

ORIGINAL ARTICLE

Enhancing the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells: Fabrication and Evaluation of Zinc Oxide Nanoparticles via the Sol-Gel Method

Vahdat Rafee^{1*}, Alireza Razeghizadeh², Parisa Farhadi Birgani³

1 Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2 Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran.

3 M.Sc, Department of Physics, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Correspondence

Vahdat Rafee

Email: v.rafee@pnu.ac.ir

How to cite

Rafee, V. Razeghizadeh, A. Farhadi Birgani, P. (2025). Enhancing the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells: Fabrication and Evaluation of Zinc Oxide Nanoparticles Via the Sol-Gel Method, Optoelectronic, 7(4), 27-38.

ABSTRACT

This study investigates the simultaneous effect of natural pigments extracted from eggplant peel and purple cabbage, along with the synthetic pigment based on ruthenium N719, on the power conversion efficiency of DSSC cells. Zinc oxide (ZnO) nanoparticles synthesized via the Sol-Gel method and deposited onto the photoanode layer using the doctor blade technique. Five DSSC samples sensitized with different dyes: DSSN1 with eggplant peel dye, DSSN2 with red cabbage dye, DSSN3 with N719 dye, DSSN4 with a 1:1 mixture of eggplant peel and red cabbage dyes, and DSSN5 with an equal mixture of eggplant peel, red cabbage, and N719 dyes (1:1:1). Structural analysis using X-ray diffraction (XRD) confirmed the hexagonal (wurtzite phase) structure of ZnO with an average crystallite size of 32.30 nm. Scanning electron microscopy (SEM) revealed a porous anode surface with an average nanoparticle size of 28.46 nm, ensuring efficient electrolyte and dye penetration. UV-Visible spectroscopy demonstrated that the combination of three dyes exhibited the broadest absorption spectrum and the highest intensity in the 400–700 nm range, with the lowest energy band gap of 2.14 eV. Photovoltaic performance evaluated using a PnuAhwaz-SOL solar simulator, revealing that DSSN5 achieved the highest power conversion efficiency of 1.46%. These findings indicate that combining natural and synthetic dyes, along with the Sol-Gel synthesis method, significantly enhances DSSC efficiency. Additionally, the cell sensitized with a combination of two natural dyes exhibited 18% higher efficiency compared to the cell sensitized with a synthetic dye. Furthermore, the cell sensitized with a combination of two natural dyes and one synthetic dye demonstrated a 100% increase in efficiency. Additionally, the low production cost and eco-friendly nature of this approach highlight its advantages.

KEYWORDS

Eggplant Peel Dye, Red Cabbage Dye, N719 Dye, DSSC, Sol-Gel Method.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگدانه‌های طبیعی: ساخت و بررسی نانوذرات اکسید روی به روش سل-ژل

وحدت رفیعی^{۱*}، علیرضا رازقی زاده^۲، پریسا فرهادی بیرگانی^۳

چکیده

این مطالعه به بررسی تأثیر هم‌زمان رنگدانه‌های طبیعی استخراج‌شده از پوست بادمجان و کلم بنفش، همراه با رنگدانه مصنوعی پایه روتنیوم N719، بر راندمان تبدیل توان سلول‌های DSSC می‌پردازد. بدین منظور، نانوذرات اکسید روی با استفاده از روش سل-ژل سنتز شده و از طریق تکنیک پوشش‌دهی دکتر بلید روی لایه فوتوآند لایه‌نشانی شدند. در ادامه پنج سلول DSSN1 تا DSSN5 ساخته و با رنگ‌های مختلف حساس‌سازی شدند: به‌طوری که DSSN1 با پوست بادمجان، DSSN2 با رنگدانه کلم بنفش، DSSN3 با رنگدانه N719، DSSN4 با ترکیبی از رنگدانه‌های پوست بادمجان و کلم بنفش (با نسبت ۱:۱) و DSSN5 با ترکیب برابر رنگدانه‌های پوست بادمجان و کلم بنفش و N719 با نسبت (۱:۱:۱). بررسی ساختاری با پراش اشعه ایکس (XRD) ساختار هگزاگونال ZnO با میانگین اندازه ریز بلورک‌ها ۳۲/۳۰ نانومتر را تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز تخلخل مناسب سطح آند را با اندازه نانوذرات ۲۸/۴۶ نانومتر نشان داد که موجب بهبود نفوذ الکترولیت و رنگدانه می‌شود. با استفاده از طیف‌سنجی UV-Visible، نشان داده شد که ترکیب سه رنگدانه بیشترین پهنای طیف جذبی و بالاترین شدت را در بازه ۴۰۰-۷۰۰ نانومتر دارد و دارای کمترین گاف انرژی با مقدار ۲/۱۴ الکترون‌ولت است. عملکرد فتوولتائیک با شبیه‌ساز PnuAhwaz-SOL بررسی شد و DSSC5 با راندمان 1.46% بهترین عملکرد را داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیب رنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی همراه با روش سنتز سل-ژل، به‌طور چشمگیری کارایی DSSC را افزایش می‌دهد. همچنین سلول حساس‌شده با ترکیب دو رنگدانه طبیعی، بازدهی ۱۸ درصد بالاتری نسبت به سلول حساس‌شده با رنگدانه مصنوعی ارائه کرده است. علاوه بر این، سلول حساس‌شده با ترکیب دو رنگدانه طبیعی و یک رنگدانه مصنوعی، افزایش ۱۰۰ درصدی بازده را نشان داده است. همچنین هزینه تولید پایین و سازگاری زیست‌محیطی، مزایای قابل‌توجه این روش را برجسته می‌کند.

واژه‌های کلیدی

رنگدانه پوست بادمجان، رنگدانه کلم بنفش، رنگدانه N719، DSSC، روش سل-ژل.

۱ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۲ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

وحدت رفیعی

رایانامه: v.rafee@pnu.ac.ir

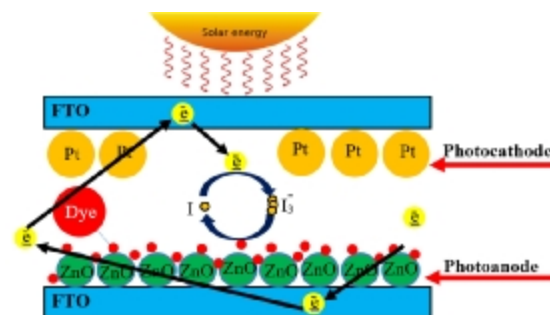
استناد به این مقاله:

وحدت رفیعی، علیرضا رازقی زاده، پریسا فرهادی بیرگانی (۱۴۰۴). بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگدانه‌های طبیعی: ساخت و بررسی نانوذرات اکسید روی به روش سل-ژل. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۳۸-۳۷، (۴)۷.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

مقدمه

در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است [۱، ۲]. در این میان، سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) به دلیل هزینه تولید پایین، انعطاف‌پذیری بالا و عملکرد مناسب در شرایط نوری ضعیف، جایگزین مناسبی برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی محسوب می‌شوند [۳، ۴]. این سلول‌ها از نیمه‌هادی‌هایی مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، دی‌اکسید قلع (SnO_2) و اکسید روی (ZnO) در لایه فوتوآند و رنگدانه‌های مختلف برای جذب نور بهره می‌برند [۵-۱۲]. انتخاب مناسب این مواد نقش مهمی در بهینه‌سازی طیف جذب نور، افزایش انتقال الکترون و بهبود بازده تبدیل توان DSSC دارد. شماتیک یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. الف) طرح‌واره سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

تاریخچه این فناوری به سال ۱۹۹۱ بازمی‌گردد، زمانی که گراتزل^۱ و همکاران [۱۳] نخستین DSSC را معرفی کردند. از آن زمان تاکنون، پژوهش‌های متعددی برای افزایش راندمان این سلول‌ها از طریق بهینه‌سازی ساختار فوتوآند، انتخاب نیمه‌هادی‌های کارآمد و استفاده از رنگدانه‌های مناسب انجام شده است [۱۴]. TiO_2 به‌عنوان نیمه‌هادی رایج در DSSC به دلیل گاف انرژی ۳/۲ eV، پایداری شیمیایی بالا و سازگاری با رنگدانه‌ها استفاده شده؛ اما محدودیت‌هایی مانند تحرک‌پذیری الکترونی پایین (حدود 10^{-1} تا 10^{-2} cm^2/Vs) و نرخ بالای بازترکیب الکترونی، استفاده از ZnO و SnO_2 را به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه مطرح کرده است [۱۵]. SnO_2 با گاف انرژی حدود ۳/۶ eV تحرک‌پذیری بالاتری (۲۰۰-۱۰۰ cm^2/Vs) دارد؛ اما نرخ بازترکیب بیشتر آن عملکرد DSSC را محدود می‌کند

[۱۵]. در مقابل، ZnO با گاف انرژی حدود ۳/۳ eV و تحرک‌پذیری در حالت نانو بین ۵۰-۲۰ cm^2/Vs ، گزینه‌ای مناسب به شمار می‌رود و به دلیل ساختار نانوساختاری متنوع، قابلیت سنتز آسان و سطح ویژه بالا توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۶].

علاوه بر خواص الکترونیکی، پارامترهای کریستالی و مورفولوژیکی ZnO نیز در عملکرد DSSC نقش دارند. این ماده معمولاً در ساختار وورتزیت^۲ با ثابت شبکه a برابر با ۳/۲۵ و c برابر با ۵/۲ آنگسترم تشکیل می‌شود [۹، ۱۷-۲۲]. اندازه بلورک‌ها و میزان تخلخل ZnO تأثیر مستقیمی بر میزان جذب رنگدانه و انتقال الکترون دارد و بسته به روش سنتز، می‌توان آن را بهینه‌سازی کرد.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب ZnO با رنگدانه‌های طبیعی می‌تواند تأثیر مثبتی بر بهینه‌سازی عملکرد DSSC داشته باشد [۷، ۲۳، ۲۴].

یکی از چالش‌های اساسی در DSSC، پایین بودن هدایت الکتریکی و نرخ بازترکیب بالای نیمه‌هادی‌های رایج مانند TiO_2 است که بر راندمان تبدیل توان تأثیر می‌گذارد [۵، ۲۵]. از سوی دیگر، پایداری و طیف جذب محدود رنگدانه‌های طبیعی مانع از دستیابی به بازدهی مطلوب شده است [۲۶-۲۹]. رنگ N719 یکی از رایج‌ترین رنگ‌های مصنوعی با بازدهی بالا است، اما هزینه بالا، پایداری محدود و اثرات زیست‌محیطی آن نیاز به جایگزین‌های مناسب‌تر را مطرح کرده است [۳۰]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) متمرکز شده‌اند که نتایج جذاب و امیدبخشی ارائه داده‌اند. این رنگدانه‌ها به دلیل زیست‌سازگاری، هزینه پایین و امکان استخراج از منابع تجدیدپذیر، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای رنگ‌های مصنوعی مانند N719 مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۶]. آنتوسیانین‌ها (موجود در میوه‌هایی مانند کلم قرمز، توت‌ها و بادمجان)، کاروتنوئیدها (در گیاهان زرد و نارنجی) و فلاونوئیدها (در برگ چای و مرکبات) از جمله ترکیباتی هستند که به دلیل ساختار مولکولی خود قادر به جذب نور در محدوده مرئی و انتقال مؤثر الکترون هستند [۲۸].

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب رنگدانه‌های طبیعی مختلف می‌تواند برهم‌کنش‌های سینرژیک ایجاد کند، طیف جذب نور را گسترش دهد و در نهایت منجر به افزایش بازده DSSC شود [۲۸]. به‌عنوان مثال ترکیب آنتوسیانین‌ها و

کربنات $[Na_2CO_3]$ با جرم مولکولی $287/54 \text{ g/mol}$ و خلوص $99/99\%$ و اتانول $99/98\%$ ساخت شرکت Merk به همراه آب مقطر و پودر پوست بادمجان و کلم بنفش خشک شده، رنگدانه N719، شیشه FTO، تریتون، الکترولیت ید - زوج رودکس تری یدید و خمیر پلاتین شرکت شریف سولار استفاده شد.

روش تهیه نانو ذرات اکسید روی به روش سل ژل

برای تهیه ۵ گرم نانوذرات ZnO، ابتدا ۱۳ گرم استات روی دوآبه در ۵۰ میلی‌لیتر اتانول و $6/5$ گرم سدیم کربنات در ۵۰ میلی‌لیتر محلول ترکیبی از آب دیونیزه و اتانول (نسبت ۱:۲) حل شدند. سپس هر دو محلول در دمای 65 درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲ ساعت روی همزن مغناطیسی هم زده شدند تا محلول‌های شفاف حاصل شود. در ادامه، محلول استات روی به صورت قطره‌ای و تحت هم‌زدن مداوم به محلول سدیم کربنات اضافه شد و پس از حدود ۲۰ دقیقه سل شفاف ایجاد گردید. رسوب $Zn(CO)_3$ تشکیل شده با استفاده از فیلتر جدا و برای حذف یون‌های اضافی چندین بار با آب دیونیزه و اتانول شسته شد. رسوب به دست آمده به مدت ۳ ساعت در دمای 100 درجه سانتی‌گراد خشک و سپس برای کلسینه‌سازی در دمای 500 درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد. در نهایت، ژل خشک شده آسیاب و مجدداً به مدت ۱ ساعت در دمای 500 درجه سانتی‌گراد کلسینه شد تا احتمال حضور هرگونه ناخالصی مانند $ZnCO_3$ به حداقل برسد، همچنین احتمال حضور فازهای اضافی را نیز به حداقل می‌رساند. بنابراین نانوپودر ZnO با بالاترین خلوص تولید می‌گردد [۱۷، ۳۲].

استخراج رنگدانه

برای تهیه رنگدانه از پوست بادمجان و کلم بنفش، ابتدا پوست بادمجان و برگ‌های سالم کلم جداسازی شده و با آب دیونیزه شست‌وشو داده و تمیز شدند. در ادامه هر نمونه برای افزایش سطح تماس رنگدانه‌ها با اتانول به طور جداگانه در هاون آسیاب شد و سپس با نسبت ۵ گرم ماده به ۵ میلی‌لیتر اتانول $99/98\%$ مخلوط گردید. مخلوط‌ها در بشر ریخته شده و با همزن مغناطیسی به مدت ۱۰ دقیقه هم‌زده شدند تا رنگدانه به طور کامل استخراج شود. سپس مخلوط از کاغذ صافی عبور داده شد تا ذرات جامد حذف و محلول شفاف جمع‌آوری شود. برای جلوگیری از تأثیر نور خورشید، ظرف حاوی محلول با فویل پوشانده شد. محلول نهایی شامل رنگدانه و اتانول در دمای زیر 4 درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شد. محلول رنگدانه - اتانول استخراج شده از پودر پوست بادمجان و کلم بنفش خشک

کاروتنوئیدها موجب بهبود جذب نور در گستره وسیع‌تری از طیف مرئی شده و عملکرد کلی سلول را ارتقا داده است [۲۸]. علاوه بر این، استفاده از عصاره گیاهان و میوه‌ها برای سنتز رنگدانه‌های پایدارتر و مقاوم‌تر، از جمله راهکارهای نوینی است که در برخی مطالعات برای افزایش دوام DSSC بررسی شده است [۲۸].

چالش اصلی در استفاده از رنگدانه‌های طبیعی، پایداری پایین و تمایل به تجزیه سریع آن‌ها در معرض نور و حرارت است [۲۸]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فرآیندهایی مانند تغییر pH، ترکیب رنگ‌های مختلف و استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی می‌توانند دوام این رنگدانه‌ها را افزایش دهند [۱۴، ۲۹]. علاوه بر این، بررسی برهم‌کنش رنگدانه‌های طبیعی با فوتوآند‌های مختلف مانند ZnO و TiO_2 از حوزه‌های تحقیقاتی جذاب است که می‌تواند به بهینه‌سازی DSSC منجر شود [۶، ۱۶، ۳۱].

در مجموع، استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در DSSC به عنوان رویکردی پایدار و کم‌هزینه، افق‌های جدیدی را در توسعه سلول‌های خورشیدی زیست‌سازگار گشوده است و همچنان یکی از حوزه‌های پررونق در تحقیقات انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود [۳]. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ترکیب رنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی همراه با نانوذرات ZnO بر راندمان تبدیل توان DSSC انجام شده است. در این مطالعه، ZnO به عنوان فوتوآند و ترکیب رنگ‌های طبیعی پوست بادمجان و کلم قرمز با رنگ مصنوعی N719 برای بهینه‌سازی طیف جذب نور و افزایش بازده سلول بررسی شده است. همچنین روش سل-ژل برای سنتز نانوذرات فوتوآند به کار گرفته شده تا ساختار متخلخل بهتری ایجاد شده و نفوذ رنگدانه و الکترولیت بهبود یابد.

نوآوری این پژوهش در ترکیب رنگ‌های طبیعی و مصنوعی برای ایجاد طیف جذب گسترده‌تر، استفاده از ZnO به عنوان جایگزین نیمه‌هادی‌های رایج و به کارگیری روش سل-ژل برای بهینه‌سازی ساختار فوتوآند نهفته است. در مقایسه با مطالعات پیشین، این تحقیق رویکردی کم‌هزینه، پایدار و کارآمد ارائه می‌دهد که می‌تواند به افزایش راندمان DSSC و بهبود امکان تجاری‌سازی این فناوری کمک کند.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی مورد استفاده

در این پژوهش از استات روی دو آبه $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ با جرم مولکولی $219/46 \text{ g/mol}$ و خلوص $99/99\%$ ، سدیم

شده، در شکل (۲) نشان داده شده است [۳۳، ۳۴].



شکل ۲. الف) رنگدانه‌های پوست بادمجان، کلم بنفش و N719

مراحل ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

مراحل ساخت فوتوآنود

ابتدا شیشه‌های FTO به ابعاد 2×2 سانتی‌متر برش داده شدند و پس از شستشو با آب دیونیزه و اتانول در حمام آلتراسونیک (هرکدام به مدت ۵ دقیقه)، خشک شدند. قسمت رسانای شیشه‌ها با مولتی‌متر مشخص شد و با استفاده از نواری چسب اسکاچ، ناحیه‌ای 1×1 سانتی‌متر مربع در مرکز شیشه برای لایه‌نشانی مشخص گردید. خمیر ZnO با ترکیب 0.5 گرم پودر ZnO، 1 میلی‌لیتر استیک اسید، چند قطره تریتون و 2.5 میلی‌لیتر اتانول تهیه شد و به روش دکتر بلید روی ناحیه مشخص‌شده، پخش شد. پس از جداکردن نواری چسب و تمیزکردن اثرات آن با پنبه آغشته به اتانول، شیشه‌ها برای ایجاد ساختار متخلخل و اتصال بهتر نانوذرات، روی یک قطعه سرامیک نسوز در کوره قرار داده شدند. حرارت‌دهی با افزایش دما از محیط تا 450 درجه سانتی‌گراد انجام و سپس کوره خاموش شد تا شیشه‌ها به دمای محیط بازگردند. پس از سرد شدن، شیشه‌ها در حمام آلتراسونیک با اتانول به مدت 10 دقیقه شسته شدند. سپس سطح پشتی و بخش‌های بدون لایه‌نشانی پوشانده شد و شیشه‌ها به‌طور عمودی در محلول رنگدانه غوطه‌ور شدند به‌طوری‌که فقط ناحیه لایه‌نشانی‌شده در محلول قرار گرفت. شیشه‌ها به مدت 24 ساعت در محیط تاریک و دمای اتاق نگهداری شدند. در نهایت، فوتوآندها از محلول خارج و برای حذف رنگدانه‌های اضافی با اتانول شسته شدند [۳۵].

مراحل ساخت فوتو کاتد

برای ساخت فوتوکاتد، شیشه‌های FTO مشابه فوتوآندها برش داده و شسته شدند. با استفاده از چسب اسکاچ، ناحیه لایه‌نشانی مشخص و خمیر پلاتین به روش دکتر بلید روی آن اعمال شد.

سپس شیشه‌ها در دمای 450 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه در کوره قرار گرفتند. پس از خنک‌شدن، شیشه‌ها شسته و سوراخ کوچکی روی آن‌ها ایجاد شد و مجدداً شستشو انجام شد [۳۵].

ساخت سلول

برای ساخت سلول، فوتوآنود و فوتوکاتد با استفاده از چسب پارافیلیم به‌صورت حلقه مربعی (ابعاد خارجی 1.5×1.5 سانتی‌متر و داخلی 1×1 سانتی‌متر) آب‌بندی شدند تا فضای خالی برای تزریق محلول الکترولیت ید-تری‌یدید باقی بماند. برای تزریق الکترولیت، ابتدا یک سمت دولایه با گیره کاغذی ثابت و الکترولیت بین آن‌ها تزریق شد. سپس سمت دیگر محکم و برای آب‌بندی به مدت 10 دقیقه در آن قرار گرفت. پس از خارج کردن، الکترولیت با پمپ خلأ در ناحیه فعال پخش و سوراخ‌ها با چسب حرارتی مسدود شدند. در نهایت، سلول‌ها برای اندازه‌گیری جریان و ولتاژ آزمایش شدند. مراحل ساخت سلول در شکل (۳) نشان داده شده است [۳۵].



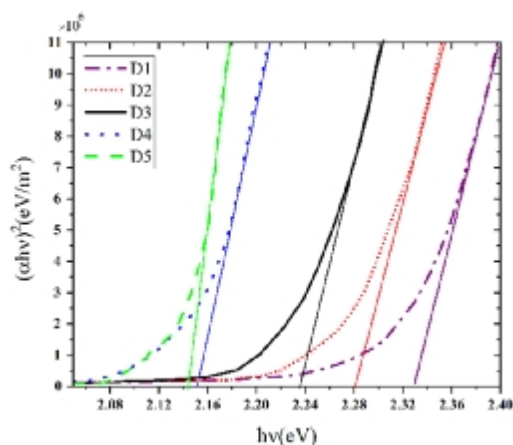
شکل ۳. مراحل ساخت سلول DSSC

نتایج و بحث

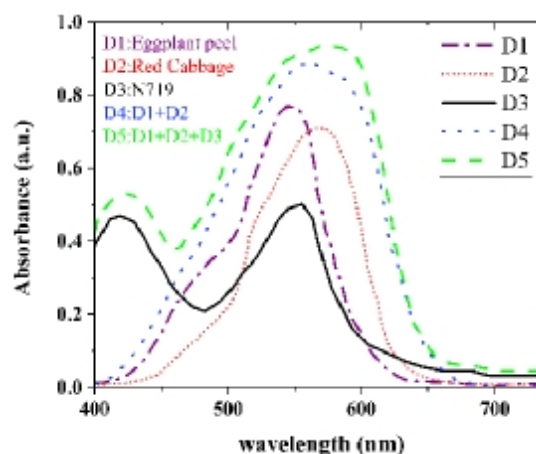
تحلیل اپتیکی

آنالیز UV-visble

به منظور شناسایی گسترده‌ترین طیف و کوچک‌ترین گاف انرژی مربوط به رنگدانه از آنالیزهای طیف‌سنجی استفاده شد. برای این منظور رنگدانه‌های D1 (رنگدانه پوست بادمجان)، D2 (رنگدانه کلم بنفش)، D3 (رنگدانه مصنوعی N719)، D4 (ترکیب رنگدانه‌های D1 و D2 به نسبت مساوی ۱:۱) و D5 (ترکیب سه رنگدانه D1، D2 و D3 به نسبت مساوی ۱:۱:۱) به‌صورت محلول با اتانول در کووت‌های دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل (Perkin Elmer) ریخته شده و طیف جذبی آن دریافت شد. در ادامه با استفاده از رابطه تاووس گاف نواری هر کدام ارزیابی شد.



شکل ۵. گاف انرژی نمونه‌های D1 تا D5



شکل ۴. طیف جذبی نمونه‌ها D1 تا D5

برای محاسبه گاف انرژی نمونه‌های D1 تا D5 از رابطه تاووس به شکل زیر استفاده می‌کنیم [۳۶]:

$$\alpha h\nu \propto (h\nu - E_g)^2 \quad (1)$$

که در آن α ضریب جذب، E_g گاف انرژی و h ثابت پلانک است نتایج محاسبه گاف انرژی نمونه‌های D1-5 در جدول (۱) ارائه می‌شود.

جدول ۱. گاف انرژی نمونه‌های D1 تا D5					
نمونه	D5	D4	D3	D2	D1
گاف انرژی (eV)	۲/۱۴	۲/۱۶	۲/۲۲	۲/۲۸	۲/۳۲

نمودار گاف انرژی ارائه شده در شکل و جدول به ترتیب (۵) و (۱) نشان می‌دهد که رنگدانه‌های طبیعی D1 (پوست بادمجان) و D2 (کلم بنفش) دارای گاف انرژی به ترتیب ۲/۳۲ eV و ۲/۲۸ eV هستند، که نشان‌دهنده امکان جذب فوتون‌های ناحیه مرئی است. این مقادیر معمولاً به انتقالات الکترونی $\pi \rightarrow \pi^*$ در ساختار مزدوج آنتوسیانین‌ها مرتبط هستند. رنگدانه مصنوعی D3 (N719) دارای کمترین مقدار گاف انرژی در بین سه رنگدانه با انرژی ۲/۲۲ eV است که نشان‌دهنده توانایی آن در جذب طیف گسترده‌ای از نور مرئی و نزدیک به مادون قرمز است. ترکیب D1 و D2 در نمونه D4 منجر به کاهش گاف انرژی به ۲/۱۶ eV شده است که بیانگر بهبود انتقال الکترونی و کاهش انرژی مورد نیاز برای تحریک الکترونی است. در نهایت، کمترین مقدار گاف انرژی ۲/۱۴ eV در نمونه D5 (ترکیب سه‌گانه D1+D2+D3) مشاهده می‌شود.

شکل (۴) نتایج حاصل از طیف‌سنجی UV-visible نمونه‌ها برای مطالعه جذب نوری D1 تا D5 آورده شده است. نمودار طیف جذبی شکل (۴) نشان می‌دهد که رنگدانه‌های D1 (پوست بادمجان) و D2 (کلم بنفش) به ترتیب دارای پیک‌های جذب در محدوده ۵۴۰-۵۶۰ نانومتر و ۵۵۰-۵۷۰ نانومتر هستند که مربوط به حضور آنتوسیانین‌ها در ساختار این رنگدانه‌ها است. این ترکیبات به دلیل ساختار π -الکترونی گسترده و پیوندهای مزدوج قادر به جذب نور در این ناحیه از طیف مرئی هستند. رنگدانه مصنوعی D3 (N719) دارای بیشترین شدت جذب در محدوده ۵۲۰-۵۶۰ نانومتر است، که نشان‌دهنده ویژگی‌های الکترونیکی آن و کارایی بالای آن در DSSC است. ترکیب رنگدانه‌های D1 و D2 با نام D4 جابه‌جایی قله جذب به صورت پایش قرمز در محدوده ۵۵۰-۵۸۰ نانومتر را از خود نشان می‌دهد که ناشی از برهم‌کنش‌های سینرژیک بین مولکول‌های رنگدانه‌ای و افزایش انتقال الکترون از باند والانس به باند رسانش است. مهم‌ترین ویژگی این طیف مربوط به رنگدانه D5 (ترکیب سه رنگدانه D1+D2+D3) است که دارای گسترده‌ترین طیف جذب از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و بیشترین شدت جذب در حدود ۵۶۰ نانومتر است. این گسترش طیفی به دلیل ترکیب جذب آنتوسیانین‌ها (D1 و D2) و رنگ مصنوعی D3 (N719) رخ داده و منجر به کاهش گاف انرژی و افزایش پوشش طیف نوری در محدوده مرئی شده است که می‌تواند به افزایش راندمان سلول خورشیدی رنگدانه‌ای منجر شود.

جدول ۲. تحلیل پراش پرتو ایکس نانو ذرات سنتز شده به روش سل-ژل

FWHM (degree)	Peak	2θ (degree)	Crystallize size(nm)
0.22	100	31.727	37.54301
0.225	002	34.384	36.96191
0.243	101	36.207	34.39747
0.26	102	47.510	33.38415
0.294	110	56.564	30.68377
0.3	103	62.824	31.02682
0.32	200	66.351	29.65843
0.305	112	67.903	31.3976
0.375	201	69.047	25.71061
Average Crystallize size:			32.30(nm)

همان طور که شکل (۶) و جدول (۲) می‌توان دریافت، قله‌های نمودار برای این نمونه در 31.727° ، 34.384° ، 36.207° ، 47.510° ، 56.564° ، 62.824° ، 66.351° ، 67.903° و 69.047° به ترتیب به عنوان صفحه‌های (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳)، (۱۱۲)، (۲۰۰) و (۲۰۱) شناسایی شدند. این محصول دارای ساختار کریستالی وورتزیت هگزاگونال است که با JCPDS Card ۳۶-۱۴۵۱ No. در توافق کامل است [۳۷].

در ادامه اندازه ریزبلورک‌ها با استفاده از رابطه دبای شرر محاسبه شد [۳۸].

$$\frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (۲)$$

در این فرمول λ طول موج اشعه X ، β پهنای قله بیشینه در نصف ارتفاع و θ زاویه موقعیت قله است. که نتایج به‌طور کامل اندازه ریزبلورک‌ها را از مرتبه نانو تأیید می‌کند. محاسبات به دست آمده از آنالیز XRD در جدول (۲) آورده شده است.

در ادامه به منظور محاسبه کرنش شبکه و نیز محاسبه متوسط ریزبلورک‌ها از روش دیگر، روش ویلیامسون-هال را ارزیابی کردیم. برای این منظور معادله ویلیامسون-هال به‌صورت معادله (۳) بیان می‌شود [۳۹]:

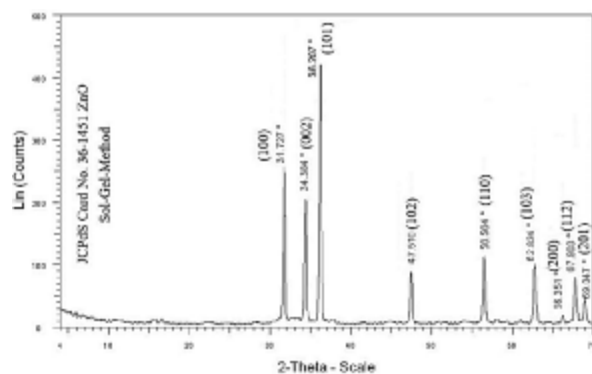
$$\beta \cos \theta = 4\varepsilon \sin \theta + \frac{0.94\lambda}{D} \quad (۳)$$

که در آن ε نشان‌دهنده کرنش شبکه و سایر پارامترها مانند معادله (۲) هستند. مقادیر ε و D را می‌توان به‌ترتیب از شیب و عرض از مبدأ نمودار $\beta \cos \theta$ در برابر $4 \sin \theta$ محاسبه کرد (ارائه شده در شکل (۷)).

که نشان‌دهنده افزایش تراکم حالات الکترونی در نوار رسانش و بهبود عملکرد رنگدانه در جذب نور کم‌انرژی‌تر است. این کاهش تدریجی گاف انرژی با ترکیب رنگدانه‌ها نشان می‌دهد که ادغام رنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی موجب افزایش جذب فوتون، بهبود برانگیختگی الکترونی و در نهایت افزایش کارایی DSSC خواهد شد. مکانیسم انتقال الکترون در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) به‌ویژه در سطح فوتوآند نقش حیاتی در کارایی سلول دارد. در این سیستم‌ها، رنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی مانند N719 فوتون‌ها را جذب کرده و الکترون‌ها را به سطح آند منتقل می‌کنند. در رنگدانه‌های مصنوعی مانند N719، انتقال الکترون به دلیل پیوند قوی گروه‌های کربوکسیلیک با سطح آند (TiO_2) به‌طور مؤثر انجام می‌شود. در رنگدانه‌های طبیعی، به‌ویژه به دلیل محدودیت‌های ساختاری، نیاز به اصلاحات شیمیایی برای بهبود پیوند و انتقال الکترون به سطح آند وجود دارد. تعامل مؤثر بین رنگدانه‌ها و سطح فوتوآند می‌تواند به بهبود کارایی و پایداری سلول‌های DSSC کمک کند و عملکرد بهینه را فراهم آورد.

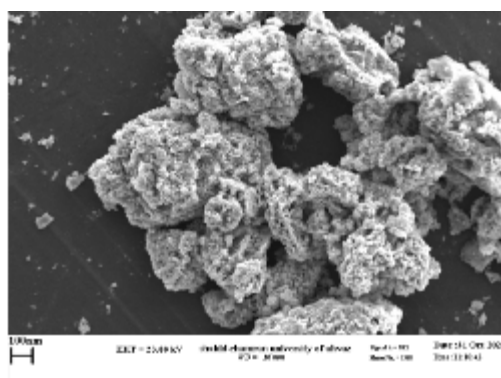
تحلیل ساختاری**آنالیز پراش پرتو X**

به منظور مطالعه خواص ساختاری، فاز نمونه‌ها و همچنین اندازه ریزبلورک‌ها از آنالیز پراش پرتو ایکس بهره برده‌ایم (مدل Siemens D ۵۰۰۰).

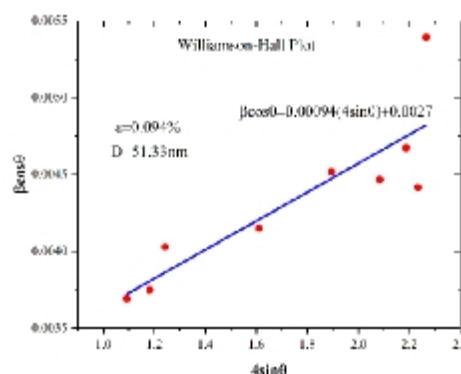
**شکل ۶.** الگوی پراش پرتو ایکس نانو ذرات سنتز شده به روش سل-ژل

شناسایی فاز نانو ساختارهای اکسید روی سنتز شده به روش سل-ژل از پراش پودر پرتو ایکس (XRD) با محدوده 2θ از 20° تا 80° ، سرعت اسکن $0.2^\circ/\text{s}$ درجه بر ثانیه و تابش $\text{Cu K}\alpha$ با طول موج $1.5406 \text{ \AA}$ انجام شد.

نتایج الگوی پراش پرتو ایکس برای نانوذرات اکسید روی سنتز شده به روش سل- ژل نشان می‌دهد که میانگین اندازه بلورک‌ها از روش شرر $33/30$ نانومتر محاسبه شده است. بیشترین اندازه بلورک مربوط به صفحه (100) با مقدار $37/54$ نانومتر و کمترین مقدار مربوط به صفحه (201) با $25/71$ نانومتر است.

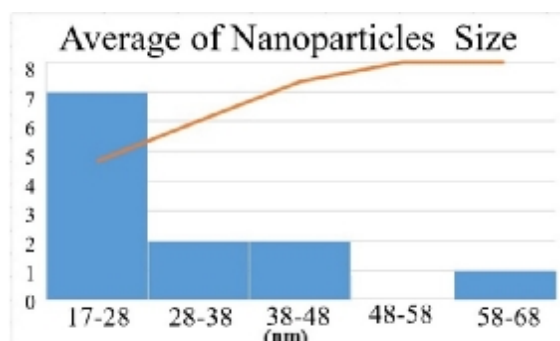


شکل ۸. تصویر SEM لایه فوتوآند



شکل ۷. برازش خطی ویلیامسون-هال برای نانوذرات سنتز شده به روش سل-ژل

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ارائه شده در شکل (۸)، ساختار فوتوآند را با بزرگنمایی بالا نمایش می‌دهد. مقیاس ۱۰۰ نانومتر تأیید می‌کند که نمونه شامل نانوذراتی در محدوده ابعاد نانومتری است که به‌صورت آگلومره و متخلخل در کنار هم قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌های مورفولوژیکی تأثیر مستقیمی بر عملکرد فوتوآند در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) دارد، زیرا افزایش تخلخل باعث بهبود نفوذ الکترولیت، افزایش سطح تماس فعال با رنگدانه و بهینه‌سازی انتقال الکترون می‌شود. ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۳/۰۰ kV و فاصله کاری ۱۶ mm نشان می‌دهند که تصویربرداری تحت شرایط استاندارد برای بررسی سطح فوتوآند انجام شده است.



شکل ۹. تحلیل هستگرم اندازه نانو ذرات لایه فوتوآند

این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر تنش‌های شبکه‌ای و محدودیت فضایی رشد بلورک‌ها در جهات کریستالی مختلف است. برای بررسی دقیق‌تر، از روش ویلیامسون-هال استفاده شده که نتایج آن نشان می‌دهد اندازه بلورک‌ها $51/33$ نانومتر و کرنش شبکه‌ای 0.094% است. این مقدار کرنش، ناشی از اعوجاج‌های ساختاری در شبکه کریستالی اکسید روی بوده که می‌تواند بر خواص الکترونیکی و نوری این ماده تأثیر بگذارد. تفاوت اندازه بلورک محاسبه‌شده از روش شر و ویلیامسون-هال تأیید می‌کند که علاوه بر اندازه بلورک، کرنش شبکه‌ای نیز در پهنای قله‌های XRD نقش داشته است. معادله خط برازش شده در نمودار ویلیامسون-هال عرض از مبدأ ($0/0.027$) نشان‌دهنده تأثیر اندازه بلورک است. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهند که نانوذرات ZnO سنتز شده دارای ساختاری نانومتری، کرنش شبکه‌ای جزئی و کیفیت کریستالی مناسبی هستند که می‌توانند در کاربردهای مختلف مانند سلول‌های خورشیدی و حسگرهای نوری استفاده شوند.

آنالیز میکروسکوپ روبشی

برای آنالیز SEM الکترودهای فوتونند، از میکروسکوپ روبشی (مدل LEO 1455VP) بهره می‌بریم. شکل (۸) نتایج حاصل از آنالیز SEM را برای نمونه اکسید روی سنتز شده به روش سل-ژل ارائه شده است. تحلیل نتایج شکل (۸) با استفاده از

این پارامترها از روی نمودار مشخصه جریان- ولتاژ استخراج شده و نقش مهمی در تعیین بازدهی نهایی سلول خورشیدی ایفا می‌کند. به‌طوری که V_{oc} به عنوان حداکثر ولتاژ تولیدی سلول در شرایط مدار باز تعریف شده و از نقطه‌ای که منحنی I-V محور ولتاژ (X) را قطع می‌کند، استخراج می‌شود. مقدار بالاتر V_{oc} نشان‌دهنده کاهش بازترکیب الکترونی و افزایش پایداری بارهای الکتریکی در فوتوآنود است. از سوی دیگر، J_{sc} میزان جریان تولید شده در حالت اتصال کوتاه ($V=0$) را مشخص کرده و از نقطه‌ای که منحنی I-V محور جریان (Y) را قطع می‌کند، به دست می‌آید. این پارامتر وابسته به میزان جذب نور و کارایی انتقال الکترون در فوتوآنود است، به طوری که افزایش J_{sc} به معنای بهبود دو ویژگی ضریب پرشدگی و راندمان تبدیل توان است.

به‌طوری که ضریب پرشدگی (FF) که میزان تطابق مشخصه عملکرد سلول با مقدار ایده‌آل را تعیین می‌کند، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$FF = \frac{P_{max}(W)}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (۴)$$

که در آن P_{max} حداکثر توان به دست آمده از منحنی I-V است. کارایی تبدیل توان (PCE) نسبتی از انرژی نور تابشی به انرژی الکتریکی تبدیلی است. افزایش مقدار FF به معنای کاهش تلفات داخلی و عملکرد بهتر سلول خورشیدی DSSC است. همچنین این پارامتر به صورت درصد بیان می‌شود. فرمول محاسبه PCE به صورت زیر است [۴۱]:

$$PCE = \eta\% = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (۵)$$

در محاسبات PCE بازده تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی، P_{in} مقدار توان تابشی ورودی است که برابر با 1000 W/m^2 در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳. تحلیل نتایج ولتاژ-آمپر سول‌های DSSN1 تا DSSN5

نمونه	PCE%	FF	$J_{sc}(\text{A/m}^2)$	$V_{oc}(\text{V})$
DSSN1	0.41	0.474	2.75×10^1	317×10^{-3}
DSSN2	0.47	0.532	2.97×10^1	298×10^{-3}
DSSN3	0.73	0.551	$10^1 \times 1.13$	$10^{-3} \times 418$
DSSN4	0.86	0.493	4.00×10^1	436×10^{-3}
DSSN5	1.46	0.488	$10^1 \times 7.75$	19×10^{-3}

تحلیل نتایج پارامترهای فوتوولتایی سلول‌های DSSN1 تا DSSN5 در شکل (۱۰) و جدول (۳) نشان می‌دهند که DSSN5 دارای بهترین عملکرد بوده و DSSN1 کمترین

تحلیل هیستوگرام در شکل (۹) توزیع اندازه نانوذرات را نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی ذرات در محدوده ۱۷ تا ۳۰ نانومتر قرار دارد و میانگین اندازه ذرات ۲۸/۴۶ نانومتر محاسبه شده است. این محدوده اندازه برای فوتوآنود مطلوب است؛ زیرا نانوذرات در این ابعاد دارای سطح ویژه بالا و قابلیت انتقال الکترون بهتری هستند.

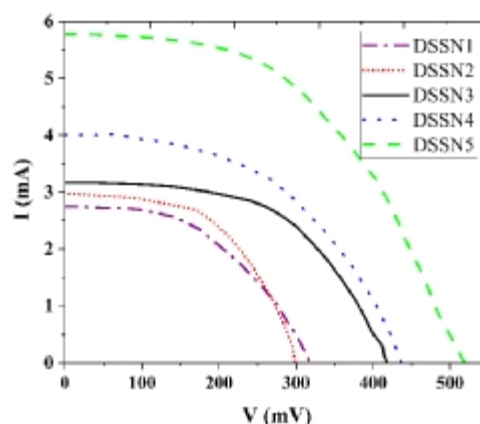
از نظر تأثیر اندازه ذرات بر عملکرد فوتوآنود، نانوذرات کوچک‌تر (۱۷-۳۰ نانومتر) باعث افزایش سطح فعال، بهبود جذب رنگدانه و کاهش مقاومت الکتریکی می‌شوند که برای عملکرد بهینه DSSC ضروری است. در مقابل، ذرات بزرگ‌تر ممکن است نرخ بازترکیب الکترونی را افزایش داده و موجب کاهش عملکرد سلول خورشیدی شوند. بنابراین توزیع اندازه یکنواخت‌تر و کنترل آگلومراسیون می‌تواند به بهبود عملکرد فوتوآنود کمک کند.

نتایج این آنالیز تأیید می‌کنند که فوتوآنود بررسی‌شده دارای ویژگی‌های ساختاری مطلوبی برای استفاده در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای است. میانگین اندازه نانوذرات در محدوده مناسب قرار دارد. برای کاهش آگلومراسیون، می‌توان از عوامل پایدارکننده (Surfactants) یا بهینه‌سازی روش‌های سنتز؛ مانند کنترل دما، غلظت مواد اولیه و سرعت رسوب‌گذاری استفاده کرد. همچنین، افزایش میزان تخلخل از طریق کنترل دقیق فرایند نانوساختارسازی می‌تواند موجب بهبود نفوذ الکترولیت و در نهایت افزایش راندمان تبدیل انرژی در DSSC شود.

تحلیل فوتوولتایی

آنالیز ولتاژ-آمپر

عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) بر اساس پارامترهای کلیدی نظیر ولتاژ مدار باز (V_{oc}) چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، ضریب پرشدگی (FF) و راندمان تبدیل توان (PCE) ارزیابی می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار ولتاژ-آمپر نمونه‌های DSSN1 تا DSSN5

قرمز با رنگدانه مصنوعی N719، عملکرد بهتری نسبت به سلول‌های خورشیدی ساخته شده تنها با رنگدانه N719 نشان داده‌اند. این ترکیب نه تنها موجب افزایش جذب نور در محدوده مرئی می‌شود؛ بلکه همچنین باعث بهبود انتقال الکترون و کاهش بازترکیب حامل‌های بار در فوتوآنود می‌گردد. در نمونه DSSN5، که شامل ترکیب سه رنگدانه پوست بادمجان، کلم قرمز و N719 است، راندمان تبدیل توان به 1.46% افزایش یافته که نشان‌دهنده عملکرد بهینه این سلول‌ها است.

نتایج آنالیزهای مختلف، از جمله XRD و SEM، نشان می‌دهند که نانوذرات ZnO به کار رفته در فوتوآنود، با اندازه ریز بلورک‌ها ۳۲/۳۰ نانومتر و ساختار هگزاگونال، تأثیر زیادی بر عملکرد فوتوآنود دارند. تصاویر SEM نشان دادند که این نانوذرات با اندازه میانگین ۲۸/۴۶ نانومتر به صورت متخلخل روی سطح فوتوآنود قرار گرفته‌اند که این ویژگی‌ها باعث افزایش نفوذپذیری الکترولیت و رنگدانه‌ها شده و در نهایت کارایی فوتوآنود را بهبود می‌بخشد.

در تحلیل طیف‌سنجی UV-Visible، مشاهده شد که ترکیب رنگدانه‌ها نه تنها گسترده‌ترین طیف جذب نور را ارائه می‌دهد، بلکه کمترین گاف انرژی (2.14 eV) را دارا است که این ویژگی باعث افزایش انتقال انرژی به الکترون و در نتیجه بهبود عملکرد فوتوولتائیک سلول‌ها می‌شود. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که ترکیب رنگدانه‌های طبیعی با رنگدانه‌های مصنوعی نه تنها موجب افزایش راندمان سلول‌های خورشیدی می‌شود؛ بلکه می‌تواند تأثیرات مثبت زیست‌محیطی و اقتصادی به همراه داشته باشد.

در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب رنگدانه‌های طبیعی به همراه ZnO به عنوان نیمه‌هادی فوتوآنود، به‌ویژه با استفاده از روش سل-ژل، می‌تواند به عنوان یک روش پایدار و کارآمد برای بهبود عملکرد DSSC در نظر گرفته شود. این مطالعه به وضوح مزایای بهبود راندمان، کاهش هزینه‌های تولید و سازگاری با محیط زیست را به همراه دارد و می‌تواند گامی مؤثر در جهت بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای در آینده باشد.

راندمان را دارد. مقدار V_{oc} در DSSN5 برابر ۵۱۹mV است که نسبت به DSSN1 (317mV) بهبود قابل‌توجهی داشته است. افزایش این مقدار نشان‌دهنده کاهش بازترکیب الکترونی و بهبود هدایت بارهای الکتریکی در فوتوآنود است. همچنین، مقدار J_{sc} در DSSN5 بالاترین مقدار ($57/7(A/m^2)$) را داشته که افزایش جذب نور و بهینه‌سازی انتقال بار را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب پرشدگی (FF) در تمام نمونه‌ها در محدوده ۰/۴۷ – ۰/۵۲ قرار دارد که نشان‌دهنده پایداری نسبی عملکرد سلول‌ها است. راندمان تبدیل توان (PCE) نیز در DSSN5 برابر ۱/۴۶% است که نسبت به DSSN1 (۰/۴۱%) بهبود چشمگیری داشته است. همچنین باید توجه داشت دما و شدت نور تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای کلیدی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) دارند. افزایش دما معمولاً منجر به کاهش ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و چگالی جریان کوتاه‌مدت (J_{sc}) می‌شود؛ زیرا با افزایش دما، نرخ واکنش‌های بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها افزایش یافته و کارایی حمل‌کننده‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، V_{oc} و J_{sc} تحت تأثیر شدت نور نیز قرار دارند؛ شدت نور بالاتر منجر به افزایش تولید فوتون و در نتیجه افزایش V_{oc} و J_{sc} می‌شود. با این حال، در دماهای بالا، افزایش شدت نور ممکن است تأثیرات منفی بر عملکرد کلی سلول‌های DSSC داشته باشد؛ چرا که دماهای بالا می‌توانند باعث کاهش فاکتور فرم (FF) و بازده تبدیل انرژی (PCE) شوند. به طور کلی، شدت نور بیشتر باعث بهبود عملکرد سلول‌های DSSC می‌شود؛ اما این تأثیرات معمولاً تحت شرایط دمایی مختلف متفاوت است و نیاز به بررسی دقیق در شرایط آزمایشی کنترل‌شده دارد تا اثرات هم‌زمان دما و شدت نور بر کارایی این سلول‌ها به‌طور بهینه مدل‌سازی و تحلیل شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده بهبود قابل توجه عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC) با استفاده از ترکیب رنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی است. این تحقیق تأکید می‌کند که ترکیب رنگدانه‌های طبیعی مانند پوست بادمجان و کلم

References

- [1] D. Helm, The future of fossil fuels—is it the end?, *Oxford Review of Economic Policy*, 32 (2016) 191-205.
- [2] M. Zastempowski, Analysis and modeling of innovation factors to replace fossil fuels with renewable energy sources-Evidence from European

منابع

- Union enterprises, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178 (2023) 113262.
- [3] Razaghizadeh, A., V. Rafee, and R. Nakhaei, Effect of Silver Nanoparticles Embedding in Mesoporous TiO₂ Layer on the Performance Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells Using Natural Dyes. *Plasmonics*, 2025: p. 1-15.

- [4] P. Prakash, B. Janarthanan, Review on the progress of light harvesting natural pigments as DSSC sensitizers with high potency, *Inorganic Chemistry Communications*, 152 (2023) 110638.
- [5] G. Arthi, J. Archana, M. Navaneethan, S. Ponnusamy, Y. Hayakawa, C. Muthamizhchelvan, S.G. Ramaraj, TiO₂ nanoparticle seeds transformed into nanotubes for effective dye-sensitized solar cell application, *Materials Letters*, 372 (2024) 136981.
- [6] A. Toghan, A. Modwi, M. Khairy, K.K. Taha, Influence of TiO₂ concentration on the characteristics of ZnO nanoparticles fabricated via sonication assisted with gelatin, *Chemical Physics*, 551 (2021) 111350.
- [7] O. Adedokun, O.L. Adediji, I.T. Bello, M.K. Awodele, A.O. Awodugba, Fruit peels pigment extracts as a photosensitizer in ZnO-based Dye-Sensitized Solar Cells, *Chemical Physics Impact*, 3 (2021) 100039.
- [8] B. Boro, B. Gogoi, B. Rajbongshi, A. Ramchiary, Nano-structured TiO₂/ZnO nanocomposite for dye-sensitized solar cells application: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 2264-2270.
- [9] A. Roy, S. Sundaram, T.K. Mallick, Effect of dye sensitization's temperature on ZnO-based solar cells, *Chemical Physics Letters*, 776 (2021) 138688.
- [10] Y. Zhu, Y. Zhou, Preparation of pure ZnO nanoparticles by a simple solid-state reaction method, *Applied Physics A*, 92 (2008) 275-278.
- [11] J. Abdalla, Y.-W. Huang, Q.-J. Yu, J.-Z. Wang, J.-N. Wang, C.-L. Yu, S.-Y. Gao, S.-J. Jiao, D.-B. Wang, A. Alarabi, TiCl₄ surface-treated SnO₂ photoanodes for self-powered UV photodetectors and dye-sensitized solar cells, *Materials Technology*, 32 (2017) 443-450.
- [12] S. Edalati, A. Behjat, N. Torabi, Near-field effect of Ag@ SnO₂ core-shell on dye-sensitized solar cell performance, *Plasmonics*, 13 (2018) 2215-2219.
- [13] B. O'regan, M. Grätzel, A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films, *nature*, 353 (1991) 737-740.
- [14] A.K. Pandey, M.S. Ahmad, N.A. Rahim, V.V. Tyagi, R. Saidur, Natural Sensitizers and Their Applications in Dye-Sensitized Solar Cell, in: R.C. Sobti, N.K. Arora, R. Kothari (Eds.) *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future*, Springer Singapore, Singapore, 2019, pp. 375-401.
- [15] A. Arabkhorasani, E. Saievar-Iranizad, A. Bayat, Effect of dye absorption time on performance of ZnO, TiO₂ and SnO₂ nanoparticle photo-anodes in dye sensitized solar cell, *Iranian Journal of Physics Research*, 21 (2021) 355-363.
- [16] V.H. Nguyen, D. Bellet, B. Masenelli, D. Muñoz-Rojas, Increasing the electron mobility of ZnO-based transparent conductive films deposited by open-air methods for enhanced sensing performance, *ACS Applied Nano Materials*, 1 (2018) 6922-6931.
- [17] J. Hasnidawani, H. Azlina, H. Norita, N. Bonnia, S. Ratim, E. Ali, Synthesis of ZnO nanostructures using sol-gel method, *Procedia chemistry*, 19 (2016) 211-216.
- [18] M. Hezam, M.Q. Alsubaie, A. Algarni, H. Ghaithan, J. Labis, M. Alduraibi, ZnO Nanosheet-Nanowire morphology tuning for Dye-sensitized solar cell applications, *Chemical Physics Letters*, 780 (2021) 138953.
- [19] K. Hedayati, S. Azarakhsh, J. Saffari, D. Ghanbari, Magnetic and Photo-catalyst CoFe 2 O 4-CdS Nanocomposites: Simple Preparation of Ni, Co, Zn or Ag-Doped CdS Nanoparticles, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (2017) 5472-5484.
- [20] K. Hedayati, Z. Behesht-Ara, D. Ghanbari, Preparation and characterization of various morphologies of SrFe 12 O 19 nano-structures: investigation of magnetization and coercivity, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (2017) 1-9.
- [21] D. Mehrparvar, M. Naseri Tekyeh, R. Moradian, S. Mahdavi, Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nano-sheets via Sol-Gel Method: Impact of Iron and Copper Impurities on Structural Properties and Band-Gap, *Quarterly Journal of Optoelectronic*, 7. (2024).
- [22] D. Mehrparvar, M. Naseri Tekyeh, M. Radmehr, Investigating the structural properties and band gap of Zn1-xNixO nanostructures synthesized by sol-gel method, *Quarterly Journal of Optoelectronic*, 6 (2024) 19-26.
- [23] M. Abrari, M. Ahmadi, H.M. Chenari, M. Ghanaatshoar, Investigating the effect of ZrO₂ nanofibers in ZnO-based photoanodes to increase dye-sensitized solar cells (DSSC) efficiency: inspecting the porosity and charge transfer properties in ZnO/ZrO₂ nanocomposite photoanode, *Optical Materials*, 147 (2024) 114690.
- [24] A. Jena, S.P. Mohanty, P. Kumar, J. Naduvath, V. Gondane, P. Lekha, J. Das, H.K. Narula, S. Mallick, P. Bhargava, Dye sensitized solar cells: a review, *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 71 (2012) 1-16.
- [25] H.Y. Lin, J.L. Li, C.C. Wang, Study on preparation of TiO₂ nanoparticle by sol-gel method, *Advanced Materials Research*, 599 (2012) 44-47.
- [26] H. Paliwal, S. Goyal, S. Singla, S. Daksh, Pigments from natural sources: An overview, *International Journal of Research in Pharmacy and Pharmaceutical Sciences (IJRPPS)*, 1 (2016) 1-12.
- [27] Y. Yuniati, K. Handarini, M. Mahfud, Pigment Extraction Method for Anthocyanin Natural Resources in Indonesia: A Review, *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 24 (2024) 66-78.
- [28] S.B. Swami, S.N. Ghgare, S.S. Swami, K.J. Shinde, S.B. Kalse, I.L. Pardeshi, Natural pigments from plant sources: A review, *The Pharma Innovation Journal*, 9 (2020) 56.
- [29] U. Mahajan, K. Prajapat, M. Dhonde, K. Sahu, P.M. Shirage, Natural dyes for dye-sensitized solar cells (DSSCs): An overview of extraction, characterization and performance, *Nano-Structures & Nano-Objects*, 37 (2024) 101111.

- [30] A.S. Najm, S.A. Alwash, N.H. Sulaiman, M. Chowdhury, K. Techato, N719 dye as a sensitizer for dye-sensitized solar cells (DSSCs): A review of its functions and certain rudimentary principles, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42 (2023) e13955.
- [31] L. Lin, X. Peng, S. Chen, B. Zhang, Y. Feng, Preparation of diverse flower-like ZnO nanoaggregates for dye-sensitized solar cells, *RSC Advances*, 5 (2015) 25215-25221.
- [32] Y. Dimitriev, Y. Ivanova, R. Iordanova, History of sol-gel science and technology, *Journal of the University of Chemical technology and Metallurgy*, 43 (2008) 181-192.
- [33] R. Mansour, Natural dyes and pigments: Extraction and applications, *Handbook of renewable materials for coloration and finishing*, 9 (2018) 75-102.
- [34] P.H.S. Miranda, A.C. dos Santos, B.C.B. de Freitas, G.A. de Souza Martins, E.V.d.B.V. Boas, C. Damiani, A scientific approach to extraction methods and stability of pigments from Amazonian fruits, *Trends in Food Science & Technology*, 113 (2021) 335-345.
- [35] R. Nakhaei, A. Razeghizadeh, P. Shabani, J. Ganji, S.S. Tabatabaee, Combination of co-sensitization and Förster resonance energy transfer in natural-synthetic dye sensitized solar cells, *Optical Materials*, 131 (2022) 112690.
- [36] A. Razeghizadeh, E. Elahi, V. Rafee, The effect of Mn doping on structural, magnetic and optical properties of TiO₂ nanoparticles, *Journal of Nanoanalysis*, 2 (2018) 77.
- [37] N. Chauhan, V. Singh, S. Kumar, R. Dhiman, Influence of nickel, silver, and sulphur doping on the photocatalytic efficiency of mesoporous ZnO nanoparticles, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45 (2020) 249-259.
- [38] A. Razeghizadeh, M. Mahmudi Ghalavandi, F. Sohili, V. Rafee, The effect of sputtering RF power on structural, optical and electrical properties of CuO and CuO₂ thin films, *Journal of Nanostructures*, 9 (2019) 230-237.
- [39] L. Abbasi, K. Hedayati, D. Ghanbari, Magnetic properties and kinetic roughening study of prepared polyaniline: lead ferrite, cobalt ferrite and nickel ferrite nanocomposites electrodeposited thin films, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32 (2021) 14477-14493.
- [40] V. Rafee, A. Razaghezadeh, R. Nakhaei, R. Hosini, Eco-friendly dye-sensitized solar cells: Green synthesis of ZnO nanoparticles using Sargassum algae and performance enhancement through optimized dye combinations, *Materials Science and Engineering: B*, 317 (2025) 118164.
- [41] V. Rafee, E. Rahimi, H. Tavallali, R. Rajabi, Improvement of efficiency and stability of perovskite solar cells using CTF-0 and combination with anthracene: A computational study, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, (2025) 116337.