

بی‌رنگ‌سازی فاضلاب نساجی با استفاده از اکسیداسیون فنتون: مطالعه مقایسه‌ای تجزیه اسید قرمز ۱۸ و متیلن آبی

الهه یعقوبی^۱، مهدیه حدادی^۱، حسینعلی اصغر نیا^{۲،۳}، نازنین احمدی^۱، محمد شیرمردی^{۲،۳*}

^۱ کمیته تحقیقات و فناوری دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی بابل، بابل، ایران

^۲ مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، پژوهشکده سلامت، دانشگاه علوم پزشکی بابل، بابل، ایران

^۳ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بابل، بابل، ایران

*نویسنده مسئول: گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بابل، بابل، ایران. ایمیل: m.shirmardi@mubabol.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

چکیده

مقدمه: رنگ‌های مصنوعی نظیر اسید قرمز ۱۸ (Acid Red 18, AR18) و متیلن آبی (Methylene Blue, MB) از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی در پساب صنایع نساجی محسوب می‌شوند که به دلیل پایداری بالا، سمیت زیاد و مقاومت در برابر تجزیه زیستی، نگرانی‌های قابل توجهی ایجاد می‌کنند.

اهداف: این پژوهش به بررسی کارایی فرآیند فنتون ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) به عنوان یک روش اکسیداسیون پیشرفته در حذف این دو رنگ از محیط‌های آبی در شرایط آزمایشگاهی و تعیین مقدار بهینه پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن پرداخت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، اثر متغیرهای عملیاتی شامل pH (محدوده ۲ تا ۱۰)، غلظت پراکسید هیدروژن (H_2O_2) (۸ تا ۸۰ میلی‌مول بر لیتر)، غلظت یون آهن (Fe^{2+}) (۵ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر)، زمان واکنش (۵ تا ۱۲۰ دقیقه)، غلظت اولیه رنگ (۲۵ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و دما (۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها به صورت ناپیوسته و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شدند.

نتایج: یافته‌های این پژوهش نشان داد که راندمان حذف رنگ وابستگی زیادی به شرایط آزمایشگاهی و متغیرهای بررسی شده دارد. هرچند به دلیل خودتنظیمی pH نهایی نمونه‌ها به حدود ۳، تغییرات pH اولیه در محدوده ۲ تا ۱۰ تأثیر چشمگیری بر راندمان حذف نداشت؛ به طوری که راندمان حذف برای AR18 بین ۸۳ تا ۹۷ درصد و برای MB بیش از ۹۹ درصد حاصل شد. افزایش غلظت پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و یون آهن (Fe^{2+}) تا یک حد مشخص، منجر به ارتقای راندمان حذف فرآیند شد؛ با این وجود، افزایش فراتر از یک مقدار مشخص، تأثیر محسوسی در راندمان حذف نداشت و در برخی موارد، به دلیل وقوع واکنش‌های رقابتی، موجب کاهش کارایی سیستم گردید. در شرایط بهینه، بیش از ۹۸ درصد از رنگ MB در کمتر از ۵ دقیقه حذف شد و حذف کامل آن پس از ۶۰ دقیقه حاصل گردید؛ در حالی که برای رنگ AR18، راندمان حذف بیش از ۹۵ درصد پس از ۱۲۰ دقیقه به دست آمد. با افزایش غلظت اولیه رنگ، کاهش محسوسی در راندمان حذف مشاهده شد. همچنین، افزایش دما منجر به بهبود کارایی حذف AR18 شد، در حالی که حذف MB نسبت به تغییرات دما حساسیت کمتری نشان داد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فرآیند فنتون می‌تواند به عنوان روشی ساده، کارآمد و مقرون به صرفه برای تصفیه پساب‌های رنگی حاوی ترکیبات آنیونی و کاتیونی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: صنایع نساجی، واکنشگر فنتون، رنگ‌زدایی، اسید قرمز ۱۸، متیلن آبی

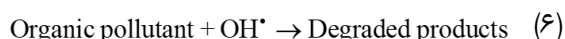
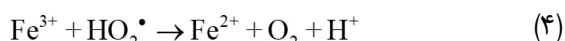
۱. مقدمه

گروه‌های مختلفی از جمله رنگ‌های آزو، آنتراکینون، فتالوسیانین و تری‌آریل‌متان تقسیم می‌شوند و در صنایع گوناگونی نظیر نساجی، تولید کاغذ، چرم، آرایشی بهداشتی، صنایع غذایی و آبکاری کاربرد گسترده‌ای دارند. صنایع نساجی و رنگری براساس ماهیت عملیات خود، یکی از پرمصرف‌ترین واحدهای صنعتی در

رنگ‌ها ترکیبات آلی آروماتیکی با ساختار پیچیده هستند که توانایی جذب نور در ناحیه مرئی (۳۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر) را دارند. تاکنون بیش از ۱۰۰,۰۰۰ نوع رنگ سنتزی شناسایی شده که تولید سالانه آن‌ها در جهان بین ۰/۷ تا ۱/۶ میلیون تن برآورد می‌شود (۱). این ترکیبات بر اساس ساختار شیمیایی خود به

مواد رنگ‌زا ترغیب نموده است (۸، ۱۸-۲۰).

در سال‌های اخیر، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به‌عنوان روش‌هایی مؤثر برای حذف ترکیبات آلی پایدار و مقاوم معرفی شده‌اند. این فرآیندها، مبتنی بر تولید رادیکال‌های واکنش‌پذیر، به‌ویژه رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$)، با توان اکسیدکنندگی بالا هستند (۲۱، ۲۲). اگرچه روش‌های متعددی از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) برای تصفیه فاضلاب به‌کار گرفته شده‌اند، اما شواهد علمی نشان می‌دهد که فرآیندهای فنتون در تخریب ترکیبات مقاوم و سمی، از کارآمدی، مقرون‌به‌صرفه‌بودن و بازده انرژی بالاتری برخوردار هستند. این برتری هم در کاربرد مستقل و هم در ترکیب با روش‌های متعارف تصفیه (مانند فرآیندهای بیولوژیکی) مشهود است. از دیگر مزایای کلیدی این فرآیندها می‌توان به سادگی نسبی طراحی، عدم نیاز به تجهیزات بسیار تخصصی و پرهزینه و استفاده از معرف‌های شیمیایی کم‌خطرتر اشاره نمود. علاوه بر این، ماهیت چرخه‌ای واکنش‌های کاتالیستی در این سیستم‌ها منجر به مصرف مقادیر کمتری از مواد شیمیایی شده که این امر علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، پایداری زیست‌محیطی بیشتری را نیز به همراه دارد (۵، ۲۳، ۲۴). واکنش‌های کلیدی این فرآیند (روابط ۱ تا ۶) منجر به تولید رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ در حضور یون آهن و پراکسید هیدروژن در محیط اسیدی می‌شوند که می‌توانند ساختارهای پیچیده رنگ‌ها را به ترکیبات ساده‌تر و بی‌خطر تبدیل کنند (۲۵):



کارایی فرآیند فنتون تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله pH، دما، زمان واکنش، غلظت Fe^{2+} و H_2O_2 است. از میان آن‌ها، نسبت مناسب پراکسید هیدروژن به ماده آلی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چراکه غلظت بیش از حد H_2O_2 نه تنها موجب اتلاف اقتصادی می‌شود بلکه ممکن است با واکنش‌های جانبی، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را نیز مهار کند (۲۵).

۲. اهداف

با توجه به آثار زیست‌محیطی مخرب ناشی از رنگ‌های مصنوعی در فاضلاب صنایع نساجی و اهمیت حفاظت از منابع آبی، این پژوهش به مقایسه سیستماتیک و مستقیم کارایی

مصرف آب محسوب می‌شوند و فاضلاب‌هایی با بار آلودگی بالا (غلظت رنگ ۱۰ تا ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر) تولید می‌کنند که طبق برآوردها حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از رنگ مصرفی وارد پساب می‌شود (۲-۴).

فاضلاب‌های رنگی، به‌ویژه در صنعت نساجی، حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات سمی، سرطان‌زا، جهش‌زا و پایدار در برابر تجزیه زیستی هستند که می‌توانند آسیب‌های جدی به منابع آبی، اکوسیستم‌ها و سلامت انسان وارد کنند (۸-۵). این ترکیبات حتی در غلظت‌های پایین، سبب اختلال در فتوسنتز آبزیان، کاهش اکسیژن محلول و تغییر در تنوع زیستی محیط‌های آبی می‌شوند (۱۲-۹). با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و چالش‌های جهانی کمبود آب، استفاده مجدد از پساب‌های صنعتی پس از تصفیه مؤثر، به‌عنوان یک راهبرد پایدار در مدیریت منابع آبی، مورد توجه جدی قرار گرفته است (۱۳، ۱۴). در میان انواع رنگ‌های مورد استفاده، اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) به‌ترتیب از نوع رنگ‌های آنیونی و کاتیونی بوده و از پرکاربردترین ترکیبات رنگی در صنایع نساجی و رنگرزی محسوب می‌شوند (۱۱). AR18 نوعی رنگ آزو با ساختار آروماتیک پیچیده و پایداری شیمیایی بالا است که به‌دلیل سمیت و پتانسیل سرطان‌زایی، یکی از آلاینده‌های خطرناک به‌شمار می‌رود (۱۵، ۱۶). MB نیز رنگی هتروسیکلیک با طیف کاربرد وسیع در صنایع نساجی است که در صورت وجود در مقادیر بالاتر از غلظت‌های مشخص، به‌دلیل سمیت ذاتی خود، علائمی مانند فشارخون بالا، تحریک پوست، گلودرد، ناراحتی‌های گوارشی، حالت تهوع و سردرد ایجاد می‌کند (۱۷، ۱۸).

به‌دلیل مضرات ناشی از مواد رنگ‌زا در محیط‌های آبی، تصفیه مؤثر و کارآمد پساب‌های رنگی ضروری است. روش‌های متعددی برای حذف رنگ از پساب‌ها معرفی شده‌اند که شامل جذب، انعقاد، الکتروکواگولاسیون، نانوذرات، فرآیندهای غشایی و روش‌های بیولوژیکی هستند. در مقایسه با روش‌های متداول حذف رنگ، اگرچه روش جذب با استفاده از جاذب‌های مختلف به بازده بالایی دست می‌یابد، اما مشکل بازیافت و احیای جاذب از چالش‌های اصلی این روش به‌شمار می‌آید. روش‌های انعقاد و الکتروکواگولاسیون نیز با تولید لجن زیاد و حجیم و پیامدهای ناشی از دفع آن مواجه هستند. همچنین، فرآیندهای بیولوژیکی با محدودیت‌هایی از قبیل نیاز به فضای عملیاتی گسترده و طولانی بودن زمان تصفیه روبه‌رو هستند؛ مدت‌زمان مذکور می‌تواند تحت تأثیر فاکتورهایی همچون گونه میکروبی، غلظت اولیه آلاینده و ساختار شیمیایی رنگ‌ها به‌طور محسوسی افزایش یابد. لذا، محدودیت‌هایی نظیر هزینه بالا، نیاز به تجهیزات خاص و بهره‌برداری پیچیده، استفاده گسترده از این روش‌ها را در کشورهای در حال توسعه دشوار ساخته است. این شرایط، محققان را برای به‌کارگیری روش‌های پیشرفته و کارا در حذف

تنظیم گردید. سپس مقادیر مشخصی از یون Fe^{2+} و H_2O_2 به محلول اضافه شد. تمامی محلول‌های مورد استفاده در این پژوهش تازه تهیه شدند. مخلوط واکنش تحت همزدن مداوم قرار گرفت و تا مدت زمان معین، بسته به نوع متغیر مورد بررسی، ادامه یافت. به منظور اعمال کنترل دقیق بر پارامترهای مؤثر در راندمان فرآیند، کلیه آزمایش‌ها بر پایه روش «تغییر تک متغیره» اجرا گردید؛ بدین صورت که در هر مرحله، تنها یکی از متغیرها تغییر یافته و سایر شرایط به‌طور ثابت حفظ شد. در این پژوهش، تأثیر شماری از متغیرهای عملیاتی بر کارایی حذف ترکیبات رنگی مورد بررسی قرار گرفت که اهم آن‌ها عبارتند از:

۲.۳. بررسی اثر pH

در این مطالعه، pH در محدوده ۲ تا ۱۰ و همچنین pH طبیعی نمونه‌ها ارزیابی شد. این آزمایش‌ها در غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت H_2O_2 ۱ میلی مول بر لیتر، غلظت یون آهن ۲۰ میلی گرم بر لیتر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن ۲۱۰ دور در دقیقه (rpm) و در دمای شرایط محیطی آزمایشگاه انجام شدند. در طول انجام واکنش، تنظیم مجددی برای pH انجام نگرفت.

۳.۳. بررسی اثر غلظت اولیه H_2O_2

برای ارزیابی تأثیر غلظت اکسیدان بر کارایی فرآیند فنتون، محدوده غلظت اولیه پراکسید هیدروژن از ۰/۱ تا ۸ میلی مول بر لیتر انتخاب شد. برای انجام این مرحله از پژوهش، شرایط آزمایشگاهی به این صورت بود: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت یون آهن ۲۰ میلی گرم بر لیتر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن ۲۱۰ دور در دقیقه، pH در حالت طبیعی (بدون تنظیم) و دمای شرایط محیطی آزمایشگاه.

۴.۳. بررسی اثر غلظت اولیه یون آهن

از آنجایی که حضور یون آهن به‌عنوان کاتالیزور در فرآیند فنتون بسیار مهم است، غلظت‌های مختلفی از یون آهن در محدوده ۰/۱ تا ۵۰ میلی گرم بر لیتر با استفاده از نمک سولفات آهن ۷ آب و به کمک روابط استوکیومتری واکنش تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. این غلظت‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شدند که ضمن تسهیل واکنش‌های اکسیداسیون از تشکیل رسوب اکسید آهن جلوگیری شود، دیگر شرایط آزمایشگاهی برای بررسی اثر این متغیر به این صورت بود: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر برای رنگ AR18 و ۵ میلی مول بر لیتر برای رنگ MB، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن

فرآیند فنتون در حذف دو رنگ با ساختار مولکولی و شیمیایی کاملاً متفاوت - اسید قرمز ۱۸ (از دسته رنگ‌های آزو) و متیلن آبی (از دسته رنگ‌های کاتیونی) - تحت شرایط عملیاتی یکسان می‌پردازد. این رویکرد تطبیقی، امکان تحلیل دقیق و کمی تأثیر بنیادین ساختار شیمیایی رنگ بر راندمان فرآیند فنتون را فراهم می‌سازد. در حالی که مطالعات پیشین غالباً به بررسی جداگانه رنگ‌ها پرداخته‌اند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله pH، غلظت H_2O_2 ، غلظت Fe^{2+} ، زمان واکنش، غلظت اولیه رنگ و دما بررسی شد؛ بنابراین، نتایج حاصل می‌تواند مبنایی علمی و کاربردی برای طراحی سیستم‌های تصفیه در مقیاس صنعتی ارائه دهد.

۳. مواد و روش‌ها

این پژوهش یک مطالعه تجربی با رویکرد آزمایشگاهی است که به ارزیابی کارایی فرآیند فنتون ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) در حذف دو رنگ اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محیط‌های آبی می‌پردازد. مطالعه حاضر از نوع بنیادی-کاربردی بوده و با هدف بررسی و تعیین مقدار بهینه پارامترهای عملیاتی مؤثر روی کارایی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته فنتون طراحی شده است.

۱.۳. مواد و محلول‌ها

رنگ AR18 از شرکت الوان ثابت (همدان، ایران) و رنگ MB از نمایندگی‌های فروش مواد شیمیایی (شرکت تمد کالا) خریداری شد. این دو رنگ به دلیل خلوص شیمیایی بالایی که داشتند بدون هیچ‌گونه تصفیه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. ساختار شیمیایی و مهم‌ترین خواص فیزیکی-شیمیایی این دو ماده رنگی در تصویر ۱ آورده شده است. سولفات آهن (II) هفت آب (۷۷۸۲-۳۶-۰) $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ؛ (CAS number: ۷۶۶۴-۳۹-۹) H_2SO_4 ؛ (CAS number: ۷۷۸۲-۳۶-۰) پراکسید هیدروژن (۱-۴۸-۹۸) H_2O_2 ؛ (CAS number: ۳۰۲۲۷۷) هیدروکسید سدیم (۱۳۱۰-۳۷-۲) NaOH ؛ و سایر مواد مورد استفاده در این پژوهش دارای خلوص بالای آزمایشگاهی بودند و از شرکت‌های معتبر داخلی یا خارجی خریداری شدند. تمامی محلول‌ها از آب مقطر دو بار تقطیر شده تهیه شدند. کلیه آزمایش‌ها به‌صورت ناپیوسته (Batch) در شرایط کنترل شده انجام شدند. در هر آزمایش، ۱۰۰ میلی لیتر از محلول رنگ با غلظت مشخص در ظروف شیشه‌ای با حجم معین ریخته شد. مقدار pH محلول با استفاده از محلول‌های با غلظت یک مول بر لیتر H_2SO_4 یا NaOH و به کمک یک دستگاه pH متر کالیبره شده

۲۱۰ دور در دقیقه، pH حالت طبیعی و دمای شرایط محیطی آزمایشگاه.

۵.۳. بررسی اثر زمان تماس

زمان تماس در بازه ۵ تا ۱۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت تا اثر آن بر کارایی فرآیند حذف رنگ تعیین گردد. بدین منظور، در فواصل زمانی مشخصی نمونه‌برداری به عمل آمد و غلظت باقیمانده برای هر رنگ اندازه‌گیری گردید. سایر پارامترهای مؤثر در این مرحله، مطابق با مقادیر بهینه حاصل از مراحل پیشین، ثابت نگه داشته شدند که این مقادیر به این صورت بودند: غلظت اولیه رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت یون آهن ۱۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر برای رنگ AR18 و ۵ میلی مول بر لیتر برای رنگ MB، سرعت همزن ۲۱۰ دور در دقیقه، pH در حالت طبیعی و دمای شرایط محیطی آزمایشگاه.

۶.۳. بررسی اثر غلظت اولیه رنگ

به منظور بررسی تأثیر غلظت اولیه رنگ بر راندمان فرآیند فنتون، کارایی حذف در غلظت‌های مختلفی در محدوده ۲۵ تا ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر مورد ارزیابی قرار گرفت. کلیه آزمایش‌های این مرحله در شرایط بهینه و ثابت شامل غلظت یون آهن ۱۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر برای رنگ AR18 و ۵ میلی مول بر لیتر برای رنگ MB، زمان تماس ۶۰ دقیقه، سرعت همزن ۲۱۰ دور در دقیقه، pH بدون تنظیم (مقدار اولیه) و دمای محیط آزمایشگاه انجام شد.

۷.۳. بررسی اثر دما

آزمایش‌ها در محدوده دمای ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد انجام شدند تا تأثیر دما بر واکنش‌های اکسیداسیون و حذف رنگ‌ها بررسی شود. دیگر شرایط آزمایشگاهی برابر با مقدار بهینه

به دست آمده از آزمایش‌های قبلی بود.

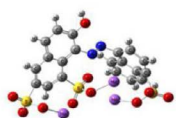
۸.۳. روش‌های تجزیه و تحلیل

از یک اسپکتروفتومتر UV-Vis (مدل DR۵۰۰۰، شرکت Hach، USA) برای اندازه‌گیری غلظت رنگ‌ها استفاده شد. در ابتدا، استانداردهای مختلفی از هر رنگ در محدوده ۱۰۰-۱ میلی گرم بر لیتر تهیه شدند و براساس آن‌ها منحنی‌های کالیبراسیون ایجاد شدند تا مقادیر جذب را با غلظت‌های رنگ مرتبط کنند. جذب هر محلول استاندارد در طول موج ۵۰۶ نانومتر برای AR18 و ۶۶۵ نانومتر برای MB اندازه‌گیری شد. برای تعیین میزان حذف رنگ پس از اتمام زمان واکنش، نمونه‌ها بلافاصله توسط دستگاه سانتریفیوژ در دور ۴۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شده و سپس از صافی با اندازه منافذ ۰/۴۵ میکرومتر عبور داده شدند. برای جلوگیری از ادامه اکسیداسیون و نیز رسوب آهن، به تمام نمونه‌ها سود یک نرمال اضافه شد و مقدار pH در محدوده بالاتر از ۸/۵ تنظیم شد. درصد حذف رنگ نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد: در این رابطه، C_0 برابر با غلظت اولیه رنگ (میلی گرم بر لیتر) و C_e غلظت نهایی یا غلظت تعادلی رنگ (میلی گرم بر لیتر) بعد از واکنش است. شایان ذکر است جهت افزایش قابلیت اطمینان و تکرارپذیری نتایج، تمامی آزمایش‌ها حداقل دو بار تکرار گردید و در نهایت، میانگین نتایج حاصل از تکرارها به عنوان داده نهایی گزارش شد. به منظور تأیید اینکه حذف رنگ‌ها صرفاً ناشی از واکنش‌های اکسیداسیون فرآیند فنتون است، در کلیه مراحل آزمایش، نمونه‌های شاهد در شرایط یکسان اما بدون افزودن Fe^{2+} و یا بدون H_2O_2 مورد ارزیابی قرار گرفتند تا سهم حذف ناشی از عوامل غیر فنتونی تعیین و تصحیح گردد. برای رسم نمودارها از نرم افزار OriginPro 2024 استفاده شد.

$$Dye\ removal = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$



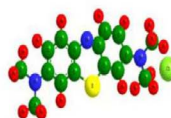
رنگ اسید قرمز ۱۸
ساختر شیمیایی



ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی	
فرمول شیمیایی	$C_{28}H_{11}N_2Na_2O_{18}S_8$
جرم مولکولی	۶۰۴/۴۸ گرم بر مول
بار الکتریکی	آنیونی
حلالیت در آب	محلول (۴۰ گرم بر لیتر)



رنگ متیلن آبی
ساختر شیمیایی



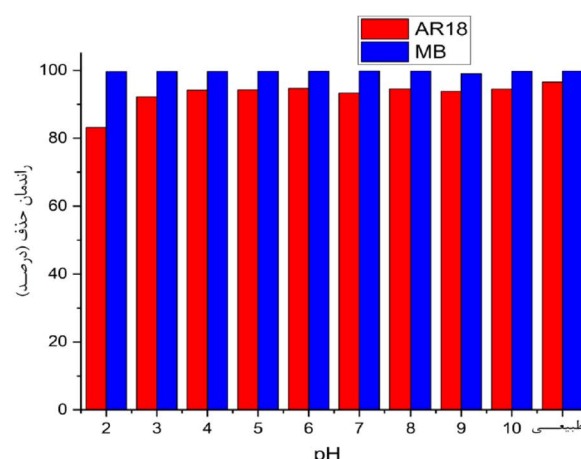
ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی	
فرمول شیمیایی	$C_{16}H_{11}N_3S_3Cl$
جرم مولکولی	۳۱۹/۸۵ گرم بر مول
بار الکتریکی	کاتیونی
حلالیت در آب	محلول (۵۰ گرم بر لیتر)

تصویر ۱. ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی رنگ‌های مورد استفاده در این مطالعه (۲۶-۲۸)

۴. نتایج

۴.۱. اثر pH بر حذف رنگ

بررسی تأثیر pH بر عملکرد فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته نشان داده است که این پارامتر نقش کلیدی در کارایی سیستم ایفا می‌نماید. در این مطالعه، به منظور تعیین pH بهینه، تأثیر تغییرات pH در محدوده ۲ تا ۱۰ و همچنین pH طبیعی نمونه‌ها بر کارایی حذف دو رنگ AR18 و MB مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که تغییرات pH تأثیر زیادی بر راندمان حذف نداشته است. در مورد رنگ AR18، راندمان حذف در محدوده ۸۳ تا ۹۷ درصد و برای رنگ MB در بازه ۹۹/۶ تا ۹۹/۹ درصد قرار داشت (تصویر ۲).

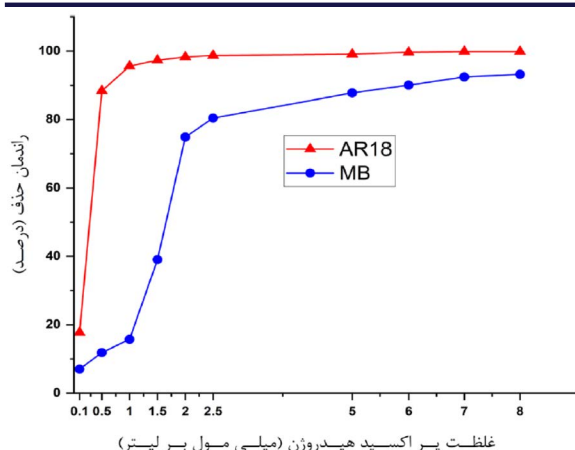


تصویر ۲. بررسی اثر pH محلول بر راندمان حذف رنگ‌های اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محلول‌های آبی توسط فرایند فنتون (شرایط آزمایشگاهی: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت H_2O_2 ۱ میلی‌مول بر لیتر، غلظت یون آهن ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن 210 rpm و در دمای محیط آزمایشگاه).

۴.۲. اثر غلظت H_2O_2 بر حذف رنگ

در فرایند فنتون، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به عنوان عامل اکسیدکننده اصلی نقش حیاتی در تعیین راندمان حذف آلاینده‌ها ایفا می‌کند. انتخاب غلظت بهینه H_2O_2 برای تخریب رنگ‌ها توسط واکنشگر فنتون از جنبه عملیاتی حائز اهمیت است که عمدتاً به دلیل هزینه بالای این ماده شیمیایی است (۲۹). نتایج حاصل از بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف پراکسید هیدروژن در محدوده ۰/۸ تا ۰/۱ میلی‌مول بر لیتر در **تصویر ۳** نشان داده شده است. مشاهده شد که افزایش غلظت این ماده تأثیر زیادی بر بهبود راندمان حذف هر دو رنگ AR18 و MB دارد. برای رنگ AR18، افزایش غلظت H_2O_2 از ۰/۱ به ۰/۸ میلی‌مول بر لیتر موجب بهبود چشمگیر راندمان حذف از ۱۸ درصد به ۱۰۰ درصد

گردید، در حالی که برای رنگ MB، افزایش غلظت از ۰/۱ به ۰/۸ میلی‌مول بر لیتر، راندمان حذف را از ۷ درصد به ۹۳ درصد ارتقا بخشید. تحلیل دقیق داده‌ها نشان داد که برای AR18، افزایش غلظت H_2O_2 فراتر از ۱ میلی‌مول بر لیتر تأثیر محسوسی بر راندمان حذف نداشته است و مقدار راندمان تقریباً ثابت و نزدیک به حذف کامل باقی ماند. به طور مشابه، در مورد MB نیز افزایش غلظت به بیش از ۵ میلی‌مول بر لیتر تغییر قابل توجهی در کارایی سیستم ایجاد نکرد و حذف کامل برای این رنگ به دست نیامد.



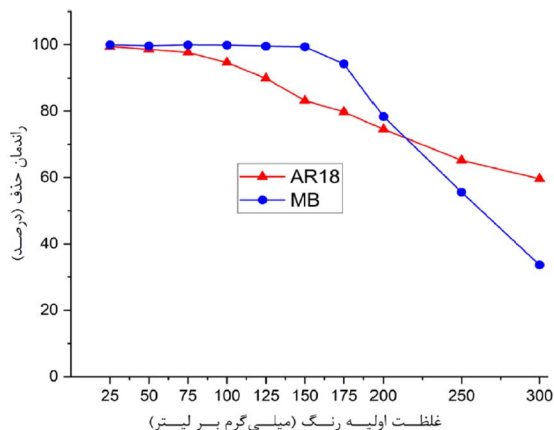
تصویر ۳. بررسی اثر غلظت H_2O_2 بر راندمان حذف رنگ‌های اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محلول‌های آبی توسط فرایند فنتون (شرایط آزمایشگاهی: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت یون آهن ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن 210 rpm، pH طبیعی و دمای محیط آزمایشگاه).

۴.۳. اثر غلظت یون آهن بر حذف رنگ

تصویر ۴ اثر غلظت یون آهن روی راندمان حذف رنگ‌های AR18 و MB را نشان می‌دهد. مطابق با **تصویر ۴**، با افزایش غلظت آهن از ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر به ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان حذف به طور کلی افزایش یافت. با این حال، این افزایش در راندمان حذف برای غلظت‌های آهن بالاتر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، برای هر دو رنگ، قابل توجه نبود. به عنوان مثال، برای رنگ AR18، افزایش غلظت آهن از ۰/۱ به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، سبب افزایش راندمان از ۱۸ درصد به ۹۵/۴۷ درصد شد؛ و در ادامه، با افزایش غلظت آهن از ۱۰ به ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان به ۹۸/۱۶ درصد رسید. برای رنگ MB نیز راندمان از ۲۲/۴ درصد در غلظت ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر به ۹۶/۵ درصد در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت. با افزایش غلظت آهن تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، کمتر از ۳ درصد افزایش در راندمان حذف مشاهده شد؛ بنابراین، جهت صرفه‌جویی در مصرف مواد شیمیایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی احتمالی آهن باقی‌مانده در پساب خروجی، غلظت آهن ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان غلظت بهینه برای آزمایش‌های بعدی انتخاب شد.

۴.۵. اثر غلظت اولیه رنگ بر راندمان حذف

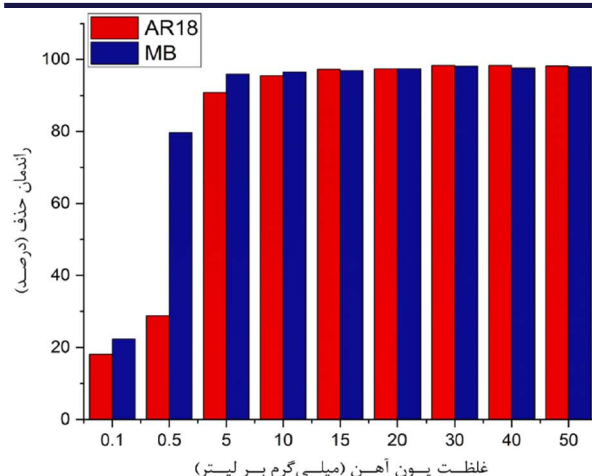
غلظت اولیه آلاینده، یکی از پارامترهای حیاتی در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای تخریب آلاینده‌های آلی محسوب می‌شود. **تصویر ۶** نتایج آزمایش‌های مربوط به حذف رنگ‌های AR18 و MB با استفاده از فرآیند فنتون را براساس غلظت‌های اولیه رنگ در دامنه ۲۵ تا ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه رنگ، راندمان حذف هر دو رنگ کاهش یافت. در زمان واکنش ۶۰ دقیقه، درصد حذف رنگ AR18 از حدود ۹۹ درصد در غلظت‌های پایین‌تر، به حدود ۵۹ درصد در غلظت‌های بالاتر کاهش یافت. همچنین، درصد حذف رنگ MB در همین بازه زمانی و در غلظت‌های مشابه، از تقریباً ۱۰۰ درصد در غلظت‌های پایین‌تر به تقریباً ۳۳/۶۵ درصد در غلظت‌های بالاتر کاهش پیدا کرد.



تصویر ۶. بررسی اثر غلظت اولیه رنگ بر راندمان حذف رنگ‌های اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محلول‌های آبی توسط فرآیند فنتون شرایط آزمایشگاهی: غلظت یون آهن ۱۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن 210 rpm، pH طبیعی و دمای محیط آزمایشگاه.

۴.۶. اثر دما بر حذف رنگ

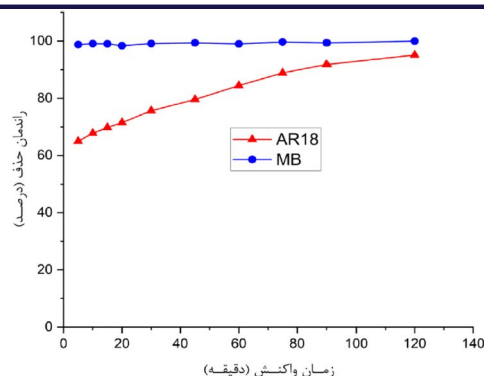
تصویر ۷ تأثیر دما بر راندمان حذف رنگ‌های AR18 و MB در محدوده دمایی ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد. همان طور که از نتایج پیدا است، با افزایش دما، راندمان حذف AR18 از ۸۲ درصد در ۲۰ درجه سانتی گراد به ۹۸ درصد در ۵۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت. این روند حاکی از تأثیر مثبت دما بر کارایی فرآیند فنتون در حذف این رنگ است. در مقابل، برای رنگ MB، با توجه به شرایط بهینه قبلی، حذف تقریباً کامل رنگ در تمام دماهای بررسی شده مشاهده شد و تأثیر افزایش دما بر راندمان آن بسیار ناچیز بود.



تصویر ۴. بررسی اثر غلظت یون آهن (Fe) بر راندمان حذف رنگ‌های اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محلول‌های آبی توسط فرآیند فنتون (شرایط آزمایشگاهی: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر برای رنگ AR18 و ۵ میلی مول بر لیتر برای رنگ MB، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن 210 rpm، pH طبیعی و دمای محیط آزمایشگاه).

۴.۴. اثر زمان واکنش بر حذف رنگ

تصویر ۵ اثر زمان واکنش بر راندمان حذف رنگ‌های AR18 و MB توسط فرآیند فنتون را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بخش عمده‌ای از حذف رنگ در همان دقایق ابتدایی واکنش رخ داده است؛ به طوری که در زمان ۵ دقیقه، راندمان حذف برای رنگ MB بیش از ۹۸ درصد و برای رنگ AR18 حدود ۶۵ درصد ثبت شد. در ادامه و با افزایش زمان تماس از ۵ تا ۱۲۰ دقیقه، روند افزایشی حذف رنگ AR18 ادامه یافت و در پایان زمان ۱۲۰ دقیقه، راندمان آن به بیش از ۹۵ درصد رسید. این در حالی است که برای رنگ MB تغییر محسوسی پس از ۵ دقیقه اولیه مشاهده نشد و حذف تقریباً کامل در همان ابتدای واکنش حاصل شد.



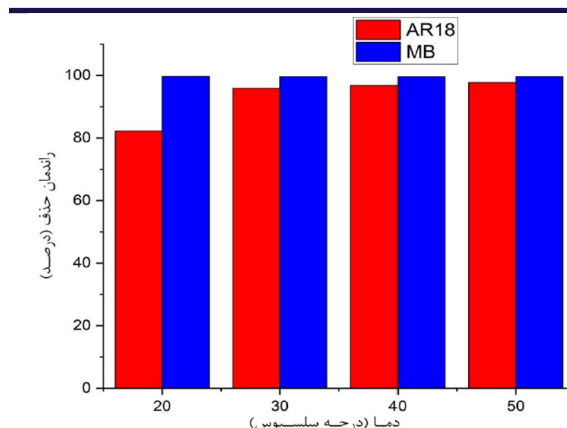
تصویر ۵. بررسی اثر زمان واکنش بر راندمان حذف رنگ‌های اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محلول‌های آبی توسط فرآیند فنتون (شرایط آزمایشگاهی: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت یون آهن ۱۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر برای رنگ AR18 و ۵ میلی مول بر لیتر برای رنگ MB، سرعت همزن 210 rpm، pH طبیعی و دمای محیط آزمایشگاه).

۱- خاصیت اسیدی ضعیف پراکسید هیدروژن: اگرچه H_2O_2 عمدتاً به عنوان یک اکسیدان قوی شناخته می شود، اما در غلظت های نسبتاً بالا می تواند به عنوان یک اسید ضعیف نیز رفتار کند و در حضور یون های فلزی، با تولید یون های H^+ به کاهش pH محیط کمک نماید.

۲- تولید اسیدهای آلی حد واسطه: تجزیه اکسیداسیونی رنگ های آلی (مانند اسید قرمز ۱۸ و متیلن آبی) اغلب منجر به تولید محصولات حد واسطی با ماهیت اسیدی، از جمله اسیدهای کربوکسیلیک کوچک می شود. تشکیل این اسیدهای آلی در طول واکنش، سهم به سزایی در اسیدی شدن پایدار محیط واکنش دارد. این پدیده به طور تجربی در مطالعه ای توسط لیو و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش شده است که در آن pH محلول در طی فرآیند فنتون از محدوده اولیه ۴/۴۹-۵/۶۴ به طور چشمگیری به محدوده ۲/۲۴-۲/۵۸ کاهش یافت و این امر را ناشی از تشکیل اسیدهای آلی طی تخریب رنگ ها دانستند (۳۴).

در نتیجه، در سیستم مورد مطالعه، به واسطه این خودتنظیمی شیمیایی، شرایط نهایی واکنش در همه نمونه ها به سمت pH بهینه (۳) سوق یافت. این امر توضیحی قانع کننده برای مشاهده راندمان حذف تقریباً یکسان در pH های اولیه مختلف ارائه می دهد، زیرا محیط واقعی تخریب در پایان برای همه آزمایش ها مشابه بوده است (تصویر ۲). این یافته از اهمیتی عملیاتی برخوردار است؛ چرا که نشان می دهد در مقیاس های بزرگ تر و برای صرفه جویی در هزینه های عملیاتی، ممکن است نیاز به تنظیم دقیق و پرهزینه pH اولیه در محدوده بهینه نباشد و سیستم به صورت ذاتی توانایی ایجاد شرایط مطلوب برای انجام واکنش را دارا باشد. با این حال، تأکید می شود که برای ارزیابی دقیق و مستقل اثر pH اولیه، می بایست با استفاده از بافرهای مناسب، pH در طول مدت واکنش ثابت نگه داشته شود تا از بروز این خطا جلوگیری به عمل آید.

بازدهی اکسیداسیون آلاینده های آلی در فرآیند فنتون وابستگی شدیدی به دوز H_2O_2 دارد، چرا که این ماده پیش ساز مستقیم رادیکال های هیدروکسیل ($OH^\bullet$) محسوب می شود. الگوی مشاهده شده در حذف رنگ ها (تصویر ۳) را می توان با نقش محوری H_2O_2 در سینتیک و مکانیسم تولید رادیکال های آزاد تبیین نمود. در مورد رنگ AR18، راندمان حذف ۹۶ درصدی در غلظت پایین H_2O_2 (۱ میلی مول بر لیتر) حکایت از واکنش پذیری بسیار بالای این رنگ با رادیکال های $OH^\bullet$ دارد که احتمالاً ناشی از حضور گروه های عاملی مستعد حمله اکسیداتیو در ساختار آن است. در مقابل، رنگ MB حتی در بالاترین غلظت H_2O_2 مورد بررسی (۸ میلی مول بر لیتر) نیز به طور کامل حذف نشد که می تواند به دلیل ساختار شیمیایی آن، پایداری ذاتی یا نیاز به مسیرهای اکسیداسیون چندمرحله ای برای تخریب نهایی باشد. در غلظت های پایین H_2O_2 ، افزایش غلظت آن منجر به



تصویر ۷. بررسی اثر دما بر راندمان حذف رنگ های اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محلول های آبی توسط فرآیند فنتون (شرایط آزمایشگاهی: غلظت یون آهن ۱۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن ۱ میلی مول بر لیتر برای رنگ AR18 و ۵ میلی مول بر لیتر برای رنگ MB، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت همزن 210 rpm و pH طبیعی محلول).

۵. بحث

مقدار pH به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی مؤثر بر راندمان فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر فنتون شناخته می شود. این اهمیت عمدتاً از تأثیر مستقیم pH بر تشکیل رادیکال های هیدروکسیل ($OH^\bullet$) نشئت می گیرد که گونه های فعال اولیه مسئول تخریب ترکیبات آلی هستند. همان طور که در منابع علمی متعدد تأیید شده است، فرآیند فنتون در محیط های اسیدی به مراتب کارآمدتر از شرایط خنثی و قلیایی عمل می کند (بیشینه بازدهی معمولاً در محدوده ۳-۴ pH). دلیل این امر، کاهش قابل توجه فعالیت کاتالیستی یون آهن (Fe^{2+}) در pH های بالاتر است؛ چرا که در این شرایط، یون های آهن تمایل به هیدرولیز و تشکیل کمپلکس های هیدروکسیدی مانند $Fe(OH)_2$ و $Fe(OH)_3$ دارند که انحلال پذیری و فعالیت کاتالیستی کمتری داشته و همچنین می توانند باعث ترسیب آهن و خروج آن از چرخه کاتالیستی واکنش شوند (۳۳-۳۰).

در این پژوهش، به منظور ارزیابی مستقل اثر pH اولیه بر راندمان حذف رنگ ها، این پارامتر به صورت جداگانه برای هر نمونه در مقادیر از پیش تعیین شده تنظیم گردید، در حالی که دیگر عوامل مؤثر شامل غلظت H_2O_2 ، غلظت یون Fe^{2+} ، زمان واکنش، دما و غلظت اولیه رنگ در همه نمونه ها ثابت نگه داشته شد. با این حال، اندازه گیری pH در پایان واکنش، پدیده قابل تأملی را آشکار ساخت: مقدار pH نهایی در همه نمونه ها، صرف نظر از مقدار اولیه، به طور مشابهی به عدد ۳ میل کرده بود. این همگرایی به سمت شرایط بهینه را می توان به دو مکانیسم اصلی مرتبط با شیمی ذاتی فرآیند فنتون نسبت داد:

تشدید تولید رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ و بهبود راندمان حذف می‌شود. با این حال، پس از عبور از یک غلظت بهینه (۱ میلی‌مول برلیتر برای AR18 و ۵ میلی‌مول برلیتر برای MB)، افزایش بیشتر H_2O_2 نه تنها تأثیر محسوسی در راندمان ندارد، بلکه در مواردی موجب کاهش کارایی نیز می‌گردد. این پدیده که به «اثر بازدارندگی» (Scavenging Effect) معروف است زمانی رخ می‌دهد که H_2O_2 اضافی خود به عنوان مهارکننده رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ عمل کرده و با آن‌ها واکنش می‌شود که حاصل آن تولید رادیکال‌های هیدرو پروسکیل ($\text{HO}_2^\bullet$) با قدرت اکسیدکنندگی به مراتب کمتر است. اثر مهارکنندگی H_2O_2 اضافی توسط روابط ۲-۵ ارائه شده است (۳۶-۳۴).

بر این اساس، غلظت بهینه H_2O_2 ، با در نظر گرفتن معیارهای کارایی، اقتصادی و زیست‌محیطی، به ترتیب ۱ میلی‌مول برلیتر برای AR18 و ۵ میلی‌مول برلیتر برای MB انتخاب گردید. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که غلظت بهینه پراکسید هیدروژن برای دستیابی به حداکثر بازدهی، تابعی از ماهیت ساختاری و خواص شیمیایی آلاینده هدف است.

یافته‌های حاضر با نتایج سایر پژوهش‌ها هم‌خوانی دارد. به عنوان مثال، لیو ژوانمو و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که در تجزیه رنگ Reactive Black 5، راندمان حذف تا غلظت ۲ میلی‌مول برلیتر H_2O_2 به صورت پیوسته افزایش یافت (تا ۹۲ درصد)، ولی فراتر از آن تغییری مشاهده نشد (۲۷). به طور مشابه، در مطالعه‌ای روی رنگ متیل اورانژ (Methyl Orange)، افزایش غلظت H_2O_2 از ۵ به ۷ میلی‌مول برلیتر نه تنها بهبودی در راندمان ایجاد نکرد، بلکه موجب کاهش جزئی آن گردید (۳۸). مطالعه پیژیکولان و همکاران (۲۰۲۵) روی رنگ Reactive Red 241، نیز نشان داد که پس از یک نقطه بهینه (۵/۸۸ میلی‌مول برلیتر)، افزایش بیشتر غلظت H_2O_2 تأثیر قابل توجهی بر راندمان حذف نداشت (۳۹).

در مجموع، نتایج مطالعه حاضر و سایر مطالعات مشابه تأکید می‌کنند که بهینه‌سازی غلظت H_2O_2 متناسب با نوع آلاینده یکی از عوامل کلیدی در بهبود کارایی فرآیندهای تصفیه است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش بیش از نیاز این ماده، نه تنها اثربخشی را افزایش نمی‌دهد بلکه در برخی موارد ممکن است اثر منفی و کاهش راندمان فرآیند را در پی داشته باشد؛ بنابراین، تعیین غلظت بهینه H_2O_2 نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف مواد شیمیایی ایفا می‌نماید.

افزایش راندمان حذف رنگ‌ها در پاسخ به افزایش غلظت یون آهن (II) را می‌توان مستقیماً به نقش کاتالیستی کلیدی این یون در چرخه فنتون نسبت داد. در مرحله آغازین این فرآیند، یون‌های Fe^{2+} با پراکسید هیدروژن واکنش داده و رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) تولید می‌کنند (رابطه ۱). در غلظت‌های پایین آهن، تولید این رادیکال‌ها محدود بوده

و در نتیجه راندمان حذف در سطح پایینی قرار داشت. با افزایش تدریجی غلظت یون Fe^{2+} تا ۱۰ میلی‌گرم برلیتر، تولید رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ به طور متناسبی افزایش یافت که این امر منجر به بهبود چشمگیر نرخ تخریب رنگ‌ها گردید. با این حال، فراتر از این غلظت بهینه، افزایش بیشتر Fe^{2+} تأثیر معنی‌داری بر راندمان حذف نداشت و در مواردی حتی کاهش اندکی نیز مشاهده شد (تصویر ۴). این رفتار را می‌توان به واکنش خنثی‌سازی (Scavenging Reaction) نسبت داد (رابطه ۳) که در اثر آن یون‌های Fe^{2+} اضافی می‌توانند با رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ تولیدشده واکنش داده و آن‌ها را به یون‌های هیدروکسید (OH^-) تبدیل کنند که این امر دسترسی رادیکال‌ها به مولکول‌های رنگ را کاهش می‌دهد (۴۱-۳۹).

لذا، انتخاب غلظت بهینه آهن (۱۰ میلی‌گرم برلیتر) نه تنها از نظر اقتصادی به صرفه است، بلکه از بروز پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از باقی‌مانده غلظت‌های بالای آهن در پساب تصفیه‌شده نیز جلوگیری می‌نماید. یافته‌های حاضر با نتایج سایر پژوهش‌ها هم‌سواست. رحمانی و همکاران (۲۰۱۷) در حذف متیلن بلو (MB) با فرآیند فنتون مشاهده کردند که افزایش غلظت آهن از ۵ به ۱۰۰ میلی‌گرم برلیتر، راندمان حذف را تا ۹۹/۹ درصد افزایش داد، اما ادامه افزایش غلظت تا ۲۰۰ میلی‌گرم برلیتر موجب کاهش راندمان به ۹۷ درصد گردید (۳۱). به طور مشابه، بقاپور و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه حذف رنگ Direct Red 81، غلظت ۲۰ میلی‌گرم برلیتر را به عنوان نقطه بهینه گزارش کردند (۳۲). مطالعه محمدرضائی و همکاران (۲۰۱۸) روی حذف فنل نیز نشان داد که افزایش غلظت آهن از ۱۰ به ۱۵ میلی‌گرم برلیتر تنها ۱ درصد بر راندمان نهایی افزوده است که تأییدی بر رسیدن سیستم به ناحیه اشباع است (۴۲). در مجموع، این مشاهدات بر این اصل کلیدی تأکید دارند که وجود یک غلظت بهینه برای کاتالیست آهن امری ضروری و عمومی در فرآیند فنتون است. عبور از این غلظت نه تنها سودی در بر ندارد، بلکه از طریق مکانیسم‌های مهار رادیکالی می‌تواند کارایی فرآیند را تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج تجربی حاصل از بررسی اثر زمان واکنش نشان می‌دهد که نرخ رنگ‌زدایی رنگ‌های AR18 و MB در ابتدای واکنش بسیار سریع بود، اما به تدریج کاهش یافته است. این مشاهدات حاکی از کاهش تدریجی سرعت واکنش با گذر زمان است. در مراحل اولیه واکنش، غلظت بالای رنگ و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) منجر به افزایش سریع سرعت واکنش، به ویژه برای رنگ MB به دلیل ساختار ساده‌تر و واکنش‌پذیری بالاتر نسبت به $\text{OH}^\bullet$ می‌شود؛ بنابراین، مشاهده راندمان بالای حذف MB در همان دقایق ابتدایی منطقی و مورد انتظار است. برای رنگ AR18، اگرچه روند حذف آهسته‌تر بود اما همچنان با افزایش زمان

رنگ در غلظت‌های بالا کافی نیست (۴۴). در مطالعات مشابه انجام‌شده نیز نتایج یکسانی به‌دست آمد که در آن‌ها گزارش شده بود با افزایش غلظت اولیه رنگ، راندمان حذف توسط فرآیندهای مبتنی بر واکنش گر فنتون کاهش می‌یابد. آنان علت کاهش راندمان حذف در غلظت‌های بالای رنگ را نبود مقدار کافی رادیکال‌های هیدروکسیل در محلول بیان کرده‌اند که این امر منجر به کاهش بهره‌وری فرآیند در تخریب غلظت‌های بالای رنگ می‌شود (۳۱، ۳۲، ۳۷، ۴۳، ۴۵).

همان‌گونه که در **تصویر ۷** نشان داده شده است، بهبود راندمان حذف AR18 با افزایش دما را می‌توان با در نظر گرفتن مکانیسم فرآیند فنتون توجیه نمود. در این فرآیند، واکنش بین یون‌های Fe^{2+} و H_2O_2 منجر به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^\bullet$) به‌عنوان عامل اکسیدکننده اصلی می‌شود. افزایش دما می‌تواند سبب افزایش نرخ این واکنش شده و در نتیجه تولید رادیکال‌های فعال افزایش یابد. همچنین، دمای بالاتر موجب افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های واکنش‌دهنده و کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش‌های اکسیداسیون می‌شود که این موضوع به تسریع انتقال جرم و بهبود کارایی کلی واکنش منجر می‌گردد (۳۶، ۴۵، ۴۶). با این حال، نتایج نشان داد که در بازه دمایی ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر قابل توجهی در راندمان حذف AR18 مشاهده نشد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مطلوب فرآیند در بازه دمایی ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد و افزایش دما فراتر از این بازه تأثیر چندانی نداشت. در مورد رنگ MB نیز به‌دلیل واکنش‌پذیری بالا و ساختار ساده‌تر، حذف کامل در شرایط دمایی پایین‌تر نیز محقق شد و به همین علت افزایش دما اثری بر بهبود راندمان نشان نداده است.

۵.۱. محدودیت‌های پژوهش

با وجود نتایج قابل توجه حاصل از به‌کارگیری فرآیند فنتون در حذف رنگ‌های اسید قرمز ۱۸ و متیلن آبی، این پژوهش دارای برخی محدودیت‌ها است که باید در تفسیر نتایج و کاربردهای صنعتی آن مورد توجه قرار گیرد. نخست، تمامی آزمایش‌ها در شرایط آزمایشگاهی و به‌صورت ناپیوسته انجام شده‌اند که ممکن است تفاوت‌هایی با شرایط واقعی و پیوسته تصفیه پساب صنعتی داشته باشد. در کاربردهای صنعتی، حضور ترکیبات مزاحم، تنوع بیشتر آلاینده‌ها و تغییرات پیوسته در ویژگی‌های پساب می‌تواند بر عملکرد فرآیند فنتون تأثیرگذار باشد. علاوه بر این، یکی از چالش‌های مهم فرآیند فنتون، نیاز به کنترل دقیق pH در محدوده اسیدی و مدیریت باقیمانده یون‌های

واکنش به راندمان بالای حذف (۹۵ درصد) دست یافته شد. این تفاوت را می‌توان ناشی از ساختار مولکولی پیچیده‌تر AR18 وجود پیوندهای آزو و گروه‌های عاملی پایدارتر و احتمال واکنش‌های چندمرحله‌ای برای اکسیداسیون کامل دانست. افزایش زمان واکنش منجر به تولید تعداد بیشتری رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود که این رادیکال‌ها به‌نوبه خود با مولکول‌های رنگ واکنش داده و موجب تجزیه آن‌ها می‌شوند؛ محصولات نهایی این فرآیند شامل آب، دی‌اکسید کربن و ترکیبات واسطه‌ای هستند (۳۲). با پیشرفت بیشتر واکنش، کاهش تدریجی غلظت رنگ و مصرف H_2O_2 موجب کاهش نرخ تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و در نتیجه کاهش سرعت واکنش شد. همچنین، در زمان‌های طولانی‌تر، بخشی از رادیکال‌های هیدروکسیل با H_2O_2 یا با یکدیگر واکنش‌های جانبی داده و موجب اتلاف بی‌اثر رادیکال‌ها می‌شوند. این پدیده که به واکنش‌های scavenging معروف است، یکی از دلایل اصلی تغییرات اندک راندمان فرآیند در زمان‌های طولانی محسوب می‌شود (۳۶).

براساس یافته‌های این پژوهش (**تصویر ۵**)، زمان بهینه برای حذف MB حدود ۵ دقیقه بود و افزایش بیشتر زمان تأثیر محسوسی بر راندمان نداشت؛ در حالی که برای AR18 رسیدن به راندمان بالای حذف ($\approx 95\%$) نیازمند زمان طولانی‌تر بود و از نظر عملی و اقتصادی، زمان ۶۰ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه انتخاب گردید. شایان ذکر است برای سایر آزمایش‌ها و مقایسه بهتر، زمان تماس یک ساعت برای هر دو رنگ انتخاب شد.

یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. برای مثال، دهقانی و همکاران (۲۰۱۵) در حذف رنگ Reactive Red 198 گزارش کردند که حدود ۶۲ درصد از رنگ در ۱۵ دقیقه ابتدایی حذف شد و راندمان نهایی پس از ۹۰ دقیقه به ۹۲ درصد رسید. آن‌ها زمان ۳۰ دقیقه را به‌عنوان زمان بهینه معرفی نمودند (۴۳). همچنین، بقاپور و همکاران (۲۰۱۶) در مورد رنگ Direct Red 81 نشان دادند که با افزایش زمان از ۵ تا ۱۸۰ دقیقه، راندمان حذف از ۳۴/۲۴ درصد به ۹۹/۹ درصد رسید و بیشترین سرعت حذف در ۳۰ دقیقه اول رخ داد (۳۲). این نتایج نشان می‌دهد که فاز اولیه واکنش، مهم‌ترین مرحله در فرآیند فنتون است که در آن بیشترین سهم از رنگ‌زدایی انجام می‌شود.

نتایج **تصویر ۶** نشان می‌دهد که افزایش غلظت رنگ از ۲۵ به ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، منجر به کاهش چشمگیر در راندمان حذف رنگ می‌شود. این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که با افزایش غلظت رنگ، درحالی که مقدار H_2O_2 ثابت نگه داشته می‌شود، رادیکال‌های هیدروکسیل تولیدی نیز به حالت ثابت می‌رسند و در نتیجه درصد حذف کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با ثابت بودن مقدار H_2O_2 ، تعداد رادیکال‌های تولیدی برای تخریب تمام مولکول‌های

و تفسیر نتایج و نگارش بخش‌هایی از مقاله؛ ح.ا. مشارکت در ایده و طراحی مطالعه و ارزیابی مقاله؛ م.ش. ایده و طراحی مطالعه، دریافت حمایت مالی، نظارت بر انجام پژوهش، آماده‌سازی و ارسال مقاله و پاسخگویی به نظرات داوران. همه نویسندگان نتایج مطالعه را بررسی نموده و نسخه نهایی مقاله را تأیید نمودند.

تعارض منافع:

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با انجام این پژوهش یا انتشار این مقاله وجود ندارد.

بازایی داده‌ها:

تمامی داده‌های مرتبط با این مطالعه در متن مقاله گنجانده شده‌اند. با این وجود، بعد از چاپ مقاله، فایل اکسل داده‌های این پژوهش، در صورت درخواست منطقی، از نویسنده مسئول قابل دریافت می‌باشد.

کد اخلاق:

IR.MUBABOL.HRI.REC.1403.251.

حمایت مادی/معنوی:

این پژوهش بعد از تصویب توسط کمیته تحقیقات و فناوری دانشجویی و کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی بابل، از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه حمایت مادی و معنوی دریافت نمود و با استفاده از امکانات آزمایشگاهی دانشکده بهداشت انجام شد.

References

- Katheresan V, Kansedo J, Lau SY. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018;6(4):4676-97. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.
- Aragaw TA, Bogale FM. Biomass-Based Adsorbents for Removal of Dyes From Wastewater: A Review. *Frontiers in Environmental Science*. 2021;9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.764958>.
- Malakootian M, Moridi A. Efficiency of electro-Fenton process in removing Acid Red 18 dye from aqueous solutions. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;111:138-47. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.008>.
- Ashournezhad H, Asgharnia H, Ahmad Nateghi S, Ebrahimi A, Heydari M, Akbari A, et al. [Comparison of the Efficiency of Synthesized Magnesium Oxide (MgO) Nanoparticles and Powdered Activated Carbon (PAC) for the Ad-

آهن و پراکسید هیدروژن در پساب نهایی است که ممکن است مشکلات زیست‌محیطی یا هزینه‌های اضافی برای مرحله پساب تصفیه ایجاد کند. همچنین، این مطالعه تنها روی دو رنگ مدل انجام شده است و عملکرد فرآیند ممکن است برای دیگر رنگ‌ها یا آلاینده‌های پیچیده متفاوت باشد؛ بنابراین، انجام مطالعات بیشتر در شرایط واقعی و روی پساب‌های صنعتی ترکیبی به منظور ارزیابی جامع‌تر کارایی و پایداری این فرآیند توصیه می‌شود.

۵.۲. نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند فنتون ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) روشی مؤثر، ساده و اقتصادی برای حذف رنگ‌های مقاوم و زیست‌تجزیه‌ناپذیر مانند اسید قرمز ۱۸ (AR18) و متیلن آبی (MB) از محیط‌های آبی می‌باشد. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله pH، غلظت پراکسید هیدروژن، غلظت یون آهن، زمان واکنش، غلظت اولیه رنگ و دما بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که pH اسیدی حدود ۳، غلظت‌های بهینه Fe^{2+} و H_2O_2 و دمای معتدل (۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد) شرایط مناسبی را برای دستیابی به راندمان بالای حذف فراهم می‌کنند. در شرایط بهینه، حذف کامل MB طی ۶۰ دقیقه به دست آمد، در حالی که برای AR18 حدود ۹۵ درصد رنگ پس از ۱۲۰ دقیقه واکنش حذف شد. همچنین مشاهده شد که با افزایش غلظت اولیه رنگ، راندمان حذف کاهش می‌یابد، به‌ویژه در غلظت‌های بالا به دلیل مصرف سریع‌تر رادیکال‌های فعال. اثر دما نیز در حذف AR18 مشهودتر بود، در حالی که رنگ MB نسبت به تغییرات دما حساسیت کمتری نشان داد. این نتایج تأیید می‌کنند که فرآیند فنتون می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگ‌های آنیونی و کاتیونی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد و گامی مؤثر در راستای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و ارتقای پایداری منابع آبی باشد.

تشکر و قدردانی:

این مقاله برگرفته از نتایج طرح پژوهشی مصوب کمیته تحقیقات و فناوری دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی بابل (شماره طرح: ۷۲۴۱۳۶۱۳۳ و کد اخلاق: IR.MUBABOL.HRI.REC.1403.251) می‌باشد؛ بنابراین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مادی و معنوی کمیته تحقیقات و فناوری دانشجویی، معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه و دانشکده بهداشت مراتب تشکر و سپاسگزاری را به عمل آورند.

مشارکت نویسندگان:

ا.ی. و ن.ا. انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها؛ م.ح. آنالیز

- sorption of Acid Red 18 Dye from Aqueous Solutions]. *J Mazandaran Univ Med Sci.* 2023;**33**(1):258-73. Persian.
5. Mzinyane NN. Removal of Methylene Blue dye from aqueous solution using Fenton-modified submerged aquatic plant *Schoenoplectus* species (Bulrush). *Heliyon.* 2024;**10**(21):e40071. [PubMed ID:39553639]. [PubMed Central ID:PMC11565393]. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40071>.
6. Vaiano V, De Marco I. Removal of Azo Dyes from Wastewater through Heterogeneous Photocatalysis and Supercritical Water Oxidation. *Separations.* 2023;**10**(4). <https://doi.org/10.3390/separations10040230>.
7. Kusumlata, Ambade B, Kumar A, Gautam S. Sustainable Solutions: Reviewing the Future of Textile Dye Contaminant Removal with Emerging Biological Treatments. *Limnological Review.* 2024;**24**(2):126-49. <https://doi.org/10.3390/limnolrev24020007>.
8. Tripathi M, Singh S, Pathak S, Kasaudhan J, Mishra A, Bala S, et al. Recent Strategies for the Remediation of Textile Dyes from Wastewater: A Systematic Review. *Toxics.* 2023;**11**(11). [PubMed ID:37999592]. [PubMed Central ID:PMC10674586]. <https://doi.org/10.3390/toxics11110940>.
9. Ehrampoush MH, Malakootian M. [Efficiency of electrocoagulation process coupled with UV/H₂O₂ to remove the orange reactive dye I22 from wastewater of textile industries]. *Koomesh.* 2016;**18**(18):408-15. Persian.
10. Periyasamy AP. Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability.* 2024;**16**(2). <https://doi.org/10.3390/su16020495>.
11. Adane T, Adugna AT, Alemayehu E, Rehman R. Textile Industry Effluent Treatment Techniques. *Journal of Chemistry.* 2021;**2021**:1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/5314404>.
12. Ma J, Huang Z, Xu L, Liu K, Zheng Z, Liu D, et al. Improved Fe³⁺/Fe²⁺ redox cycle and H₂O₂ generation by Ag@Fe₃O₄/ACF for efficient amoxicillin and dyes removal in heterogeneous electro-Fenton system. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2025;**727**. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138133>.
13. Gholami-Borujeni F, Naddafi K, Nejatizade-Barandozi F. Application of catalytic ozonation in treatment of dye from aquatic solutions. *Desalination and Water Treatment.* 2013;**51**(34-36):6545-51. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.769491>.
14. Asgharnia H, Haddadi M, Aligholizadeh F, Vosoughi M, Tabarinia H, Gerinasab Z, et al. Predictive modeling and optimization of tetracycline adsorption by activated carbon: a comparative study using Akaike and Bayesian methods. *Water Practice & Technology.* 2026;**21**(4):1288-306. <https://doi.org/10.2166/wpt.2026.222>.
15. Ayele A, Getachew D, Kamaraj M, Suresh A, Rehman R. Phycoremediation of Synthetic Dyes: An Effective and Eco-Friendly Algal Technology for the Dye Abatement. *Journal of Chemistry.* 2021;**2021**:1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/9923643>.
16. Pathirana MA, Dissanayake NSL, Wanasekara ND, Mahltig B, Nandasiri GK. Chitosan-Graphene Oxide Dip-Coated Polyacrylonitrile-Ethylenediamine Electrospun Nanofiber Membrane for Removal of the Dye Stuffs Methylene Blue and Congo Red. *Nanomaterials (Basel).* 2023;**13**(3). [PubMed ID:36770459]. [PubMed Central ID:PMC9920196]. <https://doi.org/10.3390/nano13030498>.
17. Ismail GA, Sakai H. Review on effect of different type of dyes on advanced oxidation processes (AOPs) for textile color removal. *Chemosphere.* 2022;**291**(Pt 3):132906. [PubMed ID:34785181]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132906>.
18. Rashid Ahmed H, Kayani KF. A comparative review of Fenton-like processes and advanced oxidation processes for Methylene Blue degradation. *Inorganic Chemistry Communications.* 2024;**170**. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113467>.
19. Mojiri A, Zhou JL, KarimiDermeni B, Razmi E, Kasmuri N. Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for the Removal of Dyes from Water and Wastewater: Progress, Challenges, and Future Perspectives. *Processes.* 2023;**11**(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030855>.
20. Alsukaibi AKD. Various Approaches for the Detoxification of Toxic Dyes in Wastewater. *Processes.* 2022;**10**(10). <https://doi.org/10.3390/pr10101968>.
21. Fadzli J, Hamid KHK, Him NRN, Puasa SW. A critical review on the treatment of reactive dye wastewater. *Desalin Water Treat.* 2022;**257**:185-203. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28028>.
22. Rahmani AR, Nematollahi D, Godini K, Atashzaban Z, Azarian G. Efficiency of electrochemical advanced oxidation process for degradation of antibiotic ciprofloxacin in aqueous solutions. *Koomesh.* 2019;**21**(21):686-93.
23. Fazlzadeh M, Rahmani A, Nasehinia HR, Rahmani H, Rahmani K. [Degradation of sulfathiazole antibiotics in aqueous solutions by using zero valent iron nanoparticles and hydrogen peroxide]. *Koomesh.* 2016;**18**(3):e151124. Persian.
24. Yaghoubi N, Dianati Tilaki RA, Babanejad Arimi E, Gholami-Borujeni F. [Investigating the Effectiveness of Superchlorination and Fenton Processes in Removing Hydroxychloroquine and Favipiravir from Synthetic Wastewater]. *J Mazandaran Univ Med Sci.* 2025;**34**(242):16-28. Persian.
25. Ameta R, K. Chohadia A, Jain A, Punjabi PB. Fenton and Photo-Fenton Processes. *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*; 2018. p. 49-87.
26. Alvan Sabet Company. [Dyes introduction]. 2025. Persian. Available from: <https://www.alvansabet.ir/product/ari-acid-brill-scarlet-3r/>.
27. Bien T, Kolodynska D, Franus W. Functionalization of Zeolite NaP1 for Simultaneous Acid Red 18 and Cu(II) Removal. *Materials (Basel).* 2021;**14**(24). [PubMed ID:34947411]. [PubMed Central ID:PMC8704076]. <https://doi.org/10.3390/ma14247817>.
28. Asgharnia H, Haddadi M, Gerinasab Z, Vosoughi M, Aligholizadeh F, Tabarinia H, et al. Sustainable activated carbon prepared from beech wood residues for the adsorption of dyes: A Bayesian assessment of experimental data. *Environmental Health Engineering and Management.*

- 2025;12. <https://doi.org/10.34172/ehem.1498>.
29. Lee KI, Ho KY, Chen WH, Kwon EE, Lin KA, Liou SR. Construction and demolition waste as a high-efficiency advanced process for organic pollutant degradation in Fenton-like reaction to approach circular economy. *Environ Pollut.* 2023;335:122246. [PubMed ID:37516293]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122246>.
30. Xavier S, Gandhimathi R, Nidheesh PV, Ramesh ST. Comparison of homogeneous and heterogeneous Fenton processes for the removal of reactive dye Magenta MB from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment.* 2015;53(1):109–18. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.844083>.
31. Rahmani A, Asgari G, Leili M, Aazami Gilan R. [Degradation of Methylene Blue Dye Using Fenton/PhotoFenton-Peracetic Acid (UV/Fe³⁺+CH₃COOH –H₂O₂) Processes from Aqueous Solutions]. *J Mazandaran Univ Med Sci.* 2017;27(153):95–111. Persian.
32. Baghapour MA, Dehghani M, Elhamiyan Z. Evaluation of fenton process in removal of Direct Red 81. *J Health Sci Surveill Syst.* 2016;4(1):14–21.
33. Moghadam F, Nori Kohbanan N. Removal of Reactive Blue 19 Dye Using Fenton From Aqueous Solution. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering.* 2018;5(1):50–5. <https://doi.org/10.15171/ajehe.2018.07>.
34. Liu R, Chiu HM, Shiau C-S, Yeh RY-L, Hung Y-T. Degradation and sludge production of textile dyes by Fenton and photo-Fenton processes. *Dyes and Pigments.* 2007;73(1):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.10.002>.
35. Ganesan R, Latha A, Venkatesan G, Krishnakumari B. Treatment of textile dyes with steel flakes via Fenton and Electro-Fenton processes: An experimental analysis. *Desalination and Water Treatment.* 2024;320. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100837>.
36. Findik S. Decolorization of cationic dyes methyl violet 2B and malachite green via a heterogeneous Fenton-like process using a novel magnetic zeolite-xanthan gum composite. *Int J Biol Macromol.* 2025;307(Pt 3):142193. [PubMed ID:40101824]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142193>.
37. Liu X, Qiu M, Huang C. Degradation of the Reactive Black 5 by Fenton and Fenton-like system. *Procedia Engineering.* 2011;15:4835–40. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.902>.
38. Huang G-Q, Qi G-J, Gao T-Y, Zhang J, Zhao Y-H. Fe-pillared montmorillonite as effective heterogeneous Fenton catalyst for the decolorization of methyl orange. *Journal of Chemical Sciences.* 2020;132(1). <https://doi.org/10.1007/s12039-020-01820-2>.
39. Pieczykolan B, Płonka I, Kudlek E, Kryst R, Stuchlik P, Pokoj D, et al. Application of advanced oxidation processes for effective Reactive Red 241 degradation. *Desalination and Water Treatment.* 2025;323. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101308>.
40. Sohrabi MR, Khavaran A, Shariati S, Shariati S. Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design. *Arabian Journal of Chemistry.* 2017;10:S3523–S31.
41. Ghasemi H, Mozaffari S, Mousavi SH, Aghabarari B, Abu-Zahra N. Decolorization of wastewater by heterogeneous Fenton reaction using MnO₂-Fe₃O₄/CuO hybrid catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2021;9(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105091>.
42. Mohammadrezaei E, Rezaei Kalantari R, Lotfi M. Investigation of Hybrid Process of Fenton Oxidation and Adsorption in Phenol Removal from Water. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering.* 2018;3(1):4–12.
43. Dehghani M, Taghizadeh MM, Gholami T, Ghadami M, Keshtgar L, Elhameyan Z, et al. Optimization of the Parameters Influencing the Photo-Fenton Process for the Decolorization of Reactive Red 198 (RR198). *Jundishapur Journal of Health Sciences.* 2015;7(2). [https://doi.org/10.5812/jjhs.7\(2\)2015.28243](https://doi.org/10.5812/jjhs.7(2)2015.28243).
44. Jafari Mansoorian H, Bazrafshan E, Yari A, Alizadeh M. Removal of Azo Dyes From Aqueous Solution Using Fenton and Modified Fenton Processes. *Health Scope.* 2014;3(2). <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-15507>.
45. Rabie AM, Fahim IS, Hassan RK, Labena A. Advanced oxidations process using peroxy monosulfate and Ce/ZnCo₂O₄ nanocomposite for dyes degradation. *Results in Chemistry.* 2025;16. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102379>.
46. Hassan AK, Al-Kindi GY, Ghanim D. Green synthesis of bentonite-supported iron nanoparticles as a heterogeneous Fenton-like catalyst: Kinetics of decolorization of reactive blue 238 dye. *Water Science and Engineering.* 2020;13(4):286–98. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.12.001>.

Research Article

Textile Wastewater Decolorization via Fenton Oxidation: Comparative Study of Acid Red 18 and Methylene Blue Degradation

Elahe Yaghoubi ¹, Mahdieh Haddadi ¹, Hosseinali Asgharnia ^{2,3}, Nazanin Ahmadi ¹, Mohammad Shirmardi ^{2,3*}

¹Student Research Committee, Babol University of Medical Sciences, Babol, Iran

²Social Determinants of Health Research Center, Health Research Institute, Babol University of Medical Sciences, Babol, Iran

³Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Babol University of Medical Sciences, Babol, Iran

*Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Babol University of Medical Sciences, Babol, Iran. Email: m.shirmardi@mubabol.ac.ir

Received: 17/07/2025; Accepted: 16/08/2026

Abstract

Background: Synthetic dyes such as Acid Red 18 (AR18) and Methylene Blue (MB) are among the most significant pollutants in textile wastewater due to their high stability, toxicity, and resistance to biodegradation, posing serious environmental concerns.

Objectives: This study aimed to investigate the effectiveness of the Fenton process ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) as an advanced oxidation technique for removing these two dyes from aqueous media and to optimize key operational parameters influencing its performance.

Methods: The effects of several process variables including pH (range 2-10), hydrogen peroxide concentration (8 - 0.1 mmol/L), ferrous ion concentration (0.1 - 50 mg/L), reaction time (5 - 120 min), initial dye concentration (25 - 300 mg/L), and temperature (20 - 50°C) were evaluated through a series of batch experiments conducted under laboratory conditions.

Results: The findings demonstrated that operational parameters had a substantial impact on dye removal efficiency. However, owing to the self-adjustment of the final pH of the samples to around 3, changes in the initial pH (2 - 10) did not considerably influence this efficiency. Under these conditions, the removal efficiency ranged from %83 to %97 for AR18 and exceeded %99 for MB. Increasing H_2O_2 and Fe^{2+} concentrations improved the removal efficiency up to a certain point, beyond which no significant enhancement was observed and, in some cases, a decrease in efficiency occurred due to scavenging effects and side reactions. Under optimal conditions, more than %98 of MB was removed in less than 5 minutes, and complete removal was achieved within 60 minutes. For AR18, over %95 removal was attained after 120 minutes. Increasing the initial dye concentration significantly reduced removal efficiency. Furthermore, higher temperatures enhanced AR18 degradation, while MB removal showed lower sensitivity to temperature changes.

Conclusions: The findings demonstrate that the Fenton process can be recommended as a simple, efficient, and cost-effective method for treating industrial wastewater containing both anionic and cationic dyes.

Keywords: Textile Industries, Fenton Reagent, Decolorization, Acid Red 18, Methylene Blue