

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir Journal of Color Science and Technology, 18, 4(2025), 325-335 Article type: Research article Open access

www.jcst.icrc.ac.ir

Effect of Silver on Enhancing the Performance of TiO₂-WO₃ Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells

Samira Fallahdoust Moghadam¹, Neda Gilani^{*1}, Ali Akbar Yousefi^{**2}

1- Department of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Guilan, P.O. Box: 115-14965, Guilan, Iran

2- Energy Department, Iranian Polymer and Petrochemical Research Institute, P.O. Box: 112-14975, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history: Received: 01-03-2025 Accepted: 07-06-2025 Available online: 14-07-2025 Print ISSN: 1735-8779 Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167479.1252

Keywords: Silver DSSC Nanostructure Doping TiO₂-WO₃

ABSTRACT

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) face limitations in achieving high efficiency due to the electron recombination phenomenon at the conductive oxide-electrolyte interface. In this study, to enhance the efficiency of DSSCs, TiO₂ nanoparticles were doped with WO3 nanostructures and silver. The results revealed that utilizing this combination in the fabrication of the photoanode reduces electron recombination and improves the power conversion efficiency of the solar cells. Morphological analysis of the synthesized nanoparticles was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The findings of this study showed that the photoanode based on the Ag-TiO₂-WO₃ ternary nanostructure exhibited better performance compared to photoanodes made of pure TiO₂, WO₃, and TiO₂-WO3. Specifically, the cell with the Ag-TiO₂-WO3 photoanode achieved a shortcircuit current density (Jsc) of 13.63 mA/cm² and a power conversion efficiency of 6.87 %. In contrast, cells made with photoanodes of pure TiO₂, WO₃, and TiO₂-WO₃ demonstrated power conversion efficiencies of 3.171, 0.93, and 5.631 %, respectively.

*Corresponding author: * n.gilani@guilan.ac.ir

**a.yousefi@ippi.ac.ir







دسترسی آنلاین: www.jcst.icrc.ac.ir نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۸، (۱۴۰۳)۴، ۳۳۵ـ۳۲۵ نوع مقاله: پژوهشی دسترسی آزاد

تاثیر نقره بر بهبود عملکرد فوتوآند TiO2-WO3درسلول خورشیدی حساسشده به مواد رنگزا

سمیرا فلاحدوست مقدم^۱، ندا گیلانی^۳[»]، علی اکبر یوسفی^{۳۵۳} ۱ـ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۶۵–۱۱۵ ۲_ دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۶۵–۱۱۵ ۳_ استاد، گروه انرژی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۷۵–۱۱۲

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳٬۱۲٫۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴٬۰۳٬۱۷ در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴٬۰۴٬۲۳ شاپا چاپی: ۲۷۷۹–۲۱۷۳ شاپا الکترونیکی: ۲۱۶۹–۲۳۳۸

DOI: 10.30509/jcst.2025.167479.1252

واژههای کلیدی: نقره سلول خورشیدی حساسشده به مواد رنگزا نانوساختار دوپکردن TiO2-WO3

چکیدہ

سلولهای خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا (DSSC) به دلیل پدیده نوترکیبی الکترونها در محل اتصال اکسید رسانا و الکترولیت، با محدودیتهایی در دستیابی به بازده بالا مواجه هستند. در این پژوهش، برای افزایش بازده DSSC از دوپکردن نانوذرات 2012 با نانوساختارهای W03 و نقره استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از این ترکیب در ساخت فوتوآند موجب کاهش پدیده نوترکیبی الکترونها و بهبود بازده تبدیل توان سلول خورشیدی می شود. تحلیل ریخت شناسی نانوذرات سنتزشده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیفسنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) انجام گرفت. یافتههای این مطالعه نشان دادند که فوتوآند مبتنی بر نانوساختار سه گانه -200 قرفت. یافتههای این مطالعه نشان دادند که فوتوآند مبتنی بر نانوساختار سه گانه دانو- کاره عملکرد بهتری در مقایسه با فوتوآندهای ساخته شده از 2017 و سوخ دریان توان خالص دارد. به طور مشخص، سلول دارای فوتوآند میتنی بر نانوساختار سه گانه -200 خالص دارد. به طور مشخص، سلول دارای فوتوآند میتنی بر بر ۲۰٫۶ درصد دست یافت. در خالص دارد. به طور مشخص، سلول دارای فوتوآند میتنی بر بر ۲۰٫۶ درصد دست یافت. در مقابل، سلولهای ساخته شده با فوتوآندهای 2017، و ۵۷ دوسان اتصال مقابل، سلولهای ساخته شده با فوتوآندهای داند داری دوسرخ در بر ۲۵٫۶ درصد دست یافت. در مقابل، سلولهای ساخته شده با فوتوآندهای 2017، و ۷۵ دوست داند. در اتصال

*Corresponding author: * n.gilani@guilan.ac.ir

**a.yousefi@ippi.ac.ir



۱_ مقدمه

برای کاهش وابستگی به سوختهای فسیلی، انرژیهای تجدیدپذیر بهعنوان راهحل هایی ضروری و بنیادین مطرح شدهاند. استفاده از انرژی خورشیدی، بیشک، یکی از مؤثرترین راهها برای حل بحران انرژی در جهان است. سلولهای خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا⁽ (DSSCs) به دلیل هزینه کم، انعطافیذیری، سهولت تولید، بازده تبدیل انرژی نسبتاً بالا و سمیت کم برای محیطزیست، بهعنوان نامزدهای امیدبخش برای بهرهبرداری از انرژی خورشیدی مورد توجه قرار می گیرند (۱). تلاشهای بسیاری برای ساختDSSCهای کارآمدتر با معرفی اجزای جدید مانند الکترولیتها، رنگزاها، الکترودهای شمارنده و فوتوآندهای نيمهرسانا انجام شده است (٢). در ميان اين اجزا فوتوآند نقشي حياتي در تعیین عملکرد این نوع سلول خورشیدی ایفا می کند. تاکنون، دی اکسید تیتانیم^۲(TiO₂)، به دلیل هزینه کم، سهولت ساخت، بازده تبدیل انرژی نسبتاً بالا و سطح ویژه زیاد، یکی از متداول ترین مواد مورد استفاده در فوتوآندها بوده است (۳،۴). با ایـن حـال، محـدودیت اصلی استفادہ از TiO2 بهعنوان فوتوآند مربوط به انتقال تصادفی الكترونها است؛ اين ويژگى باعث فرايند نوتركيبي الكترون- حفره شده و عملکرد مؤثر دستگاه را محدود می کند. برای رفع این مشکل، طراحی فوتوآندی با مسیر انتقال بار کارآمد که بتواند حاملهای نوری تزریقشده را به جمعکننده جریان منتقل کند، رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد SSCها محسوب می شود (۵). با هدف دستیابی به این اصلاحات، تغییرات سطحی TiO2 از طریق دوپکردن فلزی، جفت شدگی با نیمه هادی ها و هیبرید شدگی با مواد کربنی انجام شده که نتایج امیدوار کنندهای را ارائه داده است (۶). علاوه بر TiO2، اکسیدهای فلزی دیگری مانند اکسید روی (ZnO)، تریاکسید تنگستن (WO3)، اكسيد نيوبيم (Nb2O5) و اكسيد قلع (SnO2) نيز بهطور گسترده بهعنوان مواد فوتوآند مورد بررسی قرار گرفتهاند (۱۰-۷). در این میان، اکسید تنگستن^۳،WO به دلیل شباهت سطوح انـرژی آن بـا TiO2توجه ویژهای را به خود جلب کرده است؛ این ویژگی باعث افزایش علاقه به ترکیب این دو ماده شده است. علاوه بر این، گاف نـوار نسبتاً متوسط تری اکسید تنگستن (۲٫۶ eV) امکان جذب تقریباً ۱۲ درصد از نور خورشید در ناحیه مرئی را فراهم میکند (۱۱). در مقایسه با TiO2، ترى اكسيد تنگستن از تحرك الكترونى بالاتر و لبه نوار هدايت مثبتتری (در حدود ۵,۰ ولت) برخوردار است. ادغـام WO3 بـا TiO2 ، ساختار الکترونیکی را از طریق معرفی نوارهای انرژی جدید و یا هم پوشانی نوارهای موجود تغییر داده و در نتیجه موجب کاهش گاف نوار TiO2 می شود (۱۲). این گاف نوار کاهشیافته، امکان جذب طیف گستردهتری از طول موجهای نور، از جمله نور مرئی را فراهم می کند. در

یک مطالعه، چنگ أو همکارانش برای اولین بار با استفاده از نانوذرات تجاری WO3 بهعنوان فوتوآند، به بازده ۰٫۷۵ درصد دست یافتند که این بازده پس از انجام اصلاحات سطحی به ۱٬۴۶ درصد افزایش یافت (۱۳). در پژوهشی دیگر، پرابهو^۵ با استفاده از یک کامیوزیت -TiO2 WO3بهعنوان فوتوآند، به حداکثر بازده ۵٬۰۳ درصد دست یافت (۱۴). همچنین، یانگ با ترکیب TiO2و WO3 به بازدهی حتی بیشتر از ۵٬۴۷ درصد رسيد (١۵). اين پيشرفتها نشاندهنده پتانسيل قابل توجه کامپوزیت های WO3 در بهبود عملکرد DSSCها است. تحقیقات همچنین نشان دادهاند که نانوکامپوزیت TiO₂-WO₃ در مقایسه با مواد خالص WO3 و TiO2دارای خواص فوتوالکتروشیمیایی برتری است (۱۳). علاوه بر این، اصلاح TiO2 با فلزات نجیبی مانند طلا (Au)، نقره (Ag)، و یلاتین (Pt) بهعنوان یک راهکار مؤثر برای جلوگیری از بازتر کیب جفتهای الکترون- حفره ناشی از تابش نور در فوتوآندهای DSSC گزارش شده است (۱۸–۱۶). این روشها به طور گسترده در حال تحقیق و توسعه برای بهبود بازدهی سلولهای خورشیدی هستند. نانوذرات نقره با افزایش جذب نور و بهبود ضریب جذب مواد رنگزا، عملکرد این سلول ها را ارتقا می بخشند. این بهبود عملکرد ناشی از تشديد پلاسمون سطحي است (١٩، ٢٠). علاوه بر اين، فلزات نجيب مىتوانند بهعنوان محل تجمع الكترونها براى حاملهاى بار توليد شده توسط نور عمل کنند، انتقال بار سطحی را بهبود ببخشند و بازترکیب بار را به حداقل برسانند. این ویژگی منجر به بهبود انتقال الکترون در DSSC می شود (۲۱). از میان این رویکردها، افزودن نانوذرات فلزی به فوتوالكترود TiO2 مى تواند با القاى پلاسماى سطحى موضعى، جـذب نوری را افزایش دهد (۲۲). این نانوذرات همچنین از طریق تشکیل موانع شاتکی در فصل مشترک فلز-نیمهرسانا، بازترکیب الکترون ها را کاهش داده و با بازتاب و پراکندگی نور تابیده، مسیر نـوری را افـزایش میدهند. این اثرات در نهایت به تشکیل شبکه انتقال الکتـرون منتهـی می شود. مطالعات نشان دادهاند که نانوذرات نقره با اندازههای ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر بیشترین کاربرد را برای این اهداف دارند (۲۳). مطالعه آساهی^و همکارانش نشان داد که دوپکردن TiO2 ظرفیت جـذب نـور و فعالیت کاتالیزوری نوری آن در پرتو مرئی را بهطرز چشمگیری افزايش ميدهد (۲۴). كاظمي و همكارانش نانوكامپوزيتهاي نقره و TiO2 را با نسبتهای متفاوت سنتز کردند و نتایج بهبود توانایی جـذب مواد رنگزا، افزایش چگالی جریان و بازدهی سلول را نشان دادنـد (۲۵). در مطالعه دیگری، گوپتا و همکارانش اثرات TiO2 دوپشده با نقره را

بهعنوان یک فوتوآند در عملکرد DSSC مورد بررسی قـرار دادنـد. ایـن

9- Kazmi

¹⁻ Dye-sensitized solar cells

²⁻ Titanium dioxide

³⁻ Tungsten trioxide

⁴⁻ Cheng

⁵⁻ Prabhu

⁶⁻ Yang

⁷⁻ Schottky barrier

⁸⁻ Asahi

تحقیق نشان داد که بازده کلی تبدیل انرژی تا ۴۰ درصد بهبود یافته است (۲۶). علاوه بر این، گزارشها نشان دادهاند که بازده تبدیل توان برای سلول های مبتنی بر Ag-TiO2 تا حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است. لازم به ذکر است که دوپکردن نقره، علاوه بر هزینه کم، دارای تابع کاری بالاتری نسبت به سطح فرمی TiO2 است و گاف نوار آن به شکل مؤثرتری تنظیم می شود. مطالعه چانگ و همکارانش نشان داد که فوتوآند TiO2 دوپ شده با Ag نهتنها قادر به تشکیل ساختارهای متخلخل است، بلکه این ساختارها به جذب مؤثرتر مواد رنگزا کمک می کنند. بازده تبدیل توان در سلولی که از این فوتوآند استفاده شده بود، حدود ۶٫۰۶ درصد گزارش شد (۲۷). از سوی دیگر، دوپکردن TiO2 با WO3 بهدلیل توانایی آن در کاهش شکاف انرژی و گسترش محدوده جذب نور به ناحیه مرئی، بهعنوان یک روش مؤثر برای بهبود خواص فوتوولتایی شناخته شده است. ترکیب این نانوساختارها میتواند خواص نورى و الكتريكي TiO2 را بهبود دهد. بهویژه، رسوب همزمان نقره بر روی TiO₂ دوپشده با WO₃، به دلیل اثرات همافزایی میان نقره و نیمهرساناها، خواص فوتوولتایی بهبودیافتهای را نشان داده است. در حالی که تحقیقات پیشین به تأثیر دوپکردن TiO2 با WO3 و نقره بر بهبود خواص الكتريكي و نوري اشاره كردهاند، اين مطالعات عمدتاً بر کاربردهای کاتالیزوری نوری یا زمینههای دیگر پژوهش متمرکز بودهاند و استفاده از این ترکیب به طور خاص در DSSCها بررسی نشده است TiO2- این پژوهش، برای نخستین بار از نانوکامپوزیت WO3 دوپشده با Ag بهعنوان فوتوآند در DSSC استفاده شد تا تأثير آن بر كاهش نوتركيبي الكترون و افزايش بازده تبديل توان بررسي شود. بهمنظور دستیابی به این هدف، نانوکامپوزیت TiO2-WO3 همراه با مقدار مشخصی از نقره به روش هیدروترمال سنتز شد و ویژگیهای ساختاري آن با استفاده از ميكروسكوپ الكتروني روبشي (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، عملکرد سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا مورد تجزیهوتحلیل قرار گرفت و خواص فوتوولتایی بهبودیافته آن گزارش شد.

۲_ بخش تجربی

۲_۱_ مواد شیمیایی و تجهیزات

مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه از شرکت مرک خریداری شدند. این مواد شامل سدیم تنگستات دوآبه(Na2WO3·2H2O)، نیترات نقره، سدیم کلرید (NaCl)، هیدروکلریک اسید (۳۷ درصد، HCl) و اتانول (۹۹٫۸ درصد) بودند. شیشه پوشش داده شده با اکسید قلع دوپ شده (ITO)، ماده رنگزای روتنیم (TBP)، یدید پتاسیم (KI)، یدید (I2) و ۴-ترت بوتیل پیریدین (TBP) از شرکت سانلب

۲_۲_ تجهیزات

ریختشناسی سطح نمونه ابا استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM، مدل VEGA/TESCAN جمه وری چک) مورد بررسی قرار گرفت. طیف TTIR در محدوده^{۱-۲}۴۰۰۰ با استفاده از طیفسنج (FTIR، مدل Shimadzu) ثبت شد. مشخصات جریان- ولتاژ (I-V) با استفاده از شبیه ساز خورشیدی (شریف سولار) اندازه گیری شد. عملکرد سلول خورشیدی با استفاده از شبیه ساز خورشیدی مجهز شد. عملکرد سلول خورشیدی با استفاده از شبیه ساز خورشیدی مجهز قرار گرفت. مشخصه های فوتوولتایی، شامل نمودار جریان – ولتاژ (V-I)، با استفاده از یک دستگاه آنالایزر ثبت شدند. برای افزایش دقت داده ها، سه دستگاه DSSC مشابه تحت شرایط یکسان ساخته و عملکرد آن ها به طور جداگانه اندازه گیری شد. داده های مربوط به بازده تبدیل انرژی، جمع آوری شدند و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان نتایج نهایی گزارش شد.

۲_۳_ ساخت نانوکامپوزیت

ابتدا نانوساختار WO3-TiO2 به روش هیدروترمال سنتز شد. به این صورت که، سدیم تنگستات دو آبه در وزن ۰٫۳ گرم با سدیم کلرید در آب مقطر حل شد. مخلوط به مدت ۱ ساعت هم زده شد. سـپس، pH محلول با استفاده از محلول ۲ مولار هیدروکلرید اسید در ۲ تنظیم گردید. ۳,۰ گرم دی کسید تیتانیم به محلول اضافه شده و محلول مجدداً هم زده شد. پس از پراکندگی به داخل اتوکلاو فولادی ضد زنگ با یوشش تفلون ۲۵۰ میلی لیتری منتقل شد و به مـدت ۲۴ سـاعت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد نگهداری شد (کنترل دما به صورت غيرمستقيم انجام شد؛ به اين ترتيب كه اتوكلاو درون أون قرار گرفته و دمای آون از بیرون و مطابق مقدار تعیینشده تنظیم و کنترل گردید. لازم به ذکر است که کنترل pH پیش از شروع فرآیند و در مرحله آمادهسازی محلولهای اولیه انجام شد، زیرا که در طول واکنش به دلیل فشار و دمای بالا، دسترسی مستقیم به محیط داخلی راکتور امکان پذیر نبود). پس از پایان فرآیند، به اتوکلاو اجازه داده شد تا به طور طبیعی تا دمای اتاق خنک شود. نانوساختار به دست آمده سـپس با گریزانه جداسازی شد، با آب مقطر شسته شد و در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد خشک شد تا نانوکامپوزیت WO3-TiO2 به دست آید. برای ساخت نانوکامپوزیت Ag-WO3-TiO2، مقدار ۵ میلی گرم از نیترات نقره با نیمهرسانای ۲تایی TiO2-WO3 به مدت ۱ ساعت در دمای محیط و در نسبت وزنی ۵۰–۵۰ از حلال اتانول و آب همزده شد. پس از

¹⁻ Chang

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۸ (۲۰-۳۲۵)، ۳۲۵–۳۲۵

پراکندگی به داخل اتوکلاو فولادی ضد زنگ با پوشش تفلون ۲۵۰ میلیلیتری منتقل شد و به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد نگهداری شد. برای تهیه خمیر، ۴۸٫۴ درصد وزنی از نیمهرسانا، ۵٫۶ درصد وزنی پلیاتیلن گلیکول (PEG) و ۴۵ درصد وزنی اتانول با یکدیگر مخلوط شدند. این ترکیب به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد تحت همزدن قرار گرفت و نگهداری شد. سپس، برای بهبود پراکندگی ذرات و جلوگیری از تجمع آنها، ۱ درصد وزنی تریتون ۲۵۰-X به عنوان ماده سطحفعال به مخلوط اضافه شد.

۲_۴_ ساخت سلول خورشیدی

برای ساخت لایه ناز ک Ag-TiO2-WO3 ، خمیر تهیه شده با استفاده از روش دکتر بلید بر روی شیشه رسانای ITO (با عبور ۸۰ درصد نور در ناحیه مرئی) پوشش داده شد. پس از آن، فیلمهای آماده شده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. برای تهیه سلولهای خور شیدی حساس شده به مواد رنگزا، الکترودها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق در محلول رنگزای N719 غوط ور گردیدند. پس از شستوشو با اتانول بی آب و خشک شدن، الکترود ITO با پوشش پلاتین بر روی فوتوآند قرار داده شد و لبه های سلول با یک ورق آب ندی، مهر و موم شدند. شکل ۱ ساختار سلول خور شیدی را نشان می دهد.

WO3 دارای اندازه ذراتی در بازه ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر است و ذرات بهخوبی پراکنده شدهاند (شکل ۲۵). تصویر TEM از نانوذرات -Ag TiO2-WO3 در شکل ۲۵ ارائه گردیده که نشان می دهد اندازه ذرات نقره بسیار ریز است. همچنین مشاهده می شود که نانوذرات نقره درون TiO2-WO3 برهم کنش دارند، به طوری که بیشتر نانوذرات نقره درون TiO2-WO3 قرار گرفته و تعداد کمی از آنها در اطراف EDS) نمونه-Ag TiO2-WO3 قرار گرفته و تعداد کمی از آنها در اطراف EDS) نمونه-Ag توزیع شدهاند. نتایج طیف سنجی پراکندگی انرژی (EDS) نمونه-Ag TiO2-WO3 می در نمونه توزیع شدهاند. نتایج عنصر ناخالصی دیگری شناسایی نشده است (شکل ۲۰, d مکانهای بار فراهم می کنند.



Figure 1: Dye-sensitized solar cell based on Ag-TiO₂-WO₃ thin film.

1- Polyethylene glycol

2- Doctor Blade Technique

۳_ بحث و نتایج

۳_۱_ ریختشناسی نانوساختار

ریخت نانوساختار Ag-TiO₂-WO3 در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در تصویر SEM مشاهده می شود، نمونیه -Ag-TiO2





EDS تصوير (b ، Ag-TiO₂-WO₃ نانوساختار SEM تصوير (b ، Ag-TiO₂-WO₃ تصوير) آناليز (a : **۴ شکل ۲**: a) SEM image of Ag-TiO₂-WO₃ nanostructure, b) TEM image, c and d) EDS analysis.

Ag-TiO2- ریختشناسی ITO پوشش داده شده با خمیر -MO3 WO3

شکل ۳ (c-a) جزئیات سطح لایه پوشش دادهشده با Ag-TiO₂-WO₃ را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایش می دهند. شکل ۳ ۳ در مقیاس ۲ میکرومتر، گویای ساختار دانهای و متخلخل است که ذرات با پراکندگی نسبتاً یکنواخت روی سطح قرار گرفتهاند و این موضوع سبب افزایش سطح ویژهی پوشش می شود. در شکل d ۳ با بزرگنمایی بالاتر (۱ میکرومتر)، جزئیات بیشتری از ذرات قابل مشاهده است؛ به طوری که این ذرات عمدتاً به شکل کروی و بدون ترک یا تجمع غیرعادی ظاهر شدهاند که نشان دهنده پیوستگی و کیفیت مناسب پوشش است. همچنین شکل c ۳ با بزرگنمایی پایین تر (۵۰ میکرومتر) توزیع وسیعتر و یکنواختی مطلوب سطح پوشش را نشان

میدهد و نبود نواحی خالی یا تجمعات ناخواسته را تأیید میکند که حاکی از موفقیت فرآیند لایهنشانی بر بستر ITO است. علاوه بر این، تحلیل EDS در شکل ۶ (c-h) توزیع عناصر اصلی یعنی تیتانیم، تنگستن و نقره را بر روی سطح نشان میدهد. جدول ارائه شده در میکند. طبق دادههای این جدول، اکسیژن و تیتانیم بیشترین سهم را دارند و تنگستن و نقره نیز بهترتیب با مقدار کمتر در ساختار حضور دارند. بر اساس ترکیب این شواهد تصویری و تحلیلی، میتوان نتیجه داده و تمام عناصر هدف با پراکندگی یکنواخت و کیفیت مطلوب در ساختار نهایی حضور دارند.



شکل ۳: (a-c) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنماییهای مختلف، (d-f) آزمون طیفسنجیEDS برای تیتانیم، تنگستن، g) ترکیب همزمان عناصر اصلی در لایه و h) جدول درصد وزنی و اتمی عناصر.

Figure 3: (a-c) Scanning electron microscopy (SEM) images at different magnifications; (d-f) EDS elemental analysis for titanium and tungsten; (g) combined elemental mapping of the main components in the layer; and (h) table of elemental weight and atomic percentages.

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۸ (۱٤۰۳)٤، ۳۳۵–۳۲۵

FTIR _____

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای شناسایی گروههای عاملی نانوذرات TiO₂ وWO₃ وTiO₂-WO دوپ شده با Ag، از FTIR استفاده شد. در نمونههای حاوی TiO (منحنی مشکی) و نانوساختار سهتایی(منحنی آبی)، قلههایی در محدوده خمشی پیوند FO ۲۱ نسبت داده می شود که به ارتعاشات کششی و نمونه ها دارای نوارهایی از آب و گروه های هیدروکسیل در حدود می شود (۳۲). همچنین، تمامی می شود (۳۲). طیف FT-IT نمایانگر حضور قلهای در ¹⁻۲۰۰ مست داده می شود (۳۲). طیف FT-IT نمایانگر حضور قلهای در ¹⁻ می شود (۳۲). طیف TI-IF نمایانگر حضور قلهای در ¹⁻ می شود (۳۲). طیف TI-IF نمایانگر حضور قلهای در ¹⁻ می شود (۳۲). طیف TI-IF نمایانگر حضور قلهای در ¹⁻ می شود (۳۲). طیف TI-IF نمایانگر حضور قلهای در ¹⁻ می شود (۵۲). جالب توجه است که این قله، همراه با قله جذب منحنی قرمز) (۳۵). جالب توجه است که این قله، همراه با قله جذب بیانگر ترکیب موفق WO



۳_۴_ خواص فو توولتا يی

به منظور ارزیابی شاخصهای عملکرد DSSC، آزمون V-L انجام شد (شکل a ۵). برای مقایسه، سلولهای خورشیدی مبتنی بر TiO2، WO3 و همچنین نمونه خالص TiO2-WO3 ساخته و مورد بررسی قرار گرفتند. شدت نور شبیهساز خورشیدی با استفاده از یک سلول AM-1.5 میلیکونی برای دستیابی به شرایط استاندارد AM-1.5 تنظیم شد. شدت نور ورودی برابر با ۱۰۰ میلیوات بر سانتیمتر مربع (معادل یک نور خورشید) و مساحت فعال سلولها ۲٫۰۵ سانتیمتر مربع در نظر گرفته شد. همان طور که از چهار منحنی متمایز در نتایج آزمون V-L مشخص است، سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا عملکرد ثابتی را از خود نشان میدهد. عوامل کلیدی عملکرد سلولهای خورشیدی، مانند چگالی جریان اتصال کوتاه (Jsc)

و ولتاژ مدار باز (Voc)، مستقیماً از منحنیهای جریان- ولتاژ قابل استخراج هستند. با استفاده از این دادهها، ضریب پرشدگی (FF) و بازده تبدیل انرژی (PCE) یا (η) نیز محاسبه میشوند. بازده PCE از طریق محاسباتی بر اساس مشخصات IV سلول تعیین می شود:

$$PCE = \frac{J_{sc} \times V_{OC} \times FF}{P_{in}} \tag{1}$$

در رابطه ۲، Jsc پکالی جریان اتصال کوتاه، کoC ولتاژ مدار باز، توان نور تابشی، و FF ضریب پرکنندگی است که با رابطه Jmax و Vmax) / (Jsc \times Voc) حاسبه میشود. (Jmax \times Vmax) / (Jsc \times Voc) حداکثر ولتاژ و حداکثر چگالی جریان هستند).

برای تسهیل تجزیه و تحلیل مقایسهای جامع، این عوامل عملکردی در جدول ۱ خلاصه شدهاند. دادههای جدول به وضوح نشان می دهد که مقادیر Jsc و Voc و WO3 و WO3 و Ag بهبود یافته و منجر به افزایش PCE می شود. بالاترین چگالی جریان برابر با ۱۳٬۶۳ mA/cm² و ولتاژ مدار باز معادل ۳۷ ۹۳۰، با استفاده از فوتوآند ITO/Ag-TiO2-WO3 به دست آمد. شایان ذکر است که بهترین عوامل عملکردی، شامل بازده ۶٬۸۷ درصد و ضریب پرشدگی ۶۳٬۵۴ درصد برای TiO2 اصلاحشده با WO3 و Ag حاصل شده است؛ این در حالی است که این مقادیر برای فوتوآندهای TiO2-WO3 (۵٫۶۳ درصد)، TiO₂ درصد) و WO₃ و NIV۱) TiO₂ درصد) کمتر بودهاند. نتایج بهدستآمده نشان دهنده افزایش قابل توجه در Jsc است که در درجه اول به اثرات همافزایی Ag و کامپوزیت TiO₂-WO₃ نسبت داده می شود. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، افزودن WO3 اثرات مثبتی بر پارامترهای Jsc ،Voc و PCE دارد. افزودن Ag به پراکندگی یکنواخت تر نانوذرات TiO2-WO3 کمک می کند که منجر به افزایش جذب ماده رنگزا می شود که در نهایت منجر به بهبود Jsc و PCE می شود.

شکل b ۵، نمودار بازده تبدیل فوتون به جریان (IPCE) را برای سلولهای خورشیدی حساسشده به ماده رنگزا، با انواع مختلف فوتوآندهای مورد مطالعه نشان میدهد. این نتایج بیانگر عملکرد برتر سلولهای خورشیدی با فوتواند Ag-TiO2-WO3 در تبدیل فوتون به جریان است. در مقایسه با سایر فوتوآندهای بررسیشده، از جمله ماولهای خورشیدی با WO3 خالص و ترکیب TiO2-WO3، افزودن نقره به TiO2 خالص، WO3 خالص و ترکیب TiO2-WO3، افزودن نقره به ساختار فوتوآند، موجب افزایش بازده و بهبود پاسخ فوتون به جریان ماختار فوتوآند، موجب افزایش بازده و بهبود پاسخ فوتون به جریان Ag- ساختار فوتوآند، موجب افزایش بازده و بهبود پاسخ فوتون به جریان TiO2-WO3 خالص ۴۵ ماختار فوتوآند، موجب افزایش بازده و بهبود قارای فوتواند -Ag شده است. بهطور مشخص، سلول خورشیدی دارای فوتواند -Ag شده است. بهطور مشخص، معادل ۷۱ درصد دست یافته است که شده است. این مقدار برای TiO2 خالص ۴۳ از تمامی ترکیبات دیگر برتر است. این مقدار برای TiO2 خالص ۴۳ درصد و برای TiO2-WO3 معادل ۷۱ درصد دوده است. این بهبود قابل توجه نشان دهنده تأثیر مستقیم نقره بر افزایش جذب نور و تبدیل آن به جریان الکتریکی است.

Samples	Voc (V)	Jsc (mA.cm ⁻²)	FF (%)	PCE (%)
TiO ₂	0.72	6.753	65.24	3.171
WO ₃	0.53	3.175	52.45	0.93
TiO ₂ -WO ₃	0.9	8.951	68	5.631
Ag-TiO ₂ -WO ₃	0.93	13.63	63.54	6.87

جدول ۱: بازده سلول خورشیدی ساخته شده از WO₃ ،TiO₂ و نانوکامپوزیتهای Ag-TiO₂-WO₃ ،TiO₂-WO₃ ،TiO₂-WO₃ . **Table 1:** Efficiency of solar cells TiO₂ WO₂ and TiO₂-WO₂ Ag-TiO₂-WO₂ nanocomposites



شکل ۵: a) خصوصیات فوتوولتایی فتوآندهای خالص TiO₂-WO₃ ،WO₃ ،TiO₂ و ترکیب سهتایی BAg-TiO₂-WO₃) نمودار IPCE سلولهای خورشیدی. Figure 5: a) Photovoltaic properties of pure TiO₂, WO₃, TiO₂-WO₃ and Ag-TiO₂-WO₃ ternary composite photoanodes, b) IPCE of solar cells.

کمک می کند. هنگام تماس TiO2-WO3 با فلز، هر دو تحت یک تعادل سطح فرمی با یکدیگر قرار می گیرند که در نتیجه یک سد شاتکی تشکیل می شود و بنابراین منجر به تجمع تعداد زیادی الکترون در سطح نانوذرات فلز مي شود (٢٩). اين تجمع الكترون ها روى نانوذرات نقره موقعیت سطح فرمی را به نوار رسانایی TiO₂ و WO3 نزدیکتر مى كند. سد شاتكى كـه بـين نـانوذرات فلـزى و نيمهرسـاناها تشـكيل می شود به الکترون ها کمک می کند تا از فلز به نوار رسانش نیمه رساناها جريان يابند. با انتقال الكترون ها به نوار رسانش TiO₂ و WO₃، الکترونهای برانگیخته شده از ماده رنگزای N719 مجدداً شروع به تجمع بر سطح فلز می کنند. همچنین، تشکیل سد شاتکی در سطح مشترك فلز و نيمه رسانا مي تواند به عنوان يك چاه الكتروني عمل كرده و از فرآیند بازترکیب الکترون- حفره جلوگیری نماید (۲۸). لازم به ذکر است که موقعیت نوار ظرفیت^۱(VB) اکسید تنگستن در مقایسه با اکسید تیتانیم پایین تر است. به همین دلیل، حفرههای ایجاد شده در نوار ظرفيت WO3، ترجيحاً به سمت نوار ظرفيت TiO2 حركت مي كنند. این جابه جایی حامل های بار در نانو کامپوزیت های TiO₂-WO₃ باعث کاهش احتمال بازترکیب الکترونها و حفرههای نوری می شود (۳۰).

عملکرد سلول خورشیدی مبتنی بر فوتوالکترود Ag-TiO₂-WO₃ در زیر تابش نور در شکل ۶ نشان داده شده است. هنگام تابش نور، ماده رنگزا، نور فرودی را جذب کرده و الکترونها را به حالت برانگیخته انتقال میدهد. الکترونهای برانگیخته به نوار رسانش نانوذرات TiO2 تزریق می شوند. الکترون ها پس از تحریک، به دلیل پایین تر بودن سطح انرژی نوار رسانش WO3 نسبت به TiO2 ، به نوار رسانایی WO3منتقل می شوند. گاف نوار کوچک تر WO3 منجر به ایجاد اثر فوتوولتایی در TiO2 با گاف نوار بزرگتر می شود (۱۱). این فرایند منجر به بهبود جداسازی بار و گسترش بازه طیف نوری قابل استفاده در دستگاههای فوتوولتایی می شود. پس از این مرحله، ماده رنگزا با دریافت الکترون از الكتروليت، توسط سامانه اكسايش كاهش احيا شده و آماده استفاده مجدد خواهد شد. الکترولیت نیز توسط الکترونهای برگشتی از مدار خارجی، از طریق الکترود پلاتینی بازسازی می گردد. در مطالعه ما، فلز رسوب داده شده بر سطح TiO2-WO3 به عنوان یک عامل پراکندگی نور پلاسمونی عمل می کند (۱۹). این فلز باعث می شود نور به طور موثری در سیستم به دام بیفتد و در مجاورت نزدیک با مولکول های رنگزا، میدان الکترومغناطیسی قویتری ایجاد کند که به جذب بهتر نور

۳_۵_ عملکرد نانوکامپوزیت در سلول خورشیدی

¹⁻ Valance band



شکل ۶: مکانیسم ساختاری کامپوزیت Ag- TiO₂-WO₃ در سلول خورشیدی. Figure 6: Structural mechanism of Ag-TiO₂-WO₃ composite in solar cell.

۴_ نتیجه گیری

Ag- مار نشان داد که به کارگیری نانو کامپوزیت سه گانه -Ag TiO2-WO3 به عنوان فوتوآند در سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، موجب بهبود قابل توجه عملکرد این سلول ها می شود. نتایج حاصل از آزمون های ساختاری و شیمیایی حضور موفق نرکیبات TiO2، WO3 و نقره را در ساختار نهایی تأیید کرد. مقایسه نمونه های دوگانه و سه گانه بیانگر آن است که افزودن نانوذرات نقره به ترکیب TiO2-WO3 نقش مهمی در کاهش بازترکیب بارهای الکتریکی ایفا می کند؛ زیرا نقره علاوه بر افزایش جذب نور، با ایجاد مراکز به دام اندازی الکترون، جابجایی حامل های بار را تسهیل مراکز به دام اندازی الکترون، جابجایی حامل های بار را تسهیل از بازترکیب، موجب افزایش کارایی تبدیل انرژی شده است. مجموع این عوامل منجر به افزایش چگالی جریان تا ۳۰٫۶۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و ارتقای ولتاژ مدار باز سلول تا ۳۰٫۶ ولت گردید، به

طوری که بازده تبدیل انرژی به ۶٬۸۷ درصد رسید. این میزان بازده نسبت به ساختارهای دیگر، افزایش چشم گیری را نشان میدهد و بر اهمیت بهینهسازی ترکیب و مهندسی ساختار فوتوآند در توسعه سلولهای خورشیدی حساسشده به مواد رنگزا تأکید دارد. بر این اساس، استفاده از نانوکامپوزیت Ag-TiO₂-WO₃ به عنوان روشی مؤثر برای ارتقای بازده DSSC پیشنهاد می شود.

تشكر و قدرداني

نویسندگان با کمال احترام از دانشگاه گیلان و پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران بهخاطر حمایتهای ارزشمند و مساعدتهای علمی در این پژوهش، قدردانی میکنند.

> تعارض منافع هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۵_ مراجع

- Korir BK., Kibet JK, Ngari SM, A review on the current status of dye-sensitized solar cells: Toward sustainable energy. Eng Sci Eng. 2024; 12(8):3188-3226. https://doi.org/ 10.1002/ese3.1815.
- Falahdoost Moghadam S, Ahmadi K, Abdolahzade Ziabari A, Novin Vajari S, Omidtabrizi F. The effect of foamed cement

nanocomposite as counter electrode on the performance of dye-sensitized solar cell. Inter J App Ceramic Technol. 2023; 20(6): 3596-3607. https://doi.org/10.1111/ijac.14450.

 Rahmatian M, Sayyaadi H, A systematic review of a photoelectrical innovation: dye-sensitized solar cells. Int J Amb Energ. 2024;45(1):2366538. https://doi.org/10.1080/ 01430750.2024.2366538.

- Hoseinnezhad M, Qaranjig M, Qahari M, Fathi M. Investigation of the effect of semiconductor and counter electrode on the efficiency of dye-sensitized solar cells. J Color Sci Tech. 2024;18(3):181-190. https://doi.org/10. 30509/jcst.2024.167373.1238 [In Persian].
- Lim SP, Pandikumar A, Lim HN, Ramaraj R, Boosting photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells using silver nanoparticle-decorated N, S-Co-doped-TiO₂ photoanode. Sci Rep. 2015.5(1):11922. http://dx.doi.org/ 10.1038/srep11922.
- Gilani N, Fallahdoost Moghadam S, Yousefi AA. Investigating the Performance of the Graphene-WO₃-TiO₂ Ternary Composite in Dye-Sensitized Solar Cells. Iran J Chem Eng. 2024;20(4):13-26. https://doi.org/10.22034/ ijche. 2024.434847.1512.
- Irannajad Parizi A, Janghorbani K. Fabrication of dyesensitized solar cells based on TiO₂-ZnO core shell nanorod electrodes and investigation of the effect of TiO₂ layer thickness on cell efficiency. J Metall Eng. 2012, 11–26. https://civilica.com/doc/200883. [In Persian]
- Ismail M, Olivier C, Toupance T. Hybrid WO₃-nanorods/TiO₂ photoanodes for improved dye-sensitized solar cells performances under back illumination. J Mate Sci: Mat Elec. 2023;34(11):936.http://dx.doi.org/10.1007/s10854-023-10335 -8.
- Memari M. Memarian N, Designed structure of bilayer TiO₂– Nb₂O₅ photoanode for increasing the performance of dyesensitized solar cells. J Mat Sci: Mat Elec. 2020; 31(3): 2298-2307. https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-019-02762-3.
- 10.Kavan L, Vlckova Zivcova Z, Zlamalova M, Zakeeruddin SN, Grätze M. Electron-selective layers for dye-sensitized solar cells based on TiO₂ and SnO₂. J Phys Chem C. 2020; 124(12): 6512-6521. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b11883.
- 11.Yong SM. One-dimensional WO₃ nanorods as photoelectrodes for dye-sensitized solar cells. J Allo Comp. 2013; 547:113-117. http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2012. 08.124.
- 12. Younas M. Fabrication of cost effective and efficient dye sensitized solar cells with WO₃-TiO₂ nanocomposites as photoanode and MWCNT as Pt-free counter electrode. Ceram Int. 2019;45(10):936-947. https://doi.org/10.1016/j.ceramint. 2018.09.269.
- 13.Cheng P, Deng Ch, Dai Xi, Li B, Liu D, Xu J. Enhanced energy conversion efficiency of TiO₂ electrode modified with WO₃ in dye-sensitized solar cells. J Photochemistry Phot A: Chem. 2008;195(1):144-150. https://doi.org/10.1016/j. jphotochem.2007.09.016.
- 14.Prabhu N. Enhanced photovoltaic performance of WO₃ nanoparticles added dye sensitized solar cells. J Mat Sci: Mat Elect. 2014; 25: 5288-5295. http://dx.doi.org/10.1007/s10854-014-2303-6.
- 15. Yang J.H, Kim K H, Bark Ch. Synthesis and characterization of WO₃ doped TiO₂ particle/nanowire layer in dye-sensitized solar cells. Mole Crys Liq Crys. 2014. 598(1):32-39. http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2014.933295.
- 16.Shabani L, Enhancement of dye-sensitized solar cell efficiency using plasmonic gold nanocrystals coated with TiO₂ anMohammadi A, Jalali T. d SiO₂. Res Chem Nano. 2023, 8(74):34–41. https://www.magiran.com/p2725275.[In Persain]
- 17.Ramadhani DAK, Sholeha N, Khusna NN. Ag-doped TiO₂ as photoanode for high performance dye sensitized solar cells.

Mat Sci Ene Tech. 2024;7:274-281. https://doi.org/10. 1016/j.mset.2024.02.002.

- 18.Rohollah Amininejad H, Hoseinzadeh H. Optimization of plasmonic dye-sensitized solar cells using control of the Au/TiO₂ mass ratio and optimization of cell photoanode configuration. 2022,12(3),114–121.2501371[In Persian].
- 19.Uthiravel V, Narayanamurthi K, Raja V. Anandhabasker S, Kuppusamy K, Green synthesis and characterization of TiO₂ and Ag-doped TiO₂ nanoparticles for photocatalytic and antimicrobial applications. Inorg Chem Comm, 2024;170: 113327. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113327.
- 20.Samuel O. Visible light-driven TiO₂-WO₃@GO photocatalyst with catalytic memory for round-the-clock photocatalytic degradation of oilfield-produced water. Ceram Int. 2024;50(11):18205-18219. https://doi.org/10.1016/j. ceramint. 2024.02.305.
- 21.Lokman MQ, Shafie Sh, Shaban S, Ahmad F. Enhancing photocurrent performance based on photoanode thickness and surface plasmon resonance using Ag-TiO₂ nanocomposites in dye-sensitized solar cells. Mater. 2019. 12(13):2111. https://doi.org/10.3390/ma12132111.
- 22.Wu, WY, Sun B, Tao B,Wang W, Chu PK. Ag–TiO₂ composite photoelectrode for dye-sensitized solar cell .App Phys A. 2017;123:1-8. https://doi.org/10.1016/j. jmrt.2022.07. 134.
- 23.Kandasamy M, Selvaraj F. Plasmonic Ag nanoparticles anchored ethylenediamine modified TiO₂ nanowires@ graphene oxide composites for dye-sensitized solar cell. J Alloys Compd. 2022;902:163743. https://doi.org/10.1016/j. jallcom. 2022.163743.
- 24.Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T, Aoki K, Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides. Sci. 2001; 293(5528):269-271. https://doi.org/10.1126/science. 1061051.
- 25.Kazmi SA. Electrical and optical properties of graphene-TiO₂ nanocomposite and its applications in dye sensitized solar cells (DSSC). J Alloys Compd. 2017;691:659-665. http://dx. doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.319.
- 26.Gupta AK, Srivastava S, Bahadur L. Improved performance of Ag-doped TiO₂ synthesized by modified sol–gel method as photoanode of dye-sensitized solar cell. App Phys A. 2016; 122:1-13. https://doi.org/10.1007/ s00339-016-0241-2.
- 27.Chang H. Effect of Core-Shell Ag@ TiO₂ Volume Ratio on Characteristics of TiO₂-Based DSSCs. J Nanomater. 2014; 2014(1):264108. http://dx.doi.org/10.1155/2014/264108.
- 28.Basumatary B, Basumatary R. Evaluation of Ag@ TiO₂/WO₃ heterojunction photocatalyst for enhanced photocatalytic activity towards methylene blue degradation. Chem. 2022; 286:131848. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021. 131848.
- 29.Li Y, Guangyuan H, Guilin D, Keyan W, Dequan Z, Ag/TiO₂/WO₃ nanoparticles with efficient visible light photocatalytic activity. Optoelectronics Lett. 2022; 18(1): 1-5. http://dx.doi.org/10.1007/s11801-022-1077-y.
- 30.Abbaspoor M, Aliannezhadi M, Tehrani FS. Highperformance photocatalytic WO₃ nanoparticles for treatment of acidic wastewater. J Sol-Gel Sci Tech. 2023.105(2):565-576. http://dx.doi.org/10.1007/s10971-022-06002-9.
- 31.Bagheri S, Shameli K, Abd Hamid DB. Synthesis and characterization of anatase titanium dioxide nanoparticles using egg white solution via sol-gel method. J Chem. 2013; 2013(1):848205. https://doi.org/10.1155/2013/848205.
- 32.Chandore V, Savant N, Synthesis of nano crystalline ZnO by microwave assisted combustion method: An eco friendly and solvent free route. Int J Environ. Sci Dev Monit. 2013;4(2).

jcst.2025.167479.1252 [In Persian].

https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.10.112. 33.Hariri A, Gilani N, Pasikhani J, Promoting the photo-induced charge separation and photoelectrocatalytic hydrogen generation. Z-scheme configuration of WO₃ quantum How to cite this article: Fallahdoust Moghadam S, Gilani N, Yousefi AA. Effect of Silver on Enhancing the Performance of TiO₂-WO₃ Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells. J Color Sci Tech. 2025;18(4):325-335. https://doi.org/10.30509/

نشریه علمی علوم و فناو*ری ر*نگ/ ۱۸ (۳۲۵–۳۲۵