

Title Effect of Ultraviolet Irradiation and Persulfate Combined with Three-Dimensional Electrochemical Coagulation for Removal of Reactive Red 198 from Aqueous Solutions

Rahimeh Fathikhah¹, Fatemeh Ahmadizadeh¹, Mohammad Ahmadian^{*2,3}, Hiwa Hosseini^{4,5}, Davood Kalantar-Neyestanaki^{6,7}, Mohammad Azizi¹

1. Student Research Committee, School of Public Health, Bam University of Medical Sciences, Bam, Iran

2. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Bam University of Medical Sciences, Bam, Iran.

3. Noncommunicable Diseases Research Center, Bam University of Medical Sciences, Bam, Iran

4. Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

5. Research Center for Environmental Determinants of Health (RCEDH), Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

6. Medical Mycology and Bacteriology Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

7. Department of Medical Microbiology (Bacteriology and Virology), Afzalipour Faculty of Medicine, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran.

* *Corresponding author.* Tel: +983444219415, Fax: +983444345424, E-mail: moh.ahmadian@yahoo.com

Received: Jan 24, 2025 Accepted: Sep 06, 2025

ABSTRACT

Background & objectives: Textile effluents are known to contain persistent organic compounds and toxic dyes, with Reactive Red 198 (RR198) being a common example. This study aimed to evaluate the removal of RR198 by utilizing an integrated process that combines ultraviolet (UV) irradiation, three-dimensional electrochemical coagulation, and persulfate oxidation.

Methods: This experimental study, conducted on a laboratory scale, investigated the effects of several key operational variables on the removal of RR198. These variables included pH (ranging from 3 to 9), contact time (10 to 100 minutes), persulfate concentration (250 to 1000 mg/L), nanoparticle concentration (250 to 750 mg/L), applied voltage (5 to 20 volts), and initial dye concentration (10 to 50 mg/L). The experiments were performed in a 1-L cylindrical three-dimensional electrochemical coagulation reactor, which was equipped with titanium electrodes and UV irradiation. Persulfate was added in batch mode, and the magnetic carbon nanoparticles were characterized prior to their use.

Results: Characterization of the nanoparticles confirmed their spherical morphology, with minimal aggregation and particle sizes ranging from 28.5 to 31 nm. Among the various single and combined treatment methods tested, the combined process of UV irradiation, electrochemical coagulation, nanoparticles, and persulfate demonstrated the best performance and was selected for optimization. Under optimal conditions—specifically, a pH of 5, persulfate concentration of 750 mg/L, nanoparticles at 500 mg/L, and an applied voltage of 10 V—the removal efficiency of RR198 reached 99.1%. This combined process also exhibited favorable kinetics and stability across the tested concentration range.

Conclusion: The integrated system combining UV irradiation, electrochemical coagulation, nanoparticles, and persulfate—an advanced oxidation/coagulation hybrid—effectively removes the recalcitrant dye RR198 from aqueous solutions. It shows promise for the treatment of textile effluents containing resistant organic pollutants.

Keywords: Reactive Red 198; Three-dimensional Electrochemical Coagulation; Textile Effluent; Magnetic Carbon Nanoparticles; Persulfate; Ultraviolet Irradiation

تاثیر امواج فرابنفش و پرسولفات در تلفیق با انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی برای حذف رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ از محلول‌های آبی

رحیمه فتحی خواه^۱، فاطمه احمدی زاده^۱، محمد احمدیان^{۲*}، هیوا حسینی^۳، داود کلانتر نیستانی^۴، محمد عزیزی^۵

۱. کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بم، بم، ایران

۲. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بم، بم، ایران

۳. مرکز تحقیقات بیماری‌های غیرواگیر، دانشگاه علوم پزشکی بم، بم، ایران

۴. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۵. مرکز تحقیقات عوامل محیطی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۶. مرکز تحقیقات قارچ شناسی و باکتری شناسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

۷. گروه میکروب شناسی پزشکی (باکتری شناسی و ویروس شناسی)، دانشکده پزشکی افضلی پور، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۳۴۴۴۲۱۹۴۱۵، فکس: ۰۳۴۴۴۳۴۵۴۲۴، ایمیل: moh.ahmadian@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: پساب صنایع نساجی حاوی ترکیبات آلی و رنگ‌های سمی است که رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ (Reactive Red 198: RR198) یکی از ترکیبات موجود در این پساب‌ها می‌باشد. این مطالعه با هدف حذف رنگ RR198 با استفاده از فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی و پرسولفات انجام شد.

روش کار: در پژوهش حاضر نوع مطالعه تحقیق تجربی (Experimental Research) در مقیاس آزمایشگاهی بود. تاثیر متغیرهای موثر در مطالعه شامل pH (۳ تا ۹)، زمان تماس (۱۰ تا ۱۰۰ دقیقه)، غلظت پرسولفات (۲۵۰ تا ۱۰۰۰ mg/L)، غلظت نانوذرات (۲۵۰ تا ۷۵۰ mg/L)، ولتاژ جریان (۵ تا ۲۰ ولت) و غلظت اولیه رنگ (۱۰ تا ۵۰ mg/L) در حذف رنگ RR198 در مقیاس آزمایشگاهی توسط یک راکتور انعقاد الکتروشیمیایی استوانه ای شکل با حجم یک لیتر با الکترودهای تیتانیومی که تحت تابش اشعه ماوراء بنفش قرار گرفته بود و همچنین استفاده از پرسولفات به روش ناپیوسته مورد مطالعه قرار گرفت.

یافته ها: نتایج تعیین ویژگی های نانوذرات، تایید کننده تشکیل نانوذرات با ساختار کروی و کمترین کولوژگی و همچنین اندازه ذرات بین ۲۸/۵ تا ۳۱ نانومتر بود. بر اساس نتایج فرآیندهای تکی و ترکیبی، فرآیند تابش فرابنفش / انعقاد الکتروشیمیایی / نانوذرات / پرسولفات به عنوان فرآیند مناسب انتخاب و بهینه سازی آن انجام گرفت. راندمان حذف رنگ RR198 در شرایط بهینه در طی فرآیند مذکور برابر ۹۹/۱ درصد بود. شرایط بهینه فرآیند مذکور شامل pH=۵، غلظت پرسولفات برابر با ۷۵۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت نانوذرات برابر با ۵۰۰ میلی گرم در لیتر و میزان جریان برابر با ۱۰ ولت بود.

نتیجه گیری: فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش / انعقاد الکتروشیمیایی / نانوذرات / پرسولفات به عنوان یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته می‌تواند با راندمان بالا برای تصفیه پساب‌های نساجی حاوی آلاینده‌های آلی مقاوم مانند رنگ RR198 استفاده گردد.

واژه های کلیدی: رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸، انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی، پساب نساجی، نانوذرات کربن مغناطیسی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۵

مقدمه

وجود منابع آبی با کمیت و کیفیت مناسب تاثیر زیادی بر کیفیت زندگی انسان دارد. متأسفانه این منابع آبی در اثر فعالیت‌های انسانی آلوده می‌شوند. یکی از آلاینده‌هایی که از صنایع مختلف مانند نساجی، کاغذ، پلاستیک، آرایشی و بهداشتی، مواد غذایی، دارویی، کاشی و چرم به محیط زیست منتشر می‌شود رنگ‌ها هستند (۱،۲). از بین صنایع مذکور صنعت نساجی یکی از آلوده‌ترین پساب‌ها تخلیه شده به محیط است که دلیل این موضوع وجود رنگ‌های شیمیایی در این پساب‌ها است. پساب صنایع نساجی عمدتاً حاوی ترکیبات آلی و انواع رنگ‌ها می‌باشد و از جمله خصوصیات آنها BOD و COD بالای آنها است. با توجه به عملکرد ضعیف واحدهای رنگرزی و ماهیت رنگ‌ها، تخمین زده می‌شود که ۵۰ درصد رنگ‌ها مستقیماً وارد فاضلاب می‌شوند. بر اساس یک برآورد، در کشور ایران صنایع نساجی سالانه حدود ۲۸۰۰۰۰ تن پساب‌های رنگی را وارد منابع آبی می‌کند (۳، ۴). وجود رنگ‌ها نه تنها کیفیت زیبایی شناختی آب را مختل می‌کند، بلکه اکوسیستم آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و با جلوگیری از نفوذ نور خورشید و اکسیژن می‌تواند فعالیت‌های فتوسنتزی را در سیستم‌های آبی به میزان قابل توجهی کاهش دهد (۵). رنگ‌ها به دلیل ساختار حلقوی آنها ماهیت سرطان‌زایی دارند، بنابراین حتی مقدار کمی از رنگ (حتی کمتر از ۱ ppm) که وارد منابع آب گردد می‌تواند باعث آلودگی و غیر قابل مصرف شدن آنها شود. همچنین از لحاظ ساختار شیمیایی رنگ‌ها جزء دسته‌ای از آلاینده‌ها می‌باشند که سخت تجزیه پذیر نامیده می‌شوند که دلیل این پدیده ساختار مولکولی حلقوی آنها است که باعث پایداری آنها در برابر تجزیه زیستی می‌شود (۶، ۷). در میان رنگ‌های آلی، رنگ‌های آزو به دلیل ساختار پیچیده در برابر تجزیه زیستی مقاوم بوده و اغلب سمی، سرطان‌زا و جهش‌زا هستند. بنابراین، تصفیه رنگ‌های آزو مانند رنگ راکتیو قرمز

۱۹۸ در پساب‌های حاوی آن با روش‌های مناسب و قبل از تخلیه به محیط بسیار مهم است (۷). رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ برای انجام این مطالعه انتخاب شد، زیرا در صنایع نساجی کاربرد زیادی دارد. این رنگ دارای دو گروه مونوکلرو-تریازین و سولفون است و به همین دلیل از نظر زیست محیطی بسیار مهم است. فرآیندهای متفاوتی توسط محققان برای تصفیه پساب‌های نساجی استفاده شده است که شامل انعقاد و لخته سازی، الکتروکواگولاسیون متداول با الکترودهای آهنی (۸)، تصفیه بیولوژیکی، جذب سطحی (۹) و فرآیندهای ترکیبی از جمله ازن‌زنی و انعقاد است (۱۰). هر کدام از فرآیندهای مذکور دارای معایبی هستند، به عنوان مثال در فرآیند انعقاد و لخته سازی می‌توان به تولید لجن زیاد و مشکل دفع لجن و هزینه بر بودن آنها اشاره کرد. روش‌های فیزیکی مانند جذب سطحی و تبادل یون نیز باعث تولید مقادیر زیادی پسماند جامد می‌شود که خود یک معضل زیست محیطی محسوب می‌گردد (۱۱، ۱۲). در میان روش‌های الکتروشیمیایی، استفاده از الکترودهای سه بعدی توسط بسیاری از محققان مختلف مورد توجه قرار گرفته است. این روش بر اساس استفاده از دستگاه‌های الکتروکود دوبعدی که توسط ذرات رسانا به نام الکتروکود ذره پر می‌شوند کار می‌کنند. در انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی، پس از تولید جریان الکتریکی، ذرات در میدان الکتریکی الکترودها باردار شده و باعث تولید میکروالکترودهای متعددی می‌شوند. این پدیده باعث افزایش سطح الکترودها شده و در نتیجه باعث افزایش راندمان فرآیند مذکور خواهد شد. انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی همچنین می‌تواند با ایجاد میکرو الکترودهای متعدد تولید الکترو اکسیدان‌ها مانند رادیکال‌های هیدروکسیل را افزایش و مصرف انرژی را کاهش دهد. همچنین راکتور سه بعدی می‌تواند با افزودن الکتروکود سوم تعداد مکان‌های فعال برای حذف آلاینده‌ها را افزایش داده و

¹ Reactive Red 198: RR198

فاصله انتقال جرم را کاهش دهد (۱۳،۱۴). انواع معمول الکتروذرات استفاده شده در مطالعات قبلی شامل کربن فعال گرانوله، ذرات گرافیت، آئروژل و... می‌باشند. این مواد اغلب دارای هدایت الکتریکی خوب و مساحت سطح ویژه بالایی هستند و ویژگی‌های مناسبی به عنوان الکتروذرات دارند. اما یکی مشکلات مواد مذکور مقادیر بالای استفاده از آنها است (۱۵،۱۶). نانوذرات در مطالعات اخیر به عنوان یک گزینه بسیار مناسب برای جایگزینی جاذب‌های قدیمی مطرح شده‌اند. در طول دهه‌های گذشته، انواع مختلفی از نانوذرات فریت به دلیل سطوح واکنش‌پذیرشان مورد توجه قرار گرفته‌اند. خواص مغناطیسی چنین فریت‌هایی امکان جداسازی سریع مغناطیسی را پس از فرآیند جذب فراهم می‌کند. با توجه به موارد ذکر شده نانوذرات مغناطیسی سنتز و از آن به عنوان یک گزینه برای جایگزینی الکتروذرات متداول مانند کربن گرانوله و غلبه بر معایب آنها استفاده گردید (۱۷). در بخش دیگری از این مطالعه از پرسولفات به عنوان جدیدترین منبع تولید رایکال‌های آزاد با توجه به خواص منحصر به فرد آن شامل پایداری نسبی بالاتر، پتانسیل اکسیداسیون قوی تر، واکنش‌پذیری گسترده، حلالیت آبی بالا و هزینه نسبتاً کمتر نسبت به رایکال‌های هیدروکسیل استفاده گردید (۱۸). در دهه‌های اخیر استفاده از اشعه ماوراء بنفش برای کاربردهای تصفیه در حال افزایش است که کاربردهای گوناگونی در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته برای تخریب آلاینده‌ها دارد. تابش فرابنفش در تلفیق با انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی و پرسولفات می‌تواند باعث افزایش هر چه بیشتر راندمان فرآیند مذکور گردد (۱۹). در این پژوهش، با تلفیق امواج فرابنفش و پرسولفات در فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی و به کارگیری نانوذرات مغناطیسی قابل بازیابی به عنوان کاتالیست، کارایی حذف آلاینده‌ها به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. این رویکرد هم‌زمان موجب بهبود نرخ

اکسیداسیون، کاهش تولید لجن و امکان جداسازی و استفاده مجدد از نانو کاتالیست خواهد گردید. بنابراین در این تحقیق تاثیر فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی در تلفیق با تابش فرابنفش و پرسولفات برای حذف RR198 از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت.

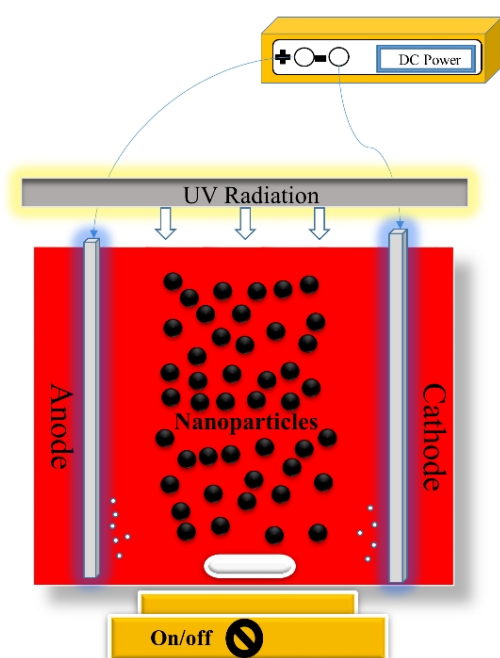
روش کار

مواد شیمیایی و وسایل مورد استفاده

تمامی مواد شیمیایی مورد استفاده گرید آزمایشگاهی و خالص بود و از شرکت مرک آلمان خریداری گردید. تجهیزات مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل لامپ فرابنفش ۶ وات، اسپکتروفتومتر، آب مقطرگیری، ترازو، منبع تامین برق DC، همزن مغناطیسی، آون، آهن ربا، pH متر، بورت و دماسنج بود. برای تهیه محلول‌های مورد نیاز از آب مقطر دو بار تقطیر استفاده گردید و محلول‌ها هر روز قبل از شروع آزمایش‌ها تهیه گردیدند.

سنتز نانوذرات مغناطیسی و تعیین ویژگی‌های آن

جهت سنتز نانوذرات $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{AC}$ در مرحله اول کربن فعال پودری خالص به مدت ۲ ساعت در داخل کوره با دمای 550°C قرار داده شد. دلیل این کار حذف ناخالصی‌های آلی موجود در کربن فعال بود. در مرحله بعد ۲ گرم از آن را وزن نموده و به همراه ۲ میلی مول $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و یک میلی مول از $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ به یک بشر ۲۵۰ سی سی وارد شد. سپس ۱۰۰ سی سی آب مقطر دیونیزه شده به آن اضافه گردید و بر روی یک هیتر مجهز به همزن مغناطیسی قرار گرفت. یک بورت بر روی بشر مذکور توسط پایه قرار داده شد و یک دماسنج هم داخل بشر قرار گرفت. توسط همزن مغناطیسی محتویات بشر به خوبی مخلوط و سپس دمای آن در 60°C تا 70°C به ساتیگراد ثابت گردید و به صورت قطره ای هر ۳ تا ۵ ثانیه یکبار آمونیاک به محتویات بشر اضافه گردید. مرتباً pH ظرف توسط کاغذهای مخصوص اندازه



شکل ۱. پایلوت مورد استفاده در تحقیق حاضر

اندازه گیری نمونه‌ها

جهت سنجش رنگ باقیمانده در نمونه از دستگاه اسپکتوفتومتر (Unico 2100 UV-Vis) با سل کوارتزی استفاده شد. رنگ RR198 حداکثر جذب را در طول موج ۵۱۸ نانومتر دارد، بنابراین دستگاه اسپکتروفتومتر بر روی طول موج مذکور تنظیم گردید. سپس منحنی کالیبراسیون رنگ رسم گردید و غلظت‌های باقیمانده بر اساس آن مشخص گردید.

یافته‌ها

در بخش اول مطالعه نانوذرات سنتز شده از لحاظ ساختار و ویژگی‌های آن مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت که در ادامه به نتایج آن آمده است.

آنالیز نانوذرات سنتز شده

بر اساس نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نانوذرات مذکور دارای ساختار کروی شکل با اندازه میانگین ذرات بین ۲۸/۵ تا ۳۱ nm بودند و میزان کولوخه شدن نانوذرات بسیار اندک بود. نتایج آنالیز نقشه‌برداری عنصری و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نانوذرات سنتز شده

گیری شد و پس از رسیدن pH به بالاتر از ۱۰ خاصیت مغناطیسی محتویات بشر توسط آهنربا بررسی شد. شایان ذکر است که با توجه به سمی بودن آمونیاک تمام مراحل ذکر شده در زیر هود آزمایشگاهی انجام شد. پس از اطمینان از ایجاد خاصیت مغناطیسی شیر بورت بسته و نانوذرات سنتز شده چندین بار توسط آب مقطر شسته شد تا pH آن به محدوده خنثی برسد. نهایتاً نانوذرات به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ °C خشک شد. برای تعیین مشخصات نانوذرات سنتز شده از آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، آزمایش طیف‌سنجی پرتو ایکس، آزمایش طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس، آزمایش مغناطیس سنج نمونه مرتعش، نقشه برداری عنصری و طیف‌سنجی تبدیل فوری مادون قرمز استفاده گردید.

پایلوت مورد استفاده و پارامترهای مورد تحقیق

در شکل ۱ شماتیک پایلوت مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است سلول الکتروشیمیایی شامل یک بشر ۴۰۰ میلی لیتری بود که در آن یک جفت صفحه تیتانیومی به عنوان الکترود کاتد و آنود، با فاصله ۵ سانتیمتر و به ابعاد ۳۰ میلی متر×۱۵۰ میلی متر×۲ میلی متر قرار داده شده بود. از یک منبع تغذیه با جریان مستقیم برای تامین جریان الکتریکی استفاده شد و پایلوت مذکور از قسمت بالا تحت تابش ۳ لامپ ۶ وات قرار گرفت. برای تعیین پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه مروری بر مطالعات قبلی شد و مهمترین پارامترها مشخص شدند. پارامترهای تابش اشعه فرابنفش ثابت ۱۸ وات، غلظت اولیه رنگ ۱۰ تا ۵۰ mg/L، غلظت نانوذرات ۲۵۰ تا ۷۵۰ mg/L، غلظت پرسولفات ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ mg/L، زمان تماس ۱۰ تا ۱۰۰ دقیقه، pHهای ۳ تا ۹ و میزان جریان‌های ۵ تا ۲۰ ولت در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفتند.

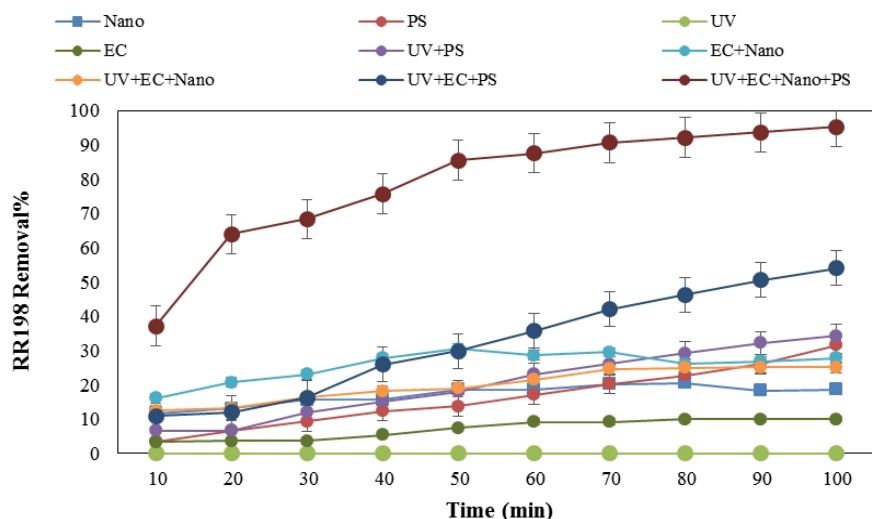
نشان‌دهنده توزیع تقریباً یکنواخت هر سه عنصر در سطح نانوذرات سنتز شده بود. همچنین مقادیر هر یک از عناصر کربن، اکسیژن و آهن در نانوذره تقریباً به صورت یکنواخت و مورد انتظار بود. در نتایج آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نانوذرات طیف جذبی 598 cm^{-1} مشاهده شد که مربوط به ارتعاشات کششی Fe-O در ساختار نانوذرات و بخش مربوط به Fe_3O_4 بود. همچنین باند جذبی 3403.07 cm^{-1} مربوط به گروه‌های OH که احتمالاً به علت جذب رطوبت توسط نانوذرات این پیک ایجاد شده است. باند جذبی ضعیف 2364.3 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ موجود در ساختار نانوذره و باند جذبی ضعیف 2923.50 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی C-H می‌باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیز پراش پرتو ایکس، فازهای گرافیت و مگنتیت در ساختار نانوذرات شناسایی شد. با توجه به اینکه نانوذرات سنتز شده از جنس کربن فعال و به صورت مغناطیسی سنتز شده بودند تشخیص فازهای مذکور در ساختار آن قابل پیش بینی بود. مقدار ثابت اشباع مغناطیسی (Ms) نانوذرات در حدود 87.27 emu/g بود که تایید‌کننده خاصیت مغناطیسی مناسب نانوذرات می‌باشد و به سادگی توسط آهنربا می‌توان آن را از پساب تصفیه شده جداسازی نمود.

نتایج تاثیر فرآیندهای مختلف در حذف RR198

در شکل ۱ نتایج تاثیر فرآیندهای تکی و تلفیقی را در حذف رنگ RR198 نشان داده شده است. همانطور که از روند موجود در شکل برمی آید فرآیند تابش فرابنفش به تنهایی هیچ تاثیری در حذف رنگ RR198 نداشت. همچنین فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی با

استفاده از الکترودهای تیتانیومی هم تاثیر کمی در حذف رنگ RR198 داشت و راندمان آن پس از زمان تماس ۱۰ دقیقه در حدود ۱۰ درصد بود. نانوذرات کربن مغناطیسی نیز تاثیر زیادی در حذف رنگ نداشت، طوری که پس از زمان تماس ۷۰ دقیقه راندمان حذف به بیشترین مقدار آن یعنی ۲۰/۵۳ درصد رسید و سپس راندمان حذف روند کاهشی پیدا کرد. فرآیند پرسولفات به تنهایی پس از زمان تماس ۱۰۰ دقیقه راندمان حذف رنگ RR198 به ۳۱/۵۸ درصد رسید. تلفیق فرآیندهای تابش فرابنفش با پرسولفات باعث افزایش راندمان به حدود ۳۴/۳۳ درصد شد و فرآیند تلفیقی انعقاد الکتروشیمیایی با نانوذرات یا همان انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی راندمان حذف رنگ RR198 آن معادل ۳۰/۵۲ درصد بود. تلفیق تابش فرابنفش با انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی نه تنها باعث افزایش راندمان فرآیند نشد بلکه منجر به کاهش راندمان فرآیند گردید، به طوری که راندمان فرآیند پس از ۱۰۰ دقیقه زمان تماس برابر با ۲۵/۱۶ درصد بود. راندمان فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی و پرسولفات پس از ۱۰۰ دقیقه زمان تماس در حدود ۵۴ درصد بود. نهایتاً راندمان تلفیق تمام فرآیندهای تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی، نانوذرات و پرسولفات با هم پس از ۱۰۰ دقیقه ۹۵/۲۵ درصد بود. با توجه به نتایج به دست آمده فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی، نانوذرات و پرسولفات به عنوان فرآیند نهایی انتخاب و در ادامه بپینه سازی آن انجام گرفت.



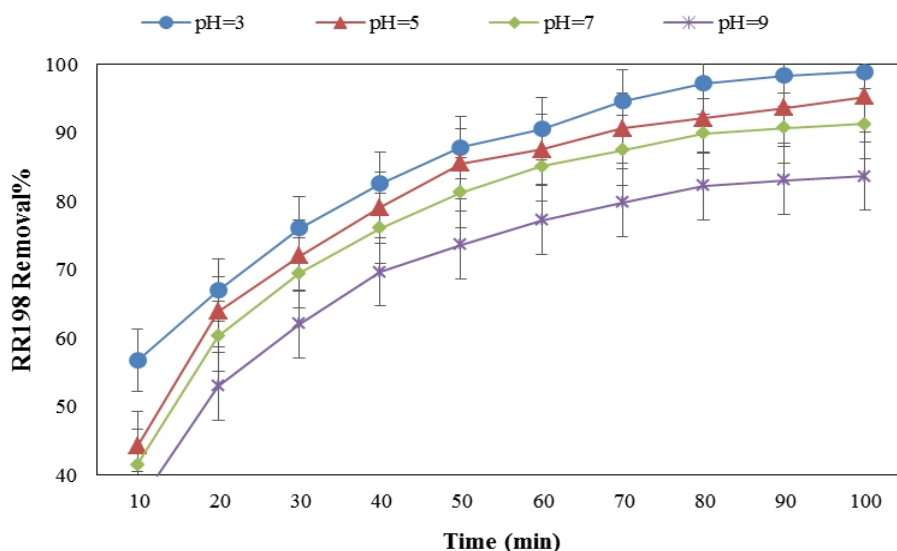
شکل ۲. نتایج تاثیر فرآیندهای ترکیبی نانوذرات (Nano)، پرسولفات (PS)، تابش فرابنفش (UV)، انعقاد الکتروشیمیایی (EC) و فرآیندهای ترکیبی تابش فرابنفش+پرسولفات (UV+PS)، انعقاد الکتروشیمیایی+نانوذرات (EC+Nano)، تابش فرابنفش+انعقاد الکتروشیمیایی+نانوذرات (UV+EC+Nano)، تابش فرابنفش+انعقاد الکتروشیمیایی+پرسولفات (UV+EC+PS)، تابش فرابنفش+انعقاد الکتروشیمیایی+نانوذرات+پرسولفات (UV+EC+Nano+PS)

نتایج بررسی تاثیر متغیرهای موثر بر فرآیند تلفیقی

تاثیر متغیر pH

نتایج بررسی تاثیر pH در حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی، نانوذرات و پرسولفات در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل آمده است در pHهای قلیایی راندمان حذف کمتر از pHهای اسیدی است. راندمان حذف رنگ RR198 در pHهای معادل ۳، ۵،

۷ و ۹ پس از ۱۰۰ دقیقه زمان تماس به ترتیب برابر با ۹۸/۹۰، ۹۵/۲۵، ۹۱/۲۵ و ۸۳/۶۵ درصد بود. بیشترین راندمان حذف در pH برابر ۳ به دست آمد، اما از آنجایی که در pH برابر ۵ نیز راندمان بالایی مشاهده گردید، برای ادامه فرآیند از این pH استفاده شد تا دفع پساب تصفیه شده با فرآیند ساده تر بوده و نیاز به خنثی سازی و هزینه اضافی نداشته باشد.

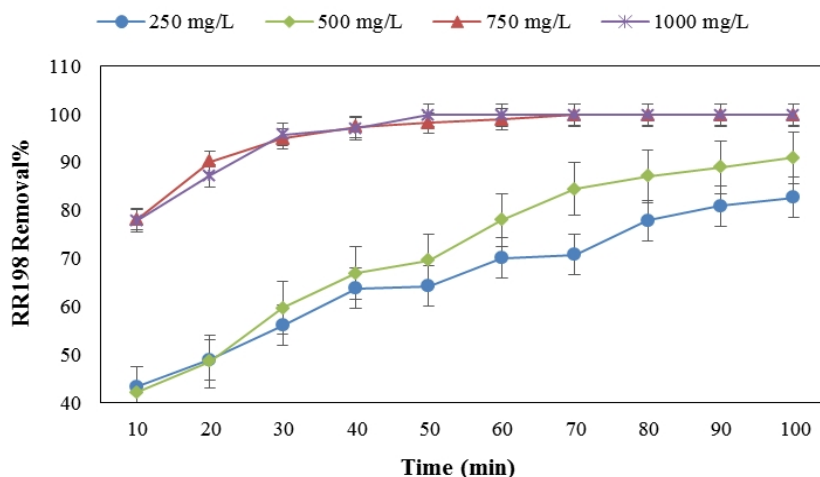


شکل ۳. نتایج بررسی تاثیر pH در حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی

تأثیر متغیر غلظت پرسولفات

یکی دیگر از متغیرهای مورد بررسی در مطالعه حاضر غلظت پرسولفات بود که نتایج آن در شکل ۴ آمده است. همانطور که از نتایج بر می آید با افزایش غلظت پرسولفات از ۲۵۰ تا ۷۵۰ میلی گرم بر لیتر

راندمان حذف رنگ RR198 روند افزایشی داشت اما با افزایش بیشتر غلظت به ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف ثابت ماند.

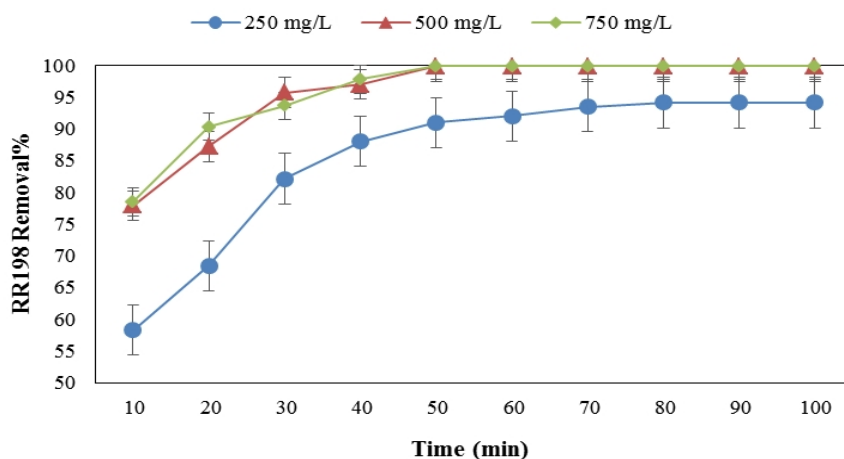


شکل ۴. نتایج بررسی تأثیر غلظت پرسولفات در حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی

تأثیر متغیر دوز نانوذرات

نتایج بررسی تأثیر دوز نانوذرات در راندمان حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج کسب شده افزایش دوز نانوذرات از ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر باعث

افزایش راندمان حذف رنگ گردید. با افزایش بیشتر دوز نانوذرات به ۷۵۰ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف ثابت ماند.



شکل ۵. نتایج بررسی تأثیر دوز نانوذرات در حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی

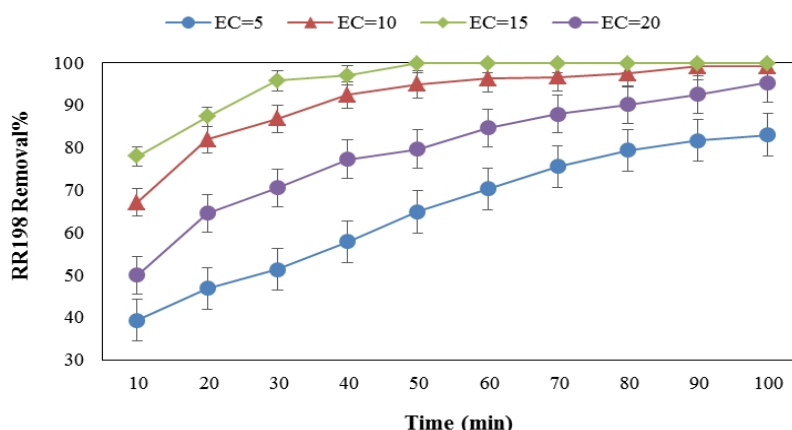
تأثیر متغیر ولتاژ جریان

نتایج تأثیر ولتاژ جریان بر حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی در شکل ۶ نشان داده شده است و

همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ولتاژ جریان از ۵ تا ۱۵ ولت در محفظه واکنش، راندمان حذف روند افزایشی داشت. بر اساس نتایج به دست

روند کاهشی پیدا کرد. بر اساس نتایج به دست آمده راندمان حذف رنگ RR198 در ولتاژهای ۱۰ و ۱۵ ولت بسیار نزدیک بود و ولتاژ ۱۰ ولت به عنوان ولتاژ بهینه فرآیند انتخاب گردید و در ادامه آزمایش‌ها با ولتاژ مذکور انجام گرفت.

آمده راندمان حذف رنگ توسط فرآیند تلفیقی در ولتاژهای ۵ و ۱۰ ولت به ترتیب برابر با ۸۱/۷ و ۹۹/۱ درصد پس از ۹۰ دقیقه تماس بود. همچنین در ولتاژ برابر با ۱۵ ولت پس از زمان تماس ۵۰ دقیقه راندمان حذف رنگ معادل ۹۹/۸۴ درصد بود. با افزایش بیشتر ولتاژ به ۲۰ ولت راندمان حذف رنگ

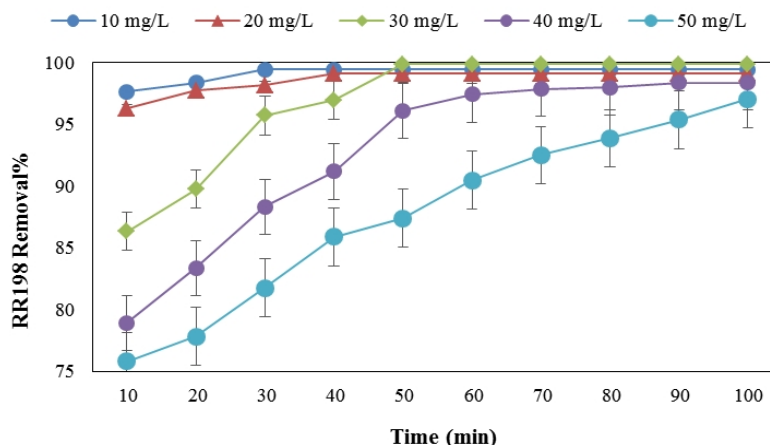


شکل ۶. نتایج بررسی تاثیر ولتاژ جریان (ولت) در حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی

پس از ۴۰ دقیقه راندمان حذف رنگ RR198 معادل ۹۹ درصد شد. همچنین در غلظت رنگ برابر ۳۰ میلی گرم بر لیتر پس از ۵۰ دقیقه راندمان حذف ۹۹/۸ درصد حاصل شد. در غلظت‌های رنگ ۴۰ و ۵۰ میلی گرم بر لیتر پس از زمان تماس ۱۰۰ دقیقه راندمان حذف به ترتیب برابر ۹۸ و ۹۷ درصد به دست آمد.

تاثیر متغیر غلظت اولیه رنگ RR198

آخرین متغیر مورد بررسی در این مطالعه تاثیر غلظت رنگ بر حذف آن توسط فرآیند تلفیقی بود که نتایج آن در شکل ۷ آمده است. بر اساس نتایج کسب شده افزایش غلظت رنگ در محفظه واکنش باعث کاهش راندمان فرآیند تلفیقی شد. در غلظت رنگ RR198 معادل ۱۰ میلی گرم بر لیتر و پس از ۳۰ دقیقه زمان تماس راندمان حذف معادل ۹۹/۴ درصد به دست آمد. در غلظت رنگ ۲۰ میلی گرم بر لیتر



شکل ۷. نتایج بررسی غلظت اولیه رنگ در حذف رنگ RR198 توسط فرآیند تلفیقی

بحث

ساختار و ویژگی‌های نانوذرات

مطالعه ساختار و ویژگی‌های نانوذره سنتز شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانوذرات دارای ساختار کروی شکل با اندازه منافذ خوب و سطح تقریباً یکنواخت می‌باشد که با نتایج مطالعه محمدی فرد و همکاران مطابقت دارد (۲۰). نتایج آنالیز نقشه برداری عنصری و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس هم نشان دهنده توزیع یکنواخت عناصر آهن، کربن و اکسیژن و همچنین درصد تقریباً یکنواخت آنها در ساختار نانوذره بود. در مطالعه احمدیان و همکاران نیز که از همین نانوذرات برای حذف سیپروفلوکساسین از محلول‌های آبی استفاده شد نتیجه آنالیز نقشه برداری و طیف سنجی پراش پرتو ایکس تقریباً مشابه مطالعه حاضر بود (۱۳). در آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نانوذرات باندهای جذبی مشاهده شد که مربوط به گروه‌های هیدروکسیل (OH) و ارتعاشات کششی متال-اکسید (Fe-O) می‌باشد. در مطالعه ملکوتیان و همکاران، که در سال ۲۰۲۱ انجام گرفت و از نانوذرات مغناطیسی برای حذف مترونیدازول استفاده گردید، گروه‌های هیدروکسیل (OH) و ارتعاشات کششی متال-اکسید (Fe-O) مشاهده شد که تقریباً مشابه با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر می‌باشد (۱۴). در تجزیه و تحلیل آنالیز طیف‌سنجی پرتو ایکس دو فاز مغناطیسی و گرافیتی شناسایی شد که با نتایج مطالعه یگانه بادی و همکاران که از همین نانوذرات برای حذف سفتریاکسون از محلول‌های آبی استفاده شد همخوانی دارد (۲۱). نتایج آنالیز مغناطیس سنج نمونه مرتعش مقدار ثابت اشباع مغناطیسی (Ms) نانوذرات را در حدود ۲۷/۸۷ emu/g اندازه گیری کرد که با نتایج مطالعات یگانه بادی و ملکوتیان تقریباً مشابه است (۱۴، ۲۱).

نتایج تاثیر فرآیندهای تکی در حذف RR198

فرآیند تابش فرابنفش به تنهایی هیچ تاثیری در حذف رنگ RR198 نداشت. تابش فرابنفش به تنهایی معمولاً کارایی چندانی در حذف آلاینده‌های مقاوم مانند رنگ‌های نساجی ندارد و معمولاً در ترکیب با سایر فرآیندها استفاده می‌گردد. در مطالعه آقاجری و همکاران که از فرآیند فوتوکاتالیستی تابش فرابنفش با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم برای حذف رنگ RR198 استفاده گردید مواجهه رنگ با غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر با تابش فرابنفش به تنهایی به مدت ۹۰ دقیقه هیچ تاثیری در حذف آن نداشت که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد (۲۲). فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی با استفاده از الکترودهای تیتانیومی راندمان آن پس از زمان تماس ۱۰ دقیقه در حدود ۱۰ درصد بود. معمولاً در فناوری انعقاد الکتروشیمیایی متداول آب وارد واحدی می‌شود که از یک جفت ورق فلزی به نام الکتروود تشکیل شده است. یک میدان الکتریکی جریان مستقیم برای القای واکنشهای الکتروشیمیایی، به الکتروودها اعمال می‌شود. در اثر القای الکتریکی فلزات منعقد کننده از سطح آند کنده شده و باعث انعقاد و رسوب آلاینده‌ها می‌شوند. در این فرآیندها الکترودهای تولید کننده منعقد کننده در آب از آهن یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. در مطالعه رمضان و همکاران که از الکترودهای آهنی و سایر الکترودهای که تولید ماده منعقد کننده می‌کنند در طی فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی برای حذف رنگ استفاده شد راندمان‌های بالایی به دست آمد (۲۳). اما یکی از معایب اصلی این فرآیندها خوردگی الکترودها و تولید مقادیر زیادی لجن رنگی است که ناشی از تولید منعقد کننده‌ها در راکتور می‌باشد. این لجن یک معضل زیست محیطی محسوب می‌شود و نیاز به تصفیه اضافی دارد. دلیل راندمان پایین فرآیند انعقاد الکترو شیمیایی با استفاده از الکترودهای تیتانیومی در این مطالعه (حدود ۱۰٪) استفاده از الکترودهای مقاوم

تیتانیومی و عدم تولید منعقد کننده می باشد. زیرا در فرآیندهای انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی هدف اصلی آن عدم تولید لجن و استفاده از نانوذرات می باشد (۱۵). نانوذرات کربن مغناطیسی سنتز شده با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر و پس از زمان تماس ۷۰ دقیقه راندمان حذف آن ۲۰/۵۳ درصد بود. در استفاده از نانوذرات مغناطیسی فرآیند جذب سطحی اتفاق می افتد و این موضوع نشان دهنده راندمان پایین این نانوذرات جهت جذب سطحی رنگ RR198 می باشد. در مطالعه شریفی فرد و همکاران که از کربن فعال تهیه شده از پوست هسته زردآلو برای حذف رنگ RR198 استفاده گردید راندمان حذف در حدود ۴۶ درصد به دست آمد که تقریباً نشان دهنده جذب پایین این رنگ توسط برخی از جاذب های کربنی می باشد (۲۴). رادیکال های سولفات اساساً از محلول نمک های مختلف پراکسیدی سولفات و پراکسی مونوسولفات و در محل تولید می شوند. آنیون پرسولفات یک اکسیدان با پتانسیل اکسیداسیون ۲ ولت است که می تواند پس از فعال شدن توسط عوامل مختلف مانند گرما، اشعه ماوراء بنفش یا فلزات انتقالی رادیکال های قوی سولفات با پتانسیل اکسیداسیون ۲/۶ ایجاد کند و انواع آلاینده ها را حذف کند. در مطالعه حاضر فرآیند پرسولفات به تنهایی راندمان حذف رنگ در حدود ۳۱/۵۸ درصد بود که دلیل مقدار پایین راندمان عدم فعال سازی آن توسط عوامل ذکر شده می باشد (۲۵). یکی از عواملی که برای فعال سازی آنیون پرسولفات استفاده می شود تابش فرابنفش می باشد که توسط بسیاری از پژوهشگران برای حذف آلاینده های مقاوم استفاده شده است. در واقع همانطور که اشاره شد تابش فرابنفش باعث ایجاد رادیکال های سولفات از آنیون پرسولفات می گردد. در این مطالعه تلفیق تابش فرابنفش با پرسولفات راندمان حذف رنگ به حدود ۳۴/۳۳ درصد رسید، یعنی تنها باعث افزایش ۴/۳۳ درصدی راندمان نسبت به آنیون پرسولفات به تنهایی شد. در مطالعه صید محمدی و

همکاران که از فرآیند تلفیقی امواج فرابنفش و پرسولفات برای حذف رنگ متیلن بلو استفاده گردید راندمان حذف معادل ۷۲ درصد در شرایط بهینه به دست آمد. دلیل راندمان بالاتر احتمالاً بهینه سازی فرآیند و ساختار مقاوم تر رنگ RR198 می باشد (۲۶). در فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی راندمان حذف رنگ در حدود ۳۰/۵۲ درصد بود که در واقع تلفیق راندمان های انعقاد الکتریکی و نانوذرات کربن مغناطیسی با هم می باشد (انعقاد الکتریکی سه بعدی) (۱۵). راندمان حذف رنگ RR198 نسبتاً پایین بود که نشان دهنده کارایی پایین این فرآیند در حذف رنگ مذکور می باشد. تلفیق تابش فرابنفش با انعقاد الکتروشیمیایی سه بعدی نه تنها باعث افزایش راندمان فرآیند نشد بلکه منجر به کاهش راندمان فرآیند گردید. دلیل این پدیده احتمالاً ساختار مقاوم رنگ RR198 و عدم وجود رادیکال های آزاد کافی در محفظه واکنش می باشد. در مرحله بعد به فرآیند مذکور آنیون پرسولفات اضافه گردید و همین باعث افزایش راندمان فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی و پرسولفات به حدود ۵۴ درصد شد. در واقع در این مرحله رادیکال های سولفات به دلیل واکنش بین آنیون های پرسولفات و تابش پرسولفات ایجاد می گردد که منجر به تخریب رنگ RR198 می گردد. یکی دیگر از فرآیندهایی که باعث ایجاد رادیکال پرسولفات می گردد ترکیب انعقاد الکتروشیمیایی با آنیون پرسولفات است که تحت عنوان الکترو پرسولفات نامیده می شود (۱۹). در مرحله نهایی تلفیق تمام فرآیندهای تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی، نانوذرات و پرسولفات باعث حذف رنگ به میزان ۹۵/۲۵ درصد شد که در ادامه بهینه سازی آن مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج بررسی متغیرهای مؤثر بر فرآیند تلفیقی

یکی از مهمترین متغیرها در مطالعات اکسیداسیون پیشرفته، pH در محفظه واکنش می باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه راندمان حذف

رنگ RR198 در pHهای اسیدی بالاتر از pHهای قلیایی بود که با توجه به مشکلات دفع پساب pH برابر ۵ به عنوان pH بهینه انتخاب گردید. اندازه‌گیری pH_{ZPC} نانوذرات سنتز شده مقادیر آن را برابر ۷/۵ نشان داد که تقریباً مشابه نتایج مطالعات مشابه گذشته است (۱۳). به همین دلیل در $pH < 7/5$ بار سطحی نانوکامپوزیت مثبت و در $pH > 7/5$ بار سطحی نانوکامپوزیت منفی است. ساختار رنگ RR198 آبیونی می‌باشد و بار منفی دارد بنابراین در pHهای اسیدی بار نانوذرات مثبت و بار رنگ مذکور منفی است که باعث جذب بیشتر آن بر روی سطح جاذب خواهد شد. همچنین در pHهای اسیدی تشکیل رادیکال‌ها سولفات نیز تسریع می‌گردد که باعث افزایش بیشتر راندمان فرآیند تلفیقی خواهد شد. در مطالعه عظیمی و همکاران که در یک مطالعه مروری به بررسی حذف رنگ با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته پرداخته شده بود نتیجه مشابهی به دست آمد و با افزایش pH راندمان حذف رنگ RR198 روند کاهشی داشت (۲۷). همچنین در مطالعه شهریاری و همکاران نیز که از فرآیند فتوکاتالیستی در ترکیب با نانوذرات سبز آهن برای حذف رنگ RR198 از محلول‌های آبی استفاده شد نیز نتایج مشابه تحقیق حاضر به دست آمد (۲۸).

در این مطالعه با افزایش غلظت پرسولفات تا ۷۵۰ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف رنگ RR198 روند افزایشی داشت اما با افزایش بیشتر غلظت، هیچ افزایشی در راندمان حذف رنگ مشاهده نشد. پرسولفات در فرآیند تلفیقی در واقع باعث افزایش رادیکال‌های آزاد سولفات تولیدی در طی فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی، نانوذرات و پرسولفات می‌شود. در نتیجه افزایش غلظت پرسولفات باعث افزایش میزان رادیکال‌های آزاد و در نتیجه تخریب بیشتر رنگ RR198 خواهد شد (۲۵). اما با افزایش بیشتر غلظت پرسولفات راندمان حذف ثابت باقی ماند که دلیل این موضوع هم نقش خود

تخریبی رادیکال‌های سولفات می‌باشد که باعث کاهش تعداد رادیکال‌های سولفات خواهد شد. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعه مهرشاد و همکاران که از فرآیند تلفیقی فتوکاتالیستی تابش فرابنفش و پرسولفات برای حذف رنگ متیلن بلو استفاده کردند همخوانی دارد (۲۹).

افزایش دوز نانوذرات تا ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف رنگ RR198 روند افزایشی داشت اما با افزایش بیشتر نانوذرات راندمان حذف ثابت شد. تعیین میزان بهینه نانوذرات به عنوان یکی از مهمترین متغیرها محسوب می‌شود و معمولاً با افزایش دوز نانوذرات سایت‌های خالی که بر روی سطح نانوذرات کربنی وجود دارد بیشتر در دسترس خواهد بود. بنابراین افزایش دوز نانوذرات باعث افزایش تماس سایت‌های جاذب و آلاینده و در نتیجه افزایش راندمان حذف رنگ RR198 در فرآیند تلفیقی تابش فرابنفش، انعقاد الکتروشیمیایی، نانوذرات و پرسولفات خواهد شد. در مطالعه مهدی زاده و همکاران که از فرآیند فوتوکاتالیستی ازن و تابش فرابنفش برای حذف رنگ RR198 از محلول‌های آبی استفاده گردید هم نتایجی مشابه نتیجه مطالعه حاضر به دست آمد (۳۰). افزایش بیش از حد بهینه نانوذرات هم تاثیر چندانی در افزایش راندمان حذف رنگ RR198 نداشت که دلیل این پدیده هم احتمالاً همپوشانی مکان‌های جاذب در سطح جاذب می‌باشد. نتیجه این مطالعه با نتایج مطالعه آدان^۱ و همکاران و همچنین مطالعه کمائی و همکاران همخوانی دارد (۳۱، ۳۲).

یکی دیگر از متغیرهای مهم در فرآیند تلفیقی ولتاژ جریان بود و بر اساس نتایج با افزایش ولتاژ جریان تا ۱۵ ولت راندمان حذف روند افزایشی داشت اما افزایش بیشتر ولتاژ جریان به ۲۰ ولت باعث کاهش راندمان فرآیند مذکور گردید. افزایش ولتاژ جریان از طریق هیدرولیز آب، باعث تولید رادیکال‌های هیدوکسیل و رادیکال‌های سولفات می‌شود که منجر

^۱ Adane

به افزایش راندمان حذف رنگ RR198 می‌شود (۱۳،۲۵). کاهش راندمان حذف رنگ RR198 نیز به دلیل واکنش‌های جانبی ناشی از چگالی جریان بالا تفسیر کرد که منجر به تکامل کاتدی گاز هیدروژن از طریق معادله ۱ می‌شود (۲۵).



آخرین پارامتر مورد مطالعه غلظت اولیه رنگ بود که بر اساس نتایج کسب شده، افزایش غلظت رنگ باعث کاهش راندمان فرآیند تلفیقی شد. در واقع در شرایط

بپینه به دست آمده در مطالعه، سایت‌های جذب موجود بر سطح نانوذره، رادیکال‌های هیدروکسیل و رادیکال‌های سولفات موجود در محفظه واکنش ثابت می‌باشد و تنها غلظت رنگ افزایش می‌یابد. بنابراین حذف رنگ RR198 در شرایط ذکر شده با افزایش غلظت رنگ مورد انتظار می‌باشد (۱،۶). در جدول ۱ مقایسه‌ای بین نتایج مطالعه حاضر با چند مطالعه مشابه آمده است.

جدول ۱. مقایسه ای بین نتایج مطالعه حاضر با چند مطالعه مشابه

سیستم / فرآیند اصلی	آلاینده	شرایط بپینه	راندمان (%)	مرجع
TiO ₂ -Fe ₃ O ₄ nanocomposite + persulfate + UV-LED (فتو کاتالیستی همراه با فعال سازی پرسولفات)	RR198	pH برابر ۳، پرسولفات ۰/۸ میلی مول، کاتالیست برابر ۱۹۰۰-۳۰۰ میلی گرم بر لیتر، زمان تماس ۸۵ دقیقه	۹۸	(33)
Fe ₃ O ₄ یا Fe ₃ O ₄ @C برای فعال سازی پرسولفات برای حذف رنگ‌ها	انواع آلی و رنگ‌ها شامل AO7، RhB و RR198	معمولاً pH اسیدی تا خنثی، میزان کاتالیست ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر	بسیار بالا	(34)
RSM) TiO ₂ /Fe ₃ O ₄ + PS + UV-LED / طراحی تجربی)	RR198	پارامترها شبیه مطالعه اول	بالا (۹۰-۹۹٪)	(35)
فرآیند تابش فرابنفش/انعقاد الکترو شیمیایی/نانوذرات /پرسولفات	RR198	pH=5، غلظت پرسولفات برابر با ۷۵۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت نانوذرات برابر با ۵۰۰ میلی گرم در لیتر و میزان جریان برابر با ۱۰ ولت	۹۹/۱	مطالعه حاضر

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر نشان داد که نانوذرات کربن مغناطیسی ساختار مناسبی دارد و از لحاظ ویژگی‌های مورد آزمایش ایده آل برای استفاده در تحقیق حاضر بودند. بر اساس نتایج به دست آمده فرآیند تکی تابش فرابنفش هیچ تاثیری در حذف رنگ RR198 نداشت و در بین فرآیندهای تکی فرآیند پرسولفات دارای بیشترین راندمان بود و پس از آن نانوذرات در جایگاه بعدی قرار داشت. فرآیند انعقاد الکتریکی سه بعدی هم راندمان حذف نسبتاً کمی و در حدود ۳۰/۵۲ داشت بنابراین در مرحله بعدی با سایر فرآیندها مانند تابش فرابنفش تلفیق گردید اما تلفیق آنها تاثیری در افزایش راندمان

نداشت. تلفیق فرآیند تابش فرابنفش / انعقاد الکتریکی سه بعدی با آنیون پرسولفات باعث افزایش چشمگیری در راندمان فرآیند گردید. با توجه به نتایج به دست آمده فرآیند مذکور می‌تواند به خوبی برای حذف آلاینده‌های مقاوم با ساختار آلی مانند رنگ‌های نساجی در صنایع مربوطه مانند صنایع رنگرزی استفاده گردد.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش در دانشگاه علوم پزشکی بم با کد اخلاق IR.MUBAM.REC.1402.018 تصویب گردیده است.

سهم نویسندگان

محمد احمدیان طراحی آزمون را انجام داد. رحیمه فتحی خواه، فاطمه احمدی زاده و محمد عزیزی انجام آزمایش‌ها را برعهده داشتند. داود کلانتر نیستانی و هیوا حسینی تجزیه و تحلیل داده را انجام دادند.

حمایت مالی

این پژوهش در کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی بم به عنوان طرح پژوهشی با شماره طرح ۴۰۲۰۰۰۱۰ تصویب گردیده است.

تضاد منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

References

- 1- 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):e23667.
- 2- Samar T, Wadood M, SK Haque. Three-dimensional Electrocoagulation Process Optimization Employing Response Surface Methodology that Operated at Batch Recirculation Mode for Treatment Refinery Wastewaters. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2024;25:59-74.
- 3- First National Conference on Environmental Science and Management. A Review of Dye Removal Techniques from Textile Effluents. Publication Year: 2015.
- 4- Uddin AN, Chowdhury TA, Rahman A, Fahim AR, Rahman A, Imon IH, et al. Adsorptive removal of Remazol Red (RR) from textile effluents using jute stick charcoal (JSC). *H2Open Journal*. 2024;7(1):78-92.
- 5- Ashna P, Heydari R. Removal of Reactive Red 198 from aqueous solutions using modified clay: Optimization, kinetic and isotherm. *Journal of the Chilean Chemical Society*. 2020;65(4):4958-4961.
- 6- Karami MA, Sharafi K, Asadi A, Bagheri A, Yosefvand F, Sony Sh, et al. Degradation of Reactive Red 198 (RR198) from aqueous solutions by advanced oxidation processes (AOPS): O₃, H₂O₂/O₃ and H₂O₂/ultrasonic. *Bulgarian Chemical Communications*. 2016;48:43-49.
- 7- Shaali A, Kamyab Moghadas B, Tamjidi S. Removal of Reactive Red 198 dye from aqueous media using Boehmite/Fe₃O₄/GO magnetic nanoparticles as a novel & effective adsorbent. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2023;103(18): 7319-7338.
- 8- Assadi A, Soudavari A, Mohammadian Fazli M. Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation processes in removing reactive red 196 from aqueous solution. *Journal of Human Environment and Health Promotion*, 2016;1(3):172-182.
- 9- Haffad H, Zbair M, Anfar Z, Ahsaine HA, 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 reviews*. 2019;40(2):225-237.
- 10- Mahdizadeh H, Dadban Shahamat Y, Rodríguez-Couto S. Discoloration and mineralization of a textile azo dye using a hybrid UV/O₃/SBR process. *Applied Water Science*. 2021;11(10):159.
- 11- Ziembowicz S, Kida M. The Optimization of Advanced Oxidation Processes for the Degradation of Industrial Pollutants. *Sustainability*, 2025;17:1908.
- 12- Dehghani M. Application of Electrocoagulation Process for Reactive Red 198 Dye Removal from the Aqueous Solution. *Iranian Journal of Health Sciences*. 2014;2(2):1-9.
- 13- Ahmadian M, Malakootian M, Aghasi M, Fatehizadeh A. Removal of ciprofloxacin from aqueous solution by a three-dimensional electrocoagulation process using Fe₃O₄@AC nanocomposite as a particle electrode in combination with persulfate: nonlinear fitting of isotherms and kinetic models. *Desalination and Water Treatment*. 2020;203:188-201.
- 14- Malakootian M, Aghasi M, Fatehizadeh A, Ahmadian M. Synergetic metronidazole removal from aqueous solutions using combination of electro-persulfate process with magnetic Fe₃O₄@AC nanocomposites: nonlinear fitting of isotherms and kinetic models. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 2021;235(10):1297-1321.

- 15- Hoang NT, Application of 3D electrodes in various electrocatalytic systems for the degradation of organic pollutants in the last 5 years (2019-2024). *Chemical Engineering Journal*. 2025;515: 163676.
- 16- Shen B, Xh Wen, Huang X. Enhanced removal performance of estriol by a three-dimensional electrode reactor. *Chemical Engineering Journal*. 2017;327:597-607.
- 17- Abegunde SM, Ayorinde Adebayo M, EF Olasehinde, Jimoh KT, Recent advances in zinc oxide nanoparticles for dye removal: Challenges and future directions – A review, *Sustainable Chemistry One World*. 2025;6:100064.
- 18- Hoang NT, Nguyen VT, Tuan NDM, Manh TD, Le PC, Tac DV. Degradation of dyes by UV/Persulfate and comparison with other UV-based advanced oxidation processes: Kinetics and role of radicals. *Chemosphere*. 2022;298:134197.
- 19- Ayati B, Ghorbani Z. Enhancement of the electro-activated persulfate process in dye removal using graphene oxide nanoparticle. *Water Science and Technology*. 2021;83(9): 2169–2182.
- 20- Mohammadifard A, Allouss D, Vosoughi M, Dargahi A, Moharrami A. Synthesis of magnetic Fe₃O₄/activated carbon prepared from banana peel (BPAC@Fe₃O₄) and salvia seed (SSAC@Fe₃O₄) and applications in the adsorption of Basic Blue 41 textile dye from aqueous solutions. *Applied Water Science*. 2022;12(5):88.
- 21- Badi MY, Azari A, Pasalari H, Esrafil A, Farzadkia M. Modification of activated carbon with magnetic Fe₃O₄ nanoparticle composite for removal of ceftriaxone from aquatic solutions. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;261:146-154.
- 22- Aghajari N, Yonesi H, Bahramifar N, Ghasemi Z. Photocatalytic removal of Reactive Red 198 from Aqueous Solution using titanium dioxide photocatalyst supported on Fe-ZSM-5 zeolite. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2017;27(150):137-157. (In Persian)
- 23- Ramadan MM, Moneer AA, El-Mallah NM et al. A comparative study for the removal of reactive red 49 (RR49) and reactive yellow 15 (RY15) using a novel electrode by electrocoagulation technique. *SN Appl. Sci*. 2023(5): 116.
- 24- Sharififard H, Sharififard I. Sharififard, Removal of reactive red dye 198 by modified apricot kernel shell derived-activated carbon bio-composite: kinetics, equilibrium, and thermodynamics. *Journal of Textile Science and Technology*. 2024;12(4):1-17. (In Persian)
- 25- Malakootian M, Ahmadian M. Ciprofloxacin removal by electro-activated persulfate in aqueous solution using iron electrodes. *Applied Water Science*. 2019;9(5):140.
- 26- Seid-Mohammadi, Zolghadr Nasab H, Nouri F, Yavari D, Asadi F. Efficiency of persulfate activated by uv irradiation in the presence of granular activated carbon for removal of methylene blue dye from aqueous solution. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences*. 2021;26(3):52-70. (In Persian)
- 27- Azimi, SC, Shirini F. Advanced Oxidation Process as a Green Technology for Dyes Removal from Wastewater: A Review. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2021;40(5):1467-1149.
- 28- Shahryari T, Khosravi R, Khosravi Baghdadeh A, Esform A. Photocatalytic Process Using Green Iron Nanoparticles for azo dye degradation from aqueous solution. *Journal of Research in Environmental Health*. 2020;6(1):11-22. (In Persian)
- 29- Mehrshad S, Shokoohi R, Asgari i Gh, Leili M. Efficiency of Integrated Photocatalytic UV/Persulfate Process in Removal of Methylene Blue and Acid Green 3 from Aqueous Solutions. *Journal of Health*. 2020;11(1):60-76. (In Persian)
- 30- Mahdizadeh H, Dadban Shahamat Y, Rodríguez-Couto S. Discoloration and mineralization of a textile azo dye using a hybrid UV/O₃/SBR process. *Appl Water Sci* 2021;11(159):79-1.
- 31- Adane T, Hailegiorgis SM, Alemayehu E. Acid-activated bentonite blended with sugarcane bagasse ash as low-cost adsorbents for removal of reactive red 198 dyes. *Water Reuse* 2022; 12 (2):175–190.
- 32- 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):23667.

- 33- Rahimi S, Mohammadi F, Ghodsi S, Mohammadi M, Karimi H. Activation of persulfate by TiO₂-Fe₃O₄ nanocomposite for reactive red 198 degradation along with modeling and optimization approach. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 2023; 10(2), 165-177.
- 34- Xiao-Bao Gong; Degradation of dye wastewater by persulfate activated with Fe₃O₄/graphene nanocomposite. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2016;6(4):553-561.
- 35- Rahimi S, Mohammadi F, Yavari Z. Removal of RR198 dye by TiO₂/Fe₃O₄/persulfate nanoparticles under UV-LED irradiation and comparison of OFAT and CCD experimental design in RSM modelling. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2020;27(4):283-93.