

Synthesis of an Organic Dye Based on Indoline for Use in Dye-Sensitized Solar Cells

Mozhgan Hosseinneshad^{*1}, Kamaladin Gharanjig¹, Mohsen Fathi²

1- Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

2- Department of Physics, Shahrood University of Technology, P.O. Box 36155-316, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26-07-2025

Accepted: 24-09-2025

Available online: 15-10-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167615.1267

Keywords:

Dye-sensitized solar cells

Indoline

Indigo

Efficiency

Titanium dioxide

ABSTRACT

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) are a new technology for producing sustainable electrical energy. Dyes in this technology play the role of electron generation upon receiving incident light. In this study, an organic dye was prepared using carbazole as the starting material. The hydrogen base of carbazole was replaced with indigo and two acetylamino groups were placed on the phenylcarbazole rings. The chemical structure of the dyes was studied by analytical methods to confirm the chemical structure. The absorption properties of the synthesized dye were investigated in three solvents: ethanol and acetonitrile (polar solvents) and benzene (non-polar solvent). The study of the deposition process and the change in the absorption maximum was conducted in an ethanol solvent and on the surface of titanium dioxide semiconductor. The feasibility of using the dye and the excited electron transfer and hole filling were evaluated by cyclic voltammetry. Finally, the DSSCs were assembled using a platinum counter electrode and iodine redox couple electrolyte. The device efficiency and the excited electron lifetime were found to be about 17.6% and 29.02 milliseconds, respectively.

*Corresponding author: * hosseinneshad-mo@icrc.ac.ir



سنتز یک ماده رنگزای آلی برپایه ایندولین برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا

مژگان حسین‌نژاد^{۱*}، کمال‌الدین قرنجیگ^۲، محسن فتحی^۳

۱- دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴

۲- استاد، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، صندوق پستی: ۳۶۱۵۵-۳۱۶

چکیده

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، یک فناوری جدید برای تولید انرژی الکتریکی زیست سازگار است. مواد رنگزا در این فناوری، نقش تولید الکترون را با دریافت نور فرودی دارند. در این مطالعه یک ماده رنگزای آلی با استفاده از کربازول به عنوان ماده شروع کننده تهیه شد. هیدروژن بازی کربازول با ایندیگو جایگزین و دو گروه استیل آمین بر روی حلقه‌های فنیل کربازول قرار داده شد. مواد رنگزا برای تایید ساختار شیمیایی، توسط روش‌های دستگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. ویژگی‌های جذبی ماده رنگزای سنتز شده در سه حلال اتانل و استونیتریل (حلال‌های قطبی) و بنزن (حلال غیرقطبی) بررسی شد. مطالعه فرایند لایه نشانی و تغییر بیشینه جذب، در حلال اتانل و سطح نیمه‌رسانا دی‌اکسیدتیتانیوم انجام شد. امکان‌سنجی کاربرد ماده رنگزا و انتقال الکترون تهیه یافته و پیرشدن حفره توسط روش ولت‌سنجی چرخه‌ای ارزیابی شد. در نهایت سلول خورشیدی با استفاده از الکتروود مقابل پلاتین شده و الکتروولیت زوج اکسایش - کاهش ید مجتمع شد. بازده دستگاه و مقدار طول عمر الکترون تهیه یافته به ترتیب در حدود ۶/۱۷ درصد و ۲۹/۰۲ میلی‌ثانیه به دست آمد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167615.1267

واژه‌های کلیدی:

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا
ایندولین
ایندیگو
بازده
دی‌اکسید تیتانیوم

۱- مقدمه

برای پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده انرژی، انسان‌ها به طور گسترده‌ای سوخت‌های فسیلی سنتی از جمله زغال‌سنگ، نفت و گازهای طبیعی را مورد استفاده قرار داده‌اند، اما این منابع که برپایه کربن هستند، تجدیدنپذیر بوده‌اند و دارای منابع محدودی هستند. همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط‌زیست از پیامدهای عمده مصرف این منابع است (۱). در نتیجه، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و زیست‌سازگار مطلوب برای غلبه بر این موانع ضروری است. برای دستیابی به این هدف، منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله انرژی خورشیدی، برق آبی و بادی، برتری چشمگیری نسبت به منابع انرژی متعارف دارند (۲، ۳). انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی گسترده و ساده، نقش مهمی را در میان این منابع انرژی تجدیدپذیر در برآوردن این نیازها بازی می‌کند (۴). انرژی خورشیدی به صورت رایگان و مداوم در دسترس است و برخلاف نیروگاه‌های بادی و آبی تحت تاثیر دوره‌های خشکسالی و بارندگی نیست (۵). دو نوع فناوری انرژی خورشیدی متمرکز و فوتوولتایی برپایه تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی خورشیدی، دارای پتانسیل اقتصادی و تجاری‌سازی هستند (۶). فناوری انرژی خورشیدی متمرکز در مناطق خشک با تابش متوسط خورشیدی سودمندتر است اما نیروگاه‌های فوتوولتاییک به دلیل کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه، از نظر اقتصادی برای کشورهای در حال توسعه، به ویژه در مناطق مرطوب، مقرون به صرفه‌تر است (۷). یکی از نسل‌های فوتوولتاییک، سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است که به دلیل قیمت پایین، ظاهر رنگی و آسانی در تهیه مورد توجه قرار گرفته‌اند (۸). در این افزازه‌ها، مواد رنگزا تولید کننده الکترون بوده‌اند و با انتقال به نیمه‌هادی و دریافت الکترون از الکترولیت، چرخه تولید الکترون را کامل می‌کند (۴). تحقیقات زیادی بر روی معرفی ساختارهای پربازده و پایدار در برابر نور، به منظور کاربرد در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا انجام شده است (۹).

فرایندهای فوتوفیزیکی و فوتوشیمیایی دو ماده رنگزای آلی شامل اسید فنیل سیانوآکرلیک و گروه اتینیل توسط روش‌های آزمایشگاهی و تئوری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. ابتدا، هندسه، طیف‌های جذبی، عوامل واکنش شیمیایی، انتقال الکترون و فعالیت فوتونیک مواد رنگزا به طور سامانمند بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بازده دو ماده رنگزای سنتز شده در حدود ۹ درصد بوده و توافق قابل‌قبولی با نتایج تئوری دارد. در ادامه مواد رنگزای سنتز شده همراه با کلروفل برای حساس کردن سطح نیمه‌هادی استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان فوتوجریان تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش محدوده جذب و بهبود نرخ تولید الکترون تهییج یافته است. اغلب تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از دو ماده رنگزا با طیف جذبی مکمل می‌تواند در بهبود بازده تبدیل دستگاه موثر باشد (۱۰). در بسیاری از تحقیقات، گروه‌های الکترون دهنده و الکترون گیرنده و

چیدمان آنها در تولید حساس کننده‌های نوری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. برای مثال گروه‌های کربازول و بنزوتری‌آزول به عنوان واحدهای الکترون دهنده و اسید سیانوآکرلیک به عنوان گروه الکترون کشنده با چیدمان D-A1- π -A2 توسط ورما^۱ و همکارانش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که مهندسی ساختار می‌تواند بیشینه جذب را از ۳۰۹ نانومتر به ۵۲۳ نانومتر تغییر دهد. در این میان ماده رنگزای دارای دو گروه بنزوتری‌آزول بیشترین بازده و در حدود ۴/۴۸ درصد را نشان داد (۱۱). در پژوهش دیگری مشتق ۹-تولیل کربازول به عنوان گروه الکترون دهنده و اسید باریتوریک یا اسید تیوباریتوریک به عنوان گروه الکترون گیرنده در چیدمان D- π -A قرار داده شد. بیشینه جذب مواد رنگزای سنتز شده در حدود ۴۴۷ و ۴۷۴ نانومتر بود. نتایج آزمون ولتاژمتری چرخه‌ای و تئوری تابعی چگالی (DFT) نشان داد که هر دو ماده رنگزا در ساختار سلول خورشیدی قابل استفاده هستند. سطح HOMO و LUMO ترکیبات سنتز شده به ترتیب در حدود ۵/۵۲ و ۳/۲ الکترون ولت بود. بازده ترکیبات سنتز شده در ساختار سلول خورشیدی در حدود ۴/۵ درصد به دست آمد (۱۲). این تحقیقات نمونه‌های موردی بر تایید کارآرایی کربازول و مشتقات آن در تهیه حساس کننده‌های کارآمد برای استفاده در ساختار سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است.

هدف اصلی این تحقیق تهیه یک حساس کننده جدید برپایه ایندولین برای استفاده در ساختار سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است. برای این منظور ایندیگو بر روی هیدروژن متصل به نیتروژن حلقه میانی کربازول استخلاف گردید و طی واکنش‌های استاندارد برای سنتز ماده رنگزای مورد نظر استفاده شد (شکل ۱). ویژگی‌های جذبی و نشری ماده رنگزای سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت و امکان کاربرد ماده رنگزای تهیه شده در ساختار سلول خورشیدی به روش ولتاژمتری چرخه‌ای مطالعه شد. در نهایت سلول خورشیدی حساس شده به ماده رنگزا با استفاده از نیمه‌هادی دی‌اکسید تیتانیم و الکترولیت زوج اکسایش - کاهش ید تهیه و ویژگی‌های فوتوولتاییک دستگاه‌های تهیه شده بررسی گردید.

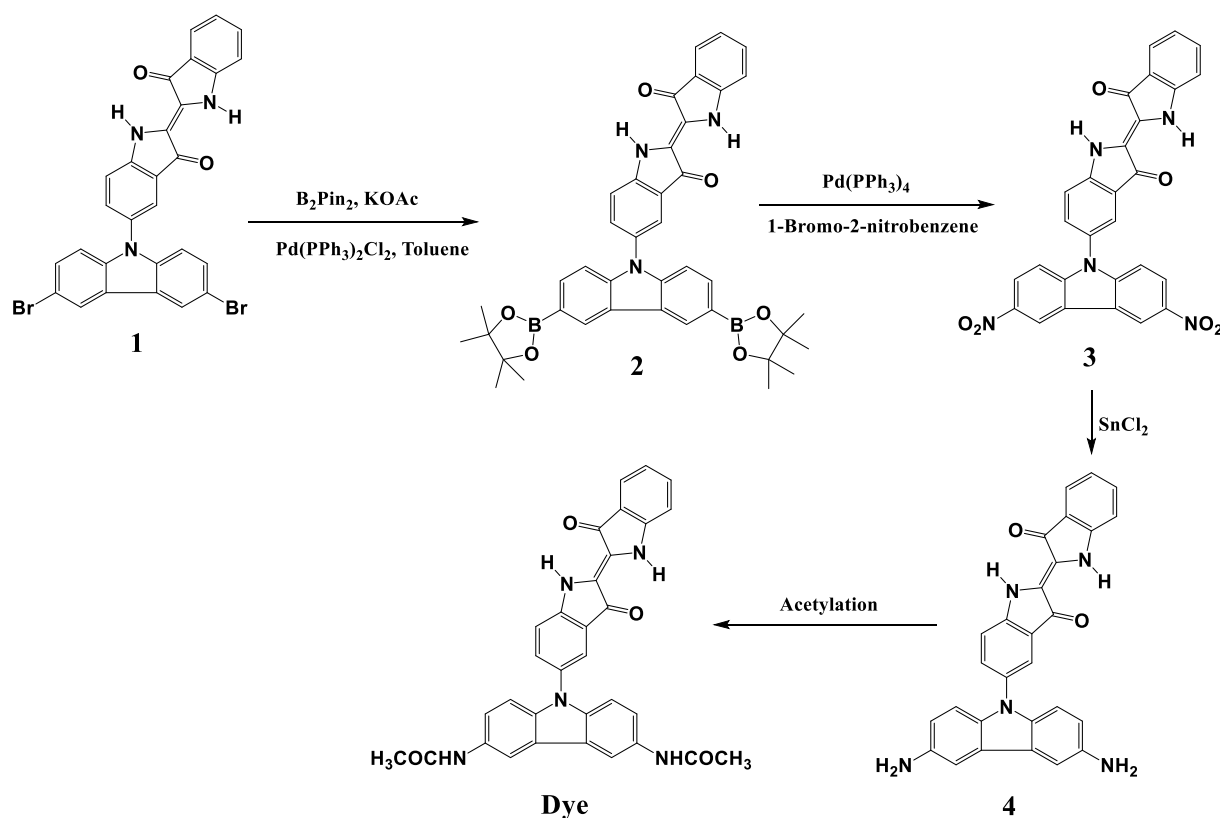
۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

ترکیبات شیمیایی و حلال‌های آلی شامل تولوئن و اتانل از شرکت مرک تهیه گردید. ماده واسطه (۱) براساس روش گزارش شده در مقاله پیشین نویسندگان تهیه گردید (۲). دی‌اکسید تیتانیم از شرکت فاین‌نانو، زیرآیند FTO، الکترولیت و چسب سرلین از شرکت شریف سولار تهیه شد. سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا

1. Verma

2. Density functional theory



شکل ۱: مسیر سنتز ماده رنگزای آلی.

Figure 1: Organic dye synthesis route.

میلی لیتر)، K_3PO_4 (۶/۶ میلی مول)، اتانل (۱۰ میلی لیتر) و تولوئن بدون آب (۵۰ میلی لیتر) در خلا نیترژن به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شد و ۰/۱۸ میلی مول $Pd(PPh_3)_4$ به آن اضافه شد. مخلوط واکنش به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و در خلأ نیترژن هم‌زده شد. مخلوط واکنش به تدریج سرد شد و داخل ۱۰۰ میلی لیتر آب اضافه شد و رسوب به دست آمده، فیلتر و با استفاده از دی‌کلرومتان نوبلور شد.

۲-۲-۳- سنتز ۷،۳-آمینو-۱۰-ایندیگوکربازول (۴)

مخلوطی از ماده واسطه ۳ (۱۸ میلی مول)، کلرید قلع (۹۵ میلی مول)، اسید هیدروکلریک (۲۲/۵ میلی لیتر) و متانل (۹۰ میلی لیتر) تهیه شد و به مدت سه ساعت تقطیر برگشتی شد. مخلوط واکنش به تدریج سرد و داخل ۱۰۰ میلی لیتر آب اضافه شد. رسوب به دست آمده، فیلتر و با استفاده از دی‌کلرومتان نوبلور شد.

۲-۲-۳- سنتز ماده رنگزای ۷،۳-استیل آمین-۱۰-ایندیگوکربازول

مخلوطی از ۶ میلی لیتر استیک اسید، ۴ میلی لیتر استیک انیدرید و ۸

زیر تابش نور استاندارد AM1.5 و با استفاده از دستگاه مشخصه‌یاب جریان - ولتاژ 524000 Cassy-e با اندازه‌گیری غلظت فوتون $cm^{-2}s^{-1}$ 5×10^{15} اندازه‌گیری شد.

۲-۲-۲- سنتز مواد واسطه

۲-۲-۱- سنتز ۷،۳-بیس (۵،۴،۴-تترامتیل-۳،۲،۱-دی‌اکسابرولان

۱۰-ایندیگوکربازول (۲)

مقدار ۷/۱۲ میلی مول از ماده شروع کننده ۱ در ۵۰ میلی لیتر تتراهیدروفوران (THF) حل شد و ۲۸/۵ میلی لیتر $nBuLi$ به تدریج به مخلوط واکنش اضافه و به مدت ۹۰ دقیقه هم‌زده شد. سپس ۳۵/۶ میلی مول ۲-ایزوپروپوکسی-۵،۴،۴-تترامتیل-۳،۲،۱-دی‌اکسابرولان به صورت قطره قطره به مخلوط واکنش اضافه و دو ساعت دیگر هم‌زده شد. مخلوط واکنش به ۱۰۰ میلی لیتر آب اضافه شد و رسوب به دست آمده، فیلتر و با استفاده از اتیل استات نوبلور شد.

۲-۲-۲- سنتز ۷،۳-نیترو-۱۰-ایندیگوکربازول (۳)

مخلوطی از ماده واسطه ۲ (۱/۸ میلی مول)، نیتروبنزن (۵/۴۱

شده است. کربازول و مشتقات آن به دلیل حضور گروه الکترون‌گاتیو نیتروژن و امکان جایگزینی گروه‌های مختلف آروماتیک و آلیفاتیک برای هیدروژن متصل به آن، دارای خواص منحصر به فردی برای کاربردهای خاص در شیمی دارویی و توسعه مواد نوری هستند (۱۵). در این پژوهش، کربازول به عنوان ماده شروع کننده برای ماده رنگزا با ویژگی حساس کننده استفاده شد. برای این منظور ایندینگو به‌عنوان یک گروه شیمیایی با خواص فنی بالا (۱۶) به هیدروژن بازی متصل شد. در ادامه واکنش برم‌دار کردن، نیترودار کردن، احیا و استیل‌دار کردن برای سنتز ماده رنگزا انجام شد. ماده رنگزای سنتز شده با روش کروماتوگرافی ستونی خالص‌سازی شد و در نهایت با روش‌های دستگاهی بررسی شد تا ساختار شیمیایی نهایی تأیید شود (جدول ۱). نتایج FTIR، حضور گروه NH استیل آمین را برای آمین نوع ۱ و ۲ به ترتیب در ناحیه 3359 cm^{-1} و 1574 cm^{-1} ، و گروه کربونیل کتونی در ناحیه 1706 cm^{-1} نشان داد. حضور پیک تک‌شاخه در ناحیه 182 ppm و 211 ppm در طیف $^{13}\text{CNMR}$ نشان دهنده حضور گروه کربونیل در ماده رنگزا است (شکل ۲).

مطالعات نشان می‌دهد که حضور گروه استیل آمین در موقعیت C2 سبب بهبود لومینسانس و نشر ماده رنگزا می‌گردد (۱۷). سه محلول از ماده رنگزای سنتز شده در اتانل، استونیتریل و بنزن با غلظت $10^{-4}\text{ mol l}^{-1}$ تهیه گردید. ماده رنگزای سنتز شده به دلیل حضور گروه‌های الکترون کشنده و الکترون دهنده در دو سوی ساختار شیمیایی دارای ممان دو قطبی بوده و انحلال آن در حلال‌های قطبی با سهولت زیادی انجام شده (اثر حلال‌پوشی مثبت) (۱۸) و بیشینه جذب در طول موج-های بالاتر ظاهر می‌شود. بیشینه جذب ماده رنگزا در اتانل در حدود 583 nm نانومتر است. بیشینه جذب ماده رنگزا بر روی سطح دی‌اکسید تیتانیوم مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که جابجایی باتوکرومیک در طیف جذبی ماده رنگزا مشاهده می‌شود. حضور گروه ایندینگو به دلیل دوگروه کربونیل و دو گروه آمین، جریان الکتریکی موجود در ساختار شیمیایی ماده رنگزا را تحت تأثیر قرار داده و سبب ایجاد یک پیک جذبی پر شدت می‌شود. بیشینه جذب ماده رنگزا در استونیتریل، اتانل، بنزن و بر روی سطح دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب 576 nm ، 583 nm و 407 nm و 589 nm نانومتر است (شکل ۳).

میلی مول از 7.3 mg - آمینو - 10 mg - ایندینگو کربازول تهیه و 15 min دقیقه هم‌زده شد. دمای مخلوط واکنش، به تدریج افزایش یافت و به مدت 5 h ساعت تقطیر برگشتی شد. مقدار pH مخلوط واکنش به صورت پیوسته بررسی شد و تثبیت آن در حدود 7 با افزایش تدریجی محلول هیدروکسید سدیم 10% درصد به دست آمد. در پایان رسوب به دست آمده، فیلتر و با استفاده از مخلوط دی‌کلرومتان: اتیل‌استات با نسبت $3:1$ خالص‌سازی شد.

۴-۲- روش تهیه سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به مواد رنگزا

بسترهای شیشه‌ای رسانا با پوشش FTO با استفاده از فراصوت متوالی در اتانل تمیز شدند. پس از آن، بسترهای شیشه‌ای رسانا توسط محلول آبی 40 mg میلی مولار TiCl_4 در دمای 70°C درجه سانتی‌گراد به مدت 30 min دقیقه برای ایجاد یک لایه مسدود کننده فوق نازک TiO_2 آمایش شدند. خمیرهای تهیه شده از نیمه‌هادی‌ها با استفاده از روش دکتربیلد بر روی زیرآیند لایه‌نشانی شد و به‌صورت تدریجی در دمای 325°C درجه سانتی‌گراد (5 min دقیقه)، 375°C درجه سانتی‌گراد (5 min دقیقه)، 450°C درجه سانتی‌گراد (15 min دقیقه) و 500°C درجه سانتی‌گراد (15 min دقیقه) حرارت داده شدند. فیلم‌های به‌دست آمده با محلول آبی 40 mg میلی مولار TiCl_4 در دمای 70°C درجه سانتی‌گراد به مدت 30 min دقیقه و پس از آن در دمای 500°C درجه سانتی‌گراد به مدت 30 min دقیقه تیمار شدند. پس از سرد شدن تا دمای 40°C درجه سانتی‌گراد، الکترودها در محلول‌های مواد رنگزا با غلظت 0.4 mg میلی مولار در اتانل غوطه‌ور شدند. غوطه‌وری به مدت 12 h ساعت در محیط تاریک برای کسب بیشینه حساسیت، ادامه یافت. الکتروده فوتوآنود و الکتروده مقابل با استفاده از چسب پلیمری Surlyn مجتمع شدند. الکترولیت با پر کردن خلاء از طریق سوراخ حفر شده در الکتروده مقابل به داخل سلول وارد شد. دستگاه در نهایت با Surlyn و پوشش صفحه شیشه‌ای مهر و موم شد (14°C ، 13°C). سلول خورشیدی تهیه شده توسط شبیه‌ساز خورشیدی AM1.5G مورد ارزیابی قرار گرفت.

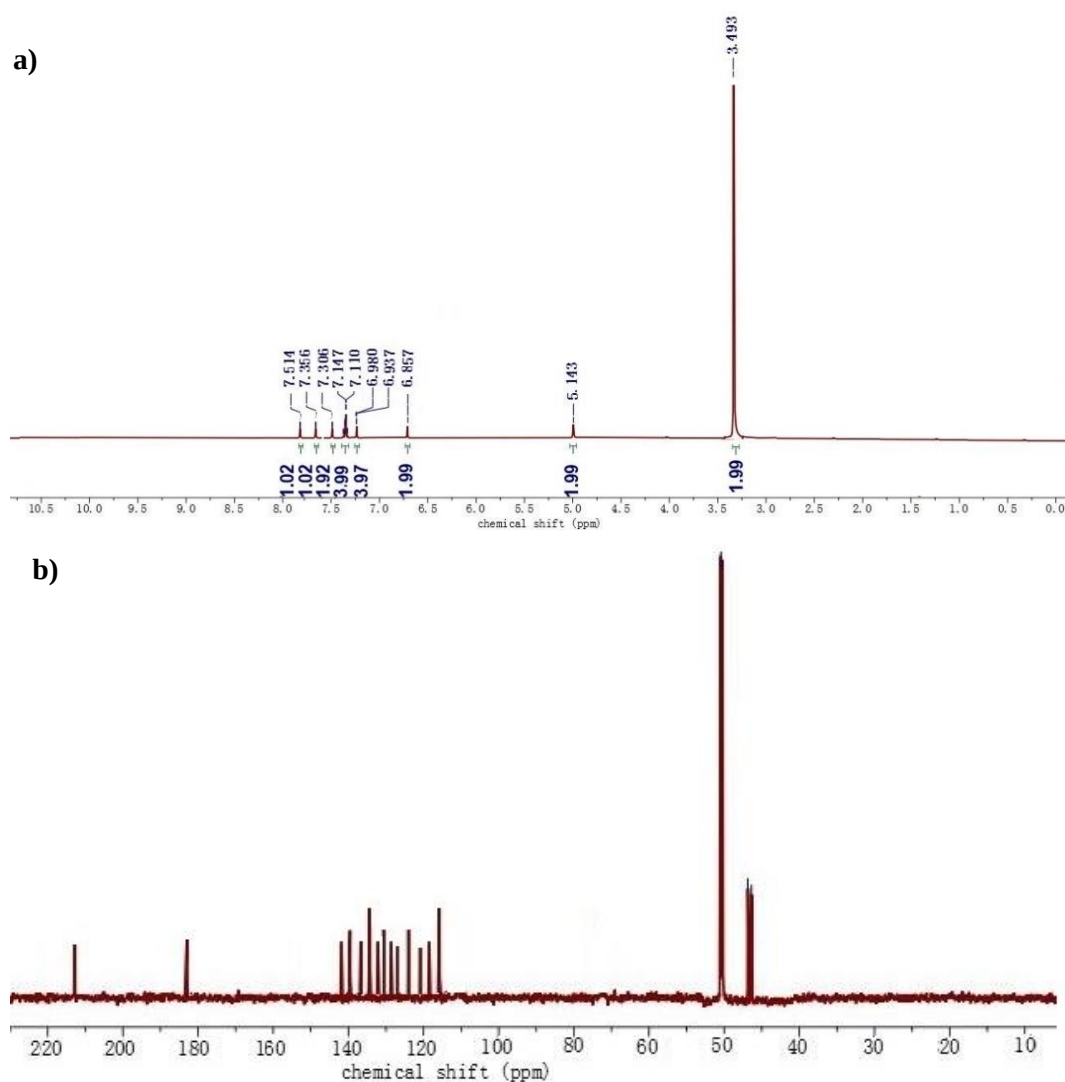
۳- نتایج و بحث

مسیر سنتز ماده رنگزای آلی بر پایه ایندولین در شکل ۱ نشان داده

جدول ۱: ویژگی‌های طیف‌سنجی ماده رنگزای سنتز شده.

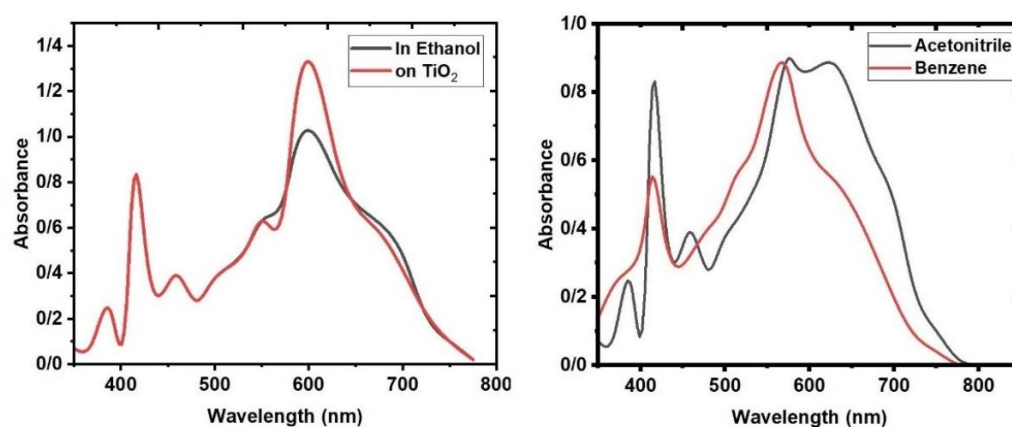
Table 1: Spectroscopic properties of the synthesized dye.

$^{13}\text{CNMR}$ (500MHz, δ/ppm)	$^1\text{HNMR}$ (500MHz, δ/ppm)	FTIR (cm^{-1})
47, 52 (Aliphatic), 110, 112, 114, 115, 117, 119, 121, 123, 124, 125, 127, 132 (Aromatic), 182 (C=O acetyl), 211 (C=O ketone)	3.49 (s, 6H, CH_3), 5.14 (s, 2H, NH), 6.85 (2H, t), 6.93-6.98 (4H, d, $J=7.4\text{ Hz}$), 7.11-7.15 (4H, d, $J=7\text{ Hz}$), 7.27 (2H, s), 7.35 (1H, s), 7.51 (2H, NH)	3359: N-H amide I, 1574: NH: amide II, 1652: C=O acetylamine, 1706 C=O ketone, 1577: C=C



شکل ۲: (a) طیف ^1H NMR و (b) ^{13}C NMR ماده رنگزای سنتز شده.

Figure 2: a) ^1H NMR and b) ^{13}C NMR spectra of the synthesized dye.



شکل ۳: طیف جذبی ماده رنگزای سنتز شده در حلال و بر روی دی‌اکسید تیتانیوم.

Figure 3: Absorption spectrum of the synthesized dye in solvent and on TiO_2 .

در جدول ۲ و شکل ۴ آورده شده است. چنان‌که اشاره شد ماده رنگزای سنتز شده، بعد از لایه نشانی بر روی سطح دی‌اکسید تیتانیوم، جابجایی باتوکرومیک اندکی نشان می‌دهد که احتمالاً ناشی از تجمعات ناخواسته از نوع J است. اگر تجمعات زیاد بوده و اختلاف بیشینه جذب در حالت محلولی و بعد از لایه‌نشانی بیش از ۱۵ نانومتر باشد، استفاده از ترکیبات ضد تجمع پیشنهاد می‌شود (۲۳). در پژوهش حاضر، این اختلاف در ۶ نانومتر در هر دو حالت بیشینه جذب در ناحیه مرئی مشاهده شد. در این مطالعه از دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان نیمه‌هادی برای تهیه سلول خورشیدی استفاده شد. مطالعات مختلف بر روی معرفی نیمه‌هادی موثر برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا به منظور بالا بردن خواص الکتریکی با نوری انجام شده است. برای این منظور روش‌های مختلفی برای تهیه نیمه-هادی‌های جدید معرفی شده که شامل دوپینگ فوتوآندها، جایگزینی فوتوآندهای مزوپور سنتی با نانومواد یک و یا دو بعدی، استفاده از روش‌های مختلف ساخت و شرایط ساخت و اصلاح سطحی با استفاده از لایه‌های مسدود و پراکنده کننده می‌باشند (۲۴). اما همچنان دی-اکسید تیتانیوم به دلیل خواص فنی عالی و هزینه کم، گزینه مناسبی برای تهیه سلول خورشیدی است که عملکرد بسیار خوبی در جمع‌آوری و هدایت بار دارد (۲۵).

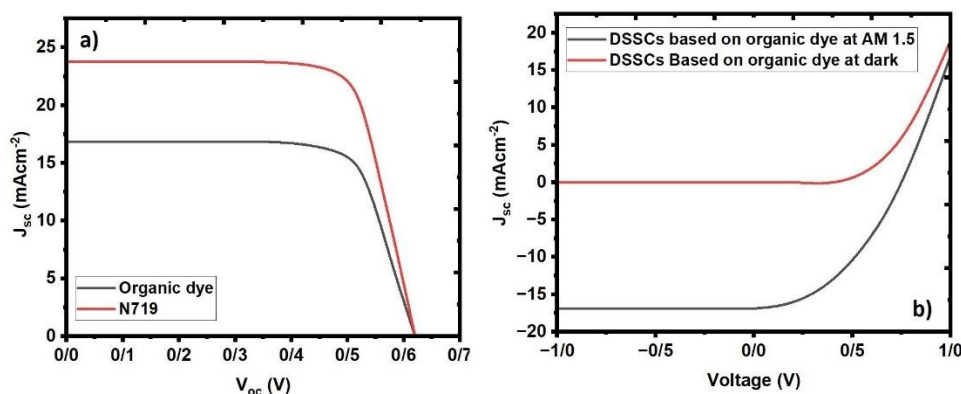
بررسی و مطالعه سطوح انرژی مواد رنگزای آلی به منظور امکان‌سنجی کاربرد آنها در دستگاه‌های فوتوولتائیک توسط روش‌های تئوری و عملی به ترتیب با DFT (۱۹) و ولتامتری چرخه‌ای (۲۰) قابل انجام است. در این پژوهش از روش ولتامتری چرخه‌ای در حلال استونیتریل استفاده شد. مقدار پتانسیل اکسایش ماده رنگزا از قله دوم در نمودار و تقریباً معادل $3/77$ الکترون‌ولت به دست آمد. بنابراین انتقال الکترون تهییج یافته به نوار هدایت دی‌اکسید تیتانیوم به صورت ترمودینامیکی قابل انجام است. از طرف دیگر پتانسیل کاهش ماده رنگزا به منظور تأیید دریافت الکترون از الکترولیت و تکرار چرخه تهییج اهمیت زیادی دارد. در صورتی‌که حفره ایجاد شده ناشی از انتقال الکترون تهییج یافته به سطح نیمه‌هادی توسط الکترولیت، پر نشود، ماده رنگزا تخریب شده و در نتیجه، سلول خورشیدی با عمر بسیار کوتاه، از کار می‌افتد (۲۱). پتانسیل کاهش ماده رنگزا در حدود $5/35$ الکترون‌ولت بود که کمتر از سطح انرژی الکترولیت زوج اکسایش-کاهش ید خواهد بود و دریافت الکترون و بازگشت به سهولت انجام می‌شود.

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا با استفاده از نیمه‌رسانای دی‌اکسید تیتانیوم و الکترولیت زوج اکسایش - کاهش ید، تهیه و ویژگی‌های فوتوولتائیک آنها مورد ارزیابی قرار گرفت (۲۲) و نتایج آن

جدول ۲: ویژگی‌های فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی مواد رنگزا.

Table 2: Photovoltaic properties of DSSCs.

Dye	Photoanode	J_{sc} (mAcm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
1	TiO ₂	16.86	0.61	0.6	6.17
N719	TiO ₂	23.77	0.62	0.63	9.28



شکل ۴: (a) نمودار فوتوجریان-فوتوولتاژ سلول‌های خورشیدی تهیه شده و (b) نمودار سلول خورشیدی در شرایط تاریک.

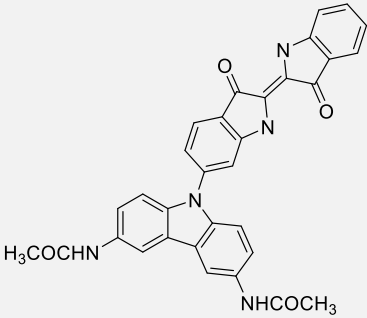
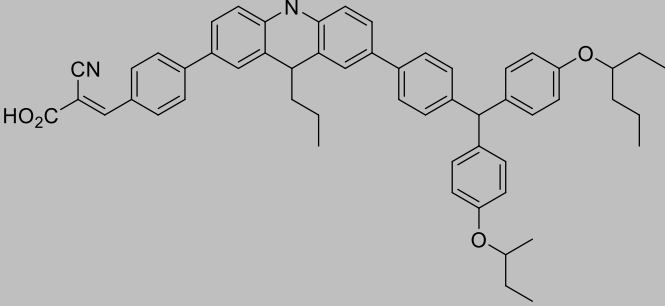
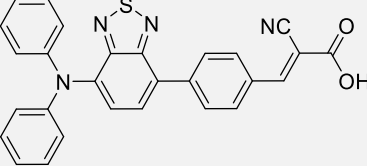
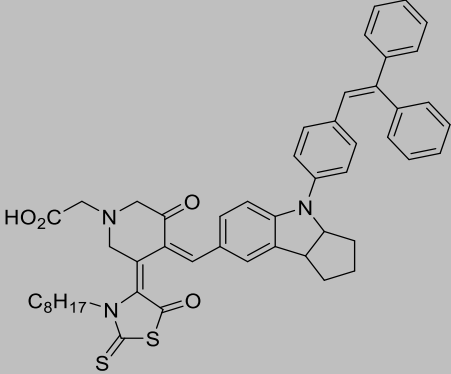
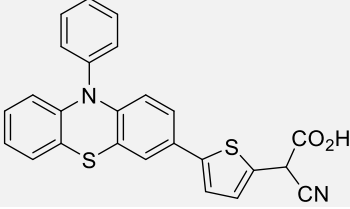
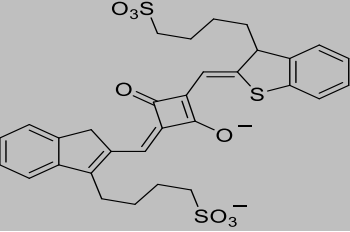
Figure 4: a) Photocurrent-photovoltage diagram of the prepared solar cells and b) diagram of the DSSC in dark conditions.

طبیعی، برای کاربردهای تجارتي و تولید دستگاه‌های فوتوولتائیک با اندازه بزرگ، توجه‌پذیر نیست. تحقیقات متعددی برای جایگزینی پلاتین انجام شده و نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت‌ها و هیبریدهای فلزی گرافن می‌تواند عملکردی نزدیک به پلاتین داشته باشد. برای دستیابی به نتایج قابل قبول در بهبود چسبندگی این مواد تحقیقات متعددی در جریان است که می‌تواند آینده امیدوارکننده‌ای برای این فناوری ترسیم کند (۳۲، ۳۱). برای درک چگونگی انتقال الکترون‌ها در یک سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، دستگاه به عنوان یک مدار الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. یکی از اطلاعات مهم در این زمینه، محاسبه طول عمر مؤثر الکترون است که تعیین می‌کند چگونه الکترون‌های برانگیخته به نیمه‌رسانا منتقل می‌شوند. فرایندهای انتقال بار شامل تزریق و بازسازی و فرایند اتلاف بار شامل بازترکیب است. دو عامل، D_{eff} (ضریب نفوذ مؤثر) و τ_{eff} (طول عمر مؤثر الکترون)، به ترتیب نشان‌دهنده انتشار الکترون‌های برانگیخته در فوتوآند و طول عمر مؤثر الکترون‌ها به دلیل پدیده نوترکیبی هستند. بنابراین، انتقال سریع الکترون منجر به افزایش جریان نوری و بازده نهایی دستگاه می‌شود (۳۳). مقادیر طول عمر الکترون تهیه‌یافته برای ماده رنگزای سنتز شده در حدود $29/02$ میلی‌ثانیه بود که نسبت به ترکیبات آلی با استخلاف آلیفاتیک یا آروماتیک بدون ناجوراتم بیشتر است. این پدیده به دلیل کاهش احتمال بازترکیب الکترون تهیه‌یافته است. افزایش سیستم مزدوج نیز به افزایش طول عمر الکترون تهیه‌یافته کمک می‌کند، بطوری‌که مواد رنگزای طبیعی برپایه بتاکاروتن نسبت به سایر ترکیبات طبیعی، دارای طول عمر بالاتری برای تولید الکترون تهیه‌یافته است (۳۴). چنان‌که در جدول ۲ نشان داده شده است، بازده سلول خورشیدی بر پایه ماده رنگزای آلی-معدنی N719 بالاتر از ترکیب آلی سنتز شده است. اما مقایسه قیمت و فرایند پیچیده تولید N719 و محدودیت منابع طبیعی روتنیوم با ترکیب شیمیایی سنتز شده، بازده به دست آمده قابل توجه و مناسب خواهد بود (۳۵). سلول خورشیدی تهیه شده دارای حدود ۱۰۰۰ ساعت زمان پاسخ‌گویی و تکرار چرخه تولید الکترون تهیه‌یافته است که نشان‌دهنده طول عمر مناسب برای افزاره تهیه شده است. در بسیاری از تحقیقات طول عمر پاسخ برای سلول‌های خورشیدی تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفته و زمان ۱۲۰۰ ساعت به عنوان طول عمر بهینه اعلام شده است (۳۸-۳۶). در جدول ۳ خواص فوتوولتائیک افزاره‌های تهیه شده با استفاده از برخی مواد رنگزای سنتز شده بر پایه ایندولین فهرست شده است. چنان‌که در جدول ۳ نشان داده شده، مهندسی ساختار و چیدمان گروه‌های الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده در بازده نهایی دستگاه بسیار مؤثر است. بازده حساس کننده سنتز شده در این پژوهش در محدوده مناسب برای ترکیبات شیمیایی برپایه ایندولین است.

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا با استفاده از روش لایه‌نشانی یگانه و حساس شده به مواد رنگزا تهیه شد. مواد رنگزای آلی بر پایه ایندولین، عملکرد مناسبی در تولید حساس‌کننده‌های ارزان‌قیمت قابل استفاده در سلول خورشیدی دارند و نیتروژن حلقه مرکزی، محل مناسبی برای الحاق استخلاف‌های مناسب برای افزایش طول سیستم مزدوج و مدیریت طیف جذبی است (۲۶). به همین دلیل کربازول به عنوان ماده شروع کننده در تهیه یک حساس کننده آلی بر پایه ایندولین مورد استفاده قرار گرفت. گروه NH به دلیل برهم‌کنش مناسب و گسترش سیستم مزدوج، انتقال بار در مولکول‌های آلی را تسهیل می‌کند (۲۷). مطالعات دینامیک مولکولی و اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی نشان می‌دهند که این گروه موجب انتقال الکترون-حفره در مقیاس زمانی پیکوثانیه شده و فرآیند انتقال الکترون از نظر ترمودینامیکی را تسهیل می‌نماید (۲۸). البی و همکارانش ۱۵ ماده رنگزای جدید بر پایه ایندولین با آرایش $D-A-\pi-A$ طراحی و سنتز نمودند. برای این منظور در قسمت پل مزدوج از ناجوراتم‌های موجود در سیستم طویل دوگانه استفاده نموده و گروه‌های آروماتیک را به نیتروژن کربازول متصل کردند. نتایج نشان داد که حضور ناجوراتم‌ها در پل مزدوج و استخلاف‌های متصل به کربازول می‌تواند منجر به کاهش گاف نوار انرژی در حدود $1/91$ الکترون‌ولت مشاهده و بیشینه جذب به انتهای محدوده قرمز منتقل شود. حضور یک گروه تیوفن، انتقال بار درون مولکولی را تسهیل کرده و در نتیجه تحرک بار الکتریکی بهبود می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان از حضور مؤثر گروه‌های هتروآروماتیک در طراحی مولکول‌های پربازده برای کاربرد در ساختار سلول خورشیدی دارد. از طرف دیگر محل این استخلاف‌ها می‌تواند در کسب بازده بالا بسیار مؤثر باشد (۲۹). آرایش $D-\pi-A$ با استفاده از دی‌فنیل‌آمین به عنوان گروه الکترون‌دهنده، دی‌فنیل‌آکریلیدین به عنوان پل مزدوج و سیانواکریلیک اسید به عنوان گروه الکترون‌کشنده برای تهیه سه ماده رنگزای حساس کننده قابل استفاده در سلول خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت. بیشترین بازده به دست آمده از این چیدمان، در حدود $3/19$ درصد گزارش شد. بیشینه جذب مواد رنگزا با تقویت گروه الکترون‌دهنده متصل به نیتروژن کربازول و افزایش سیستم مزدوج جابجایی باتوکرومیک نشان داده و در ساختار سلول خورشیدی، بازده نهایی دستگاه بهبود یافته است. بطوری‌که حضور هر گروه فنیل در بخش الکترون‌دهنده متصل به اتم نیتروژن، در حدود ۱۶ درصد در بهبود بازده کوانتومی مؤثر است (۳۰). در این پژوهش از پلاتین به عنوان الکتروکاتالیزور استفاده شد که به دلیل رسانایی الکتریکی بالا و فعالیت الکتروکاتالیستی عالی در برابر سامانه اکسایش-کاهش یدید/تری یدید، در بسیاری از تحقیقات به عنوان بهترین گزینه معرفی شده است. البته توجه به این نکته ضروری است که استفاده از پلاتین به دلیل قیمت بالا و کمبود منابع

جدول ۳: ویژگی‌های فوتوولتائیک افزاره‌های تهیه شده برپایه ایندولین.

Table 3: Photovoltaic properties of devices based on Indoline.

Dye Structure	Photoanode	η (%)	Ref.
	TiO ₂	6.17	This study
	TiO ₂	3.19	(39)
	TiO ₂	6.57	(39)
	TiO ₂	9.30	(40)
	ZnO	8.85	
	TiO ₂	4.48	(41)
	TiO ₂	3.31	(42)

۴- نتیجه‌گیری

تهیه‌یافته به سطح نیمه‌هادی و دریافت الکترون از الکترولیت زوج اکسایش-احیا و قابلیت استفاده از ماده رنگزا در ساختار سلول خورشیدی است. سلول خورشیدی با استفاده از ماده رنگزای سنتز شده، الکترولیت زوج اکسایش-احیا و الکتروود مقابل پلاتین مجتمع گردید. بازده دستگاه تهیه شده در حدود ۶/۱۷ درصد به دست آمد. حضور گروه ایندیگو موجب تسریع انتقال الکترون-حفره در مقیاس زمانی پیکوثانیه شده و تسهیل فرآیند انتقال الکترون از نظر ترمودینامیکی می‌شود. مقدار طول عمر الکترون تهیه‌یافته برای ماده رنگزای سنتز شده به دلیل کاهش پدیده بازترکیب، در حدود ۲۹/۰۲ میلی‌ثانیه است که نسبت به ترکیبات آلی با اختلاف آلیفاتیک یا آروماتیک بدون هترو اتم بیشتر است. بازده ماده رنگزا در ساختار سلول خورشیدی کمتر از ترکیب تجاری N719 است اما به دلیل قیمت پایین‌تر و سهولت تهیه، نسبت به ماده رنگزای N719، قابل قبول است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

یک ماده رنگزای آلی بر پایه ایندولین با استفاده از کربازول به عنوان ماده شروع کننده تهیه شد. برای این منظور، ایندیگو بر روی نیتروژن حلقه میانی استخلاف گردید و گروه استیل‌آمین با استفاده از واکنش‌های نیترودار کردن، احیا و استیل‌دار کردن بر روی موقعیت ۳ و ۶ حلقه‌های فنیل قرار گرفت. بازده سنتز در حدود ۸۵ درصد بود و محصول پس از خالص‌سازی توسط روش‌های آزمون‌های دستگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت و ساختار شیمیایی آن تأیید شد. بیشینه جذب ماده رنگزا در سه حلال استونیتریل، اتانل، بنزن و بر روی سطح دی‌اکسید تیتانیم به ترتیب ۵۷۶، ۵۸۳، ۴۰۷ و ۵۸۹ نانومتر است. بنابراین ماده رنگزای سنتز شده دارای اثر حلال‌پوشی مثبت است و با لایه نشانی بر روی سطح دی‌اکسید تیتانیم، جابجایی باتوکرومیک مشاهده شد. این جابجایی در بیشینه جذب، به دلیل تجمع مختصر ماده رنگزا بر روی سطح نیمه هادی است. پتانسیل اکسایش و کاهش ماده رنگزای سنتز شده با استفاده از روش ولتامتری چرخه‌ای به ترتیب ۳/۷۷ و ۵/۳۵ الکترون ولت به دست آمد. این نتیجه نشان دهنده امکان انتقال ترمودینامیکی الکترون

۵- مراجع

- Qamar S, Ela SE. Dye-sensitized solar cells (DSSC): Principles, materials and working mechanism. Cuuent Optin Colloid Inter Sci. 2024; 74:101871. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101871>.
- Hosseinneshad M, Gharanjig K, Nasiri S, Fathi M. Study of the presence of thioindigo in photosensitizers based on phenothiazine: Synthesis and photovoltaic evaluation in DSSCs. Synth Metal. 2025; 312: 117885. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2025.117885>.
- Saud PS, Bist A, Kim AA, Yousef A, Abutaleb A, Park M, Park SJ, Pant B. Dye-sensitized solar cells: Fundamentals, recent progress, and Optoelectrical properties improvement strategies. Opt Mater. 2024; 150: 115242. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115242>.
- Hosseinneshad M, Nasiri S, Nutalapati V, Gharanjig K, Arabi AM. A review of the application of organic dyes based on naphthalimide in optical and electrical devices. Prog Color Colorant Coat. 2024; 17(4):417-433. <https://doi.org/10.30509/pccc.2024.167247.1267>.
- Sasikumar R, Thirumalaisamy S, Kim B, Hwang B. Dye-sensitized solar cells: Insights and research divergence towards alternatives. Renew Sustain Energy Rev. 2024; 199:114549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114549>.
- Sebak MA, Aladim AK, Gami F, Mostafa MM, Shahin OR, Abdelhamid Shahat M. Regulating carrier transfer and performance in dye-sensitized solar cells (DSSCs) using gamma-irradiated chitosan@pva@al₂O₃ nanocomposites as a counter electrode. Mater Res Bull. 2025; 192: 113593. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113593>.
- Iman RN, Youna M, Harrabi K, Mekki A. A comprehensive review on advancements and optimization strategies in dye-sensitized solar cells: Components, characterization, stability and efficiency enhancement. Inorg Chem Commun. 2024; 165: 112488. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112488>.
- Hosseinneshad M, Nasiri S, Nutalapati V, Gharanjig K, Arabi A. Investigation of using amine and acetylamine functional units on naphthalimide dyes for photovoltaic devices. Pigm Resin Technol. 2025;54(4):589-598. <https://doi.org/10.1108/PRT-03-2024-0030>.
- Iswarya S, Dharshini A, Vithiya BSM, Prasad TAA. Evolving smart homes to exploring space, dye-sensitized solar cells (DSSC) as a sustainable energy model for the future world-A review. Next Energy. 2025;8:100328. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100328>.
- Han J, Song P, Ma F, Li Y. Optical absorption spectroscopy and electronic properties of D-A dyes and chlorophyll derivatives for co-sensitization in DSSCs. Acta Part A: Mol Biomol Spect. 2025;326:125160. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125160>.
- Verma P, Chetti P. Investigation of the influence of donor and internal acceptor on photovoltaic parameters in D-A1- π -A Dye sensitizers for efficient DSSCs. Chem Phys Impact. 2025; 10:100789. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100789>.
- Devarajan N, Naik P, Gorle DB. Exploring the potential of heterocyclic carbazole-derived dyes for DSSCs. J Photochem Photobiol A Chem. 2025; 462:116177. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116177>.
- Shelke R, Walke P, Khond V, Nirwan. Performance degradation of dye sensitized solar cells with cobalt sulphate and graphite as a counter electrode. Materialstoday. 2024; In Press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.091>.
- Hosseinneshad M, Gharanjig K, Ghahari M, Nasiri S. Investigation of Photo-electrode and Counter Electrode Effect

- on DSSCs Based on Indoline Dyes. *Prog Color Colorant Coat.* 2024; 17(4): 121-132. <https://doi.org/10.30509/pccc.2023.167159.1230>.
15. Morja MI, Chikhalia KH. Transition metal-free synthesis and functionalization of phenothiazines. *Tetrahedron.* 2023; 145: 133618. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2023.133618>
 16. Mocquard J, Lamer AL, Fabre PL, Mathiev C, Chastrette C, Vitra A, Vandebossche V. Indigo dyeing from *Isatis tinctoria* L.: From medieval to modern use. *Dye Pigm.* 2022; 207: 110675. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110675>
 17. Jaszczyszyn A, Gasiorowski K, Swiatek P, Malinka W, Boczula KC, Petrus J, Matusiewicz BC. Chemical structure of phenothiazines and their biological activity. *Pharmacol Rep.* 2012; 64:16-23. [https://doi.org/10.1016/S1734-1140\(12\)70726-0](https://doi.org/10.1016/S1734-1140(12)70726-0).
 18. Homocianu M. Exploring solvatochromism: A comprehensive analysis of research data. *Microchem J.* 2024; 198:110166. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110166>.
 19. Conradie J. Effective dyes for DSSCs—Important experimental and calculated parameters. *Next Energy.* 2024; 13:100282. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100282>.
 20. Mohammadian-Sarcheshmeh H, Arazi R, Mazloun Ardakani M. Application of bifunctional photoanode materials in DSSCs: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2020; 134: 110249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110249>.
 21. Bakhshayesh AM, Farajisafilo N. Efficient dye-sensitized solar cell based on uniform In-doped TiO₂ spherical particles. *Appl Phys A.* 2015; 120:199-206. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9150-z>
 22. Gong J, Sumathy K, Qiao Q, Zhou Z. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017; 234: 246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.097>.
 23. Antu NR, Hasan W, Hasanuzzaman M, Islam M. Challenges and prospects of semi transparent dye-sensitized solar cells for real-world applications: A review. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 2025; 77:101907. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2025.101907>.
 24. Karim NA, Mehmood U, Zahid HF, Asif T. Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Sol Energy.* 2019; 185:165-188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.057>
 25. Mazloun-Ardakani M, Arazi R, Haghshenas M, Tamaddon F, Alizadeh M. Synthesis of 2-amino-4-(4-(methylamino)phenyl)-6-phenylnicotinonitrile as a new additive for the passivation of the TiO₂ surface and retarding recombination in dye-sensitized solar cells. *Electrochim Acta.* 2018; 266: 452-459. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.011>.
 26. Yashwantrao G, Saha S. Perspective on the rational design strategies of quinoxaline derived organic sensitizers for dye-sensitized solar cells (DSSC). *Dye Pigm.* 2022; 199:110093. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110093>.
 27. Rasikumar R, Thirumalaisamy S, Kim B, Hwang B. Dye-sensitized solar cells: Insights and research divergence towards alternatives. *Renew Sustain Energy Rev.* 2024; 199:114549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114549>.
 28. Babar F, Mehmood U, Asghar H, Hassan Mehdi M, Khan AH, Khalid H, Huda N, Fatima Z. Nanostructured photoanode materials and their deposition methods for efficient and economical third generation dye-sensitized solar cells: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020; 129:109919. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109919>.
 29. Alyahya F, Wazzan N. Systematic molecular engineering of π -spacer in Indoline-based dyes with D-A'- π -A framework to enhance the intramolecular charge transfer and photovoltaic properties in DSSC and NLO applications: DFT insight. *Chem. Phys.* 2025; 594:11266. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2025.112666>.
 30. Gezgin M, Arslan BS, Avci D, Nebioglu M, Sisman I. Novel D- π -A dye as a co-sensitizer of indoline and benzothiadiazole dyes to enhance photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. *J Photochem Photobiol A Chem.* 2025; 458: 115977. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115977>
 31. Subalakshmi K, Ashok Kumar A, Paul OP, Saraswathy S, Pandurangan A, Senthilselvan J. Platinum-free metal sulfide counter electrodes for DSSC applications: Structural, electrochemical and power conversion efficiency analyses. *Sol Energy.* 2019; 193: 507-518. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.075>.
 32. Azahar AA, Nurhafizah MD. A short review on surpassing Pt with alternative counter electrodes and QGD enhancement in counter electrode. *Synth Metal.* 2024; 307: 117685. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2024.117685>.
 33. Guo F, Narukullapati BK, Mohammed KJ, Altamari US, Abed AM, Yan Z, Ahmad N, Dwijendra NKA, Sivaraman R, Abdulkadhim AH. New material for addressing charge transport issue in DSSCs: Composite WS₂/MoS₂ high porosity counter electrodes. *Sol. Energy.* 2022; 243: 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.020>.
 34. Ayaz M, Hijji M, Alatawi AS, Namazi MA, Mohamed Ershath MI. Enhancing photovoltaic performance in dye-sensitized solar cells using nanostructured NiS/MoS₂ composite counter electrodes. *Mater Sci Semicconduct Proc.* 2024; 173:108172. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108172>.
 35. Norouzibazaz M, Gholivand MB, Taherpour AA. Design and construction of MoS₂/Ni₃S₂ nanosheets decorated on multi-walled carbon nanotubes as a sustainable counter electrode for dye-sensitized solar cells: An experimental and computational investigation. *J Phys Chem Solid.* 2024; 193: 112168. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.112168>.
 36. Sunahara K, Ogawa J, Mori S. A method to measure electron lifetime in dye-sensitized solar cells: Stepped current induced measurement of cell voltage in the dark. *Electrochem. Commun.* 2011; 13(12): 1420-1422. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.09.005>.
 37. Bisquert J, Santiago FF, Mora-Sero I, Belmonte G, Gimenez S. Electron lifetime in dye-sensitized solar cells: theory and interpretation of measurements. *J Phys Chem.* 2019; 446(1): 136777. <https://doi.org/10.1021/jp9037649>.
 38. Bharwal Ak, Mancieri L, Olivieri C, Mahmoud A, Iojoiu C, Toupance T, Ruiz CM, Pasquini M, Duche D, Simon JJ, Henrist C, Alloin F. Remarkable 8.3% efficiency and extended electron lifetime towards highly stable semi-transparent iodine-free DSSCs by mitigating the *in-situ* triiodide generation. *Chem Eng J.* 2022; 446(1): 136777. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136777>.
 39. Gezgin M, Arslan BS, Auc D, Nebioglu M, Sisman I. Novel D- π -A dye as a co-sensitizer of indoline and benzothiadiazole dyes to enhance photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. *J Photochem Photobiol A: Chem.* 2025; 458: 115977. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115977>.
 40. Arslan BS, Ozturk N, Gezgin M, Sevindik S, Yilan D, Kumbasar RA, Nebioglu M, Sisman I. Optimization of fabrication parameters for efficient dye-sensitized solar cells based on dyes containing benzothiadiazole, indoline, and their co-sensitization. *Electrochimica Acta.* 2025; 458:142523. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142523>.

41. Verma P, Chetti P. Investigation of the influence of donor and internal acceptor on photovoltaic parameters in D-A1- π -A Dye sensitizers for efficient DSSCs. *Chem Phys Impact*. 2025; 10:100789. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100789>.
42. Al-Horaibi SA, Asiri AM, El-Shishtawy RM, Gaikwad ST. Indoline and benzothiazole-based squaraine dye-sensitized solar cells containing bis-pendent sulfonate groups: Synthesis, characterization and solar cell performance. *J Mol Struct*. 2024; 1195: 591-597. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.05.068>

How to cite this article:

Hosseinnezhad M, Gharanjig K, Fathi M. Synthesis of an organic dye based on indoline for use in dye-sensitized solar cells. *J Color Sci Tech*. 2025;19(1):101-112. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167615.1267> [In Persian]