

ارزیابی الکتروشیمیایی سل خورشیدی رنگینه‌ای تهیه شده با الکترودهای لایه نازک

نانوساختار و رنگینه طبیعی

مهسا سعیدی^۱، سید احمد مظفری^{۲*}، سارا رحیم نژاد^۳ و رضارحمانیان^۴^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری^۲سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، آزمایشگاه نانو فناوری و لایه نازک^۳دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری^۴سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، آزمایشگاه نانو فناوری و لایه نازک

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۲

تاریخ تصحیح: ۹۲/۰۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۳۱

چکیده:

امروزه سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای با توجه به هزینه ساخت پایین نسبت به دیگر سل‌های خورشیدی تبدیل انرژی نور به انرژی الکتریکی را بسیار مقرون به صرفه ساخته و از آن‌ها به عنوان نسل سوم سل‌های خورشیدی و از دسته سل‌های لایه نازک نانوساختاری نام می‌برند. معمولاً تیتانیوم دی اکسید به عنوان نیمه رسانا این نقش را ایفا می‌کند و الکترون‌های برانگیخته شده را از رنگینه به الکتروود شمارشگر (کاتد) انتقال می‌دهد. در نهایت طی یک چرخه‌ی انتقال الکترون که الکتروولیت در آن نقش مهمی دارد، الکترون‌ها به مولکول‌های رنگینه برمی‌گردند. به این ترتیب، نور خورشید توسط این سل خورشیدی به الکتروسیته تبدیل می‌شود. در پروژه حاضر از منبع طبیعی پوست بادمجان جهت تهیه رنگینه مناسب برای ساخت سل خورشیدی بهره برده شد. استخراج رنگینه‌ها با استفاده از حلال مناسب و خالص‌سازی آن‌ها با استفاده از ستونهای استخراج فاز جامد انجام گرفت. ارزیابی الکتروشیمیایی و اندازه‌گیری راندمان نهایی سل‌های ساخته شده بر پایه منبع طبیعی پوست بادمجان انجام شده و از تکنیک قدرتمند و غیر مخرب امپدانس الکتروشیمیایی در مطالعه انتقال بار سطحی الکترودهای نانوساختار سل خورشیدی استفاده گردید.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، سل خورشیدی حساس شده با رنگینه، رنگینه طبیعی، آنتوسیانین، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

۱- مقدمه:

مدتهای مدیدی استفاده از اثر فوتولتائیک در حساس سازی با رنگینه، نسبتاً غیرکاربردی باقی ماند تا زمانی که پیشرفت غیر قابل باوری در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ در دانشگاه صنعتی فدرال در لوزان سوییس توسط مایکل گرتزل و برایان اورگان به دست آمد. پروفیسور گرتزل یک سل خورشیدی با بازده تبدیل انرژی بیش از ۷٪ را تهیه کرد. سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای^{*} را به افتخار سازنده این سل‌ها، میخائیل گرتزل، با نام Gratzel cell می‌شناسند [۱]. سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای متعلق به دسته سل‌های خورشیدی لایه نازک[†] می‌باشند [۱]. ساده بودن مراحل ساخت، بازدهی نسبتاً مناسب و هزینه پایین

samozaafari@gmail.com

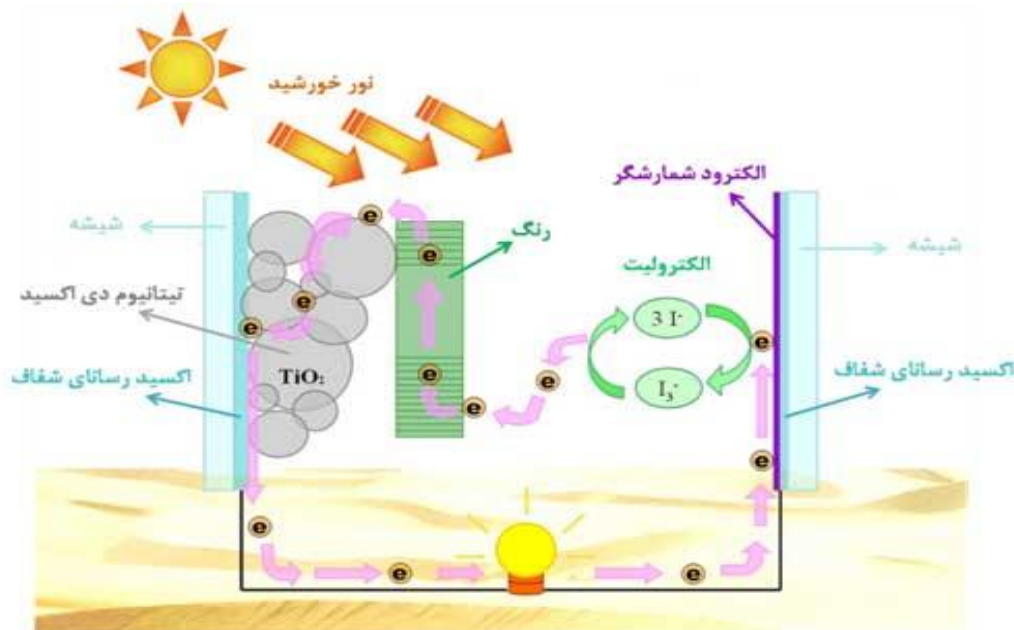
* Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)

† Thin Film Solar Cells

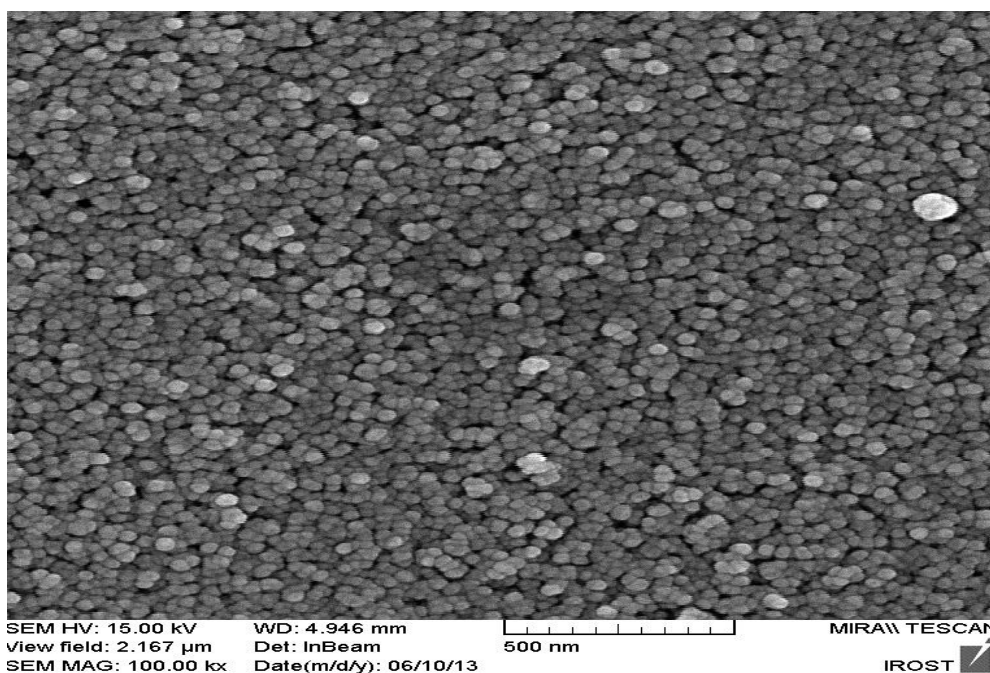
* نویسنده مسوول: استادیار شیمی تجزیه، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، تهران

ساخت آن‌ها در مقایسه با انواع دیگر سل‌های خورشیدی از مهم‌ترین مشخصه‌های این سل‌هاست که تولید انرژی را به طور چشم‌گیری مقرون به صرفه کرده است. تیتانیوم دی‌اکسید با نوار ممنوعه حدود $5/3$ الکترون ولت که یک نیمه‌رساناست ماده اصلی این سل‌ها بوده و در نقش آند می‌باشد که مولکول‌های رنگینه جاذب نور خورشید روی آن قرار می‌گیرند. در بیش‌تر موارد خاصیت فوتونی سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای متعلق به گروه‌های آنتوسیانین موجود در رنگینه‌های طبیعی است [۲،۳]. کلمه آنتوسیانین از دو کلمه یونانی به معنای گیاه و آبی مشتق شده است. آنتوسیانین‌ها ترکیبات طبیعی هستند که رنگ طبیعی را به میوه‌ها و سبزیجات و گیاهان می‌بخشند [۴، ۵]. در تحقیق حاضر استفاده از رنگینه‌ی طبیعی به عنوان حساسگر فوتوآند را مورد بحث قرار می‌دهیم. در این سل‌ها مکانیسم به این صورت است:

- ۱- رنگینه نشانده شده روی سطح تیتانیوم دی‌اکسید، شار فوتون گسیل شده را جذب می‌کند.
 - ۲- به دلیل انتقال بار از فلز مرکزی به لیگاند، رنگینه از حالت پایه به حالت برانگیخته می‌رسد. الکترون‌های برانگیخته شده به نوار رسانایی الکتروود تیتانیوم دی‌اکسید تزریق شده و منجر به اکسایش رنگینه می‌شوند.
 - ۳- الکترون‌های تزریق شده در نوار رسانایی تیتانیوم دی‌اکسید بین نانو ذرات تیتانیوم دی‌اکسید انتشار یافته و جریان را ایجاد می‌کنند. جریان به اکسید رسانای شفاف انتقال داده می‌شود تا از طریق مدار خارجی به الکتروود شمارشگر و سپس محلول الکتروولیت برسد.
 - ۴- یون تری یدید موجود در محلول الکتروولیت، الکترون‌ها را از الکتروود شمارشگر گرفته و به یون یدید کاهش پیدا می‌کند.
 - ۵- رنگینه اکسید شده در تماس با محلول الکتروولیت، الکترون‌ها را از یون یدید پذیرش کرده و به حالت پایه بر می‌گردد. یون یدید نیز پس از انتقال الکترون به حالت اکسید شده‌ی خود یعنی یون تری یدید تبدیل می‌شود.
- در سل‌های قدیمی سیلیکونی، هر دو کار تهییج الکترون با نور رسیده و تولید جریان با میدان الکتریکی ناشی از الکترون‌ها بر عهده سیلیکون است درحالی که در سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای تهییج الکترونی بوسیله مولکول رنگینه و انتقال جریان از طریق تیتانیوم دی‌اکسید انجام می‌گیرد. در سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای کاتد نقش کاتالیزور دارد و الکترون‌ها را وارد الکتروولیت می‌کند تا از طریق واکنش شیمیایی در الکتروولیت، دوباره الکترون‌ها وارد مولکول رنگینه شوند. مهم‌ترین عاملی که منجر به کاهش بازدهی سل‌ها می‌شود باز ترکیب الکترون‌های منتقل شده به تیتانیوم دی‌اکسید با یون‌های موجود در الکتروولیت قبل از انتقال آن‌ها از طریق مدار خارجی به الکتروود پلاتین می‌باشد. شمای ۱ ساختار کلی سل خورشیدی رنگینه‌ای و شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه نانوساختار تیتانیوم دی‌اکسید در سل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.



شمای ۱. شماتیک سل‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی لایه نانو ساختار تیتانیوم دی اکسید به کار گرفته شده در سل خورشیدی حساس شده با رنگینه.

از پارامترهای بسیار مهم به منظور افزایش بازدهی در سل‌ها، داشتن فوت‌آندی با سطح موثر مناسب می‌باشد که منجر به جذب رنگینه بیشتر و در نتیجه افزایش انتقال الکترون به فوت‌آند گردد. در این پروژه با جذب رنگینه‌ی طبیعی بر روی لایه ۲۰ نانومتری تیتانیوم دی‌اکسید بر روی بستری از شیشه‌های شفاف هادی اکسید قلع آلیپده شده با فلوتور به عنوان فوت‌آند استفاده گردید. در تهیه سل‌های رنگینه‌ای از رنگینه‌های طبیعی به جای رنگینه‌های تجاری و سنتزی روتنیوم به منظور کاهش هزینه‌های ساخت سل استفاده شده است. با وجود اینکه در این سل‌ها بازدهی نسبتاً 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 می‌باشد. در این تحقیق رنگینه حاوی آنتوسیانین از منبع طبیعی پوست بادمجان رویش یافته در ایران استخراج و برای اولین بار از روش استخراج با فاز جامد[‡] (SPE) برای حذف ناخالصی‌های موجود در رنگینه استخراجی استفاده گردید. سل خورشیدی رنگینه‌ای با رنگینه استخراجی خالص سازی شده تهیه و به روش‌های الکتروشیمیایی بخصوص روش امپدانس الکتروشیمیایی[§] مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-بخش تجربی:

۲-۱- روش آزمایش:

برای تهیه رنگینه حاوی آنتوسیانین از پوست بادمجان به دو طریق استخراج بدون خالص سازی و استخراج همراه با خالص سازی با ستون استخراج با فاز جامد C18 عمل گردید. ابتدا برای استخراج رنگینه ۵۰ گرم پوست بادمجان به محلول اتانولی شامل هیدروکلریک اسید و استیک اسید منتقل گردید. عمل استخراج با حلال برای مدت هشت ساعت بر روی شیکر همزن صورت گرفت. مایع استخراجی پس از فیلتراسیون ساده با کاغذ صافی، در دمای پنج درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. محلول استخراجی از پوست بادمجان برای چندین ماه در دمای محیط و در محلول اسیدی قابل نگهداری است [۶، ۷]. از این محلول استخراجی و رنگینه موجود در آن برای ساخت سل خورشیدی استفاده گردید. به منظور جذب رنگینه‌استخراجی از پوست بادمجان بر روی سطح آند سل مورد نظر و برای قرار دادن آند در محلول استخراجی حاوی رنگینه، مدت زمان جذب دو ساعت در نظر گرفته شد. بعد از آماده‌سازی الکتروود آند و همچنین آماده‌سازی کاتد با پوشش پلاتین و ایجاد حفره بر روی آن (جهت تزریق الکتروولیت)، با قرار دادن یک ورقه پلیمری (سولین) با ضخامت ۵۰ میکرون بین الکتروود کاتد و آند و حرارت دادن مجموعه کاتد/لایه عایق/آند تا دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد عمل درزگیری سل صورت گرفت. سپس با استفاده از یک پمپ خلأ، الکتروولیت حاوی گونه‌های اکسند-کاهنده از حفره موجود بر روی الکتروود کاتد به داخل سل تزریق گردید. در نهایت سل‌های ساخته شده با آزمون جریان-ولتاژ و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد ارزیابی الکتروشیمیایی قرار گرفتند.

۲-۲- الکتروود مقابل:

[‡] Solid Phase Extraction (SPE)

[§] Electrochemical Impedance Spectroscopy

الکتروود مقابل شامل یک لایه‌ی بسیار نازک پلاتینی بر روی شیشه‌ی رسانا می‌باشد. برای ساخت الکتروود پلاتین از محلول ۵ میلی مولار کلرو پلاتینیک اسید هگزاهیدرات استفاده می‌شود. 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 می‌شود. پس از ریختن نمک پلاتین روی سطح رسانا، الکتروود به مدت ۳۰ دقیقه در کوره در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد حرارت دهی می‌شود.

۲-۳- استخراج با فاز جامد:

در این روش یک ترکیب یا گروهی از ترکیبات مشابه با مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی بازداري می‌شوند. باید فرایند بازداري برگشت پذیر باشد تا گونه‌های بازداري شده به آسانی شسته شوند و فاز جامد برای استفاده مجدد آماده گردد. از مزایای این روش، دارا بودن فاکتور پیش تغلیظ بالا، امکان استفاده از سیستم‌های پیوسته، جذب و استخراج سریع و کمی، گزینش پذیری بالا، قابلیت احیاء دوباره و دردسترس بودن می‌باشد. معمولاً در این تکنیک جاذب در یک ستون کوچک یا کارتریج انباشته می‌شود که شباهت زیادی به ستون کروماتوگرافی مایع دارد. استخراج با فاز جامد به طور وسیعی برای حذف یا تغلیظ آنالیت به کار می‌رود، اما تاکنون برای تخلیص آنتوسیانین مصرفی در سل خورشیدی مورد استفاده قرار نگرفته است. در این مقاله نوآوری کار در استفاده از روش استخراج با فاز جامد (SPE) می‌باشد که ایده به کارگیری آن به دلیل حذف ناخالصی‌های موجود در رنگینه استخراجی از پوست بادمجان می‌باشد. پس از حذف ناخالصی‌های همراه رنگینه، سهم مواد آنتی اکسیدانی و رنگینه مفید در پوشش دادن نانوذرات TiO_2 افزایش یافته که این ابتکار باعث افزایش راندمان سل گردید و بخوبی بیانگر تاثیرگذاری خالص سازی رنگینه قبل از استفاده در سل خورشیدی می‌باشد.

۲-۴- مراحل استخراج با فاز جامد:

صرف نظر از نوع استخراج با فاز جامد، استخراج در این روش در چهار مرحله متفاوت انجام می‌گیرد، این مراحل عبارتند از:

الف) آماده سازی یا فعال سازی ماده جاذب: این مرحله برای آماده کردن فاز جامد جهت برهمکنش کامل و تکرارپذیر با نمونه صورت می‌گیرد. ابتدا فاز جامد با یک حلال مناسب شسته می‌شود تا با مرطوب شدن سطح جاذب، زنجیرهای آلکیلی توسط مولکول‌های حلال، حلال‌پوشی گردیده و از حالت واپیچیده و جمع شده خارج شوند، سپس فاز جامد تحت تاثیر یک حلال که مانند حلال نمونه است، قرار می‌گیرد. این عمل تماس کامل بین آنالیت و سطح جاذب را در مراحل بعد امکان پذیر می‌سازد.

ب) عبور نمونه از روی جاذب (بارگذاری جاذب): با عبور دادن محلول حاوی نمونه از درون فاز جامد (جاذب)، آنالیت روی سطح آن جذب می‌شود، برای جذب کامل و گزینش پذیر آنالیت روی فاز جامد، باید شرایط محلول نمونه از نظر pH، قطبیت و عوامل دیگر کاملاً مناسب باشد.

ج) شستشوی جاذب برای حذف ناخالصی‌ها: در این مرحله با عبور یک حلال مناسب از فاز جامد، مزاحمت‌های احتمالی که همراه آنالیت بازداری شده‌اند، از فاز جامد شسته می‌شوند. حلال یا محلول مورد نظر باید طوری انتخاب شود که هیچ اثری بر جذب آنالیت نداشته باشد.

د) جداسازی آنالیت مورد نظر از جاذب با یک حلال مناسب (شویش آنالیت): آنالیت جذب شده روی فاز جامد با عبور یک حلال مناسب شسته و جمع آوری می‌گردد. حلال باید طوری انتخاب شود که علاوه بر بازیابی کامل آنالیت با استفاده از حداقل مقدار آن، در مرحله اندازه‌گیری مزاحمت ایجاد نکند و یا به سادگی از سیستم حذف شود. از فواید استخراج با فاز جامد می‌توان به سرعت بالای استخراج، فاکتور تغلیظ بالا، کاهش مصرف حلال و تکرارپذیری خوب اشاره کرد. استخراج با فاز جامد ناخالصی‌هایی مانند چربی‌ها و قندها را حذف و باعث خالص سازی آنتوسیانین و در نتیجه آن افزایش سایت‌های TiO_2 عاری از چربی و قند و بر هم کنش‌های بیشتر آنتوسیانین با TiO_2 در واحد سطح می‌گردد که نتیجه کلی کار افزایش بازدهی سل می‌باشد.

۳- نتایج و بحث:

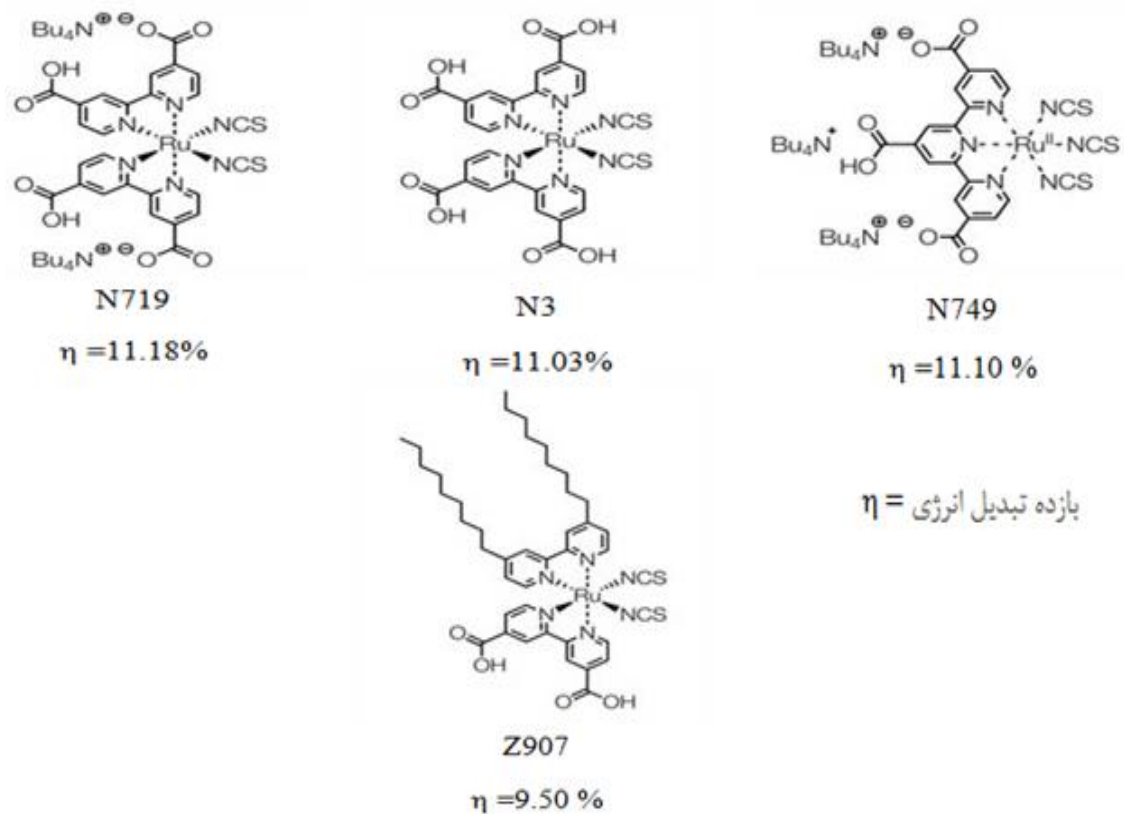
معمولاً در بیشتر بررسی‌ها روی سل‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه، کمپلکس‌های روتنیوم پلی پیریدین^{**} به عنوان رنگینه تجاری حساس به نور انتخاب می‌شوند. دلیل این انتخاب شناخت گسترده‌ی ویژگی‌های فیزیک نوری و اکسایش-کاهش نوری این کمپلکس‌ها و همچنین آسان بودن تغییر سطح مزدوج شدگی لیگاندهای پلی پیریدین و حضور گروه‌های مناسب در اطراف لیگاند به منظور بهبود خواص طیفی و اکسایش-کاهشی آن‌ها می‌باشد. کمپلکس‌های روتنیوم تجاری مانند N3، N719، N749، Z907 مؤثرترین حساس کننده‌های تیتانیوم دی‌اکسید هستند که به دلیل بازده تبدیل انرژی بالا در سراسر جهان به عنوان رنگینه‌های شاهد در سل‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه استفاده می‌شوند. شکل ۲ ساختار شیمیایی و بازده بالای تبدیل انرژی را برای هر رنگینه تجاری از مشتقات روتنیوم نشان می‌دهد.

عموماً آنتوسیانین‌ها و مشتقات آن‌ها طیف‌های جذبی وسیعی در ناحیه مرئی برای انتقال الکترونی از بالاترین اربیتال مولکولی اشغال شده^{††} به پایین‌ترین اربیتال مولکولی اشغال نشده^{‡‡} دارند. ماکزیمم طول موج جذبی برای رنگینه استخراجی از پوست بادمجان برابر با ۵۵۴ نانومتر است که در شکل ۳ نشان داده شده است.

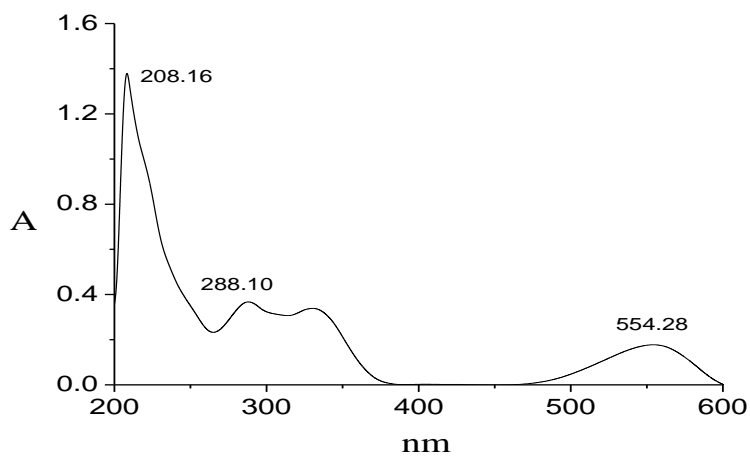
** Ruthenium Polypyridine

†† Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO)

‡‡ Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO)



شکل ۲. ساختار شیمیایی و بازده تبدیل انرژی رنگینه‌های تجاری N719, N3, N749, Z907.

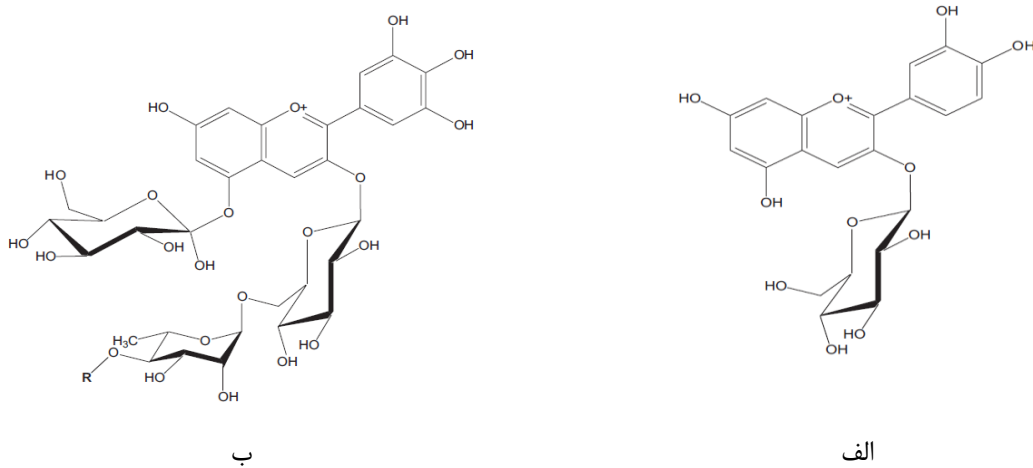


شکل ۳. طیف جذبی رنگینه استخراجی از پوست بادمجان.

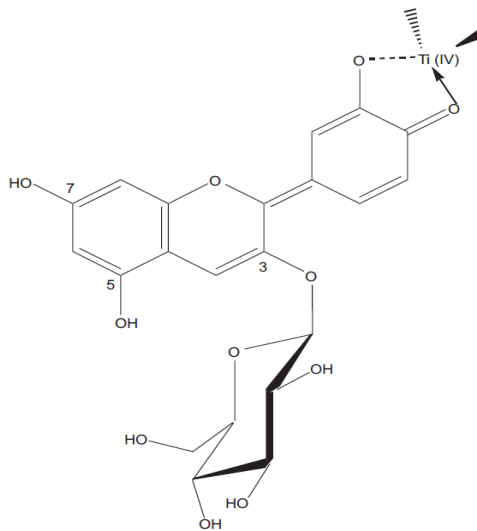
تاکنون رنگینه استخراجی از پوست گیاه جاباتیکابو^{§§}، به عنوان کارآمدترین حساسگر طبیعی تهیه شده برای سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. پوست بادمجان نیز به دلیل دارا بودن رنگینه‌های طبیعی نظیر سیانین

^{§§} Jaboticabu

و ناسونین به عنوان یکی از منابع طبیعی در تهیه سل‌های خورشیدی رنگینه‌ای می‌تواند مورد توجه و بررسی بیشتری قرار گیرد (شکل ۴). حضور گروه‌های هیدروکسیل در این رنگینه‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با یون تیتانیوم (Ti^{4+}) موجود در فوتوآند تشکیل‌دهنده مناسب و موثر جهت انتقال الکترونی را در پی خواهد داشت (شکل ۵).



شکل ۴. ساختار شیمیایی (الف) رنگینه طبیعی سیانین و (ب) رنگینه طبیعی ناسونین.



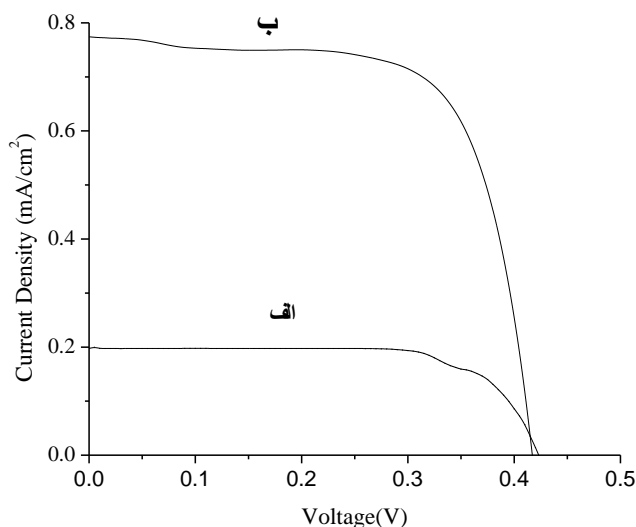
شکل ۵. ساختار سیانین متصل شده به یون Ti^{4+} .

علاوه بر این حضور گروه‌های گلیکوزید که در موقعیت ۳ و ۵ (شکل ۴ب) به دلیل مزاحمت فضایی مانعی قوی برای اتصال گروه‌های عاملی آنتوسیانین و تشکیل یک باند با سطح تیتانیوم دی‌اکسید در موقعیت ۳، ۵ و ۷ می‌شود، به تسهیل اتصال Ti^{4+} به گروه هیدروکسی فنل که در آن چگالی الکترونی LUMO واقع شده است کمک می‌کند (شکل ۵). از این رو این پدیده منجر به تزریق کارآمد الکترون از رنگینه به فیلم نیمه‌هادی می‌شود [۹]. برای افزایش خاصیت و فعالیت حساس‌گری رنگینه می‌توان روش استخراج را مثلاً با کاهش pH و یا استفاده نکردن از استیک اسید در مرحله استخراج تغییر داد. نتایج آزمایشات نشان داد که رنگینه‌های طبیعی بر روی سطح تیتانیوم دی‌اکسید دارای جذب مناسبی بوده و نور مرئی را

بیشتر جذب می‌نمایند. در این تحقیق ارزیابی الکتروشیمیایی سل‌های تهیه شده با رنگینه‌های طبیعی از روی پارامترهایی مانند ولتاژ مدار باز^{***}، چگالی جریان مدار کوتاه^{†††}، فاکتور کارکرد^{‡‡‡} و بازدهی^{§§§} صورت گرفت. شکل ۶ نتایج بررسی منحنی جریان-ولتاژ سل‌های ساخته شده را تحت تابش استاندارد نشان می‌دهد. آزمون‌های مقدماتی از تحت تابش قرار دادن سل ساخته شده با رنگینه‌های استخراجی از پوست بادمجان برای مدت ۳ ساعت تغییر چندانی در پایداری سل نشان نداد. نتایج گزارش شده برای پایداری سل بر اساس داده‌های گزارش شده به وسیله دیگر محققان مشابه می‌باشد [۹، ۸]. در جدول ۱ پارامترهای فتوالکتریکی سل‌های خورشیدی تهیه شده با رنگینه‌های طبیعی تحت تابش طیف شبیه‌ساز خورشیدی در قالب چگالی جریان مدار کوتاه (J_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، بازدهی و فاکتور کارکرد (FF) ارائه شده است. بر طبق این نتایج سل تهیه شده از رنگینه استخراجی از پوست بادمجان با خالص‌سازی آنتوسیانین از طریق استفاده از ستون فاز جامد، افزایش بازدهی بیش از ۴ برابر را نسبت به سل تهیه شده با رنگینه خالص نشده نشان می‌دهد.

جدول ۱. داده‌های فتوالکتریکی سل‌های خورشیدی ساخته شده با رنگینه استخراجی از پوست بادمجان قبل و بعد از خالص‌سازی.

| V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | Fill Factor | Efficiency | رنگینه مصرفی در ساخت سل |
|---------------|--------------------------------|-------------|------------|--|
| ۰/۴۲ | ۰/۱۹ | ۰/۷۴ | ۰/۰۵ | رنگینه پوست بادمجان (قبل از خالص‌سازی) |
| ۰/۴۲ | ۰/۷۷ | ۰/۶۸ | ۰/۲۲ | رنگینه پوست بادمجان (بعد از خالص‌سازی با ستون SPE) |



شکل ۶ نمودار i - v سل تهیه شده با رنگینه استخراجی از پوست بادمجان (الف) قبل و (ب) بعد از خالص‌سازی.

۳-۱- طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS):

*** Open Circuit Voltage (V_{oc})

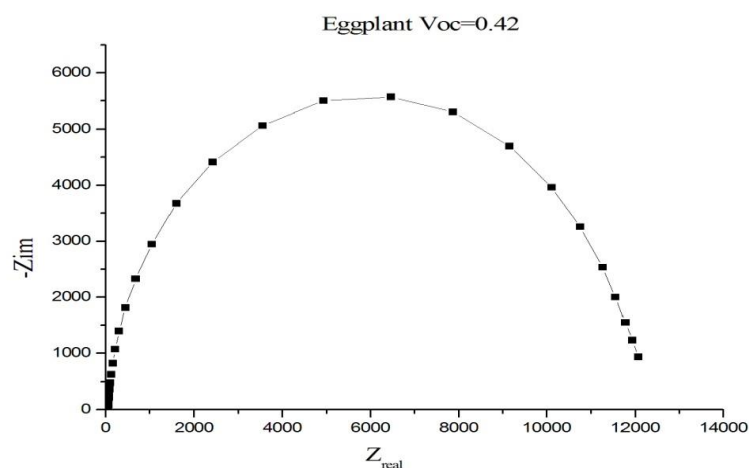
††† Short Circuit Current Density (J_{sc})

‡‡‡ Fill Factor (FF)

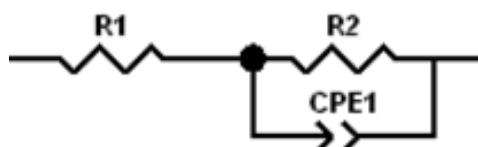
§§§ Efficiency

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) جزء مهم ترین روش های توصیف سیستم های الکتروشیمیایی و از جمله آن سل های خورشیدی فوتوالکتروشیمیایی رنگینه ای است. در این روش، پتانسیل اعمال شده به سیستم با مدولاسیون یک موج سینوسی کوچک، دچار اختلال شده و پاسخ به صورت جریان سینوسی بر حسب تابعی از فرکانس مدولاسیون اندازه گیری می شود. امپدانس به صورت نسبت ولتاژ به جریان تعریف می شود.

تفسیر طیف امپدانس با استفاده از مدارهای معادل انجام می شوند. اجزای سل و سطوح تماس به صورت مولفه های الکتریکی مانند مقاومت ها و خازن ها نمایش داده می شوند. با تطابق طیف امپدانس اندازه گیری شده، با مدار معادل می توان مقادیر عددی پارامترهایی مانند مقاومت انتقال بار در اجزای سل و رفتارهای خازنی روی سطوح الکتروود را به دست آورد (جدول ۲). از تحلیل نتایج آنالیز امپدانس پارامترهای مختلف سل های خورشیدی ساخته شده مانند ضریب نفوذ موثر الکترون-ها در فوتو آندها، آهنگ باز ترکیب الکترون ها با الکترولیت و طول عمر الکترون ها در فوتو آندها و چگالی الکترونی در حالت پایا در نوار هدایت قابل محاسبه است. جذب بیشتر رنگینه منجر به جذب بیشتر تابش فرودی و تولید الکترون-حفره بیشتر شده و تعداد الکترون های منتقل شده به تیتانیوم اکسید را افزایش می دهد. نمودار نایکوئیست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سل تهیه شده با رنگینه استخراجی از پوست بادمجان بعد از خالص سازی (شکل ۷) و مدار معادل طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (شکل ۸) نشان داده شده اند.



شکل ۷. نمودار نایکوئیست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سل تهیه شده با رنگینه استخراجی از پوست بادمجان بعد از خالص سازی.



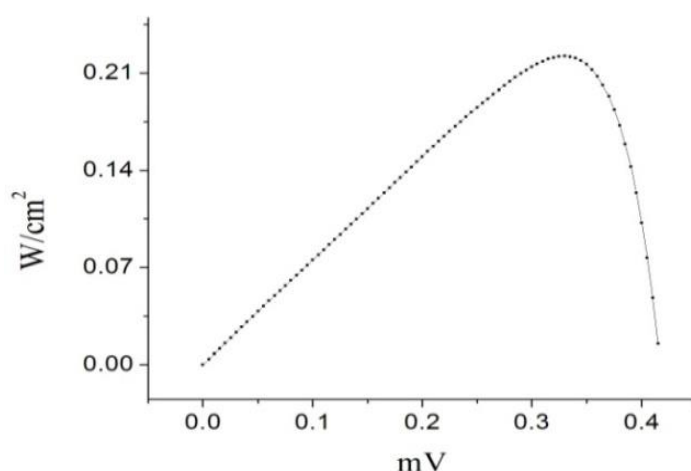
شکل ۸. مدار معادل استفاده شده در آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.

جدول ۲. داده‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سل‌های خورشیدی ساخته شده با رنگینه استخراجی از پوست بادمجان بعد از خالص‌سازی.

| R1($\Omega \text{ cm}^2$) | R2($\Omega \text{ cm}^2$) | CPE1-T ($\text{s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$) | CPE1-P | رنگینه پوست بادمجان (بعد از خالص‌سازی با ستون SPE) |
|-----------------------------|-----------------------------|---|--------|--|
| ۴۴/۱۵ | ۱۲۵۵۳ | $۳/۷۵۴ \times ۱۰^{-۶}$ | ۹۰/۸۲۲ | |

۳-۲- نمودار توان:

با رسم نمودار توان بر حسب ولتاژ می‌توان ماکزیمم توان را از روی منحنی استخراج نمود (شکل ۹). این نقطه بیانگر بهترین شرایط برای استفاده از این سل می‌باشد.



شکل ۹. نمودار توان بر حسب ولتاژ سل خورشیدی ساخته شده با رنگینه استخراجی خالص‌سازی شده پوست بادمجان.

۴- نتیجه‌گیری:

در این تحقیق رنگینه‌های با ساختار آنتوسیانین از منابع طبیعی مانند پوست بادمجان استخراج و پس از خالص‌سازی با ستون استخراج فاز جامد C18 با موفقیت در تهیه سل خورشیدی رنگینه‌ای به کار گرفته شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها برای سل‌های تهیه شده با رنگینه استخراجی از پوست بادمجان قبل و بعد از خالص‌سازی نشان از افزایش ۴ برابری بازدهی سل تهیه شده با رنگینه خالص شده را دارد که این مهم بر تأثیر بالای درجه خلوص رنگینه و میزان افزایش پوشش سطح الکتروود فتوآند با رنگینه دلالت دارد. برای ساخت سل خورشیدی رنگینه‌ای مبتنی بر رنگینه استخراجی و خالص شده پوست بادمجان از شرایط پذیرفته شده ساخت سل نظیر الکتروولیت ید/یدید، حلال اتانول، ضخامت فیلم تیتانیوم دی‌اکساید کمتر از ۱۰ نانومتر، و منبع نور با تابش AM ۱/۵ استفاده گردید و تأثیر جایگزینی رنگینه طبیعی به جای رنگینه سنتزی و بررسی اثر خالص‌سازی رنگینه استخراجی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین از تکنیک قدرتمند و غیر مخرب امپدانس الکتروشیمیایی در مطالعه انتقال بار سطحی الکتروودهای نانوساختار سل خورشیدی استفاده گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد اگرچه رنگینه‌های طبیعی نسبت به رنگینه‌های تجاری روتنیوم دارای بازدهی و ثبات کمتری می‌باشند، لکن رنگینه‌های طبیعی به

دلیل در دسترس بودن، آسانی روش تهیه، کاهش هزینه‌های ساخت، غیر سمی بودن و زیست سازگار بودن از ظرفیت بالایی در تهیه سل‌های رنگینه‌ای خورشیدی برخوردار می‌باشند.

۵- مراجع:

- [1] B. O'Regan and M. Gratzel, *Nature*, **353** (1991) 737.
- [2] N. J. Cherepy, G. P. Smestad, M. Gratzel, J. Z. Zhang, *J. Phys. Chem.* **101** (1997) 9342.
- [3] Q. Dai and J. Rabani, *J. Photochem. Photobiol. A*. **148** (2002) 17.
- [4] M. Rossetto, P. Vanzani, F. Mattivi, M. Lunelli, M. Scarpa, A. Rigo, *Arch. Biochem. Biophys.* **408** (2002) 239.
- [5] G. Mazza, J. E. Cacace, C. D. Kay, *J. AOAC Int.* **87** (2004) 129.
- [6] K. Wongcharee, V. Meeyoo and S. Chavadej, *Sol. Ener. Mat. & Sol. Cells*, **91** (2007) 56.
- [7] W. H. Lai, Y. H. Su, L. G. Teoh, M. H. Hon, *J. Photochem. Photobiol.* **195** (2008) 307.
- [8] A. S. Polo, N. Y. Murakami Iha, *Sol. Ener. Mat. & Sol. Cells*, **90** (2006) 1936.
- [9] D. Zhang, N. Yamamoto, T. Yoshida, H. Minoura, *Trans. MRS J.* **27** (2002) 811.