایوب کریم‌زاد قویدل^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- ۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه طبیعی، با به‌کارگیری الکتروولیت نیمه‌جامد و جایگزینی الکتروود مقابل پلاتینیومی با نانوکامپوزیت اکسید زیر کونیوم/نانومیله‌های اکسید تنگستن جهت کاهش هزینه‌ها است. برای تهیه الکتروولیت نیمه‌جامد، ترکیبی از سه ماده یدید سزیم، یدید قلع و دی‌فلورید قلع استفاده شد. نتیجه این ترکیب، تری‌یدید قلع سزیم ($\text{CsSnI}_3 \cdot x\text{F}_x$) بوده که به دلیل تحرک بالای حفره برابر با $585 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$ و قابلیت حل شدن در حلال‌های آلی، می‌تواند گزینه مناسبی برای جایگزینی الکتروولیت مایع در نظر گرفته شود. ساختار فوتوآند توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی اثر دو حنای سیاه و ساده توسط طیف‌نگاری مرئی-ماوراء بنفش جهت انتخاب رنگ‌دانه طبیعی انجام شد. الکتروود مقابل نیز با لایه‌نشانی نانوکامپوزیت اکسید زیر کونیوم/نانومیله‌های اکسید تنگستن با روش میکرواسپری ساخته شد. نتایج نشان داد رنگ‌دانه طبیعی حنا با بیشینه جذب 665 nm عملکرد بهتری را عرضه می‌نماید. همچنین استفاده از نانوکامپوزیت اکسید زیر کونیوم/نانومیله‌های اکسید تنگستن علاوه بر خاصیت کاتالیزوری خوب، چرخه ولتاژتری مشابه با پلاتین را از خود نشان دادند که پیامد آن طول عمر بیشتر و ثبوت توان خروجی در طول زمان است. ارزیابی کارایی نمونه سلول خورشیدی ساخته شده، ولتاژ مدار باز 0.17 V ، جریان اتصال کوتاه 4.08 میلی‌آمپر و راندمان 0.95% را از خود نشان داد که این راندمان در مقایسه با سلول‌هایی بر پایه الکتروولیت مایع 2 برابر است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

کلید واژگان:

سلول خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه الکتروولیت نیمه‌جامد
نانوکامپوزیت اکسید زیر کونیوم/نانومیله‌های اکسید تنگستن
حنا
تری‌یدید قلع سزیم

*نویسنده مسئول: غلامرضا کیانی

پست الکترونیکی:

g.kiani@tabrizu.ac.ir

مقدمه

امروزه جوامع بشری با دو مشکل اساسی محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها روبه‌رو است [۱؛ ۲]. جایگزین نمودن سوخت‌های هسته‌ای به دلیل هزینه بالای راه‌اندازی، پسماندهای خطرناک و تصاعد تابش‌های زیان‌بار قادر نیست مشکل چندانی را در این زمینه حل کند [۳]. در این بین، انرژی خورشیدی می‌تواند به عنوان یک انرژی پاک، تجدیدپذیر و در دسترس، این مشکلات را حل نماید [۴؛ ۵]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای تبدیل انرژی خورشیدی به الکتروسیسته صورت گرفته است [۶؛ ۷]. در این بین، سلول‌های خورشیدی، به عنوان سیستم‌های فتوولتائیک^۱، به منظور تبدیل نور به الکتروسیسته مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. در بین نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی موجود، نوع حساس‌شده با رنگ‌دانه، به دلیل دارا بودن مزایایی همچون هزینه ساخت کم، انعطاف‌پذیری، روش ساخت آسان، وزن سبک، عدم سمیت و کارکرد در شرایط نور ضعیف، به عنوان نسل سوم سلول‌های خورشیدی، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹؛ ۱۰].

علی‌رغم مزایای ذکر شده، سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای دارای معایبی نیز می‌باشند که عمده‌ترین آنها وجود ترکیبات مایع پدید/تری‌پدید است که به دلیل لزوم فرایند اکسایش/کاهش، به عنوان الکترولیت در ساختار این نوع از سلول‌ها به کار می‌روند [۱۱]. زوج اکسایش-کاهنده پدید/تری‌پدید به دلیل مسائلی همچون نشت الکترولیت مایع، ماهیت خورنده آن و پایداری ضعیف، روند تجاری‌سازی فناوری سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ‌دانه مبتنی بر الکترولیت مایع را محدود کرده و منجر به کاهش ماندگاری و طول عمر سلول شده است [۱۲؛ ۱۳]. از این رو، الکترولیت‌های نیمه‌جامد، برای جبران این نقایص معرفی شده‌اند. در الکترولیت‌های نیمه‌جامد از مواد حفره‌ای، به منظور انتقالات الکترونی استفاده می‌شود و به دلیل عدم خوردگی و فراریت، این مواد می‌توانند جایگزین ایده‌آلی برای الکترولیت‌های مایع در نظر گرفته شوند [۱۴].

تلاش‌های فراوانی برای جایگزین‌های مناسبی از مواد جامد، نیمه‌جامد و ژله‌ای در ساختار این سلول‌ها صورت گرفته است [۱۵]. علی‌رغم تمامی این تلاش‌ها، به دلیل راندمان بالای الکترولیت‌های مایع و نرخ پایین بازترکیب، در مقایسه با دیگر الکترولیت‌ها، هنوز این الکترولیت‌ها در صدر مصرف برای ساخت این نوع از سلول‌ها قرار دارند [۱۳؛ ۱۶]. از سوی دیگر، یکی از چالش‌های اساسی در الکترولیت‌های نیمه‌جامد، بازترکیب بالای الکترون‌ها از فوتون‌اند می‌باشد که برای دستیابی به بازده حداکثری سلول، باید از مقدار آن تا حد امکان کاسته شود [۱۷]. این امر توسط اصلاح لایه اکسیدی و اصلاح لایه سطحی توسط مواد معدنی محقق می‌شود [۱۸].

تحقیقات فراوانی در راستای افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای صورت پذیرفته است که این مطالعات شامل استفاده از نقاط کوانتومی برای تبدیل فرکانس‌های نوری بالاتر و نیز تغییرات دوپینگ^۲ TiO_2 به منظور سازگاری بهتر آن با الکترولیت است [۱۹]. مهم‌تر از این موارد، استفاده از مواد گوناگون نیمه‌جامد، جامد پلیمری یا معدنی جهت جایگزینی در الکترولیت مایع می‌باشد [۲۰].

در ادامه روند مطالعات در این زمینه، گروهی از محققین توانستند یک اتصال ناهمگون بین TiO_2 و $CuSCN$ در حالت جامد در سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگ‌دانه را گزارش کنند که دارای عملکرد مطلوب‌تری نسبت به الکترولیت مایع می‌باشد [۲۱]. همچنین پژوهشگران یک گروه تحقیقاتی موفق به بررسی عملکرد لیگاند کمپلکس‌های

¹ Photovoltaic

² Doping

کبالت^۱ بر اساس ترپیریدین^۲، بی‌پیریدین^۳ و فنانترولین^۴ شدند. بر این اساس مشخص گردید که DSSC^۵های مبتنی بر [Co(dtbbpy)₃] و رنگ N₃ در مقایسه با DSSC مبتنی بر دید/تری‌دید دارای بازده نسبی بیشتری در حدود ۸۰٪ می‌باشند [۲۲]. در تحقیقی دیگر، سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای با کارایی بالا (DSSCs) مبتنی بر الکترولیت ژل پلیمری پلی‌آکریلونیتریل، که حاوی نمک‌های دوتایی RbI و تتراگزیل آمونیوم دید (HeX₄NI) در ترکیب با فوتوالکترودهای چند لایه TiO₂ بودند، ساخته شد. جریان اتصال کوتاه ۲۰ mA/cm² و بازده چشمگیر ۷/۵٪ از جمله دستاوردهای مهم این تحقیق بود [۹].

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در منابع علمی، جهت رفع محدودیت‌های موجود در الکترولیت‌های مایع و نیز بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه طبیعی توسط الکترولیت نیمه‌جامد، ارزیابی وسیعی صورت نگرفته است. لذا این پژوهش در تلاش است تا گامی در راستای بهبود راندمان و کاهش هزینه‌های ساخت سلول‌های خورشیدی بردارد. نوآوری‌های اصلی در این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از الکترولیت نیمه‌جامد دید سزیم قلع (CsSnI₃) در سلول خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه طبیعی و بهره‌گیری از نانوکامپوزیت مبتنی بر نانومیله‌های دی-اکسید تنگستن/اکسید زیرکونیوم به جای پلاتین، به عنوان الکترود مقابل جهت کاهش هزینه‌ها و نیز افزایش طول عمر سلول خورشیدی است.

روش انجام آزمایش

مواد و تجهیزات

در این تحقیق، از بستر اکسید رسانای شفاف شیشه ITO (در ابعاد ۱/۱ mm × ۲۵ × ۲۵، و شفافیت ۸۶٪؛ nominal at ۵۵۰ nm) به عنوان زیرلایه استفاده شد. از پودر دی‌اکسید تیتانیوم ساخت شرکت Degussa AG، سدیم هیدروکسید، نیتریک اسید ۶۷٪، پلی‌اتیلن گلیکول ساخت شرکت Fluka، تریتون X-۱۰۰ ساخت شرکت مرک آلمان، جهت ساخت فوتوآند بهره گرفته شد. از حنای ساده و حنای سیاه به عنوان رنگ‌دانه طبیعی استفاده گردید. همچنین اتانول ساخت شرکت مجلی، یدید سزیم، یدید قلع، فلورید قلع، استونیتریل، هگزاکلرید تنگستن، اکسید زیرکونیوم و اسید استیک ساخت شرکت مرک آلمان جهت تهیه الکترود مقابل و الکترولیت مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور مشخصه‌یابی و بررسی عملکرد سلول خورشیدی تهیه شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN MIRA^۳، اسپکتروفتومتر ساخت شرکت طیف‌سنج پیشرو پژوهش مدل Photonix AR ۲۰۱۵ استفاده شد. همچنین گستره توزیع اندازه ذرات تصویر SEM نانوذرات TiO₂ با استفاده از نرم‌افزار ImageJ ۱.۵۲۷ استخراج گردیده است.

تهیه سلول خورشیدی حساس شده با رنگ‌دانه

به منظور تهیه نانوذرات آاناتاز^۶ دی‌اکسید تیتانیوم با خلوص بالا و تهیه فوتوآند، نخست ۲ g از پودر تیتانیومی (حاوی ترکیبی از ۳۰٪ فاز روتیل^۷ و ۷۰٪ فاز آاناتاز) در طی دو مرحله درون ۷۰ mL سدیم هیدروکسید ۱۰ نرمال ریخته و پس

¹ Cobalt Ligand complexes

² Terpyridine

³ Biperiden

⁴ Phenanthroline

⁵ Dye-Sensitive Solar Cells

⁶ Anatase

⁷ Rutile

از همگن کردن توسط همزن مغناطیسی، در دمای 130°C به مدت ۲۰ ساعت در داخل اتوکلاو حرارت داده شد. pH ماده حاصل پس از خنک شدن با افزودن اسید نیتریک ۰/۱ مولار برابر ۱/۵ تنظیم شد. مواد مجدداً در دمای 240°C به مدت ۱۲ ساعت داخل اتوکلاو تحت حرارت قرار گرفتند تا ساختار آاناتاز تیتانیوم فعال، حاصل شود. محلول به‌دست آمده صاف و خشک گردید. سپس 0.5g از پودر به‌دست آمده توسط 100mL از تریتون X-۱۰۰ و 0.2g پلی‌اتیلن گلیکول در 3mL از اسید استیک ۰/۱ مولار به صورت خمیر درآورده شد. سپس به منظور لایه‌نشانی و استفاده به عنوان الکتروُد، نواری کوچک در راستای دو لبه شیشه چسبانده و خمیر حاصله روی شیشه ITO موجود، به روش لایه‌نشانی تیغه‌ای (دکتر بیلد^۱) کشیده شد. در نهایت الکتروُد پوشش داده شده به آرامی تحت جریان هوا و در سه مرحله در دمای 150°C به مدت ۱۵ دقیقه، دمای 320°C درجه به مدت ۱۰ دقیقه، و دمای 500°C به مدت ۳۰ دقیقه به منظور بازپخت حرارت داده شد تا پلیمر تدریجاً از ساختار حذف شده و لایه نانو ذرات خالص آاناتاز تیتانیوم به جا بماند [۲۳]. با توجه به این‌که شرایط دمایی و زمانی از جمله عوامل تاثیرگذار بر نانو ساختار لایه TiO_2 می‌باشد، لذا به منظور دستیابی به دمای بهینه جهت اتصالی با استحکام و پایداری بالا بین نانوذرات TiO_2 و زیرلایه مدنظر، فرایند بازپخت باید به صورت آرام و پایا صورت پذیرد. از این‌رو، دما به تدریج و در بازه‌های زمانی متفاوت شروع به افزایش یافته و بازپخت اولیه در دمای 150°C به مدت ۱۵ دقیقه آغاز گردیده و به همین ترتیب تا دمای 500°C به آرامی روند صعودی داشته است. در غیر این‌صورت اگر دما به طور ناگهانی تا دمای 500°C افزایش می‌یافت، به دلیل عدم استحکام کافی بین نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و زیرلایه، سطح لایه‌نشانی شده با ریزش مواجه شده و بر مورفولوژی نانوذرات تاثیر سویی داشت و همین امر موجب جذب اندک رنگ‌دانه و به تبع آن افت عملکرد سلول خورشیدی می‌شد [۲۴].

به منظور تهیه رنگ‌دانه از دو نمونه حنای ساده و حنای سیاه، با روش استخراج سوکسله^۲، استفاده گردید. روش کار بدین صورت است که 10g از هردو ماده اولیه (حنا) در یک بشر 170mL که حاوی 100mL حلال اتانول است، ریخته شد. بشر درون حمام روغن تا دمای 80°C (نقطه جوش الکل) حرارت داده شد. الکل تبخیر شده از طریق لوله بالا رفته و با حنای خشک مخلوط می‌گردد و بعد از پر شدن محفظه بالا مجدداً به پایین باز می‌گردد. برای تسهیل فرایند تبخیر و یکنواختی از همزن مغناطیسی درون مخزن پایینی استفاده شد. پس از تهیه رنگ‌دانه حنا، فوتوآند آماده شده به مدت ۱۸ ساعت درون محلول رنگی قرار گرفت تا رنگ‌دانه‌ها جذب آن شوند.

الکتروولیت نیمه جامد به کار گرفته شده در این تحقیق، نیمه‌هادی معدنی نوع P به نام تری‌یدید قلع سزیم^۳ می‌باشد. روش تهیه الکتروولیت $\text{CsSnI}_{3-x}\text{F}_x$ ، بدین ترتیب است که ابتدا 260mg از یدید سزیم، 373mg از یدید قلع و 3mg از فلورید قلع با هم مخلوط گردیدند و در یک پیرکس^۴ خلاء یا شیشه بسته شده تحت دمای 450°C به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شدند. پس از اتمام این مدت زمان، شیشه در دمای اتاق قرار گرفت. سپس پودر بر جا مانده (100mg) الی 350mg در $1/5\text{mL}$ استونیتریل حل گردید. به منظور دوپینگ، مقدار $5/5$ وزنی، که معادل 15mg از دوپ‌کننده فلورید قلع است، در همان حلال حل گردید تا الکتروولیت در فاز محلول آماده تزریق به سلول باشد. و در نهایت محلول حاضر توسط سرنگ به سلول تزریق گردید و در دمای اتاق تحت جریان نیتروژن خشک شد.

به منظور آماده‌سازی الکتروُد مقابل، نیاز به سنتز دی‌اکسید تنگستن (WO_2) می‌باشد که در این تحقیق، از هگزا کلرید تنگستن^۵، به عنوان کلرید فلزی، اتانول، به عنوان منبع اکسیژن و اوره، به عنوان منبع کربن با تغییر در نسبت مولی اوره-کلرید فلزی استفاده شد. تمامی اکسیدها و کاربیدهای حاصل، عملکرد کاتالیست شیمیایی عالی برای احیای

¹ Doctor Blade

² Soxhlet extractor

³ CsSnI_3

⁴ Pyrex

⁵ WCl_6

تری‌پدید به پدید را از خود نشان دادند. روش تهیه بدین صورت بود که ۳/۹۷ g از هگزا کلرید تنگستن در ۱۰ mL از اتانول خالص^۱ با افزودن ۰/۶g از اوره حل شد. محلول به مدت ۲ ساعت به شدت هم زده شد. سپس در دمای ۱۲۰°C تا دست‌یابی به پیش‌ماده ژله‌ای حرارت داده شد. سپس این پیش‌ماده در دمای ۸۰۰°C تحت جریان نیتروژن تا پدیدار شدن نانومیله‌های اکسید تنگستن تحت حرارت قرار گرفت [۲۵].

برای تهیه ترکیب کاتالیست به منظور لایه‌نشانی در الکتروود مقابل، ۵۰۰ mg از پودر نانومیله اکسید تنگستن به دست آمده به همراه ۴g از اکسید زیرکونیم در ۳ mL از الکل خالص هم‌زده شد و مخلوط حاصل به مدت ۴ ساعت توسط گوی فلزی، آسیاب^۲ گردید. محصول به دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه توسط اولتراسونیک پراکنده گردید تا ترکیب خمیری به دست آید و در نهایت خمیر بر روی بستر شیشه‌ای به وسیله میکرواسپری پاشیده شد. لایه به دست آمده در دمای ۵۰۰°C و تحت جریان نیتروژن، به مدت ۳۰ دقیقه خشکانده شد [۲۴].

به منظور تهیه سلول خورشیدی نهایی، ابتدا یک چسب نواری دور تا دور فوتوآند چسبانده و الکتروود مقابل به نحوی که نواحی فعال روبه‌روی هم و بدون ورود آلودگی به چسب، روی آن چسبانیده شد و در نهایت محلول الکترولیت حاضر، توسط یک سرنگ از طریق واشر پلاستیکی به سلول تزریق کرده و از طریق سرنگ دیگری، اجازه خروج هوا داده شد. بعد از پر شدن، ناحیه وسط سلول در دمای اتاق تحت جریان نیتروژن خشک گردید. مراحل آماده‌سازی سلول خورشیدی مذکور، در شکل ۱ آورده شده است.



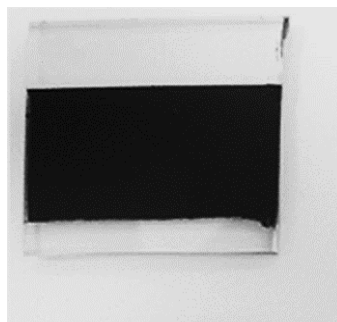
(ب)



(الف)



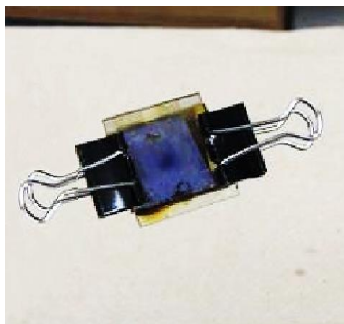
(د)



(ج)

¹ anhydrous ethanol

² star ball milling



(د)



(ه)

شکل ۱. مراحل آماده‌سازی سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگ‌دانه: الف) شیشه ITO پوشش داده شده با TiO_2 ، ب) تهیه رنگ‌دانه به روش استخراج سوکسله، ج) فوت‌آند دوپ شده با رنگ حنا، د) لایه کاتالیست (ITO دوپ شده با WO_2)، ه) الکترولیت نیمه‌جامد حل‌شده در استونیتریل و آماده تزریق، ی) سلول خورشیدی نهایی.

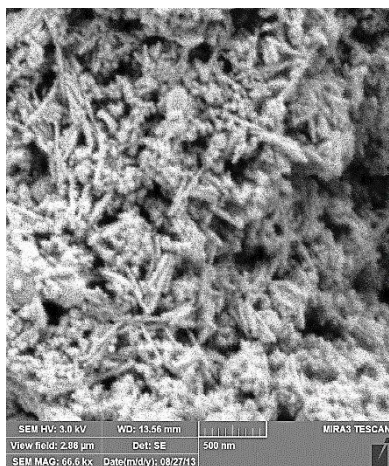
نتایج و بحث

آنالیز میکروسکوپی و طیف‌نگاری

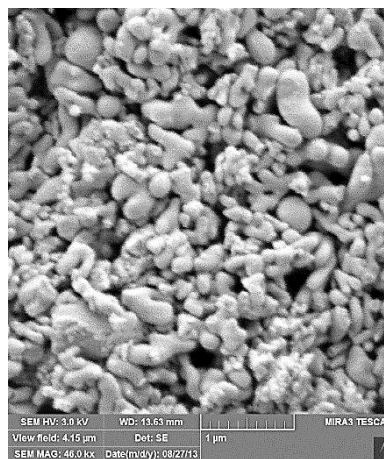
شکل ۲ الف، میکروگراف‌های حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از تیتانیای به دست آمده را در بزرگنمایی ۴۶ kX نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، ذرات دارای اندازه‌های چند صد نانومتری (۱۰۰-۳۰۰ نانومتر) می‌باشند که به منظور دست‌یابی به عملکرد مطلوب‌تر، نیاز به نانوذرات کوچک‌تر است تا بتوان جذب بالاتری از نور را توسط رنگ‌دانه و الکترولیت به دست آورد. لذا برای حل این مشکل و بهینه ساختن هدایت ساختار، افزایش اندازه تخلخل‌ها و ایجاد ساختارهای شبه‌کانال (یک بعدی) امری اساسی است که موجب فراهم شدن مسیری برای هدایت الکترون می‌شود. لذا بدین منظور از نانومیله‌های دی‌اکسید تنگستن بهره گرفته شده است که به واسطه دارا بودن نانو ساختار یک بعدی زمینه تسهیل مسیر هدایت الکترون و جبران اندازه نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم را فراهم می‌آورد. همان‌طور که در شکل ۲ ب مشاهده می‌گردد، ساختارهای نانومیله‌ای دی‌اکسید تنگستن سنتز شده در بزرگنمایی ۶۶ kX نشان داده شده است که نانومیله‌ها دارای قطر تقریبی ۵۰ الی ۱۰۰ nm بوده که به منظور استفاده در الکتروود مقابل، کاملاً در ابعاد مطلوب می‌باشند. وجود این ساختار نانومیله‌ای، موجب افزایش هدایت الکترون‌ها به سمت الکتروولیت می‌شود و شکل نانومیله‌ای نیز سبب قرارگیری مناسب سلول‌های الکتروولیت در ساختار خواهد شد [۲۶].

سلول‌های ساخته شده با الکتروولیت $\text{CsSnI}_{3-x}\text{F}_x$ و TiO_2 بدون رنگ‌دانه به عنوان سلول فتوولتایی عمل می‌کنند که این مطلب بیانگر آن است که خود $\text{CsSnI}_{3-x}\text{F}_x$ می‌تواند به عنوان رنگ‌دانه عمل کند [۲۷] و الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده در اثر برخورد فوتون می‌توانند از طریق آن تجزیه شوند [۲۸]. اما راندمان آن چندان قابل قبول نمی‌باشد [۲۹]. بنابراین در ساختار حاضر اگر به جای رنگ‌دانه، $\text{CsSnI}_{3-x}\text{F}_x$ نور را جذب کند، الکترون‌ها و حفره‌ها درون الکتروولیت ایجاد خواهند شد. سپس الکترون‌ها به باند هدایت TiO_2 منتقل شده و در این مرحله رنگ‌دانه می‌تواند به عنوان مجرای برای انتقال سریع بار از CsSnI_3 عمل کرده و جدایی بار را از طریق انتقال حفره به CsSnI_3 تسریع کند

که در نهایت این عمل باعث افزایش راندمان خواهد شد [۹؛ ۲۳]. بنابراین فرض اولیه بر این است که هر دو رنگدانه و الکترولیت در اینجا می‌توانند در نقش جاذب نور و حساس‌کننده عمل کنند که این فرض با توجه به عملکرد رنگدانه‌وار خود الکترولیت و نزدیکی باندهای لومو^۱ و هدایت این دو به هم منطقی به نظر می‌رسد.



(ب)



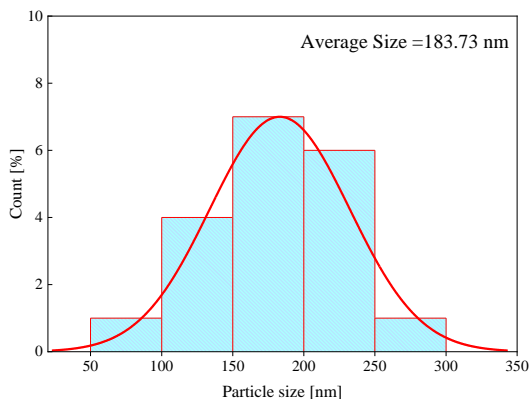
(الف)

شکل ۲. میکروگراف‌های SEM مواد سنتز شده در پژوهش حاضر: الف) نانوذرات تیتانیای به‌دست آمده با بزرگنمایی ۴۶ kX ب) نانومیله-های WO₂ سنتز شده با بزرگنمایی ۶۶ kX.

تحلیل توزیع اندازه ذرات میکروسکوپی

شکل ۳، نمودار توزیع اندازه ذرات میکروسکوپی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد که به کمک نرم افزار ImageJ از تصاویر SEM ذرات استخراج گردیده است. همان‌طور که مشخص است اندازه ذرات در گستره ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر می‌باشد. مطابق با نمودار، میانگین اندازه ذرات ۱۸۳/۷۳ نانومتر به‌دست آمده است. انحراف معیار برای توزیع ذرات برابر با ۴۸ نانومتر بوده که نشان از توزیع قابل قبول در مقیاس نانو است.

^۱ LUMO



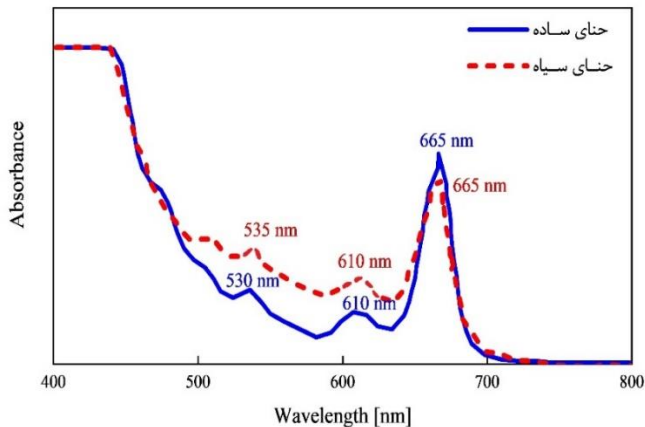
شکل ۳. نمودار توزیع اندازه ذرات میکروسکوپی TiO_2 .

بررسی طیف جذبی رنگدانه

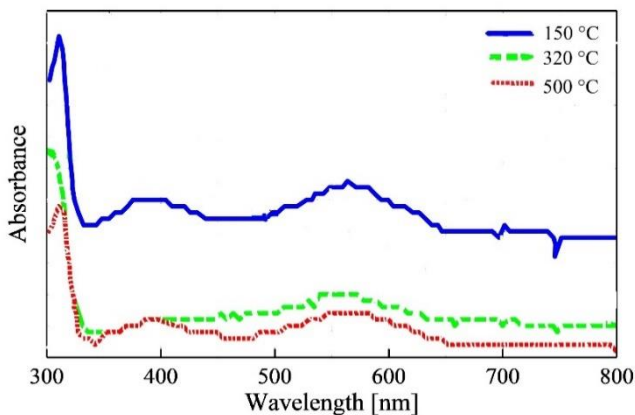
در این تحقیق از دو رنگدانه حنای ساده و حنای سیاه که با روش استخراج سوکسله به دست آمده بودند، استفاده شد. طیف جذبی آنها توسط طیف‌نگاری مرئی-ماوراء بنفش مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل ۴ قابل مشاهده است. میکروگراف‌های الف و ب در شکل ۴، به ترتیب نمودار طیف جذبی به دست آمده برای دو ماده حنای سیاه و حنای ساده را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که از شکل مشخص است، حنای ساده دارای دو پیک جذبی کوچک در طول موج‌های ۵۳۰ nm و ۶۱۰ nm بوده و یک حداکثر جذب در طول موج ۶۶۵ nm در محدوده نور آبی می‌باشد. حداقل جذب نیز در محدوده نور سبز می‌باشد. برای حنای سیاه نیز این دو پیک نسبی در طول موج‌های ۵۳۵ nm و ۶۱۰ nm و یک حداکثر جذب در طول موج ۶۶۵ nm یا نور آبی قابل مشاهده است. به دلیل میزان بالای جذب نسبی در حنای ساده، از این رنگدانه به عنوان حساس‌کننده استفاده شد. البته لازم به ذکر است که شدت جذب در این رنگدانه‌های طبیعی نسبت به رنگدانه‌های بر پایه روتنیوم مانند NV۱۹ کمتر است [۳۰]. ولی با توجه به امکانات موجود و کاهش هزینه‌های ساخت، استفاده از این رنگدانه‌ها ترجیح داده شد.

با توجه به شکل ۵، بیشترین میزان رنگدانه جذب شده مربوط به دمای 150°C و کمترین مقدار جذب مربوط به دمای 50°C می‌باشد. در حین بازپخت، ایجاد حفرات در نانوساختار در نتیجه اکسیداسیون مواد آلی صورت می‌پذیرد. اما در دمای بالای بازپخت، در اثر نفوذ حرارتی، نظم ساختار متخلخل از بین می‌رود. لذا با توجه به شکل، در دمای پایین‌تر، میزان جذب بالا نشان‌دهنده تخلخل بیشتر ساختار می‌باشد که سبب حفظ ریخت‌شناسی نمونه می‌گردد و در دمای بالا با افزایش بلورینگی، تخلخل و جذب کاهش می‌یابد. لذا به منظور حفظ ساختار لازم است دما به طور تدریجی افزایش یابد.



شکل ۴. نمودار طیف جذبی رنگدانه‌های حنای ساده و حنای سیاه.



شکل ۵. طیف جذبی فوتوآند در دماهای بازپخت مختلف.

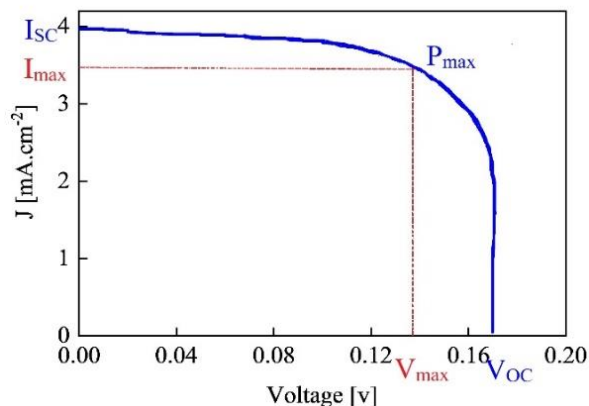
مشخصه‌یابی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

منحنی ولتاژ - جریان، از مهم‌ترین مشخصه‌های سلول خورشیدی رنگدانه‌ای محسوب می‌شود. از تحلیل این منحنی می‌توان به پارامترهای مؤثری همچون جریان اتصال کوتاه^۱، ولتاژ مدار باز^۲، ضریب پرشدگی^۳ و بازده تبدیل کل انرژی دست یافت [۱۸]. این منحنی برای نمونه‌های تولید شده در شکل ۶ گزارش گردیده است. از داده‌های منحنی جریان-ولتاژ در شکل ۶ قابل استنباط است، که نمونه سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه حنای ساده با دارا بودن مقادیر ولتاژ مدار باز ۰/۱۷ ولت، جریان اتصال کوتاه ۴/۰۸ میلی‌آمپر و راندمان ۰/۹۵٪ نتیجه قابل قبولی را به همراه داشته است. همچنین مشخصات مهم به دست آمده از این منحنی‌ها و مقایسه آن با دیگر نمونه‌های سلول‌های خورشیدی در منابع علمی، در جدول ۱ به طور خلاصه آورده شده است.

¹ Short circuit current

² Open circuit voltage

³ Fill Factor



شکل ۶. نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگ‌دانه حنای ساده بر پایه الکترولیت نیمه-جامد و الکتروود مقابل اکسید زیرکونیوم/اکسید تنگستن.

با توجه به نمودار شکل ۶ و توسط روابط زیر پارامترهای مؤثر سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای استخراج می‌گردند. با کاهش تدریجی مقاومت، افزایش جریان و نیز کاهش ولتاژ مشاهده خواهد شد که حاصل ضرب این دو مقدار، در نقطه‌ای به بیشترین مقدار خود می‌رسد که این همان بیشینه ولتاژ (V_{max}) و بیشینه جریان (I_{max}) بوده و حاصل ضرب آنها مطابق رابطه (۱) بیشینه توان خروجی (P_{max}) است. با کاهش مقاومت، ولتاژ به مقدار صفر میل خواهد کرد و پدیده اتصال کوتاه در مدار رخ خواهد داد.

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (1)$$

فاکتور پرشدگی، یکی از پارامترهایی است که با حاصل ضرب ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای رابطه دارد. برای به دست آوردن FF، نیاز به تعریف چند پارامتر دیگر است. با دقت به نمودار جریان بر حسب ولتاژ شکل ۶، علاوه بر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه، دو پارامتر بیشینه ولتاژ و بیشینه جریان سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای نیز مشاهده می‌گردد. از این‌رو، فاکتور پرشدگی (FF) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه I_{sc} و V_{oc} به ترتیب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز می‌باشند. برای سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته شده، بیشینه مقدار ولتاژ ۰/۱۴ ولت حاصل شده است. بیشینه جریان نیز برابر ۲/۴ میلی‌آمپر به دست آمده است. بنابراین، با توجه به رابطه (۱) مقدار حداکثر توان برای سلول خورشیدی ۰/۴۷۶ mW محاسبه می‌گردد.

همچنین با توجه به نمودار شکل ۶، مقدار جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز برای سلول خورشیدی به ترتیب برابر با ۴/۰۸ میلی‌آمپر و ۰/۱۷ ولت استحصال شده است که با قرار دادن این اعداد در رابطه (۲) پارامتر FF نیز برابر ۶۸٪ به دست می‌آید.

راندمان یا بازده سلول خورشیدی (η)، یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های سلول خورشیدی است که نسبت بیشینه توان خروجی به توان ورودی (P_{in}) مطابق با رابطه (۳) تعریف می‌گردد. برای به دست آوردن بازده سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای، استانداردهایی تعریف می‌گردد تا نتایج به دست آمده در سراسر دنیا بر اساس آن قابل مقایسه باشد. توان ورودی در استاندارد جهانی، شدت تابش منبع نور در 1.5 AM است که بر حسب واحد وات یا میلی‌وات بر واحد سطح (mW/cm^2)، محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \times 100 \quad (3)$$

در آزمایش‌های تحقیق جاری، مقدار توان ورودی، با توجه به استفاده از لامپ زنون به عنوان منبع نور، 50 میلی‌وات بر سانتی‌مترمربع در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده بازده سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته شده با الکترولیت جامد طبق رابطه (۳) 0.95% محاسبه می‌گردد.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است، در تحلیل نهایی پارامترهای به دست آمده و مقایسه محاسن و معایب سلول ساخته شده در تحقیق حاضر با نمونه الکترولیت نیمه‌جامد که در مرجع [۳۱] گزارش شده است، دارای ولتاژ اتصال کوتاه پایین‌تری از نمونه مرجع [۳۲] بوده ولی جریان اتصال کوتاه بزرگ‌تری را ارائه می‌دهد، که این انتظاری است که در کار پژوهش کنونی نیز مشهود است. این پدیده ناشی از تحرک بالای حفره در الکترولیت است که باعث جریان اتصال کوتاه بالاتری نسبت به نمونه مشابه آزمایشگاهی مرجع [۳۲] می‌شود. کمتر بودن ولتاژ نیز به دلیل عدم تطابق نسبی باند لومو رنگ‌دانه و ظرفیت^۲ الکترولیت می‌باشد.

راندمان سلول خورشیدی تهیه شده در تحقیق حاضر در مقایسه با نمونه ارائه شده در مرجع [۳۳] بیش از دو برابر است. این یافته نشان می‌دهد که استفاده از الکترولیت نیمه‌جامد به همراه الکتروود مقابل نانوکامپوزیتی به جای الکتروود پلاتینیومی توانسته است راندمان را به طور چشمگیری بهبود دهد. این نتیجه در حالی است که مزایای بی‌شمار دیگری نظیر قیمت ساخت بسیار پایین‌تر و دوام بیشتر نیز برای سلول خورشیدی ساخته شده وجود دارد. مقایسه راندمان کار حاضر با نمونه‌های مراجع [۳۱; ۳۲] به وضوح نشان می‌دهد که راندمان به دست آمده در آنها به مراتب بیشتر است. دلیل این امر استفاده از رنگ‌های آلی می‌باشد که به عنوان یک یافته‌ی مهم تلقی می‌گردد. بنابراین می‌توان جمع‌بندی نمود که در سلول‌های خورشیدی بر پایه الکترولیت نیمه‌جامد استفاده از رنگ‌دانه‌های طبیعی اگر چه موجب کاهش هزینه‌های ساخت می‌شوند، ولی به واسطه دارا بودن ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پایین، سبب کاهش بازده، در سلول‌های خورشیدی ساخته شده با رنگ‌دانه‌های طبیعی می‌شوند. بنابراین بهره‌گیری از رنگ‌های آلی در این دسته از سلول‌های خورشیدی توصیه می‌گردد.

¹ Air mass

² Valence bond

جدول ۱. جدول مقایسه مشخصه‌های سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته شده با مراجع دیگر.

راندمان/٪	فاکتور پرشدگی	پیشینه شدت جریان (mA)	جریان اتصال کوتاه (mA)	پیشینه ولتاژ (V)	ولتاژ مدار باز (V)	نوع رنگ‌دانه	نوع الکترولیت	انواع سلول‌های خورشیدی
۰/۹۵	۶۸	۳/۴	۴/۰۸	۰/۱۴	۰/۱۷	رنگ‌دانه طبیعی حنا	الکتrolیت نیمه‌جامد $CsSnI_3$	نمونه تولید شده در پژوهش حاضر
۱۰/۲	۷۲/۷	عدم گزارش	۱۹/۲	عدم گزارش	۰/۷۳۲	رنگ $N719$	الکتrolیت جامد $CsSnI_3$	[۳۱]
۰/۴۵	۳۶/۳	عدم گزارش	۰/۹۰۶	عدم گزارش	۰/۴۱	حنای بحرینی	الکتrolیت مایع I/I_3	[۳۳]
۱۰/۲۸	۷۳	عدم گزارش	۱۶/۶۶	عدم گزارش	۰/۸۴۶	رنگ‌دانه آلی	الکتrolیت پلیمری	[۳۲]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خصوصیات الکتrolیت نیمه‌جامد معدنی تری‌یدید سزیم قلع بر بهبود عملکرد سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگ‌دانه طبیعی مطالعه شده، همچنین همزمان با بررسی این موضوع، تأثیر استفاده از نانوکامپوزیت اکسید زیرکونیم/ نانومیله‌های اکسید تنگستن در الکتروتود مقابل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌های به دست آمده از تأثیر مواد استفاده شده در سلول خورشیدی را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- استفاده از الکتrolیت‌های نیمه‌جامد، به منظور رفع مشکل نشتی و پایداری ضعیف الکتrolیت‌های مایع، به دلیل عدم خوردگی و فراریت آنها مناسب ارزیابی شد. اصلاح سطحی الکتrolیت نیمه‌جامد تری‌یدید قلع سزیم توسط عوامل دوپ‌کننده معدنی نظیر دی‌فلورید قلع و یدید قلع، موجب بهبود جریان اتصال کوتاه و راندمان شد.
- مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های علمی در سایر مراجع نشان داد که به‌کارگیری رنگ‌دانه طبیعی حنا به همراه الکتrolیت نیمه‌جامد تری‌یدید سزیم قلع موجب بهبود راندمان تبدیل انرژی نسبت به الکتrolیت مایع یدید/ تری‌یدید می‌شود.
- مقایسه راندمان سلول خورشیدی تولید شده در پژوهش حاضر با نمونه‌های پیشین مشابه که از الکتrolیت نیمه‌جامد استفاده نموده‌اند نشان داد که در این دسته از سلول‌های خورشیدی استفاده از رنگ‌دانه‌های طبیعی موجب افت شدید راندمان می‌شود. بنابراین توصیه می‌گردد تا در سلول‌های خورشیدی بر پایه الکتrolیت‌های نیمه‌جامد حتماً از رنگ‌های آلی استفاده شود.
- همچنین به‌کارگیری نانوکامپوزیت اکسید زیرکونیم/ نانومیله‌های اکسید تنگستن به جای فلزات گران‌قیمتی نظیر پلاتین در الکتروتود مقابل، علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت، عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد.
- در نهایت سلول خورشیدی تهیه شده با رنگ‌دانه حنای ساده و الکتrolیت نیمه‌جامد تری‌یدید سزیم قلع، به ترتیب مقادیر ولتاژ مدار باز ۰/۱۷ ولت و جریان اتصال کوتاه ۴/۰۸ میلی‌آمپر را ارائه نموده و توانست راندمان سلول خورشیدی را نسبت به نمونه مشابه در مرجع [۳۲] تا میزان ۰/۹۵٪ بهبود ببخشد.

References

- [1] Ikpesu, J. E., Iyuke, S. E., Daramola, M., & Okewale, A. O. (2020). Synthesis of improved dye-sensitized solar cell for renewable energy power generation. *Solar Energy*, 206(7), 918-934. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.002>
- [2] Rajaei, M. (2017). Modeling and optimizing the CIGS thin film cell structure to increase efficiency. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(2), 81-94. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100506.html?lang=en
- [3] Barghi Jahromi, M. S., Kalantar, V., & Omidpanah, M. (2022). Numerical Simulation of Indirect Cabinet Solar Dryer by spraying of Water Droplets in Yazd Climate. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(1), 523-544. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.292394.1594>
- [4] Al Bin Saleh, H., Abd El-Lateef, H. M., & Bakir, E. (2022). Simple development of eco-friendly dye-sensitized solar cells via controlling thickness of TiO₂ nanoparticles and viscosity of electrolyte: Experimental study and DFT calculations. *Inorganic Chemistry Communications*, 140, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.10.9472>
- [5] Sharma, S., Bulkesh, S., Ghoshal, S. K., & Mohan, D. (2017). Dye sensitized solar cells: From genesis to recent drifts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 529-537. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.136>
- [6] Kokal, R. K., Bhattacharya, S., Cardoso, L. S., Miranda, P. B., Soma, V. R., Chetti, P., Melepurath, D., & Raavi, S. S. K. (2019). Low cost 'green' dye sensitized solar cells based on New Fuchsin dye with aqueous electrolyte and platinum-free counter electrodes. *Solar Energy*, 188, 913-923. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.066>
- [7] Sharma, K., Sharma, V., & Sharma, S. (2018). Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status. *Nanoscale research letters*, 13(1), 1-46. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s11671-018-2760-6.pdf>
- [8] Dupré, O., Vaillon, R., & Green, M. A. (2017). *Thermal behavior of photovoltaic devices: Physics and Engineering*. Springer Cham. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-49457-9>
- [9] Gong, J., Sumathy, K., Qiao, Q., & Zhou, Z. (2017). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.097>
- [10] Zhang, W., Wu, Y., Bahng, H. W., Cao, Y., Yi, C., Saygili, Y., Luo, J., Liu, Y., Kavan, L., Moser, J-E., Hagfeldt, A., Tian, H., Zakeeruddin, S. M., Zhu, W-H., & Grätzel, M. (2018). Comprehensive control of voltage loss enables 11.7% efficient solid-state dye-sensitized solar cells. *Energy & Environmental Science*, 11(7), 1779-1787. <https://doi.org/10.1039/C8EE00661J>
- [11] Benesperi, I., Michaels, H., & Freitag, M. (2018). The researcher's guide to solid-state dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(44), 11903-11942. <https://doi.org/10.1039/C8TC03542C>
- [12] Liu, I. P., Chen, Y-Y., Cho, Y-S., Wang, L-W., Chien, C-Y., & Lee, Y-L. (2021). Double-layered printable electrolytes for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*, 482, 228962. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.22.8962>
- [13] Wang, M., Anghel, A. M., Marsan, B., Cevey Ha, N-L., Pootrakulchote, N., Zakeeruddin, S. M., & Grätzel, M. (2009). CoS Supersedes Pt as Efficient Electrocatalyst for Triiodide Reduction in Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(44), 15976-15977. <https://doi.org/10.1021/ja905970y>
- [14] Chikate, B. V., Sadawarte, Y., & Sewagram, B. (2015). The factors affecting the performance of solar cell. *International journal of computer applications*, 1(1), 1-5. <https://citeseerx.ist>

- t.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=f36dc848575cf06c20301547f08bc127a3f30bbb
- [15] Grätzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. *Nature*, 414(6861), 338-344. <http://www.sciencecafeovervecht.nl/Energietransitie/data/Photoelectrochemical-cells-414338a0.pdf>
- [16] Purnama, H., Prabowo, B. A., Hanif, L. N., Ridwan, I., & Hidayati, N. (2021). Effect of Sintering Temperature in Curcumin Dye-Sensitized Solar Cell using ITO Glass. *Journal of Physics: Conference Series*, 1858(1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/17426596/1858/1/012059>
- [17] Jasim, K. E. (2011). Dye sensitized solar cells-working principles, challenges and opportunities. In L. A. Kosyachenko (Ed.), *Solar Cells-Dye-Sensitized Devices*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/23333>
- [18] Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580-1608. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- [19] Askari, M., Mirzaei Mahmoud Abadi, V., & Mirhabibi, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94-113. <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
- [20] Bashar, H., Bhuiyan, M. M. H., Hossain, M. R., Kabir, F., Rahaman, M. S., Manir, M. S., & Ikegami, T. (2019). Study on combination of natural red and green dyes to improve the power conversion efficiency of dye sensitized solar cells. *Optik*, 185, 620-625. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.043>
- [21] Zheng, H., Shah, S. K., Abbas, M., Ly, I., Rivera, T., Almeida, R. M., Hirsch, L., Toupance, T., & Ravaine, S. (2016). Efficiency enhancement in solid state dye sensitized solar cells by including inverse opals with controlled layer thicknesses. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 21, 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2016.05.001>
- [22] Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., & Han, L. (2006). Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(25), L638-L640. <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.L638>
- [23] Lee, B., Buchholz, D. B., Guo, P., Hwang, D-K., & Chang, R. P. H. (2011). Optimizing the Performance of a Plastic Dye-Sensitized Solar Cell. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(19), 9787-9796. <https://doi.org/10.1021/jp201555n>
- [24] Wang, Y., Zhao, C., Wu, M., Liu, W., & Ma, T. (2013). Highly efficient and low cost Pt-based binary and ternary composite catalysts as counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*, 105, 671-676. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.04.154>
- [25] Wu, M., Mu, L., Wang, Y., Lin, Y-N., Guo, H., & Ma, T. (2013). One-step synthesis of nano-scaled tungsten oxides and carbides for dye-sensitized solar cells as counter electrode catalysts. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(25), 7519-7524. <https://doi.org/10.1039/C3TA10628D>
- [26] Kumara, G. R. A., Kaneko, S., Okuya, M., Onwona-Agyeman, B., Konno, A., & Tennakone, K. (2006). Shiso leaf pigments for dye-sensitized solid-state solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(9), 1220-1226. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.07.007>
- [27] Xia, J., Yuan, C., & Yanagida, S. (2010). Novel Counter Electrode V2O5/Al for Solid Dye-Sensitized Solar Cells. *American Chemical Society Applied Materials & Interfaces*, 2(7), 2136-2139. <https://doi.org/10.1021/am100380w>

- [28] Jiang, Q. W., Li, G. R., Liu, S., & Gao, X. P. (2010). Surface-Nitrided Nickel with Bifunctional Structure As Low-Cost Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(31), 13397-13401. <https://doi.org/10.1021/jp1035184>
- [29] Levy, R. B., & Boudart, M. (1973). Platinum-Like Behavior of Tungsten Carbide in Surface Catalysis. *Science*, 181(4099), 547-549. <https://doi.org/10.1126/science.181.4099.547>
- [30] Jiang, Q. W., Li, G. R., & Gao, X. P. (2009). Highly ordered TiN nanotube arrays as counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Chemical Communications*, 44(44), 6720-6722. <https://doi.org/10.1039/B912776C>
- [31] Chung, I., Lee, B., He, J., Chang, R. P. H., & Kanatzidis, M. G. (2012). All-solid-state dye-sensitized solar cells with high efficiency. *Nature*, 485(7399), 486-489. <https://doi.org/10.1038/nature11067>
- [32] Artuso, E., Barolo, C., Bessho, T., Zhang, Y., Barbero, N., Nazeeruddin Md, K., Viscardi, G., & Graetzel, M. (2008, October 27-29). *Synthesis and characterization of new polypyridyl ruthenium photosensitizers for DSCs*. Joint International Centre for Theoretical Physics-The Kuwait Foundation for the Advancement of Sciences Workshop on Nanoscience for Solar Energy Conversion, Miramare - Trieste, Italy. <https://iris.unito.it/handle/2318/63572>
- [33] Jasim, K. E., Al-Dallal, S., & Hassan, A. M. (2012). Henna (*Lawsonia inermis* L.) Dye-Sensitized Nanocrystalline Titania Solar Cell. *Journal of Nanotechnology*, 2012, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2012/167128>