Journal of Ilam University of Medical Sciences
P-ISSN: 1563-4728
E-ISSN: 2588-3135

Synthesis of a Novel SnS2/ZrO2 Nanocomposite for the Degradation of Organic Pollutants in Water under Visible Light Irradiation

Marjan Tanzifi [1*], Hadis Saraee [1], Naimeh Setareshenas [1], Manouchehr Mansouri [1]

[1] Dept of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:
Received: Jun. 13, 2026
Received in revised form: Jul. 28, 2026
Accepted: Sep. 08, 2026
Published Online: Nov. 26, 2026

**** Correspondence to:***
Marjan Tanzifi
Dept of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

Email:
m.tanzifi@ilam.ac.ir

A B S T R A C T

Introduction: Organic pollutants in aquatic environments have become a major environmental concern, and the use of efficient photocatalysts for their degradation has attracted considerable attention. In this regard, designing semiconductor nanocomposites with strong visible light absorption and effective charge carrier separation is of great importance.

Materials & Methods: Tin disulfide (SnS_2), zirconium dioxide (ZrO_2), and SnS_2/ZrO_2 nanocomposite were synthesized by the hydrothermal method. The structural, morphological, and optical properties of the samples were investigated by XRD, FESEM, TEM, EDX, DRS, and PL. The photocatalytic activity of the nanocomposite for methylene blue degradation under visible light irradiation was investigated by changing the photocatalyst dosage, lamp power, and initial solution concentration.

Results: The phases were successfully formed as evidenced by the XRD results. The FESEM images showed the nanostar-like morphology of ZrO_2. TEM analysis showed the formation of SnS_2 quantum dots and the nanocomposite structure. The optical studies revealed that the nanocomposite has improved visible-light absorption, red-shifted the absorption edge, and decreased the band gap from 2.24 to 2.11 eV. The reduced PL intensity confirmed the inhibited electron-hole recombination and improved charge carrier separation. Under optimum conditions (0.2 g/L photocatalyst, 150 W lamp power, and 10 mg/L concentration), the dye degradation was 93.53%, and the catalyst was stable over five cycles.

Conclusion: Active species trapping experiments showed that superoxide radicals, hydroxyl radicals, and positive holes play the main role in the degradation process. The effective interaction between SnS_2 and ZrO_2 improved charge transfer and enhanced photocatalytic activity, making the synthesized nanocomposite a promising candidate for the removal of organic pollutants from aqueous environments.

Keywords: SnS_2, ZrO_2, Nanocomposite, Organic Pollutant, Visible Light

Cite this paper: Tanzifi M, Saraee H, Setareshenas N, Mansouri M. Synthesis of a Novel SnS2/ZrO2 Nanocomposite for the Degradation of Organic Pollutants in Water under Visible Light Irradiation. *Journal of Ilam University of Medical Sciences*. 2026;34(5):122-139.

Introduction

With the growth of population and industrialization, the discharge of dye-containing wastewater has increased to a great extent, which seriously threatens the aquatic ecosystem and human health. In this context, photocatalysis has been recognized as a green, efficient, and cost-effective method for the degradation of organic pollutants (1). Various photocatalysts, metal sulfides, have narrower bandgaps and higher conduction band reduction potentials than metal oxides with S 3p hybridized valence bands. Tin disulfide (SnS_2) has been of great interest, especially due to its narrow bandgap, excellent response to visible light, easy synthesis, low cost, and low toxicity. However, pristine SnS_2 has limited oxidation capability due to its high position of the valence band and quick recombination of the photoinduced electron-hole pairs (2, 3). The rapid development of nanotechnology has made the design of nanostructures with controlled morphologies a powerful approach to optimize surface area, light absorption, and charge-transfer dynamics. Although quantum dots (QDs) have high specific surface areas and tunable bandgaps, agglomeration hinders their practical applications. The combination of these nanostructures with wide bandgap semiconductors prevents aggregation and provides active contact interfaces and facilitates charge separation. In this

© The Author(s)
Publisher: Ilam University of Medical Sciences

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

regard, the coupling of SnS_2 quantum dots with stable metal oxides such as ZrO_2, an n-type semiconductor with good thermal/chemical stability and suitable band positions, is an effective heterojunction strategy for enhancing interfacial charge transfer (4, 5). In the current work, a novel SnS_2/ZrO_2 nanocomposite was successfully synthesized for the synergistic improvement of visible-light-driven photocatalytic performance. The as-synthesized photocatalyst was thoroughly characterized for its structural, morphological, and optical properties. The catalytic activity was evaluated by degradation of methylene blue (MB) under visible-light irradiation. Moreover, active species trapping experiments and the plausible charge-transfer mechanism were studied to provide in-depth insights into the degradation pathway.

Methods

All analytical-grade reagents, including $ZrOCl_{2.8}H_2O$, CH_3COONa, $SnCl_4 \cdot 5H_2O$, thioacetamide, methylene blue, and scavenging agents (BQ, EDTA, and IPA), were purchased and used as received. Star-like ZrO_2 nanostructures were synthesized via a hydrothermal method by dissolving $ZrOCl_2.8H_2O$ and CH_3COONa in distilled water, followed by heating in a Teflon-lined autoclave at 240°C for 6 h. The SnS_2/ZrO_2 nanocomposite was subsequently prepared through a facile hydrothermal route: pre-dispersed ZrO_2 nano-stars were mixed with $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ and thioacetamide precursors, and the resulting mixture was heated at 160°C for 14 h. Pristine SnS_2 was synthesized under identical conditions without the ZrO_2 addition. The structural, morphological, optical, and elemental properties of the samples were characterized using XRD, FESEM, TEM, EDX-mapping, DRS, and PL spectroscopy. The photocatalytic activity was evaluated by monitoring the degradation of MB aqueous solution under visible-light irradiation (LED lamp). Prior to illumination, the suspension was magnetically stirred in the dark to establish adsorption-desorption equilibrium. At designated time intervals, aliquots were sampled, centrifuged, and analyzed using a UV–vis spectrophotometer. Active species trapping experiments using BQ, IPA, and EDTA were conducted to identify the primary reactive radicals and holes governing the photocatalytic pathway, and recyclability tests were performed over five consecutive cycles.

Results

XRD analysis revealed that the dominant phase in SnS_2 is hexagonal and that in ZrO_2 it is monoclinic, with the characteristic reflections of both phases present in the nanocomposite, confirming successful formation of the hybrid. TEM images showed quantum-dot-like SnS_2 particles, while FESEM and TEM imaging confirmed the star-like morphology of ZrO_2. . EDX mapping verified the presence of all constituent elements within the nanocomposite. Compared with pristine SnS_2, the nanocomposite exhibited enhanced absorption intensity and a red shift at the absorption edge, which were attributed to the synergistic effect of the components, improved charge-carrier separation, and enhanced photocatalytic activity. The bandgap of the nanocomposite was also reduced relative to SnS_2. The marked decrease in PL emission intensity confirmed a lower recombination rate of the photoinduced electron-hole pairs in the nanocomposite. Photocatalytic performance was evaluated through methylene blue degradation under visible-light irradiation by varying the catalyst dosage, lamp power, and dye concentration. The optimum values were found to be 0.2 g/L, 150 W, and 10 mg/L, respectively. Recyclability was assessed over five consecutive cycles, with degradation efficiency remaining above 85% in every cycle. The charge-transfer mechanism was assigned to electron transfer from the SnS_2 conduction band to the ZrO_2 conduction band, and dye degradation proceeded sequentially via superoxide radicals, hydroxyl radicals, and photogenerated holes, in agreement with the active-species trapping experiments.

Conclusion

The synthesized SnS_2/ZrO_2 nanocomposite achieved 93.53% methylene blue degradation under optimal visible-light conditions and maintained over 85% efficiency after five cycles. Enhanced visible-light absorption and reduced electron-hole recombination contributed to its performance. Scavenging tests identified it as the dominant active species, followed by and. These findings highlight the nanocomposite's potential for photocatalytic wastewater treatment.

Authors' Contribution

Conceptualization, Methodology, Validation: HS, Formal Analysis, Investigation, Resources, Software: NS, Data Curation: MM, Writing–Original Draft Preparation, Writing–Review & Editing, Visualization, Supervision, Project Administration: MT.

Ethical Statement

This study involved laboratory-based synthesis

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

and characterization of materials and evaluation of the photocatalytic performance of the SnS_2/ZrO_2 nanocomposite for the degradation of organic pollutants in water. No human participants or animals were involved in this research; therefore, ethical approval from a human or animal research ethics committee and informed consent were not applicable. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest or competing financial relationships.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Acknowledgment

The authors would like to express gratitude to all researchers whose scholarly works contributed to the theoretical and empirical foundations of this study.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

مجله دانشگاه علوم پزشکی ایلام

شاپای چاپی : ۱۵۶۳-۴۷۲۸

شاپای الکترونیک : ۲۵۸۸-۳۱۳۵

سنتز نانوکامپوزیت جدید SnS2/ZrO2 برای تخریب آلایندهٔ آلی در آب تحت تابش نور مرئی

مرجان تنظیفی [1*]، حدیث سارایی [1]، نعیمه ستاره شناس [1]، منوچهر منصوری [1]

[1] گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۹/۰۵

نویسنده مسئول:
مرجان تنظیفی
گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

Email:
m.tanzifi@ilam.ac.ir

چکیده

مقدمه: آلودگی‌های آلی در منابع آبی به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی تبدیل است و استفاده از فتوکاتالیست‌های کارآمد برای تخریب این آلاینده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. بدین‌منظور، طراحی نانوکامپوزیت‌های نیمه‌رسانا با قابلیت جذب نور مرئی و جداسازی مؤثر حامل‌های بار اهمیت فراوانی دارد.

مواد و روش‌ها: نیمه‌رساناهای دی‌سولفید قلع (SnS_2)، دی‌اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) و نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 به روش هیدروترمال سنتز شدند. ویژگی‌های ساختاری، مورفولوژیکی و نوری نمونه‌ها با XRD، FESEM، TEM، EDX، DRS و PL بررسی گردید. کارایی فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت در حذف متیلن بلو تحت نور مرئی با تغییر مقدار فتوکاتالیست، توان لامپ و غلظت اولیه ارزیابی شد.

یافته‌های پژوهش: نتایج XRD تشکیل موفق فازها را تأیید کرد. تصاویر FESEM مورفولوژی نانوستاره‌ای ZrO_2 و آنالیز TEM تشکیل نقاط کوانتومی SnS_2 و ساخت نانوکامپوزیت را نشان دادند. بررسی‌های نوری نشان داد، نانوکامپوزیت با افزایش جذب مرئی، شیفت قرمز لبهٔ جذب و کاهش شکاف نواری از ۲/۲۴ به ۲/۱۱ الکترون‌ولت همراه است. افت شدت PL بیان‌کنندهٔ مهار بازترکیب الکترون–حفره و بهبود جداسازی حامل‌های بار بود. در شرایط بهینه (۰/۲ گرم بر لیتر فتوکاتالیست، توان لامپ ۱۵۰ وات و غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر)، تخریب رنگ به ۹۳/۵۳ درصد رسید و کاتالیست در پنج چرخه پایدار ماند.

بحث و نتیجه‌گیری: آزمون‌های به‌دام‌اندازی گونه‌های فعال نشان داد، رادیکال‌های سوپراکسید، هیدروکسیل و حفرات مثبت نقش اصلی در فرایند تخریب دارند. برهمکنش مؤثر بین SnS_2 و ZrO_2 موجب بهبود انتقال بار و افزایش فعالیت فتوکاتالیستی می‌شود و نانوکامپوزیت سنتزشده را به گزینه‌ای مناسب برای تصفیهٔ آلاینده‌های آلی در محیط‌های آبی تبدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دی‌سولفید قلع، دی‌اکسید زیرکونیوم، نانوکامپوزیت، آلایندهٔ آلی، نور مرئی

استناد: نظیفی مرجان، سارایی حدیث، ستاره شناس نعیمه، منصوری منوچهر. سنتز نانوکامپوزیت جدید SnS2/ZrO2 برای تخریب آلایندهٔ آلی در آب تحت تابش نور مرئی. *مجله دانشگاه علوم پزشکی ایلام*، آذر ۱۴۰۵؛ (۵)۳۴: ۱۳۹-۱۲۲.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

حق‌مؤلف © نویسندگان

مقدمه

رشد جمعیت و صنعتی شدن جهان به افزایش تخلیهٔ پساب‌های حاوی آلاینده‌های آلی، به‌ویژه رنگ‌های صنعتی، به محیط‌زیست منجر شده است. سالانه حدود ۳۰ درصد از ۷۰۰ هزار تن رنگ مصنوعی تولیدی در جهان به منابع آبی رها می‌شود که تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم است (۲، ۱)؛ ازاین‌رو، کنترل و تصفیهٔ این آلاینده‌ها ضرورتی حیاتی دارد. فتوکاتالیز فرایندی دوستدار محیط‌زیست است که طی آن، انرژی نور به‌منظور دستیابی به اهدافی ازجمله حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آبی، سنتز مواد و شکافت آب به انرژی شیمیایی تبدیل می‌گردد؛ درنتیجه، این فرایند به‌عنوان روشی مناسب با بازدهی بالا، ایمن، ارزان، پایدار و طبیعی برای پاک‌سازی محیط‌های آلوده در نظر گرفته می‌شود (۴، ۳)؛ همچنین خودتمیزشوندگی، تولید نکردن محصولات جانبی نامطلوب، جلوگیری از انتقال آلایندهٔ بین فازها و امکان بازیابی و استفاده مجدد از فتوکاتالیست از مزایای مهم این فرایند است (۶، ۵). فتوکاتالیست‌ها نیمه‌رساناهایی هستند که با جذب نور مرئی، نزدیک به مادون‌قرمز یا فرابنفش برانگیخته می‌شوند و با تولید جفت‌های الکترون–حفره و گونه‌های فعال واکنشی، موجب تخریب آلاینده‌ها می‌گردند (۸، ۷). در این میان، فتوکاتالیست‌های فعال در نور مرئی و نزدیک به مادون‌قرمز اهمیت بیشتری دارند؛ زیرا این نواحی به‌ترتیب حدود ۴۳–۴۲ درصد و ۵۵–۵۲ درصد از طیف خورشید را تشکیل می‌دهند، درحالی‌که سهم نور فرابنفش تنها ۵–۳ درصد است (۸، ۷).

سولفیدهای فلزی نیمه‌رساناهایی با باندگپ متوسط و عموماً کوچک‌تر از اکسیدهای فلزی هستند که در حضور نور مرئی فعال می‌شوند. این ویژگی را می‌توان به تشکیل نوار ظرفیت آن‌ها توسط ترازه‌ای‌های S_{3p} نسبت داد که بالاتر از حالت‌های O_{2p} هستند و موجب موقعیت بالاتر نوار ظرفیت در مقایسه با اکسیدها می‌گردد (۹–۷)؛ همچنین به علت موقعیت مناسب نوار هدایت، این مواد توان کاهندگی بالایی دارند و در واکنش‌هایی نظیر احیای CO_2 (۱۰)، تثبیت نیتروژن (۱۱) و حذف آلاینده‌های آبی (۳، ۱) به‌کار می‌روند. دی سولفید قلع (SnS_2) از سولفیدهای فلزات واسطه، باندگپ باریک (۱/۹ تا ۲/۵ الکترون‌ولت)، فعالیت در نور مرئی، سنتز ساده، هزینهٔ کم، سمیت پایین و پایداری مناسب دارد و به‌عنوان فتوکاتالیستی امیدبخش شناخته می‌شود (۱۲، ۱). بااین‌حال، استفاده از SnS_2 خالص با محدودیت‌هایی همراه است؛ ازجمله موقعیت بالای نوار ظرفیت که مانع تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل و موجب کاهش توان اکسیدکنندگی می‌گردد و همچنین بازترکیب سریع جفت‌های الکترون–حفره که کارایی فتوکاتالیستی را کاهش می‌دهد (۱۲، ۱). برای بهبود عملکرد فتوکاتالیستی SnS_2، راهکارهایی مانند تشکیل نانوکامپوزیت با سایر نیمه‌رساناها به‌کار گرفته‌شده است که موجب تسهیل انتقال بار و کاهش بازترکیب جفت‌های الکترون–حفره می‌شود. انتخاب مناسب نیمه‌رسانای دوم نقش مهمی در جذب نور مرئی، جدایش و انتقال بار و بهره‌گیری مؤثر از ویژگی‌های اکسایشی و کاهشی نوارها دارد (۱۵–۱۳، ۱). در این میان، اکسیدهای فلزی به علت پایداری بالا در محیط‌های اسیدی و بازی، هزینهٔ کم، غیرسمی بودن و قابلیت بازیافت، گزینه‌های مناسبی برای تشکیل نانوکامپوزیت با سولفیدهای فلزی به‌شمار می‌روند (۱۶، ۱۵). وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۵، کامپوزیت SnS_2/ZnO با ساختار Z–شکل را سنتز و در تخریب رنگ رودامین‌بی تحت نور مرئی استفاده کردند. نرخ تخریب رنگ توسط فتوکاتالیست کامپوزیتی ۱۰/۵۱ بار بیشتر از SnS_2 خالص به‌دست آمد. تخریب نوری آلاینده در نوار ظرفیت ZnO و نوار هدایت SnS_2 رخ داد (۱). ویی و همکاران در سال ۲۰۲۱ نشان دادند، کامپوزیت سه‌تایی $CeO_2/SnS_2/PANI$ با ساختار S-scheme در کاهش Cr(VI) تحت نور مرئی عملکرد بهتری نسبت به پیوند ناهمگون دوتایی و اجزای خالص دارد. این ساختار با افزایش جدایش حامل‌های بار و حفظ پتانسیل احیایی نوارهای ظرفیت و هدایت، موجب بهبود فعالیت فتوکاتالیستی شد (۱۳).

ZrO_2 یک نیمه‌رسانای نوع n با پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، غیرسمی و نسبتاً ارزان است که به علت مقاومت مناسب در محیط‌های اسیدی و بازی نسبت به اکسیدهایی

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

مانند ZnO و TiO_2، توجه فراوانی را به خود جلب کرده است (۱۷)؛ همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد، موقعیت نوار هدایت آن منفی‌تر و نوار ظرفیت آن مثبت‌تر از ZnO و TiO_2 است (۱۷-۱۹). در این پژوهش، به‌منظور بهبود فعالیت فتوکاتالیستی SnS_2، از ZrO_2 به‌عنوان نیمه‌رسانای دوم برای ساخت نانوکامپوزیت استفاده گردید، به‌طوری‌که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، سنتز و ارزیابی فتوکاتالیستی این نانوکامپوزیت تاکنون گزارش نشده است.

با پیشرفت نانوتکنولوژی، سنتز نانوساختارها با مورفولوژی‌های متنوع مورد توجه قرار گرفته است؛ زیرا شکل و ساختار آن‌ها بر ویژگی‌های سطحی، جذب نور و عملکرد فتوکاتالیستی تأثیر مستقیم دارد. در نانوکامپوزیت‌ها، برهم‌کنش مناسب بین نیمه‌رساناها موجب تسهیل انتقال حامل‌های بار و کاهش بازترکیب الکترون-حفره می‌شود (۱۹، ۳). نقاط کوانتومی به علت سطح ویژهٔ بالا و باندگپ قابل تنظیم عملکرد مطلوبی دارند؛ اما تمایل آن‌ها به تجمع می‌تواند فعالیتشان را کاهش دهد. استفاده از نیمه‌رساناهای بزرگ‌تر و چندبعدی به‌عنوان بستر، از تجمع جلوگیری می‌کند، سطح تماس مؤثر ایجاد می‌نماید و انتقال بار را بهبود می‌بخشد (۲۰). هدف از این پژوهش سنتز نانوکامپوزیت جدید SnS_2/ZrO_2، شناسایی ویژگی‌های ساختاری، مورفولوژیکی و نوری و ارزیابی کارایی فتوکاتالیستی آن در حذف رنگ متیلن بلو تحت نور مرئی است؛ همچنین اثر مؤلفه‌های عملیاتی مؤثر بر فرایند و نیز نقش گونه‌های فعال و سازوکار انتقال بار به‌منظور تبیین عملکرد فتوکاتالیست بررسی شد.

مواد و روش‌ها

زیرکونیل کلراید اکتاهیدرات ($ZrOCl_2.8H_2O$، ۹۸ درصد)، استات سدیم (CH_3COONa، ۹۹ درصد)، رنگ‌دانهٔ متیلن بلو ($C_{16}H_{18}ClN_3S$، ۸۵ درصد)، کلرید قلع ۵ آبه ($SnCl_4{\cdot}5H_2O$، ۹۸ درصد) و تیواستامید (CH_3CSNH_2، ۹۹ درصد) از شرکت Merck آلمان تهیه گردید. بنزوکوئینون ($C_6H_4O_2$، BQ، Merck، ۹۸ درصد)، اتیلن دی‌آمین ترا استیک‌اسید ($C_{10}H_{16}N_2O_8$، EDTA Merck، ۹۹ درصد) و ایزوپروپیل الکل (C_6H_8O، شرکت IPA, Scharlau، ۹۹/۸ درصد) به‌عنوان اسکونجر در آزمایش‌های به‌دام‌اندازی گونه‌های فعال استفاده شدند.

سنتز ZrO_2 با ساختار نانوستاره-شکل: به‌منظور سنتز ZrO_2، مقدار ۰/۶۴۴ گرم زیرکونیل کلراید اکتاهیدرات و ۰/۰۸۲ گرم استات سدیم در ۱۲ میلی‌لیتر آب مقطر حل و به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد. محلول حاصل در راکتور هیدروترمال با آستر تفلونی در دمای ۲۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت تحت‌فشار ناشی از فرایند هیدروترمال حرارت داده شد. پس از سرد شدن، محصول با سانتریفیوژ جداسازی، با آب مقطر شسته و در ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت خشک گردید (۲۱).

سنتز نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2: به‌منظور سنتز نانوکامپوزیتSnS_2/ZrO_2 (۳۰ درصد وزنی ZrO_2)، نانوستاره‌های ZrO_2 در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه اولتراسونیک شدند؛ سپس این سوسپانسیون به محلول حاوی ۰/۷ گرم کلرید قلع ۵ آبه و ۰/۴۵ گرم تیواستامید در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده گردید و ۳۰ دقیقه هم زده شد. مخلوط در راکتور هیدروترمال با آستر تفلونی در ۱۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۱۴ ساعت حرارت داده شد. پس از سرد شدن، محصول سانتریفیوژ، شسته و در ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۱۲ خشک گردید. SnS_2 خالص نیز به همین روش و بدون ZrO_2 سنتز شد (۱۳).

مشخصه‌یابی نمونه‌ها: به‌منظور بررسی ویژگی‌های ساختاری، مورفولوژیکی و نوری نمونه‌های سنتزشده، آنالیزهای مختلفی انجام گردید. ساختار فازی با XRD (PHILIPS PW1730) تعیین شد. طیف جذب با UV–Vis (Agilent Cary, Germany) ثبت گردید. مورفولوژی توسط TEM (Zeiss EM900) و FESEM (TESCAN MIRA3) بررسی شد و آنالیز عنصری با EDX-MAP (TESCAN VEGA3) انجام گرفت. ویژگی‌های نوری از طریق UV–Vis DRS (SCINCO S-4100) و طیف‌های PL با دستگاه Cary Eclipse در طول‌موج برانگیختگی ۴۰۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

ارزیابی عملکرد فتوکاتالیستی: عملکرد فتوکاتالیستی

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

SnS_2/ZrO_2 با تخریب متیلن‌بلو تحت نور مرئی (لامپ LED) و در شرایط مختلف عملیاتی ارزیابی شد. مقدار معینی فتوکاتالیست به ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول رنگ افزوده و پس از ۴۵ دقیقه هم زدن در تاریکی (برقراری تعادل جذب-واجذب)، فرایند تحت تابش نور و با فاصلهٔ ۵ سانتی‌متر از منبع نور آغاز گردید. در فواصل ۲۰ دقیقه‌ای نمونه‌برداری انجام، ذرات با سانتریفیوژ جدا و غلظت باقی‌مانده توسط اسپکتروفتومتر UV-Vis تعیین شد. بازدهی تخریب بر اساس رابطهٔ زیر محاسبه گردید:

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

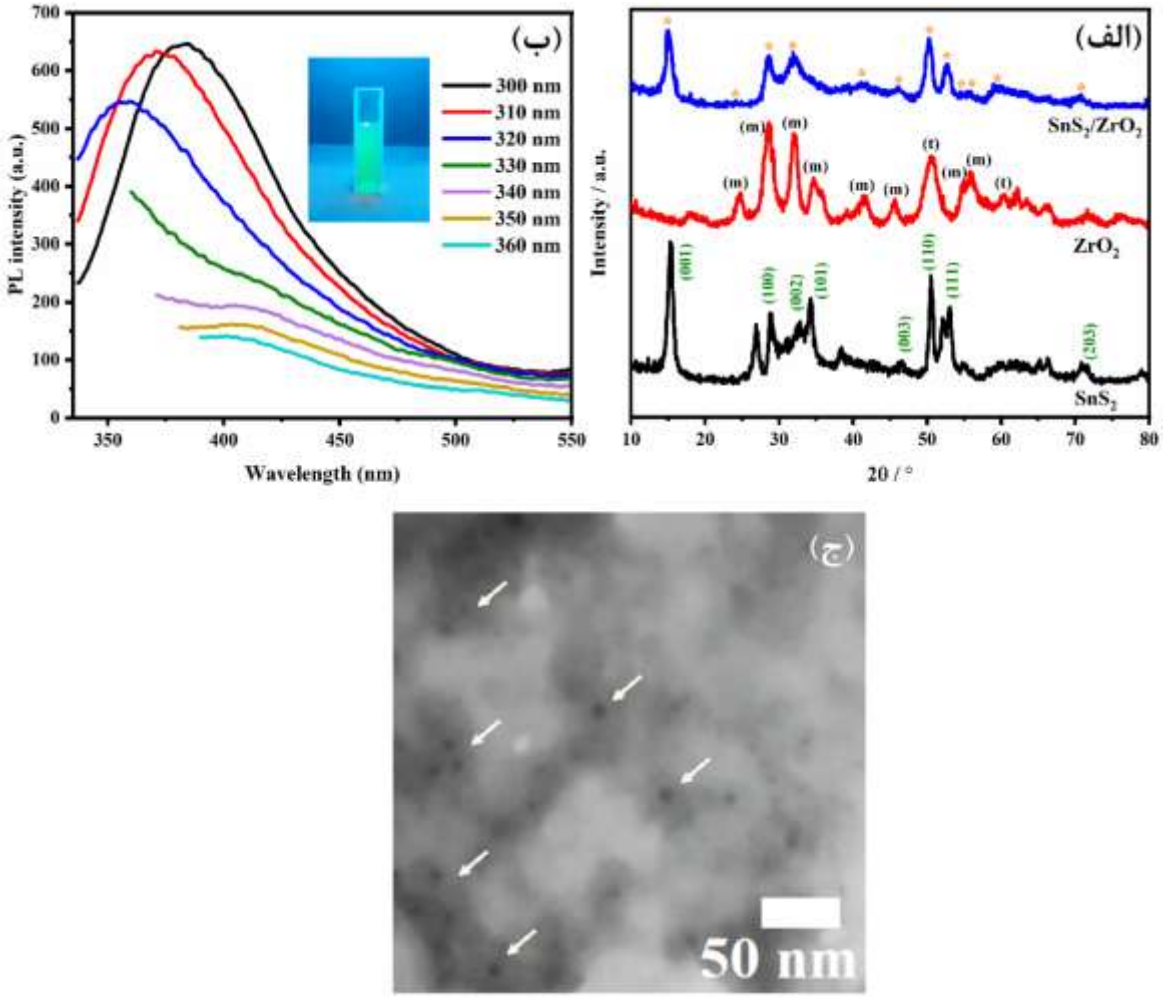
در معادله بالا، مؤلفه‌های C_0 و C_t به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ غلظت محلول رنگ (میلی‌گرم بر لیتر) در زمان اولیه و پس از گذشت زمان t هستند.

برای شناسایی گونه‌های فعال در فرایند فتوکاتالیستی، آزمایش‌های به‌دام‌اندازی با استفاده از بنزوکوئینون (BQ، ۱ میلی‌مولار)، ایزوپروپیل الکل (IPA، ۱ میلی‌مولار) و اتیلن دی‌آمین ترا استیک‌اسید (EDTA، ۱ میلی‌مولار) به‌ترتیب به‌عنوان گیرندهٔ رادیکال‌های سوپراکسید($O_2^{\cdot-}$)، هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$) و حفره‌های مثبت (h^+) انجام شد؛ همچنین پایداری نانوکامپوزیت طی پنج چرخهٔ متوالی با جداسازی، شست‌وشو، خشک کردن و استفاده مجدد از فتوکاتالیست ارزیابی گردید.

یافته‌های پژوهش

به‌منظور بررسی ساختار فازی نیمه‌رساناهای خالص و نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 از آنالیز XRD استفاده شد (شکل شمارهٔ ۱. الف). الگوی XRD مربوط به SnS_2 پیک‌هایی در 2θ برابر با °۱۵/۲۸، °۲۸/۹۲، °۳۲/۶۷، °۳۴/۱۹، °۴۶/۵۸، °۵۱/۵۰، °۷۱/۵۲ و °۷۹/۹۳ نشان می‌دهد که به‌ترتیب به صفحات (۰۰۱)، (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۰۰۳)، (۱۱۰)، (۱۱۱) و (۲۰۳) نسبت داده‌شده و بیان‌کنندهٔ ساختار هگزاگونال این نیمه‌رسانا مطابق با JCPDS 23–0677 است (۲۲، ۱۳، ۱). در الگوی ZrO_2 نیز پیک‌هایی در °۲۴/۷۷، °۶۶/۲۸، °۹۸/۳۱، °۵۶/۳۴، °۲۹/۴۱، °۵۵/۴۵، °۸۸/۵۴ و °۸۹/۵۵ مشاهده شد که به صفحات (۰۱۱)، (۱۱۱)، (۱۱۱–)، (۰۲۲)، (۲۱۱)، (۱۱۲–)، (۲۰۲–) و (۰۱۳) فاز مونوکلینیک نسبت داده می‌شوند، درحالی‌که پیک‌های °۵۰/۴۵ و °۶۰/۰۶ مربوط به صفحات (۱۱۲) و (۲۱۱) فاز تتراگونال هستند (JCPDS 07–0343) (۲۳، ۲۱). بااین‌حال، فاز مونوکلینیک فاز غالب در نمونهٔ سنتزشده است؛ همچنین در الگوی XRD نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2، پیک‌های مشخصهٔ هر دو نیمه‌رسانا مشاهده می‌شود که تشکیل موفق این نانوکامپوزیت را تأیید می‌کند.

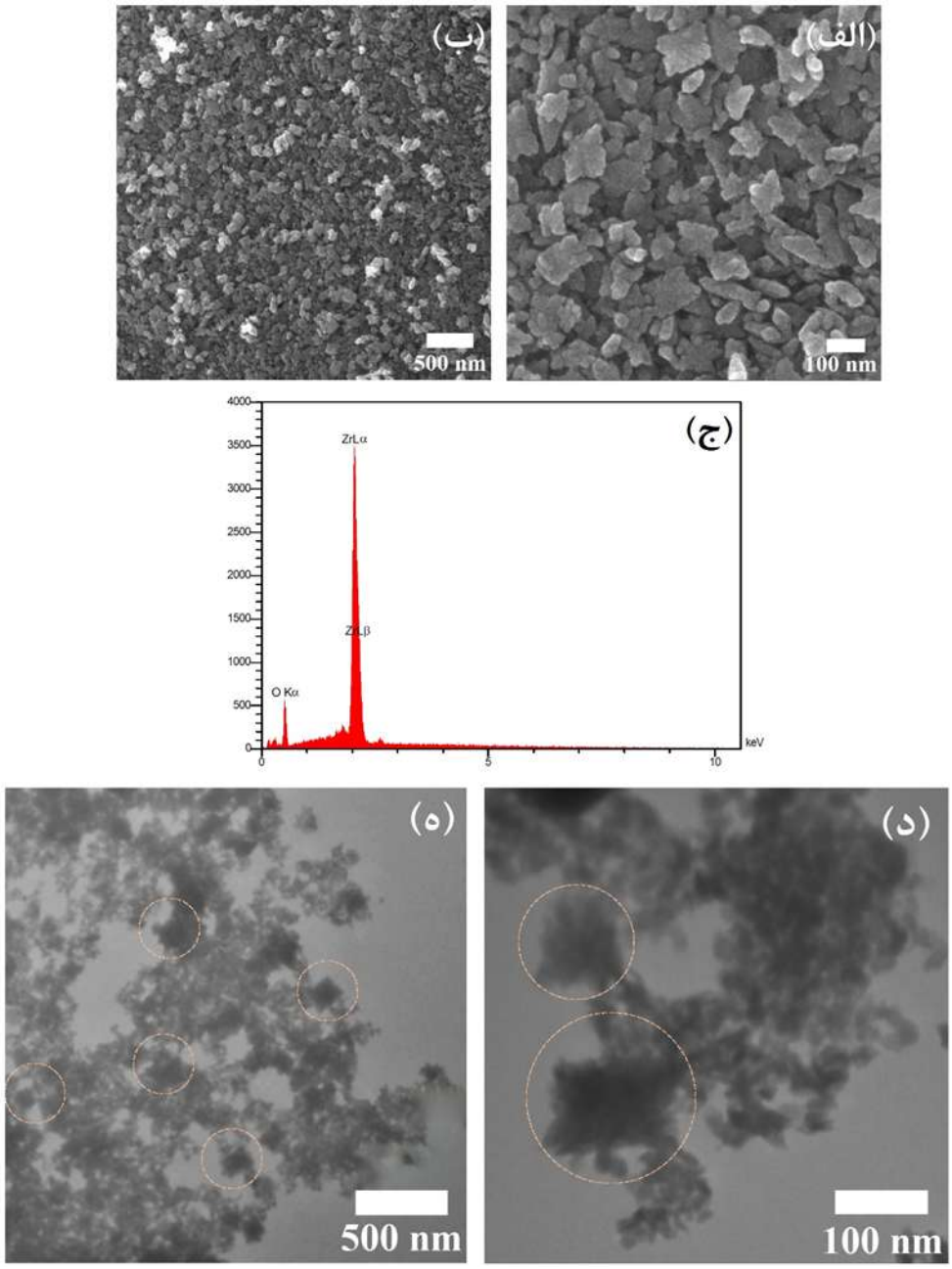
[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]



شکل شمارهٔ ۱. الف. طیف XRD فتوکاتالیست‌های مختلف؛ ب. آنالیز فلورسانس؛ ج. تصویر TEM نیمه‌رسانای SnS_2

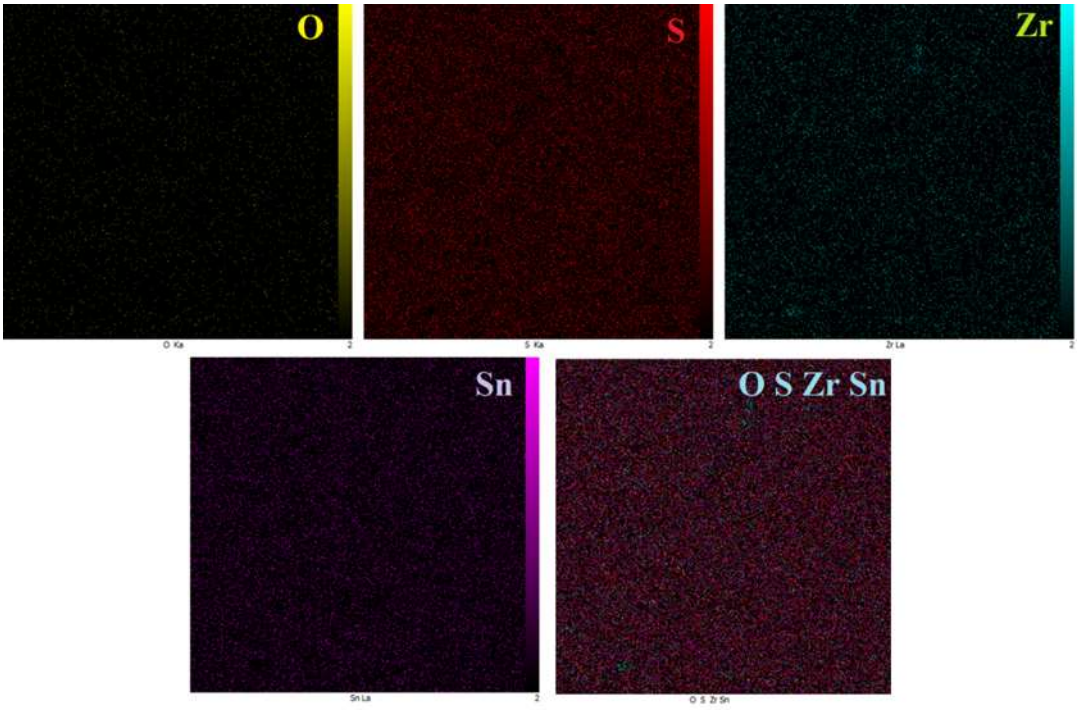
مورفولوژی و ساختار فتوکاتالیست‌های سنتزشده با آنالیزهای TEM و FESEM نشان داده شد. شکل‌های شمارهٔ ۱. ب- ج آنالیز فلورسانس و تصویر TEM نیمه‌رسانای SnS_2 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱. ب مشاهده می‌گردد، نقاط کوانتومی SnS_2 تحت تابش نور فرابنفش ۳۶۵ نانومتر، فلورسانس سبز روشن ساطع کردند (تصویر داخل کادر). طیف فلورسانس نقاط کوانتومی SnS_2 تحت طول‌موج‌های تحریک مختلف اندازه‌گیری شد که در آن حداکثر فلورسانس در طول‌موج تحریک ۳۰۰ نانومتر مشاهده گردید. اثر محدودیت کوانتومی به انتشار فلورسانس در نقاط کوانتومی نیمه‌رسانا منجر می‌شود و انتشار فلورسانس مشاهده‌شده تشکیل نقاط کوانتومی SnS_2 را تأیید می‌کند (۲۴). در شکل شمارهٔ ۱. ج، ذرات کروی و بسیار ریز در ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر مشاهده می‌گردد که نشان‌دهندهٔ ساختار نقاط کوانتومی SnS_2 است. تصاویر FESEM (شکل‌های شمارهٔ ۲. الف- ب) نشان می‌دهد، ZrO_2 مورفولوژی نانوستاره‌ای با اندازهٔ ذرات حدود ۱۰۰-۳۰ نانومتر دارد و آنالیز EDX (شکل شمارهٔ ۲. ج) حضور عناصر Zr و O را تأیید می‌کند. تصاویر TEM نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 (شکل شمارهٔ ۲. د- ه) پراکنش مناسب نانوستاره‌های ZrO_2 در ساختار نانوکامپوزیت را نشان می‌دهد که بیان‌کنندهٔ ادغام مؤثر دو نیمه‌رسانا و تسهیل انتقال حامل‌های بار است. این امر موجب کاهش بازترکیب الکترون-حفره و بهبود عملکرد فتوکاتالیستی می‌شود؛ همچنین نتایج EDX-mapping (شکل شمارهٔ ۳) حضور عناصر O، Zr، Sn و S را در نانوکامپوزیت تأیید می‌کند و درصدهای وزنی به‌ترتیب ۶/۴ درصد، ۱۳/۹۴ درصد، ۳۶/۷ درصد و ۴۲/۹۵ درصد را نشان می‌دهد که حاکی از سهم کمتر ZrO_2 در ترکیب نهایی است.

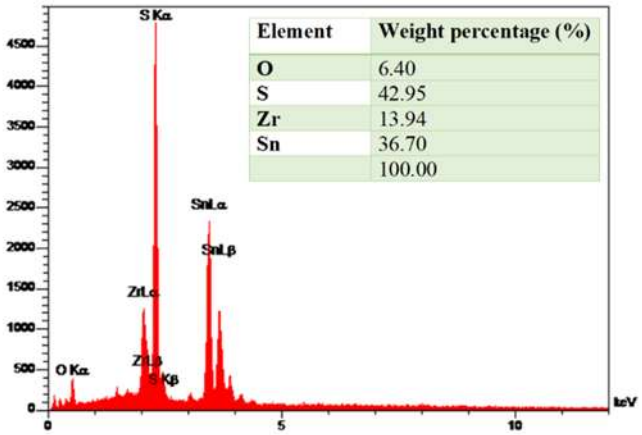
[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]



شکل شمارهٔ۲. الف- ب. تصاویر FESEM با بزرگنمایی‌های مختلف؛ ج. آنالیز EDX نیمه‌رسانای ZrO_2؛ د- ه. تصاویر TEM نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 با بزرگ‌نمایی‌های مختلف

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]





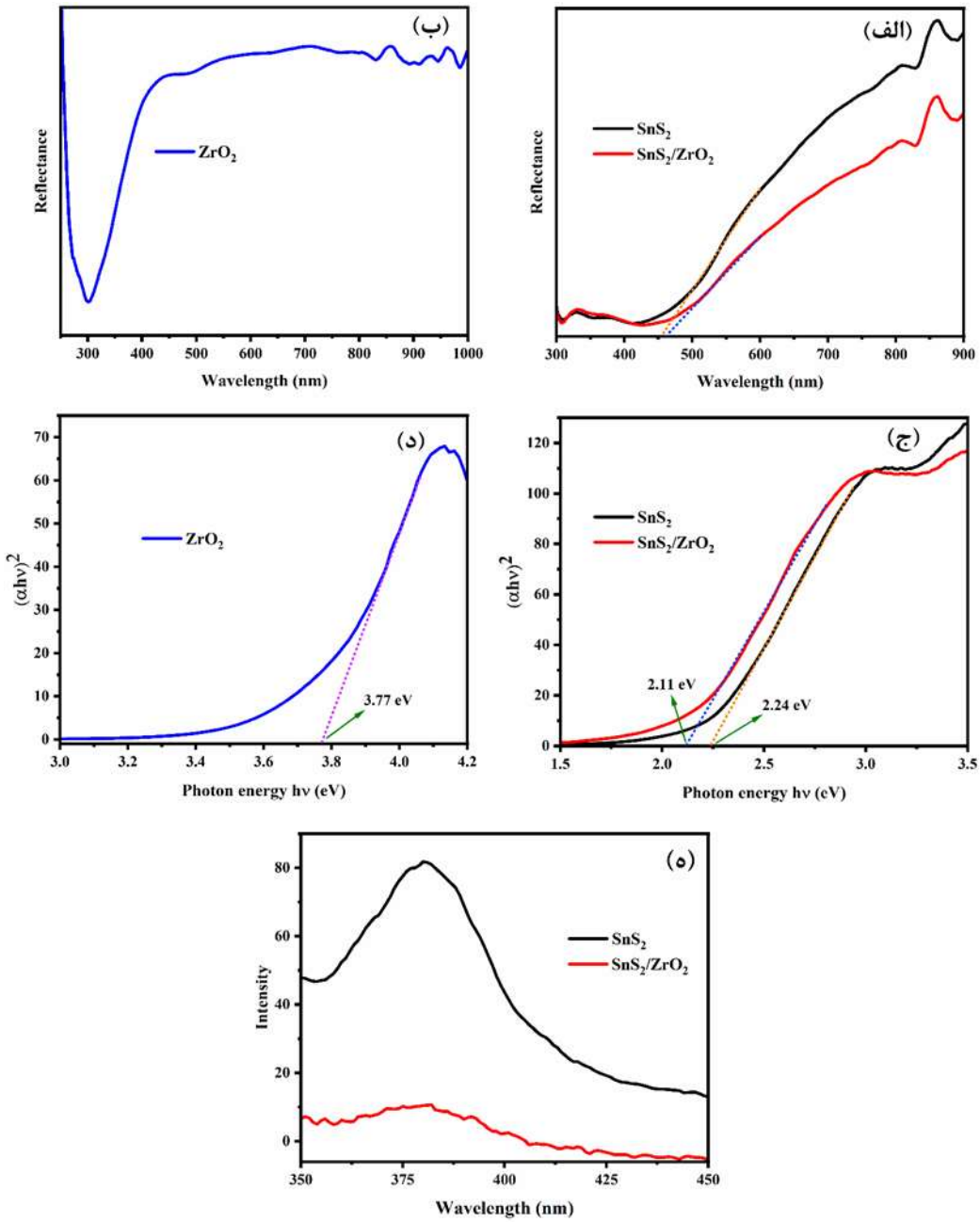
Element	Weight percentage (%)
O	6.40
S	42.95
Zr	13.94
Sn	36.70
	100.00

شکل شمارهٔ ۳. آنالیز EDX-mapping نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2

ویژگی‌های نوری SnS_2 خالص و نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 با آنالیزهای DRS و PL بررسی شد (شکل شمارهٔ ۴). نتایج DRS (شکل‌های شمارهٔ ۴. الف– ب) نشان داد، لبهٔ جذب SnS_2 و نانوکامپوزیت در ناحیهٔ مرئی قرار دارد، درحالی‌که ZrO_2 جذب اصلی خود را در ناحیهٔ فرابنفش (۲۹۴ نانومتر) نشان می‌دهد. در مقایسه با SnS_2 خالص، نانوکامپوزیت افزایش شدت جذب و شیفت قرمز لبهٔ جذب از ۴۵۵ به ۴۶۱ نانومتر را نشان داد که به اثر هم‌افزایی و بهبود جدایش و انتقال حامل‌های بار نسبت داده می‌شود و بیان‌کنندهٔ ارتقای پتانسیل فتوکاتالیستی در نور مرئی است (۱۳، ۵). انرژی شکاف نواری نمونه‌ها با استفاده از رابطهٔ Kubelka–Munk محاسبه شد (۵) و نتایج در شکل‌های شمارهٔ ۴. ج– د ارائه‌شده است. بر اساس شکل شمارهٔ ۴. ج، انرژی شکاف نواری SnS_2 خالص برابر با ۲/۲۴ الکترون‌ولت به‌دست آمد که در نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 به ۲/۱۱ الکترون‌ولت کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهندهٔ بهبود توان جذب نور مرئی و درنتیجه، ارتقای پتانسیل فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت نسبت به SnS_2 خالص است؛ همچنین مطابق شکل شمارهٔ ۴. د، انرژی شکاف نواری ZrO_2 خالص ۳/۷۷ الکترون‌ولت محاسبه گردید که بیان‌کنندهٔ فعالیت فتوکاتالیستی این ماده در ناحیهٔ فرابنفش است. آنالیز PL برای ارزیابی جداسازی و انتقال حامل‌های بار در نیمه‌رساناها به‌کار می‌رود. ازآنجاکه نشر فتولومینسانس ناشی از بازترکیب جفت‌های الکترون–حفره است، کاهش شدت PL نشان‌دهندهٔ مهار این بازترکیب،

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

افزایش تشکیل گونه‌های فعال و بهبود عملکرد فتوکاتالیستی است (۵، ۳). طیف‌های PL (شکل شمارهٔ ۴. هـ) نشان می‌دهد، SnS_2 خالص شدت نشر بیشتری دارد، درحالی‌که در نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 کاهش محسوسی مشاهده می‌گردد که به برهم‌کنش مؤثر SnS_2 با ZrO_2 و جداسازی بهتر حامل‌های بار نسبت داده می‌شود.



شکل شمارهٔ ٤. الف- ب. آنالیز DRS؛ ج- د. نمودار Tauc برای محاسبهٔ شکاف نواری؛ هـ آنالیز PL فتوکاتالیست‌های مختلف

عملکرد فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت از طریق تخریب رنگ متیلن‌بلو تحت تابش نور مرئی ارزیابی شد. برای این منظور، از لامپ LED به‌عنوان منبع نور استفاده گردید. شرایط عملیاتی آزمایش شامل مقدار نانوکامپوزیت مصرفی، توان لامپ و غلظت محلول رنگ بود؛ همچنین فاصلهٔ منبع نور تا راکتور واکنش فتوکاتالیستی ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

شکل‌های شمارهٔ ۵. الف تا ج اثر مقدار نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 (۰/۰۵- ۰/۳ گرم بر لیتر) بر تخریب متیلن‌بلو (غلظت محلول ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و توان لامپ ۱۰۰ وات) را نشان می‌دهند. با افزایش مقدار کاتالیست تا ۰/۲ گرم بر لیتر، بازدهی تخریب در ۸۰ دقیقه از ۵۶/۴۷ درصد به ۸۸/۳۶ درصد افزایش یافت که ناشی از افزایش سایت‌های فعال و تولید

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

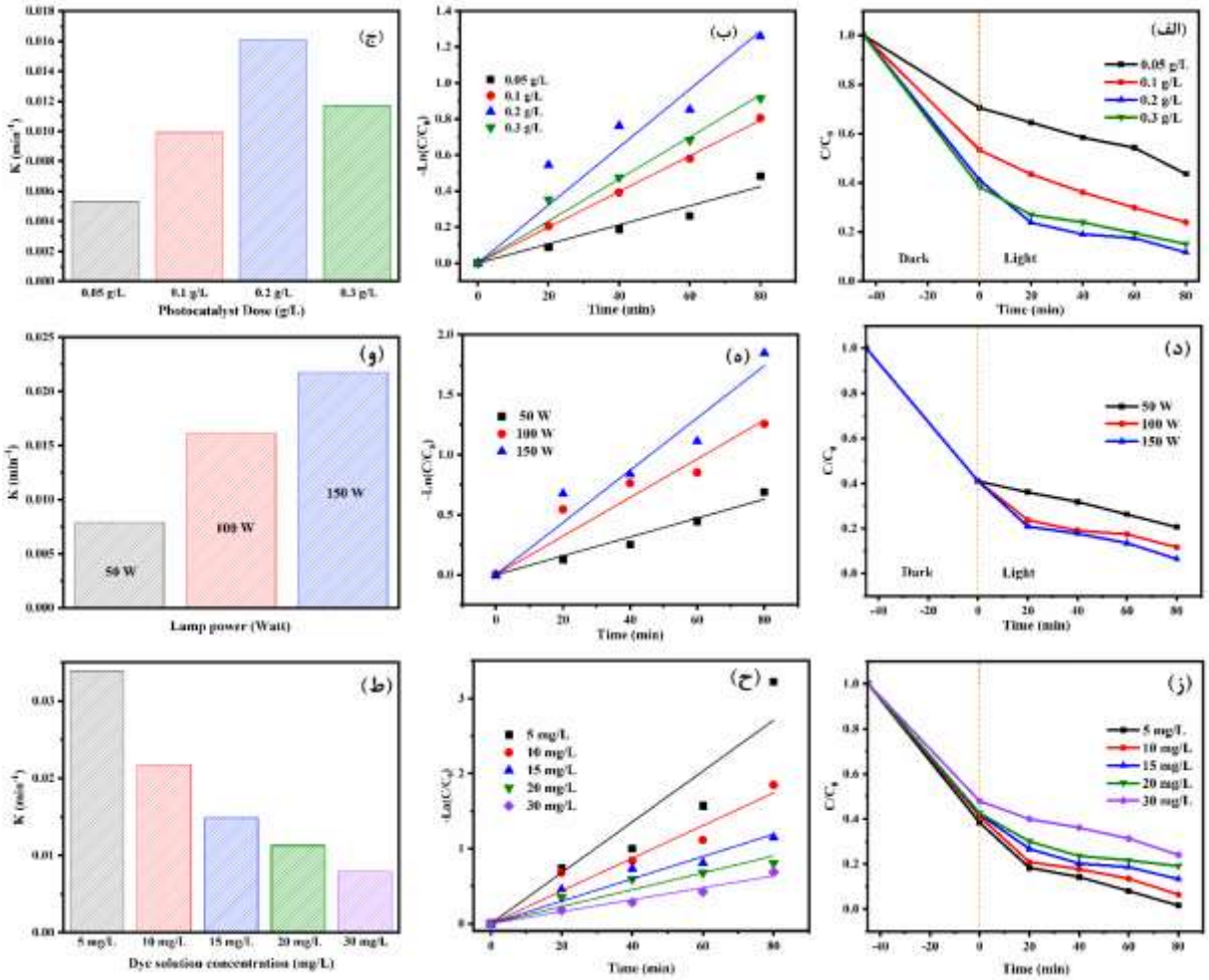
گونه‌های واکنشی است (۳). بااین‌حال، در ۰/۳ گرم بر لیتر کاهش نسبی بازدهی (۸۴/۶۵ درصد) به علت کدورت و افت نفوذ نور مشاهده شد. روند نرخ تخریب نیز مشابه بود. ثابت سرعت واکنش برای مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ گرم بر لیتر به‌ترتیب ۰/۰۰۵۳، ۰/۰۰۹۹، ۰/۰۱۶۱ و ۰/۰۱۱۶ (بر دقیقه) محاسبه گردید.

شکل‌های شمارهٔ ۵. د- هـ- و، تأثیر توان منبع نور بر بازدهی و نرخ تخریب فتوکاتالیستی متیلن بلو را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها، توان لامپ ۵۰-۱۵۰ وات، مقدار نانوکامپوزیت ۰/۲ گرم بر لیتر و غلظت محلول ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش توان لامپ از ۵۰ به ۱۵۰ وات، بازدهی تخریب، نرخ واکنش و ثابت سرعت افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که بازدهی به‌ترتیب ۷۹/۴۵ درصد، ۸۸/۳۶ درصد و ۹۳/۵۳ درصد و ثابت سرعت واکنش ۰/۰۰۷۸، ۰/۰۱۶۱ و ۰/۰۲۱۷ (بر دقیقه) برای توان‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ وات به‌دست آمد. این روند به افزایش شار فوتونی و درنتیجه، تولید بیشتر جفت‌های الکترون-حفره در سطح نانوکامپوزیت نسبت داده می‌شود.

به‌منظور بررسی اثر غلظت اولیهٔ محلول بر عملکرد فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت، آزمایش‌ها در غلظت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر (توان ۱۵۰ وات و مقدار نانوکامپوزیت ۰/۲ گرم بر لیتر) انجام شد (شکل‌های شمارهٔ ۵. ز- ح - ط). بر اساس شکل‌های شمارهٔ ۵. ز و ۵. ح، با افزایش غلظت رنگ از ۵ به ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، بازدهی و نرخ تخریب فتوکاتالیستی کاهش یافت، به‌طوری‌که درصد حذف به‌ترتیب ۹۷ درصد، ۹۳/۵۳ درصد، ۸۶/۶۶ درصد ۸۰/۹۴ و ۷۵/۷۶ درصد برای غلظت‌های یادشده به‌دست آمد. این روند را می‌توان به اشغال سایت‌های فعال سطح فتوکاتالیست توسط مولکول‌های رنگ و همچنین کاهش نفوذ نور در محلول‌های غلیظ‌تر نسبت داد. با وجود این، نانوکامپوزیت سنتزشده حتی در غلظت‌های بالاتر نیز بازدهی حذف قابل‌قبولی نشان داد. مطابق شکل شمارهٔ ۵. ط، ثابت سرعت واکنش برای غلظت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب ۰/۰۳۳۸، ۰/۰۲۱۷، ۰/۰۱۴۸، ۰/۰۱۱۳ و ۰/۰۰۷۹ (بر دقیقه) محاسبه شد.

جدول شمارهٔ ۱ بازدهی تخریب فتوکاتالیستی متیلن‌بلو توسط نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر SnS_2 را از نظر درصد حذف، زمان واکنش، مقدار کاتالیست، غلظت محلول و شرایط تابش مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد، نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 سنتزشده در این پژوهش تحت نور مرئی عملکرد قابل توجهی در تخریب متیلن‌بلو دارد.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]



شکل شمارهٔ ۵. الف- ب- ج. اثر مقدار نانوکامپوزیت؛ د- هـ- و. اثر توان لامپ؛ ز- ح- ط. اثر غلظت محلول بر بازدهی تخریب متیلن‌بلو توسط نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2

جدول شمارهٔ ۱. بازدهی تخریب رنگ متیلن‌بلو توسط انواع نانوکامپوزیت‌های بر پایهٔ SnS_2

نانوکامپوزیت	مؤلفه‌های آزمایش (منبع نور، مقدار فتوکاتالیست، غلظت محلول و زمان)	بازدهی تخریب	مرجع
SnS_2-$BiFeO_3$/rGO	لامپ جیوه ۲۵۰ وات، ۰/۴ گرم بر لیتر، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۹۰ دقیقه	۹۸ درصد	(۲۵)
SnS_2/g-C_3N_4	لامپ هالوژن ۴۰۰ وات، ۱ گرم بر لیتر، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۹۰ دقیقه	۹۰ درصد	(۲۶)
SnS_2/C_3N_5	لامپ زنون ۳۰۰ وات، ۰/۳ گرم بر لیتر، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۴۰ دقیقه	۹۵ درصد	(۲۷)
SnS_2/rGO/g-C_3N_4	لامپ مرئی ۳۰۰ وات، ۰/۰۵ گرم بر لیتر، ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر، ۷۰ دقیقه	۸۶ درصد	(۲۸)
SnS_2/ZrO_2	لامپ LED ۱۵۰ وات، ۰/۲ گرم بر لیتر، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۸۰ دقیقه	۹۳/۵۳ درصد	پژوهش حاضر

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

به‌منظور ارزیابی پایداری نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 آزمون بازیافت در پنج چرخه انجام شد (شکل شمارهٔ ۶. الف). نتایج نشان داد، بازدهی تخریب به‌ترتیب ۹۳/۵۳ درصد، ۹۲/۷۴ درصد، ۹۱/۶۲ درصد، ۸۸/۹۸ درصد و ۸۵/۱۰ درصد است که بیان‌کنندهٔ پایداری مناسب و قابلیت استفادهٔ مجدد آن در تصفیهٔ پساب است.

به‌منظور تعیین نقش گونه‌های فعال مؤثر در فرایند فتوکاتالیستی، آزمون‌های به‌دام‌اندازی انجام گردید (شکل شمارهٔ ۶. ب). نتایج نشان داد، ثابت سرعت واکنش از ۰/۰۲۱۷ بر دقیقه (بدون اسکونجر) به ۰/۰۱۰ (در حضور BQ)، ۰/۰۱۵ (در حضور IPA) و ۰/۰۱۸۵ (در حضور EDTA) کاهش می‌یابد. این نتایج بیان‌کنندهٔ نقش غالب رادیکال $^{\bullet}O_2^-$ و سپس رادیکال $^{\bullet}OH$ و h^+ در تخریب نوری متیلن‌بلو است. علاوه بر این، مقادیر انرژی نوارهای ظرفیت و هدایت SnS_2 و ZrO_2 به‌ترتیب توسط معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌گردد (۲۲، ۵، ۳).

$$E_{VB} = \chi - E_C + 0.5E_g \quad (۲)$$

$$E_{CB} = E_{VB} - E_g \quad (۳)$$

در این روابط، E_{VB} و E_{CB} به‌ترتیب انرژی نوار ظرفیت و هدایت، Ec انرژی الکترون آزاد (۴/۵ الکترون‌ولت)، Eg شکاف نواری و χ الکترونگاتیویته مطلق نیمه‌رسانا است که برای ZrO_2 و SnS_2 به‌ترتیب ۵/۹۱ و ۴/۶۶ الکترون‌ولت گزارش شده‌اند (۲۲، ۵، ۳). بر اساس این، سطوح $^{VB}/_{CB}$ برای SnS_2 ۰/۹۶- و ۱/۲۸+ و برای ZrO_2 برابر ۰/۴۷۵- و ۳/۲۹۵+ محاسبه شد.

بر اساس نتایج آزمون‌های به‌دام‌اندازی و مقادیر ترازهای نوار به‌دست‌آمده از DRS، سازوکار تخریب متیلن بلو توسط نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 تحت نور مرئی (شکل شمارهٔ ۶. ج) پیشنهاد گردید. در تابش مرئی، SnS_2 به علت باندگپ کوچک برانگیخته می‌شود و جفت‌های الکترون-حفره تولید می‌کند؛ اما در نمونهٔ خالص بازترکیب سریع رخ می‌دهد. در نانوکامپوزیت، الکترون‌های برانگیخته از نوار هدایت SnS_2 به نوار هدایت ZrO_2 منتقل می‌گردد (به علت پتانسیل منفی‌تر SnS_2)، و ZrO_2 به‌عنوان پذیرندهٔ الکترون عمل می‌کند (معادله ۴). الکترون‌های تجمع‌یافته در ZrO_2 با اکسیژن محلول واکنش می‌دهند و رادیکال‌های $^{\bullet}O_2^-$ تولید می‌کنند (معادله ۵) که گونهٔ غالب در فرایند تخریب هستند (پتانسیل کاهش زوج $^{\bullet}O_2^-/O_2$: ۰/۳۳- الکترون‌ولت). این رادیکال‌ها مستقیماً رنگ را اکسید می‌کنند یا از طریق تشکیل H_2O_2 و سپس $^{\bullet}OH$ در تجزیهٔ آلاینده مشارکت دارند (معادلات ۶ و ۷) (۲۹، ۵). حفره‌های باقی‌مانده در نوار ظرفیت SnS_2 نیز به‌طور مستقیم مولکول‌های رنگ را اکسید می‌کنند (معادله ۸)؛ زیرا توانایی تولید $^{\bullet}OH$ از H_2O یا OH^- را ندارند (پتانسیل زوج‌های $^{\bullet}OH/OH^-$ و $^{\bullet}OH/H_2O$ به‌ترتیب ۱/۹۹+ و ۲/۲۷+ الکترون‌ولت) (۲۹). درمجموع، $^{\bullet}O_2^-$ سپس $^{\bullet}OH$ و درنهایت h^+، به‌ترتیب گونه‌های فعال اصلی در این سامانه به‌شمار می‌روند.

$$\frac{SnS_2\ QDs}{ZrO_2\ star-like} + h\nu \rightarrow SnS_2\ QDs\ (h^+ + e^-) \rightarrow SnS_2\ QDs\ (h^+) + ZrO_2\ star-like\ (e^-) \quad (۴)$$

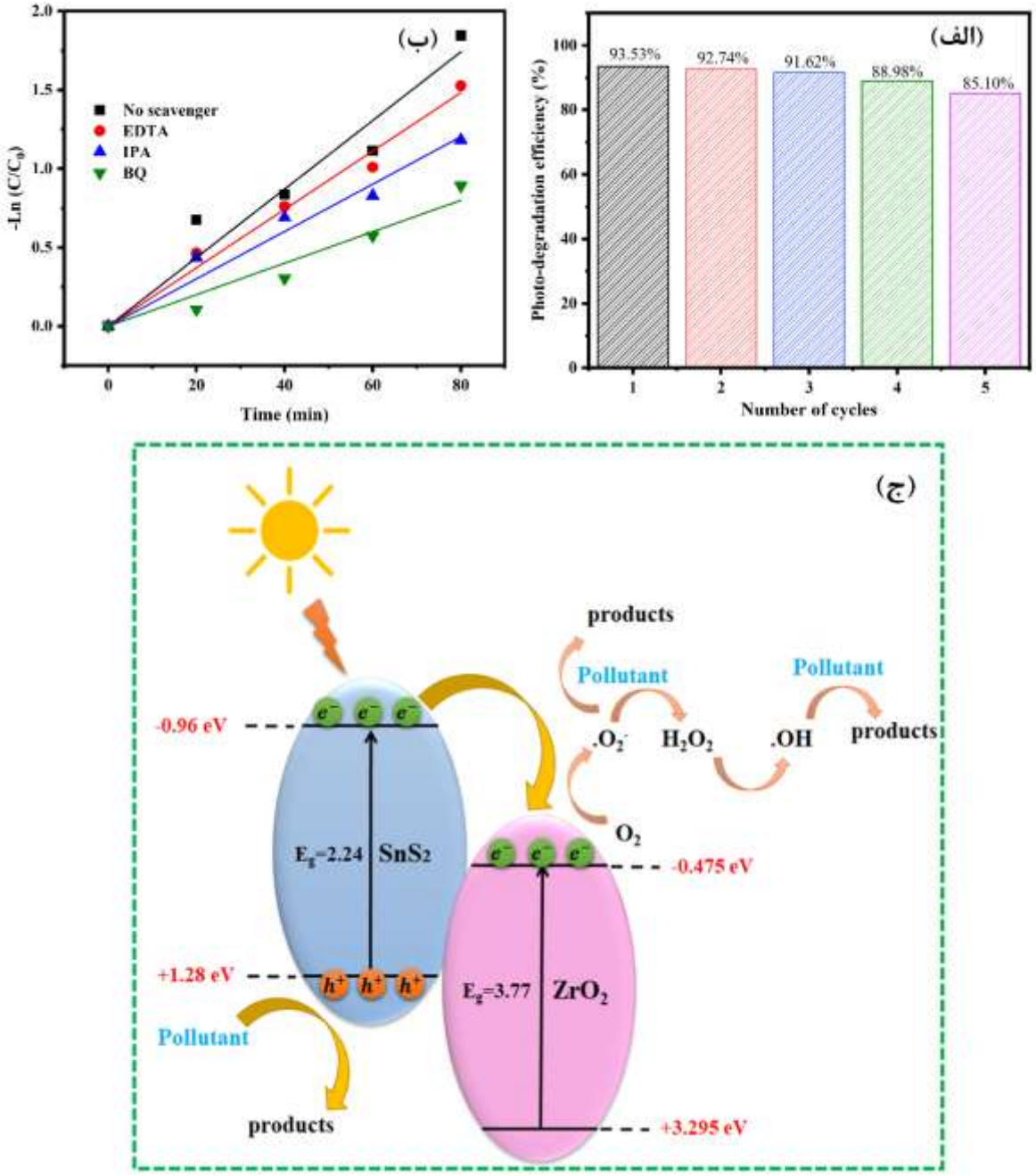
$$e^- + O_2 \rightarrow .O_2^- \quad (۵)$$

$$2e^- + 2H^+ + O_2 \rightarrow H_2O_2 \quad (۶)$$

$$H_2O_2 + .O_2^- \rightarrow OH\cdot + OH^- + O_2 \quad (۷)$$

$$(.O_2^- + h^+ + OH\cdot) + Dye \rightarrow degradation\ products \quad (۸)$$

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]



شکل شمارهٔ ٦. الف. چرخه‌های متوالی تخریب نوری متیلن‌بلو توسط نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2؛ ب. آزمایش‌های به دام انداختن گونه‌های فعال (غلظت محلول رنگ: ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، توان لامپ: ۱۵۰ وات، مقدار نانوکامپوزیت: ۰/۲ گرم بر لیتر)؛ ج. سازوکار پیشنهادی تخریب فتوکاتالیستی

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نیمه‌رساناهای SnS_2، ZrO_2 و نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 با موفقیت سنتز و به‌وسیلهٔ آنالیزهای XRD، FESEM، TEM، EDX، DRS، PL و فلورسانس مشخصه‌یابی شدند. آنالیز XRD سنتز موفق نمونه‌های سنتزشده را اثبات کرد. نتایج نشان داد، ZrO_2 ساختار نانوستاره‌ای دارد و SnS_2 به‌صورت نقاط کوانتومی تشکیل‌شده است. نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 نسبت به SnS_2 خالص افزایش جذب نور مرئی، شیفت قرمز لبهٔ جذب و کاهش شکاف نواری از ۲/۲۴ به ۲/۱۱ الکترون‌ولت را نشان داد؛ همچنین کاهش شدت PL در نانوکامپوزیت بیان‌کنندهٔ مهار بازترکیب الکترون–حفره و بهبود تولید گونه‌های فعال بود. بررسی عملکرد فتوکاتالیستی نشان داد، نانوکامپوزیت سنتزشده تحت تابش نور مرئی، در شرایط بهینه شامل زمان ۸۰ دقیقه، غلظت محلول ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار فتوکاتالیست

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

۰/۲ گرم بر لیتر و توان لامپ ۱۵۰ وات، قادر به تخریب ۹۳/۵۳ درصد متیلن‌بلو است؛ همچنین این فتوکاتالیست پس از پنج چرخه استفاده، پایداری مطلوبی از خود نشان داد. نتایج آزمون‌های به‌دام‌اندازی نشان داد، گونه‌های فعال اصلی شامل رادیکال سوپراکسید، رادیکال هیدروکسیل و حفره‌های مثبت هستند و سهم آن‌ها به‌ترتیب $(O_2^- > OH^{\cdot} > h^+)$است؛ همچنین ترازهای نوار هدایت و ظرفیت برای SnS_2 به‌ترتیب ۰/۹۶- و ۱/۲۸+ الکترون‌ولت و برای ZrO_2 برابر با ۰/۴۷۵- و ۳/۲۹۵+ الکترون‌ولت محاسبه شد. بر اساس این، انتقال الکترون از نوار هدایت SnS_2 به نوار هدایت ZrO_2 موجب جداسازی مؤثر حامل‌های بار، کاهش بازترکیب و درنتیجه، افزایش کارایی فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت در تخریب آلاینده‌های آلی می‌شود. درمجموع، نتایج این مطالعه نشان داد، نانوکامپوزیت SnS_2/ZrO_2 سنتزشده، به علت بهبود جداسازی حامل‌های بار و ارتقای پاسخ نوری در ناحیهٔ مرئی، از قابلیت مناسبی برای تخریب فتوکاتالیستی آلاینده‌های آلی برخوردار است؛ بنابراین، نانوکامپوزیت یادشده را می‌توان به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و امیدبخش برای کاربردهای محیط‌زیستی، به‌ویژه در فرایندهای تصفیهٔ پساب معرفی کرد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تعارض منافع یا روابط مالی رقابتی در این مطالعه وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش یک مطالعه مستقل بوده و هیچ گونه کمک مالی از سازمان یا نهاد خاصی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

مرجان تنظیفی (ایده پردازی، روش شناسی، تحلیل داده ها، نگارش، بازبینی و ویرایش، نظارت)، حدیث سارایی (انجام آزمایش ها)، نعیمه ستاره شناس (نگارش، بازبینی و ویرایش)، منوچهر منصوری (انجام آزمایش ها).

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

References

1. Wang C, Liu B, Ren J, Javed MS, Han W. Enhanced photocatalytic performance of SnS2/ZnO Z-scheme composite photocatalysts for efficient environmental remediation. Mater Res Bull. 2025;183:113222. doi: 10.1016/j.materresbull.2024.113222.
2. Anwer H, Mahmood A, Lee J, Kim KH, Park JW, Yip ACK. Photocatalysts for degradation of dyes in industrial effluents: opportunities and challenges. Nano Res. 2019;12:955-72. doi: 10.1007/s12274-019-2287-0.
3. Tanzifi M, Mansouri M, Saraee H, Rahmatian N, Anvari A, Tavakkoli Yaraki M. Visible-light induced photo-degradation procedure of organic pollutants using a novel Z-scheme 0D/2D SnS2/MgO nano-heterojunction. Chem Eng Res Des. 2025;221:313-25. doi: 10.1016/j.cherd.2025.08.012.
4. Yan X, Chen Z, Yue Y, Chai R, Ou H, Li Y, Yang G. Janus cobalt sites on carbon nitride for efficient photocatalytic overall water splitting. Appl Catal B: Environ Eng. 2025;360:124527. doi: 10.1016/j.apcatb.2024.124527.
5. Tanzifi M, Peyravi M, Jahanshahi M, Khalili S. Investigation of photocatalytic and visible light self-cleaning performance of 2D/2D g-C3N4-ZrO2 based PES/PDA membranes for organic contaminants degradation. J Mol Struct. 2024;1315:138877. doi: 10.1016/j.molstruc.2024.138877.
6. Zhang YC, Yao L, Zhang G, Dionysiou DD, Li J, Du X. One-step hydrothermal synthesis of high-performance visible-light-driven SnS2/SnO2 nanoheterojunction photocatalyst for the reduction of aqueous Cr (VI). Appl Catal B: Environ. 2014;144:730-8. doi: 10.1016/j.apcatb.2013.08.006.
7. Wang L, Yu J. Chapter 1 - Principles of photocatalysis. Interface Sci Technol. 2023;35:1-52. doi: 10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0.
8. Elmi Fard N, Pasdar H, Tavakkoli Yaraki M. CdSe nanoflower as a new near infrared-activated photocatalyst for remediation of pharmaceutical wastewaters. Mater Today Sustain. 2024;28:100961. doi: 10.1016/j.mtsust.2024.100961.
9. Ali S, Bakhtiar SUH, Ismail A, Ismail PM, Hayat S, Zada A, et al. Transition metal sulfides: From design strategies to environmental and energy-related applications. Coord Chem Rev. 2025;523:216237. doi: 10.1016/j.ccr.2024.216237.
10. Huang QQ, Wang D, Guo RT. Metal sulfide-based photocatalysts applied in CO2 photocatalytic reduction: Current status and future perspectives. J Ind Eng Chem. 2026;160:98-131. doi: 10.1016/j.jiec.2026.02.022.
11. Dolla TH, Matthews,T, Maxakato NW, Ndungu P, Montini T. Recent advances in transition metal sulfide-based electrocatalysts and photocatalysts for nitrogen fixation. J Electroanal Chem. 2023;928:117049. doi: 10.1016/j.jelechem.2022.117049.
12. Kumar G, Kumar J, Bag M, Dutta RK. Solar light induced photocatalytic process for reduction of hexavalent chromium and degradation of tetracycline and methylene blue by heterostructures made of SnS2 nanoplates surface modified by ZnWO4 nanorods. Sep Purif Technol. 2022;292:121040. doi: 10.1016/j.seppur.2022.121040.
13. Wei H, Zhang Y, Zhang Y, Zhang Y. Design and synthesis of a new high- efficiency CeO2/SnS2/polyaniline ternary composite visible-light photocatalyst. Colloids Interface Sci Commun. 2021;45:100550. doi: 10.1016/j.colcom.2021.100550.
14. Srivind J, Nagarethinam VS, Suganya M, Balamurugan S, Usharani K, Balu AR. NiO coupled SnS2 nanoparticles with improved magnetic and photocatalytic performance against the degradation of organic dyes without N=N double bond. Vacuum. 2019;163:373-383. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.02.048.
15. Gadore V, Mishra SR, Ahmaruzzaman Md. SnS2/ZIF-67 nanocomposite: a novel bifunctional, highly efficient, and reusable photocatalyst for enhanced visible- light-assisted biodiesel production and degradation of tinidazole. Mater Res Bull. 2025;183:113177. doi: 10.1016/j.materresbull.2024.113177.
16. Oskenbay A, Salikhov D, Rofman O, Rakhimbek I, Shalabayev Z, Khan N, et al. Solid-state synthesis of ZnS/ZnO nanocomposites and their decoration with NiS cocatalyst for photocatalytic hydrogen production. Ceram Int. 2023;49:32246-60. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.07.200.
17. Hu L, Hu H, Lu W, Lu Y, Wang S. Novel composite BiFeO3/ZrO2 and its high photocatalytic performance under white LED visible-light irradiation. Mater Res Bull. 2019;120:110605–110616. doi: 10.1016/j.materresbull.2019.110605.
18. Kim D, Yong K. Boron doping induced charge transfer switching of a C3N4/ZnO photocatalyst from Z-scheme to type II to enhance photocatalytic hydrogen production. Appl Catal B Environ. 2021;282:119538-47. doi: 10.1016/j.apcatb.2020.119538.
19. Li C, Sun Z, Xue Y, Yao G, Zheng S. A facile synthesis of g-C3N4/TiO2 hybrid photocatalysts by sol–gel method and its enhanced photodegradation towards methylene blue under visible light. Adv Powder Technol. 2016;27:330-37. doi: 10.1016/j.apt.2016.01.003.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

20. Wang Y, Li C, Wang S, Shao Z, Xie L, Qin Y, et al. 0D/2D dual fenton α-Fe2O3/Fe-doped g-C3N4 photocatalyst and the synergistic photo-Fenton catalytic mechanism insight. Chemosphere. 2024;358:142158. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142158.
21. Shu Z, Jiao X, Chen D. Hydrothermal synthesis and selective photocatalytic properties of tetragonal star-like ZrO2 nanostructures. Cryst Eng Comm. 2013;15:4288-4294. doi: 10.1039/C3CE40234G.
22. Jain S, Kumar N, Sharma S, Parmar D, Sharma RK, Tahir M, et al. A facile synthesis of Bi2O3/SnS2 and Ag@Bi2O3/SnS2 nanostructures and their enhanced photodegradation application toward RhB. Mater Today Sustain. 2023;24:100539. doi: 10.1016/j.mtsust.2023.100539.
23. Kumar S, Ojha AK. Oxygen vacancy induced photoluminescence properties and enhanced photocatalytic activity of ferromagnetic ZrO2 nanostructures on methylene blue dye under ultra-violet radiation. J Alloy Compd. 2015;644:654-62. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.04.183.
24. Gonzalez JM, Oleynik II. Layer-dependent properties of SnS2 and SnSe2 two- dimensional materials. Phys Rev. 2016;94:125443. doi: 10.1103/PhysRevB.94.125443.
25. Bagherzadeh M, Kaveh R. A new SnS2-BiFeO3/reduced graphene oxide photocatalyst with superior photocatalytic capability under visible light irradiation. J Photochem Photobiol A Chem. 2018;359:11-22. doi: 10.1016/j.jphotochem.2018.03.031.
26. Fareed I, Farooq MUH, Danish Khan M, Tahir M, Butt FK. An efficient multifunctional SnS2/g-C3N4 hierarchical nanoflower catalyst for electrocatalytic and photocatalytic applications. Ceram Int. 2024;50:36004-17. doi: 10.1016/j.ceramint.2024.06.412.
27. Yanan G, Ming S, Jingxuan Y, Yajie W, Bin L. Fabrication of SnS2/C3N5 heterojunction photocatalyst for highly efficient hydrogen production and organic pollutant degradation. J Fuel Chem Technol. 2025;53:336-46. doi: 10.1016/S1872-5813(24)60507-4.
28. Shyagathur SC, Rao AHN, Ravishankar PK, Nagaraju G, Pattar J. SnS2 based SnS2/rGO/g-C3N4 Z-scheme ternary nanocomposites for efficient visible light-driven photocatalytic activity. Opt Mater. 2024;147:114688. doi: 10.1016/j.optmat.2023.114688.
29. Li C, Sun Z, Xue Y, Yao G, Zheng S. A facile synthesis of g-C3N4/TiO2 hybrid photocatalysts by sol–gel method and its enhanced photodegradation towards methylene blue under visible light. Adv Powder Technol. 2016;27:330-37. doi: 10.1016/j.apt.2016.01.003.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]