

Assessment of Greywater Treatment Efficiency Using of Surface Adsorption with Iron oxide nanoparticles

Received: 13 March 2025, Accepted: 07 June 2025

Saeid Govahi¹, Ehsan Derikvand^{2*}, Saeb Khoshnavaz², Mohsen Solimani Babarsad², Iman Parseh³

¹ Department of Water Sciences, Sho.C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

² Research Center for Water Science and Environmental, Department of Water Sciences, Sho.C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

³Department of Environmental Health Engineering, Behbahan Faculty of Medical Sciences, Behbahan, Iran

***Corresponding Author:**
ehsan.derikvand@iau.ac.ir

How to Cite This Article:

Govahi S, Derikvand E, Khoshnavaz S, Solimani Babarsad M, Parseh I. Assessment of greywater treatment efficiency using of surface adsorption with iron oxide nanoparticles. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(2):189–203.

DOI:

ABSTRACT

Background: In recent years, the management and treatment of greywater have become critical environmental challenges due to the presence of non-biodegradable pollutants that conventional wastewater treatment methods fail to fully remove. This study aims to evaluate the efficiency of a hybrid approach combining adsorption using iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) and advanced chemical oxidation with UV/H₂O₂ for greywater treatment.

Materials and Methods: Greywater samples were first treated with Fe₃O₄ nanoparticles under optimized conditions: pH=5, contact time of 40 minutes, and adsorbent dosage of 1.2 g/L. Subsequently, UV/H₂O₂ oxidation was applied to enhance removal efficiency.

Results: Adsorption alone achieved removal efficiencies of 57% for COD, 36% for BOD, 7.5% for TKN, and 60% for TP. Following UV/H₂O₂ oxidation, COD removal increased to over 93%, reducing residual COD to 12.1 mg/L. The process showed optimal performance at lower pH levels 4 to 5, while H₂O₂ concentrations up to 7 mM improved oxidation efficiency without significant enhancement beyond this level.

Conclusion: The integration of physical adsorption and advanced oxidation not only overcomes the limitations of conventional methods but also meets environmental discharge standards. With high efficiency and relatively low operational costs, this dual-stage method offers a sustainable solution for greywater management in urban and industrial settings.

Keywords: Greywater, Hydrogen Peroxide, Ultraviolet, Treatment, Oxidation, SBR

مطالعه میزان تصفیه پذیری آب خاکستری با استفاده از جذب سطحی با نانوذرات آهن

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

سعید گواهی^۱، احسان دریکوند^{۲*}، صائب خوش نواز^۲، محسن سلیمانی بابرصاد^۲، ایمان پارسه^۳^۱ گروه مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران^۲ گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران^۳ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر، مدیریت و تصفیه آب خاکستری به یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی تبدیل شده است. وجود آلاینده‌های غیرقابل تجزیه بیولوژیکی در آب خاکستری، روش‌های متداول تصفیه را ناتوان از دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی می‌کند. هدف این مطالعه، ارزیابی کارایی تلفیق فرآیندهای جذب سطحی با نانوذرات Fe_3O_4 و اکسیداسیون UV/H_2O_2 در حذف آلاینده‌های آب خاکستری است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، نمونه آب خاکستری ابتدا تحت فرآیند جذب سطحی با نانوذرات Fe_3O_4 در شرایط بهینه شامل $pH=5$ ، زمان تماس ۴۰ دقیقه و غلظت ۱/۲ گرم بر لیتر قرار گرفت. پس از آن، مرحله اکسیداسیون UV/H_2O_2 جهت افزایش راندمان حذف آلاینده‌های مقاوم اعمال شد.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند که فرآیند جذب سطحی به تنهایی قادر به حذف $COD\ 57\%$ ، $BOD\ 36\%$ ، $TKN\ 7/5\%$ و $TP\ 60\%$ است. با اضافه کردن اکسیداسیون شیمیایی، راندمان حذف COD به بیش از 90% افزایش یافت. تغییرات pH تنها تأثیر جزئی بر حذف فسفات و نترات داشت، اما pH در محدوده ۴ تا ۵، عملکرد بهتری در حذف COD مشاهده شد. افزایش غلظت H_2O_2 تا ۷ میلی مولار راندمان اکسیداسیون را بهبود بخشید، اما مقادیر بالاتر اثر محسوسی نداشتند.

نتیجه‌گیری: تلفیق فرآیندهای جذب سطحی و اکسیداسیون پیشرفته می‌تواند محدودیت‌های روش‌های مرسوم را در تصفیه آب خاکستری برطرف کند. این رویکرد نوآورانه با کارایی بالا و هزینه‌های عملیاتی مناسب، می‌تواند الگویی پایدار برای مدیریت آب خاکستری در شرایط شهری و صنعتی مطرح شود.

واژه‌های کلیدی: آب اکسیژنه، اکسیداسیون، بیولوژیکی، تصفیه، خاکستری، فرابنفش

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

ehsan.derikvand@iau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

Govahi S, Derikvand E, Khoshnavaz S, Solimani Babarsad M, Parseh I. Assessment of greywater treatment efficiency using of surface adsorption with iron oxide nanoparticles. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(2):189–203.

DOI:

مقدمه

در سال‌های اخیر، مدیریت و تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی به چالشی جدی در حفظ منابع آب تبدیل شده است. آب خاکستری (Greywater) که از فعالیت‌های روزمره مانند شست‌وشو، دوش گرفتن و آشپزخانه ناشی می‌شود، یکی از منابع قابل بازیافت آب است که به دلیل حضور آلاینده‌های غیرقابل تجزیه بیولوژیکی، نیازمند روش‌های پیشرفته تصفیه است. این نوع فاضلاب معمولاً دارای مواد آلی پیچیده، فسفات، نیتрат و در برخی موارد فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم و جیوه است. این آلاینده‌ها نه تنها می‌توانند خطرات بهداشتی جدی برای انسان‌ها ایجاد کنند (مانند اختلال در عملکرد کبدی، کلیوی و سیستم عصبی)، بلکه در زنجیره غذایی تجمع می‌یابند و باعث یوتروفیکاسیون آب‌های سطحی می‌شوند.^{۱،۲}

پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانو تکنولوژی، استفاده از نانوذرات با خواص جذب سطحی بالا را برای تصفیه فاضلاب‌های پیچیده تسهیل کرده است. نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) به دلیل سطح ویژه بالا، قابلیت بازیابی مغناطیسی و پایداری شیمیایی، در حذف آلاینده‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، مطالعات قبلی نشان داده‌اند که روش‌های جذب سطحی به تنهایی قادر به دستیابی به استانداردهای دفع فاضلاب نیستند، زیرا نمی‌توانند آلاینده‌های مقاوم را کاملاً جذب کنند. برای مثال، مطالعه Gharloghi و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که استفاده از نانوذرات Fe_3O_4 در تصفیه فاضلاب شهری فقط ۵۰٪ از COD را حذف می‌کند، در حالی که تلفیق این روش با اکسیداسیون شیمیایی مانند UV/H_2O_2 می‌تواند راندمان حذف را به بیش از ۹۰٪ افزایش دهد.^{۳،۴}

در مقایسه با مطالعات قبلی، پژوهش حاضر به تکمیل چرخه تصفیه می‌پردازد: ابتدا آب خاکستری از فرآیند بیولوژیکی SBR عبور داده می‌شود، سپس تحت تیمار با نانوذرات Fe_3O_4 در شرایط بهینه قرار می‌گیرد، و در نهایت از اکسیداسیون UV/H_2O_2 برای حذف کامل آلاینده‌های

باقی‌مانده استفاده می‌شود. این رویکرد دوگانه نه تنها کارایی حذف را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد.^{۵،۶}

آب خاکستری به دلیل تنوع و مقاومت آلاینده‌های آن مانند مواد آلی پیچیده، فسفات، نیترات و فلزات سنگین، چالش‌های منحصر به فردی را برای تصفیه ایجاد می‌کند. آب خاکستری حاوی ترکیبات آلی متنوعی است که روش‌های بیولوژیکی مرسوم نمی‌توانند آنها را تجزیه کنند.^۶ بسیاری از آلاینده‌های آب خاکستری (مانند فلزات سنگین) در برابر روش‌های متداول تصفیه مقاوم هستند و نیازمند فناوری‌های پیشرفته‌ترند.^۷ فرآیندهای مرسوم تصفیه گاهی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند و نیازمند بهینه‌سازی هستند.^۸

روش‌های متداول تصفیه آب خاکستری شامل فرآیندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی است. فرآیندهای بیولوژیکی مانند SBR (Sequencing Batch Reactor) قادر به حذف مواد آلی و مواد غذایی هستند، اما در برابر آلاینده‌های مقاوم ناکارآمدند. فرآیندهای شیمیایی مانند اکسیداسیون شیمیایی UV/H_2O_2 می‌توانند آلاینده‌های مقاوم را تجزیه کنند، اما هزینه بالایی دارند. فرآیندهای فیزیکی مانند جذب سطحی با نانوذرات Fe_3O_4 کارایی خوبی در حذف فلزات سنگین دارند، اما نمی‌توانند تمام آلاینده‌ها را از بین ببرند.^۹ با این حال، مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تلفیق روش‌های جذب سطحی و اکسیداسیون شیمیایی می‌تواند محدودیت‌های فرآیندهای مرسوم را برطرف کند. به عنوان مثال، مطالعه Zazouli و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که استفاده از نانوذرات Fe_3O_4 در تلفیق با UV/H_2O_2 می‌تواند COD را تا ۹۵٪ حذف کند.^{۱۰}

تحقیق حاضر دو نوآوری اصلی دارد: ابتدا آب خاکستری از فرآیند SBR عبور داده شده، سپس تحت تیمار با نانوذرات Fe_3O_4 قرار می‌گیرد، و در نهایت از اکسیداسیون UV/H_2O_2 برای حذف کامل آلاینده‌های باقی‌مانده استفاده می‌شود. این رویکرد دوگانه باعث افزایش راندمان حذف

COD به بیش از ۹۰٪ می‌شود.^۴ در این پژوهش، شرایط بهینه مانند pH، زمان تماس و غلظت نانوذره برای حذف ماکزیمم آلاینده‌ها تعیین شده است. به عنوان مثال، نتایج نشان دادند که در pH برابر ۵ و غلظت ۱/۲ گرم بر لیتر نانوذره Fe₃O₄، راندمان حذف COD به ۵۷٪ و بعد از اکسیداسیون به ۹۰٪ افزایش می‌یابد.^۳ در نهایت، اهداف اصلی این پژوهش شامل بهینه‌سازی پارامترهای تصفیه برای حذف ماکزیمم آلاینده‌ها، ارزیابی تأثیر تلفیق جذب سطحی و اکسیداسیون UV/H₂O₂، تحلیل مقایسه‌ای نتایج با مطالعات مشابه و ارائه یک مدل قابل اجرا برای مدیریت پایدار آب خاکستری در شرایط شهری است.

مواد و روش‌ها

شناسایی و تهیه نانوذرات اکسید آهن

نانوذرات آهن (Fe₃O₄) خریداری شده از شرکت Finenano دارای شکل کروی، سطح ویژه بالا، اندازه ذرات نانویی (۱۰-۴۰ نانومتر)، خلوص بالا (بالای ۹۸٪) و مقاومت حرارتی بالا (نقطه ذوب ۵۹۷ درجه سانتیگراد) هستند. خواص مغناطیسی نانوذرات با استفاده از دستگاه VSM (Vibrating Sample Magnetometer) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات دارای خاصیت فرومغناطیس ضعیف هستند و قابلیت جداسازی مغناطیسی بعد از فرآیند جذب را دارند، که این یک مزیت مهم عملی در کاربردهای تصفیه فاضلاب است. نقطه صفر بار سطحی (pH at point of zero charge) نانوذرات با روش تیتراسیون پتانسیومتری تعیین شد. مقدار pHPZC نانوذرات Fe₃O₄ حدود ۶/۵ به دست آمد، که نشان‌دهنده تمایل بالای این جاذب به جذب آلاینده‌های منفی در pH کمتر از این مقدار است.

با توجه به اینکه خصوصیات آب خاکستری در زمانهای مختلف از نظر اندازه و کیفیت تغییر می‌کند آب خاکستری با توجه به اجزاء تشکیل دهنده آن در پساب‌های خانگی در آزمایشگاه ساخته شد و جهت مطالعه استفاده گردید تا بتوان

خصوصیات آن را ثابت نگه داشت و راندمان سیستم تصفیه را دقیق تر مورد سنجش قرار داد. اجزاء تشکیل دهنده آب خاکستری آزمایشگاهی در جدول ۱ و ۲ ذکر شده است. آب خاکستری که مورد جذب سطحی و اکسیداسیون قرار می‌گیرد قبلاً در سیستم بیولوژیکی SBR مورد تصفیه قرار گرفته است و به دلیل عدم تصفیه کامل در این مطالعه جهت حذف بیشتر از جذب سطحی با ذرات نانو آهن و اکسیداسیون شیمیایی استفاده می‌کنیم. پارامترهای COD، BOD، TP و TKN پارامترهای کیفی مورد بررسی می‌باشند. اندازه گیری‌ها طبق دستورالعمل بیست و چهارمین چاپ کتاب استاندارد متد در بخشهای 5210، 5220 A، 4500 P، 4500 NE انجام شده است. ذرات آهن با ایجاد میدان مغناطیسی قوی همانطور که در شکل ۱ آمده است جدا می‌شوند. به منظور خارج کردن جاذب از آهن‌ها و گوس‌متر با تنظیم و کالیبره کردن میدان مغناطیسی در حد ۱/۳ تسلا استفاده گردید. پس از جذب، نانوذرات با استفاده از یک میدان مغناطیسی جدا شدند و چندین بار با آب مقطر و الکل شستشو داده شدند تا ناخالصی‌ها و یون‌های اضافی حذف شوند. سپس نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه به مدت ۱۲ ساعت خشک شدند.

تهیه آب خاکستری

در این مطالعه، آب خاکستری سنتزی مطابق جدول ۱ با استفاده از مواد شیمیایی مختلفی شامل پودر لباسشویی (۲۰۰ mg/L) به‌عنوان سورفاکتانت‌های روغنی شبیه‌سازی‌کننده مواد شوینده، عصاره گوشت (۶۰۰ mg/L) به‌عنوان منبع مواد آلی پیچیده و کربوهیدراتی، آرد کیک (۱۵ mg/L) به‌عنوان منبع نیتروژنی مشابه اوره، صابون بدن (۴ mg/L) به‌عنوان سورفاکتانت محلول در فعالیت‌های شخصی، و روغن (۰/۰۱ mg/L) به‌عنوان ترکیب آلی مقاوم موجود در بقایای غذای تهیه شده است. این مواد به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تنوع آلاینده‌های موجود در آب خاکستری واقعی را به خوبی شبیه‌سازی کنند و شرایط چالش‌برانگیز برای ارزیابی عملکرد فرآیند تصفیه تلفیقی

نانوذرات Fe_3O_4 و اکسیداسیون $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ فراهم شود. همچنین، استفاده از مواد شیمیایی خالص اجازه کنترل دقیق شرایط آزمایش و دستیابی به نتایج قابل تکرار را فراهم می‌کند. غلظت این مواد بر اساس مطالعات قبلی و متوسط مقادیر گزارش شده تعیین شد. هدف از این رویکرد، شبیه‌سازی شرایط واقعی بدون تغییرات ذاتی آب‌های واقعی بود تا نتایج قابل تکرار و قابل مقایسه‌ای به دست آید.

مشخصات شیمیایی آب سنتز شده نشان داد که دارای $\text{TKN}=3/9 \text{ mg/L}$, $\text{BOD}=40 \text{ mg/L}$, $\text{COD}=170 \text{ mg/L}$ و $\text{TP}=0/4 \text{ mg/L}$ بوده که در محدوده استانداردهای آب خاکستری شهری قرار دارد.

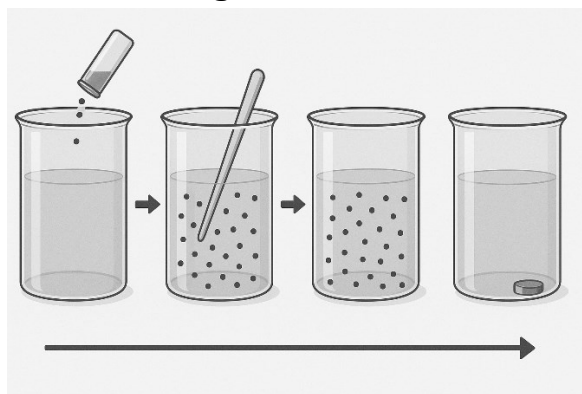
جدول ۱. ترکیبات آب خاکستری آزمایشگاهی ورودی به جذب سطحی

ترکیب	واحد در ۶۰ لیتر آب	مقدار
پودر لباسشویی	mg	۲۰۰
عصاره گوشت	mg	۶۰۰
آرد کیک	mg	۱۵
صابون بدن	mg	۴
روغن	mg	۰/۰۱

جدول ۲. خصوصیات آب خاکستری آزمایشگاهی ورودی به جذب سطحی

ترکیب	واحد	مقدار
BOD_5	mg	۴۰
COD	mg	۱۷۰
TKN	mg	۳/۹
TP	mg	۰/۴

در راندمان حذف ترکیبات BOD ، COD ، NO_3 و PO_4 مورد بررسی قرار گرفتند. جهت مطالعه هر پارامتر، بقیه پارامترها ثابت قرار داده می‌شود و فقط پارامتر مورد مطالعه در چند ارلن تغییر داده می‌شود. انتخاب محدوده زمان ۵ تا ۱۲۰ دقیقه به بررسی سرعت واکنش و زمان لازم برای دستیابی به تعادل جذب کمک می‌کند و امکان مقایسه با سایر مطالعات را فراهم می‌آورد.^۲ قبل از هر آزمایش مواد معلق آب توسط صافی ۰/۴۵ میکرومتری گرفته می‌شود. جهت حذف مزاحمت آهن در اندازه گیری COD ، pH نمونه را تا مقدار ۱۰ بالا می‌بریم تا آهن به صورت هیدروکسید آهن در آمده و به کمک فیلتراسیون از آب خارج گردد.^۷



شکل ۱. روش جداسازی آهن و آنالیز نمونه ها

نرمال و سود سوز آور ۰/۱ نرمال استفاده گردید. پس از یافتن زمان ایده آل جذب، تاثیر pH بر این فرآیند با انجام آزمایش‌هایی در محدوده pH بین ۳ تا ۱۰ و با استفاده از ۰/۵ گرم بر لیتر نانوذرات اکسید آهن بررسی شد. نقطه صفر بار (pHPZC) نانوذرات Fe_3O_4 در حدود ۶/۵ گزارش شده است. در pH کمتر از ۶/۵ سطح جاذب دارای بار مثبت است و جذب یون‌های منفی مثل PO_4^{3-} و NO_3^- افزایش می‌یابد.^{۴، ۱۱} پس از یافتن زمان تماس و pH ایده آل، تاثیر مقدار جاذب نانوذرات اکسید آهن Fe_3O_4 بر فرآیند جذب بررسی شد. بدین منظور، مقادیر مختلف جاذب از ۰/۱ تا ۵ گرم در لیتر به ارلن‌های حاوی ۲۵۰ میلی لیتر نمونه فاضلاب اضافه گردید. افزایش بیش از

با توجه به ترکیبات آلی غیر قابل تجزیه بالای این نوع از آب خاکستری و عدم توانایی تصفیه بیولوژیکی، جهت رسیدن به استاندارد تخلیه فاضلاب از فرایند جذب سطحی استفاده گردید. در فاضلاب به دلیل سطح تماس بالای ذرات ریز و جذب بالای آلاینده ها توسط آنها با توجه به نوع آلاینده می توان از مواد نانو جهت تصفیه تکمیلی استفاده نمود. جاذب هایی که جهت حذف آلودگی می توان استفاده کرد شامل نانو ذرات کربن و غشاهای نانو، نانوفتوکاتالیست ها و نانوذرات آهن می گردند. نانوذرات آهن به دلیل جداسازی آسان و قدرت جذب بالای مواد آلی برای حذف ترکیبات آلی در این پژوهش استفاده شده است پارامترهای تاثیرگذار pH ، زمان تماس، دوز جاذب

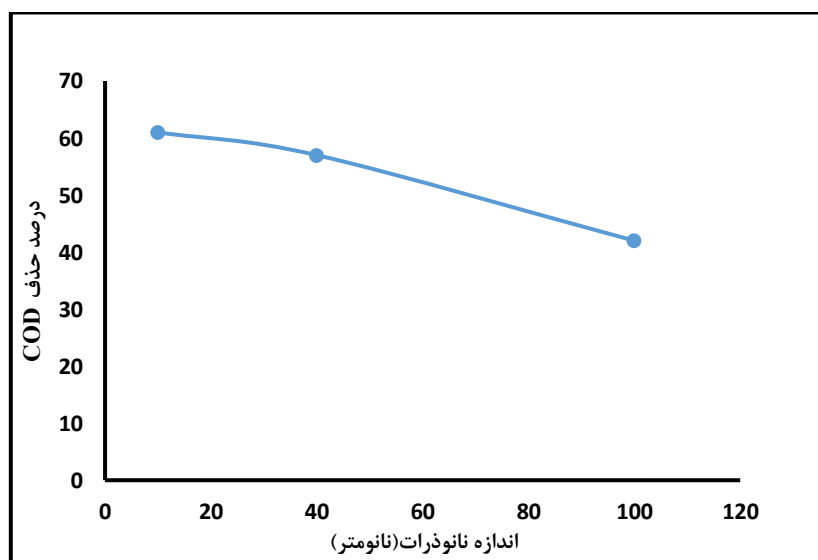
جاذب مورد استفاده از نانوذرات اکسید آهن با فرمول Fe_3O_4 میباشد که اندازه ذرات آن ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ نانومتر می باشد. جهت هم زدن نمونه ها از همزن با قدرت ۱۲۰ دور در دقیقه استفاده گردید. مطابق شکل ۱ پس از تصفیه با استفاده از آهنربا نانوذرات آهن و ترکیبات جذب شده را از آب جدا می کنیم. آهنربای نئودیمیومی دیسکی شکل با قطر ۲ سانتی متر، ضخامت ۱ سانتی متر، با چگالی شار ۴۸۰۰ گوس و پوشش نیکلی استفاده گردید و در مدت ۳ تا ۵ دقیقه در کف ظرف نانوذرات را جذب نمود. دمای محیط بین ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است حجم هر نمونه مورد آزمایش ۲۵۰ میلی لیتر انتخاب و برای افزایش و کاهش pH از اسید سولفوریک ۰/۱

یافته ها

تاثیر اندازه ذرات اکسید آهن در حذف COD فاضلاب خاکستری

در ابتدا لازم است اندازه ذرات اکسید آهن بهینه گردد سپس پارامترهای دیگر را مورد بررسی قرار دهیم. نمونه آب خاکستری با مقدار COD برابر ۱۷۰ میلی گرم بر لیتر به ترتیب در معرض ذرات اکسید آهن با اندازه های ۱۰۰، ۴۰، و ۱۰ نانومتر در زمان ماند مطابق نمودار شکل ۲، درجه اسیدی، و مقدار دوز یکسان از جاذب با درصد حذف ترکیبات آلی ۴۲، ۵۷ و ۶۱ درصد مواجه گردید. ذرات کوچکتر به دلیل انرژی سطحی بالاتر، تمایل بیشتری به تجمع دارند. نانوذرات کوچکتر معمولاً انتقال جرم بهتری دارند و می توانند آلاینده ها را سریع تر جذب کنند. نانوذرات ۱۰ نانومتر بیشترین کارایی جذب COD را نشان می دهند، اما به دلیل تجمع و ناپایداری در شرایط واقعی نیاز به کنترل بیشتر دارند. به همین دلیل از ذرات ۴۰ نانومتر برای ادامه تحقیق استفاده نمودیم.

حد دوز ممکن است منجر به لخته شدگی نانوذرات و کاهش مؤثر سطح جذب شود^{۱۲}. لذا دوزهای بالا در این مطالعه در نظر گرفته نشد. در هر مرحله، غلظت بهینه جاذب با ثابت نگه داشتن سایر شرایط، تعیین شد. لامپ UV در این پژوهش طول موجی در محدوده ۱۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر فراهم می کند. طول موج ۲۴۰ نانومتر به دلیل توانایی بالا در شکستن پیوندهای شیمیایی آلاینده های آلی و همچنین اثر میکروب کشی، در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) مانند UV/H₂O₂ کاربرد گسترده ای دارد. دو لامپ UV با توان ۱۵ وات در سقف یک جعبه شیشه ای به ابعاد ۸*۲*۱۵ که با فویل آلومینیومی پوشیده شده به گونه ای که با آب تماس نداشته باشد جهت پرتوافکنی قرار گرفته است. فاصله لامپها از آب ۵ سانتی متر می باشد. دمای محیط بین ۲۵ تا ۳۵ درجه متغیر بوده است.

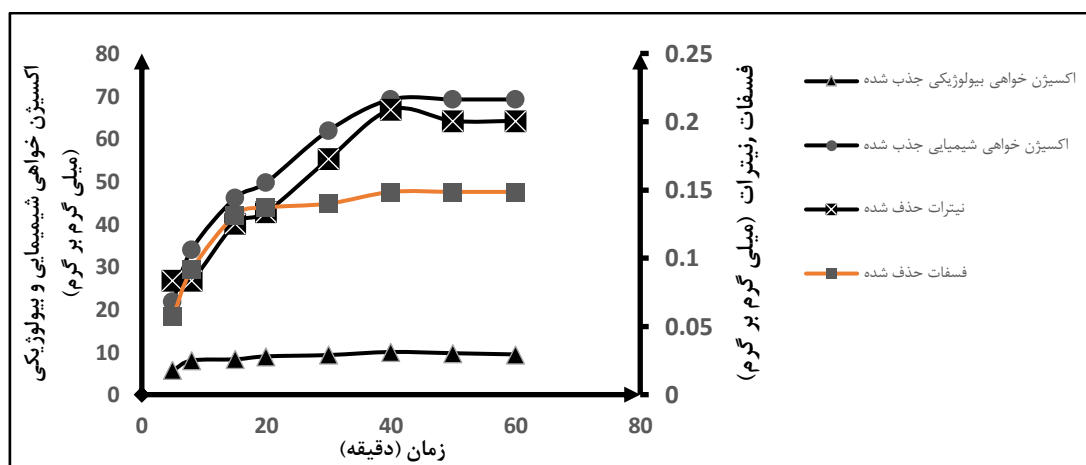


شکل ۲. تاثیر اندازه ذرات اکسید آهن در فرایند جذب COD

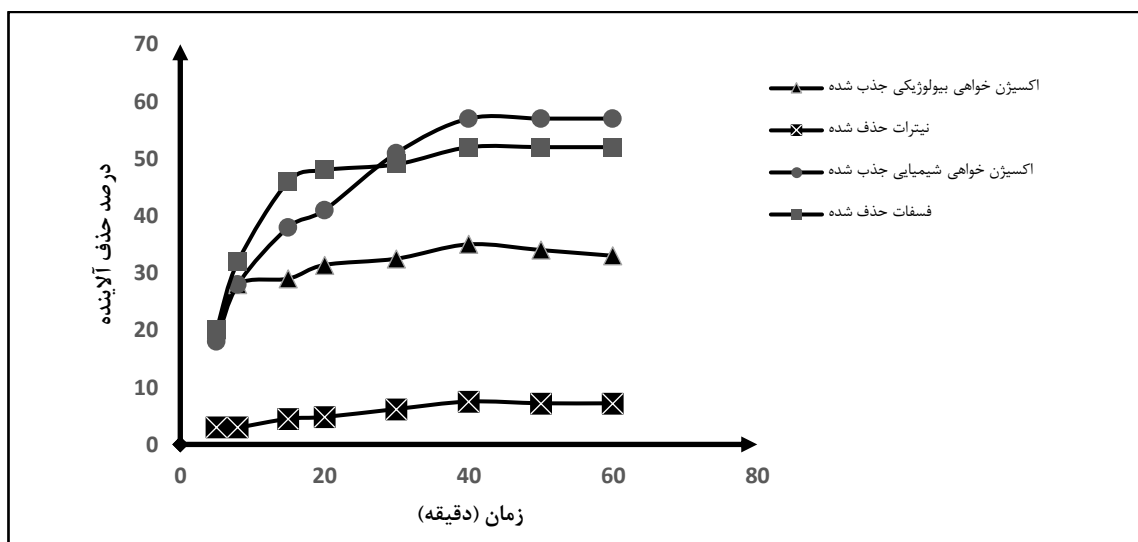
افزایش زمان تماس به ۶۰ دقیقه، مقدار BOD به ۹/۴ میلی گرم در گرم نانوذره رسیده و ۳۳ درصد حذف شده است. اما پس از زمان تماس ۳۰ دقیقه (۹/۳ میلی گرم در گرم و ۳۲/۵ درصد حذف)، تغییر قابل توجهی در حذف BOD مشاهده نمی شود. مقدار TKN در زمان ۵ دقیقه ۰/۱ میلی گرم در گرم نانوذره بوده و ۳ درصد حذف شده است. اما با افزایش زمان تماس به ۶۰ دقیقه، مقدار TKN به ۰/۲ میلی گرم در گرم نانوذره رسیده و ۷/۲ درصد حذف شده است. همچنین، مقدار TP از ۰/۰۶ میلی گرم در گرم نانوذره با ۲۰ درصد حذف در ۵ دقیقه به ۰/۱۵ میلی گرم در گرم نانوذره با ۵۲ درصد حذف در ۶۰ دقیقه افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد که با افزایش زمان تماس، نانوذرات آهن به طور مؤثری در حذف آلاینده های آب خاکستری عمل می کنند. اما پس از زمان تماس ۴۰ دقیقه، تغییر قابل توجهی در راندمان حذف آلاینده ها مشاهده نمی شود و به نظر می رسد که به یک مقدار ثابت می رسد. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که نانوذرات آهن به عنوان یک روش مؤثر در تصفیه آب خاکستری عمل می کنند، اما افزایش زمان تماس بیش از ۴۰ دقیقه تأثیر قابل توجهی بر راندمان حذف ندارد.

تأثیر زمان تماس بر حذف آلاینده های آب خاکستری با نانو ذرات آهن

شکل ۳ و ۴ نشان می دهد که زمان تماس چگونه بر حذف آلاینده های آب خاکستری با استفاده از نانوذرات آهن تأثیر می گذارد. با افزایش زمان تماس، تغییرات قابل توجهی در مقادیر تقاضای شیمیایی اکسیژن، تقاضای بیوشیمیایی اکسیژن، نیترات و فسفات مشاهده می شود. به عنوان مثال، در زمان تماس ۵ دقیقه، مقدار COD برابر ۲۲ میلی گرم در گرم نانوذره بوده و ۱۸ درصد حذف شده است. اما با افزایش زمان تماس به ۲۰ دقیقه، مقدار COD به ۵۰ میلی گرم در گرم نانوذره رسیده و درصد حذف آن به ۴۱ درصد افزایش یافته است. اما پس از زمان تماس ۲۰ دقیقه، تغییر قابل توجهی در حذف COD مشاهده نمی شود و مقدار COD در زمان های ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه تقریباً ثابت می ماند (حدود ۶۹ میلی گرم در گرم و ۵۷ درصد حذف). این الگوی افزایشی در BOD نیز مشاهده می شود. به عنوان مثال، مقدار BOD در زمان ۵ دقیقه ۵/۷ میلی گرم در گرم نانوذره بوده و ۲۰ درصد حذف شده است. اما با



شکل ۳. میزان جذب بر اساس میلی گرم آلاینده بر هر گرم نانوذرات آهن

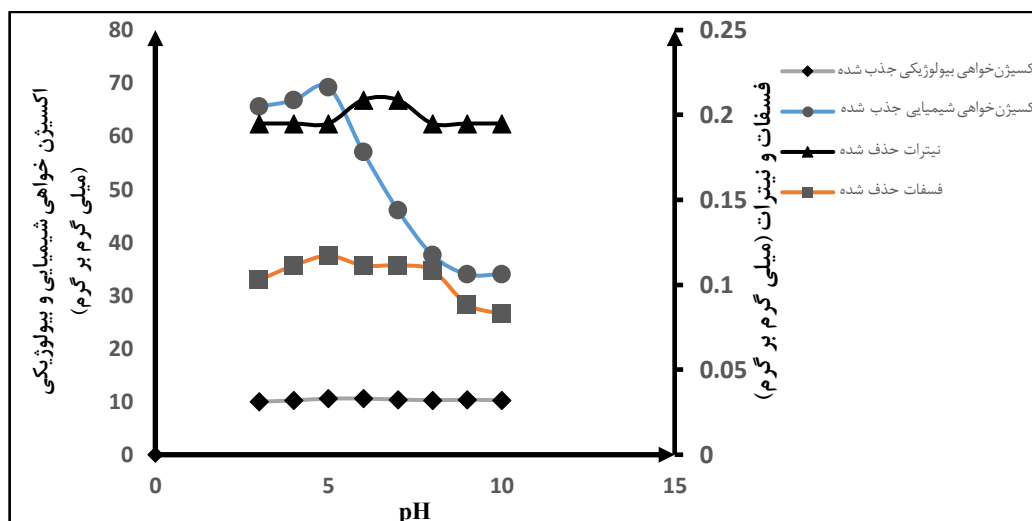


شکل ۴. درصد حذف آلاینده های مختلف در اثر استفاده از نانو ذرات آهن

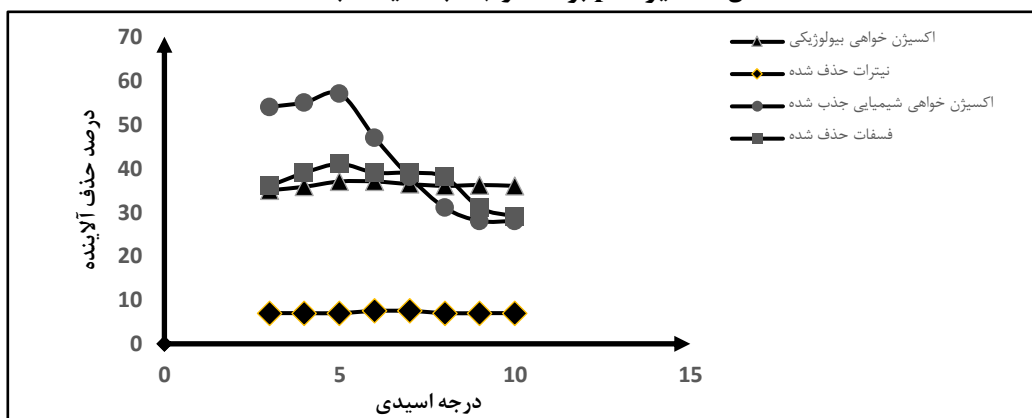
کاهش می یابد و به ۴۶ میلی گرم در گرم (۳۸٪ حذف) و مقدار BOD به ۱۰/۴ میلی گرم در گرم (۳۶/۴٪ حذف) می رسد. مقدار NO_3 در pH های مختلف تقریباً ثابت می ماند و حدوداً ۰/۲ میلی گرم در گرم است و درصد حذف آن نیز تقریباً تغییر چندانی نمی کند. در مورد PO_4 ، مقدار حذف در pH برابر ۳ برابر ۰/۱ میلی گرم در گرم (۳۶٪ حذف) بوده و با افزایش pH به ۷ به ۰/۱۱ میلی گرم در گرم (۳۹٪ حذف) می رسد. به طور کلی، نتایج نشان می دهند که pH بهینه برای حذف BOD و COD محدوده ۴ و ۵ است، زیرا در این pH ها درصد حذف بیشتری دارند. اما برای NO_3 و PO_4 ، تغییرات pH تأثیر زیادی بر میزان حذف ندارند و تقریباً ثابت باقی می ماند. همچنین، شکل ۶ نشان می دهد که تغییرات pH در حذف BOD، فسفات و نیترات تأثیر کمتری دارد، اما در حذف COD در pH های پایین، عملکرد بهتری دارد.

تأثیر pH بر حذف آلاینده های آب خاکستری با نانو ذرات آهن

شکل ۵ و ۶ نشان می دهند که چگونه pH بر تخلیه آلاینده های آب خاکستری با استفاده از نانوذرات آهن تأثیر می گذارد. به عنوان مثال، در pH برابر ۳، مقدار مصرف اکسیژن شیمیایی برابر ۶۵/۶ میلی گرم در گرم نانوذرات آهن بوده و ۵۴٪ از آن حذف شده است. همچنین، مقدار مصرف اکسیژن زیستی برابر ۱۰ میلی گرم در گرم نانوذرات آهن بوده و ۳۵٪ از آن حذف شده است. با افزایش pH به ۴ و ۵، مقادیر COD و BOD افزایش می یابند و به ترتیب به ۶۶/۸ میلی گرم در گرم (۵۵٪ حذف) و ۶۹/۲ میلی گرم در گرم (۵۷٪ حذف) برای COD و ۱۰/۲ میلی گرم در گرم (۳۵٪ حذف) و ۱۰/۶ میلی گرم در گرم (۳۷٪ حذف) برای BOD می رسند. در pH برابر ۷، مقدار COD



شکل ۵. تاثیر pH بر مقدار جذب آلاینده با Fe_3O_4



شکل ۶. تاثیر pH بر راندمان حذف آلاینده با Fe_3O_4

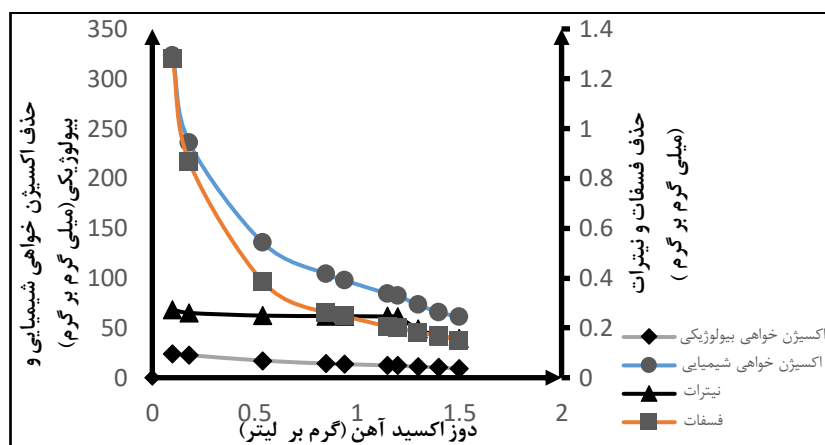
دوز بهینه Fe_3O_4 جهت حذف آلاینده های آلی و معدنی آب خاکستری

شکل ۷ و ۸ نشان می دهد که چگونه افزودن مقادیر مختلفی از Fe_3O_4 به آب خاکستری می تواند به حذف آلاینده های آلی و معدنی کمک کند. با افزایش مقدار Fe_3O_4 از ۰/۱ تا ۱/۵ g/l، تغییرات قابل توجهی در مقادیر COD، BOD، NO_3 و PO_4 مشاهده می شود. برای مثال، در مقدار ۰/۱ g/l از Fe_3O_4 ، میزان COD برابر با ۳۲۳ mg/g با ۱۹٪ حذف شده و میزان BOD برابر با ۲۴ mg/g با ۶٪ حذف شده است. ولی با افزایش مقدار به ۰/۵۵ g/l، میزان COD به ۱۳۵/۴ mg/g با ۴۳٪ حذف و میزان BOD

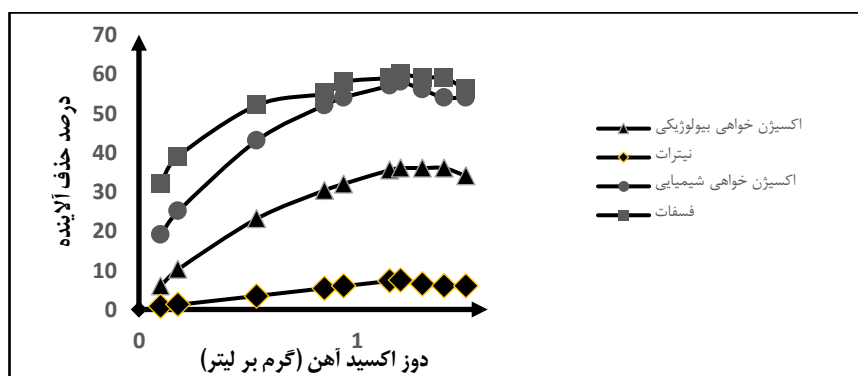
به ۱۷/۱ mg/g با ۲۳/۱٪ حذف می شود. در مقدار بهینه ۱ g/l، میزان COD به ۸۲/۱۶ mg/g با ۵۸٪ حذف و میزان BOD به ۱۲ mg/g با ۳۶٪ حذف می رسد. همچنین، میزان NO_3 در مقدار ۰/۱ g/l برابر با ۰/۲۷۳ mg/g با ۶٪ حذف می شود و با افزایش مقدار به ۱/۲ g/l، میزان حذف به ۰/۲۴ mg/g با ۱۲٪ حذف می رسد. همچنین، میزان PO_4 در مقدار ۰/۱ g/l برابر با ۰/۷ mg/g با ۳۲٪ حذف می شود و با افزایش مقدار به ۱/۲ g/l، میزان حذف به ۰/۲ mg/g با ۶۰٪ حذف می شود. این نتایج نشان می دهند که با افزایش مقدار Fe_3O_4 تا مقدار بهینه ۱/۲ g/l کارایی حذف آلاینده ها به طور قابل توجهی افزایش می یابد. در این مقدار بیشترین درصد حذف برای COD و PO_4 مشاهده می شود. به

فعال اکسیژن (OH) شود. این امر باعث کاهش راندمان اکسیداسیون آلاینده‌ها می‌شود. Lakshmanan و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزایش بیش از حد دوز جذب می‌تواند واکنش‌های جانبی را در محیط آبی تحریک کند و به جای بهبود، باعث کاهش کارایی شود.

عبارت دیگر، Fe_3O_4 به عنوان یک ماده مؤثر در تصفیه آب خاکستری عمل می‌کند و با افزایش مقدار به حد بهینه، کارایی حذف آلاینده‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در فرآیند UV/H_2O_2 ، غلظت بالای Fe_3O_4 می‌تواند نور UV را جذب یا پراکنده کند و مانع از تولید رادیکال‌های



شکل ۷. تاثیر افزایش نانوذرات اکسید آهن در ظرفیت حذف آلاینده‌های آلی و معدنی



شکل ۸. تاثیر افزایش نانوذرات اکسید آهن در راندمان حذف آلاینده‌های آلی و معدنی

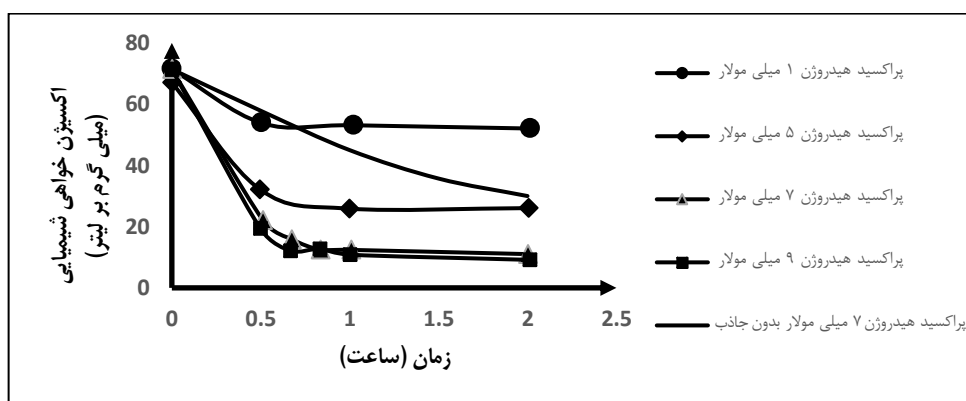
سطحی از اکسیداسیون شیمیایی UV/H_2O_2 استفاده گردید. با افزودن $1\text{ mM } H_2O_2$ و تابش دو ساعت UV میزان ۲۱ درصد از COD باقیمانده حذف گردید. با افزایش غلظت H_2O_2 تا 7 mM میزان حذف به ۸۳٪ با زمان تابش فرابنفش یک ساعت مشاهده گردید. میزان COD باقیمانده برابر $12/1\text{ mg/l}$ و راندمان کل جذب سطحی و اکسیداسیون شیمیایی UV/H_2O_2 برابر ۹۳٪ بدست آمد. همانگونه که در شکل ۸ مشخص شده است زمان تابش

تاثیر استفاده از اکسیداسیون شیمیایی UV/H_2O_2 بعد از جذب سطحی نانوذرات آهن بر حذف ترکیبات آلی

در مرحله قبل در pH برابر ۵ با اضافه کردن $1/2$ گرم بر لیتر نانوذرات Fe_3O_4 میزان ۵۸ درصد از COD حذف گردید و آب خاکستری با COD برابر $71/4\text{ mg/l}$ بدست آمد. جهت افزایش راندمان حذف ترکیبات آلی بعد از جذب

۹ مولار تقریباً بر هم منطبق می باشد. نمودار شکل ۹ نشان می دهد که در صورتی که فرایند جذب سطحی با آهن حذف گردد در مدت زمان یک ساعت و pH برابر ۳ راندمان حذف COD، ۵۶ درصد کاهش می یابد و به ۳۷ درصد می رسد.

بیشتر از یک ساعت تاثیری در میزان حذف ترکیبات آلی ندارد. راندمان حذف COD در مقادیر ۱، ۵، ۷، ۹ میلی مولار H_2O_2 به ترتیب ۲۵/۶، ۶۳/۸، ۸۲/۶ و ۸۴/۸ درصد حاصل گردید. میزان تغییرات راندمان حذف در مقادیر بیشتر از ۷ مولار ناچیز مشاهده گردید به طوریکه دو نمودار ۷ و



شکل ۹. تاثیر مقدار H_2O_2 و زمان تابش UV بر حذف COD آب های خاکستری

راندمان حذف در pH برابر ۵ به دلیل نقطه صفر بار (pHPZC) با pH برابر ۶/۵ در نانوذرات اکسید آهن افزایش یافت، زیرا در این محدوده، سطح جاذب دارای بار مثبت بوده و با آلاینده های منفی (مانند مواد آلی و فسفات) واکنش الکترواستاتیک ایجاد می کند. این مکانیسم با مطالعات^{۱۱ و ۴} مطابقت دارد که نقش pHPZC در تعیین ظرفیت جذب یون های منفی را تأکید کردند. با این حال در pH بزرگتر از ۷، کاهش جذب نیترات (NO_3^-) به دلیل افزایش بار منفی سطح جاذب و رقابت OH^- با NO_3^- تأیید شد، که با مطالعات Zazouli و Lu هم خوانی دارد، زیرا جذب فیزیکی نیترات با Fe_3O_4 ناکارآمد است.^{۱۰ و ۱۴} در مورد دوز بهینه جاذب، افزایش غلظت Fe_3O_4 تا ۱ g/l راندمان حذف آلاینده ها را بهبود بخشید، اما غلظت های بالاتر از این مقدار باعث لخته شدگی ذرات و کاهش سطح ویژه موثر شد. این موضوع با مطالعه Lakshmanan در

بحث

یافته های این مطالعه نشان دادند که ترکیب فرآیند جذب سطحی با نانوذرات Fe_3O_4 و اکسیداسیون UV/H_2O_2 روشی مؤثر برای حذف آلاینده های آب خاکستری COD، BOD، TKN، TP است. در مرحله جذب سطحی، استفاده از ۱/۲ g/L نانوذرات Fe_3O_4 در pH برابر ۵ و زمان تماس ۴۰ دقیقه منجر به حذف ۵۸٪ COD، ۳۶٪ BOD، ۷۵٪ TKN و ۶۰٪ TP شد. با افزودن H_2O_2 با غلظت ۷ mM و تابش UV به مدت ۱ ساعت، راندمان حذف COD به ۹۳٪ افزایش یافت. COD باقی مانده برابر ۱۲/۱ mg/L مشاهده شد که این مقدار بالای حذف نشان دهنده اهمیت تلفیق روش های فیزیکی و شیمیایی در غلبه بر آلاینده های مقاوم است. این یافته با مطالعات قبلی^{۳ و ۱۱} هم خوانی دارد که تأکید کردند بدون تلفیق روش ها، دستیابی به استانداردهای محیط زیستی غیرممکن است

سال ۲۰۱۴ هم‌خوانی دارد که نشان داد افزایش دوز جاذب ممکن است منجر به اشباع سایت‌های جذب و واکنش‌های جانبی با رادیکال‌های فعال شود.^{۱۱} علاوه بر این، در دوزهای بالا، پراکندگی نور UV توسط نانوذرات Fe_3O_4 می‌تواند راندمان اکسیداسیون را کاهش دهد، که با مطالعه Hatt سال ۲۰۰۷ در مورد محدودیت‌های فرآیندهای AOPs مطابقت دارد.^{۱۵}

در مرحله اکسیداسیون، افزایش غلظت H_2O_2 از ۱ mM به ۷ mM و کاهش زمان تابش به ۱ ساعت، راندمان حذف COD را از ۲۵/۶٪ به ۸۲/۶٪ افزایش داد. با این حال، غلظت‌های H_2O_2 بالاتر از ۷ mM تأثیر چشمگیری نداشتند، که ممکن است به دلیل واکنش‌های غیرفعال‌کننده رادیکال‌های OH با H_2O_2 اضافی باشد. این پدیده در مطالعات Xu در سال ۲۰۱۲ و Rahmani در سال ۲۰۱۱ گزارش شده است.^{۱۶ و ۱۷} همچنین، نتایج نشان دادند که زمان تابش بیش از ۱ ساعت تأثیر معناداری در افزایش حذف نداشت، زیرا رادیکال‌های فعال مصرف شده و واکنش‌های جانبی افزایش یافت. مقایسه با مطالعات مشابه نشان داد که رویکرد دوگانه جذب سطحی و اکسیداسیون شیمیایی در این مطالعه راندمان حذف COD را از ۵۷٪ (فقط جذب سطحی) به ۹۳٪ افزایش داد. این تفاوت با مطالعه Gharloghi و همکاران در سال ۲۰۱۶ که تنها ۵۰٪ COD را با Fe_3O_4 حذف کردند، تفاوت روشی دارد، که نوآوری تحقیق حاضر را در استفاده از فرآیند تلفیقی برجسته می‌کند. همچنین، در مقایسه با مطالعه لاشمانا، که ۵۰ درصد از TOC را با Fe_3O_4 اصلاح شده با پلیمر حذف کردند،^{۱۱} تلفیق با $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ در این پژوهش راندمان را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. این نتایج با مطالعات کنسولتانت هم‌خوانی دارد که تأکید کردند بدون تکنیک‌های تکمیلی، دستیابی به استانداردهای دفع فاضلاب غیرممکن است.^{۱۳} در نهایت، نانوذرات Fe_3O_4 با سطح ویژه $40-60 \text{ m}^2/\text{g}$ را به جاذبی کارآمد در مقایسه با روش‌های مرسوم تبدیل کرده است. با این حال، محدودیت‌هایی مانند وابستگی

شدید به pH، عدم حذف نیتрат و کاهش راندمان در غلظت‌های بالای H_2O_2 نیازمند بهینه‌سازی بیشتر هستند. این یافته‌ها با مطالعات رحمانی و کنسولتانت سازگار است که تأکید کردند مدیریت دقیق پارامترهای عملیاتی ضروری است.^{۱۳ و ۱۶}

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که رویکرد دوگانه جذب سطحی با Fe_3O_4 و اکسیداسیون $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ می‌تواند راندمان حذف آلاینده‌های آب خاکستری را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. در شرایط بهینه شامل pH برابر ۵، زمان تماس ۴۰ دقیقه و دوز $1/2 \text{ g/L}$ ، راندمان حذف COD، BOD، TKN و TP به ترتیب ۵۸٪، ۳۶٪، ۷۵٪ و ۶۰٪ بود. با تلفیق فرآیند اکسیداسیون، راندمان حذف COD به ۹۳٪ رسید، که این بهبود چشمگیر به تولید رادیکال‌های فعال در واکنش $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ و تجزیه مواد آلی غیرقابل تجزیه بستگی دارد. این نوآوری در مقایسه با مطالعات قبلی که فقط از روش‌های تکی جذب سطحی استفاده کردند، محدودیت‌های روش‌های مرسوم را برطرف کرده و استانداردهای محیط‌زیستی را فراهم می‌کند.^{۱۱ و ۱۳} با این حال، چالش‌هایی مانند عدم حذف نیترات، وابستگی شدید به pH و کاهش راندمان در غلظت‌های بالای H_2O_2 وجود دارد. این محدودیت‌ها نیازمند اصلاح سطح جاذب (مانند پوشش با کیتوزان یا پلیمرهای مغناطیسی) و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای کاربردهای صنعتی هستند. همچنین، قابلیت بازیابی نانوذرات Fe_3O_4 و کاهش هزینه‌های عملیاتی، این روش را به روشی پایدار و اقتصادی در مقیاس شهری تبدیل کرده است. این مطالعه پیشنهاد می‌کند که تلفیق روش‌های جذب سطحی و اکسیداسیون پیشرفته با مدیریت دقیق پارامترها مانند pH، غلظت H_2O_2 و زمان تابش می‌تواند به عنوان الگویی برای مدیریت آب خاکستری در مناطق شهری مطرح شود. تحقیقات آینده باید بر گسترش مقیاس فرآیند، بهینه‌سازی اقتصادی و افزایش ظرفیت حذف نیترات تمرکز کنند، زیرا این چالش‌ها هنوز نیازمند

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش با رعایت تمام اصول اخلاقی انجام شده است. از آنجا که این مطالعه در حوزه علوم مهندسی قرار دارد و شامل نمونه‌گیری انسانی، آزمایش‌های بالینی یا استفاده از حیوانات آزمایشگاهی نبوده، نیاز به اخذ کد اخلاق نداشته است. با این حال، تمام فرآیندهای تحقیق بر اساس موازین علمی و اخلاقی صورت پذیرفته است.

مشارکت نویسندگان

- طراحی مطالعه، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش پیش‌نویس مقاله و ویرایش نهایی: سعید گواهی
- جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل آماری و مشارکت در نگارش مقاله: احسان دریکوند
- بررسی منابع و مشارکت در اصلاح مقاله: محسن سلیمانی بابرصاد
- بازبینی انتقادی محتوا: صائب خوشنواز
- هماهنگی پروژه: ایمان پارسه

راهکارهای جایگزین مانند اصلاح سطح یا استفاده از روش‌های تکمیلی هستند. بنابراین، این رویکرد دوگانه می‌تواند به کاهش مصرف آب خالص و افزایش بازیابی آب در شرایط کمبود منابع آبی کمک کند.

سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری و حمایت‌های ارزشمند پالایشگاه بید بلند بهبهان قدردانی می‌کنند. همچنین از همکاری جناب آقای دکتر صادق معتقد مدیر پژوهش پالایشگاه در طول مراحل مختلف تحقیق صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافعی با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از سازمان‌ها یا نهادهای داخلی و خارجی انجام شده است.

References

1. Hlongwane GN, Sekoai PT, Meyyappan M, Moothi K. Simultaneous removal of pollutants from water using nanoparticles: a shift from single pollutant control to multiple pollutant control. *Sci Total Environ* . 2019;656:808–33.
2. Xu P, Zeng GM, Huang DL, Feng CL, Hu S, Zhao MH, et al. Use of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment: a review. *Sci Total Environ* . 2012;424:1–10.
3. Gharloghi M, Yazdanbakhsh A, Eslami A, Aghayani E. Efficiency of iron oxide nanoparticles in advanced treatment of secondary effluent of municipal wastewater treatment plant. *J Mazandaran Univ Med Sci* . 2016;26(135):130–43.
4. Zhang J, Lin S, Han M, Su Q, Xia L, Hui Z. Adsorption properties of magnetic magnetite nanoparticle for coexistent Cr(VI) and Cu(II) in mixed solution. *Water (Basel)* . 2020;12(2):446.
5. Predescu AM, Matei E, Berbecaru AC, Pantilimon C, Drăgan C, Vidu R, et al. Synthesis and characterization of dextran-coated iron oxide nanoparticles. *R Soc Open Sci* . 2018;5(3):171525.
6. Shojaei S, Khammarnia S, Shojaei S, Sasani M. Removal of reactive Red 198 by nanoparticle zero valent iron in the presence of hydrogen peroxide. *J Water Environ Nanotechnol* . 2017;2(2):129–35.
7. Renu, Agarwal M, Singh K. Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review. *J Water Reuse Desal* . 2017;7(4):387–419.
8. Mohapatra M, Anand S. Synthesis and applications of nano-structured iron oxides/hydroxides – a review. *Int J Eng Sci Technol* . 2011;2(8):127–46.
9. Ali A, Zafar H, Zia M, ul Haq I, Phull AR, Ali JS, et al. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnol Sci Appl* . 2016;9:49–67.
10. Zazouli MA, Belarak D, Karimnezhad F, Khosravi F. Removal of fluoride from aqueous solution by using of adsorption onto modified *Lemna minor*: adsorption isotherm and kinetics study. *J Mazandaran Univ Med Sci* . 2014;23(109):195–204.
11. Lakshmanan R, Sanchez-Dominguez M, Matutes-Aquino JA, Wennmalm S, Kuttuva Rajarao G. Removal of total organic carbon from sewage wastewater using poly(ethylenimine)-functionalized magnetic nanoparticles. *Langmuir* . 2014;30(4):1036–44.
12. Drenkova-Tuhtan A, Mandel K, Paulus A, Meyer C, Hutter F, Gellermann C, et al. Phosphate recovery from wastewater using engineered superparamagnetic particles modified with layered double hydroxide ion exchangers. *Water Res* . 2013;47(15):5670–7.
13. Consultants I. Code. In: *Fire Flow Water Consumption in Sprinklered and Unsprinklered Buildings, An Assessment of Community Impacts*. Philadelphia: Springer Science & Business Media; 2012.
14. Lu AH, Salabas EL, Schüth F. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angew Chem Int Ed* . 2007;46(8):1222–44.
15. Hatt BE, Fletcher TD, Deletic A. Treatment performance of gravel filter media: implications for design and application of stormwater infiltration systems. *Water Res* . 2007;41(12):2513–24.
16. Rahmani AR, Ghafari HR, Samadi MT, Zarabi M. Synthesis of zero valent iron nanoparticles (nzvi) and its efficiency in arsenic removal from aqueous solutions. *Water Wastewater* . 2011;1:35–41.