DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664 Published by Vesnu Publications

Journal of Health System Research Vol. 22, No. 2, Summer

Received: 23.08.2025 Accepted: 21.12.2025 Published: 06.07.2026

Efficiency of the Fenton Process for Removing Reactive Red Dyes from Wastewater: A Systematic Review

Zahra Tavangar[1], Ensiyeh Taheri[2], Hamidreza Pourzamani[3], Ali Fatehizadeh[2], Alireza Rahimi[4], Afshin Ebrahimi[3]

Review Article

Abstract

Background: Reactive red dyes are hazardous pollutants in textile wastewater because of their environmental persistence and toxicity. The Fenton process, which generates highly oxidative hydroxyl radicals, presents a promising solution. This systematic review evaluates the efficiency of the Fenton process in removing reactive red dyes from wastewater.

Methods: A systematic search was conducted in the ISI Web of Science, Scopus, PubMed, Embase, and ProQuest databases without time restrictions and limited to English-language publications. After the screening phase, eligible studies meeting the inclusion criteria were identified and qualitatively analyzed. Two indices for assessing and comparing dye removal efficiency by the Fenton and photo-Fenton processes – namely, catalyst consumption efficiency (M) and hydrogen peroxide consumption efficiency (N) – were defined and calculated.

Findings: After screening and evaluating 1152 articles, 53 studies were ultimately analyzed. The highest M index of 2.38 was achieved in the Fenton process at pH = 3, with a catalyst concentration of 4.19 mg/l and an optimal reaction time of 10 minutes, resulting in 100% dye removal efficiency. Furthermore, the highest hydrogen peroxide consumption efficiency (N = 3.64) was observed in the photo-Fenton process at an optimal time of 2 minutes, with hydrogen peroxide consumption of 13.61 mg/l.

Conclusion: The Fenton process is highly effective for removing reactive red dye within short reaction times. Selecting the appropriate catalyst and optimizing operational conditions are crucial for enhancing efficiency and ensuring process stability.

Keywords: Reactive red dyes; Fenton process; Advanced oxidation processes; Textile wastewater; Dye removal; Systematic review

Citation: Tavangar Z, Taheri E, Pourzamani H, Fatehizadeh A, Rahimi A, Ebrahimi A. **Efficiency of the Fenton Process for Removing Reactive Red Dyes from Wastewater: A Systematic Review.** J Health Syst Res 2026; 22(2): 216-31.

1- MSc Student, Student Research Committee AND Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
3- Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
4- Associate Professor, Department of Medical Library and Information Science, School of Management and Medical Informatics, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
Corresponding Author: Afshin Ebrahimi; Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran; Email: a_ebrahimi@hlth.mui.ac.ir

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664 Published by Vesnu Publications

بررسی کارایی فرایند فنتون جهت حذف رنگ‌های قرمز راکتیو از فاضلاب: یک مطالعه مروری نظام‌مند

زهرا توانگر[۱]، انسیه طاهری[۲]، حمیدرضا پورزمانی[۳]، علی فاتحی‌زاده[۲]، علیرضا رحیمی[۴]، افشین ابراهیمی[۳]

مقاله مروری

چکیده

مقدمه: رنگ‌های قرمز راکتیو با توجه به ویژگی‌های ماندگاری در محیط و سمیت، از جمله آلاینده‌های خطرناک در پساب نساجی محسوب می‌شوند. فرایند فنتون که به واسطه تولید رادیکال‌های هیدروکسیل با قدرت اکسیداسیون بالا شناخته می‌شود، راهکار مؤثری به شمار می‌رود. پژوهش حاضر به ارزیابی نظام‌مند کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو از فاضلاب پرداخت.

روش‌ها: جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های اطلاعاتی ISI Web of Science، Scopus، PubMed، Embase و ProQuest بدون اعمال محدودیت زمانی و به زبان انگلیسی انجام شد. پس از مرحله غربالگری، مطالعات واجد معیارهای ورود، شناسایی و به روش کیفی تحلیل گردید. دو شاخص به منظور ارزیابی و مقایسه کارایی حذف رنگ با روش فنتون و شبه فنتون شامل بازدهی مصرف کاتالیست (M) و بازدهی مصرف پراکسید هیدروژن (N) تعریف و محاسبه شد.

یافته‌ها: پس از مرحله غربالگری و ارزیابی ۱۱۵۲ مقاله، در نهایت، ۵۳ مقاله مورد تحلیل قرار گرفت. بالاترین شاخص M به میزان ۲/۳۸ در فرایند فنتون با pH = ۳ و غلظت کاتالیست، ۴/۱۹ میلی‌گرم بر لیتر و زمان بهینه ۱۰ دقیقه به دست آمد که راندمان حذف رنگ در این شرایط ۱۰۰ درصد بود. همچنین، بالاترین بازدهی مصرف پراکسید هیدروژن (N = ۳/۶۴) در فرایند شبه فنتون و زمان بهینه ۲ دقیقه حاصل گردید که در آن مصرف پراکسید هیدروژن، ۱۳/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر بود.

نتیجه‌گیری: فرایند فنتون کارایی بسیار بالایی در حذف رنگ قرمز راکتیو با زمان‌های واکنش کوتاه از خود نشان می‌دهد. انتخاب کاتالیست و بهینه‌سازی شاخص‌های عملیاتی، عوامل کلیدی در بهبود کارایی و پایداری فرایند می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رنگ قرمز راکتیو؛ فرایند فنتون؛ فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته؛ تصفیه پساب نساجی؛ حذف رنگ؛ مطالعه مرور نظام‌مند

ارجاع: توانگر زهرا، طاهری انسیه، پورزمانی حمیدرضا، فاتحی‌زاده علی، رحیمی علیرضا، ابراهیمی افشین. **بررسی کارایی فرایند فنتون جهت حذف رنگ‌های قرمز راکتیو از فاضلاب: یک مطالعه مروری نظام‌مند.** مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۵؛ ۲۲ (۲): ۲۳۱-۲۱۶

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۶/۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۹/۳۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۴/۱۵

مقدمه

رنگ‌های راکتیو (Reactive red) از جمله مشکل‌سازترین رنگ‌ها در صنعت نساجی به شمار می‌رود (۲، ۱). مصرف این رنگ‌ها به دلیل روش رنگرزی ساده و پایداری مطلوب در فرایند شستشو، روندی افزایشی دارد (۳). این گروه از رنگ‌ها به واسطه ایجاد پیوند کووالانسی با الیاف و پایداری شیمیایی بالا، نقش مهمی در صنعت نساجی ایفا می‌کنند و منجر به تولید رنگ‌های درخشان و بادوام می‌شوند (۴). با این وجود، پس از ورود به محیط‌های آبی، می‌توانند باعث بروز مشکلات زیبایی‌شناختی، کاهش فرایند فتوسنتز و ایجاد سمیت حاد و مزمن گردند. همچنین، این ترکیبات و متابولیت‌های آن‌ها دارای پتانسیل سرطان‌زایی و جهش‌زایی هستند (۵). بر اساس شواهد علمی، برخی از رنگ‌های راکتیو از پایداری محیطی قابل توجهی برخوردار هستند؛ به طوری که مطالعات میدانی، نیمه عمر تجزیه آن‌ها در محیط‌های آبی را بیش از ۴۰ سال برآورد کرده‌اند (۶). این پایداری زیست محیطی که موجب مقاومت ترکیبات در برابر تخریب می‌شود، کاربرد فن‌آوری‌های تصفیه فاضلاب مؤثر و پایدار را برای جلوگیری از انتشار آن‌ها به محیط زیست ضروری می‌سازد (۷).

روش‌های فیزیکی- شیمیایی مختلفی همچون انعقاد/ لخته‌سازی، جذب کربن فعال و تکنیک‌های اسمز معکوس به منظور حذف رنگ توسعه یافته‌اند. با این حال، روش‌های مذکور تنها قادر به انتقال آلاینده از یک فاز به فاز دیگر هستند (۸) و نیاز به تصفیه بیشتر همچنان باقی می‌ماند (۹). بنابراین، تمرکز بر تکنیک‌هایی که منجر به تخریب کامل مولکول‌های رنگ می‌شوند، امری ضروری است (۸).

یافته‌های تجربی اخیر نشان می‌دهد که رنگ‌زدایی از رنگ‌های راکتیو از طریق فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته امکان‌پذیر است (۱۰). اکسیداسیون فنتون به عنوان یکی از این فرایندها، از H_2O_2 و یون Fe^{2+} محلول یا یک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی و گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۳- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۴- دانشیار، گروه کتابداری و اطلاع‌رسانی پزشکی، دانشکده مدیریت و اطلاع‌رسانی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
نویسنده مسؤول: افشین ابراهیمی؛ استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
Email: a_ebrahimi@hlth.mui.ac.ir

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

کاتالیزور آهن جامد برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) با پتانسیل اکسیداسیون بالا استفاده می‌کند. برای بیش از دو دهه، فرایند فنتون به عنوان روش مؤثری برای اکسیداسیون آلاینده‌های آلی مقاوم در برابر تجزیه زیستی، به طور گسترده‌ای توسعه یافته است (۱۲، ۱۱). به طور کلی، این فرایند در مقایسه با سایر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، به زمان واکنش کمتری برای معدنی‌سازی ترکیبات آلی نیاز دارد (۱۴، ۱۳).

در فرایند فنتون، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، یون Fe^{2+} را به Fe^{3+} اکسید می‌کند و در این فرایند، یک یون هیدروکسید و یک رادیکال هیدروکسیل تشکیل می‌شود. سپس یون Fe^{3+} توسط یک مولکول دیگر از H_2O_2 به Fe^{2+} کاهش می‌یابد که این امر منجر به تولید یک پروتون و یک رادیکال هیدروپروکسیل می‌گردد. علاوه بر این، H_2O_2 در یک واکنش جانبی به نام «عدم تناسب» (Disproportionation) به دو گونه رادیکالی اکسیژن تبدیل می‌شود که در روابط ۱ تا ۳ نشان داده شده است و آب به عنوان محصول جانبی تولید می‌شود (۱۵).

رابطه ۱ $$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^{\circ} + OH^{-}$$

رابطه ۲ $$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + HOO^{\circ} + H^{+}$$

رابطه ۳ $$2H_2O_2 \rightarrow OH^{\circ} + HOO^{\circ} + H_2O$$

به طور کلی، فرایند فنتون متعارف شامل چهار مرحله اصلی «تنظیم pH محیط، واکنش اکسیداسیون، خنثی‌سازی و در نهایت رسوب‌دهی از طریق انعقاد» است. بدین‌ترتیب، در این فرایند آلاینده‌های آلی به طور عمده در دو مرحله اکسیداسیون و انعقاد حذف می‌شوند (۱۶).

در مقابل، فرایندهای شبه‌فنتون (Fenton-like) به عنوان جایگزین‌های کارامد برای سیستم کلاسیک فنتون مطرح هستند. در این فرایندها، بر خلاف فرایند فنتون کلاسیک که از یون Fe^{2+} به عنوان کاتالیزور استفاده می‌کند، از سایر کاتالیزورهای فلزی مانند Fe^{3+}، مس، منگنز، کبالت و... یا مواد جامد (مانند اکسیدهای فلزی یا کمپلکس‌های فلزی پایدار شده روی بستر) برای تجزیه H_2O_2 و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل استفاده می‌شود. این رادیکال‌های قوی، قادر به تخریب طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی مقاوم هستند. علاوه بر این، فرایندهای شبه‌فنتون با تولید لجن کمتر و همچنین، قابلیت بازیابی و استفاده مجدد کاتالیست در سیستم‌های ناهمگن، گزینه امیدوارکننده‌ای برای تجزیه رنگ‌های آلی پیچیده در پساب‌های صنعتی محسوب می‌شوند (۱۷).

Nidheesh و همکاران در یک مطالعه مروری، کارایی فرایندهای فنتون را در حذف رنگ‌های صنعتی از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فرایندهای فنتون در انواع همگن، ناهمگن و ترکیبی (مانند الکتروفنتون و سونوفنتون) روش‌های مؤثر و سازگاری با محیط زیست برای زدایش رنگ‌های صنعتی محسوب می‌شوند (۱۷). همچنین، مشخص گردید که بهینه‌سازی شاخص‌های عملیاتی از جمله pH در محدوده اسیدی (~۳)، غلظت کاتالیست آهن و H_2O_2 و نیز دمای واکنش، عامل کلیدی در دستیابی به تخریب کامل رنگ‌ها و کاهش سمیت پساب است (۱۸).

در همین راستا، Pimentel Prates و همکاران با انجام یک مرور نظام‌مند جامع، به تحلیل کاربردهای فرایند فنتون در تصفیه فاضلاب پرداختند و دریافتند که این روش به طور فزاینده‌ای برای حذف آلاینده‌های مقاوم مانند رنگ‌ها، داروها و ترکیبات آلی در پساب‌های صنعتی و شهری مورد استفاده قرار گرفته است (۱۹). از مهم‌ترین دستاوردهای مطالعه آنان، می‌توان به شناسایی روند رشد نمایی انتشارات از سال ۲۰۱۳، تأیید اثربخشی فرایند فنتون در حذف بیش از ۵۰ درصد Chemical oxygen demand (COD) در بیشتر تحقیقات و همچنین، معرفی نوآوری‌هایی مانند الکتروفنتون و کاتالیست‌های نانویی به منظور بهبود کارایی فرایند اشاره نمود (۱۹).

Kamati و همکاران نیز در یک مرور جامع، به ارزیابی روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب حاوی رنگ‌های راکتیو در صنایع رنگرزی و چاپ پرداختند. مطالعه آنان به تحلیل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی پرداخت و بر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به عنوان راهکاری ساده، مقیاس‌پذیر و مقرون به‌صرفه تأکید ویژه‌ای نمود. در نهایت، آنان بر ضرورت توسعه روش‌های ترکیبی و پایدار به منظور کاهش اثرات مخرب این آلاینده‌ها بر محیط زیست و سلامت انسان تأکید کردند (۷).

با بررسی پیشینه پژوهش، خلأ دانشی آشکاری در زمینه تحقیقات مروری تخصصی پیرامون کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو مشاهده می‌شود. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی کلی فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته پرداخته‌اند، اما هیچ یک به طور خاص و نظام‌مند به ارزیابی جامع عوامل مؤثر و شرایط بهینه‌سازی فرایند فنتون برای حذف این دسته از رنگ‌ها نپرداخته‌اند. این در حالی است که با توجه به مصرف روزافزون رنگ‌های قرمز راکتیو در صنعت نساجی و پایداری محیطی قابل توجه این ترکیبات که می‌تواند تا چندین دهه در محیط باقی بماند، لزوم انجام تحقیق نظام‌مندی برای تعیین بهترین شیوه‌های تصفیه بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف پر کردن این خلأ پژوهشی و با تمرکز بر تجزیه و تحلیل نظام‌مند شواهد موجود در زمینه کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو از فاضلاب طراحی شد. دستیابی به شرایط بهینه عملیاتی و شناسایی مؤثرترین رویکردهای مبتنی بر فرایند فنتون از جمله اهدافی است که می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های کارشناسی در انتخاب راهکارهای تصفیه‌ای کارامد و پایدار فراهم آورد.

روش‌ها

این تحقیق بر اساس دستورالعمل‌های بیانیه PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) انجام شد (۲۰). به منظور شناسایی کلیه مقالات مرتبط با کاربرد فرایند فنتون در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو از فاضلاب، یک جستجوی نظام‌مند و جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی Web of Science، Scopus، PubMed، Embase و ProQuest تا تاریخ ۱۵ سپتامبر سال ۲۰۲۴ صورت پذیرفت. جستجو محدود به مقالات منتشر شده به زبان انگلیسی و بدون اعمال محدودیت زمانی بود. راهبرد جستجو با استفاده از کلید واژه‌های استخراج شده از مقالات علمی شامل Fenton*, "Fenton reaction", "Fenton like reaction", "Fenton oxidation", "Fenton reaction", "Fenton-Based ", "Fenton reagent*", "Iron-based oxidation", "ferrous ion, AOPs" oxidation", "Fenton process", "H_2O_2–Fe (II)", "Reactive red", "Reactive red colour", "Reactive red color", "Reactive red Pigment*", "Reactive red Coloring Agent", "Reactive red Hue", "Reactive red Tint", "Reactive Red dye Colorant*", "Reactive Red dye Stain*", "wastewater*", "waste liquor*", "sewer effluent", "Sewage", "textile wastewater", "Aqueous solution*", "textile effluent", "textile

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

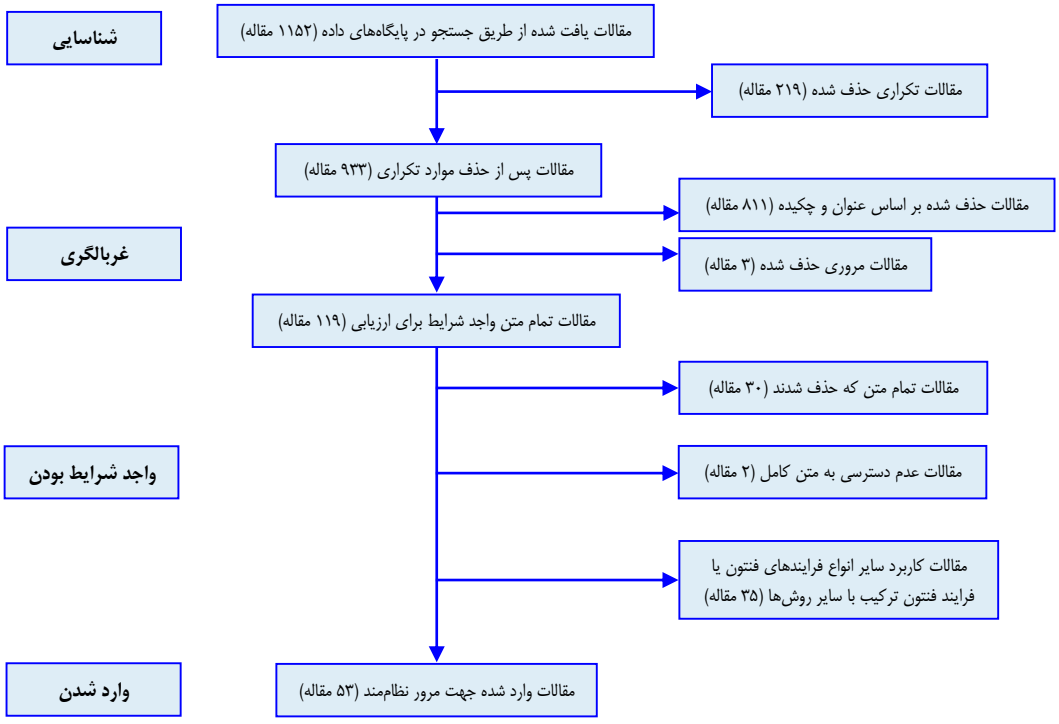
industry wastewater", "textile wastewater treatment", "Wastewater treatment", "Wastewater purification" و همچنین، واژگان مشابه از پایگاه‌های MeSH و Embase و با ترکیب مناسب کلید واژه‌ها از طریق عملگرهای AND و OR طراحی گردید.

در پژوهش حاضر، بر اساس ساختار Patient/Problem, Intervention, Comparison, Outcome (PICO)، جمعیت مورد بررسی، فاضلاب (Wastewater)؛ نوع مداخله، فرایند فنتون (Fenton processes)؛ مقایسه، کارایی‌های حذف رنگ‌های Reactive red از فاضلاب (Removal efficiency of Reactive Red dyes from wastewater) و پیامد، حذف رنگ (Dye removal) بود. سپس مطالعات پژوهشی اصیل که به زبان انگلیسی منتشر شده و به بررسی کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو از فاضلاب پرداخته بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. مقالات مروری، سرمقاله، نامه به سردبیر و مطالعاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود، از تحقیق حذف شدند.

مرحله غربالگری بر اساس عنوان و چکیده توسط دو ارزیاب به طور مستقل انجام پذیرفت. در مواردی که بین نتایج استخراج شده توسط دو ارزیاب اختلاف نظر وجود داشت، از نظرات ارزیاب سوم برای اتخاذ تصمیم نهایی استفاده می‌شد. سپس متن کامل پژوهش‌های مرتبط مورد بررسی دقیق قرار گرفت. روش بررسی بدین صورت بود که مقالات مرتبط با فرایند فنتون و شبه‌فنتون ارزیابی شده و اطلاعات مورد نیاز از جمله نام فرایند، نوع رنگ قرمز راکتیو، pH بهینه، نوع و غلظت کاتالیست، غلظت H_2O_2، زمان و دمای بهینه فرایند و غلظت اولیه رنگ استخراج گردید.

در مجموع، ۱۱۵۲ مقاله شناسایی شد که ۲۱۸ مقاله به دلیل تکراری بودن حذف گردید. از ۹۳۴ مقاله باقی‌مانده، بر اساس بررسی عنوان و چکیده، ۸۱۱ مقاله نامرتبط و ۳ مقاله مروری شناسایی و حذف شد. بدین ترتیب، ۱۲۰ مقاله برای ارزیابی متن کامل وارد مرحله بعد گردید. از این تعداد، ۳۰ مقاله غیر مرتبط، ۲ مقاله با متن کامل غیر قابل دسترس و ۳۵ مقاله به دلیل کاربرد سایر فرایندهای فنتون یا ترکیب آن با روش‌های دیگر، از روند تحقیق حذف گردید. در نهایت، ۵۳ مقاله واجد شرایط مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و داده‌های مورد نظر از آن‌ها استخراج گردید. با توجه به بررسی بیش از یک رنگ قرمز راکتیو یا چندین کاتالیست در برخی مقالات، در مجموع، ۶۶ مطالعه از ۵۳ مقاله استخراج و در ارزیابی کیفی وارد شد. این روند در نمودار جریان PRISMA (شکل ۱) خلاصه شده است.

ارزیابی کیفیت مطالعات منتخب با به کارگیری چک‌لیست PRISMA و اعمال اصلاحات لازم با توجه به نوع پژوهش و نظر نویسندگان انجام پذیرفت. معیارهای ارزیابی شامل طراحی آزمایش (داشتن هدف مشخص و تعریف متغیرهای مستقل)، روش‌شناسی (توصیف جامع مواد و روش‌ها و تأیید تکرارپذیری)، کنترل کیفیت (گزارش کالیبراسیون دستگاه‌ها و استفاده از مواد مرجع)، تحلیل داده‌ها (به کارگیری روش‌های آماری مناسب، گزارش انحراف معیار/ خطای استاندارد و محاسبه ضریب تعیین)، ارایه نتایج (ارایه داده‌های خام و نمودارهای دارای برچسب مناسب) و بخش بحث (ذکر محدودیت‌ها و ارایه پیشنهادها) بود. نتایج ارزیابی نشان داد که ۴۵ مقاله نمره بالاتر از ۵۰ درصد (۱۴ از ۲۸) کسب کرد که بیان‌کننده کیفیت مطلوب ۸۵ درصد مقالات این مرور نظام‌مند می‌باشد و تنها ۴ مقاله نمره کمتر از ۱۴ و ۴ مقاله نمره برابر ۱۴ را به خود اختصاص دادند.



شکل ۱. فرایند جستجو و انتخاب مقالات

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

در مطالعه حاضر با توجه به این که امکان قضاوت در مورد کارایی و تعیین فرایند بهینه بر اساس راندمان حذف رنگ، غلظت کاتالیست، غلظت H_2O_2 مصرفی و یا زمان واکنش وجود نداشت، به منظور یکسان‌سازی نتایج از دو شاخص محقق ساخت که در روابط ۴ و ۵ ارایه شده است، استفاده گردید.

$$M = \frac{\left(\frac{mg}{l}\right)\text{غلظت رنگ حذف شده}}{\text{زمان واکنش}(\min) \times \left(\frac{mg}{l}\right)\text{غلظت کاتالیست}}$$ رابطه ۴

$$N = \frac{\left(\frac{mg}{l}\right)\text{غلظت رنگ حذف شده}}{\text{زمان واکنش}(\min) \times \left(\frac{mg}{l}\right)H_2O_2\text{ غلظت}}$$ رابطه ۵

بر اساس رابطه ۴، شاخص M برابر با نسبت غلظت رنگ حذف شده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به غلظت کاتالیست مصرفی بر حسب میلی گرم بر لیتر، تقسیم بر زمان واکنش است. در واقع، هرچه مقدار عددی این شاخص برای فرایند فنتون بیشتر باشد، میزان رنگ بیشتری در مدت زمان کمتر حذف شده؛ ضمن این که مصرف کاتالیست نیز کمتر بوده و در نتیجه آن، فرایند و شرایط بهینه برای حذف رنگ قرمز راکتیو عملکرد بهتری داشته است. به عبارت دیگر، شاخص M مشخص می‌کند که چه میزان کاتالیست مصرف شده تا بیشترین حذف رنگ در کمترین زمان باشد. زمانی که هدف ما یافتن مؤثرترین سیستم فنتون از نظر اقتصادی و بازدهی است، از شاخص M استفاده می‌شود. رابطه ۵ شاخص N را معرفی می‌کند. این شاخص برابر با نسبت غلظت رنگ حذف شده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به غلظت H_2O_2 مصرفی بر حسب میلی گرم بر لیتر تقسیم بر زمان واکنش است. در واقع، هرچه مقدار عددی شاخص N برای یک فرایند فنتون بیشتر باشد، میزان رنگ بیشتری در مدت زمان کمتری حذف شده و همچنین، مصرف H_2O_2 نیز کمتر بوده است. زمانی که هدف، بررسی تأثیر H_2O_2 بر بازدهی می‌باشد، از این شاخص استفاده می‌شود. هر دو شاخص از جنبه اقتصادی حایز اهمیت است و امکان مقایسه نظام‌مند بین سیستم‌های مختلف فنتون را فراهم می‌سازد.

یافته‌ها

مطالعات مستخرج مرتبط با فرایندهای فنتون و شبه فنتون برای حذف رنگ قرمز راکتیو در جدول ۱ ارایه شده است.

بحث

اثر نوع فرایند: فرایند فنتون کلاسیک به طور عمده از Fe^{2+} و H_2O_2 برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل استفاده می‌کند که در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو مؤثر است. در مطالعه Wu و همکاران با استفاده از Fe^{2+} در pH = ۳، راندمان حذف ۷۰ درصد گزارش شد (۲۱). در مقابل، فرایندهای شبه فنتون از کاتالیست‌های جایگزین مانند Fe^{3+} یا ترکیبات ناهمگن (نانوذرات، کمپلکس‌های فلزی) بهره می‌برند. تحقیق Dutta و همکاران با استفاده از Fe^{3+} در pH = ۷/۲ به راندمان ۹۷ درصد دست یافت (۲۴). این فرایندها انعطاف‌پذیری بیشتری در شرایط واکنش دارند و برخی از آن‌ها مانند سیستم‌های ناهمگن در پژوهش‌های Costa و همکاران (۲۷) و Hassan و همکاران (۲۸) قابلیت استفاده مجدد را ارایه داده‌اند.

اثر pH pH یکی از متغیرهای کلیدی در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در فرایندهای فنتون و شبه فنتون شناخته می‌شود (۱۶). فرایند فنتون کلاسیک اغلب در محدوده pH اسیدی (بین ۳ و ۴) بهینه عمل می‌کند. به عنوان نمونه، در تحقیق Wu و همکاران، در pH = ۳، راندمان حذف ۷۰ درصد ثبت گردید (۲۱). در مقابل، فرایندهای شبه فنتون قابلیت کاربرد در محدوده وسیع‌تری از pH را دارا می‌باشند. پژوهش Zhu و همکاران در pH = ۷ به راندمان ۹۹-۹۴ درصد دست یافت (۴۴). این انعطاف‌پذیری در عملکرد، فرایند شبه فنتون را برای کاربردهای عملی در شرایط واقعی جذاب‌تر می‌سازد. علاوه بر این، pH محلول تأثیر چند جانبه‌ای بر مکانیسم‌های تصفیه دارد. این متغیر هم بر جذب سطحی مولکول‌های رنگ از طریق تأثیر بر بار سطح کاتالیست و درجه یونش رنگ تأثیر مستقیم دارد (۵۹) و هم بر فعالیت کاتالیستی، پایداری H_2O_2 و کارایی اکسیداسیون در فرایند شبه فنتون مؤثر است (۵۸).

محدوده بهینه pH برای فرایند فنتون به طور عمده حول pH = ۳ گزارش شده است که با تولید بالاتر H_2O_2 مرتبط است (۱۸). اگرچه دامنه pH در مطالعات مورد بررسی از ۲ تا ۲/۷ متغیر بود، اما بیشترین مقدار بهینه گزارش شده، ۳ بوده است. کارایی بالای حذف رنگ در pH اسیدی را می‌توان با برهم‌کنش الکترواستاتیکی مطلوب بین کاتالیست و مولکول رنگ و نیز تولید بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل توجیه نمود (۵۹).

در مقادیر pH پایین‌تر از ۳، تشکیل کمپلکس‌های آبی آهن همچون $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$ که کندتر با H_2O_2 واکنش می‌دهند، می‌تواند منجر به کاهش کارایی سیستم گردد (۳۴). این اثر در pHهای به شدت اسیدی (کمتر از ۲) با مکانیسم دیگری تشدید می‌شود که در آن پروتونه شدن H_2O_2 و تشکیل یون اکسونیوم ($H_3O_2^+$) مطابق رابطه ۶ به طور قابل‌توجهی نرخ واکنش را کاهش می‌دهد (۷۲).

$$H_2O_2 + H^+ \rightarrow H_3O_2^+$$ رابطه ۶

همچنین، در این محدوده pH پایین، یون‌های H^+ اضافی با رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش می‌دهد و آن‌ها را به مولکول آب تبدیل می‌کند که این مکانیسم در رابطه ۷ نشان‌داده شده است (۱۸).

$$HO^{\circ} + H^+ + e^- \rightarrow H_2O$$ رابطه ۷

در محدوده قلیایی، تشکیل رسوب هیدروکسید آهن ($Fe(OH)_3$) نه‌تنها بازسازی کاتالیست آهن را مختل می‌کند، بلکه موجب تغییر مسیر غالب فرایند از اکسیداسیون به انعقاد می‌شود (۳۴). در pH = ۳/۵، تعادل حلالیت توسط Fe^{3+} و $Fe(OH)_3$ برای سیستم Fe-H_2O کنترل می‌شود. برای pH محلول بالاتر از ۳/۵، این تعادل فقط توسط $Fe(OH)_3$ کنترل می‌شود. در این شرایط، حذف رنگ به طور عمده به دلیل فرایند انعقاد یا جذب است. بر خلاف این، اگر Fe^{3+} تعادل را کنترل کند و فرایند فنتون مسؤول حذف آلاینده در pH کمتر از ۳/۵ باشد، با پیشرفت تخریب رنگ، تشکیل اسیدهای آلی در فرایندهای فنتون، منجر به کاهش pH محلول می‌شود (۷۳).

با افزایش pH به مقادیر بالاتر از ۴، توانایی اکسیداسیون فنتون به دلیل تجزیه H_2O_2 و غیر فعال شدن کاتالیزورهای آهنی، کاهش می‌یابد (۶۲). در محیط‌های قلیایی شدید (pH > ۸)، ناپایداری ذاتی H_2O_2 و رسوب گسترده هیدروکسیدهای آهن، کارایی فرایند فنتون را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (۵۹).

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

جدول ۱. شرایط عملیاتی بهینه در مطالعات کاربرد فرایندهای فنتون و شبه فنتون برای حذف رنگ‌های قرمز راکتیو

فرایند	نوع رنگ	pH	نوع کاتالیست	غلظت کاتالیست (میلی‌گرم بر لیتر)	غلظت H_2O_2 (میلی‌گرم بر لیتر)	زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتی‌گراد)	غلظت رنگ (میلی‌گرم بر لیتر)	راندمان (درصد)	شاخص M	شاخص N	منبع
Fenton	Reactive Red 2	۳	Fe^{2+}	۲/۷۹	۶۸/۰۳	۵	۲۵	۲۰	۷۰/۰۰	۱/۰۰٤	۰/۰٤۱	(۲۱)
Fenton	Reactive Red 2	۳	Fe^{2+}	٤٤	۵۸	۱۰	–	۱۰	بیشتر از ۹۸	۰/۰۲۲	۰/۰۱۷	(۲۲)
Fenton	Reactive Red 2	۳	Fe^{2+}	۵۰	۹۰	۱۵	دمای اتاق	۱۰	۹۹/۰۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷	(۲۳)
Fenton-like	Reactive Red 2	۲/۷	Fe^{2+}	۲/۰۱	٤٤/۸۸	۶۰	۲۵/۸۵	۱۰۰/۲	بیشتر از ۹۷	۰/۸۰۶	۰/۰۳۶	(۲٤)
Fenton-like	Reactive Red 2	۳	Fe^{3+}	۲/۷۵	۶۸/۰۳	۲۰	۲۵	۲۰	۱۰/۰۰	۰/۰۳۶	۰/۰۰۲	(۲۱)
Fenton-like	Reactive Red 2	۷	Fe^{3+}	۲۵	۱۰۰۰	۵۰	۲۵	٤۰	۱۰۰	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰۸	(۲۵)
Fenton-like	Reactive Red 120	۳	Fe^{2+}	۱۳/۹۶	۱۷۰/۰۷	۱۵	۲۵	۱۰۱	بیشتر از ۹۸	۰/٤۷۳	۰/۰۳۹	(۲۶)
Heterogeneous Fenton/batch system	Reactive Red 120	۳	mill scale (MS)	۱۵۰۰۰	۱۷/۰۱	۱۲۰	۲۵	۳۵	۹۰/۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۵	(۲۷)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 120	۳	G-Z-Fe/Ni-NPs	۱۰۰	۳٤/۰۱	۱۲۰	۵۰	۲۵	۹۹/۹۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	(۲۸)
homogenous Fenton	Reactive Red 120	۳	Fe^{2+}	۵/۵۸	۶۸۰	۳۰	–	۱۰۰	۱۰۰	۰/۵۹۷	۰/۰۰۵	(۲۹)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 120	۳	G-Fe/Ni-NPs	۱۰۰	۶۸۰/۲۸	۱۲۰	۵۰	۲۵	۹۹/۸۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۳	(۲۸)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 120	۳	pyrite cinder (PC)	٤۰۰۰	۳٤۰/۱٤	٤۸۰	۲۵ ± ۰/۵	۵۰	۹۲/۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	(۳۰)
Fenton	Reactive Red 141	۳	Fe^{2+}	۲۵۰	۳۳۳	۳۰	دمای اتاق	۵۰۰۰	۹۰/۰۰	۰/۶۰۰۰	۰/٤۵۱	(۳۱)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 141	۳/۵	ZSM-5 zeolite (Si/Al = 42)	۱۰۰۰	۲۳۸/۱	۱۲۰	۵۹/۸۵	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰٤	(۳۲)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 141	۳/۵	IE-FeZSM-5 (42)	۱۰۰۰	۹۰۸۱/۷٤	۱۲۰	۵۹/۸۵	۱۰۰	۹۷/۰۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱	(۳۳)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 141	۳/۵	HT-FeZSM-5-2	۱۰۰۰	۹۰۸۱/۷٤	۱۲۰	۵۹/۸۵	۱۰۰	۹۱/٤۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱	(۳۳)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 141	۳/۵	HT-FeZSM-5-1	۱۰۰۰	۹۰۸۱/۷٤	۱۲۰	۵۹/۸۵	۱۰۰	۸۵/٤۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۱	(۳۳)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red 141	۳/۵	IE-FeZSM-5 (22)	۱۰۰	۹۰۸۱/۷٤	۱۲۰	۵۹/۸۵	۱۰۰	٤۷/۸۰	۰/۰۰۰٤	۰/۰۰۰۰٤	(۳۳)
Fenton	Reactive Red 195	۳	Fe^{2+}	٤۵۰	۲۵۰۰	۳۰	–	۵۰۰۰	۹۵/۰۰	۰/۳۵۲	۰/۰۶۳	(۳٤)
Fenton	Reactive Red 195	۳	Fe^{2+}	۵۰	۷۷/۷	٤۵	۳۰	۱۰۰	۸۰/۵۰	۰/۰۳۶	۰/۰۲۳	(۳۵)

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

جدول ۱. شرایط عملیاتی بهینه در مطالعات کاربرد فرایندهای فنتون و شبه فنتون برای حذف رنگ‌های قرمز راکتیو (ادامه)

فرایند	نوع رنگ	pH	نوع کاتالیست	غلظت کاتالیست (میلی‌گرم بر لیتر)	غلظت H_2O_2 (میلی‌گرم بر لیتر)	زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتی‌گراد)	غلظت رنگ (میلی‌گرم بر لیتر)	راندمان (درصد)	شاخص M	شاخص N	منبع
Fenton	Reactive Red 195	۳	Fe-MIL-88B/GO composite	۳۰۰	۱۳۶	۲۵	دمای اتاق	۱۰۰	۷۵/۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۲۲	(۳۶)
Fenton	Reactive Red 195	۳	Fe^{2+}	۵۰	۱۹۹/۸	۴۵	۲۵	۱۰۰	۹۹/۷۰	۰/۰۴۴	۰/۰۱۱	(۳۷)
heterogeneous Fenton	Reactive Red 195	۲	Cu-Fe bimetallic wool complex	۵۰۰۰	۱۰۲/۰۴	۹۰	۲۵	۵۶/۸۱۶	۹۵/۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۶	(۳۸)
heterogeneous Fenton	Reactive Red 195	۶	Fe-AO-n-PAN-D	۴۰۰۰	۱۰۲	۱۲۰	–	۵۶/۸۱۶	۹۹/۶۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵	(۳۹)
Fenton	Reactive Red 195	۳–۴	Fe^{2+}	۱	۶۰	۱۵۰	–	۲۵	۶۵/۰۰	۰/۱۰۸	۰/۰۰۲	(۴۰)
Fenton-like catalytic oxidation	Reactive Red 195	۳	$FeNi_3/SiO_2$	۱۰۰۰	۱۰۰	۹۰	دمای اتاق	۵	۱۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۶	(۴۱)
Heterogeneous Fenton	Reactive Red 195	۳	$GOFe_3O_4/Cu$	۳۴۰	۵۷۶۰	۹	دمای اتاق	۲۲	۹۷/۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۴	(۴۲)
Fenton	Reactive Red 198	۳	Fe^{2+}	۲۵۰	۳۳۳	۳۰	دمای اتاق	۵۰۰۰	۸۸/۰۰	۰/۵۸۷	۰/۴۴	(۳۱)
Heterogeneous Fenton	Reactive Red 198	۲	Fe_3O_4-BC_1	۴۸۶۲	۲۷۵۱۷۳	۴۵	دمای اتاق	۶۲/۵	۹۳/۶۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۱	(۴۳)
Heterogeneous Fenton	Reactive Red198	۲	Fe_3O_4-BC_2	۲۴۴۹/۶	۳۱۶۶۷۰	۱۵	دمای اتاق	۱۰۰	۹۵/۴۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۰۲	(۴۳)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red X-3B	۷	Ce-Fe/Cu@γ-Al_2O_3 microspheres	۱۷۵۰	۱۰۰۰۰	۲/۵	۷۵	–	۹۹/۹۴	–	–	(۴۴)
Fenton-like	Reactive Red X–3B	۲/۵	N-EMR	۴۰	۱۳/۶۱	۲	۴۵	۱۰۰	۹۹/۰۰	۱/۲۴	۳/۶۴	(۴۵)
Fenton-like	reactive red X-3B	۳/۵	α-FeOOH@CBC	۱۰۰۰	۳۳۳	۹۰	–	۱۰۰۰	۹۹/۹۰	۰/۰۱۱	۰/۰۳۳	(۴۶)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red X-3B	۷	copper@carbonized cotton nanoparticles (CCCNs)	۲۶۰۰	۱۶۰۰۰۰	۳	۶۵	۱۰۰۰۰	۱۰۰	۱/۲۸۲	۰/۰۲۱	(۴۷)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red X–3B	۳	Iron-carbon composite	۱۵۰۰۰	۲۲۱۰/۹۱	۳۰	دمای اتاق	۸۰۰	۸۵/۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	(۴۸)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red X–3B	۳	Sponge iron	۱۵۰۰۰	۲۲۱۰/۹۱	۳۰	دمای اتاق	۸۰۰	۸۵/۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	(۴۸)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red X–3B	۳	Chalcopyrite	۱۵۰۰۰	۲۲۱۰/۹۱	۲۴۰	دمای اتاق	۸۰۰	۸۰/۱۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۲	(۴۸)
Heterogeneous Fenton-like	Reactive Red X–3B	۳	pyrite	۱۵۰۰۰	۲۲۱۰/۹۱	۲۴۰	دمای اتاق	۸۰۰	۸۰/۱۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۲	(۴۸)

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

جدول ۱. شرایط عملیاتی بهینه در مطالعات کاربرد فرایندهای فنتون و شبه فنتون برای حذف رنگ‌های قرمز راکتیو (ادامه)

فرایند	نوع رنگ	pH	نوع کاتالیست	غلظت کاتالیست (میلی‌گرم بر لیتر)	غلظت H_2O_2 (میلی‌گرم بر لیتر)	زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتی‌گراد)	غلظت رنگ (میلی‌گرم بر لیتر)	راندمان (درصد)	شاخص M	شاخص N	منبع
Fenton-like	Reactive Red X-3B	۷	Fe-Cu@c-Al_2O_3 microspheres-modified c-Al_2O_3	۲۲۰۰	۱۰۵۰۰	۳/۵	۷۰	۲۰۰	۹۹/۹٤	۰/۰۲٦	۰/۰۰۵	(٤۹)
Fenton-Like	Reactive red X-3B	۷	CuO@γ-Al_2O_3	۲۵۰۰	۱۰۵۰۰	۳/۵	۷۰	۲۰۰	۹٤/٦۹	۰/۰۲۲	۰/۰۰۵	(۵۰)
Fenton	Reactive Red 6B	۳/۸۵	Fe^{2+}	۱/۹٦	۸۵	–	۳۵	۲۹/۳٤	۱۰۰	–	–	(۵۱)
Fenton-like	Reactive Red 6B	٤	Fe^{3+}	۲۷/۹۲	۳٤۰	٦/٦٦	۱۵	۲۹/۳٤	۹۰/۰۰	۰/۱٤۲۵	۰/۰۱۲	(۵۲)
Fenton	Reactive Red 6B	۳/۱۵	Fe^{2+}	۱/۹۵	۱۷۰/۱	۱٦/۷	۱۵	۲۹/۳٤	۹۸/۰۰	۰/۸۸۵	۰/۰۱۰	(۵۳)
Fenton	Reactive Red 239	۳	Fe^{2+}	۲/۵	۱۲/۵	۳۰	–	۱۰۰	۹٤/۱۰	۱/۲۵۵	۰/۲۵۱	(۵٤)
Fenton	Reactive Red 239	۳	Fe^{2+}	٤/۱۹	۱۷۰	۱۰	–	۱۰۰	۱۰۰	۲/۳۸۷	۰/۰۵۹	(۵۵)
Fenton	Remazol Red RB	۳/۵	Fe^{2+}	۵۵	۳۰۰	–	۵۰	۱۰۰	۹۹/۰۰	–	–	(۵٦)
Fenton/catalytic wet peroxidation	Reactive Red 3	۳	Fe-RH-MCM-41	۱۰۰۰	۱٦٤٤/۷۵	–	۵۰	۵۰	۹۷/۰۰	–	–	(۵۷)
Fenton-like	Reactive Red 180	٤	hydrochar bio-based catalyst	۱۰۰	٤/۹۹	٦۰	۲۵	۱۰۰	۷۲/۲۰	۰/۰۰۱	۰/۲٤۱	(۵۸)
Fenton	Reactive Red 180	۲/۵	FeO-NPs	۲۵۰	۷/۵	٦۰	۲۵	۱۰۰	۹۸/۰۰	۰/۰۰۷	۰/۲۱۸	(۱۵)
Fenton	Reactive Red 180	۲	Fe(II)-loaded leonardite	۷۵۰	۱٦/٦۵	٦۰	دمای اتاق	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۰	(۵۹)
Fenton	Reactive Red 24	۳	iron slag(IS)	۱۵۰۰	۱۰۰	۵	۲۵±۲	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۱۳	۰/۲۰۰	(٦۰)
Fenton	Reactive Red 235	۳	Fe^{2+}	۵/۵۸٤۵	۳٤	۷۵	۲۵	۵۰۰	۱۰۰	۱/۱۹٤	۰/۱۹٦	(٦۱)
Fenton	Reactive Red B-2BF	٤	Fe^{2+}	۵/۰۳	۳۲/٦٤	۵	۲۵	۱٦	۹۳/٤۷	۰/۵۹۵	۰/۰۹۲	(٦۲)
Fenton	Reactive Red 45	۳	Fe^{2+}	۷۵	٤۰۰	۳۰	۵۰	۲۰۰	۹۹/۹۰	۰/۰۸۸	۰/۰۱۷	(۱٦)
Fenton-like	Reactive Red 45	۳	Fe^{3+}	۷۵	۵۰۰	۳۰	۵۰	۲۰۰	۹۹/۰۰	۰/۰۸۸	۰/۰۱۳	(۱٦)
Fenton	Reactive Red 45	–	Fe^{2+}	۲۷/۹۳	۸۵	٦۰	–	۲۰	۷۰/۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	(٦۳)
heterogeneous Fenton	Reactive Red B-2BF	۳	Coal gangue	۷۰۰	۳٤۰/۱٤	٦۰	۲۱	۲۵۰	> ۹۰/۵۷	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱	(٦٤)
Fenton	Reactive Red dyestuff	۳	Fe^{2+}	٦۱/٤	۷٤۸	۲۰	۲۰ ± ۲	۱۰۰	۹۷/۰۰	۰/۰۷۹	۰/۰۰۷	(٦۵)
heterogeneous Fenton-like	Reactive Brillant Red	۳	MIP	۵۰۰۰	٦۸/۰۲	۱۲۰	دمای اتاق	۵۰	۹۲/٤۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰٦	(٦٦)
*Fenton	Reactive Red 293	۳	Fe^{2+}	۸۹/۷	۳٤/۸۵	۱۲۰	دمای اتاق	۲۳	۷۳/۲۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰٤	(٦۷)

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

جدول ۱. شرایط عملیاتی بهینه در مطالعات کاربرد فرایندهای فنتون و شبه فنتون برای حذف رنگ‌های قرمز راکتیو (ادامه)

فرایند	نوع رنگ	pH	نوع کاتالیست	غلظت کاتالیست (میلی‌گرم بر لیتر)	غلظت H_2O_2 (میلی‌گرم بر لیتر)	زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتی‌گراد)	غلظت رنگ (میلی‌گرم بر لیتر)	راندمان (درصد)	شاخص M	شاخص N	منبع
Fenton-like	Reactive Red 243	٤	cu^{2+}	٨٠٠	٣٣٣٠	٦٠	دمای اتاق	٥٠٠	٨٦/٤٠	٠/٠٠٩	٠/٠٠٢	(٦٨)
Fenton	Red MX-5B	٢/٥–٣	Fe^{2+}	١	٢٠٠	٤٨٠	–	٦١/٥٣	٩٩/٨٠	٠/١٢٨	٠/٠٠٠٦	(٦٩)
Fenton-like	Red MX-5B	٢/٥–٣	Fe^{3+}	١	٢٠٠	٤٨٠	–	٦١/٥٣	٩٩/٥٠	٠/١٢٨	٠/٠٠٠٦	(٦٩)
Heterogeneous Fenton	Reactive Red 19	٣	$GOFe_3O_4/Cu$	٣٤٠	٥٧٦٠	٩	دمای اتاق	٢٢	٨٠/٠٠	٠/٠٠٦	٠/٠٠٠٣	(٤٢)
Fenton	Red dye Reactive	٦	a hybrid material (chitosan/Fe^0/Fe_2O_3)	١٠٠٠	٣٣٣٠	١٨٠	٢٥	٢٥	٩٠/٠٠	٠/٠٠٠١	٠/٠٠٠٠٤	(٧٠)
Heterogeneous Fenton-like	Remazol Red RR	٧/٢	Fe^{3+}	١٠٠٠	٦٨٠٢/٨	١٤٤٠	٢٤	٤٠	٩٦/٥٧	٠/٠٠٠٣	٠/٠٠٠٠٠٤	(٧١)

MIP: Magnetite iron coated pumice
*Real wastewater

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

اثر نوع و غلظت کاتالیست: نوع و غلظت کاتالیست از عوامل تعیین‌کننده کارایی فرایندهای فنتون و شبه فنتون است. در فرایند فنتون کلاسیک، از یون Fe^{2+} به عنوان کاتالیست متداول استفاده می‌شود (۲۱)؛ در حالی که در فرایندهای شبه فنتون، طیف وسیعی از کاتالیست‌ها شامل Fe^{3+} در مطالعات Wu و همکاران (۲۵، ۲۱)، نانوذرات در تحقیق Hassan و همکاران (۲۸)، کمپلکس‌های فلزی در پژوهش Cui و همکاران (۳۸) یا استفاده از مواد طبیعی مانند Pyrite cinder (PC) در مطالعه Kerkez و همکاران (۳۰) استفاده شده است. این تنوع به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا باتوجه به شرایط خاص، کاتالیست مناسب را انتخاب کنند. کاتالیزور متغیر مهمی است که بر کارایی تمام فرایندهای فنتون تأثیر می‌گذارد. غلظت کاتالیست رابطه مستقیمی با کارایی حذف رنگ دارد. افزایش غلظت کاتالیست، منجر به افزایش مکان‌های فعال برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و در نتیجه، بهبود راندمان تخریب آلاینده می‌گردد (۷۴). همچنین، قدرت اکسیدکنندگی H_2O_2 برای از بین بردن رنگ‌ها در فاضلاب رنگرزی واقعی در غیاب یون‌های آهن کافی نیست (۷۵). به نظر می‌رسد که در غلظت بالای کاتالیزور، به دلیل وجود یون‌های آهن بیشتر در محیط، H_2O_2 بیشتری به رادیکال هیدروکسیل کاتالیز می‌شود و راندمان حذف افزایش می‌یابد (۴۲). دوز واکنش‌پذیر فنتون در فرایند اکسیداسیون فنتون و شبه فنتون نقش بسیار مهمی در تجزیه مواد آلی و تعیین هزینه کل فرایند ایفا می‌کند. به طور کلی، با افزایش دوز Fe^{2+} و Fe^{3+}، سرعت تخریب مواد آلی افزایش می‌یابد. با این وجود، افزایش بی‌رویه غلظت کاتالیست می‌تواند اثرات معکوس به دنبال داشته باشد. در غلظت‌های بسیار بالای یون‌های آهن، واکنش رقابتی مطابق رابطه ۸، موجب مصرف H_2O_2 و کاهش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود (۱۶).

$$Fe^{2+} + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O \qquad \text{رابطه ۸}$$

بنابراین، غلظت Fe^{2+} باید به درستی کنترل شود تا رنگ‌زدایی مطلوب در طول دوره واکنش حاصل شود (۷۶)، اما برای تخریب رنگ در غلظت‌های پایین‌تر کاتالیزور، زمان بیشتری لازم است (۷۷). در اغلب مطالعات بررسی شده، غلظت کاتالیست در فرایند فنتون و شبه فنتون از ۱ تا ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده است. در مطالعه Wu و همکاران از غلظت ۲/۷۹ میلی‌گرم بر لیتر Fe^{2+} استفاده شده است (۲۱). همچنین، در فرایند شبه فنتون، غلظت کاتالیست از ۱ میلی‌گرم در لیتر در تحقیق Hsueh و همکاران (۶۹) تا ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در پژوهش Liu و همکاران (۴۸) گزارش گردید. این تفاوت به طور عمده به نوع کاتالیست و مکانیسم واکنش بستگی دارد. شاخص M که در رابطه ۴ ارایه شد، معادل نسبت غلظت رنگ حذف شده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به غلظت کاتالیست مصرفی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر تقسیم بر زمان واکنش است؛ به این معنی که هرچه مقدار عددی این شاخص برای فرایند فنتون بیشتر باشد، میزان رنگ بیشتری در مدت زمان کمتر حذف خواهد شد. در همین حال، مصرف کاتالیست نیز کمتر بوده و فرایند و شرایط بهینه برای حذف رنگ قرمز راکتیو عملکرد بهتری داشته است. بر اساس داده‌های جدول ۱، بیشترین مقدار شاخص M برابر با ۲/۳۸۷ است و مربوط به سیستمی با غلظت کاتالیست ۴/۱۹ میلی‌گرم بر لیتر در زمان ۱۰ دقیقه می‌باشد که منجر به راندمان حذف ۱۰۰ درصدی برای رنگ Reactive Red 239 شده است. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب بهینه نوع و غلظت کاتالیست، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به کارایی مطلوب در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو دارد.

اثر H_2O_2: H_2O_2 به عنوان منبع اصلی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی فرایند فنتون ایفا می‌کند (۱۶). با این وجود، این ماده یکی از عوامل اصلی هزینه‌بر در فرایند مذکور محسوب می‌شود که لزوم بهینه‌سازی غلظت مصرفی آن را ضروری می‌سازد (۵۹). به طور کلی، راندمان حذف رنگ با افزایش غلظت H_2O_2 تا رسیدن به مقدار بهینه، بهبود می‌یابد؛ چرا که در این شرایط، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل افزایش می‌یابد و رنگ‌زدایی تقریباً کاملی حاصل می‌گردد (۷۸).

اغلب رابطه مستقیمی بین غلظت H_2O_2 و بازده تجزیه رنگ وجود دارد، اما افزایش بیش از حد آن ممکن است منجر به کاهش تجزیه رنگ شود؛ چرا که تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در فرایند فنتون نیز به طور مستقیم با مقدار H_2O_2 مرتبط است و هرچه مقدار H_2O_2 بیشتر باشد، رادیکال‌های هیدروکسیل آزاد بیشتری تولید می‌شود، اما باید توجه داشت که استفاده از مقادیر زیاد H_2O_2 محدودیتی برای تولید رادیکال ایجاد می‌کند. در این حالت، گروه‌های هیدروکسیل شکل مولکولی خود را تغییر می‌دهند و اثربخشی آن‌ها کاهش می‌یابد (۷۹). هنگام تصمیم‌گیری در مورد دوز H_2O_2 مصرفی در پژوهش‌ها باید احتیاط زیادی کرد. بخش استفاده نشده H_2O_2 ممکن است باعث افزایش COD در فرایندهای فنتون شود و بنابراین، در غلظت بیش از حد، H_2O_2 توصیه نمی‌شود (۱۶). غلظت H_2O_2 در فرایند فنتون اغلب بین ۶۰۰۰-۷/۵ میلی‌گرم در لیتر متغیر است؛ هر چند غلظت‌های بالایی تا حدود ۳۱۶۶۷۰ میلی‌گرم در لیتر هم در مطالعه Kenda و همکاران گزارش شده است (۴۳). این در حالی است که مقدار مصرف H_2O_2 بر اساس نتایج ارایه شده در جدول ۱، در تحقیق Eskikaya و همکاران، ۴/۹۹ میلی‌گرم در لیتر در فرایند شبه فنتون به عنوان کمترین (۵۸) و در مقابل، مقدار ۱۶۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در پژوهش Zhu و همکاران بیشترین مقدار است (۴۷). بنابراین، انتخاب غلظت بهینه میلی‌گرم در لیتر برای دستیابی به راندمان بالا و کاهش هزینه‌ها ضروری است. همان‌گونه که در رابطه ۵ مشاهده گردید، شاخص N نشان دهنده نسبت غلظت رنگ حذف شده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به غلظت H_2O_2 مصرفی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر تقسیم بر زمان واکنش است. به عبارت دیگر، هرچه مقدار عددی این شاخص برای فرایند فنتون بیشتر باشد، میزان رنگ بیشتری در مدت زمان کمتری حذف شده و همچنین، مصرف H_2O_2 نیز کمتر بوده است. بر اساس داده‌های جدول ۱، بیشترین مقدار شاخص N برابر با ۳/۶۴ است که در نتیجه غلظت بهینه H_2O_2 معادل این مقدار، ۱۳/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر در زمان بهینه ۲ دقیقه و غلظت بهینه رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است که منجر به راندمان حذف ۹۹ درصدی برای رنگ Reactive Red X-3B شده است که مقدار قابل توجهی می‌باشد (۴۵). این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب غلظت بهینه H_2O_2 نه تنها از نظر فنی، بلکه از جنبه اقتصادی نیز حایز اهمیت فراوانی است.

اثر دما: دمای واکنش از جمله متغیرهای مهم و مؤثر در تخریب رنگ‌ها توسط فرایندهای فنتون و شبه فنتون به شمار می‌رود. به طورکلی، دماهای بسیار پایین و بسیار بالا می‌توانند تأثیر منفی بر راندمان فرایند داشته باشند (۸۰). دما می‌تواند بر واکنش‌های بین H_2O_2، یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} تأثیر بگذارد. یکی از دلایل افزایش راندمان حذف با افزایش دما، افزایش نرخ واکنش در فرایندهای فنتون و شبه فنتون و در نتیجه، تشکیل مقدار بیشتری از

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

رادیکال‌های هیدروکسیل است (۱۶). همچنین، افزایش ثابت سرعت واکنش به افزایش نرخ برخورد بین مولکول‌های رنگ و رادیکال‌های هیدروکسیل نسبت داده می‌شود (۸۱). در همین راستا، افزایش تخریب رنگ‌ها با افزایش دما را می‌توان ناشی از افزایش سرعت تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل دانست (۷۳). از سوی دیگر، کاهش راندمان حذف رنگ در دماهای بالاتر (به عنوان مثال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) می‌تواند به دلایل متعددی از جمله تخریب H_2O_2 در دماهای بالا، تبخیر این ماده و کاهش غلظت مؤثر آن برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل باشد (۸۲، ۱۶). علاوه بر این، بی‌ثباتی لخته‌های تشکیل شده در دماهای بالا می‌تواند منجر به افزایش غلظت یون‌های آهن آزاد شده و در نتیجه، مصرف رادیکال‌های هیدروکسیل در طول واکنش‌های فنتون گردد (۸۳).

بر اساس نتایج حاصل از جستجوهای انجام شده و داده‌های مندرج در جدول ۱، بیشتر مطالعات مربوط به فرایند فنتون در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) یا نزدیک به این دما انجام شده‌اند که از جمله می‌توان به تحقیق Wu و همکاران (۲۱) اشاره نمود. با این وجود، برخی از فرایندهای شبه فنتون مانند پژوهش Zhu و همکاران، در دمای بالا (۷۵ درجه سانتی‌گراد) به اجرا درآمده‌اند تا راندمان حذف بهبود یابد (۴۴). اگرچه دمای بالا می‌تواند سرعت واکنش را افزایش دهد، اما این امر ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی نیز گردد.

اثر غلظت اولیه رنگ: غلظت اولیه رنگ به عنوان یک متغیر کلیدی در کاربردهای عملی فرایندهای فنتون مورد توجه است (۸۱). محدوده غلظت رنگ‌هایی که اغلب در فاضلاب‌های صنعت نساجی یافت می‌شوند، در محدوده ۲۵۰–۵۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد (۷۳). نتایج مطالعه علی‌بیگی و همکاران نشان داد که غلظت اولیه رنگ راکتیو قرمز ۱۹۵ تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف آن توسط فرایند شبه فنتون دارد؛ به طوری که در کمترین غلظت، راندمان حذف به ۱۰۰ درصد رسیده و با افزایش غلظت رنگ به ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر، این راندمان به ۸۸ درصد کاهش یافته است (۴۲). همچنین، تحقیق Bayar و همکاران بر روی حذف رنگ قرمز ۴۵ با استفاده از فرایندهای فنتون و شبه فنتون تأیید کرد که با افزایش غلظت رنگ، راندمان حذف کاهش می‌یابد (۱۶).

به طور کلی، با افزایش غلظت اولیه رنگ، کارایی تخریب رنگ‌ها کاهش می‌یابد؛ چرا که در غلظت‌های بالاتر رنگ، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل روی سطح کاتالیزور کاهش می‌یابد و مکان‌های فعال ممکن است توسط یون‌های رنگ اشغال شود (۷۳). علاوه بر این، محصولات واسطه‌ای که در طول اکسیداسیون رنگ تشکیل می‌شوند، احتمالاً با مولکول‌های رنگ برای مکان‌های فعال Fe^{2+} موجود رقابت می‌کنند (۷۹). بنابراین، واکنش بین کاتالیزور و H_2O_2 مهار می‌گردد و در نتیجه، راندمان تجزیه کاهش می‌یابد (۷۴). همان‌گونه که علی‌بیگی و همکاران نیز اشاره کرده‌اند، در فرایند فنتون ناهمگن، افزایش غلظت اولیه رنگ و جذب آن روی سطح کاتالیست مغناطیسی می‌تواند موجب مهار واکنش بین کاتالیست و H_2O_2 و کاهش راندمان حذف رنگ گردد (۴۲).

بر اساس یافته‌های این مرور نظام‌مند، غلظت رنگ در پژوهش‌های مورد بررسی از ۵ تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده است. برای مثال، مطالعه Islam و همکاران با غلظت ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام گرفت (۳۱). این در حالی است که در تحقیق Zhu و همکاران، غلظت بالای ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز مورد بررسی قرار گرفت (۴۷) که به نظر می‌رسد چنین غلظت بالایی در نمونه‌های محیطی واقعی غیر قابل تشخیص باشد و از این‌رو، این مقدار در دامنه قابل قبول پژوهش حاضر قرار نمی‌گیرد. در مقابل، مطالعه احمدی و همکاران با غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر به عنوان کمترین غلظت مورد بررسی،گزارش شده است (۴۱). این تفاوت قابل توجه در غلظت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که غلظت رنگ تأثیر مستقیمی بر راندمان فرایند دارد.

اثر زمان واکنش: بر اساس نتایج به دست‌آمده از مرور مطالعات، مدت زمان واکنش در فرایند فنتون کلاسیک عموماً در بازه کوتاه‌تری (۱۸۰–۵ دقیقه) قرار دارد. به عنوان مثال، در تحقیق Wu و همکاران، زمان واکنش ۵ دقیقه گزارش گردید (۲۱). با این حال، مواردی همچون پژوهش Hsueh و همکاران با زمان واکنش ۴۸۰ دقیقه نیز مشاهده شده است (۶۹). در مقایسه، فرایندهای شبه فنتون در بیشتر موارد به دوره‌های زمانی طولانی‌تری نیاز دارند که در مطالعه Cechinel و همکاران به ۱۴۴۰ دقیقه رسیده است (۷۱). این اختلاف در بازه‌های زمانی مورد نیاز را می‌توان به عواملی همچون تفاوت در سینتیک واکنش، ماهیت کاتالیست مورد استفاده و مکانیسم‌های اکسیداسیون در هر یک از فرایندها نسبت داد.

نوع رنگ: تحقیقات متعددی به بررسی حذف انواع مختلفی از رنگ‌های قرمز راکتیو از جمله قرمز راکتیو ۲، ۱۲۰، ۱۴۱، ۱۹۵، ۱۹۸، ۴۵، ۱۸۰، ۳، ۲۴۳، ۲۳۹، ۱۹، X-3B، 6B، MX-5B و B-2BF پرداخته‌اند. لازم به ذکر است که بر اساس داده‌های جدول ۱، رنگ‌های راکتیو دیگری نیز در برخی پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به منظور پرهیز از طولانی شدن متن، از ذکر مجدد نام آن‌ها خودداری شده است. هر یک از این رنگ‌ها دارای ساختار شیمیایی منحصر به فردی هستند که تأثیر مستقیمی بر راندمان حذف آن‌ها دارد. به عنوان مثال، در پژوهش موسوی و نظری، راندمان حذف رنگ Reactive Red 2 به ۷۰ درصد رسید (۲۲)؛ در حالی که در مطالعه Feuzer-Matos و همکاران، رنگ Reactive Red 195 با راندمان ۹۵ درصد حذف گردید (۳۵). این اختلاف در کارایی را می‌توان به عواملی همچون پیچیدگی ساختار مولکولی، پایداری شیمیایی و میزان تمایل به تجزیه‌پذیری در هر یک از رنگ‌ها نسبت داد.

راندمان حذف رنگ: بر اساس داده‌های جدول ۱، بیشترین مقدار شاخص M برابر با ۲/۳۸۷ به دست آمد که بیان‌کننده کارایی بالای سیستم در حذف رنگ با مصرف بهینه کاتالیست و زمان واکنش است. بر این اساس، مؤثرترین فرایند فنتون از نظر بازدهی برای حذف رنگ قرمز راکتیو ۲۳۹ در شرایط بهینه شامل غلظت کاتالیست ۴/۱۹ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت H_2O_2 برابر ۱۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت اولیه رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و زمان واکنش ۱۰ دقیقه گزارش شد که منجر به حذف کامل رنگ گردیده است (۵۵).

بر پایه یافته‌های این مرور نظام‌مند، راندمان حذف در فرایند فنتون کلاسیک عموماً در محدوده ۶۵ تا ۱۰۰ درصد قرار دارد. به عنوان مثال، در تحقیق موسوی و همکاران، راندمان حذف ۹۸ درصد ثبت گردید (۲۳). در مقابل، فرایندهای شبه فنتون دامنه وسیع‌تری از راندمان (۱۰ تا ۹۷ درصد) را نشان می‌دهند که از جمله می‌توان به پژوهش Liu و همکاران با راندمان ۴۱/۸۵ درصد اشاره نمود (۴۸).

در عمل، عوامل متعددی همچون نوع کاتالیست، pH و غلظت مواد شیمیایی بر راندمان حذف رنگ تأثیر می‌گذارند. تحلیل شاخص‌های M و N در جدول ۱ نشان می‌دهد که این شاخص‌ها ارتباط مستقیمی با مصرف مواد

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

شیمیایی و هزینه‌های عملیاتی دارند. به طور مشخص، مقادیر بالاتر این شاخص‌ها نشانگر کارایی بهتر فرایند از جنبه اقتصادی و عملیاتی می‌باشد. برای مثال، مقدار شاخص M در مطالعه Khrueakham و همکاران، ۲/۳۸۷ (۵۵) و شاخص N در تحقیق Lan و همکاران، ۳/۶۴ (۴۵) گزارش شد که بیانگر بهینه بودن این سیستم‌ها از نظر مصرف مواد شیمیایی است.

اگرچه این مرور نظام‌مند با بررسی ۸۳ مقاله معتبر به تحلیل جامعی از کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ‌های قرمز راکتیو دست یافت، اما با محدودیت‌هایی همراه بود که لازم به ذکر است. از جمله این که ناهمگونی روش‌شناختی قابل توجهی در طرح‌های آزمایشی مطالعات از لحاظ نوع راکتور، روش افزودن معرف‌ها و شرایط عملیاتی وجود داشت که انجام متاآنالیز کمی را با چالش مواجه ساخت. همچنین، تمرکز بیشتر تحقیقات بر شاخص‌های عملیاتی پایه و عدم بررسی محصولات تجزیه سمی و مسیرهای مکانیسمی، ارزیابی کامل جنبه‌های زیست محیطی فرایند را محدود نمود. بیشتر پژوهش‌ها تأثیر ماتریکس پیچیده پساب واقعی را نادیده گرفته و در محیط‌های مصنوعی و ساده شده متمرکز شده‌اند و در نهایت، عدم گزارش یکپارچه هزینه‌های عملیاتی و ارزیابی اقتصادی در بیشتر مطالعات، مقایسه سیستم‌های مختلف از جنبه کاربردی را دشوار می‌سازد.

نتیجه‌گیری

فرایند فنتون کلاسیک به دلیل سادگی و راندمان بالا در pH اسیدی، گزینه مناسبی برای حذف رنگ‌های قرمز راکتیو است. با این حال، فرایندهای شبه فنتون با انعطاف‌پذیری بیشتر در pH و امکان استفاده از کاتالیست‌های متنوع، برای کاربردهای صنعتی جذاب‌تر هستند. انتخاب فرایند مناسب به شرایط عملیاتی، نوع آلاینده و اهداف اقتصادی بستگی دارد. برخی از مقالات مورد بررسی در مطالعه نظام‌مند حاضر نشان دادند که ترکیب فن‌آوری‌های مختلف می‌تواند به بهبود راندمان و کاهش هزینه‌ها کمک کند. در مجموع، فرایند فنتون می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر در حذف انواع مختلف رنگ‌های راکتیو قرمز در مقیاس آزمایشگاهی عمل کند که البته نیاز به بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر بر فرایند دارد. بر اساس نتایج تحقیقات بررسی شده و با توجه به شاخص M، بهترین نتایج در فرایند فنتون برای حذف رنگ Reactive Red 239 در pH = ۳ و غلظت کاتالیست ۴/۱۹ میلی‌گرم بر لیتر و زمان بهینه ۱۰ دقیقه و غلظت بهینه H_2O_2 برابر با ۱۷۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمده که راندمان حذف رنگ قرمز راکتیو ۱۰۰ درصد بوده است. همچنین، بر اساس شاخص N، بهترین غلظت H_2O_2 برابر ۱۳/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر در فرایند شبه فنتون برای حذف رنگ Reactive Red X–3B در زمان بهینه واکنش ۲ دقیقه است. نکته قابل توجه در تمامی این پژوهش‌ها، عدم توجه به بحث تنوع دبی فاضلاب‌های رنگی و امکان به کارگیری چنین روشی در مقیاس کامل است. به عبارت دیگر، اگرچه این نتایج گویای عملکرد بهینه این روش تصفیه در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد، اما نیاز به مطالعات مفصل‌تری به شکل مقیاس کامل و با توجه به حجم زیاد این‌گونه فاضلاب‌ها الزامی به نظر می‌رسد. برای تکمیل تحقیقات آینده، انجام مطالعات مرور نظام‌مند به منظور شناسایی محصولات واسطه‌ای تخریب رنگ‌ها، به کارگیری شاخص‌های M و N برای مقایسه کارایی فرایندها در حذف سایر آلاینده‌های آلی مقاوم، بررسی کارایی فرایندهای فنتون برای حذف سایر گروه‌های رنگ پرمصرف و ایجاد پایگاه داده‌های تخصصی و همچنین، توسعه شاخص‌های جدید برای مقایسه فنی و اقتصادی فرایندهای مختلف تصفیه پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد با شماره ۳۴۰۳۵۷۹ و کد اخلاق IR.MUI.DHMT.REC.1403.141، مصوب دانشگاه علوم پزشکی اصفهان می‌باشد. بدین وسیله از کلیه کسانی که در انجام این مطالعه همکاری نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. همچنین، از معاونت تحقیقات و فن‌آوری دانشگاه علوم پزشکی اصفهان به جهت حمایت مالی از این طرح سپاسگزاری می‌گردد.

References

1. Belessi V, Romanos G, Boukos N, Lambropoulou D, Trapalis C. Removal of Reactive Red 195 from aqueous solutions by adsorption on the surface of TiO2 nanoparticles. J Hazard Mater. 2009; 170(2-3): 836-44.
2. Pérez-Calderón J, Santos MV, Zaritzky N. Synthesis, characterization and application of cross-linked chitosan/oxalic acid hydrogels to improve azo dye (Reactive Red 195) adsorption. Reactive and Functional Polymers. 2020; 155: 104699.
3. Racyte J, Rimeika M. UV/H2O2 - Advanced oxidation processes possibilities for textile reactive dyes decolorization. 7th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2008-Conference Proceedings. 2008.
4. Yang J, Wu C, Fang H, Chen X, Lv J. Exploring the requirements of reactive dyes in eco-friendly dyeing process: The relationship between dye structure, dyeing properties, and eco-friendly dyeing techniques. Dyes and Pigments. 2024; 223: 111976.
5. Kunz A, Mansilla H, Durán N. A degradation and toxicity study of three textile reactive dyes by ozone. Environ Technol. 2002; 23(8): 911-8.
6. Kiani R, Mirzaei F, Ghanbari F, Feizi R, Mehdipour F. Real textile wastewater treatment by a sulfate radicals-Advanced Oxidation Process: Peroxydisulfate decomposition using copper oxide (CuO) supported onto activated carbon. Journal of Water Process Engineering. 2020; 38: 101623.
7. Kamati SN, Yan J, Fan J. A review on progresses in reactive dye-containing wastewater treatment. 2024; 19: 2712-33.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

8. Georgiou D, Melidis P, Aivasidis A, Gimouhopoulos K. Degradation of azo-reactive dyes by ultraviolet radiation in the presence of hydrogen peroxide. Dyes and Pigments. 2002; 52(2): 69-78.
9. Saien J, Fallah Vahed Bazkiaei M. Homogenous UV/periodate process in treatment of p-nitrophenol aqueous solutions under mild operating conditions. Environ Technol. 2018; 39(14): 1823-32.
10. Arslan-Alaton I, Balcioğlu I, Bahnemann D. Advanced Chemical Oxidation of Reactive Dyes in Simulated Dyehouse Effluents by Ferrioxalate-Fenton/UV-A and TiO2/UV-A Processes. Dyes and Pigments. 2000; 47: 207-18.
11. Hasan Du, Rahim Pouran S, Abdul Raman AA, Mizzouri N, Daud W, Shaaban M. Hybrid of Fenton and Sequencing batch reactor for petroleum refinery wastewater treatment. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014.
12. Xu L, Wang J. A heterogeneous Fenton-like system with nanoparticulate zero-valent iron for removal of 4-chloro-3-methyl phenol. J Hazard Mater. 2011; 186(1): 256-64.
13. Hasan Du, Abdul Raman AA, Wan D. Oxidative mineralisation of petroleum refinery effluent using Fenton-like process. Chemical Engineering Research and Design. 2012; 90: 298-307.
14. Kiril Mert B, Yonar T, Yalili Kiliç M, Kestioğlu K. Pre-treatment studies on olive oil mill effluent using physicochemical, Fenton and Fenton-like oxidations processes. J Hazard Mater. 2010; 174(1-3): 122-8.
15. Isik Z, Bouchareb R, Arslan H, Özdemir S, Gonca S, Dizge N, et al. Green synthesis of iron oxide nanoparticles derived from water and methanol extract of Centaurea solstitialis leaves and tested for antimicrobial activity and dye decolorization capability. Environ Res. 2023; 219: 115072.
16. Bayar S, Erdogan MJAE, Research E. Removal of COD and Color from Reactive Red 45 Azo Dye Wastewater Using Fenton and Fenton-Like Oxidation Processes: Kinetic Studies. 2019; 17: 1517-29.
17. Nidheesh PV, Gandhimathi R, Ramesh ST. Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: A review. Environ Sci Pollut Res Int. 2013; 20(4): 2099-132.
18. Xiao J, Guo S, Wang D, An Q. Fenton-Like Reaction: Recent Advances and New Trends. Chemistry – A European Journal. 2024; 30(24): e202304337.
19. Pimentel Prates M, de Oliveira Loures Marcionílio SM, Borges Machado K, Medeiros de Araújo D, Martínez-Huitle CA, Leão Arantes AL, et al. Fenton: A systematic review of its application in wastewater treatment. Processes. 2023; 11(8): 2466.
20. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Med. 2009;6(7):e1000097.
21. Wu CH, Andy Hong P, Jian MY. Decolorization of Reactive Red 2 in Fenton and Fenton-like systems: effects of ultrasound and ultraviolet irradiation. Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2012; 106(1): 11-24.
22. Mousavi SA, Nazari S. Applying Response Surface Methodology to Optimize the Fenton Oxidation Process in the Removal of Reactive Red 2. 2017; 26(2): 765-72.
23. Mousavi SA, Mokhtari M, Khashij M. Evaluating the Fenton Process Efficiency in Removal of Reactive Red 2 from Aqueous Solution %J Journal of Environmental Health and Sustainable Development. 2017; 2(2): 292-9.
24. Dutta K, Bhattacharjee S, Chaudhuri B, Mukhopadhyay S. Chemical oxidation of C. I. Reactive Red 2 using Fenton-like reactions. Journal of Environmental Monitoring. 2002; 4(5): 754-60.
25. Wu CH. Decolorization of C.I. Reactive Red 2 in O3, Fenton-like and O3/Fenton-like Hybrid Systems. Dyes and Pigments. 2008; 77: 24-30.
26. Neamtu M, Yediler A, Siminiceanu I, Kettrup A. Oxidation of commercial reactive azo dye aqueous solutions by the photo-Fenton and Fenton-like processes. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2003; 161(1): 87-93.
27. Costa TC, Soares PA, Campos CEM, Souza AAU, Đolić MB, Vilar VJP, et al. Industrial steel waste as an iron source to promote heterogeneous and homogeneous oxidation/reduction reactions. 2019; 211: 804-17.
28. Hassan MMA, Hassan SS, Hassan dAK. Comparative of Green-Synthesis of Bimetallic Nanoparticles Iron/Nickel (Fe/Ni) and Supported on Zeolite 5A: Heterogeneous Fenton-like For Dye Removal From Aqueous Solutions. 2022; 19(5).
29. Vergara J, Pérez-Orozco JP, Suarez-Parra R, Hernández I. Degradation of reactive red 120 azo dye in aqueous solutions using homogeneous/heterogeneous iron systems. Revista Mexicana de Ingeniera Qumica. 2012; 11: 121-31.
30. Kerkez D, Bečelić-Tomin M, Gvoić V, Mandić AK, Leovac Maćerak A, Tomašević Pilipović D, et al. Pyrite Cinder as an Effective Fenton-like Catalyst for the Degradation of Reactive Azo Dye: Effects of Process

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

Parameters and Complete Effluent Characterization. 2023; 13(2): 424.
31. Islam S, Shaikh IA, Firdous N, Ali A, Sadef Y. Performance Evaluation of Fenton Oxidation Treatment Method for the Reuse of Reactive Dyeing Effluent. J Chem Soc Pakistan. 2019; 41(6): 1138-44.
32. Yaman C, Gündüz G. A parametric study on the decolorization and mineralization of C.I. Reactive Red 141 in water by heterogeneous Fenton-like oxidation over FeZSM-5 zeolite. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2015; 13(1): 7.
33. Yaman Y, Gündüz G, Dükkancı M. Degradation of CI Reactive Red 141 by heterogeneous Fenton-like process over iron-containing ZSM-5 zeolites. Coloration Technology. 2013; 129.
34. Ali A. A new approach for the removal of unfixed dyes from reactive dyed cotton by Fenton oxidation. 2019.
35. Feuzer-Matos AJ, Testolin RC, Cotelle S, Sanches-Simões E, Pimentel-Almeida W, Niero G, et al. Degradation of recalcitrant textile azo-dyes by fenton-based process followed by biochar polishing. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 2021; 56(9): 1019-29.
36. Vu T, Le G, Vũ Thị H, Nguyen K, T. Trang Q, quang n, et al. Highly photocatalytic activity of novel Fe-MIL-88B/GO nanocomposite in the degradation of reactive dye from aqueous solution. Materials Research Express. 2017; 4.
37. Feuzer-Matos A, Testolin R, Pimentel-Almeida W, Silva R, Deomar-Simões M, Poyer-Radetski L, et al. Treatment of Wastewater Containing New and Non-biodegradable Textile Dyes: Efficacy of Combined Advanced Oxidation and Adsorption Processes. Water, Air, & Soil Pollution. 2022; 233.
38. Cui G, Dong Y, Li Y, Shen W, Chen Z. Novel heterogeneous photocatalysts prepared with waste wool and Fe3+ or Cu2+ ions for degradation of CI Reactive Red 195: a comparative study. 2017; 133(3): 200-8.
39. Huang F, Xu Y, Liao S, Yang D, Hsieh Y-L, Wei Q. Preparation of Amidoxime Polyacrylonitrile Chelating Nanofibers and Their Application for Adsorption of Metal Ions. Materials. 2013; 6: 969-80.
40. Santana R, Charamba L, Nascimento G, Oliveira J, Sales D, Duarte M, et al. Degradation of Textile Dyes Employing Advanced Oxidative Processes: Kinetic, Equilibrium Modeling, and Toxicity Study of Seeds and Bacteria. Water, Air, & Soil Pollution. 2019; 230: 136.
41. Ahmadi A, Barikbin B, Khodadadi M. Fenton-like catalytic oxidation of reactive red 195 by feni3/sio2@ h2o2: adsorption and degradation study. 2021.
42. Alibeigi A, Pormazar S, Salmani Nodoushan M, Dalvand A. Heterogeneous Fenton process using GO@Fe 3 O 4 /Cu catalyst for the degradation of reactive dyes from aqueous solutions: modeling and optimisation. International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2024: 1-18.
43. Kenda G, Paul Alain K, Donald Raoul T, Fotsop CG, Bopda A, Kuete I-H, et al. Green Synthesis of Magnetic Biochars derived from Biobased Orange Peel Materials as Sustainable Heterogeneous Catalytic Supports for the Fenton Process. Arabian Journal of Chemistry. 2023; 17: 105502.
44. Zhu G, Xiong S, Shi C, Jin Y, Ge M. Ceria-Promoted Heterogeneous Fenton-Like Oxidation of Polyvinyl Alcohol, Rhodamine-B and Reactive Red X-3b Over Fe/Cu@Γ-Al2o3 Microspheres Under Neutral Conditions. SSRN Electronic Journal. 2022.
45. Lan J, Sun Y, Huang P, Du Y, Zhan W, Zhang TC, et al. Using Electrolytic Manganese Residue to prepare novel nanocomposite catalysts for efficient degradation of Azo Dyes in Fenton-like processes. Chemosphere. 2020; 252: 126487.
46. Jin R, Deng C, Liu G, Zhai S, Qi D. Heterogeneous catalysis of FeOOH in-situ loaded biochar for reactive red X-3B: Catalytic mechanism based on Fenton-like system. Journal of environmental chemical engineering. 2024; 12(1): 111702.
47. Zhu G, Jin Y, Ge M. Simple and green method for preparing copper nanoparticles supported on carbonized cotton as a heterogeneous Fenton-like catalyst. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022; 647: 128978.
48. Liu X, Yao Y, Lu J, Zhou J, Chen Q. Catalytic activity and mechanism of typical iron-based catalysts for Fenton-like oxidation. Chemosphere. 2023; 311: 136972.
49. Zhu G, Xiong S, Shi C, Jin Y, Ge M. Fe-Cu@γ-Al2O3 microspheres as a heterogeneous Fenton-like catalyst for degrading polyvinyl alcohol, Rhodamine-B, and Reactive Red X-3B. Journal of Molecular Liquids. 2022; 365: 120118.
50. Zhu G, Jin Y, Ge M. Efficiently Enhanced Fenton-Like Reaction via CuO@γ-Al2O3 Particles for the Catalytic Hydrogen Peroxide Degradation of Polyvinyl Alcohol, Rhodamine-B, and Reactive red X-3B over a Wide pH Range. Water, Air, & Soil Pollution. 2022; 233.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

51. Xu H, Yu T, Wang J, Li M, Liu Y. Online monitoring of Fenton-mediated reactive red 6B oxidation kinetics. 2015; 34(4): 1019-27.
52. Xu H, Yu T, Guo X, Wang J. Fe3+/H2O2 Fenton degradation of wastewater containing dye under UV irradiation. Desalination and Water Treatment. 2016; 57(38): 18028-37.
53. Xu H, Yu T, Wang J, Li M. Effect of H2O2/Fe2+ concentration ratios on fenton oxidation of reactive red 6B with on-line detective technology. Nature Environment and Pollution Technology. 2015; 14: 71-6.
54. Raksaman S, Kloysuwan C, Khrueakham A, Sairiam S. Effect of spunbond nonwoven microplastics on dye wastewater treatment via hydrogen peroxide–based catalyst–assisted advanced oxidation processes. Environmental Advances. 2024; 17: 100567.
55. Khrueakham A, Srithai P-u, Samree K, Painmanakul P, Sairiam S. Treatment of wastewater containing Reactive Red 239 using Fenton oxidation processes with photo-assisted regeneration of Fe2+ catalyst. Desalination And Water Treatment. 2020; 207: 437-45.
56. Meriç S, Kaptan D, Tünay O. Removal of color and COD from a mixture of four reactive azo dyes using fenton oxidation process. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 2003; 38(10): 2241-50.
57. Wantala K, Khamjumphol C, Thananukool N, Neramittagapong A. Degradation of Reactive Red 3 by heterogeneous Fenton-like process over iron-containing RH-MCM-41 assisted by UV irradiation. Desalination and Water Treatment. 2015; 54(3): 699-706.
58. Eskikaya O, Isik Z, Arslantas C, Yabalak E, Balakrishnan D, Dizge N, et al. Preparation of hydrochar bio-based catalyst for fenton process in dye-containing wastewater treatment. Environ Res. 2023; 216(Pt 1): 114357.
59. Arslan H, Bouchareb R, Arikan EB, Dizge N. Iron-loaded leonardite powder for Fenton oxidation of Reactive Red 180 dye removal. Environ Sci Pollut Res Int. 2022; 29(51): 77071-80.
60. Van HT, Lan Huong N, Hoang T, Tran T, Vo A, Pham TT, et al. Using FeO-constituted Iron Slag wastes as heterogeneous catalyst for Fenton and Ozonation processes to degrade Reactive Red 24 from aqueous solution. Separation and Purification Technology. 2019; 224.
61. Aplin R, Waite TD. Comparison of three advanced oxidation processes for degradation of textile dyes. Water Science and Technology. 2000; 42(5-6): 345-54.
62. Gao AF, Li AG, Gao ZJ, Peng ZX, Wang WP. Study of decolorization kinetics of reactive red B-2BF in Fenton oxidation process. 2019.
63. Koprivanac N, Kusić H, Vujević D, Peternel I, Locke BR. Influence of iron on degradation of organic dyes in corona. J Hazard Mater. 2005; 117(2-3): 113-9.
64. Jiwei Z, Jingjing X, Shuaixia L, Baoxiang G, Feng C, Qiming Z, et al. Heterogeneous Fenton Catalytic Removal of Organic Pollutant in Aqueous Solution by using Coal Gangue as a Catalyst. Recent Innovations in Chemical Engineering. 2019; 12(4): 312-25.
65. Lu J, Xu N, Chen J, Jiang W, Han P, Lu X. Study on Pretreatment of Saline Organic Wastewater by Ultrasound and Fenton Reagent. Asian Journal of Chemistry. 2011; 24(4): 1735-41.
66. Cifci DI, Meric S. Synthesis of magnetite iron pumice composite for heterogeneous Fenton-like oxidation of dyes. Advances in environmental research. 2020; 9(3): 161-73.
67. Slama NEH, Masmoudi G, Fizer M, Mariychuk R, Dhaouadi H. Comprehensive study of Fenton reaction efficiency on textile wastewater treatment from dye solution to real effluent with emphasis on Fukui function analysis. Journal of Molecular Liquids. 2024; 402: 124773.
68. Bertea A, Butnaru R, Berariu R. Reducing pollution in reactive cotton dyeing through wastewater recycling. Cellulose Chemistry and Technology. 2013; 47: 133-9.
69. Hsueh CL, Huang YH, Wang CC, Chen CY. Degradation of azo dyes using low iron concentration of Fenton and Fenton-like system. Chemosphere. 2005; 58(10): 1409-14.
70. Degradation of organic compounds in a fenton system based on chitosan/Fe0 /Fe2O3 composites: a theoretical and experimental study 2016.
71. Cechinel MAP, Nicolini JL, Tápia PM, Miranda EAC, Eller S, de Oliveira TF, et al. Cobalt Ferrite (CoFe2O4) Spinel as a New Efficient Magnetic Heterogeneous Fenton-like Catalyst for Wastewater Treatment. 2023; 15(20): 15183.
72. Hassan H, Hameed B. Decolorization of Acid Red 1 by heterogeneous Fenton-like reaction using Fe-ball clay catalyst. Int Conf Environ Sci Eng. 2011; 8.
73. Idel-aouad R, Valiente M, Yaacoubi A, Tanouti B, López-Mesas M. Rapid decolourization and mineralization of the azo dye C.I. Acid Red 14 by heterogeneous Fenton reaction. J Hazard Mater. 2011; 186(1): 745-50.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]

74. Ji F, Li C, Zhang J, Deng L. Efficient Decolorization of Dye Pollutants with LiFe(WO4)2 as a Reusable Heterogeneous Fenton-Like Catalyst. Desalination. 2011; 269: 284-90.
75. Wang CT, Chou WL, Chung MH, Kuo YM. COD Removal from Real Dyeing Wastewater by Electro-Fenton Technology Using an Activated Carbon Fiber Cathode. Desalination. 2010: 129-34.
76. Zheng H, Pan Y, Xiang X. Oxidation of acidic dye Eosin Y by the solar photo-Fenton processes. J Hazard Mater. 2007; 141(3): 457-64.
77. Muruganandham M, Swaminathan M. Decolourisation of Reactive Orange 4 by Fenton and photo-Fenton oxidation technology. Dyes and Pigments. 2004; 63(3): 315-21.
78. Panda N, Sahoo H, Mohapatra S. Decolourization of Methyl Orange using Fenton-like mesoporous Fe(2)O(3)-SiO(2) composite. J Hazard Mater. 2011; 185(1): 359-65.
79. 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.
80. Nidheesh PV, Gandhimathi R. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. Desalination. 2012; 299: 1-15.
81. Fu F, Wang Q, Tang B. Effective degradation of C.I. Acid Red 73 by advanced Fenton process. J Hazard Mater. 2010; 174(1-3): 17-22.
82. Dutta K, Mukhopadhyay S, Bhattacharjee S, Chaudhuri B. Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like reaction. J Hazard Mater. 2001; 84(1): 57-71.
83. Benitez FJ, Acero JL, Real FJ, Rubio FJ, Leal AI. The role of hydroxyl radicals for the decomposition of p-hydroxy phenylacetic acid in aqueous solutions. Water Res. 2001; 35(5): 1338-43.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v22i2.1664]