Torbat Jam University of Medical Sciences
Iranian journal of Health Research and Development
Vol. 4, No. 3, September 2026

Antibacterial Properties and Sonocatalytic Efficiency of Zinc Oxide Nanoparticles in the Degradation of Dye from Aqueous Solutions

Seyedeh Nastaran Asadzadeh(PhD)[1], Mobin Yasini(BSc)[2]* ,mohadeseh heidari(BSc)2

Original Article

Abstract

Background: Reactive Red 198, a monoazo dye, is one of the most common synthetic dyes used in textile industries. Its discharge into wastewater leads to serious environmental problems due to its stability and resistance to biodegradation. Advanced oxidation processes (AOPs) are powerful methods with simple operation and high efficiency for the degradation of persistent organic compounds in the environment. This study aimed to evaluate the sonocatalytic and antibacterial performance of zinc oxide (ZnO) nanoparticles for the degradation of Reactive Red 198 dye from aqueous solutions.

Methods: This experimental study was conducted on a laboratory scale. The effects of key parameters, including solution pH, initial catalyst concentration, oxidant dosage, and initial dye concentration, on the removal efficiency of Reactive Red 198 were investigated. The dye concentration was measured at a wavelength of 518 nm using a UV–Vis spectrophotometer. Under optimal conditions, the performance of various catalytic processes was compared, and the antibacterial activity of the synthesized ZnO nanoparticles was also assessed.

Results:The optimal conditions were obtained at an initial dye concentration of 15 mg/L, peroxymonosulfate concentration of 60 mg/L, ZnO nanoparticle dosage of 2 g/L, and pH = 4. Under these conditions, a maximum dye removal efficiency of 89.69% was achieved after 45 minutes. Moreover, the ZnO nanoparticles exhibited significant antibacterial activity against both Gram-negative and Gram-positive bacteria.

Conclusion: The incorporation of ZnO nanoparticles into the sonocatalytic process offers strong oxidation capability, high efficiency, and effective decomposition of refractory organic pollutants, making it a promising method for the removal of Reactive Red 198 from textile wastewater. Furthermore, ZnO nanoparticles demonstrate potential for controlling and eliminating resistant bacterial strains in environmental applications.

Keywords: Antibacterial, sonocatalyst, zinc oxide nanoparticles, reactive red 198

Corresponding author: Mobin Yasini **- E-mail address:** Yasinimobin18@gmail.com
1. Assistant Professor of Environmental Health Engineering, School of Health, North Khorasan University of Medical Sciences, Bojnurd, Iran
2. Student of the Student Research Committee, Faculty of Health, North Khorasan University of Medical Sciences, Bojnord, Iran.

Received: 2026/02/04 **Revised**: 2026/05/09 **Accepted**: 2026/08/01

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

Copyright©2026, Asadzadeh et al.This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

دانشکده علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تربت جام
مجله تحقیق و توسعه سلامت ایران
دوره ۴ ،شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵

بررسی خواص آنتی باکتریال و کارایی فرایند سونوکاتالیستی نانوذرات اکسید روی در حذف رنگ راکتیو قرمـــز۱۹۸ از محلول‌های آبی

سیده نسترن اسدزاده(PhD)[۱]، مبین یاسینی(BSc)*[۲]، محدثه حیدری(BSc)[۲]

مقاله پژوهشی

چکیده

سابقه و هدف: رنگ راکتیو قرمز۱۹۸ از نظر ساختار جزء رنگ های منوآزو است که با ورود به فاضلاب های صنایع نساجی، مشکلات زیست محیطی متعددی را به همراه خواهند داشت. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته روشی با بهره‌برداری ساده و قدرت بالا برای تخریب ترکیبات مقاوم به تجزیه و پایدار در محیط زیست می باشد. هدف این مطالعه تعیین کارایی فرایند سونوکاتالیستی و ضدباکتریایی نانوذرات اکسید روی به منظور تخریب راکتیو قرمز ۱۹۸ می باشد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه بصورت تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. کارایی حذف راکتیو قرمز ۱۹۸ تحت شرایط مختلف مانندpH ،غلظت اولیه کاتالیزور، غلظت اولیه اکسیدان، غلظت اولیه رنگ تحت امواج اولتراسونیک با فرکانس ۳۷ کیلوهرتز و توان ۵۰۰ وات در دمای محیط و زمان واکنش ۴۵ دقیقه بررسی گردید. همچنین در شرایط بهینه بدست آمده کارایی فرایندهای مختلف بر روی حذف رنگ مقایسه گردید. غلظت رنگ با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۸ نانومتر تعیین گردید. در نهایت خاصیت ضد باکتریایی نانوذره تعیین گردید.

یافته‌ها: تحت شرایط بهینه ی غلظت راکتیو قرمز ۱۹۸ = ۱۵ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسی منوسولفات= ۶۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت نانوذرات اکسید روی= ۲ گرم بر میلی لیتر ،pH=۴، حداکثر کارایی حذف رنگ در زمان واکنش ۴۵ دقیقه برابر با۸۹/۶۹ درصد بدست آمد. همچنین نانوذره دارای خواص ضدباکتریایی بالایی در برابر باکتری های گرم منفی و مثبت می باشد.

نتیجه گیری: در فرایند سونوکاتالیستی حضور نانوذره اکسید روی دارای مزایایی مانند اکسیداسیون قوی، تجزیه ترکیبات آلی نسوز و راندمان بالا می باشد و برای حذف رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ از پساب صنعت نساجی توصیه می گردد. همچنین برای مهار و از بین بردن سویه باکتری مقاوم می تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

واژه های کلیدی: ضدباکتریایی ،سونوکاتالیستی ، نانوذرات اکسید روی، راکتیو قرمز ۱۹۸

نویسنده مسئول: مبین یاسینی خراسان شمالی-شهرستان بجنورد-دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی
E-mail : yasinimobin18@gmail.com تلفن: ۰۹۱۰۳۲۹۴۷۱۰

۱. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران.
۲. دانشجوی کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵ **اصلاح:** ۱۴۰۵/۰۲/۱۹ **پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

Copyright©2026, Asadzadeh et al.This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

مقدمه

تأمین آب سالم به عنوان عنصری حیاتی برای بقای بشر، همواره چالشی بنیادین بوده است(۱). در دهه‌های اخیر، گسترش بی‌وقفه فعالیت‌های صنعتی، منابع آبی را با آلودگی‌های جدی مواجه ساخته است(۲). یکی از اصلی‌ترین منابع ورود آلاینده‌ها به این منابع، صنایع رنگرزی و نساجی است که توسعه چشم گیری در سطح جهانی یافته‌اند. تخلیه پساب‌های حاوی رنگ نساجی به اکوسیستم‌های آبی، پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی به همراه دارد: از جمله کاهش نفوذ نور و مختل‌سازی فرآیند فتوسنتز، برهم زدن تعادل اکولوژیکی آب‌های پذیرنده، و در نهایت انقراض پوشش گیاهی و جانوری. لذا، دستیابی به روش‌های تصفیه مؤثر و پایدار برای این نوع فاضلاب‌ها به یک الزام زیست‌محیطی تبدیل شده است(۳). سالانه بیش از ۷۰،۰۰۰ تن رنگ در سراسر جهان تولید می‌شود که بخش قابل توجهی از آن از طریق پساب‌های صنعتی وارد محیط می‌شود. برآوردها نشان می‌دهد که تقریباً ۵۰ درصد از رنگ‌های راکتیو مصرفی در فرآیندهای نساجی، به دلیل عدم تثبیت کامل، از طریق جریان پساب به محیط زیست راه می‌یابند(۴). ویژگی بارز این رنگ‌ها، یعنی پایداری شیمیایی بالا ناشی از وجود حلقه‌های آروماتیک در ساختار مولکولی آن‌ها، باعث می‌شود که در برابر روش‌های تصفیه متداول، تجزیه‌پذیری زیستی ضعیفی از خود نشان دهند(۵). رنگ‌های راکتیو، به‌ویژه آن‌هایی که دارای گروه عاملی آزو (-N=N-) هستند، بزرگ‌ترین و پرکاربردترین دسته رنگ‌ها در صنایع نساجی محسوب می‌شوند؛ دلیل این امر، ارائه خواص رنگرزی مطلوب‌تر و تولید طیف وسیعی از رنگ‌های روشن است. حلالیت بالای این ترکیبات در آب، مسیر ورود آسان آن‌ها به فاضلاب‌های صنعتی را هموار می‌سازد(۶). به عنوان مثال، رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ که یک ترکیب آروماتیک آنیونی دارای بار منفی به دلیل حضور گروههای سولفونا (SO_3) است، کاربرد گسترده‌ای در بخش‌های چاپ و رنگ‌آمیزی دارد(۷). ساختار شیمیایی خاص این رنگ، که در دسته‌بندی آنتروکینون‌ها قرار می‌گیرد و پس از رنگزاهای آزو، از پرمصرف‌ترین رنگ‌ها در نساجی است که منجر به پایداری فوق‌العاده آن در محیط‌های طبیعی و ایجاد صدمات غیرقابل جبران در صورت تخلیه می‌شود(۸).

بر اساس الزامات سخت‌گیرانه مقررات زیست‌محیطی، توسعه روش‌های پیشرفته تصفیه ضروری است. فرآیندهای تصفیه مرسوم فاضلاب‌های نساجی معمولاً شامل مراحل فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و پس از آن فرآیند بیولوژیکی است. با توجه به حضور غلظت‌های متفاوتی از هیدروکربن‌های آروماتیک و آلیفاتیک سمی در این پساب‌ها که با روش‌های معمول به‌راحتی حذف نمی‌شوند، نیاز مبرمی به کارگیری فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته(AOPs) احساس می‌گردد(۹). انتخاب بهینه روش تصفیه باید بر اساس معیارهایی نظیر کاهش زمان فرآیند، سادگی عملیاتی، بازدهی بالا، سازگاری با محیط زیست و مقرون به صرفه بودن باشد (۱۰). در این میان، فرآیند سونو شیمیایی به عنوان یک رویکرد ترکیبی که امواج فراصوت را با واکنش‌های شیمیایی در هم می‌آمیزد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مزیت اصلی این روش، علاوه بر عملکرد مناسب در دمای محیط و اجتناب از مواد شیمیایی زیان‌آور، هم‌افزایی مثبت میان سازوکارهای فیزیکی (مانند بهبود انتقال جرم و تلاطم لایه‌های مرزی ناشی از فراصوت) و سازوکارهای شیمیایی (افزایش نرخ تولید رادیکال‌هایی نظیر هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$) و سولفات ($SO_4^{\cdot-}$) است(۱۱). از دیگر مزایای فرایند سونوکاتالیستی می‌توان به استفاده از این فرایند برای فاضلاب‌هایی که توانایی نفوذ نور در آن‌ها کم است (مانند فاضلاب صنایع رنگرزی) اشاره کرد. در چنین فاضلاب‌هایی، نفوذ امواج فرا صوت تا عمق ۳۰- ۲۵ سانتیمتر قابل ملاحظه است، بنابراین امواج فرا صوت می‌تواند به عنوان یک گزینه جهت تولید رادیکال هیدروکسیل استفاده شود(۱۲). رادیکال‌های هیدروکسیل، به عنوان قوی‌ترین اکسنده‌ها در فرایند سونوشیمیایی، با افزودن کاتالیست‌ها یا مواد شیمیایی مانند H_2O_2یا ازن، نرخ تولیدشان به شدت افزایش می‌یابد(۱۱). نانوذرات اکسید روی (ZnO) به عنوان نیمه‌رسانای کاتالیستی، به دلیل غیر سمی بودن، شکاف باند وسیع، پایداری مکانیکی و شیمیایی مطلوب، کاتالیست بسیار مناسبی در فرآیندهای سونوکاتالیستی تلقی می‌شوند(۱۳). نانوذرات اکسید روی به دلیل دارا بودن انرژی شکاف پیوندی ۳/ ۲ev هزینه کمتر و همچنین عملکرد بهتر آن یا برای تخریب چندین آلاینده آلی در هر دو محیط بازی و اسیدی

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

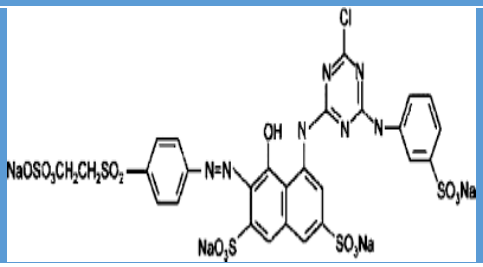
ترجیح داده می شود(۱۴). علاوه بر کارایی کاتالیستی، نانوذرات ZnO به دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، با مولکول‌های زیستی مهم درون سلول‌های باکتریایی برهمکنش قوی برقرار کرده و اثرات ضدباکتریایی قابل توجهی را نشان می‌دهند. مکانیسم‌های احتمالی شامل آسیب به غشای سلولی، تغییر در اجزای لیپیدی دیواره سلولی، یا القای استرس اکسیداتیو از طریق گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) است که در نهایت منجر به از کار افتادگی و غیرفعال‌سازی میکروبی می‌شود(۱۵). همچنین، تلفیق امواج اولتراسونیک (US)با اکسیدان پراکسی‌مونو سولفات (PMS) در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، برای تصفیه آلاینده‌های مختلف با موفقیت به کار رفته است(۱۶). پراکسی منوسولفات مزایایی نظیر حلالیت کامل در آب، دسترسی تجاری، پایداری بالا، عدم نیاز به انتقال فاز، هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر و عدم تولید لجن در مراحل تصفیه را داراست(۱۷). لذا، هدف اصلی این پژوهش، تخریب رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ از محلول‌های آبی با بهره‌گیری از فرآیند ترکیبی اکسیداسیون سونوکاتالیستی (US/PMS/ZnO) است و به طور همزمان، فعالیت ضدباکتریایی نانوذرات ZnO نیز به منظور بررسی کارایی دوگانه آن‌ها در کاربردهای پاکسازی محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مصرفی

رنگ راکتیو قرمز۱۹۸ مورد استفاده در این مطالعه، محصول شرکت دای استار (Dye star) آلمان بوده و از شرکت نساجی یزدباف تهیه گردید. ساختار شیمیایی راکتیو قرمز ۱۹۸ در **جدول شماره ۱** آورده شده است(۱). مواد مصرفی هیدروکسید سدیم(NaOH، ۹۸درصد) و اسید سولفوریک (H_2SO_4، ۹۹/۹۹درصد) و پراکسی منوسولفات (PMS)از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. نانو ذرات اکسید روی با درجه خلوص آزمایشگاهی از شرکت فاین نانو خریداری شد که آزمایش میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscopy:TEM) و طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش (Ultraviolet and Visible Spectroscopy:UV-vis) در آزمایشگاه‌های دانشگاه تربیت مدرس بر روی پودر نانو ذرات اکسید روی انجام گرفت. تمام محلول‌ها با استفاده از آب یونیزه شده تهیه شد. pH محلول نیز با افزودن محلول‌های اسید سولفوریک و سود تنظیم شد.

جدول ۱: مشخصات و ساختار شیمیایی رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸

فرمول شیمیایی	$C_{۲۷}H_{۱۸}C_{۱}N_{۷}NA_{۴}O_{۱۵}S_{۵}$
نوع رنگ	آنیونی
وزن مولکولی	۹۶۷/۵ g/mol
نام تجاری	Remazol Red 133
طول موج جذب	۵۱۸ nm
ساختار مولکولی	

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

روش آزمایش

در این مطالعه آزمایشی برای تعیین شرایط بهینه حذف رنگ راکتیو قرمـز۱۹۸ در دمای اتاق (۲۵±۱درجه سلسیوس)صورت گرفت. در ابتدا محلول استوک ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر راکتیو قرمـز۱۹۸ به صورت هفتگی ساخته شد و سایر نمونه ها از محلول استوک تهیه شدند. از اسید سولفوریک و سود با استفاده از دستگاهpH متر (مدل HANNAساخت کشور رومانی) برای تنظیم pH محلول استفاده گردید. همچنین امواج اولتراسوند توسط دستگاه اولتراسونیک با فرکانس ۳۷ کیلوهرتز و توان ۵۰۰ وات Elma)، ساخت آلمان) تولید شد. سپس محلول‌های مورد نظر با استفاده از محلول استوک در یک ظرف شیشه‌ای به حجم ۲۰۰ میلی لیتربه عنوان راکتور تهیه شدند. به منظور تعیین اثر متغیرهای مستقل دوز نانو ذره اکسید روی (۰,۱ ,۰,۵ ,۱ , ۲ , ۴ گرم در لیتر)، پراکسی منوسولفات (۵،۱۵،۳۰،۶۰،۹۰ میلی‌گرم در لیتر pH (۴،۷،۱۰) غلظت رنگ، (۱۵، ۴۵، ۶۰، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و زمان تماس (۴۵-۰دقیقه) و توان ۵۰۰ وات بر روی متغیر وابسته (تغییرات غلظت رنگ راکتیو قرمـز۱۹۸) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.برای بررسی تأثیر مقادیر مختلف پارامترهایpH،غلظت رنگ، دوز نانوذره و دوز اکسیدان پراکسی منوسولفات، آزمایش‌ها با تاثیر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها در دو مرحله تکرار شد(۱۸). برای انجام آزمایشات، ۱۰میلی لیتر از نمونه در فواصل زمانی معین از راکتور برداشته و به منظور حذف نانو ذرات، محلول با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه (Heidelberg Runne) به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید.غلظت ۱۹۸ RRبا استفاده از یک اسپکتروفتومتر Vis-UV در طول موج ۵۱۸ نانومتر اندازه‌گیری شد. Rراندمان حذف رنگ (درصد) بر اساس فرمول زیر محاسبه شد. که در این فرمول C_0 و C_tبه ترتیب غلظت اولیه و نهایی رنگ در زمان صفر و t می‌باشد (۳).

$R=C_0-C_t/C_0$ درصد

تعیین خواص ضدباکتریایی نانوذرات اکسید روی

برای بررسی اثر ضدمیکروبی نانوذرات از روش ماکرو دیلوشن براث طبق استاندارد موسسه استاندارد بالینی و آزمایشگاهی (CLSI) استفاده شد(۱۹). .بدین منظور سویه های میکروبی استاندارد اشریشیا کلی(ATCC 11303) سودوموناس آئروژینوزا (ATCC342) استافیلوکوکوس اورئوس (ATCC 6538) و باسیلوس سرئوس (ATCC 12817)از سازمان پژوهش های علمی صنعتی ایران (IROST)تهیه شدند(**جدول ۲**).

جدول ۲:سویه‌های میکروبی استاندارد مورد استفاده در این مطالعه

شماره	نام میکروب	شماره کلکسیون کشت های میکروبی نوع فارسی	طبقه بندی گرم
۱	انتروکوکوس فکالیس	۱۲۳۷	مثبت
۲	پسودوموناس آئروژنز	۱۶۰۳	منفی
۳	اشرشیا کلی	۱۵۵۲	منفی
۴	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۴۳۱	مثبت

ابتدا برای تعیین حداقل غلظت بازدارندگی و حداقل غلظت کشندگی نانوذرات، ده لوله حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات (۴۰۰, ۲۰۰, ۱۰۰, ۵۰, ۲۵, ۱۲/۵, ۶/۲۵, ۳/۱۲, ۱/۵۶، ۰/۷۸ میکرو گرم بر میلی لیتر) آماده گردید. از کشت یک روزهٔ سویه باکتریایی مورد نظر در محیط کشت مولر هینتون آگار، سوسپانسیون سلولی با کدورت نیم مک فارلند تهیه شد. سپس به هر لوله یک میلی لیتر اضافه شد و در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت انکوباسیون شدند. بعنوان کنترل مثبت یک لوله تنها حاوی مولر هینتون و کشت باکتریایی انکوباسیون شدند. برای کنترل منفی و اطمینان از استریل بودن روش کار مورد استفاده در این مطالعه و استریل بودن سوسپانسیون نانوذرات، یک میلی لیتر از محیط مولر

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

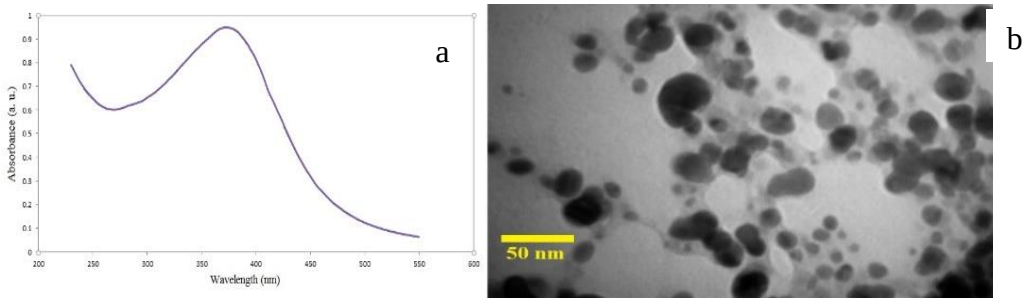
هینتون براث به داخل یک لوله و یک میلی لیتر از محیط مولر هینتون براث و نانوذرات با غلظت ۰/۵میکروگرم بر میلی لیتر به لوله دیگری اضافه شد. بعد از ۲۴ ساعت انکوباسیون، لوله‌های حاوی محیط باکتریایی با تابش غیرمستقیم نورخورشید برای تست کدورت رشد باکتریایی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای اطمینان از مرگ سلول‌های باکتریایی و تخمین MIC، ۱۰۰ میکرولیتر از لوله‌های بدون کدورت گرفته شده و بر روی محیط کشت مولرهینتون آگار رشد می‌دهیم. میزان رشد باکتری‌ها در محیط کشت‌ها حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی بررسی شد. کمترین غلظتی از نانوذرات که از رشد باکتری جلوگیری کرد به عنوان حداقل غلظت بازدارندگی (MIC)و کمترین غلظتی که تمام سلول‌های باکتریایی را از بین برد به عنوان حداقل غلظت کشندگی (MBC) محاسبه گردید(۲۰). تستها به صورت دو بار تکرار انجام شد و نتایج این مطالعه با آنالیز واریانس یکطرفه (ANOVA)توسط نرم افزار SPSS ورژن ۲۲ (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). تحلیل و تجزیه شد.

یافته ها

۳-۱ -تعیین مشخصات نانوذره اکسید روی

در **شکل (1.a)** طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش (UV-Vis) نانوذرات اکسید روی استفاده شده در مطالعه را نشان داده است. در آنالیزUV-Vis ، پیک جذب مشاهده شده در ۳۸۰-۳۶۰ نانومتر، تشکیل نانوذرات اکسید روی را تأیید می‌کند(۲۱). برای شناسایی شکل و اندازه نانوذرات اکسید روی از یک میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد. **شکل 1. b** نشان می‌دهد که اندازه ذرات ۵۰ نانومتر بود.

علاوه بر این، به جز پیک مشخصه، پیک دیگری در طیف مشاهده نشد که نشان می‌دهد نانوذرات اکسید روی استفاده شده دارای خلوص بالایی هستندو دارای توزیع اندازه ذرات مناسب می‌باشند. تصاویر همچنین نشان داد که نانوذرات اکسید روی تقریباً کروی و بیضی شکل بودند(۲۲).

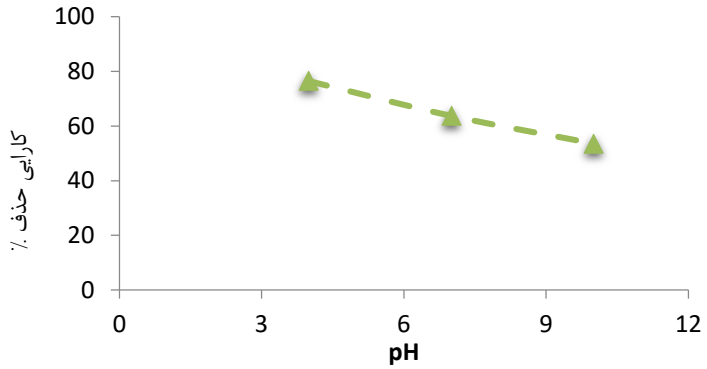


شکل ۱:تصاویر UV-vis (a) و TEM (b) نانوذرات اکسید روی

۳-۲ -بررسی تاثیر pH بر کارایی فرایند

تجزیه سونوکاتالیستی رنگ RR۱۹۸ در محدوده pH اسیدی، خنثی و بازی مطالعه شد. pH محلول‌های رنگ با سود و اسید سولفوریک یک دهم نرمال قبل از تابش امواج اولتراسوند تنظیم گردید. نتایج حاصل که در **شکل ۲** ارائه شده است، گویای آن است که اکسیداسیون و درصد حذف رنگ تحت تأثیر pH محیط بوده و بیشترین کارایی حذف برابر ۷۶/۴۸ درصد در pH بهینه برابر ۴ به دست آمد. بنابراین نتایج بیانگر آن است که با کاهش pH ، کارایی حذف رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ افزایش می‌یابد.

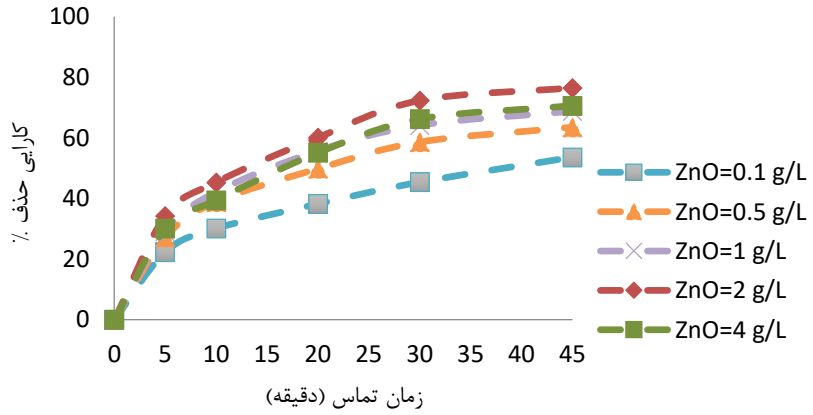
[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]



شکل ۲- اثر pH بر کارایی تخریب رنگ تحت شرایط غلظت کاتالیست۲ گرم برلیتر، پراکسی منوسولفات ۹۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت رنگ ۴۵ میلی گرم برلیتر

۳-۳ -بررسی تاثیر دوز نانوذره اکسید روی بر کارایی فرایند

مقدار کاتالیست یک پارامتر مهم در فرایند سونوکاتالیستی است. بـه منظـور سـنجش اثـر غلظت‌های اولیـه اکسـید روی از غلظت‌های مختلف اکسید روی بـه مقـدار ۰/۱، ۰/۵، ۱،۲،۴گرم در لیتر در یک غلظت ثابت رنگ و پراکسی منوسولفات ومحدوده pH اسیدی استفاده گردیـد. مطـابق **شـکل ۳** نتـایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان تجزیه رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ بـا افزایش بارگذاری کاتالیست از ۰/۱ به ۲ گرم در لیتر افزایش یافته است اما در غلظت‌های بالاتر کارایی حذف کاهش یافت. بنـابراین مقـدار ۲ گـرم در لیتـر، اکسید روی به عنوان غلظت بهینه انتخاب گردید.

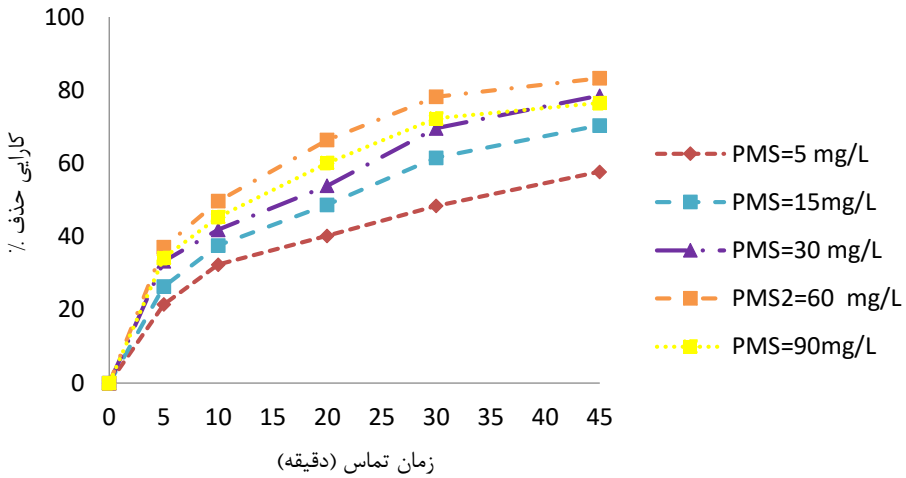


شکل ۳. بررسی تأثیر دوزکاتالیست ZnO بر کارایی فرایند تحت شرایط pH=۴، پراکسی منوسولفات ۹۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت رنگ ۴۵ میلی گرم برلیتر

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

۳-۴ -بررسی تاثیر غلظت پراکسی منوسولفات بر کارایی فرایند

به منظور بررسی غلظت‌های مختلف پراکسی منوسولفات، این ماده در غلظت‌های ۵ تا ۹۰ میلی گرم بر لیتر به محلول رنگزا اضافه گردید. افزودن پراکسی منوسولفات به محلول رنگزا، تا غلظت ۶۰ میلی گرم بر لیتر باعث افزایش سرعت واکنش در فرایند سونوکاتالیستی گردید. غلظت ۶۰ میلی گرم بر لیتر بعنوان غلظت بهینه انتخاب گردید و در غلظت بالاتر کارایی حذف کاهش یافت **شکل(۴)**.

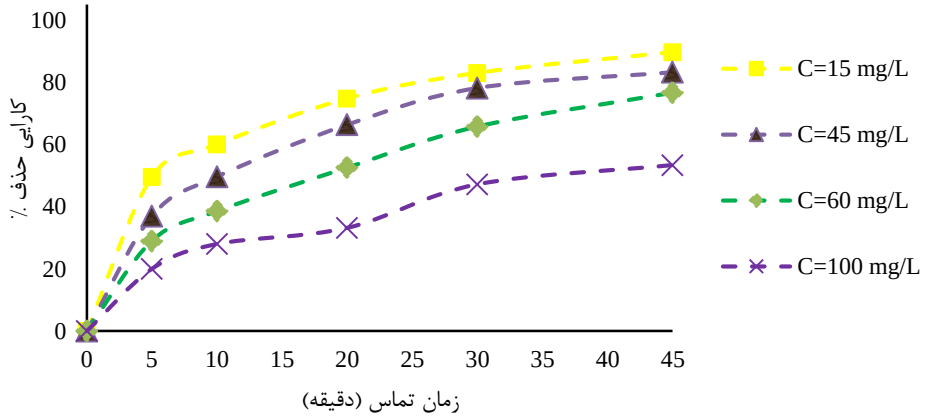


شکل ۴: بررسی تاثیر غلظت پراکسی منوسولفات بر کارایی فرایند تحت شرایط pH=4، غلظت نانوذره اکسید روی ۲ گرم بر لیتر، غلظت رنگ ۴۵ میلی گرم برلیتر

۳-۵ -بررسی تاثیر غلظت اولیه رنگ بر کارایی فرایند

به منظور بررسی غلظت‌های مختلف رنگ بر روی راندمان حذف آن، غلظت‌های ۱۵،۴۵،۶۰ و ۱۰۰ میلیگرم در لیتر راکتیو قرمز ۱۹۸ مورد مطالعه قرار گرفت. برای دستیابی به غلظت بهینه راکتیو قرمز ۱۹۸، از شرایط بهینه pH و کاتالیزور و اکسیدان به دست آمده از مراحل قبل به همراه غلظت‌های مختلف رنگ استفاده گردید. همانگونه که شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش غلظت اولیه رنگ از ۱۵ تا ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، سرعت رنگبری کاهش می‌یابد لذا غلظت ۱۵ میلی گرم بر لیتر دارای بالاترین راندمان می‌باشد و غلظت بهینه انتخاب گردید. **شکل (۵)**

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]



شکل ۵: بررسی تاثیر غلظت رنگ بر کارایی فرایند تحت شرایط pH =۴، غلظت نانوذره اکسید روی ۲ گرم بر لیتر، غلظت پراکسی منوسولفات ۶۰ میلی گرم برلیتر

۳-۶ -تعیین خواص آنتی باکتریال نانوذرات اکسیدروی:

جدول ۳ نتایج حاصل از خاصیت آنتی باکتریال نانوذرات اکسیدروی بر روی سویه‌های باکتری گرم منفی و گرم مثبت را نشان می‌دهد.

جدول۳:نتایج تست‌های ضدباکتریایی نانوذرات اکسیدروی

سویه باکتری	حداقل غلظت بازدارندگی از رشد(µg/mL)	حداقل غلظت کشنده (µg/mL)
اشرشیا کلای	۰/۱۲۵	۰/۵
استافیلو کوکوس اورئوس	۰/۰۶	۰/۲۵
باسیلوس سرئوس	۰/۰۶	۰/۲۵
سودوموناس آئروژینوزا	۰/۱۲۵	۰/۵

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

بحث

فاضلاب‌های نساجی معمولاً دارای دامنه وسیعی از pHهستند. پارامتر pHنقشی حیاتی در مشخصات کیفی پساب نساجی ایفا کرده و مستقیماً بر تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$)و سولفات ($SO^{\cdot-}_4$) تأثیرگذار است. به طور خاص، pHمحیط به عنوان یک عامل کنترلی مهم در واکنش‌های سونوکاتالیستی سطح-ذره عمل کرده و سرعت واکنش‌های شیمیایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دلیل این امر، تأثیرگذاری pHبر بار سطحی ذرات کاتالیست است. نتایج تجربی حاکی از آن است که با کاهش مقدارpH، کارایی حذف رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ به طور مشهودی افزایش می‌یابد. در شرایط اسیدی غلظت پایینpH، ممکن است احیای مستقیم توسط الکترون‌های موجود در باند هدایت نقش مهمی در تجزیه مولکول رنگ ایفا کند که منجر به ایجاد شکاف‌های احیاکننده در پیوندهای آزو می‌شود(۲۳). از سوی دیگر، تأثیر pHبر فرآیند حذف، شدیداً وابسته به نقطه بار خنثی کاتالیزور (pH_{zpc})و ماهیت آلاینده است؛ این وابستگی، تعاملات الکترواستاتیکی بین سطح کاتالیست و مولکول‌های رنگ را (به عنوان آلاینده آنیونی) به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد،به طور مشخص، زمانی که pHمحلول ازpH_{zpc}کمتر شود، بار سطحی نانوذرات ZnO مثبت شده و این وضعیت، جذب الکترواستاتیکی قوی‌تری را برای مولکول‌های رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ که دارای بار منفی هستند، فراهم می‌آورد(۲۴). برعکس، درpH های بالاتر ازpHzpc، بار سطح ZnO منفی شده و افزایش غلظت یون‌های منفی، منجر به نیروی دافعه بین کاتالیست و مولکول‌های رنگ شده و در نتیجه، بازده حذف کاهش می‌یابد(۲۵). در مطالعه ای که جهانگیری و همکاران روی رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بالاترین درجه از رنگزدایی که منجر به حذف ۹۸درصد رنگ شد درpH برابر با ۴ مشاهده شد که به جاذب الکترواستاتیک بین سطح مثبت کاتالیست و آنیون راکتیو قرمز نسبت داده میشود(۲۵). بهبود راندمان حذف رنگ با افزایش غلظت نانوذرات به این دلیل است که تعداد سایت‌های فعال (Active Sites) بر روی سطح کاتالیست افزایش یافته و سطح دسترسی برای جذب آلاینده میسر می‌شود. این یافته با نتایج پژوهش معصوم‌بیگی و همکاران همخوانی دارد(۲۶). افزایش دوز کاتالیست تا حد بهینه، موجب افزایش تولید جفت حفره‌های الکترونی و رادیکال‌های هیدروکسیل شده و پیشرفت سونوکاتالیست را تسریع می‌بخشد؛ یعنی با افزایش سطح فعال کاتالیست، نرخ رنگ‌بری نیز افزایش می‌یابد. با این حال، کاهش کارایی حذف در دوزهای بیش از حد بهینه محتمل است؛ این پدیده معمولاً به دلیل کدورت ایجاد شده توسط خوشه‌های نانوذرات رخ می‌دهد که نفوذ امواج اولتراسوند را تضعیف کرده و اثرات پراکندگی امواج را افزایش می‌دهد(۲۷). نتایج مطالعه Chen نیز مشابه این موضوع را در فتوکاتالیستی تأیید می‌کند: افزایش غلظت کاتالیست اکسید روی، ابتدا به دلیل افزایش سطوح فعال و تولید بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل و سوپراکسید منجر به بهبود تجزیه می‌شود، اما غلظت‌های بالاتر از حد بهینه، به واسطه افزایش کدورت و تداخل در نفوذ نور، باعث افت راندمان تجزیه می‌گردد(۲۸). همانطور که نتایج نشان داد در فرایندسونوکاتالیستی، افزودن پراکسی منوسولفات در مقدار بهینه باعث افزایش سرعت واکنش می‌شود. در حالی که افزودن بیش از مقدار بهینه پراکسی منوسولفات باعث کاهش کارایی راندمان حذف می‌گردد.

اکسیدان PMS دو نقش اساسی در افزایش میزان تخریب دارد:

اول، سولفات تولید شده روی سطح ZnO ناشی از PMS تحت امواج اولتراسوند مستقیماً مولکول‌های راکتیو قرمز ۱۹۸ را تجزیه می‌کند. دوم، HSO^-_5 به عنوان یک گیرنده الکترون عمل می‌کند و بازترکیب جفت الکترون-حفره را مهار می‌کند و اجازه می‌دهد OH بیشتری تولید شود(۲۹). افزودن پراکسی منوسولفات به محلول رنگزا، باعث افزایش غلظت رادیکال‌های سولفات فعال در محلول می‌گردد در نتیجه سرعت واکنش اکسیداسیون سونوکاتالیستی نیز افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که پراکسی منوسولفات در غلظت‌های بالاتر از مقدار بهینه به عنوان یک مداخله گر عمل کرده و با رادیکال‌های هیدروکسیل و سولفات تشکیل شده در محیط مایع وارد واکنش شده و از حمله آنها به مولکول‌های رنگزا جلوگیری می‌کند. درمطالعه اسدزاده و همکاران که برروی حذف مواد آلی انجام دادند، نتایج نشان داد با افزودن پراکسی منوسولفات در حضور امواج اولتراسونیک مشاهده شد که افزودن پراکسی

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

منوسولفات به راکتور باعث افزایش کارایی تجزیه می‌گردد(۳۰). با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، با افزایش غلظت اولیه رنگ، کارایی کلی حذف کاهش می‌یابد. این کاهش بدین دلیل رخ می‌دهد که در غلظت‌های بالاتر، تعداد مولکول‌های رنگی که روی سطح کاتالیست جذب می‌شوند بیشتر است؛ این امر کاهش تماس مستقیم بین رادیکال‌ها و مولکول‌های رنگ مادر، کاهش نفوذ امواج اولتراسونیک، و در نتیجه کاهش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را در پی دارد. همچنین، پوشیده شدن کامل سایت‌های فعال کاتالیست توسط یون‌های رنگ در غلظت‌های بالا، تولید رادیکال‌ها را محدود می‌سازد. با ثابت ماندن غلظت کاتالیست و شدت تابش، تعداد رادیکال‌های تولیدی ثابت است، در نتیجه سرعت رنگ‌بری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش غلظت اولیه رنگ منجر به افزایش محصولات واسطه تجزیه شده و احتمال رقابت این مواد واسطه با مولکول‌های رنگ مادر برای واکنش با رادیکال‌ها وجود دارد(۵). این پدیده در مطالعات فتوکاتالیستی Chen نیز تأیید شده است که با افزایش غلظت اولیه آلاینده، میزان حذف به دلیل اشغال سطوح فعال کاتالیست، کاهش می‌یابد(۲۸). نتایج نشان داد که نانوذرات دارای اثر ضد باکتریایی بر روی باکتری‌های مورد آزمایش داشته وحتی در غلظت کم حتی از رشد آنها جلوگیری می‌کند. همچنین نتایج بیانگر این موضوع است که اثر نتایج حاصل از MBC و MIC گذاری بر روی اشرشیاکلی و سودوموناس آئروژینوزا در غلظت‌های بالاتر نانوذرات اکسیدروی می‌باشد و باکتری استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سرئوس در غلظت‌های پایین‌تر نانوذرات اکسیدروی نسبت به آن واکنش نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج می‌توان بیان کرد که باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سرئوس مقاومت کمتری را در مقابل نانوذرات اکسیدروی دارند (31).مکانیسم مشخص و تعیین شده‌ای برای عملکرد این نانو ذرات در مقابل باکتری‌ها وجود ندارد. تاکنون مکانیسم‌های متعددی برای این منظور پیشنهاد شده است که به صورت برهم کنش‌های فیزیکی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی بین نانوذرات اکسیدروی و باکتری‌ها می‌باشد. نانو ذره اکسیدروی پتانسیل غشایی پلاسما را ناپایدار می‌کند که نتیجه آن کاهش سطح آدنوزین تری فسفات درون سلول می‌باشد این عمل با هدف قرار دادن غشاء سلول باکتری انجام می‌شود و باعث مرگ باکتری می‌گردد. نانو ذرات اکسیدروی موجب از هم گسستن اجزای ممانعت کننده موجود در غشاء خارجی باکتری می‌شود که باعث آزاد شدن تصاعدی مولکول‌هایی نظیر لیپو پلی ساکارید و پورین‌ها از غشاء سیتو پلاسمی می‌شود(۳۲). همچنین نانو اکسیدروی فقط به سطح غشاء سلولی نمی‌چسبد بلکه به درون سلول‌ها هم نفوذ می‌کند. نانو اکسیدروی پس از نفوذ به داخل سلول باکتری آنزیم‌های آن را غیر فعال کرده و با تولید هیدروژن پراکسید باعث مرگ باکتری می شودو نیز نانو ذرات اکسیدروی بعد از چسبیدن به سطح غشاء سلولی، سیستم تنفسی را به صورت برهمکنش آنزیم با زنجیره تنفسی باکتری با Zn^{2+} تخریب می‌کنند(۳۳).

Andradeوهمکاران نانوذرات اکسید روی را به کمک امواج اولتراسونیک سنتز کردند و خواص ضدباکتریایی آن را بر روی باکتریهای اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند باکتری استافیلوکوکوس اورئوس در مقایسه با اشرشیاکلی حساسیت بیشتری را در مقابل نانوذرات اکسید روی دارند همچنین خواص ضدباکتریایی نانوذرات به شکل و اندازه آنها بستگی دارد(۱۵).

نتیجه گیری

از نتایج مطالعهٔ حاضر چنین نتیجه گیری می‌شود که بکارگیری نانوذرات اکسیدروی در فرایند سونوکاتالیستی توام با امواج اولتراسونیک و اکسیدان پراکسی منوسولفات می‌تواند به نحوی موثر و کارآمد جهت حذف رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار بگیرد. درصد حذف رنگ تابع مقدار غلظت اولیهٔ رنگ، غلظت اکسیدان، کاتالیست و pH می‌باشد. هم چنین این کاتالیست قادر به حذف ۸۹/۶۹درصد رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ از محلول‌هایی با غلظت اولیه رنگ ۱۵ میلی گرم در لیتر، pH=۴، غلظت نانوذره اکسید روی ۲ گرم بر لیتر، غلظت پراکسی منوسولفات ۶۰ میلی گرم برلیتر می‌باشد. علاوه بر این نانوذرات اکسید روی، علاوه بر خاصیت سونوکاتالیستی برای تخریب الاینده دارای خاصیت ضدباکتریایی بالایی در غلظت‌های پایین دارا می‌باشد. این نانوذرات می‌توانند برای مهار و ازبین بردن باکتری‌های گرم

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

مثبت و منفی و دیگر سویه‌های مقاوم باکتری‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

تشکروقدردانی: این مطالعه توسط دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی حمایت شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از تمام کسانی که در انجام این پژوهش آنان را یاری کردند، تقدیر و تشکر کنند.

تاییدیه اخلاق ورضایت برای شرکت: این مطالعه مطابق با موازین مندرج در بیانیه‌ی هلسینکی انجام شده است. این مقاله حاصل طرح مصوب دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی با کد. اخلاق IR. KUMS.REC.1402.068 می‌باشد.

افشای مالی: این مطالعه، مستخرج از طرح تحقیقاتی کمیته تحقیقات دانشجویی بوده و تحت حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی بجنورد قرار گرفته است(۴۰۱۰۱۹۲).

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می دارند هیچگونه تعارض منافعی در این پژوهش وجود ندارد.

دردسترس بودن داده هاومطالب: داده ها و مطالب پژوهش حاضر از طریق ارتباط با نویسنده مسئول قابل دستیابی می باشد.

رضایت انتشار: کاربرد ندارد

مشارکت نویسندگان: همه نویسندگان سهم قابل توجهی در پژوهش در بخش های طراحی، انجام آزمایشات ، تحلیل، تفسیر داده ها داشته و موافقت خود را با نسخه نهایی اعلام کردند. سیده نسترن اسدزاده: مدیریت پروژه، راهنمای علمی و ویرایش متن نهایی؛ مبین یاسینی: انجام آزمایشات و نگارش پیش نویس و تحلیل روش ها؛ محدثه حیدری: گرداوری داده ها و تفسیر نتایج نهایی. همچنین تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه، تأیید و مسئولیت صحت و اند یکپارچگی محتوای آن را پذیرفته اند.

References

1. Haffad H, Zbair M, Anfar Z, Ait Ahsaine H, Bouhlal H, Khallok H. Removal of reactive red-198 dye using chitosan as an adsorbent: optimization by central composite design coupled with response surface methodology. Toxin Rev. 2021;
2. Kamani H, Hosseinzehi M, Ghayebzadeh M, Azari A, Ashrafi SD, Abdipour H. Degradation of reactive red 198 dye from aqueous solutions by combined technology advanced sonofenton with zero valent iron: Characteristics/effect of parameters/kinetic studies. Heliyon. 2024;10(1).
3. Moussavi G, Mahmoudi M. Degradation and biodegradability improvement of the reactive red 198 azo dye using catalytic ozonation with MgO nanocrystals. Chem Eng J. 2009;152(1):1–7.
4. Malakootian M, Smith Jr A, Gharaghani MA, Mahdizadeh H, Nasiri A, Yazdanpanah G. Decoloration of textile Acid Red 18 dye by hybrid UV/COP advanced oxidation process using ZnO as a catalyst immobilized on a stone surface. Desalin Water Treat. 2020;182:385–94.
5. Mirzapour P, Kamyab Moghadas B, Tamjidi S, Esmaeili H. Activated carbon/bentonite/Fe3O4 nanocomposite for treatment of wastewater containing Reactive Red 198. Sep Sci Technol. 2021;56(16):2693–707.
6. Arshad R, Bokhari TH, Javed T, Bhatti IA, Rasheed S, Iqbal M, et al. Degradation product distribution of Reactive Red-147 dye treated by UV/H2O2/TiO2 advanced oxidation process. J Mater Res Technol. 2020;9(3):3168–78.
7. Oke N, Mohan S. Development of nanoporous textile sludge based adsorbent for the dye removal from industrial textile effluent. J Hazard Mater. 2022;422:126864.
8. Tang X, Ran G, Li J, Zhang Z, Xiang C. Extremely efficient and rapidly adsorb methylene blue using porous adsorbent prepared from waste

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

paper: Kinetics and equilibrium studies. J Hazard Mater. 2021;402:123579.
9. Asgher M, Bhatti HN. Evaluation of thermodynamics and effect of chemical treatments on sorption potential of Citrus waste biomass for removal of anionic dyes from aqueous solutions. Ecol Eng. 2012;38(1):79–85.
10. Mahmoodi A, Mehdinia SM, Rahmani A, Nassehinia H. Investigation efficiency of nano photocatalytic compound of TiO2 and rice husk silica in removal of reactive red 198 dye from synthetic aqueous solutions. Iran J Catal. 2020;10(1).
11. Asgari G, Shabanloo A, Salari M, Eslami F. Sonophotocatalytic treatment of AB113 dye and real textile wastewater using ZnO/persulfate: Modeling by response surface methodology and artificial neural network. Environ Res. 2020;109367.
12. Hossein K, Simin N, Ramin N, Mehdi K, Seyed Davood A, Idris B, et al. Sonocatalytic oxidation of reactive blue 29 dye by N-doped TiO2 nanoparticles from aqueous medium. 2018.
13. Aliannezhadi M, Doost Mohamadi F, Jamali M, Shariatmadar Tehrani F. Ultrasound-assisted green synthesized ZnO nanoparticles with different solution pH for water treatment. Sci Rep. 2025;15(1):7203.
14. Bashir M, Majid F, Bibi I, Mushtaq J, Ali A, Farhat LB, et al. Ultrasonic assisted synthesis of ZnO nanoflakes and photocatalytic activity evaluation for the degradation of methyl orange. Arab J Chem. 2022;15(11):104194.
15. Andrade-Guel M, Ávila-Orta CA, Cabello-Alvarado C, Cadenas-Pliego G, Esparza-González SC, Pérez-Alvarez M, et al. Non-woven fabrics based on nanocomposite nylon 6/ZnO obtained by ultrasound-assisted extrusion for improved antimicrobial and adsorption methylene blue dye properties. Polymers (Basel). 2021;13(11):1888.
16. Gujar SK, Divyapriya G, Gogate PR, Nidheesh P V. Environmental applications of ultrasound activated persulfate/peroxymonosulfate oxidation process in combination with other activating agents. Crit Rev Environ Sci Technol. 2023;53(6):780–802.
17. Lee Y, Lee S, Cui M, Ren Y, Park B, Ma J, et al. Activation of peroxodisulfate and peroxymonosulfate by ultrasound with different frequencies: Impact on ibuprofen removal efficient, cost estimation and energy analysis. Chem Eng J. 2021;413:127487.
18. Yousef Dash, Reza M, Morteza K, Hassan P, Mojgan Z. Mineralization of Reactive Red 198 Dye by Advanced Integrated Oxidation Process from Colored Wastewaters Using the Central Cube Design Method. 2021.
19. El-Telbany M, Mohamed AA, Yahya G, Abdelghafar A, Abdel-Halim MS, Saber S, et al. Combination of meropenem and zinc oxide nanoparticles; antimicrobial synergism, exaggerated antibiofilm activity, and efficient therapeutic strategy against bacterial keratitis. Antibiotics. 2022;11(10):1374.
20. Hamed S, Emara M. Antibacterial and antivirulence activities of acetate, zinc oxide nanoparticles, and vitamin C against E. coli O157: H7 and P. aeruginosa. Curr Microbiol. 2023;80(2):57.
21. Melo MMM, Rocha EMR, Silva EL. Solar heterogeneous photocatalysis (ZnO/UV) for textile dyes removal. Environ Qual Manag. 2018;28(1):65–71.
22. Moussavi G, Borghee M, Farzadkia M, Asl Ra. Decolorization and mineralization of reactive red 198 in saline water: performance comparison of photolysis, uv/tio 2, and uv/zno processes. Environ Eng Manag J. 2015;14(5).
23. Chaudhary K, Aadil M, Zulfiqar S, Ullah S, Haider S, Agboola PO, et al. Graphene oxide and reduced graphene oxide supported ZnO nanochips for removal of basic dyes from the industrial effluents. Fullerenes, Nanotub Carbon Nanostructures. 2021;29(11):915–28.
24. Peighambardoust SJ, Boffito DC, Foroutan R, Ramavandi B. Sono-photocatalytic activity of sea sediment@ 400/ZnO catalyst to remove cationic dyes from wastewater. J Mol Liq. 2022;367:120478.
25. Jahangiri, Mansour, Tavakoli, Omid, Alimohammadi, Mobina. Kinetic study of nanophotocatalytic reaction (ZnO-Ag-Zr) in the degradation of reactive red dyes (RR198). Applied Chemistry of Today. 2024;19(70):181–200.
26. Hossein MB, Abbas R, Akbar N. Photocatalytic degradation of methylene blue using zinc oxide nanoparticles. 2009.
27. Dihom HR, Al-Shaibani MM, Mohamed RMSR, Al-Gheethi AA, Sharma A, Khamidun MH Bin. Photocatalytic degradation of disperse

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]

azo dyes in textile wastewater using green zinc oxide nanoparticles synthesized in plant extract: A critical review. J Water Process Eng. 2022;47:102705.
28. Chen X, Wu Z, Liu D, Gao Z. Preparation of ZnO photocatalyst for the efficient and rapid photocatalytic degradation of azo dyes. Nanoscale Res Lett. 2017;12(1):143.
29. Kong L, Fang G, Fang Z, Zou Y, Zhu F, Zhou D, et al. Peroxymonosulfate activation by localized electrons of ZnO oxygen vacancies for contaminant degradation. Chem Eng J. 2021;416:128996.
30. Nima F, Nastaran S, Mahdieh O, Mohaddeseh B, Yeganeh B, Arefeh T. Investigation of the efficiency of sonophotocatalytic process using magnetic iron nanoparticles in the removal of ciprofloxacin from aqueous solutions. 2025.
31. Kadiyala U, Turali-Emre ES, Bahng JH, Kotov NA, Vanepps JS. Unexpected insights into antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles against methicillin resistant Staphylococcus aureus (MRSA). Nanoscale. 2018;10(10):4927–39.
32. Iqtedar M, Riaz H, Kaleem A, Abdullah R, Aihetasham A, Naz S, et al. Biosynthesis, optimization and characterization of ZnO nanoparticles using Bacillus cereus MN181367 and their antimicrobial activity against multidrug resistant bacteria. Rev Mex Ing química. 2020;19(Sup. 1):253–66.
33. Abebe B, Zereffa EA, Tadesse A, Murthy HCA. A review on enhancing the antibacterial activity of ZnO: Mechanisms and microscopic investigation. Nanoscale Res Lett. 2020;15(1):190.

[Downloaded from jhrd.trjums.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/jhrd.4.3.40]