

## ساخت و ارزیابی الکتروشیمیایی سل خورشیدی رنگینه‌ای حساس شده با رنگینه استخراجی از چای ترش بر پایه الکترودهای تیتانیم دی اکسید نانو ساختار

سید احمد مظفری<sup>۱\*</sup>، مهسا سعیدی<sup>۲</sup> و رضا رحمانیان<sup>۳</sup>

۱- استادیار شیمی تجزیه، آزمایشگاه نانو فناوری و لایه نازک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی کاربردی، واحد شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری شیمی تجزیه، آزمایشگاه نانو فناوری و لایه نازک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

دریافت: مرداد ۱۳۹۳، بازنگری: اسفند ۱۳۹۳، پذیرش: خرداد ۱۳۹۴

**چکیده:** سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای با استفاده از خاصیت رنگینه‌ها برای جذب انرژی فوتون و آزاد کردن الکترون و نفوذ و انتقال آن بین دو الکتروود آند و کاتد برای تولید انرژی الکتریکی به کار گرفته می‌شوند. از آنجایی که رنگینه‌های طبیعی به دلیل ارزانی قیمت و قابلیت دسترسی بالا و کارایی مناسب، جایگزین مناسبی برای رنگینه‌های سنتزی گران قیمت است، در پژوهش حاضر از رنگینه‌های طبیعی مانند آنتوسیانین به عنوان ماده حساس کننده برای ساخت سلول خورشیدی رنگینه‌ای استفاده شد. برای ساخت الکتروود آند و کاتد به ترتیب از نانو ذرات تیتانیم دی‌اکسید و نانو ذرات پلاتین بر روی بستری از شیشه‌های شفاف و رسانای اکسید قلع آلیپیده شده با فلئور و هم‌چنین از زوج ردوکس ید- یداید به عنوان الکتروولیت استفاده شد. منبع طبیعی چای ترش به منظور تهیه رنگینه طبیعی برای ساخت سلول خورشیدی انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. استخراج و خالص سازی رنگینه طبیعی با استفاده از حلال و ستون استخراج با فاز جامد انجام شد. با بررسی الکتروشیمیایی سل ساخته شده، نحوه عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت و مقدار جریان مدار کوتاه ( $I_{sc}$ )، ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ )، بازدهی سل ( $\mu$ ) و فاکتور پرکنندگی (FF) به ترتیب  $0.72$  mA/cm<sup>2</sup>،  $0.41$  mV،  $0.10$  و  $0.72$  محاسبه شد.

**واژه‌های کلیدی:** سل خورشیدی رنگینه‌ای، آنتوسیانین، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، رنگینه طبیعی، چای ترش

### مقدمه

جایزه هزاره فناوری<sup>۴</sup> را به خاطر کشف بزرگش دریافت کرد [۱]. نیم رساناها به‌طور معلوم در معرض تابش نور، پایداری خوبی دارند. اما بیشتر این نیم رساناها به علت شکاف انرژی به نسبت زیادی که دارند، نمی‌توانند نور مرئی را به اندازه کافی جذب کنند. بنابراین، نیم‌رساناهایی همچون  $ZnO$  و  $TiO_2$  با پوششی از رنگینه‌های آلی می‌توانند طیف کوچکی از نور مرئی خورشید

سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای (DSSC)<sup>۱</sup> در واقع جزء سلول‌های ارزان قیمتی هستند که به گروه سلول‌های خورشیدی لایه نازک<sup>۲</sup> تعلق دارند. درگذشته این نوع سلول‌ها به عنوان سلول‌های گراتزل<sup>۳</sup> شناخته می‌شدند، زیرا به وسیله ی گراتزل در سال ۱۹۹۱ میلادی کشف شدند. گراتزل در سال ۲۰۱۰ میلادی

1. Dye-Sensitized Solar Cells

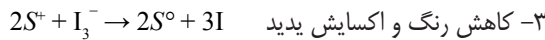
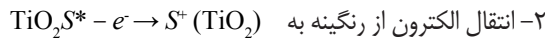
2. Thin Film Solar Cell

3. Gratzel Cell

4. Millennium Technology

می‌شود. ولتاژ تولید شده متناسب با اختلاف سطح فرمی الکترون در نیم رسانا و پتانسیل ردوکس الکترولیت است. واکنش‌های شیمیایی درون سلول را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [۴].

الف- در الکتروود فوتوآند:

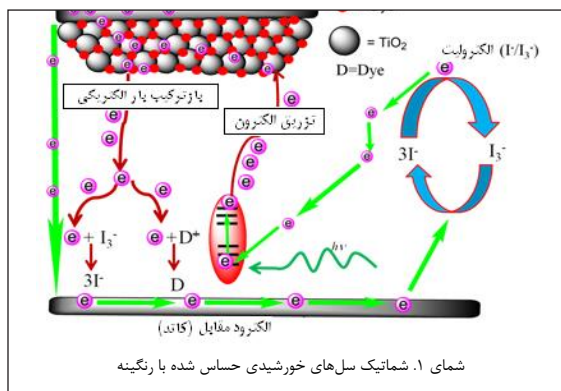


ب- در الکتروود مقابل:



در فوتوالکتروود  $S^{\circ}$  حالت پایه رنگینه،  $S^{*}$  حالت برانگیخته رنگینه،  $S^{+}$  حالت کاتیونی رنگینه است.

در سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای، تهییج الکترونی به وسیله مولکول رنگ و انتقال جریان از طریق تیتانیم دی اکسید انجام می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱. شماتیک سل‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه

در قلب سامانه، لایه‌ای متخلخل از ذرات نانومتری وجود دارد، ماده انتخابی به طور معمول  $TiO_2$  است. اکسیدهای دیگر با شکاف انرژی مشابه، مانند  $ZnO$ ،  $Nb_2O_5$  و  $SnO_2$  نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۵ تا ۹]. جنس الکتروودها در سل خورشیدی رنگینه‌ای از جنس شیشه است امکان استفاده از پلیمرهای رسانا

را جذب کنند و در سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای به کار روند. اگر نیم رساناهای مورد استفاده در فوتوالکتروودها، تک و یا چند بلوری باشند، توانایی جذب رنگینه در آن‌ها کاهش یافته لذا میزان نور جمع آوری شده (LHE) و در نتیجه بازده تبدیل نور به جریان کاهش می‌یابد. برای افزایش مقدار نور جمع آوری شده و عملکرد این سلول‌ها می‌توان از دو روش استفاده کرد: (۱) افزایش سطح موثر فوتوالکتروود به منظور افزایش جذب مقادیر بیشتری از رنگینه (۲) ساخت رنگینه‌هایی که بازه وسیعی از نور مرئی را جذب کنند. استفاده از الکتروودهای  $TiO_2$  با تخلخل نانومتری باعث جذب مقدار بیشتری از رنگینه‌ها بر روی سطح الکتروود می‌شود. هم چنین رنگینه‌هایی با کمپلکس روتنیم در محیط آلی که توانایی جذب نور در طول موج ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتری را دارند، باعث پیشرفت چشمگیری در عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای شده است. گراتزل و همکارانش در سوئیس موفق به تولید سلول‌های خورشیدی رنگینه با بازده ۷ تا ۱۰ درصد تحت نور در AM (توده هوا) برابر با ۱٫۵ شدند [۲]. این سلول‌های خورشیدی متشکل از نانو ذرات  $TiO_2$ ، رنگینه‌ای با کمپلکس روتنیم و الکترولیت اکسایش-کاهش‌ی است.

از آن زمان تلاش‌های زیادی برای بهینه سازی این سلول‌ها انجام شده که به ساخت سلول‌هایی با بازده بالاتر از ۱۱٪ منتهی شده است [۳]. در این سل‌ها سازوکار به این صورت است که تک لایه‌ای از رنگینه روی سطح فیلم نانوبلوری جذب می‌شود. برانگیختگی نوری رنگینه، به تزریق یک الکترون به تراز رسانش تیتانیم دی اکسید و تولید کاتیون رنگینه منتهی می‌شود (فرایند تزریق). با ورود الکترون از الکترولیت، رنگ احیاء شده و به حالت پایه باز می‌شود (فرایند احیاء رنگینه). الکترولیت، به طور معمول شامل یک جفت اکسایش-کاهش  $I_3^-/I^-$  حل شده در یک حلال آلی است. با این وجود استفاده از حلال‌های دیگری مانند مایعات یونی، الکترولیت‌های ژل و الکترولیت‌های پلیمری نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با ورود الکترون از الکتروود کاند، الکترولیت احیاء شده و مدار الکتریکی با انتقال الکترون در مدار خارجی کامل

حذف ناخالصی‌هایی مانند چربی‌هاست که اتصال رنگینه به سطح  $TiO_2$  را مشکل ساخته و به دلیل انباشته شدن رنگ بر روی سطح  $TiO_2$  بازدهی سل مذکور را پایین می‌آورد. لذا استفاده از این روش بازدهی بیشتری را برای سل مورد نظر به دنبال دارد.

### بخش تجربی

#### روش آزمایش:

افزون بر رنگینه استفاده شده در ساخت سلول و روش‌های خالص‌سازی آن (استخراج با فاز جامد) که بر روی بازده کلی سلول مؤثر است، روش آماده نمودن<sup>۳</sup> زیر لایه‌ی پوشاننده شده با  $TiO_2$  و زیر لایه‌ی پوشاننده شده با پلاتین نیز نکته مهم دیگری در فرایند ساخت سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای است. با استفاده از روش دکتر Blade خمیر  $TiO_2$  بر روی سطح لایه قلع اکسید فلورینه شده پوشش داده شد. اما نکته مهم در به کارگیری این روش ایجاد لایه مناسب و یکنواخت از  $TiO_2$  است، به گونه‌ای که با داشتن مساحت سطحی به اندازه  $0.25 \text{ cm}^2$  استفاده از آن را به عنوان بستر فوتوآند بسیار مناسب می‌سازد. سپس الکتروود مذکور در کوره به میزان ۶۰ دقیقه در دمای  $400^\circ \text{C}$  به منظور حذف ناخالصی‌ها گرما داده شد.

فاصله‌ی بین الکتروود کار و الکتروود مقابل برای تزریق الکتروولیت بسیار حائز اهمیت است. مقدار فاصله‌ی مورد نیاز، با مقدار مایع تزریق شده تعیین می‌شود. افزون بر آن، روش تزریق الکتروولیت به این فضا نیز بازده سل را تعیین می‌کند زیرا تزریق نامناسب ممکن است باعث گیرافتادن حباب‌های هوا درون سلول شود.

برای ساخت سلول از منبع طبیعی چای ترش به عنوان منبع حاوی رنگینه طبیعی استفاده شد. در این بخش ۲۰ گرم از چای ترش را با محلول اتانول، هیدروکلریک اسید با نسبت ۸ به ۲ مخلوط کرده و عمل استخراج با حلال برای مدت ۸ ساعت بر روی همزن صورت گرفت. برای خالص‌سازی محلول رنگینه استخراجی از ستون فاز جامد  $C_{18}$  استفاده شد. مایع استخراجی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. به منظور جذب رنگینه بر روی سطح

نیز که ویژگی انعطاف‌پذیری داشته باشد در سل‌های خورشیدی نیز رو به پیشرفت است. هر چند که به طور معمول از الکترودهای شیشه‌ای رسانا استفاده می‌شود. زیر لایه‌ای که  $TiO_2$  بر روی آن قرار می‌گیرد فوتو آند<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در تهیه سل‌های رنگینه‌ای از رنگینه‌های طبیعی جایگزین رنگینه‌های تجاری و سنتزی روتنیم که بر روی فوتوآند قرار می‌گیرد بهره برده می‌شود. با وجود این که در این سل‌ها بازدهی به نسبت کمی مشاهده می‌شود، اما در واقع استفاده از رنگینه‌های طبیعی به جای رنگینه‌های تجاری از مزایای در دسترس بودن، آسانی روش تهیه، کاهش هزینه‌های ساخت، غیرسمی بودن و زیست سازگار بودن برخوردار است.

به طور معمول حجم حلال مورد نیاز برای شویش کامل آنالیت‌ها، بسیار کمتر از حجم نمونه اصلی است و بدین ترتیب نمونه تغلیظ شده‌ای از آنالیت‌ها به دست می‌آید. باید فرایند بازداری برگشت پذیر باشد تا گونه‌های بازداری شده به آسانی شسته شوند و فاز جامد برای استفاده مجدد آماده شود. استخراج با فاز جامد برای خالص‌سازی آنتوسیانین‌ها در برخی موارد به کار گرفته شده است [۱۰].

معرفی و استفاده از چای ترش به عنوان رنگینه جدید در سل‌های خورشیدی تنها بخشی از نوآوری مطرح شده در این مقاله است افزوده بر آن روش استخراج فاز جامد (SPE)<sup>۲</sup> روش SPE در مقایسه با فرایندهای استخراج تک مرحله‌ای معمولی رنگینه دارای قدرت تفکیک بسیار بیشتری است. استخراج با فاز جامد از یک محیط جاذب برای جداسازی نمونه‌ها بر اساس تفاوت در برقراری تعادل با محیط جاذب بهره می‌برد که از کروماتوگرافی معمولی مشتق شده است. این روش جایگزین مناسب روش استخراج مایع-مایع است. در استخراج فاز جامد آنالیت‌ها از یک فاز مایع به درون یک فاز جامد (سیلیکای متخلخل) انتقال می‌یابند. موادی که به وسیله ذرات جامد استخراج می‌شوند را می‌توان با شست‌وشو با یک حلال مناسب جدا کرد. از دیگر مزیت‌های استفاده از ستون SPE می‌توان به قیمت مناسب، بازدهی بالاتر، ایمنی بیشتر، صحت بالاتر، آلودگی کمتر و تعداد مراحل پایین‌تر استخراج اشاره کرد. اما نکته کلیدی در به کارگیری روش SPE

1. Photo Anode

2. Solid phase extraction

3. Assemble

میلی مولار کلرو پلاتینیک اسید هگزا هیدرات استفاده شد. به ازای هر سانتی متر مربع از سطح باید ۱۰ میکرو لیتر از محلول به سطح ریخته شود. محلول ذکر شده در سه مرحله به زیر لایه افزوده شد. پس از ریختن نمک پلاتین روی سطح رسانا، الکترو د به مدت ۳۰ دقیقه در کوره در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد گرمادهی شد.

### نتیجه‌ها و بحث

سطح تراز انرژی اوربیتال LUMO، اوربیتال HOMO، تراز فرمی الکترو د  $TiO_2$  و انرژی پتانسیل اکسایش- کاهش الکترو لیت از عوامل موثر در کارکرد سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای است. در سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای جریان تولید شده، تحت تاثیر اختلاف انرژی بین تراز LUMO و HOMO رنگینه می‌شود، هر اندازه این متفاوت کم‌تر باشد، توانایی در جذب پرتوهای با طول موج بیشتر در طیف خورشیدی ممکن شده و در نتیجه، جریان ایجاد شده افزایش می‌یابد. در واقع، تراز LUMO رنگینه باید به اندازه‌ی کافی از تراز رسانش  $TiO_2$  بالاتر باشد تا انتقال الکترون به صورت کارآمد انجام شود. جفت شدگی الکترونیکی ذاتی بین LUMO رنگینه و تراز رسانش  $TiO_2$  انتقال الکترون را بهتر می‌کند [۵].

ترکیبات طبیعی مانند میوه‌ها و سبزی‌هایی که دارای رنگ قرمز و بنفش است حاوی آنتوسیانین‌هاست [۱۴ تا ۱۸]. آنتوسیانین‌ها و مشتقات آن‌ها طیف‌های جذبی وسیعی در ناحیه مرئی برای انتقالات الکترونی دارند. بعد از آماده‌سازی محلول‌های استخراجی حاوی آنتوسیانین، با استفاده از دستگاه طیف سنجی -فرابنفش بیشینه طول موج جذبی برای رنگینه استخراجی از چای ترش برابر با ۵۴۶ نانومتر است که در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۴ تا ۱۸].

چای ترش به دلیل دارا بودن رنگینه‌های طبیعی مانند سیانیدین و دلفینیدین [۱۶] به عنوان یکی از منابع طبیعی در تهیه سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای مورد توجه است. گروه‌های OH در سیانیدین و دلفینیدین تشکیل کی‌لیت مناسب و موثر با یون تیتانیوم ( $Ti^{4+}$ ) موجود در فوتوآند را فراهم ساخته و انتقال الکترونی را آسان می‌کند (شکل ۳).

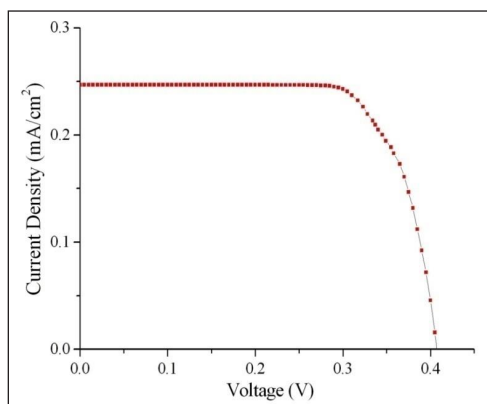
آند سل مورد نظر و برای قرار دادن آند در محلول استخراجی حاوی رنگینه، مدت جذب ۲۴ ساعت برای رنگینه استخراجی از چای ترش در نظر گرفته شد. بعد از آماده‌سازی الکترو د آند، کاتد و ایجاد حفره جهت تزریق الکترو لیت، برای جلوگیری از برخورد دو الکترو د به یکدیگر از یک ورقه پلیمری (سورلین) به عنوان فضا دهنده بهره برده شد. این ورقه پلیمری نه تنها با ایجاد فاصله مانع از تماس دو الکترو د می‌شد بلکه برای آب‌بندی سل نیز به کار می‌رفت. تزریق الکترو لیت از طریق حفره ایجاد شده در کاتد صورت گرفت و پس از اعمال تزریق حفره بسته شد. سل تهیه شده در داخل محفظه مخصوص شبیه‌ساز نور خورشیدی قرار گرفته و نور به آن تابانده می‌شد و از طریق اتصال به دستگاه پتانسیو استات/گالوانو استات مشخصات فوتوالکترونیکی آن بررسی شد.

### الکترو د مقابل (کاتد):

تاکنون انواع متفاوتی از الکترو دهای مقابل از جنس پلاتین، کربن و پلیمرهای رسانا معرفی شده‌اند. الکترو د مقابل را می‌توان با لایه نشانی لایه‌ی نازکی از کاتالیست پلاتین روی زیر لایه‌ی رسانای شیشه‌ای تهیه کرد. بدون پلاتین، شیشه‌ی رسانای قلع اکسید الکترو د مقابل، دارای رسانایی ضعیفی بوده و مقاومت انتقال، بار بزرگی دارد [۱۱]. پلاتین را می‌توان با روش‌های متفاوتی مانند لایه نشانی الکتروشیمیایی [۱۲]، تکافت افشانه‌ای<sup>۲</sup>، بیرون اندازه‌ی<sup>۳</sup> و تبخیر گرمایی [۱۲ و ۱۳] لایه نشانی کرد. بهترین عملکرد و پایداری طولانی مدت با خوشه‌های<sup>۴</sup> نانومتری پلاتین که با تجزیه‌ی گرمایی ترکیبات پلاتین کلرید تهیه می‌شوند، به دست آمده است [۱۲]. در این مورد، مقدار بسیار کمی از پلاتین ( $5 \mu\text{g cm}^{-2}$ ) مورد نیاز است به گونه‌ای که الکترو د مقابل شفاف باقی می‌ماند. فیلم‌های Pt تهیه شده با روش‌های دیگر روی زیر لایه‌ی TCO<sup>۵</sup>، در الکترو لیت  $I_3^-/I^-$  حل شد. بنابراین، به عنوان الکترو د مقابل در سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای مناسب نیستند. برای ساخت الکترو د پلاتین از محلول ۵

1. Solar Simulator      2. Spray Pyrolysis      3. Sputtering      4. Cluster      5. Transparent Conductive Oxide

که زاویه تابش خورشید در آن جا ۴۸٫۲ درجه باشد. این شرایط با وسیله‌ای که نور خورشید را شبیه سازی می‌کند قابل اعمال است. برای مشخصه‌یابی سل ابتدا آن را در تاریکی قرار داده و ولتاژ مدار باز ( $V_{OC}$ ) آن اندازه‌گیری شد. ولتاژ مدار باز، ولتاژ در زمانی است که جریانی وجود ندارد. سپس سل را تحت تابش قرار داده و فوتوجریان ایجاد شده با استفاده از دستگاه پتانسیو استات/گالوانواستات اندازه‌گیری شد. روبش پتانسیل از ولتاژ  $V_{OC}$  شروع شد تا ولتاژ صفر ادامه یافت. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از روبش پتانسیل، نمودار جریان-ولتاژ رسم شد. در شکل ۴ نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ سلول خورشیدی آورده شده است.



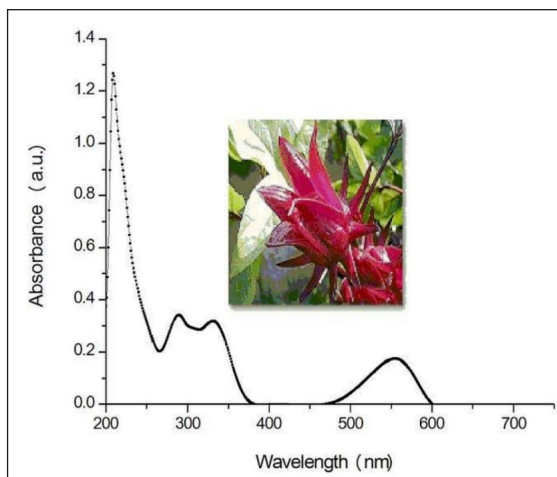
شکل ۴ نمودار جریان-ولتاژ سلول تهیه شده با رنگینه استخراجی از چای ترش بعد از خالص‌سازی

از نمودار شکل ۴ می‌توان ولتاژ مدار باز ( $V_{OC}$ ) و جریان اتصال کوتاه (JSC) را به دست آورد. جریان اتصال کوتاه، چگالی جریان در زمانی است که ولتاژ برابر با صفر باشد. با استفاده از چگالی جریان و ولتاژ بیشینه می‌توان بازدهی سلول ( $\mu$ ) را با استفاده از روابط زیر به‌دست آورد.  $W$ ، بیانگر توان نور ورودی به سلول برحسب وات است. فاکتور پرکنندگی (FF) از تقسیم توان واقعی سلول بر توان نظری سلول قابل محاسبه است.

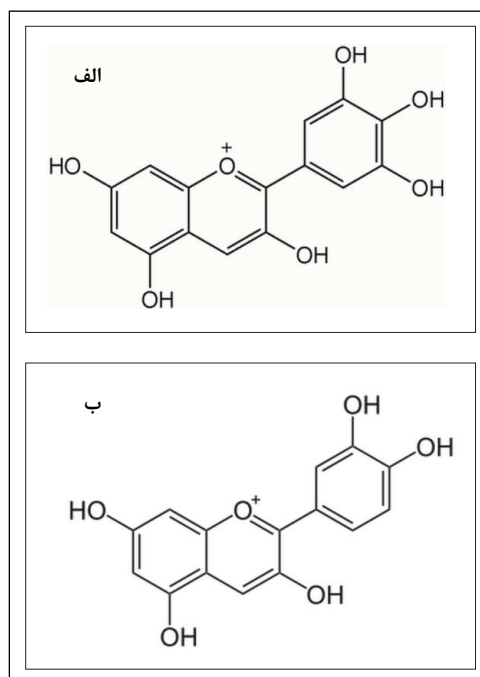
$$\mu = (V_{Max} \times J_{Max}) / 100W \quad (1)$$

$$FF = \mu / (V_{OC} \times J_{SC}) \quad (2)$$

با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از نمودار بالا می‌توان جدولی از مشخصات سل خورشیدی تهیه کرد (جدول ۱).



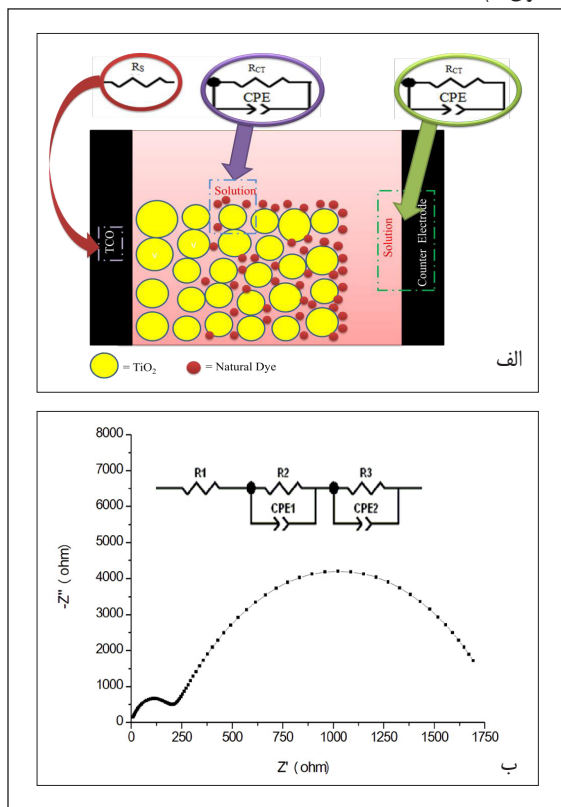
شکل ۲ طیف جذبی رنگینه استخراجی از چای ترش



شکل ۳ (الف) ساختار شیمیایی رنگینه طبیعی دلفینیدین و (ب) رنگینه طبیعی سیانیدین

روش‌های متفاوت برای ارزیابی سلول‌های خورشیدی وجود دارد که در این پژوهش از روش اندازه‌گیری جریان-ولتاژ بهره برده شد. برای اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ احتیاج به شرایط استاندارد ( $AM = 1.5$ ) بود [۱۷] که سلول خورشیدی در این شرایط تحت تابش نور خورشید قرار گیرد.  $AM$  برابر با ۱٫۵، زاویه‌ای است

بازده کم در سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای می‌شود. استفاده از گروه‌های رنگینه‌ای که حاوی گروه عاملی کربوکسیلیک اسید در ساختار خود بوده و بهبود کیفیت و تغلیظ رنگینه‌ای استخراجی با خالص‌سازی موجب افزایش بازده سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای می‌شود [۱۸]. مقاومت درونی اجزای متفاوت سلول، نمودار نایکوئیست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول تهیه شده با رنگینه استخراجی از چای ترش بعد از خالص‌سازی و مدار معادل طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (شکل ۵) نشان داده شده‌اند (جدول ۲).



شکل ۵ الف) مقاومت درونی اجزای متفاوت سلول و ب) نمودار نایکوئیست طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول تهیه شده با رنگینه استخراجی از چای ترش پس از خالص‌سازی و مدار معادل استفاده شده در آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

نمودار توان:

با رسم نمودار توان بر حسب ولتاژ می‌توان بیشینه توان را از روی منحنی استخراج کرد (شکل ۶). این نقطه بیانگر بهترین

جدول ۱ داده‌های فوتوالکتریکی سل خورشیدی ساخته شده با رنگینه استخراجی از چای ترش بعد از خالص‌سازی

رنگینه مصرفی در ساخت سل	$\mu$	FF	$J_{sc}$ (mA/Cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)
رنگینه چای ترش (بعد از خالص‌سازی)	۰٫۱۰	۰٫۷۲	۰٫۲۵	۰٫۴۱

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی:

یکی از کاربردهای ویژه روش امپدانس اندازه‌گیری میزان مقاومت درونی سلول‌های خورشیدی است. به طور کلی نتیجه‌های امپدانس سلول‌های خورشیدی سه ناحیه نیم دایره‌ای را به نمایش می‌گذارد، در فرکانس‌های بالا (بالتر از ۱۰۰ MHz) بر روی محور حقیقی مقاومت  $R_s$  خود را نشان می‌دهد. دو نیم دایره ظاهر شده در ناحیه‌های فرکانس بالا در گستره‌های ۱۰ KHz تا ۱۰۰ MHz و ۱۰۰ Hz تا ۱۰ KHz به ترتیب مربوط به مقاومت انتقال بار و لایه دوگانه مربوط به سطوح الکترولیت/پلاتین و الکترولیت/رنگینه  $TiO_2$  است. ناحیه نیم دایره‌ی بزرگ در ناحیه‌ی فرکانس پایین در حدود ( $< 100$  Hz) مربوط به مقاومت عنصر واربورگ است، که مربوط به جفت اکسایش-کاهش  $(I_3^-/I^-)$  در الکترولیت است. مقاومت انتقال بار به دست آمده برای سطوح الکترولیت/پلاتین به میزان  $200 \Omega$  است و این در حالی است که این مقدار برای الکترولیت/رنگینه  $TiO_2/1650 \Omega$  است [۱۸]. مقدار مقاومت درونی سطوح الکترولیت/پلاتین و الکترولیت/رنگینه  $TiO_2$  در سلول‌های خورشیدی دارای رنگینه‌های گوناگون متفاوت است، که این امر ناشی از تفاوت در پیوند بین  $TiO_2$  و رنگینه است. به طور کلی این مقاومت ناشی از انباشتگی رنگینه‌های استخراجی بر روی سطح  $TiO_2$  است فرایند انباشتگی شدن رنگینه بر روی سطح  $TiO_2$  باعث تشکیل پیوندهای ضعیف با  $TiO_2$  می‌شود که مقدار مقاومت درونی سلول را افزایش می‌دهند. جذب بیشتر رنگینه منجر به جذب بیشتر تابش و تولید الکترون-حفره بیشتر شده و تعداد الکترون‌های منتقل شده به تیتانیم دی اکسید را افزایش می‌دهد. با افزایش مقدار مقاومت درونی سل مقدار JSC کاهش می‌یابد که این امر موجب

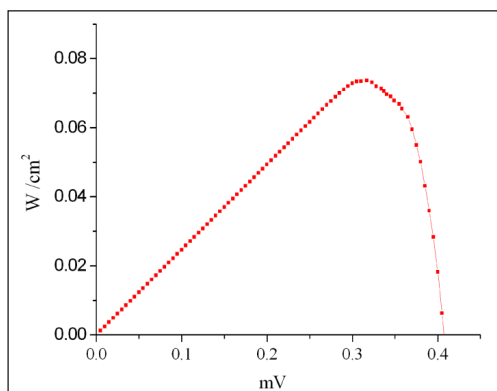
جدول ۲ داده‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سلول خورشیدی ساخته شده با رنگینه استخراجی از چای ترش پس از خالص‌سازی

R1 ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	R2 ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	CPE1-T ( $\text{s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )	CPE1-P	$C_{1dl}$	R3 ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	CPE2-T ( $\text{s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )	CPE2-P	$C_{2dl}$	
۱۰	۲۰۰	$1 \times 10^{-7}$	۰٫۷	$4.05 \times 10^{-16}$	۱۶۵۰	$1 \times 10^{-5}$	۰٫۶	$6.66 \times 10^{-7}$	رنگینه چای ترش (پس از خالص‌سازی)

به سایر سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای متمایز می‌سازد استفاده از روش SPE به منظور خالص‌سازی رنگینه و بهبود جذب رنگ بدون ناخالصی بر سطح  $\text{TiO}_2$  است به گونه‌ای که اگر در سلول‌های مذکور خالص‌سازی رنگینه صورت بپذیرد مقدار بازدهی سلول قطع به یقین بهبود می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، سلول خورشیدی رنگینه‌ای با استفاده از رنگینه‌ی طبیعی آنتوسیانین استخراج شده از منبع طبیعی چای ترش، الکتروکاتد، آند و الکترولیت ( $I_3^-/I^-$ ) ساخته شد. اطلاعات به دست آمده از بررسی مقاومت درونی بیانگر مقدار مقاومت سلول در سطوح الکترولیت/پلاتین و الکترولیت/رنگینه  $\text{TiO}_2$  بوده و اطلاعات ارزشمندی از چگونگی اتصال رنگینه به فوتوآند دارد به گونه‌ای که با انباشتگی رنگینه میزان اتصال به سطح فوتوآند کم شده و موجب افزایش مقاومت درونی سلول می‌شود. با مطالعات انجام شده مشخص شد که رنگینه‌های طبیعی بازده و ثبات کم‌تری نسبت به رنگینه‌های مصنوعی (رنگینه‌های روتنیم) دارند، اما به دلیل در دسترس بودن، آسانی روش تهیه، غیرسمی بودن و زیست‌سازگار بودن از ظرفیت بالایی در تهیه سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای برخوردار است. این سلول‌ها به دلیل قیمت پایین می‌توانند در سلول‌های خورشیدی به شکل وسیعی به کار روند.



شکل ۶ نمودار توان بر حسب ولتاژ سلول خورشیدی ساخته شده با رنگینه استخراجی خالص‌سازی شده چای ترش

شرایط برای استفاده از این سلول است. به تازگی تلاش‌هایی به منظور ساخت سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای به کار گرفته شده است که می‌توان به:

Blue pea ( $\eta=0.05\%$ ), Annatto ( $\eta=0.19\%$ ), Norbixin ( $\eta=0.13\%$ ), Spinach ( $\eta=0.13\%$ ), Fructus lycii ( $\eta=0.17\%$ ), Lily ( $\eta=0.17\%$ ), Marigold ( $\eta=0.23\%$ ), Dragon fruit ( $\eta=0.22\%$ )

اشاره کرد [۱۵]. میزان بازدهی سلول خورشیدی رنگینه‌ای بر مبنای چای ترش در مقایسه با نمونه‌های مشابه مطلوب بوده اما آن‌چه که سلول خورشیدی ساخته شده در این مقاله را نسبت

### مراجع

- [1] Tripathi, B.; Yadav, P.; Kumar, M.; Results Phys., 3, 182-186, 2013.
- [2] Fredi, K.; Studies of Charge Transport Processes in Dye-Sensitized Solar Cells; PhD Thesis, 2007.
- [3] Zalas, M.; Walkowiak, M.; Gierczyk, B.; Broniarz, M.; Electrochim. Acta., 108, 736-740, 2013.
- [4] Jiang, D.; Xiaoyong, L.; Sci. China Chem.,

- 54, 930-935, 2011.
- [5] Happ, B.; Schcafer, J.; Menzel, R.; Winter, A.; *Macromol.*, 44, 6277-6287, 2011.
- [6] Feldt, S.; Gibson, E.; Gabrielsson, E.; Sun, L.; *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 16714-16724, 2010.
- [7] Feldt, S.; Wang, G.; Boschloo, G.; Hagfeldt, A.; *J. Phys. Chem. C.*, 115, 21500-21507, 2011.
- [8] Nazeeruddin, M.; *J. Am. Chem. Soc.*, 123, 1613-1624, 2001.
- [9] Swetha, T.; Reddy, K.; Singh, S.; *Chem. Rec.*, In press, 2015.
- [10] Saeidi, M.; Mozaffari, S.A.; Rahmanian, R.; *JAC.*, 8, 79-90, 2013.
- [11] Kong, F.; Dai, S.; Wang, K.; *Adv. Optoelectron.*, 7, 1-13, 2007.
- [12] Swami, S.; Chaturvedi, N.; Kumar, A.; Dutta, V.; *J. Power Sources*, 275, 80-89, 2015.
- [13] Hauch, A.; *Electrochim. Acta.*, 46, 3457-3466, 2001.
- [14] Rossetto, M.; Vanzani, P.; Mattivi, F.; Lunelli, M.; Scarpa, M.; Rigo, A.; *Arch. Biochem. Biophys.*, 408, 239-245, 2002.
- [15] Mozaffari, S.A.; Saeidi, M.; Rahmanian, R.; *Spectrochim. Acta A.*, 142, 226-231, 2015.
- [16] Ojeda, D.; Ferrer, E.; Zamilpa, A.; *J. Ethnopharmacol.*, 127, 7-10, 2010.
- [17] Shanmugam, V.; Manoharan, S.; Anandan, S.; *Spectrochim. Acta A.*, 104, 35-40, 2013.
- [18] Zhou, H.; Wu, L.; Gao, Y.; Ma, T.; *J. Photochem. Photobiol A.*, 219, 188-194, 2011.



## Fabrication and electrochemical evaluation of dye hibiscus tea sensitized solar cell with nano-structured titanium dioxide electrodes

S.A. Mozaffari<sup>1,\*</sup>, M. Saeidi<sup>2</sup> and R. Rahmanian<sup>3</sup>

1. Assistant Prof. of Analytical Chemistry, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran
2. MSc student in Applied Chemistry, Share Ray Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. PhD Student in Analytical Chemistry, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran

Received: August 2014, Revised: February 2015, Accepted: June 2015

**Abstract:** Dye sensitized solar cells, benefiting from the properties of the dyes, are used to absorb photons, followed by releasing electrons and transferring them between the two electrodes of anode and cathode in order to produce electrical energy. Since natural dyes with affordability, accessibility and appropriate performance are suitable alternative low cost synthetic dyes, in this study, the natural dyes containing anthocyanins were used as the photo sensitizer to produce dye sensitized solar cells. In this project, anode and cathode were made, respectively, from TiO<sub>2</sub> nano-particles and platinum nano-particles on fluorine doped SnO<sub>2</sub> transparent and conductive glass substrates and I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sup>-</sup>, was used as the electrolyte. Natural source of Hibiscus tea was used to obtain natural dye for solar cell fabrication. Dye extraction by using suitable solvent and purification by extraction column with solid phase was performed. By electrochemical evaluation and calculating final efficiency of the constructed cell, its performance was investigated. Current-voltage curve was plotted and the efficiency of solar cell based on dye extracted from Hibiscus tea was achieved.

**Keywords:** Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), Anthocyanin, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Natural Dye, Hibiscus Tea