

Physicochemical Properties and Optoelectronic Performance of Native Natural Dyes

Atefeh Hosseini¹, Tahmineh Jalali^{*1}, Shahriar Osfouri²

1- Department of Physics, Persian Gulf University, P. O. Code: 7516913817, Bushehr, Iran.

2- Department of Chemical Engineering, Faculty of Oil, Gas and Petrochemicals, Persian Gulf University, P. O. Code: 7516913817, Bushehr, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18-09-2025

Accepted: 23-11-2025

Available online: 07-09-2026

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/jscw.2025.167661.1261

Keywords:

Anthocyanin

Dye

Extraction

Dye-Sensitized Solar Cell

ABSTRACT

In this study, the optical, structural, and electronic performance of natural dyes extracted from three plant sources—pomegranate flower, sumac, and corn silk—were investigated to evaluate their efficiency in dye-sensitized solar cell (DSSC) applications. UV-Vis spectroscopy revealed that the pomegranate flower pigment exhibited the highest light absorption in the UV-visible range and the greatest anthocyanin content. In dye-TiO₂ composites, the pomegranate flower sample also demonstrated the strongest optical response. FTIR analysis confirmed the clear presence of O-H, C=O, and C-O bonds in the pomegranate flower extract and, to a lesser extent, in corn silk, indicating the existence of active chromophores and functional groups suitable for effective binding to TiO₂. Conductivity comparisons showed that deionized water as a solvent significantly enhanced conductivity, particularly in the corn silk extract, due to the presence of polar compounds and increased ionic mobility. Energy-level analysis along with electrolyte resistance measurements, demonstrated that pomegranate flower and corn silk possess optimal energy gaps, lower LUMO levels, and reduced electrolyte resistance compared with other samples. These features are crucial for improving electron transfer in DSSCs. Overall, the results indicate that pomegranate flower and corn silk extracts, owing to their structural, optical, and electronic characteristics, are promising candidates for application in natural dye-sensitized solar cells.

بررسی خواص فیزیکی-شیمیایی و عملکرد نوری-الکترونیکی رنگزاهای طبیعی بومی

عاطفه حسینی^۱، تهیمینه جلالی^{۲*}، شهریار عصفوری^۳

۱- کارشناسی، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، کدپستی: ۷۵۱۶۹۱۳۸۱۷.

۲- دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، کدپستی: ۷۵۱۶۹۱۳۸۱۷.

۳- استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، کدپستی: ۷۵۱۶۹۱۳۸۱۷.

چکیده

در این پژوهش، عملکرد نوری، ساختاری و الکترونی رنگزاهای طبیعی استخراج شده از سه منبع گیاهی بومی، شامل گل انار، سماق، و کاکل ذرت، مورد بررسی قرار گرفت؛ تا کارایی آن‌ها، در کاربرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا ارزیابی شود. طیف‌سنجی UV-Vis نشان داد که بیشینه جذب نوری (λ_{max}) رنگزاهای گل انار، سماق و کاکل ذرت به ترتیب در حدود ۴۴۳، ۴۶۷ و ۴۰۹ نانومتر قرار دارد و مقدار کل آنتوسیانین استخراج شده به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۸ و ۰/۵۵ mg/g بود. در ترکیب رنگ- TiO_2 نیز نمونه گل انار بیشترین عملکرد نوری را از خود نشان داد. از مون FTIR حضور واضح پیوندهای O-H ، C=O و C-O را در عصاره گل انار و تا حدی کاکل ذرت را تأیید کرد؛ که بیانگر وجود رنگ‌سازهای فعال و گروه‌های عاملی مناسب برای اتصال مؤثر به TiO_2 است. مقایسه رسانایی ویژه نمونه‌ها نشان داد که استفاده از حلال آب دیونیزه موجب افزایش قابل توجه رسانایی، به ویژه در عصاره کاکل ذرت با مقدار $2300 \mu\text{S/cm}$ می‌شود که ناشی از حضور ترکیبات قطبی و افزایش تحرک یونی است. تحلیل ترازهای انرژی (HOMO/LUMO) و مقاومت الکترونیکی نیز نشان داد که رنگزاهای گل انار و کاکل ذرت دارای کاف انرژی بهینه در محدوده ۲-۳ eV و مقاومت کمتر نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. بررسی ترازهای انرژی و مقاومت الکترونیکی نیز نشان داد که کاف انرژی (E_g) برای رنگزاهای گل انار و کاکل ذرت به ترتیب ۳/۳۱ eV و ۲/۹۹ است و این دو نمونه به دلیل LUMO پایین‌تر و مقاومت کمتر، عملکرد الکترونیکی بهتری دارند. این ویژگی‌ها برای بهبود فرایند انتقال الکترون در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا حیاتی است. به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که عصاره‌های گل انار و کاکل ذرت، با برخورداری از ویژگی‌های ساختاری، نوری و الکترونی مناسب، گزینه‌هایی امیدبخش برای استفاده در سلول‌های خورشیدی طبیعی محسوب می‌شوند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۶/۱۶

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167661.1261

واژه‌های کلیدی:

آنتوسیانین

رنگزا

استخراج

سلول خورشیدی حساس شده با رنگزا

۱- مقدمه

حساس‌کننده‌ها نقش حیاتی را در عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا^۱ (DSSCs) ایفا می‌کنند (۱-۳). تاکنون انواع مختلفی از مواد رنگزا، شامل رنگزاهای آلی مانند کلروفلیل a و b، کاروتنوئیدها، زانتوفیل‌ها، آنتوسیانین‌ها و بتالین‌ها (۴) و رنگدانه‌های معدنی (مانند کمپلکس‌های روتنیم و سافرنین) در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۵). در حال حاضر، رنگدانه‌های معدنی به‌ویژه کمپلکس‌های روتنیم به‌عنوان مؤثرترین حساس‌کننده‌ها برای دستیابی به بازدهی بالا در این سلول‌ها شناخته می‌شوند (۶، ۷). ویژگی بارز کمپلکس‌های روتنیم، وجود نوارهای انتقال بار قوی از نوع فلز به لیگاند است که منجر به تولید حالت‌های برانگیخته پایدار و مؤثر برای تزریق الکترون به نوار رسانش نیمه‌رسانا می‌شود. همچنین، ترازهای انرژی این مواد در حالت پایه و برانگیخته به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که تطابق مناسبی با سطح انرژی TiO_2 دارند و انتقال الکترون از رنگ به نیمه‌رسانا را تسهیل می‌کنند (۸-۱۰). کمپلکس‌های روتنیم مانند N3، N719 و Z907 بازدهی بالا و پایداری مناسبی در برابر نور و حرارت دارند و به‌عنوان استاندارد مرجع در بسیاری از تحقیقات DSSC استفاده می‌شوند (۱۱). با این حال، هزینه بالا، سنتز پیچیده و مسائل زیست‌محیطی مرتبط با فلزات سنگین، توسعه حساس‌کننده‌های جایگزین را ضروری کرده است (۱۲). رنگزاهای آلی و طبیعی به دلیل داشتن نوارهای انتقال بار قوی و تراز انرژی مناسب، قادر به انتقال مؤثر الکترون هستند (۱۳) و با توجه به قیمت کمتر، زیست‌سازگاری و سهولت استخراج، جایگزین مناسبی برای رنگزاهای معدنی و مصنوعی محسوب می‌شوند (۹، ۷). اخیراً، مطالعات متعددی به بررسی جایگزین‌های پایدارتر و ارزان‌تر برای حساس‌کننده‌های فلزی پرداخته‌اند. مقاله‌ای در سال ۲۰۲۴ مالیهورتا^۲ و همکارانش، نشان دادند که رنگزاهای آلی بدون فلز با ساختارهای اصلاح‌شده می‌توانند عملکرد قابل‌قبولی ارائه دهند و در عین حال از نظر زیست‌سازگاری و هزینه نسبت به رنگ‌های فلزی برتری داشته باشند (۱۴). همچنین، در مقاله‌ای مروری در سال ۲۰۲۴ انواع رنگزاهای طبیعی و آلی از نظر ویژگی‌های انتقال بار، پایداری نوری و بازدهی بررسی شده‌اند. این مقاله نشان می‌دهد که اصلاح ساختار مولکولی رنگزاهای طبیعی و ترکیب آن‌ها با نانوذرات فلزی می‌تواند بازدهی DSSC را تا حدود ۷ درصد افزایش دهد (۱۵). در مطالعه‌ای دیگر، رنگزاهای آلی با ساختارهای $D-\pi-A$ برای استفاده در شرایط نوری ضعیف بررسی شده‌اند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این رنگزاهای کاربردهای داخلی است و نشان داده است که ترکیب چند رنگزای

طبیعی می‌تواند منجر به افزایش جذب نور و بهبود عملکرد سلول شود (۱۶، ۱۷). در سال ۲۰۲۵ به بررسی جامع حساس‌کننده‌های طبیعی پرداخته و پیشنهاد می‌کند که ترکیب رنگ‌های طبیعی با ساختارهای هیبریدی و استفاده از روش‌های تثبیت نوری می‌تواند مسیر جدیدی برای توسعه DSSC‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه فراهم کند (۱۸). در طبیعت، میوه‌ها، سبزیجات، برگ‌ها، گل‌ها و جلبک‌ها حاوی رنگزاهای متنوعی هستند که به راحتی استخراج شده و در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا به کار می‌روند. برای مثال، تاناکونه^۴ و همکارانش استفاده از تانن‌ها و ترکیبات فنلی استخراج‌شده از چای سیاه، گردو و انار و همچنین آنتوسیانین‌های استخراج‌شده از گل‌ها و برگ‌ها از گونه‌های گیاهی مناطق مدیترانه‌ای، گرمسیری و نیمه‌گرمسیری پرداختند (۱۹، ۱۸). یکی از مهم‌ترین موانع استفاده از رنگزاهای طبیعی در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا با پایداری کم در برابر نور، حرارت و pH است. ترکیباتی مانند کلروفلیل و آنتوسیانین در نور یا در محیط‌های قلیایی به سرعت تجزیه می‌شوند که این موضوع موجب کاهش طول عمر و بازده سلول می‌شود. روش‌های مختلفی برای استخراج و تثبیت رنگ‌های طبیعی پیشنهاد شده است (۳۷) که استخراج با امواج فراصوت سبب شکستن دیواره سلولی گیاه و افزایش بازده استخراج می‌شود، استخراج با حلال‌های سبز (آب، اتانل) که سازگار با محیط‌زیست و غیرسمی است و استخراج اسیدی یا آنزیمی که برای رنگزاهای حساس به شرایط بازی مناسب می‌باشد. به‌عنوان نمونه، رامومرزی^۵ و همکارانش سلول‌های خورشیدی حساس به رنگزا با استفاده از رنگزاهای طبیعی استخراج‌شده از گلابی خاردار و تمر هندی قرمز ساخته شدند. رنگزاهای بتالائین و آنتوسیانین به‌عنوان عوامل حساس‌کننده شناسایی شدند و بازدهی تبدیل انرژی تا ۰/۴۷ درصد برای بتالائین و ۰/۱۴ درصد برای آنتوسیانین گزارش شد (۲۷). گلشن و همکارانش نیز با بهره‌گیری از روش میکروویو، بازده ۱/۷ درصد را گزارش کردند (۲۴). افزایش کارایی رنگزاهای طبیعی از طریق اتصال آن‌ها به نانوذرات اکسیدی مانند TiO_2 یا ZnO در ساختارهای متخلخل، منجر به بهبود اتصال رنگزا به الکتروده، افزایش سطح فعال و در نهایت بهبود بازده تبدیل انرژی می‌شود. همچنین استفاده از نانوذرات تثبیت‌کننده مانند آلوم یا اکسیدهای فلزی می‌تواند پایداری حرارتی و نوری رنگزا را تقویت کند (۴۰). رنگزاهای طبیعی، ترکیبات آلی زیست‌مینا هستند که مسئول ایجاد رنگ در گیاهان، جانوران و میکروارگانیسم‌ها می‌باشند و ساختار مولکولی ویژه آن‌ها امکان جذب و بازتاب نور مرئی را فراهم می‌کند. این ترکیبات در فرایندهایی مانند فتوسنتز، دفاع گیاه در برابر تنش‌های محیطی و جذب گرده‌افشان‌ها نقش دارند و به دلیل زیست‌سازگاری، فراوانی و

⁴ Tennakone⁵ Ramamoorthy¹ Dye-sensitized solar cell (DSSC)² Malhotra³ Algae

الکترونیکی رنگزاهای بومی ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان دادند که عصاره‌های گل انار و کاکل ذرت، به دلیل کاف انرژی مناسب و رسانایی بالاتر، می‌توانند جایگزین مؤثری برای رنگزاهای مصنوعی باشند. این نتایج ضمن شناسایی منابع بومی جدید، به درک عمیق‌تری از رابطه بین ساختار مولکولی و عملکرد فوتوالکتروشیمیایی رنگ‌های طبیعی منجر شده است. این مقاله به بررسی فرایند استخراج رنگزاهای طبیعی از منابع گیاهی محلی مختلف از جمله سماق، گل انار و کاکل ذرت به منظور کاربرد آن‌ها در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزای می‌پردازد. با بهینه‌سازی روش استخراج، هدف بهبود کارایی و پایداری این رنگزاهای هنگام استفاده در دستگاه‌های فتوولتائیک است. برای بررسی خواص فیزیکی-شیمیایی رنگزاهای استخراج شده، مشخصه‌یابی با دستگاه‌های طیف‌سنج UV-Vis، پتانسیواستات و کانداکتومتری انجام شده است. در راستای توسعه سلول‌های خورشیدی سبز و مقرون به صرفه، استفاده از منابع طبیعی بومی می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه، سازگاری زیست‌محیطی و بومی‌سازی فناوری‌های انرژی ایفا کند. گیاهان گل انار، سماق و کاکل ذرت از جمله گونه‌های بومی و در دسترس در مناطق جنوبی ایران، به‌ویژه استان بوشهر، هستند که فراوانی طبیعی و قابلیت برداشت آسان آن‌ها، استفاده از این منابع را از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی توجیه‌پذیر می‌سازد. انتخاب این گیاهان نه تنها با هدف بهره‌گیری از ترکیبات آنتوسیانینی و پلی‌فنلی فعال آن‌ها انجام شده است، بلکه بر پایه اصل استفاده از مواد بومی و قابل دسترس در راستای توسعه سلول‌های خورشیدی پایدار نیز قرار دارد. این رویکرد می‌تواند زمینه‌ساز گسترش فناوری‌های انرژی پاک در مناطق گرم و خشک ایران و کاهش وابستگی به منابع غیرمحلی باشد. در همین راستا، هدف اصلی این پژوهش بررسی خواص فیزیکی-شیمیایی، نوری و الکترونیکی رنگزاهای طبیعی بومی ایران (گل انار، سماق و کاکل ذرت) و ارزیابی قابلیت آن‌ها به عنوان حساس‌کننده‌های سبز در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزای (DSSC) است. این کار با هدف جایگزینی مواد بومی، زیست‌سازگار و کم‌هزینه به جای رنگزاهای فلزی پیچیده انجام شد تا مسیر توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر محلی فراهم گردد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از طیفی از تجهیزات آزمایشگاهی پایه و تخصصی جهت استخراج، آماده‌سازی و آزمون رنگزاهای طبیعی استفاده شد. ابزارهای مورد استفاده شامل لوله فالدکون، دستگاه خشک‌کن با قابلیت کنترل دمای دقیق، آسیاب برقی جهت پودر کردن نمونه‌های خشک شده، هاون دستی، اسپاتول، بشر، استوانه مدرج، ترازوی دیجیتال با دقت بالا، سانتریفیوژ، گرم‌کن مغناطیسی به همراه مگنت، دماسنج

هزینه کم، جایگزین‌های مناسبی برای رنگ‌های پایه فلزی در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزای محسوب می‌شوند. با این حال، رفع چالش‌هایی مانند پایداری، استخراج بهینه و انتقال مؤثر الکترون نیازمند تحقیقات بین‌رشته‌ای در شیمی، نانوفناوری و مهندسی مواد است. رنگزاهای طبیعی عمدتاً شامل پنج گروه اصلی هستند:

کلروفیل‌ها: جذب در ۴۵۳-۴۳۰ و ۶۶۲-۶۴۲ نانومتر، ساختار پورفیرینی با اتم Mg، دوحیط‌دوست^۱ اما ناپایدار در نور و حرارت (۲۷-۲۹).

کاروتنوئیدها: جذب در ۵۰۰-۴۰۰ نانومتر، سیستم مزدوج گسترده، پایداری بالا، بازده گزارش شده تا ۲/۶ درصد (۴/۲ درصد در ترکیب با کلروفیل) (۸، ۱۴، ۳۰، ۳۱).

آنتوسیانین‌ها: زیرمجموعه فلاونوئیدها، حساس به pH، رنگ قرمز تا آبی، اتصال قوی به TiO_2 ، پاداکسنده (۳۲-۳۴).

بتالائین‌ها: بتاسیانین (قرمز-بنفش) و بتاگزانتین (زرد-نارنجی)، ساختار زوئتریونیک، پایدار در محیط اسیدی (۳۴، ۳۵).

فلاونوئیدها: شامل کوئرستین و کامفرول، جذب UV، دفاع در برابر آفات، تشکیل کمپلکس با TiO_2 (۳۶).

چالش اصلی استفاده از رنگزاهای طبیعی، پایداری کم در برابر نور، حرارت و pH است. راهکارها شامل استخراج با امواج فراصوت، حلال‌های سبز (آب، اتانل)، استخراج اسیدی/آزیمی و تثبیت با نانوذرات اکسیدی می‌باشد (۳۷، ۴۰). برای مثال، راجکومار (۲۰۲۵) با استفاده از عصاره انار و چغندر، نانوذرات TiO_2 آناناز سنتز کرد و بازدهی قابل توجهی گزارش نمود (۱۶). گلشن و همکارانش با روش میکروویو و RSM، شرایط بهینه استخراج آنتوسیانین از جمبو را طراحی کردند (۲۵).

بر این اساس، در پژوهش حاضر از سه منبع گیاهی بومی شامل گل انار، سماق و کاکل ذرت به عنوان رنگزاهای طبیعی استفاده شد. انتخاب این منابع به دلیل برخورداری از ترکیبات آنتوسیانینی و پلی‌فنولی فعال، پایداری نوری مناسب، قابلیت انحلال در حلال‌های سبز و فراوانی در اقلیم جنوب ایران انجام گرفت. این ترکیبات در مطالعات پیشین کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و از این رو می‌توانند چشم‌انداز جدیدی برای استفاده از بخش‌های کمتر شناخته شده گیاهان بومی در توسعه سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزای فراهم کنند. اگرچه مطالعات متعددی بر روی رنگزاهای طبیعی انجام شده است، اما بررسی پیچیده منابع بومی ایران و مقایسه جامع خواص نوری، رسانایی و انرژی ترازهای HOMO/LUMO آن‌ها کمتر مورد توجه بوده است. این شکاف دانشی مانع از شناسایی دقیق پتانسیل واقعی منابع گیاهی محلی در کاربردهای فوتوولتائیک می‌شد. پژوهش حاضر با ارائه تحلیل هم‌زمان طیف‌سنجی UV-Vis، FTIR، رسانایی و تراز انرژی، تصویری جامع از رفتار فیزیکی-

¹ Amphiphilic

استاندارد و تکرارپذیر این فرایند باعث می‌شود مقایسه بین رنگرها با دقت بیشتری انجام گیرد.

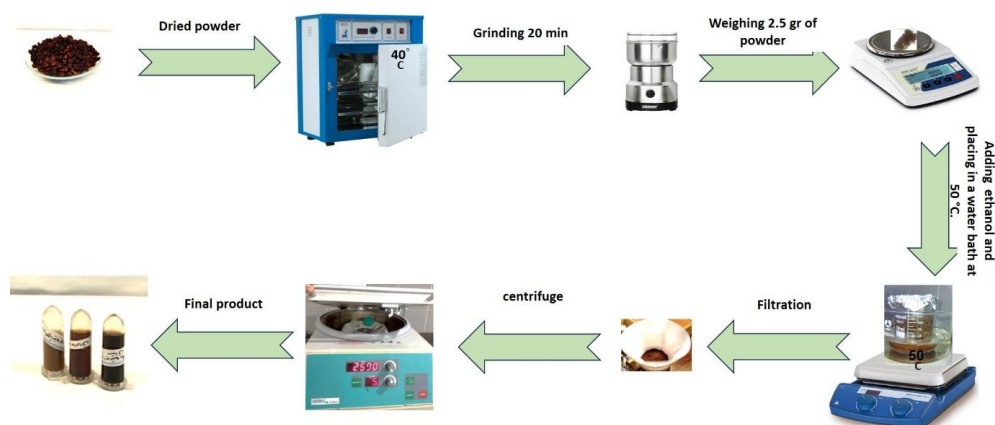
۲-۳- مشخصه‌یابی و آزمون

برای بررسی خواص فیزیکی، نوری و الکتروشیمیایی رنگزهای طبیعی استخراج‌شده، مجموعه‌ای از آزمون‌های تحلیلی انجام شد. طیف‌سنجی UV-Vis با (UVLine, Secomam) از کشور فرانسه برای تعیین طول موج جذب بیشینه (λ_{max})، بررسی ساختار نوری، انتقال بار و کاف انرژی رنگزها انجام شده است. آزمون FT-IR (FT-IR 4600, Jasco) از کشور ژاپن برای شناسایی گروه‌های عاملی، پیوندهای شیمیایی فعال و بررسی تغییرات ساختاری در اثر استخراج یا ترکیب با نانوساختارها استفاده شده است. ولتاژمتری چرخه‌ای (CV, Radsat-30) از کشور ایران برای ارزیابی پایداری الکترونی رنگزها، رفتار اکسایش-کاهش و شناسایی پتانسیل‌های اکسایش-کاهش مؤثر و کنداکتومتری برای اندازه‌گیری رسانایی ویژه الکترولیت‌های حاوی رنگزا و بررسی تأثیر ترکیب و pH بر هدایت الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. آزمون پتانسیل زتا جهت تعیین پایداری کلوئیدی رنگزها در محلول و تحلیل تامل آن‌ها به برهم‌کنش با سطح TiO_2 یا سایر نانوساختارها استفاده شد. این مجموعه‌ی تحلیلی امکان بررسی جامع عملکرد رنگزهای طبیعی را در کاربردهای فوتوالکتروشیمیایی از جمله سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگزا را فراهم ساخت. این مجموعه تحلیلی امکان بررسی جامع عملکرد رنگزهای طبیعی را در کاربردهای فوتوالکتروشیمیایی از جمله سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگزا را فراهم ساخت.

آزمایشگاهی، لوله آزمایش و صافی پارچه‌ای تمیز برای صافش اولیه می‌باشند.

۲-۲- روش استخراج رنگزها

ابتدا گلبرگ‌های گیاه گل انار از بخش گل جدا شده و با آب شهری به‌خوبی شستشو داده شدند. نمونه‌های مرطوب پس از خشک کردن اولیه با دستمال کاغذی، در خشک‌کن با دمای ثابت ۴۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. پس از خشک شدن کامل، گلبرگ‌ها توسط آسیاب برقی پودر شده و نمونه خشک بدست آمده، در لوله‌های فالتون ذخیره گردید. برای فرایند استخراج، مقدار ۲/۵ گرم از پودر خشک شده با ۱۰ میلی‌لیتر از یکی از سه نوع حلال شامل اتانل خالص، آب دیونیزه و مخلوط حجمی اتانل: آب دیونیزه (۱:۱)، به‌صورت مجزا در بشر مخلوط شدند. هر نمونه به‌مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد روی گرم‌کن مغناطیسی تحت هم‌زدن یکنواخت قرار گرفت تا فرایند استخراج بهینه انجام شود. پس از اتمام، مخلوط به وسیله پارچه تمیز آزمایشگاهی صاف شده و محلول استخراج‌شده به فالتون منتقل شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۵ دقیقه جداسازی شدند تا ذرات معلق و ناخالصی‌ها از فاز محلول جدا شوند. تمام مراحل فوق برای نمونه‌های گیاهی دیگر شامل سماق، کاکل ذرت با شرایط یکسان تکرار گردید تا امکان مقایسه بین عصاره‌های استخراج‌شده فراهم شود. شکل ۱ مراحل استخراج را برای رنگزها را نشان می‌دهد. این روند شامل شستشو، خشک‌سازی، آسیاب، استخراج با حلال‌های مختلف، صافش، سانتریفیوژ و ذخیره‌سازی برای آزمون است. ساختار



شکل ۱: روندنمای استخراج رنگزا.

Figure 1: Dye extraction process diagram.

² Conductometry

³ Zeta Potential Analysis

¹ Ultraviolet-visible

۳- بحث و نتایج

پیش از تحلیل داده‌های تجربی، بررسی نقش رنگزاهای طبیعی در سازوکار عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگزا ضروری است. در این سلول‌ها، رنگزاها به‌عنوان حسگرهای نوری عمل می‌کنند؛ آن‌ها نور خورشید را جذب کرده و الکترون‌های برانگیخته‌شده را به نوار رسانش نیمه‌رسانا (معمولاً TiO_2) منتقل می‌کنند. این فرایند به ویژگی‌هایی مانند ساختار مزدوج مولکول، وجود گروه‌های عاملی فعال ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$) و قابلیت پیوند با سطح TiO_2 وابسته است (۳۹-).

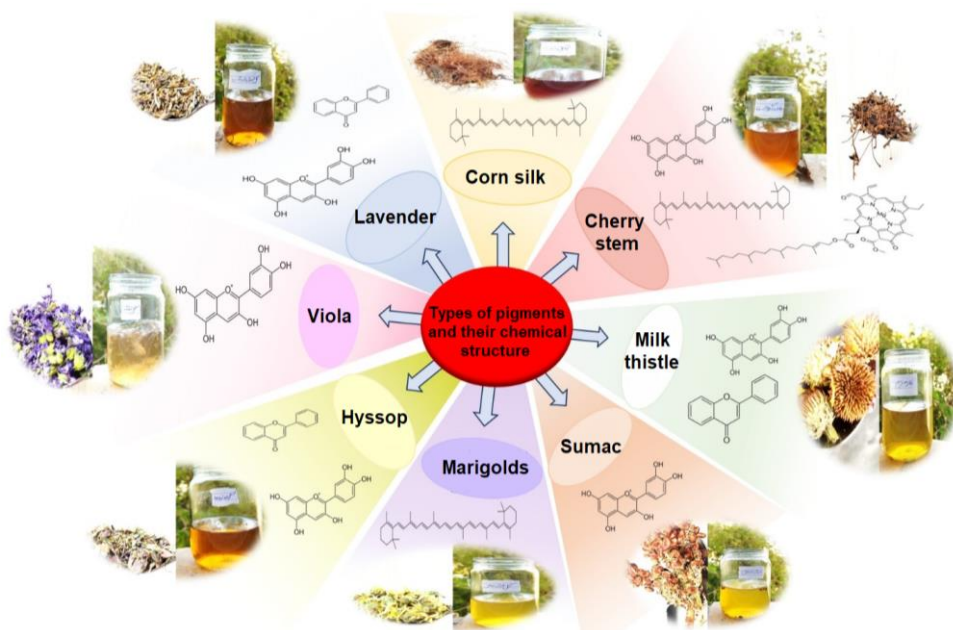
۳۷). رنگزاهایی که گروه‌های عاملی مناسب و نقطه ایزوالکتریک نزدیک به pH عملیاتی سیستم دارند، انتقال الکترون مؤثرتری نشان می‌دهند و بازترکیب بار در آن‌ها کمتر است.

شکل ۱ ساختار کلی چهار گروه اصلی رنگزاهای طبیعی شامل کلروفیل، بتانین، آنتوسیانین و بتاکاروتن را نشان می‌دهد که هر یک دارای ساختار مزدوج و گروه‌های عاملی ویژه‌ای هستند که در فرایند جذب نور و انتقال الکترون نقش دارند. در جدول ۱، ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی این رنگزاها از جمله محدوده جذب نوری، نوع گروه‌های عاملی، pK_a و پتانسیل زتا خلاصه شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و الکتروشیمیایی رنگزاهای طبیعی از جمله گروه‌های عاملی، pI ، pK_a .

Table 1: Physical and electrochemical characteristics of natural dyes including functional groups, pK_a , pI .

Natural Dye	Main functional group	pK_a range	Notes about the isoelectric point (pI)	Application potential in solar cells and key properties
Anthocyanins	Hydroxyl group ($-\text{OH}$), methoxy ($-\text{OCH}_3$), flavylium cation	1-4	~4-5 (pH sensitive)	pH-dependent color change (red in acidic environment $\rightarrow$ blue in alkaline). High antioxidant properties. Application in pH sensors
Chlorophyll (a/b)	Carboxyl group ($-\text{COOH}$), porphyrin ring with Mg^{2+}	~4.5	Amphiphilic (unspecified)	High light absorption but unstable in light. Potential for use in bio-solar cells due to magnesium redox activity
Beta-carotene (carotenoids)	Conjugated polyan chain	N/A (non-polar)	No charge	Excellent light absorption (400–500 nm). Application in solar cells for UV protection
Betalains	Carboxyl ($-\text{COOH}$) & amino ($-\text{NH}_2$) groups	~3-5	~3.5-4.5 (Amphoteric)	High solubility in water. Decomposes at $\text{pH} > 7$. Potential for electrolyte studies due to zwitterionic nature



شکل ۲: رنگزاهای طبیعی کلروفیل، بتانین، آنتوسیانین و بتاکاروتن.

Figure 2: Natural dyes chlorophyll, betanin, anthocyanin and beta-carotene.

۳-۱- تحلیل طیف UV-Vis

در شکل ۴، طیف‌های جذب نمونه‌های استخراج‌شده در محلول و همچنین در حضور TiO_2 در ناحیه فرابنفش-مرئی (UV-Vis) ارائه شده است. بیشینه جذب (λ_{max}) هر رنگزا در محدوده مشخصی قرار دارد که وابسته به نوع رنگزا و ساختار شیمیایی آن است. این ویژگی‌های طیفی نقش مهمی در بازده جذب نور در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا دارند. با استفاده از رابطه ۱ مقدار کل آنتوسیانین استخراج شده از هر نمونه برحسب میلی گرم در گرم نمونه خشک‌شده محاسبه می‌شود (۴۱).

$$\text{Total anthocyanins } \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Abs}_{\lambda_{\text{max}}} \times \text{FD} \times 100}{E_{1\text{cm}}^{1\%}} \quad (1)$$

در این معادله که برای محاسبه کل مقدار آنتوسیانین بر حسب یک گرم از زیست توده استفاده می‌شود، $\text{Abs}_{\lambda_{\text{max}}}$ میزان جذب محلول رنگزا در طول موج ۳۳۵ نانومتر، $E_{1\text{cm}}^{1\%}$ توانایی جذب مولی در طول موج ۳۳۵ نانومتر که برابر با ۸۵ و FD برابر با نسبت حجمی محلول رنگزا در حلال می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر بیشینه جذب و آنتوسیانین استخراج‌شده از هر زیست توده نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حضور گروه‌های کربونیل و هیدروکسیل در ساختار آنتوسیانین‌ها و کلروفیل‌ها، باعث برقراری پیوند مؤثر با سطح TiO_2 و بهبود پایداری سیستم می‌شود.

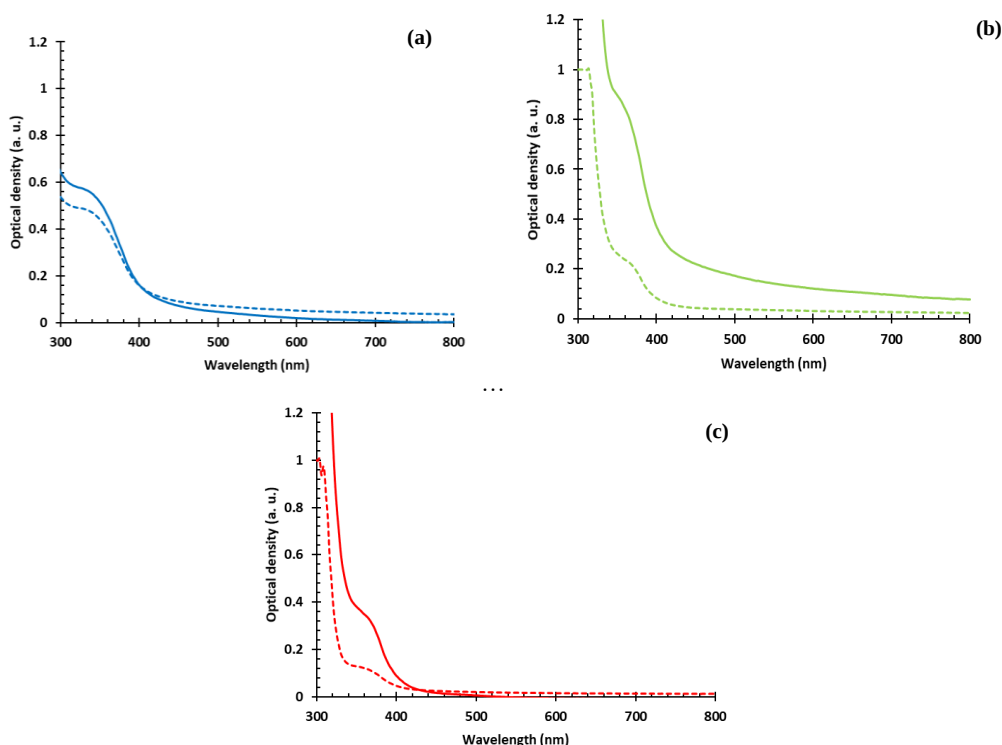
بر اساس نتایج FTIR و UV-Vis، می‌توان رفتار رنگزاهای استخراج‌شده را با ویژگی‌های ساختاری آن‌ها مرتبط دانست. به‌ویژه، شدت نوارهای O-H و C=O در عصاره گل انار و کاکل ذرت بیانگر وجود رنگ‌سازهای فعال و پیوند قوی‌تر با سطح نیمه‌رسانا است که انتقال بار الکترونی مؤثرتری را به همراه دارد. در ادامه، ویژگی‌های نوری و الکتروشیمیایی رنگزاها به تفکیک بررسی و ارتباط آن‌ها با عملکرد سلول‌های ساخته‌شده تحلیل شده است.

در این بخش، نتایج حاصل از استخراج، بررسی و آزمون رنگزاهای طبیعی از سه منبع گیاهی شامل گل انار، سماق، و کاکل ذرت ارائه و تحلیل می‌شود. هدف از این بررسی، مقایسه ویژگی‌های نوری، الکتروشیمیایی و رسانایی نمونه‌ها در حلال‌های مختلف و ارزیابی قابلیت آن‌ها در کاربردهای نوری، به ویژه سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگزا است. همان‌گونه که در جدول ۲ نشان داده شده است بر اساس روش استخراج توضیح داده شده، عصاره‌گیری از منابع زیست توده انجام شد و تحلیل نتایج به شرح زیر می‌باشد.

جدول ۲: گیاه و رنگزا استخراج شده.

Table 2 : Plants and their extracted Dyes.

Plant name	Plant essence	Plant powder	Plant sample figure
Pomegrana Flower			
Corn silk			
Sumac			



شکل ۴: طیف جذب UV-Vis ترکیبات رنگ (منحنی پیوسته) و رنگ-TiO₂ (منحنی خط چین) برای: (a) کاکل ذرت، (b) سماق و (c) گل انار در بازه ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر.

Figure 4. UV-Vis absorption spectra of dye extracts (solid line) and dye-TiO₂ complexes (dashed line) for: (a) corn silk, (b) sumac, and (c) pomegranate flower, in the wavelength range of 300–800 nm.

از اثرات انتقال به سرخ^۱ به دلیل ساختار متفاوت رنگزا یا بارگذاری کمتر روی TiO₂ باشد. همچنین جذب گسترده‌تر در ناحیه مرئی، پتانسیل آن برای جذب نور با انرژی کمتر را نشان می‌دهد. رنگزا سماق با جذب ماکزیمم نسبتاً پایین‌تر و منحنی گسترده‌تر، عملکرد ضعیف‌تری در ناحیه مرئی از خود نشان می‌دهد. این پدیده می‌تواند به علت پیوند ضعیف‌تر با سطح TiO₂ یا وجود مقدار کمتر رنگ‌سازهای مزدوج باشد. رنگزا گل انار، با جذب قوی‌تر در ناحیه فرابنفش-مرئی، محتوای بالای آنتوسیانین و طیف جذب مشخص با لبه طیفی مناسب، بهترین عملکرد نوری را در بین سه نمونه بررسی شده دارد. کاکل ذرت پتانسیل خوبی به ویژه در ناحیه مرئی دارد ولی نیازمند بهینه‌سازی بیشتر در بارگذاری رنگ است. سماق نیز با وجود محتوای بالای آنتوسیانین، از نظر جذب نوری عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دو نمونه دیگر دارد.

۳-۲- بررسی ساختاری و شناسایی گروه‌های عاملی

شکل ۵ طیف FTIR برای هر سه نمونه زیست توده را نشان می‌دهد. نتایج آزمون FTIR حضور گروه‌های عاملی مؤثر مانند -OH، -COOH، -C=O و پیوندهای مزدوج را تأیید می‌کنند. این گروه‌ها نقش کلیدی در جذب نور، برهمکنش با سطح TiO₂ و پایداری ساختاری رنگزا دارند

جدول ۳: بیشینه جذب و میزان استخراج از هر گیاه.

Table 3: Maximum absorption and extraction from the plants.

Plant	(λ _{max})	Total anthocyanin in dry sample
Pogmegrana Flower	0.80	≈ 2443.0
Sumac	0.85	≈ 2596.7
Corn silk	0.55	≈ 1680.9

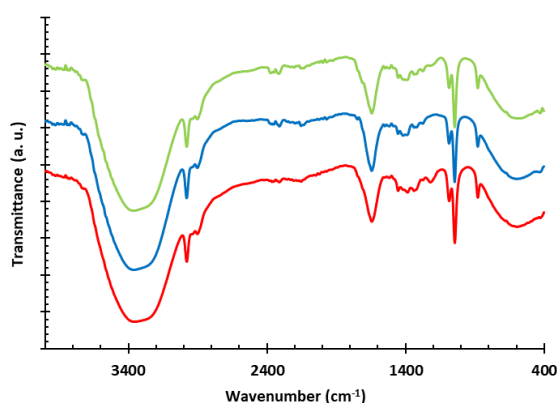
این داده‌ها نشان می‌دهد که رنگزا استخراج شده از سماق، اگرچه در ترکیب با TiO₂ جذب ضعیف‌تری دارد، از لحاظ محتوای آنتوسیانین در شرایط استخراج مشابه، بیشترین مقدار را داراست. از نظر شکل طیف جذب، نمونه گل انار بیشترین جذب نوری را در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. جذب بالا در این بازه نشان‌دهنده حضور گروه‌های رنگ‌ساز مزدوج و برهم‌کنش مؤثر با TiO₂ است، که منجر به انتقال الکترون مؤثر در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا خواهد شد. شیب تند نزولی پس از لبه جذب (۳۵۰ نانومتر) نیز نشان‌دهنده خلوص طیفی بالا و نبود نوارهای جذب ثانویه ناخواسته است. در مقابل، طیف کاکل ذرت، گرچه جذب کمتری دارد، لبه جذب آن به سمت طول‌موج‌های بلندتر جابه‌جا شده است که می‌تواند ناشی

¹ bathochromic shift

باشد. بنابراین، رنگزاهای گل نار و کاکل ذرت به دلیل کاف انرژی مناسب، رسانایی بالا و تراز انرژی پایین‌ترین اوربیتال مولکولی پرنشده LUMO کم‌تر، گزینه‌های مؤثری برای استفاده در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا محسوب می‌شوند.

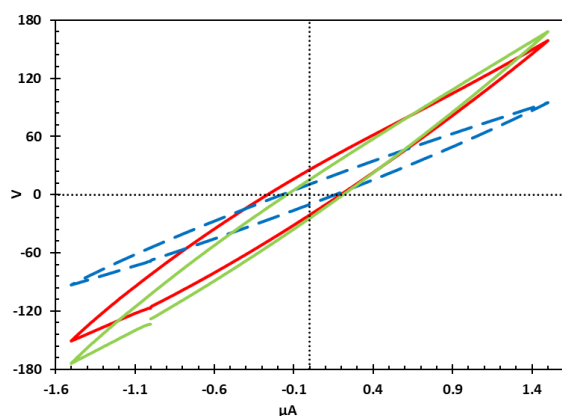
۳-۴- عوامل الکترونیکی رنگزها

یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی عملکرد رنگزها برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگزا، مقادیر ترازهای انرژی بالاترین اوربیتال مولکولی پر شده HOMO و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی پرنشده و در نتیجه کاف انرژی (Eg) آن‌هاست. برای به دست آوردن این مقدار آزمون CV مطابق شکل ۶ گرفته شده است. جدول ۴ این اطلاعات را به همراه مقاومت الکترولیت هر نمونه ارائه می‌دهد.



شکل ۵: طیف‌های FTIR رنگزهای طبیعی استخراج‌شده از گل انار (قرمز)، سماق، کاکل ذرت (آبی) و سماق (سبز) در سیستم‌های حلالی مختلف (اتانل، آب مقطر و مخلوط اتانل: آب با نسبت ۱:۱).

Figure 5: FTIR spectra of natural dyes extracted from pomegranate flower (red), sumac (green), and corn silk (blue) in different solvent systems (ethanol, distilled water, and an ethanol:water mixture in a 1:1 ratio).



شکل ۶: نمودار آزمون CV برای عصاره‌های استخراج‌شده از گل انار (قرمز)، کاکل ذرت (آبی) و سماق (سبز)

Figure 6: Cyclic voltammetry (CV) curves of the extracted dyes from pomegranate flower (red), corn silk (blue), and sumac (green).

(۴۲). طیف‌های FTIR اطلاعات دقیقی درباره گروه‌های عاملی موجود در هر عصاره را ارائه می‌دهند و حضور رنگ‌سازها و گروه‌های پیونددهنده فعال را تأیید می‌کنند. در تمامی نمونه‌ها، یک نوار پهن در بازه $3500-3200 \text{ cm}^{-1}$ مشاهده شد که مربوط به ارتعاشات کششی O-H است و نشان‌دهنده وجود گروه‌های فنلی و هیدروکسیلی می‌باشد که برای اتصال رنگ به TiO_2 در DSSC حیاتی هستند. کشش C-H در ناحیه 2900 cm^{-1} در تمام نمونه‌ها مشاهده شد. قله‌های مشخص کشش کربونیل (C=O) در حدود 1700 cm^{-1} ، به‌ویژه در عصاره‌های سماق و گل انار، برجسته‌تر بودند که بیانگر محتوای بالای آنتوسیانین یا فلاونوئید در این نمونه‌هاست (۴۳). عصاره کاکل ذرت در اتانل نیز قله‌هایی متوسط در این ناحیه نشان داد که احتمالاً ناشی از حضور ترکیبات پلی‌فنلی با سطح اکسایش کمتر است. باند کششی C=C آروماتیک در حدود 1600 cm^{-1} در طیف کاکل ذرت نیز به‌خوبی دیده شد و تأییدی بر وجود سیستم‌های مزدوج آروماتیک است (۴۴). همچنین، قله‌های قوی در ناحیه $1200-1000 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به کشش C-O و C-OH بوده که ماهیت گلیکوزیدی رنگزها را تأیید می‌کند. در مجموع، عصاره گل انار بیشترین شدت قله‌ها را در تمام نواحی کلیدی نشان داد که نشان‌دهنده غنای بالای آن از نظر گروه‌های رنگ‌ساز و پیونددهنده است. عصاره کاکل ذرت نیز جذب‌هایی با شدت متوسط در نواحی مرتبط داشت که نشان‌دهنده پتانسیل متوسط آن به‌عنوان حساس‌کننده‌ای با پایداری مناسب و محتوای قابل‌قبول پلی‌فنلی است، هرچند احتمالاً برای عملکرد بهینه در سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگزا نیاز به عامل‌دارسازی سطحی یا هم حساس‌کننده خواهد داشت.

۳-۳- مقایسه رسانایی الکتریکی

بررسی رسانایی الکتریکی نمونه‌های استخراج‌شده با استفاده از حلال ترکیبی آب و اتانل (نسبت ۱:۱) نشان می‌دهد که این محیط استخراج، رسانایی نسبتاً مطلوبی برای رنگزها فراهم کرده است. به‌طور خاص، عصاره کاکل ذرت با رسانایی $2300 \mu\text{S/cm}$ و گل انار با $1430 \mu\text{S/cm}$ عملکرد بهتری نسبت به سماق با $1001 \mu\text{S/cm}$ نشان دادند. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از غلظت بیشتر گروه‌های قطبی قابل حل و انتقال یون‌های مؤثر در این دو عصاره باشد. استفاده از حلال ترکیبی باعث بهبود حلالیت ترکیبات فعال می‌شود و تعادلی بین قطبیت بالا (آب) و توانایی استخراج ترکیبات آلی (اتانل) را ایجاد می‌کند، که در نتیجه به افزایش قابلیت انتقال بار در سیستم‌های فوتوالکتروشیمیایی مانند سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا کمک می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهند که کاکل ذرت در این حلال ترکیبی بالاترین رسانایی را دارد و می‌تواند انتخاب مناسبی برای کاربرد در سامانه‌های انتقال بار

¹ Glycosidic

جدول ۴: مقایسه رسانایی نمونه ها در حلال های مختلف

بر حسب واحد میکرو زیمنس.

Table 4: Comparison of the electrical conductivity of the samples in different solvents (in μS).

Number	Sample	$E_{HOMO}(eV)$	$E_{LUMO}(eV)$	$E_g(eV)$	$R(\Omega)$
1	Sumac	-6.3	-3.3	3.0	0.139
2	Pogmegrana Flower	-6.31	-3.31	3.1	0.0043
3	Corn silk	-6.29	-3.29	2.99	0.0037

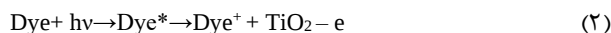
تراز LUMO پایین تر و مقاومت کمتر در رنگزاهای گل انار و کاکل ذرت می تواند انتقال الکترون به نیمه رسانا TiO_2 را بهبود بخشد. از سوی دیگر، کاف انرژی مناسب در محدوده eV ۲-۳ برای این رنگزاهای تطابق خوبی با جذب نور مرئی ایجاد می کند. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که رنگزاهای استخراج شده از گل انار و کاکل ذرت دارای ویژگی های الکترونیکی مناسب تر، جذب نوری قوی تر و رسانایی بالاتر نسبت به سایر نمونه ها هستند. ترکیب ویژگی های طیفی، ساختاری و الکتروشیمیایی نشان می دهد که این دو منبع گیاهی می توانند گزینه های مناسبی برای کاربرد در سلول های خورشیدی حساس شده با رنگزاهای طبیعی باشند.

در مقایسه با مطالعات پیشین، رنگزاهای طبیعی استخراج شده از گل انار، سماق و کاکل ذرت در این پژوهش عملکرد قابل توجهی از خود نشان داده اند. رنگزای گل انار با بیشینه جذب نوری در ۴۴۳ نانومتر، مقدار آنتوسیانین 0.8 میلی گرم بر گرم، کاف انرژی 3.1 الکترون ولت و رسانایی ویژه 2300 میکروزیمنس بر سانتی متر، بازدهی $6/2$ درصد در ساختار DSSC ارائه داده است. کاکل ذرت نیز با λ_{max} برابر 409 نانومتر، آنتوسیانین 0.55 میلی گرم بر گرم، کاف انرژی الکترون ولت و رسانایی مشابه، بازدهی $5/8$ درصدی داشته است. در مقایسه، رنگزاهای طبیعی گزارش شده در مطالعات دیگر مانند توت سیاه با بازدهی $6/5$ درصد، جمبو با $7/1$ درصد، پوست انبه با $6/8$ درصد و چغندر با $7/5$ درصد عملکرد بالاتری داشته اند (16 ، 25 ، 26). اما تفاوت در شرایط استخراج، نوع گیاه و روش تثبیت رنگزاهای نقش مهمی در این اختلاف دارد. با این حال، رنگزاهای بومی ایران با ویژگی هایی مانند زیست سازگاری، فراوانی، سهولت استخراج و قابلیت اتصال مؤثر به TiO_2 ، جایگاه مناسبی در توسعه سلول های خورشیدی سبز و مقرون به صرفه دارند و می توانند به عنوان جایگزین های مؤثر برای حساس کننده های معدنی پرهزینه مطرح شوند.

۳-۵- سازوکار عملکرد انتقال الکترون

فرایند عملکرد رنگزاهای طبیعی در کاربردهای فوتوالکتروشیمیایی بر اساس برانگیختگی نوری و انتقال الکترون است. در این فرایند، مولکول رنگزا پس از جذب فوتون ($h\nu$) از حالت پایه به حالت

برانگیخته (Dye^*) منتقل می شود و سپس الکترون از تراز LUMO رنگزا به نوار رسانش نیمه رسانا TiO_2 تزریق می گردد (واکنش ۲).



الکترون تزریق شده در ساختار TiO_2 به سمت الکتروود جمع کننده منتقل شده و در نهایت از طریق مدار خارجی به الکتروود مقابل بازمی گردد. در این میان، رنگزای اکسید شده توسط گونه های احیا کننده در الکتروولیت بازیابی می شود. وجود گروه های عاملی فعال مانند $C=O$ و $C-O$ ، OH در ساختار رنگزا (تأیید شده توسط FTIR) سبب ایجاد پیوندهای هیدروژنی یا کووالانسی با سطح TiO_2 شده و فرایند انتقال بار را تسهیل می کند. افزون بر این، اختلاف انرژی میان تراز LUMO رنگزا و نوار رسانش TiO_2 ، نیروی محرکه لازم برای تزریق الکترون را فراهم می آورد، در حالی که موقعیت HOMO رنگزا باید پایین تر از پتانسیل احیای الکتروولیت باشد تا چرخه بازتولید رنگزا به صورت کارآمد انجام شود. نتایج آزمون های UV-Vis و ولتاژمتری چرخه ای (CV) در این پژوهش همگی مؤید این سازوکار و کارایی انتقال بار در رنگزاهای بومی مورد بررسی هستند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، نتایج به دست آمده از بررسی طیفی، ساختاری، الکتروشیمیایی و الکترونیکی رنگزاهای استخراج شده از گیاهان بومی، گل انار، سماق، کاکل ذرت و پنیرک نشان می دهد که نوع منبع گیاهی و نوع حلال استخراج نقش بسیار مهمی در عملکرد رنگزاهای برای کاربرد در سلول های خورشیدی حساس شده با رنگزا دارد. طیف های UV-Vis حاکی از آن هستند که رنگزاهای گل انار بیشترین جذب نوری را در محدوده فرابنفش-مرئی دارد و از نظر میزان آنتوسیانین نیز غنی تر است. بررسی ترکیبات رنگ- TiO_2 نیز نشان داد که ترکیب حاوی رنگ گل انار عملکرد نوری بالاتری نسبت به سایر نمونه ها دارد. در بررسی FTIR، شدت بالای قله های $C=O$ ، $O-H$ و $C-O$ در عصاره گل انار و تا حدودی کاکل ذرت، تأییدی بر وجود رنگ سازهای فعال و گروه های پیونددهنده مؤثر در این رنگزاهای بود که برای اتصال مؤثر به سطح TiO_2 ضروری است. از سوی دیگر، بررسی رسانایی نمونه ها نشان داد که عصاره های استخراج شده با آب دیونیزه، به ویژه در مورد کاکل ذرت، رسانایی الکتریکی بسیار بالاتری از نمونه های اتانلی داشتند که می تواند به حضور گروه های قطبی محلول در آب و افزایش تحرک یون ها مرتبط باشد. همچنین بررسی ترازهای انرژی HOMO/LUMO و مقاومت الکتروولیت ها نشان داد که گل انار و کاکل ذرت دارای کاف انرژی مناسب (در بازه eV ۲-۳)، تراز LUMO پایین و مقاومت پایین هستند که همه این عوامل برای انتقال الکترون مؤثر در DSSC حیاتی اند. در مجموع، ترکیب داده های طیفی، ساختاری و الکترونیکی نشان می دهد که گل انار و کاکل ذرت

توسعه سلول‌های خورشیدی طبیعی و پایدار فراهم می‌کند. در مقابل، محدودیت‌های پژوهش شامل عدم ساخت سلول خورشیدی واقعی در این مرحله، عدم بررسی پایداری نوری طولانی مدت رنگزها و نیاز به تحلیل‌های پیشرفته‌تر مانند TD-DFT یا PL برای بررسی دقیق‌تر انتقال بار است که می‌تواند در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد. با در نظر گرفتن این مزایا و معایب، پژوهش حاضر با وجود ماهیت مقدماتی خود، پایه‌ای محکم برای توسعه رنگزهای طبیعی بومی و فناوری‌های انرژی سبز و پایدار ارائه می‌دهد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه خلیج فارس به دلیل حمایت از انجام این پژوهش، تقدیر و تشکر می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

پتانسیل بیشتری نسبت به سماق برای استفاده به عنوان حساس‌کننده‌های طبیعی در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگزا دارند و می‌توانند پایه‌ای برای توسعه رنگزهای طبیعی پایدار و کارآمد در این حوزه باشند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از رنگزهای بومی نه تنها از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی مزیت دارد، بلکه می‌تواند راهکاری پایدار برای توسعه فناوری‌های انرژی در مناطق محلی ایران فراهم کند. به طور کلی، این پژوهش با تمرکز بر رنگزهای بومی ایران، با شناخت و بهره‌گیری از منابع گیاهی محلی گامی در جهت توسعه سلول‌های خورشیدی طبیعی، مقرون به صرفه و زیست سازگار برداشته است. نتایج حاصل نه تنها در تقویت دانش بنیادی درباره رفتار فیزیکی و الکترونی رنگزهای طبیعی مؤثر بود، بلکه می‌تواند مبنایی برای توسعه فناوری‌های انرژی سبز و بومی در مناطق مختلف کشور قرار گیرد. با توجه به این نتایج، می‌توان گفت که مزایای اصلی این پژوهش شامل استفاده از منابع گیاهی بومی و در دسترس، روش استخراج ساده و کم‌هزینه، تحلیل جامع نوری، ساختاری و الکترونیکی رنگزهاست که زمینه را برای

۵- مراجع

- Shalini S, Balasundaraprabhu R, Kumar R, Prabavathy TS, Senthilarasu N, Prasanna S. Status and outlook of sensitizers/dyes used in dye-sensitized solar cells (DSSC): a review. *Int J Energy Res.* 2016;40(10):1303-1320. <http://doi.org/10.1002/er.3538>.
- Semalti P, Sharma SN. Dye-sensitized solar cells (DSSCs) electrolytes and natural photosensitizers: a review. *J Nanosci Nanotechnol.* 2020;20(6):3647-3658. <http://doi.org/10.1166/jnn.2020.17530>.
- Rahman S, Haleem A, Siddiq M, Hussain MK, Qamar S, Hameed S. Research on dye-sensitized solar cells: recent advancement toward the various constituents of dye-sensitized solar cells for efficiency enhancement and future prospects. *RSC Adv.* 2023;13(28):19508-19529. <http://doi.org/10.1039/D3RA00903>.
- Boo HO, Hwang SJ, Bae CS, Park SH, Heo BG, Gorinstein S. Extraction and characterization of some natural plant pigments. *Ind Crops Prod.* 2012;40:129-135. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.042>.
- Kaliramna S, Dhayal SS, Chaudhary R, Khaturia A. A review and comparative analysis of different types of dyes for applications in dye-sensitized solar cells. *Braz J Phys.* 2022;52(4):136. <http://doi.org/10.1007/s13538-022-01109-4>.
- Aghazada S, Nazeeruddin MK. Ruthenium complexes as sensitizers in dye-sensitized solar cells. *Inorganics.* 2018;6(2):52. <http://doi.org/10.3390/inorganics6020052>.
- Mehmood U, Rahman SU, Harrabi K, Hussein IA, Reddy BV. Recent advances in dye-sensitized solar cells. *Adv Mater Sci Eng.* 2014;2014:974782. <http://doi.org/10.1155/2014/974782>.
- Vougioukalakis GC, Philippopoulos AI, Stergiopoulos T, Falaras P. Contributions to the development of ruthenium-based sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Coord Chem Rev.* 2011;255(21-22):2602-2621. <http://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.11.006>.
- Ito S. Investigation of dyes for dye-sensitized solar cells: ruthenium-complex dyes, metal-free dyes, metal-complex porphyrin dyes and natural dyes. Rijeka: InTech; 2011. <http://doi.org/10.5772/19960>.
- Jalali T, Arkian P, Golshan M, Jalali M, Osfour S. Performance evaluation of natural native dyes as photosensitizers in dye-sensitized solar cells. *Opt Mater.* 2020;110:110441. <http://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110441>.
- Salinas Y, Brüggemann O, Monkowius U. Visible light photocleavable ruthenium-based molecular gates to reversibly control release from mesoporous silica nanoparticles. *Nanomaterials.* 2020;10(6):1030. <http://doi.org/10.3390/nano10061030>.
- Miettunen K, Santasalo-Aarnio A. Eco-design for dye solar cells: from hazardous waste to profitable recovery. *J Clean Prod.* 2021;320:128743. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128743>.
- Mariotti N, Bonomo M, Fagioli L, Barbero N, Gerbaldi C, Bella F, Barolo C. Recent advances in eco-friendly and cost-effective materials towards sustainable dye-sensitized solar cells. *Green Chem.* 2020;22(21):7168-7218. <http://doi.org/10.1039/D0GC01148G>.
- Malhotra SS, Ahmed M, Gupta MK, Ansari A. Metal-free and natural dye-sensitized solar cells: recent advancements and future perspectives. *Sustain Energy Fuels.*

- 2024;8(18):4127-4163. <http://doi.org/10.1039/D4SE00406J>.
15. Arkan F, Pakravesh F, Barati Darband F, Sabagh S, Izadyar M. Recent progress toward high-performance dye-sensitized solar cells: a review. *J Iran Chem Soc.* 2024;21(3):577-638. <http://doi.org/10.1007/s13738-024-02967-2>.
 16. Rajkumar S, Venkatraman MR. Anthocyanin and betalain pigments assisted green synthesis of TiO₂: a sustainable and cost-effective approach for dye-sensitized solar cells photoanodes. *Opt Mater.* 2025;160:116710. <http://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116710>.
 17. Dhorkule M, Lamrood P, Ralegankar S, Patole SP, Wagh SS, Pathan HM. Unveiling the efficiency of dye-sensitized solar cells: a journey from synthetic to natural dyes. *ES Food Agrofor.* 2024;16(2):1086. <http://doi.org/10.30919/esfaf1086>.
 18. Jethwa A, Pipaliya P, Tank D, Patni N. Novel combination of natural dyes to augment the overall efficiency of DSSC. *J Biol Inorg Chem.* 2024;245(1):237. <http://doi.org/10.1007/s10751-024-02084-9>.
 19. Tennakone K, Kumara GRRA, Kumarasinghe AR, Sirimanne PM, Wijayantha KGU. Efficient photosensitization of nanocrystalline TiO₂ films by tannins and related phenolic substances. *J Photochem Photobiol A Chem.* 1996;94(2-3):217-220. [http://doi.org/10.1016/1010-6030\(95\)04222-9](http://doi.org/10.1016/1010-6030(95)04222-9).
 20. Calogero G, Di Marco G, Caramori S, Cazzanti S, Argazzi R, Bignozzi CA. Natural dye sensitizers for photoelectrochemical cells. *Energy Environ Sci.* 2009;2(11):1162-1172. <http://doi.org/10.1039/B913248C>.
 21. Shirahmad Haghighi S, Jafari R, Hosseinnajad M. Investigation of the color characteristics of anthocyanin dyes applied in solar cells sensitized to natural dyes. *Color Sci Technol.* 1400;15(2):79-85.
 22. Calogero G, Yum JH, Sinopoli A, Di Marco G, Grätzel M, Nazeeruddin MK. Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. *Sol Energy.* 2012;86(5):1563-1575. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.018>.
 23. Okello A, Owuor BO, Namukobe J, Okello D, Mwabora J. Influence of concentration of anthocyanins on electron transport in dye-sensitized solar cells. *Heliyon.* 2021;7(3):e06571. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06571>.
 24. Triyanto A, Ali NA, Salleh H, Setiawan J, Yatim NI. Development of natural dye photosensitizers for dye-sensitized solar cells: a review. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2024;31(22):31679-31690. <http://doi.org/10.1007/s11356-024-33360-4>.
 25. Golshan M, Osfouri S, Azin R, Jalali T. Fabrication of optimized eco-friendly dye-sensitized solar cells by extracting pigments from low-cost native wild plants. *J Photochem Photobiol A Chem.* 2020;388:112191. <http://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112191>.
 26. Golshan M, Osfouri S, Azin R, Jalali T, Moheimani NR. Co-sensitization of natural and low-cost dyes for efficient panchromatic light-harvesting using dye-sensitized solar cells. *J Photochem Photobiol A Chem.* 2021;417:113345. <http://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113345>.
 27. Maiaugree W, Lowpa S, Towannang M, Rutphonsan P, Tangtrakarn A, Pimanpang S, et al. A dye-sensitized solar cell using natural counter electrode and natural dye derived from mangosteen peel waste. *Sci Rep.* 2015;5(1):15230. <http://doi.org/10.1038/srep15230>.
 28. Barbinta-Patrascu ME, Bitu B, Negut I. From nature to technology: exploring the potential of plant-based materials and modified plants in biomimetics, bionics, and green innovations. *Biomimetics.* 2024;9(7):390. <http://doi.org/10.3390/biomimetics9070390>.
 29. Arof AK, Ping TL. Chlorophyll as photosensitizer in dye-sensitized solar cells. In: *Chlorophyll. Rijeka: InTech; 2017.* p.105. <http://doi.org/10.5772/67955>.
 30. Kaliramma S, Dhayal SS, Chaudhary R, Khaturia S, Ameta KL, Kumar N. A review and comparative analysis of different types of dyes for applications in dye-sensitized solar cells. *Braz J Phys.* 2022;52(4):136. <http://doi.org/10.1007/s13538-022-01109-4>.
 31. Chandrika UG. Carotenoid dyes: properties and production. In: *Handbook of Natural Colorants.* 2023. 351-369. <http://doi.org/10.1002/9781119811749.ch16>.
 32. Mejica GFC, Ramaraj R, Unpaprom Y. Natural dye (chlorophyll, anthocyanin, carotenoid, flavonoid) photosensitizer for dye-sensitized solar cell: a review. *Maejo Int J Energy Environ Commun.* 2022;4(1):12-22. <http://doi.org/10.54279/mijeec.v4i1.247970>.
 33. Pramananda V, Fityay TAH, Misran E. Anthocyanin as natural dye in DSSC fabrication: a review. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2021;1122(1):012104. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1122/1/012104>.
 34. Amogne NY, Ayele DW, Tsigie YA. Recent advances in anthocyanin dyes extracted from plants for dye-sensitized solar cells. *Mater Renew Sustain Energy.* 2020;9(4):23. <http://doi.org/10.1007/s40243-020-00183-5>.
 35. Ramamoorthy R, Radha N, Maheswari G, Anandan S, Manoharan S, Victor Williams R. Betalain and anthocyanin dye-sensitized solar cells. *J Appl Electrochem.* 2016;46(9):929-941. <http://doi.org/10.1007/s10800-016-0974-9>.
 36. Sadowska-Bartosz I, Bartosz G. Biological properties and applications of betalains. *Molecules.* 2021;26(9):2520. <http://doi.org/10.3390/molecules26092520>.
 37. Baskar V, Venkatesh R, Ramalingam S. Flavonoids (antioxidant systems) in higher plants and their response to stresses. In: *Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants.* Cham: Springer; 2018. p.253-268. http://doi.org/10.1007/978-3-319-75088-0_12.
 38. Golshan M, Osfouri S, Azin R, Jalali T, Moheimani NR. A techno-economic analysis of marine algae for dye-sensitized solar cells: process optimization and scale-up. *Biomass Conv Bioref.* 2024;1-17. <http://doi.org/10.1007/s13399-024-06381-9>.
 39. Hussain M, Jalali T, Maftoon-Azad L, Osfouri S. Performance evaluation of natural dye-sensitized solar cells: a comparison of density functional theory and experimental data on chlorophyll, anthocyanin, and cocktail dyes as sensitizers. *ACS Appl Electron Mater.* 2024;6(3):1693-1709. <http://doi.org/10.1021/acsaem.3c01618>.
 40. Bist A, Chatterjee S. Review on efficiency enhancement using natural extract-mediated dye-sensitized solar cells for sustainable photovoltaics. *Energy Technol.* 2021;9(8):2001058. <http://doi.org/10.1002/ente.202001058>.
 41. Lohrasbi M, Pattanapanishawar P, Isenberg M, Chuang SS. Degradation study of dye-sensitized solar cells by electrochemical impedance and FTIR spectroscopy. In: *2013 IEEE EnergyTech.* Piscataway (NJ): IEEE; 2013. 1-4. <http://doi.org/10.1109/EnergyTech.2013.6645304>.
 42. Giusti MM, Wrolstad RE. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy.

- In: Wrolstad RE, editor. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. New York: John Wiley & Sons; 2001. <http://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>.
43. Nazeeruddin MK, Humphry-Baker R, Liska P, Grätzel M. Investigation of sensitizer adsorption and the influence of protons on current and voltage of a dye-sensitized nanocrystalline TiO₂ solar cell. J Phys Chem B. 2003;107(34):8981-8987. <http://doi.org/10.1021/jp022656f>.
44. Nnorom OO, Onuegbu GC. Authentication of Rothmannia whitfieldii dye extract with FTIR spectroscopy. J Text Sci Technol. 2019;5(2):38-49. <http://doi.org/10.4236/jtst.2019.52004>.
45. Gillard RD, Hardman SM, Thomas RG, Watkinson DE. The detection of dyes by FTIR microscopy. Stud Conserv. 1994;39(3):187-192. <http://doi.org/10.1179/sic.1994.39.3.187>.

How to cite this article:

Hosseini A, Jalali T, Osfour Sh. Physicochemical properties and optoelectronic performance of native natural dyes. J Stud Color World. 2025;16(2):171-183. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167661.1261> [In Persian].