



بررسی خواص فوتوولتاییک سلول‌های خورشیدی بر پایه مخلوط مواد رنگزای ایندولینی

مژگان حسین‌نژاد^{۱*}، سیامک مرادیان^{۲،۳}، کمال‌الدین قرنجیگ^۴

۱- استادیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- استاد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۳- دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۴- قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۱۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰

چکیده

در این تحقیق، سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای آلی دو لایه بر پایه مواد رنگزای ایندولینی معرفی می‌شود. خواص طیف‌سنجی مخلوط محلول مواد رنگزا و در حالت جذب شده بر روی لایه دی‌اکسید تیتانیم به منظور تعیین تغییرات در طول موج‌های جذب بررسی گردید. ویژگی‌های الکتروشیمیایی هر یک از مخلوط‌ها بررسی شد. اندازه‌گیری‌های پتانسیل اکسایش برای تمام مخلوط‌ها نشان دهنده انتقال ترمودینامیکی الکترون تهییج یافته به باند هدایت لایه دی‌اکسید تیتانیم است. در نهایت سلول خورشیدی با استفاده از مخلوط مواد رنگزا تهیه گردید تا خواص فوتوولتاییک و بازده تبدیل هر یک از آنها تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی حساس شده به ماده رنگزا، ایندولین، مخلوط مواد رنگزا، بازده تبدیل، خواص فوتوولتاییک.

Investigation of Photovoltaic Properties of Dye-Sensitized Solar Cells Based on Mixture of Indoline Dyes

M. Hosseinnzhad^{1*}, S. Moradian^{2,3}, K. Gharanjig^{1,3}

¹ Department of Organic Colorants, Institute of Color Science and Technology, P.O. Box 16656118481, Tehran, Iran

² Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

³ Center of Excellence for Color Science and Technology, Institute of Color Science and Technology, P. O.Box: 16656118481, Tehran, Iran.

Received: 13-04-2014

Accepted: 01-09-2015

Available online: 10-03-2016

Abstract

This research describes a double layered dye sensitized solar cells by using organic dyes based on indoline. Spectrophotometric evaluations of the mixtures of dyes in solution and on a TiO₂ substrate were carried out in order to assess changes in the status of the dyes. Additionally, electrochemical properties of each mixture of dyes were investigated. Oxidation potential measurements for all of mixture ensure a thermodynamically favorable charge transfer to the TiO₂ conduction band. Finally, dye sensitized solar cells are fabricated in order to determine the photovoltaic behaviour and conversion efficiencies of each mixture. *J. Color Sci. Tech.* 9(2016), 307-312©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Dye-sensitized solar cells, Indoline, Dye mixture, Conversion efficiencies, Photovoltaic properties.

۱- مقدمه

خورشیدی بر پایه مواد رنگزای طبیعی است. برای مثال کومارا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ از مخلوط یک ماده رنگزای طبیعی بر پایه آنتوسیانین و یک ماده رنگزای آلی بر پایه تیوفن به بازده ۱.۵۵٪ دست یافتند در حالی که بازده این ماده رنگزای طبیعی به صورت انفرادی ۰.۱۷٪ بود. بنابراین استفاده از تکنیک مخلوط مواد حساس به نور با افزایش گستره جذب، سبب بهبود بازده تبدیل سلول خورشیدی می‌گردد [۱].

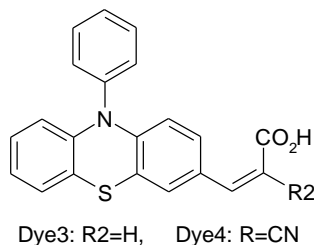
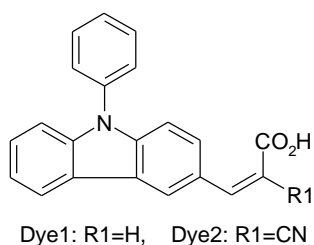
در این تحقیق از چهار ماده رنگزای آلی بر پایه ایندولین که روش سنتز و خالص‌سازی آنها قبلاً منتشر شده است استفاده شد [۱۰]. در این مواد رنگزا N-فنیل کربازول و N-فنیل فنوتیازین به عنوان بخش الکترون‌دهنده و آکرلیک اسید و سیانوآکرلیک اسید به عنوان واحد الکترون‌گیرنده استفاده گردید (شکل ۱). خواص جذبی در حلال و در حالت جذب شده بر روی لایه دی‌اکسید تیتانیوم و ویژگی‌های نشری مخلوط‌ها در حلال مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. سپس پتانسیل اکسایش هریک از مخلوط‌ها با استفاده از روش ولتامتری چرخه‌ای تعیین شده و صحت مخلوط‌های مورد نظر برای کاربرد در سلول خورشیدی بررسی می‌گردد. در نهایت مخلوط مواد رنگزای خالص‌سازی شده در ساختار سل خورشیدی نانو ساختار اعمال گردیده و خواص فوتولتاییک و بازده تبدیل هر یک از مخلوط‌ها تعیین شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

مواد رنگزای مورد استفاده در این تحقیق طبق روش استاندارد گزارش شده تهیه و خالص‌سازی گردیدند [۱۰]. حلال‌ها و مواد مصرفی همه از نوع آزمایشگاهی و از شرکت مرک تهیه گردید. برای بررسی مشخصات جذبی و نشری مخلوط مواد رنگزا به ترتیب از دستگاه طیف‌سنج در ناحیه مرئی-فرابنفش Double beam CECIL 9200 و دستگاه فلورومتر Ocean Optics Usb2000flg استفاده گردید. منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ هر سلول تحت روشنایی، با استفاده از یک شبیه‌ساز خورشیدی با شدت 1000 W/m^2 و دستگاه مشخصه‌یاب جریان-ولتاژ (Cassy-e 524000) اندازه‌گیری شد.

امروزه سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به مواد رنگزا به دلیل مزایای متعدد از قبیل قیمت پایین، عدم آلاینده‌گی محیط زیست و کار در شرایط ملایم مورد توجه قرار دارند. بالاترین بازده عملکرد برای این افزارها در حدود ۱۲٪ می‌باشد که در این سلول‌ها از کمپلکس‌های آلی-معدنی به عنوان تولیدکننده جریان استفاده شده است [۱]. سلول‌های خورشیدی تهیه شده با کمپلکس‌های آلی-معدنی دارای محدوده جذب وسیع و بازده تبدیل بالا هستند اما نقص بزرگ آنها قیمت بسیار بالای این ترکیبات است [۲]. بنابراین ساختارهای عاری از فلزی که علاوه بر قیمت پایین دارای بازده تبدیل بالا نیز باشند مورد تحقیق و توسعه قرار گرفته‌اند [۳]. انواع متنوعی از ساختارها مانند کومارین‌ها، تیوفن‌ها، ایندولین‌ها و غیره به عنوان مواد حساس به نور در سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شوند [۴]. دو ویژگی مهم یک ماده حساس به نور با قابلیت کاربرد در سلول خورشیدی، طیف جذب پهن و ثبات نوری بالا است [۵] اما سلول خورشیدی بر پایه مواد رنگزای انفرادی تنها محدوده باریکی از طیف نور خورشیدی را جذب می‌کنند. امروزه نه تنها هیچ ماده رنگزای حساس به نور، با پوشش کامل نور مرئی و زیر قرمز تهیه نشده است بلکه اغلب مواد رنگزای آلی دارای طیف جذبی باریکی بوده که سبب کاهش توانایی جذب فوتون و در نتیجه کاهش بازده تبدیل می‌شود [۶]. یکی از راه‌حل‌های برطرف نمودن این نقص استفاده از مخلوط دو و یا تعداد بیشتر از ماده رنگزای آلی به منظور افزایش طیف جذب نور است [۷]. از آنجاکه ضریب جذب مولار مواد رنگزای آلی بالاتر از کمپلکس‌های آلی-معدنی است، بنابراین می‌توان با استفاده از مقدار بسیار کمتر از مواد رنگزای آلی به چگالی نوری مناسب دست یافت، در نتیجه با کاربرد مخلوط مواد رنگزای آلی امکان دستیابی به طیف جذبی کامل با ضریب جذب مولار بالا وجود دارد [۸]. اولین بار در سال ۲۰۰۳ سایاما و همکارانش یک سلول خورشیدی با استفاده از مخلوط مواد رنگزای آلی بر پایه سیانین و مرو سیانین تهیه کرده و بازده تبدیل ۳٪ را برای آن گزارش نمودند [۹]. یکی از بهترین نتایج مربوط به سلول خورشیدی تهیه شده توسط کانگت و همکارانش با استفاده از مخلوط مواد رنگزای آلی بر پایه تیوفن است که بازده تبدیل ۷٪ برای آن گزارش شده است [۶]. یکی از کاربردهای مهم این رویکرد در بهبود عملکرد سلول‌های



شکل ۱: مواد رنگزای مورد استفاده.

۲-۲-۲- روش کار

۲-۲-۱- بررسی ویژگی‌های جذبی و نشری مواد رنگزای سنتز شده

برای تعیین ویژگی‌های جذبی و نشری هر یک از مخلوط مواد رنگزا از روش‌های طیف‌سنجی در ناحیه مرئی- ماوراء بنفش استفاده شد. برای این منظور محلول ۰.۲ مولار هر یک از مواد رنگزای سنتز شده در استونیتریل تهیه و سپس مخلوط‌هایی با نسبت ۱:۱ از آنها تهیه گردید و پروفیل نوار جذبی و نشری، در نتیجه شکل نوار جذبی، نشری، بیشینه طول موج جذب و نشر برای هر یک از آنها مشخص گردید.

۲-۲-۲- بررسی رفتار الکتروشیمیایی مواد رنگزای سنتز شده

رفتار الکتروشیمیایی مخلوط مواد رنگزای آلی سنتز شده بررسی گردید. پتانسیل اکسایش (E_{ox}) هر یک از مخلوط مواد رنگزا با استفاده از سیستم سه الکترودی شامل الکتروود جیوه به عنوان الکتروود مرجع و سیم پلاتین به عنوان الکتروود کار و الکتروود مخالف اندازه‌گیری گردید. پتانسیل تمام الکتروودها با استفاده از زوج فروسن (Fc) / فروسنیم (Fc^+) کالیبره گردید. محلولی شامل مخلوط مواد رنگزا با نسبت ۱:۱ در استونیتریل، تترابوتیل آمونیم ($0.1 M$) و فروسن ($1 M$) تهیه شد. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی با سرعت اسکن $100 mVs^{-1}$ انجام گردید [۱۰].

۲-۲-۳- ساخت سلول خورشیدی با استفاده از مواد رنگزای سنتز شده

خمیر شفاف نانو بلور دی‌اکسید تیتانیم به روش چاپ اسکرین بر روی شیشه (FTO) اعمال شد و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای $450^{\circ}C$ خشک گردید. فیلم دی‌اکسید تیتانیم با محلول آبی تتراکلرید تیتانیم و غلظت $1 mM$ به روش حمام شیمیایی لایه‌نشانی شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای $450^{\circ}C$ خشک گردید. فیلم خشک شده سپس تا دمای $100^{\circ}C$ سرد شد. الکتروود کار به مدت ۱۸ ساعت در مخلوط مورد نظر از مواد رنگزا غوطه‌ور شده و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در اتانل قرار داده شد تا مواد رنگزای جذب نشده برطرف گردد. الکتروود آند، الکتروود مقابل و یک فیلم Sealing به روش اعمال حرارت مجتمع گردید. یک قطره از محلول الکتروولیت درون حفره ایجاد شده روی الکتروود مخالف ریخته شده و با ایجاد

1- Fluorine doped tin oxide

خلاء، کل سیستم پر شد. در نهایت حفره با یک تکه شیشه اضافی مسدود گردید. عملکرد سلول‌های خورشیدی تهیه شده تحت نور تک‌فام با اندازه غلظت فوتون $5 \times 10^{15} \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ بررسی شد [۱۱].

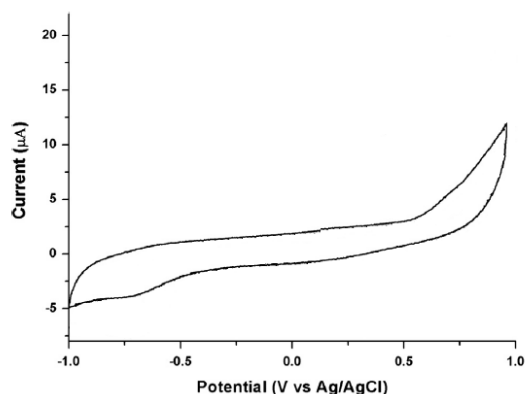
۳- نتایج و بحث

مواد رنگزای آلی Dye1-Dye4 (شکل ۱) مطابق روش تشریح شده در مقاله پیشین [۱۰] با استفاده از N-فنیل کربازول (فنوتیازین) به عنوان گروه الکترون دهنده و آکرلیک اسید و سیانو آکرلیک اسید به عنوان گروه الکترون کشنده تهیه شدند. مواد رنگزای سنتز شده با استفاده از روش کروماتوگرافی صفحه‌ای خالص‌سازی شده و محلول ۰.۲ مولار هر یک از آنها در استونیتریل تهیه می‌شود. سپس مخلوط‌هایی با نسبت ۱:۱ از ماده رنگزای ۱ و مواد رنگزای ۲، ۳ و ۴ تهیه گردید تا خواص جذبی و نشری آنها بررسی شود (جدول ۱). طول موج بیشینه جذب نوار مرئی، فام را مشخص می‌کند و شدت نوار مرئی یا ϵ_{max} قدرت رنگی را تعیین می‌کند. هرچه مقدار ضریب جذب مولی بیشتر باشد قدرت رنگی ماده رنگزا بالاتر است [۱۲]. طول موج بیشینه جذب این مواد رنگزا به صورت انفرادی دارای یک نوار جذبی کم شدت مربوط به جابجایی $\pi \rightarrow \pi^*$ در محدوده $375-300$ نانومتر و یک نوار جذبی در محدوده مرئی مربوط به جابجایی $n \rightarrow \pi^*$ است [۱۰] اما شدت و گستره جذب در مخلوط مواد رنگزا افزایش می‌یابد. سپس ویژگی‌های نشری مخلوط مواد رنگزای Dye1 تا Dye 4 اندازه‌گیری شد (جدول ۱). هرچه مولکول قطبی‌تر باشد ممان دوقطبی بالاتر بوده و برهم‌کنش با حلال قطبی بالاتر رفته و جابجایی استوکس افزایش می‌یابد [۱۳]. نشر فلورسنس به دلیل انتقال بار از گروه الکترون دهنده به گروه الکترون گیرنده است بنابراین هر چه گروه الکترون دهنده، قوی‌تر باشد نشر ساده‌تر انجام شده و طول موج بیشینه نشر جابجایی باتوکرومیک نشان خواهد داد [۱۴]. از مقایسه طول موج بیشینه نشر مخلوط حاوی مواد رنگزای بر پایه پایه کربازول (Dye 1 و Dye 2) با مخلوط حاوی مواد رنگزای بر پایه فنوتیازین (Dye 1 و Dye 3) و (Dye 1 و Dye 4) مشخص شده است مخلوط‌های حاوی مواد رنگزای حاوی جزء فنوتیازین دارای طول موج بیشینه نشر بیشتری می‌باشند که به دلیل اثر الکترون‌دهندگی قوی‌تر اتم گوگرد است [۱۵]. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، طول موج بیشینه جذب مخلوط مواد رنگزای لایه نشانی شده بر روی لایه دی‌اکسید تیتانیم در مقایسه با طول موج بیشینه جذب مخلوط مواد رنگزا در محلول دارای شیفت باتوکرومیک (شیفت قرمز) بوده که ناشی از J-تجمع مواد رنگزا بر روی لایه دی‌اکسید تیتانیم است. طیف جذب مخلوط مواد رنگزای ۱ و ۴ در محلول و در حالت جذب شده بر روی لایه دی‌اکسید تیتانیم و طیف نشری این مخلوط در شکل ۲ آورده شده است.

تمام مخلوط‌های مواد رنگزای سنتز شده قابلیت انتقال الکترون به باند هدایت دی‌اکسید تیتانیوم را دارند. تراز انرژی الکترولیت استفاده شده ۰،۴۷ بوده که برای تامین الکترون انتقال یافته به باند هدایت لایه دی‌اکسید تیتانیوم لازم است تراز انرژی E_{ox} پایین‌تر از این مقدار باشد [۱۹]. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود تمام مخلوط‌ها قابلیت دریافت الکترون از الکترولیت را دارند. از طرف دیگر نمودارهای ولتامتری چرخه‌ای تمام مخلوط‌ها دارای رفتار برگشت پذیر بوده بنابراین فرآیند تهییج الکترونی آنها تکرارپذیر است. در نتیجه این مخلوط‌ها برای کاربرد در سلول خورشیدی مناسب هستند. نمودار ولتامتری چرخه‌ای مخلوط مواد رنگزای ۱ و ۴ در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: نتایج الکتروشیمیایی مخلوط مواد رنگزا.

مواد رنگزا	E_{ox} (V)	E_{red} (V)	E_{o-o} (V)	E_{gap} (V)
Dye 1	۰،۹۳	-۱،۹۱	۲،۸۴	۱،۴۱
Dye 1+ Dye 2	۰،۸۹	-۱،۸۷	۲،۷۶	۱،۳۷
Dye 1+Dye 3	۰،۵۶	-۲،۰۲	۲،۵۸	۱،۴۸
Dye 1+Dye 4	۰،۵۲	-۱،۹۸	۲،۵۰	۱،۴۲



شکل ۳: نمودار ولتامتری چرخه‌ای مخلوط مواد رنگزای ۱ و ۴.

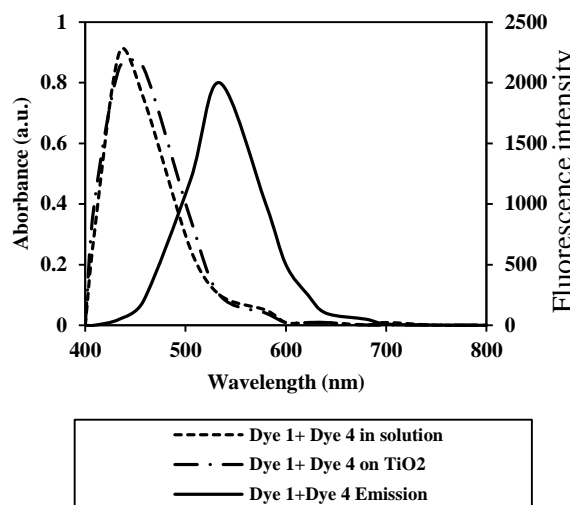
در نهایت سلول‌های خورشیدی نانو ساختار با استفاده از مخلوط مواد رنگزای آلی سنتز شده، به عنوان تولید کننده جریان بر روی لایه نانو بلور دی‌اکسید تیتانیوم آنتاز تهیه شده [۲۰] و رفتار فوتولتاییک آنها بررسی گردیده است. نمودارهای فوتوجریان-فوتولتاز برای سلول‌های خورشیدی تهیه شده از مخلوط مواد رنگزای آلی سنتز شده در شکل ۴ نشان داده شده است و نتایج فتولتاییک در جدول ۳ آورده است. بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکترونیته سلول‌های خورشیدی نانو ساختار (η) مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$\eta = \frac{[J_{sc}(mAcm^{-2})][V_{oc}(V)][FF]}{P_{in}(mWcm^{-2})} \quad (1)$$

که در آن V_{oc} پتانسیل مدار باز، J_{sc} جریان مدار باز و P_{in} شدت نور تابشی است.

جدول ۱: ویژگی‌های جذب و نشری مخلوط مواد رنگزای سنتز شده

مواد رنگزا	λ_{max} (nm) محلول	ϵ_{max} (l $mol^{-1}cm^{-1}$)	λ_F (nm)	λ_{max} (nm) TiO_2
Dye 1	۴۰۹	۲۳۸۹۸	۵۱۰	۴۱۵
Dye 1+ Dye 2	۴۱۱	۲۴۱۳۸	۵۱۹	۴۲۳
Dye 1+ Dye 3	۴۲۸	۲۴۶۳۲	۵۲۶	۴۴۵
Dye 1+ Dye 4	۴۳۴	۲۵۱۷۸	۵۳۴	۴۵۸



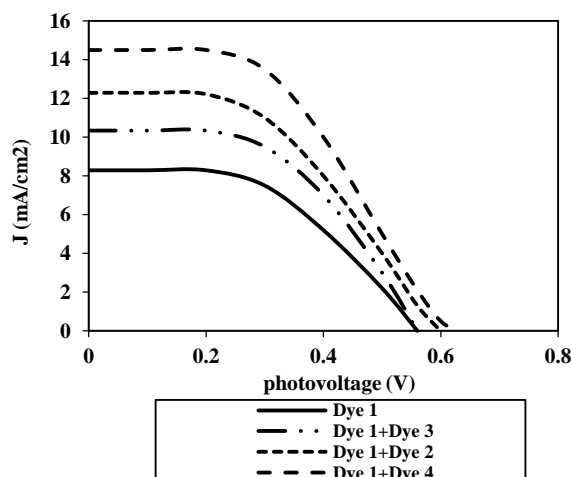
شکل ۲: طیف جذب و نشر مخلوط مواد رنگزای ۱ و ۴.

رفتار الکتروشیمیایی مخلوط مواد رنگزای آلی سنتز شده بررسی گردید. پتانسیل اکسایش حالت پایه (E_{ox}) هر یک از مخلوط‌ها با استفاده از اطلاعات نمودار ولتامتری چرخه‌ای به دست آمد. برای به دست آوردن این نمودارها از سیستم سه الکترودی شامل الکترودی کار و جیوه به عنوان الکترودی مرجع و سیم پلاتین به عنوان الکترودی کار و الکترودی مخالف استفاده گردید. پتانسیل تمام الکترودها با استفاده از زوج فروسن (Fc)/فروسینیم (Fc^+) کالیبره شد [۱۶]. محلولی شامل مخلوطی با نسبت ۱:۱ از مواد رنگزا در استونیتریل، تتراپوتیل آمونیم (۰،۱ M) و فروسن (۱ M) تهیه شد. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی با سرعت پویش $100 mVs^{-1}$ انجام شد. پتانسیل اکسایش حالت پایه (E_{ox}) در واقع انرژی بالاترین تراز الکترونی پر شده می‌باشد. پس از تعیین E_{o-o} هر یک از مخلوط‌ها، مقدار E_{red} محاسبه گردید. پتانسیل کاهش (E_{red}) در واقع انرژی پایین‌ترین تراز الکترونی خالی است [۱۷]. نتایج الکتروشیمیایی هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۲ آورده شده است. کمترین مقدار موثر E_{gap} برای انتقال الکترون به لایه دی‌اکسید تیتانیوم ۰،۲۷ است و بیشتر بودن آن نشان‌دهنده آن است که الکترون تهییج یافته به راحتی و به صورت ترمودینامیکی به باند هدایت دی‌اکسید تیتانیوم انتقال می‌یابد [۱۸]. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود

خالی و در نتیجه تسهیل در انتقال الکترون به باند هدایت دی‌اکسید تیتانیم است [۲۲]. مخلوط‌های دارای گروه سیانواکرلیک اسید به دلیل حضور الکترون‌کشنده قوی سیانو دارای بازده تبدیل بالاتری نسبت به مخلوط‌های مشابه بدون گروه سیانو هستند [۲۳]. مخلوط‌های (Dye 1+Dye 2) و (Dye 1+Dye 4) در سلول خورشیدی دارای بازده تبدیل بالاتری نسبت به مخلوط (Dye 1+Dye 3) هستند. استفاده از مخلوط مواد رنگزا یک روش نسبتاً جدید برای افزایش محدوده جذب مواد رنگزای آلی در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است. با افزایش محدوده جذب، تعداد فوتون‌های نور ورودی به سلول خورشیدی بالاتر رفته و در نتیجه تعداد الکترون‌های تهییج یافته افزایش می‌یابد، بنابراین بازده تبدیل نیز بهبود می‌یابد [۱]. نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که بیشترین بازده تبدیل مربوط به مخلوط مواد رنگزای Dye 1+Dye 4 است. این مخلوط دارای بازده تبدیل ۶,۱۱٪ است، از آنجایی که مخلوط مواد رنگزای به کار رفته سبب افزایش محدوده جذب نسبت به حالت انفرادی ماده رنگزای Dye 4 در سلول خورشیدی می‌گردد، بازده تبدیل آن بالاتر از ماده رنگزای Dye 4 انفرادی بوده و عملکرد سلول خورشیدی بهبود می‌یابد. نتایج بدست آمده با مقالات منتشر شده مطابقت دارد. برای مثال کومارا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ مطالعاتی بر روی مخلوط دو ماده رنگزای طبیعی بر پایه آنتوسیانین در سلول خورشیدی انجام دادند. نتایج نشان داد که بازده تبدیل سلول خورشیدی برپایه مواد رنگزای انفرادی ۰,۱۷٪ و ۰,۹۶٪ است در حالی که سلول خورشیدی تهیه شده از مخلوط این مواد رنگزا دارای عملکرد بهتری با بازده ۱,۵۵٪ است [۱]. بیشترین بازده تبدیل وقتی به دست می‌آید که از مخلوط مواد رنگزای آلی با فام‌های مکمل استفاده شود زیرا در این حالت محدوده طول موج جذب گسترده‌تر خواهد بود و تعداد فوتون‌های ورودی افزایش بیشتری خواهد داشت [۵]. برای مثال در سال ۲۰۱۳ چانگ و همکارانش، مخلوط دو ماده رنگزای آلی بر پایه ایندولین و تیوفن را در سلول خورشیدی مورد مطالعه قرار دادند. بازده تبدیل سلول خورشیدی تهیه شده از ماده رنگزای آلی بر پایه ایندولین و تیوفن به صورت انفرادی به ترتیب ۳,۹۸٪ و ۵,۳۱٪ است در حالی که بازده تبدیل سلول خورشیدی تهیه شده از مخلوط آنها دارای بازده ۶,۲۴٪ است [۲۴].

۴- نتیجه‌گیری

چهار ماده رنگزای آلی بر پایه ایندولین با استفاده از N-فنیل کربازول (فنوتیازین) به عنوان گروه الکترون‌دهنده و آکرلیک اسید و سیانواکرلیک اسید به عنوان گروه الکترون‌گیرنده تهیه و خالص‌سازی شدند. مخلوط‌هایی با نسبت ۱:۱ از مواد رنگزای تهیه شد. خواص طیف‌سنجی جذبی و نشری مخلوط مواد رنگزا سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مخلوط مواد رنگزای سنتز شده در فاز



شکل ۴: نمودارهای فوتوجریان-فوتولتاژ سل‌های خورشیدی نانوساختار تهیه شده.

مشخصه V_{OC} پتانسیل مدار باز است که نشان‌دهنده حرکت الکترون بین لایه دی‌اکسید تیتانیم/ماده رنگزا/الکترولیت است. ولتاژ از V_{OC} تا صفر جاروب می‌شود تا جریان که همان پلاریزاسیون خطی است، به دست آید. از تقسیم جریان به دست آمده بر مساحت موثر چگالی جریان به دست می‌آید. مساحت موثر حداکثر مساحت سلول خورشیدی بوده که نور را جذب و الکترون تولید می‌کند. تمام این اندازه‌گیری‌ها تحت تابش نور AM ۱,۵ انجام شده زیرا طیف این نور منطبق بر طیف نور خورشید می‌باشد تا عملکرد سلول خورشیدی مشابه زمانی باشد که در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد [۲۱].

جدول ۳: نتایج فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی نانوساختار بر پایه مخلوط مواد رنگزای ایندولینی.

مواد رنگزا	V_{OC} (V)	J_{sc} (mA.cm ⁻²)	FF (%)	η (%)
Dye 1	۰,۵۶	۸,۲۹	۰,۶۴	۲,۹۸
Dye 1+Dye 2	۰,۶۰	۱۲,۴۵	۰,۶۴	۴,۷۲
Dye 1+Dye 3	۰,۵۸	۱۰,۳۴	۰,۶۳	۴,۵۵
Dye 1+Dye 4	۰,۶۳	۱۵,۱۵	۰,۶۴	۶,۱۱

بازده تبدیل مواد رنگزای سنتز شده در سلول خورشیدی به صورت انفرادی عبارتند از: $\eta_{Dye1} = ۲,۹۸\%$ ، $\eta_{Dye2} = ۴,۷۲\%$ ، $\eta_{Dye3} = ۴,۵۵\%$ و $\eta_{Dye4} = ۶,۱۱\%$. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، استفاده از مخلوط مواد رنگزا سبب بهبود بازده تبدیل می‌شود. افزایش ماده رنگزای حاوی جزء فنوتیازین در مخلوط مواد رنگزای Dye 1+Dye 3 سبب افزایش بازده تبدیل نسبت به حالت انفرادی ماده رنگزای Dye 1 می‌شود. این پدیده به دلیل کاهش اختلاف انرژی بالاترین تراز پرشده الکترونی و پایین‌ترین تراز الکترونی

استفاده از مخلوط مواد رنگزای آلی بر پایه ایندولین به عنوان تولیدکننده جریان، بر روی لایه نانو کریستال دی اکسید تیتانیم آنتاز تهیه شده و رفتار فوتولتاییک آنها بررسی گردید. حضور ماده رنگزای دارای گروه فنوتیازین و یا گروه سیانواکریلیک اسید در مخلوط ماده رنگزا سبب افزایش بازده تبدیل می گردد بنابراین مخلوط 4 Dye 1+Dye که دارای هر دو عامل است بالاترین بازده (۵۸٪) را نشان می دهد. در مجموع استفاده از مخلوط مواد رنگزا به دلیل افزایش گستره طول موج جذب نور خورشید توسط ماده حساس به نور سبب افزایش بازده تبدیل سلول خورشیدی می گردد.

حلالی دارای بیشینه طول موج جذب در حدود ۴۰۹ تا ۴۳۴ و ضریب جذب مولار آن‌ها ۲۳۸۹۸ تا ۲۵۱۷۸ لیتر بر مول سانتی متر است. بیشینه طول موج نشر مواد رنگزای سنتز شده در حدود ۵۱۰ تا ۵۳۴ نانومتر است که مخلوط‌های دارای مواد رنگزای حاوی فنوتیازین دارای طول موج بیشینه نشر بیشتری می باشند که به دلیل اثر الکترون دهنده قوی تر اتم گوگرد است. رفتار الکتروشیمیایی مخلوط مواد رنگزای آلی سنتز شده، بررسی گردید و مشخص شد که تمام مخلوط‌های مواد رنگزا قابلیت انتقال الکترون به باند هدایت دی اکسید تیتانیم و در نتیجه قابلیت کاربرد در سلول خورشیدی را دارند. سلول‌های خورشیدی نانو ساختار با

۵- مراجع

1. N. Kumara, P. Ekanayake, A. Lim, L. Liew, M. Iskandar, L. Ming, G. Senadeera, Layered co-sensitization for enhancement of conversion efficiency of natural dye sensitized solar cells. *J. Alloys Compound*. 581(2013), 186-191.
2. B. O'Regan, M. Grätzel, A low cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*. 353(1991), 737-740.
3. M. Hosseinnzhad, S. Moradian, K. Gharanjig, Synthesis and characterization of two new organic dyes for dye-sensitized solar cells. *Synthetic Commun*. 44(2014), 779-787.
4. M. Hosseinnzhad, S. Moradian, K. Gharanjig, Synthesis and application of two organic dyes for dye-sensitized solar cells. *Prog. Color. Colorants. Coat*. 6(2013), 109-107.
5. L. Lin, M. Yeh, C. Lee, J. Chang, A. Baheti, R. Vittal, K. R. Thomas, K. Ho, Insights into the co-sensitizer adsorption kinetics for complementary organic dye-sensitized solar cells. *J. Power Source*. 247(2014), 906-914.
6. D. Kuang, P. Walter, F. Nüesch, S. Kim, J. Ko, P. Comte, S. M. Zakeeruddin, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, Co-sensitization of organic dyes for efficient ionic liquid electrolyte-based dye-sensitized solar cells. *Langmuir*. 23(2007), 10906-10909.
7. J. J. Cid, J. H. Yum, S. R. Jang, M. K. Nazeeruddin, E. Martinez Ferrero, E. Palomares, J. Ko, M. Grätzel, T. Torres, Molecular co-sensitization for efficient panchromatic dye-sensitized solar cells. *Angew. Chem. Int. Ed*. 46(2007), 8358-8362.
8. A. Burke, L. S. Mende, S. Ito, M. Grätzel, A novel blue dye for near-IR 'dye-sensitized' solar cell applications. *Chem. Commun*. 2007, 234-236.
9. K. Sayama, S. Tsukagoshi, T. Mori, K. Hara, Y. Ohga, A. Shinpou, Y. Abe, S. Suga, H. Arakawa, Efficient sensitization of nanocrystalline TiO₂ films with cyanine and merocyanine organic dyes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 80(2003), 47-71.
10. M. Hosseinnzhad, S. Moradian, K. Gharanjig, F. Afshar Taromi, Synthesis and characterization of eight organic dyes for dye sensitized solar cells. *Material Technol*. 29(2014), 112-117.
11. M. Hosseinnzhad, K. Gharanjig, S. Moradian, Effect of anti-aggregation agent on photovoltaic performance of indoline sensitized solar cells. *Material. Technol*. 29(2014), 189-192.
12. M. Hosseinnzhad, A. Khosravi, K. Gharanjig, S. Moradian, The synthesis, application and investigation properties of two new acid dyes based on naphthalimide. *J. Color. Sci. Tech*. 4(2011), 233-243.
13. H. Shaki, K. Gharanjig, S. Rouhani, A. Khosravi, Synthesis and photophysical properties of some novel fluorescent dyes based on naphthalimide derivatives. *J. Photoch. Photobio. A*. 216(2010), 44-52.
14. K. Gharanjig, M. Sadeghi-Kiakhani, Investigation of dissolution of an azo naphthalimide disperse dye containing carboxylic acid group in the presence of anionic and nonionic dispersing agents. *J. Color Sci. Tech*. 4(2010), 133-142.
15. T. Wu, M. Tsao, F. Chen, S. Su, C. Chang, H. Wang, Y. Lin, W. Yang, I. Sun, Synthesis and characterization of organic dyes containing various donors and acceptors. *Int. J. Mol. Sci*. 11(2010), 329-353.
16. D. Andrienko, *Cyclic voltammetry*, John Wiley & Sons pub., New York. 2008, 3-12.
17. Y. Wang, H. Yang, L. Lu, Three-dimensional double deck mesh like dye sensitized solar cells. *J. Appl. Phys*. 108(2010), 64510-64516.
18. G. Hallas, A. D. Towns, Dyes derived from aminothiophenes. *Dyes. Pigm*. 33(1997), 319-336.
19. P. Wang, S. Zakeeruddin, P. Comte, R. Humphry, M. Gratzel, Enhance the performance of dye-sensitized solar cells by co-grafting amphiphilic sensitizer and hexadecylmalonic acid on tio₂ nanocrystals. *J. Phys. Chem. B*. 107 (2003) 14336.
20. M. Matsui, T. Fujita, Y. Kubota, Funabiki, J. Jin, T. Yoshida, H. Miura, Substituent effects in a double rhodanine indoline dye on performance of zinc oxide dye-sensitized solar cell. *Dyes Pigm*. 86(2010), 143-148
21. M. Matsui, T. Fujita, Y. Kubota, K. Funabiki, J. Jin, T. Yoshida, H. Miura, The use of indoline dyes in a zinc oxide dye-sensitized solar cell. *Dyes Pigm*. 80(2009), 233-238.
22. S. S. Park, Y. S. Won, Y. C. Choi, J. H. Kim, Molecular design of organic dyes with double electron acceptor for dye-sensitized solar cell. *Energ Fuel*. 23(2009), 3732-3736.
23. J. Chang, C. Lee, D. Kumar, P. Chen, L. Lin, K. R. Thomas, K. Ho, Co-sensitization promoted light harvesting for organic dye-sensitized solar cells using unsymmetrical squaraine dye and novel pyrenoimidazole-based dye. *J. Power Source*. 240(2013), 779-785.