# Efficiency of Persulfate Activated by UV Irradiation in the Presence of Granular Activated Carbon for Removal of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution

**Abdolmotaleb Seidmohammadi[1], Hasan Zoolghadrnasab[2], Faezeh Nouri[3], Darya Yavari[3], Fatemeh Asadi[3]**

1. Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID ID: 0000-0001-8197-1324
2. M.S.C., Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID ID: 0000-0003-2955-7390
3. B.Sc., Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID ID: 0000-0003-2975-3324
4. Ph. D Student, Student Research Committee, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran., (Corresponding Author), Email: f_asadi56@yahoo.com, Tel: 0831-8281992, ORCID ID:0000-0002-8119-2555

## ABSTRACT

**Background and Aim:** Dyes are one of the most important pollutants in textile wastewater (TWW). Use of advanced oxidation processes (AOPs) as an efficient method can be useful for removal of these pollutants from the effluent of textile wastewater. In this study we evaluated the efficiency of the persulfate activation process, using ultraviolet (UV), in the presence of granular activated carbon (GAC) for removal of methylene blue dye (MBD). Also, we studied the effect of operating parameters on the dye removal.

**Materials and Methods:** This experimental study was performed in a pilot-scale batch photoreactor. The effect of operating parameters including solution pH (between 3 and 9), dosage of granular activated carbon (0.6-5 mg/L), persulfate concentration (0.2-2 mmol/L), initial concentration of methylene blue dye (50-400 mg/L), and contact time (2-30 minutes) were evaluated. The final concentration of methylene blue dye was measured by using DR-6000 device. Mineralization of the process, in optimal conditions, was determined by measuring COD and TOC.

**Results:** The highest efficiency of the process for removal of methylene blue dye (99% dye removal at an initial concentration of 50mg/L) was observed at pH = 3, granular activated carbon dose of 1 g/L, optimal persulfate concentration of 1 mmol/L, and after a 20-minute contact time. The removal rates of COD and TOC were 71% and 69.9%, respectively, and the decomposition rate of methylene blue dye was based on the first-order reaction ($R^2 = 0.99$).

**Conclusion:** Considering the results of this study, the combined process had a significant efficiency to remove methylene blue dye and can be used as an efficient method for removal of the dye from the effluent of textile wastewater.

**Keywords:** Methylene blue dye, Ultraviolet, Persulfate, Activated granular carbon

**Received:** Jan 7, 2020 **Accepted:** Oct 3, 2020

**How to cite the article:** Abdolmotaleb Seidmohammadi, Hasan Zoolghadrnasab, Faezeh Nouri, Darya Yavari, Fatemeh Asadi. Efficiency of persulfate activated by UV irradiation in the presence of granular activated carbon for removal of methylene blue dye from aqueous solution. SJKU. 2020;25(3):52-70.

Copyright © 2018 the Author (s). Published by Kurdistan University of Medical Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial License 4.0 (CCBYNC), where it is permissible to download, share, remix, transform, and buildup the work provided it is properly cited. The work cannot be used commercially without permission from the journal

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان / دوره بیست و شش / مرداد و شهریور ۱۴۰۰/۷۰-۵۲

# کارایی فرآیند پرسولفات فعال‌شده با امواج فرابنفش در حضور کربن فعال گرانوله در حذف رنگ متیلن‌بلو از محلول‌های آبی

**عبدالمطلب صیدمحمدی[۱]، حسن ذوالقدرنسب[۲]، فائزه نوری[۳]، دریا یاوری[۳]، فاطمه اسدی[۴]**

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۰۰۰۰-۰۰۰۱-۸۱۹۷-۱۳۲۴

۲. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۰۰۰۰-۰۰۰۳-۲۹۵۵-۷۳۹۰

۳. کارشناسی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۰۰۰۰-۰۰۰۳-۲۹۷۵-۳۳۲۴

۴. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. (نویسنده مسئول)، پست الکترونیک: F_asadi56@yahoo.com، تلفن: ۰۸۳۱-۸۲۸۱۹۹۲، کد ارکید: ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۸۱۱۹-۲۵۵۵

## چکیده

**زمینه و هدف:** رنگ‌ها از مهم‌ترین آلاینده‌های موجود در فاضلاب صنایع نساجی می‌باشند. استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌عنوان یک روش کارآمد می‌تواند در حذف این آلاینده‌ها از پساب فاضلاب صنایع نساجی مؤثر باشد. ازاین‌رو در این پژوهش عملکرد فرآیند فعال‌سازی پرسولفات با استفاده از امواج فرابنفش در حضور کربن فعال گرانوله جهت حذف رنگ متیلن-بلو و تأثیر پارامترهای بهره‌برداری موردبررسی قرارگرفته است.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه تجربی در یک راکتور نوری ناپیوسته در مقیاس پایلوت انجام شد. تأثیر پارامترهای بهره‌برداری ازجمله pH محلول در محدوده ۹-۳، دزاژ کربن فعال گرانوله ۵-۰/۶ mg/L، غلظت پرسولفات ۲-۰/۲ mmol/L و غلظت اولیه رنگ متیلن بلو در دامنه ۵۰-۴۰۰ mg/L در زمان تماس ۳۰-۲ دقیقه موردبررسی قرار گرفت. غلظت نهایی رنگ متیلن‌بلو با استفاده از دستگاه DR-6000 اندازه‌گیری شد. معدنی‌سازی فرآیند در شرایط بهینه با اندازه‌گیری COD، TOC تعیین شد.

**یافته‌ها:** بیشترین کارایی فرآیند در حذف رنگ متیلن‌بلو در pH= ۳، دوز کربن فعال گرانوله ۱ g/L، غلظت بهینه پرسولفات ۱ mmol/L و در زمان تماس ۲۰ دقیقه بود که در این حالت ۹۹ درصد رنگ در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر حذف شد. میزان حذف COD و TOC به ترتیب برابر با ۷۱٪ و ۶۹/۹٪ بود. سرعت تجزیه رنگ متیلن‌بلو مطابق با واکنش درجه اول بود ($R^2$ = ۰/۹۹).

**نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش فرآیند تلفیقی موردنظر کارایی قابل‌توجهی در حذف رنگ متیلن‌بلو داشته و می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد در حذف رنگ از پساب فاضلاب صنایع نساجی مورداستفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** رنگ متیلن بلو، امواج فرابنفش، پرسولفات، کربن فعال گرانوله

وصول مقاله:۹۸/۱۰/۱۷ اصلاحیه نهایی:۹۹/۳/۱۲ پذیرش:۹۹/۷/۱۲

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

**مقدمه**

امروزه با توسعه صنعت و پیشرفت تکنولوژی مبتنی بر دانش و تجربه و ابداع فرآورده‌های جدید مصرف رنگ‌های مختلف سنتتیک در صنایع متعددی نظیر تولید مواد آرایشی، چرم، کاغذ و صنایع نساجی افزایش‌یافته است. افزایش مصرف رنگ‌ها در فرآیندهای صنعتی منجر به تولید حجم قابل‌توجهی از پساب‌های رنگی حاوی مواد آلی و غیرآلی شده است که تصفیه مؤثر و کارآمد آن‌ها جزو الزامات زیست‌محیطی است(۱). حضور این ترکیبات در فاضلاب‌های صنعتی به دلیل سمیت زیاد بر روی موجودات آبزی، اختلال در کارایی سیستم‌های متداول تصفیه فاضلاب و زیباشناختی محیط موردتوجه جدی محققین قرارگرفته است(۱). ازنظر بهداشتی برخی از رنگ‌ها دارای خاصیت سرطان‌زایی و جهش‌زایی بوده و می‌توانند موجبات ایجاد آلرژی و افزایش مشکلات پوستی شوند(۲). رنگ‌ها و پیگمان‌های راکتیو که در صنایع نساجی به کار می‌روند به همراه پساب‌های حاوی سموم کشاورزی، بزرگ‌ترین گروه آلاینده‌های محیطی را تشکیل می‌دهند. آزاد شدن این مواد در طبیعت تهدید جدی برای اکوسیستم‌های آبی به شمار می‌آید. متیلن‌بلو با فرمول مولکولی $C_{16}H_{18}N_3SCl$، جرم مولی ۳۱۹/۸۵ g/mol و دمای ذوب ۱۰۰-۱۱۰ °C جزء ترکیبات آروماتیک هتروسیکلیک است که در برابر مواد شیمیایی، گرما، نور و حتی تجزیه بیولوژیکی مقاوم است، در دمای اتاق پودری به رنگ سبز تیره، بی‌بو و جامد است که زمانی که در آب حل می‌شود یک محلول آبی‌رنگ به دست می‌آید. شکل آب‌دار آن دارای ۳ مولکول آب به ازای هر واحد متیلن‌بلو است(۳). رنگ متیلن‌بلو یکی از رنگ‌های با مصرف زیاد در صنعت نساجی بوده و تماس بیش‌ازحد با این رنگ، موجب افزایش ضربان قلب، استفراغ، شوک، سیانوز، زردی، نکروز بافت در انسان می‌شود(۴). برای حذف رنگ‌ها روش‌های زیادی به‌کاررفته است که ازجمله می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اشاره نمود. به دلیل قابلیت تجزیه بیولوژیکی کم‌رنگ‌های مصنوعی، سیستم‌های متداول تصفیه بیولوژیک فاضلاب به دلیل نیاز به زمان طولانی دارای کارایی مناسبی جهت حذف رنگ نمی‌باشند(۵). از روش‌های متداول فیزیکی و شیمیایی حذف رنگ مانند انعقاد و لخته‌سازی، شناورسازی، فیلتراسیون غشایی، تجزیه الکتروشیمیایی، ازن‌زنی، امواج ماوراء صوت و جذب سطحی به‌صورت مجزا یا توأم با فرآیندهای بیولوژیکی فاضلاب استفاده می‌شود(۶)؛ که هرکدام دارای مزایا و معایبی هستند. یکی از فرآیندهای مؤثر در حذف ترکیبات و مواد آلی سمی و غیرقابل تجزیه بیولوژیکی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته ($AOP_S$) است که به دلیل سهولت کاربرد، اقتصادی بودن، کارایی بالا و عدم تولید مقادیر زیاد لجن به‌عنوان یک فناوری کارآمد در زمینه‌های مختلف علوم محیط‌زیست موردتوجه قرارگرفته است. حذف آلاینده‌ها در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته بر پایه تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل ( $^{\bullet}OH$ ) و سولفات ( $SO_4^{\bullet}$ ) باقدرت اکسیداسیون بالا بوده که بسیاری از ترکیبات شیمیایی آلی را به مواد معدنی تبدیل می‌کند(۷). این رادیکال‌های ناپایدار به‌شدت فعال بوده و از طریق واکنش‌های شیمیایی در محل تولید می‌شوند. رادیکال‌های آزاد اکسیدکننده قوی بوده و به‌سرعت به مولکول‌های مواد آلی حمله کرده و یک اتم هیدروژن از ساختار ماده آلی جدا می‌کنند(۸). در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته نوع و غلظت ماده اکسیدکننده یکی از فاکتورهای مؤثر در حذف ترکیبات آلی است. پرسولفات یکی از عوامل اکسیداسیون دو الکترونی است که در حضور فعال‌کننده‌ها به رادیکال سولفات با قدرت اکسیداسیون و احیای بالا در مقایسه با رادیکال هیدروکسیل تبدیل می‌شود. رادیکال پرسولفات تولیدشده یکی از تأثیرگذارترین عوامل اکسیدکننده است که توانایی تجزیه انواع رنگ را دارد. علاوه بر آن این رادیکال قادر است به‌صورت غیرمستقیم با آب و یون‌های هیدرکسیل وارد واکنش شده و رادیکال هیدروکسیل تولید



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

نماید که خود عامل مهم در تجزیه رنگ‌ها به شمار می‌رود(۸). رادیکال سولفات که از نمک‌های سدیم، آمونیوم و پتاسیم تشکیل تهیه می‌شوند(۸)

به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون پتانسیل اکسیداسیون بالا ($E^0$ = ۲/۰۱ V)، واکنش‌پذیری غیرانتخابی، پایداری در دمای اتاق، حلالیت بالا و ارزان بودن به‌عنوان یک اکسیدکننده قوی برای حذف آلاینده‌ها مطرح‌شده است(۹). ازآنجایی‌که واکنش‌های پرسولفات در دمای اتاق معمولاً به‌کندی انجام می‌شوند، لذا لازم است که فعال گردد(۹). پرسولفات به‌طور مؤثری به‌وسیله حرارت، نور UV، فلزات واسطه ($Me^{n+}$) و فلزات صفر ظرفیتی فعال می‌گردد. به‌محض فعال‌سازی پرسولفات، باندهای O-O در ساختار پرسولفات شکسته می‌شوند و رادیکال‌های سولفات ($SO^{\circ}_4$) با قدرت اکسیدکنندگی برابر با $E^0$ = ۲/۶۷ V تولید می‌شود(۱۰). در مطالعات متعددی از آنیون پرسولفات و رادیکال‌های آن برای حذف رنگ و ترکیبات رنگی استفاده‌شده است که نتایج آن‌ها نیز رضایت‌بخش بوده است(۱۱). اکسیداسیون کاتالیزور نوری تکنیک پیشرفته‌ای است که با استفاده از آن آلاینده‌های آلی به‌طور کامل تجزیه‌شده و ازبین می‌روند. در این روش از یک منبع نوری(معمولاً نور فرابنفش UV) استفاده می‌شود. از طرفی تنها تعدادی از مواد شیمیایی آلی می‌توانند در اثر جذب مستقیم پرتو UV تجزیه گردند درحالی‌که برخی از ترکیبات آلی خطرناک سخت تجزیه‌پذیر می‌باشند و در کاربرد تنها پرتوهای UV حذف کارآمدی ندارند. روش‌های ترکیبی پرتو UV با اکسیدکننده‌ها باعث افزایش سرعت و اثربخشی در تجزیه ترکیبات آلی می‌گردد(۱۱). کربن فعال به علت مساحت سطح ویژه بالا، ساختارهای کوچک و لایه‌بندی، انعطاف‌پذیری و خاصیت ارتجاعی بالا به‌عنوان کاتالیزور برای حذف انواع مختلف آلاینده‌ها و افزایش عملکرد فوتوکاتالیستی موردبررسی قرارگرفته است(۷). کربن فعال جاذب خوبی برای حذف آلاینده‌ها از آب و فاضلاب است؛ ولی نقش آن به‌عنوان کاتالیست به‌خوبی شناخته‌شده نیست، بر اساس برخی مطالعات، کربن فعال آلاینده‌ها را در سطح خود به دام انداخته و جذب فیزیکی می‌کند و به‌عنوان بستری برای جمع‌آوری آلاینده‌ها است، سپس توسط عامل اکسیدکننده، آلاینده‌های آب و فاضلاب به‌تدریج اکسید می‌شوند و کربن فعال دوباره احیاشده و وارد چرخه واکنش می‌گردد(۱۲). در فرآیندهای فتوکاتالیستی، ناهمگن مواد واکنش در یک فاز نمی‌باشند و به‌راحتی در محیط واکنش حل نمی‌شوند، برای جلوگیری از کاهش بازده کلی واکنش به‌دلیل کاهش سطح‌فعال از یک کاتالیست استفاده می‌شود. ترکیب پرسولفات با ظرفیت اکسیداسیون بالا با کربن فعال گرانوله با ظرفیت جذب بالا در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، اثر سینرژیستی است که نتیجه آن تولید یون‌های هیدروکسیل بیشتر و تجزیه و معدنی سازی بهتر مواد آلی و نیز کاهش مصرف پرسولفات است(۱۳). مکانیسم حذف رنگ بر اساس مطالعات در واکنش‌های فوتوکاتالیستی طی چند مرحله صورت می‌پذیرد(۱۳):

۱) جذب نور توسط کاتالیست طی رابطه ۱:

$$GAC + hv \rightarrow e_{CB}^{-} + h_{VB}^{+} \quad (۱$$

۲) سپس تولید رادیکال‌های سولفات تحت تأثیر عوامل فعال‌کننده مانند اشعه UV به‌صورت روابط ۲ و ۳ خواهد بود:

$$S_2O_8^{-2} + hv_{vb}^{+} \rightarrow 2SO_4^{\bullet} \quad (۲$$

$$S_2O_8^{-2} + catalyst^{+} \rightarrow SO_4^{\bullet} + catalyst^{(n+1)} + SO_4^{-2} \quad (۳$$

۳) اکسیداسیون ماده آلی توسط رادیکال پرسولفات طی روابط ۴، ۵ و ۶:

$$R + SO_4^{\bullet} \rightarrow R'^{\bullet} + SO_4^{-2} \quad (۴$$



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

$$R + h^{+} \rightarrow R^{+\circ} \rightarrow \text{degradation products} \quad (۵$$

$$RCOO^{-} + h^{+} \rightarrow R^{\bullet} + CO_2 \quad (۶$$

استفاده از فرآیند تلفیقی یکی به دلیل سادگی، افزایش کارایی حذف مواد آلی، عدم تولید مقادیر زیاد لجن و دیگری به دلیل کاهش هزینه‌های مرتبط بسیار مفید است(۱۳). لذا با توجه به موارد ذکرشده و در نظر گرفتن محدودیت‌های روش‌های حذف متداول رنگ و محاسن روش‌های اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از پرسولفات و اشعه UV، شامل کوتاه بودن زمان انجام واکنش و نیز عدم تولید محصولات نهایی خطرناک، هدف از انجام این تحقیق، تعیین میزان حذف رنگ متیلن بلو با استفاده از پرسولفات فعال‌شده با امواج فرابنفش در حضور کربن فعال گرانوله در محلول‌های آبی انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی:

این پژوهش یک مطالعه تجربی-کاربردی است که در مقیاس آزمایشگاهی در یک فتوراکتور با جریان منقطع در آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام شد. صورت پذیرفت. مواد مورداستفاده در این مطالعه شامل رنگ متیلن‌بلو تهیه‌شده از شرکت الوان ثابت واقع در استان همدان، پرسولفات، هیدروکسیدسدیم و اسیدسولفوریک یک نرمال از شرکت Merck خریداری شد. جدول ۱ و ۲ بیانگر مشخصات فیزیکی و شیمیایی رنگ متیلن‌بلو و کربن فعال گرانوله است. دستگاه اسپکتروفتومتر .HATCH Co مدل DR 6000، pH متر مورداستفاده مدل Orion A ۲۵۰ شرکت Hatch مورداستفاده قرار گرفت.

فوتو راکتور:

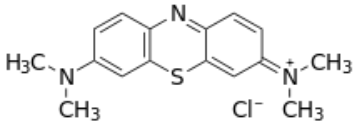
منبع تابش اشعه از یک لامپ جیوه‌ای کم‌فشار UVC با پوشش کوارتز با توان W ۵۵ و شدت $\mu W/cm^2$ ۱۵۶ در داخل یک محفظهٔ استیلی و حجم ۲ لیتر بود. محل انجام واکنش بر روی نمونه‌های آب، فضای بین لامپ UVC و پوشش استیلی بود (شکل۱).



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

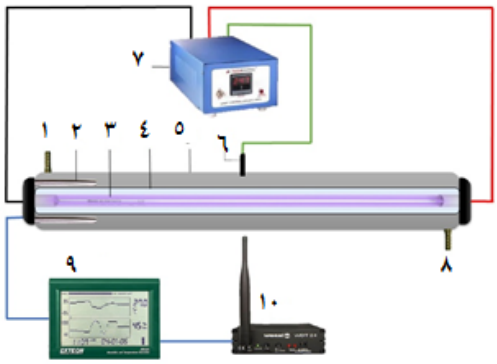
[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

**جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رنگ متیلن‌بلو خریداری شده**

| نام رنگ | متیلن بلو |
|---|---|
| فرمول شیمیایی | $C_{16}H_{18}N_3SCl$ |
| ساختار مولکولی |  |
| وزن مولکولی | ۳۱/۸۵ g/M |
| $\lambda_{Max}$ | ۶۶۸ nm |

**جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کربن فعال گرانوله خریداری شده**

| نام رنگ | کربن فعال گرانوله |
|---|---|
| فرمول شیمیایی | C |
| وزن مولکولی | ۱۲/۰۱ g/M |
| مش | ۲/۵ mm |




۱) ورودی نمونه
۲) دماسنج
۳) لامپ UV
٤) لوله کوارتز
٥) روکش استیل ضدزنگ
٦) سلول نوری
۷) ترانسفورماتور
۸) خروجی نمونه
۹) صفحه انتقال امواج
۱۰) تبدیل‌گر امواج

**شکل ۱. شماتیک راکتور مورداستفاده در این پژوهش**

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

در پایان هر آزمایش نمونه‌ها برای رسوب کاتالیزور در دستگاه سانتریفوژ با دور ۴۰۰۰ rpm قرار گرفت. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری میزان کارایی فرآیند در معدنی‌سازی، مقدار کاهش COD و TOC در شرایط بهینه اندازه‌گیری شد(۱۳).

روش انجام فرآیند و متغیرها:

در تمامی مراحل انجام آزمایش‌های از محلول ذخیره g/L ۱، رنگ متیلن‌بلو در آب استفاده شد. نمونه‌برداری در طی زمان‌های مشخص و در فاصله زمانی ۵ تا ۳۰ دقیقه انجام گرفت. نمونه‌های موردنیاز در این تحقیق به‌صورت سنتتیک بود. حجم نمونه استفاده‌شده در هر مرحله آزمایش ۵۰ سی-سی بود. نظر به اینکه جهت انجام این مطالعه هریک از متغیرها در دامنه موردنظر در ۵ سطح و ۶ زمان مورد آنالیز قرار گرفت، بر این اساس با احتساب میانگین ۲ بار تکرار، با روش فاکتوریل ۱۸۰ نمونه، برای تعیین اثر اشعه فرابنفش، گرانول کربن فعال و پرسولفات به‌تنهایی و باهم ۳۶ نمونه با احتساب ۲ بار تکرار مجموعاً، تعداد کل آزمایش‌های برابر ۱۹۶ نمونه بود. به‌منظور بررسی تأثیر pH بر فرآیند، pH های ۳، ۵، ۷ و ۹ انتخاب شد. نمونه‌ها با غلظت ثابت L/gm ۲۰۰ رنگ متیلن‌بلو و L/g ۲ کربن فعال گرانوله، mmol/L ۰/۵ پرسولفات طی زمان ۳۰ دقیقه داخل دستگاه VU قرار گرفت. در تمامی مراحل آزمایش از اسیدسولفوریک و سدیم هیدروکسید ۰/۱ نرمال جهت تنظیم pH نمونه‌ها استفاده شد(۱۴). جهت تعیین تأثیر غلظت‌های مختلف پرسولفات (mmol/L ۰/۲، ۰/۵ ، ۱، ۱/۵ و ۲)، نمونه‌ها با غلظت ثابت mg/L ۲۰۰ رنگ متیلن‌بلو، g/L ۲ کربن فعال گرانوله و pH بهینه حاصل از مرحله قبل طی زمان ۳۰ دقیقه درون راکتور امواج فرابنفش قرار گرفت. برای تعیین تأثیر غلظت‌های مختلف کاتالیزور کربن فعال گرانوله (g/L ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶)، نمونه‌ها با غلظت ثابت mg/L ۲۰۰ رنگ متیلن‌بلو، پرسولفات و pH بهینه حاصل از مراحل قبل طی زمان ۳۰ دقیقه تحت تأثیر امواج فرابنفش قرار گرفت. برای تعیین تأثیر غلظت‌های مختلف رنگ متیلن بلو در مقادیر ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نمونه‌ها با مقادیر بهینه غلظت کربن فعال گرانوله، پرسولفات و pH طی زمان ۳۰ دقیقه تحت تأثیر امواج فرابنفش قرار گرفت.

آنالیز نمونه‌ها و معدنی سازی:

به‌منظور تعیین کارایی فرآیند مذکور در فرآیند معدنی سازی بعد از به دست آمدن شرایط بهینه، نمونه‌ها با غلظت ثابت رنگ متیلن‌بلو برابر با mg/L ۲۰۰ طی مدت ۳۰ دقیقه در معرض امواج فرابنفش، کربن فعال گرانوله و پرسولفات قرار داده شد و بر اساس دستورالعمل‌های مندرج در کتاب استاندارد متد(۱۴) در طول‌موج ۶۵۰ نانومتر مقدار کاهش COD بررسی شد. به‌منظور اندازه‌گیری COD، محلول‌های هضم و معرف اسید طبق دستورالعمل ارائه‌شده در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش آب و فاضلاب تهیه شد. سپس با حل کردن مقدار مشخص KHP ( Potassium Hydrogen Phthalate) خشک‌شده در دمای ۱۱۰°C، در آب مقطر، سری نمونه‌ها با غلظت‌های مشخص COD ساخته شد. نمونه‌ها جهت هضم در دستگاه COD REACTOR HATCH به مدت ۲/۵ ساعت قرار گرفت، توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (DR 6000) در طول‌موج ۶۲۰ nm قرائت گردید. نمودار کالیبراسیون آن با رگرسیون ۰/۹۹۹ رسم و فرمول نمودار خطی به دست آمد. همچنین تعیین باقیمانده غلظت TOC با استفاده از دستگاه TOC آنالیزر مدل elementary ساخت کشور آلمان انجام گرفت. جهت اندازه‌گیری غلظت باقیمانده رنگ متیلن‌بلو از دستگاه اسپکتروفتومتری DR 6000 شرکتHATCH استفاده شد. با استفاده از اسکن طول‌موج، طول‌موج ۶۶۳ نانومتر که در آن بیشترین میزان جذب مشاهده شد انتخاب گردید. پس از رسم منحنی استاندارد و قرائت غلظت باقیمانده رنگ متیلن‌بلو راندمان حذف رنگ متیلن‌بلو با استفاده از معادله ۱ تعیین شد:

$$(\%) = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0}\right) \times 100 \qquad (1$$



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

در این رابطه %، درصد حذف رنگ، $C_0$ غلظت اولیه رنگ و $C_t$ غلظت باقیمانده رنگ در زمان‌های مختلف بود(۱۵).

تعیین سینتیک واکنش تجزیه رنگ متیلن‌بلو در فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$

در این پژوهش سینتیک واکنش به‌منظور تهیه اطلاعاتی در خصوص عوامل مؤثر بر سرعت واکنش و مکانیسم تبادل واکنشگرها به محصولات با استفاده از سه مدل از واکنش‌های درجه صفر، یک و دو به‌صورت زیر محاسبه گردید(۱۵). سرعت واکنش در سنتیک درجه صفر، مستقل از غلظت ماده اولیه است و طبق رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Rc = \frac{dc}{dt} = K \qquad (۲$$

سرعت واکنش درجه یک، مستقیماً متناسب با غلظت مواد اولیه است.

$$Rc = \frac{dc}{dt} = KC_t \qquad (۳$$

سرعت واکنش در سینتیک درجه ۲، متناسب با توان دوم ماده اولیه پیش می‌رود.

$$Rc = \frac{dc}{dt} = KC_t^2 \qquad (۴$$

در این معادلات:

Rc: سرعت واکنش، $C_0$: غلظت اولیه، $C_t$: غلظت در زمان t، K: ثابت سرعت واکنش است. در واکنش درجه صفر، معادله خطی به‌وسیله ترسیم مقادیر غلظت $C_t$ در زمان t به دست می‌آید. در واکنش درجه یک، از ترسیم $-\ln C_t/C_0$ در زمان t معادله خطی و در واکنش مرتبه دوم از مقادیر $1/C_t$ در زمان t معادله خطی حاصل می‌شود. پس از ترسیم شکل‌های مرتبه‌های مختلف، شیب منحنی شکل یا مقدار ثابت سرعت واکنش (K) قابل‌محاسبه است. ابعاد ضریب سرعت به مرتبه واکنش بستگی دارد. سرعت واکنش دارای آحاد غلظت، $^{-1}$(زمان) است. در واکنش درجه صفر ثابت سرعت واکنش برحسب mg/L.min و در واکنش‌های درجه ۱ و ۲ به ترتیب برحسب L/min و L/mg.min بیان می‌گردد(۱۵). در این مطالعه برای مطالعه سینتیک واکنش از ۳ مدل سینتیک درجه صفر، درجه یک و درجه دو استفاده شد.

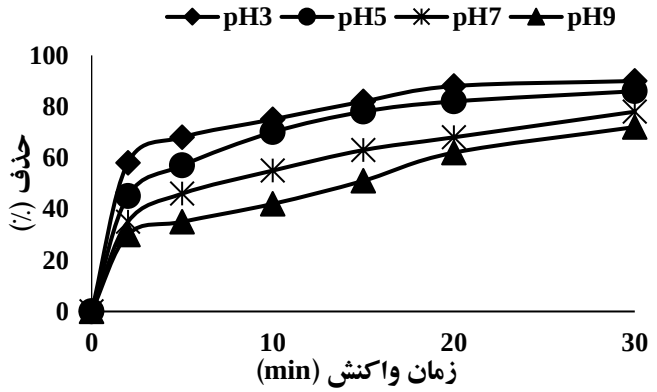
## یافته‌ها

تأثیر تغییرات pH در کارایی فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$:

سرعت واکنش‌های شیمیایی به pH محیط بستگی داشته و pH محلول به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر اکسیداسیون مواد شیمیایی تأثیرگذار است(۱۶). در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، تغییرات pH از طریق تولید رادیکال‌های متنوع بر میزان اکسیداسیون مواد آلی تأثیرگذار است. نتایج تأثیر تغییرات pH محیط در دامنه ۹-۳ در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

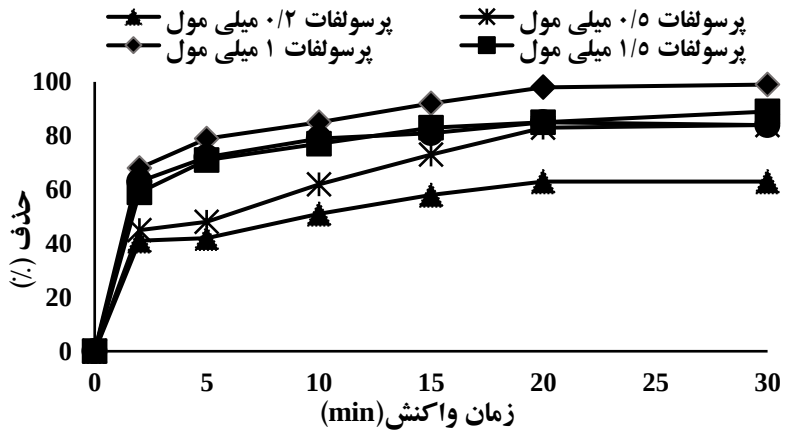



**شکل۲. تأثیر تغییرات pH محیط در میزان حذف رنگ متیلن‌بلو**
**(غلظت رنگ متیلن‌بلو ۲۰۰ mg/L، پرسولفات ۱/۵ mmol/L، کربن فعال گرانوله ۲ g/L)**

بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۲ در شرایط اسیدی و در **pH** برابر با ۳ بیشترین حذف رنگ متیلن‌بلو مشاهده‌شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۲ با افزایش **pH** محیط راندمان حذف کاهش‌یافته و در **pH** ۷ و ۹ به ترتیب به ۷۸ و ۷۲ درصد رسیده است.

تأثیر تغییرات غلظت پرسولفات در کارایی فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$

نتایج تأثیر غلظت‌های متفاوت پرسولفات در دامنه ۰/۲ تا ۲ میلی مول بر لیتر در pH = ۳ و مقادیر ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رنگ و ۲ گرم در لیتر کربن فعال در شکل ۳ نشان داده‌شده است.



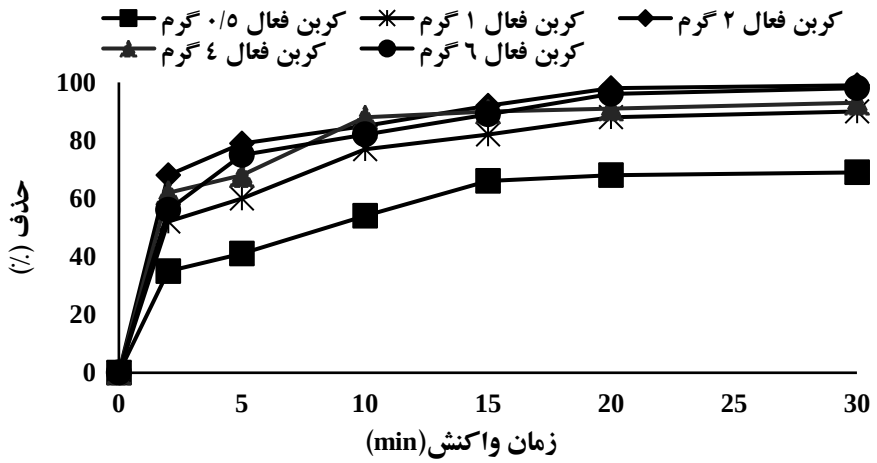

**شکل ۳. تأثیر تغییرات غلظت پرسولفات محیط در میزان حذف رنگ متیلن‌بلو**
**(غلظت رنگ متیلن‌بلو۲۰۰ mg/L، pH=۳، کربن فعال گرانوله ۲ mg/L)**

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

تأثیر تغییرات غلظت کربن فعال‌گرانوله در کارایی فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$

بررسی تأثیر میزان دزاژ کاتالیزور مورداستفاده در حذف آلاینده نشان داد که با افزایش کربن فعال گرانوله از g/L ۰/۵ تا ۲، میزان حذف رنگ در محلول از ۳۵ تا ۹۹٪ افزایش یافت (شکل۴).



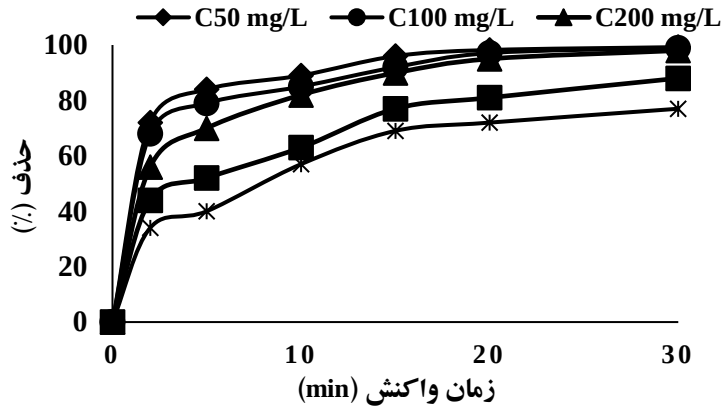

**شکل ٤. تأثیر تغییرات غلظت کربن فعال گرانوله در میزان حذف رنگ متیلن‌بلو**
**(غلظت رنگ متیلن‌بلو mg/L ۲۰۰، pH=۳، پرسولفات mmol/L ۱)**

تأثیر تغییرات غلظت اولیه رنگ متیلن بلو در کارایی فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$

فاضلاب صنایع نساجی حاوی غلظت‌های متفاوتی از رنگ است ازاین‌رو بررسی کارایی حذف مقادیر متفاوت رنگ در فرآیند حائز اهمیت است. نتایج تأثیر غلظت‌های اولیه رنگ متیلن‌بلو در دامنه ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در زمان‌های مختلف بهره‌برداری و شرایط بهینه بهره‌برداری (pH=۳، پرسولفات ۱ میلی‌مولار بر لیتر و کربن فعال ۲ گرم بر لیتر) در شکل ۵ نشان داده‌شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۵، میزان حذف رنگ در فرآیند تلفیقی موردنظر به غلظت اولیه رنگ متیلن‌بلو بستگی دارد به‌نحوی‌که با افزایش غلظت اولیه رنگ راندمان حذف کاهش‌یافته است. بیشترین کارایی حذف فرآیند به میزان ۹۹ درصد در زمان ۲۰ دقیقه در غلظت اولیه رنگ برابر با ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل‌شده است که با افزایش غلظت اولیه رنگ به ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در زمان ۳۰ دقیقه راندمان حذف به ۷۴ درصد کاهش یافته است.

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

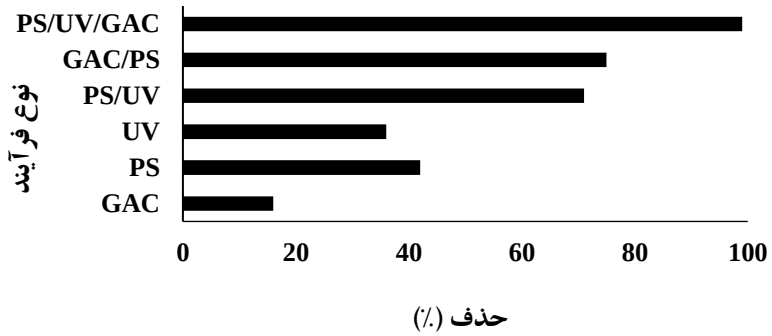



**شکل ۵. تأثیر تغییرات غلظت اولیه رنگ متیلن‌بلو در میزان حذف آن**
**(غلظت کربن فعال g/L ۲، pH=۳، پرسولفات mmol/L ۱)**

تأثیر هم‌افزایی مکانیسم‌ها

به‌منظور تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر در حذف رنگ در غلظت تأثیر فرآیندهای مختلف ازجمله کربن فعال، پرسولفات و اشعه فرابنفش به‌صورت مجزا و فرآیندهای تلفیقی امواج فرابنفش/ پرسولفات و پرسولفات /کربن فعال در شرایط بهینه بهره‌برداری و غلظت اولیه رنگ متیلن‌بلو اولیه برابر با mg/L ۲۰۰ موردمطالعه قرار گرفت که نتایج در شکل ۶ نشان داده‌شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۶، کاربرد مجزای GAC، امواج UVو $S_2O_8$ به ترتیب ۱۶، ۳۶ و ۴۲ درصد از رنگ متیلن‌بلو را در طی زمان ۳۰ دقیقه در شرایط بهینه بهره‌برداری حذف نموده‌اند.این در حالی است که فرآیند توأم امواج فرابنفش/پرسولفات و پرسولفات/کربن فعال به ترتیب ۷۲ و ۷۵ درصد رنگ را حذف نموده است که بیانگر تأثیر مثبت فرآیندهای تلفیقی در مقایسه با فرآیندهای مجزا بوده است. مقایسه این نتایج با فرآیند توأم $UV/GAC/S_2O_8$ بیانگر تأثیر بیشتر فرآیند توأم نسبت به فرآیندهای مورد مطالعه به‌تنهایی بود، به‌نحوی‌که بر اساس میزان حذف رنگ آن‌ها را به‌صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

$$GAC < UV < S_2O_8 < UV/S_2O_8 < GAC/S_2O_8 < UV/GAC/S_2O_8$$




**شکل ٦. مقایسه حذف رنگ متیلن‌بلو در شرایط بهینه توسط فرآیندهای مختلف**

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

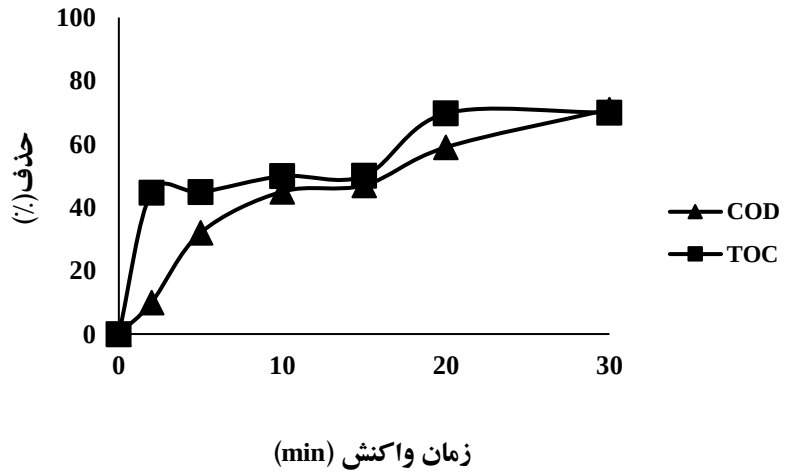
[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

تأثیر فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$ در فرآیند معدنی سازی:

بر اساس نتایج میزان تجزیه رنگ متلین بلو بر اساس آزمایش COD که در شکل ۷ نشان داده‌شده است، فرآیند تلفیقی موردمطالعه بعد از گذشت زمان ۳۰ دقیقه از انجام فرآیند و در غلظت اولیه رنگ ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۷۱ درصد کاهش COD را سبب شده است درحالی‌که راندمان حذف رنگ در غلظت موردنظر بالغ بر ۹۸ درصد بوده است. آنالیزهای انجام‌شده در خصوص تغییرات غلظت TOC نیز بیانگر کاهش غلظت کل کربن آلی به میزان ۶۹/۹٪ درصد بود (شکل۷). جدول ۳ مقایسه میزان حذف رنگ متیلن‌بلو مطالعات فتوکاتالیستی را با مطالعه حاضر ارائه می‌دهد.

**جدول ۳. مقایسه میزان حذف رنگ متیلن‌بلو توسط فرآیند فوتوکاتالیست با مطالعه حاضر**

| نویسنده | سال | فرآیند | درصد معدنی‌سازی | سینتیک واکنش | راندمان حذف رنگ متیل‌بلو (٪) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Xiheng zhang (۱۷)** | ۲۰۱۶ | UV/ پرسولفات | ۹۲/۴ | – | ۹۵ |
| **Guntae Son (۱۸)** | ۲۰۱۶ | پلاسما – پرسولفات | ۵۸/۱ | درجه اول | ۱۰۰ |
| **Antoine Ghauch (۱۹)** | ۲۰۱۲ | پرسولفات فعال‌شده با حرارت | – | درجه اول | ۹۸ |
| **Mohamed (۲۰)** | ۲۰۰۶ | پرسولفات/ $TiO_2$/ UV | ۹۸ | درجه اول | ۹۸ |
| **Chang-Mao Hung (۲۱)** | ۲۰۱۶ | پرسولفات/ FeO | – | درجه اول | ۸۵ |
| **مطالعه حاضر** | ۱۳۹۹ | پرسولفات/ UV/GAC | ۶۴/۷۵ | درجه اول | ۹۹ |




**شکل ۷. کارایی $UV/GAC/S_2O_8$ در کاهش COD و TOC**
**(pH=۳ ، پرسولفات ۱ mmol/L، غلظت کربن فعال ۲ g/L، غلظت رنگ متیلن‌بلو ۲۰۰ mg/L)**

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

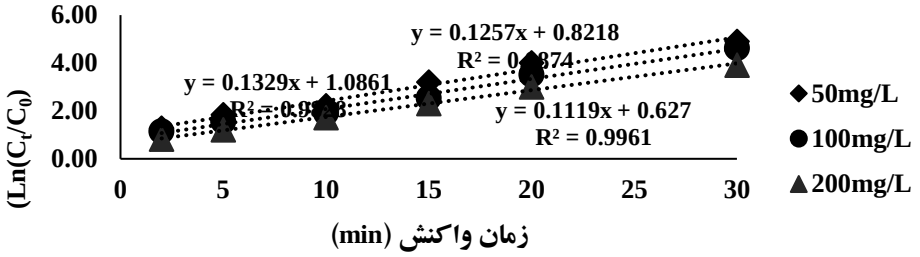
[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

تعیین سینتیک واکنش تجزیه رنگ متیلن‌بلو در فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۴ و شکل۸، ضریب تجزیه $(R^2)$، ۰/۹۹ است که فرآیند بر اساس ضریب همبستگی مطابقت بیشتری با واکنش درجه اول دارد (به دلیل مقادیر بالاتر $R^2$)، نسبت به دو مدل دیگر نزدیک‌تر است.

**جدول ٤. ضرایب سینتیکی مربوط به حذف رنگ متیلن‌بلو**

| مرتبه | ضریب تعیین($R^2$) | | | ثابت سرعت(K) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| غلظت اولیه رنگ (mg/L) | ۵۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ |
| صفر | ۰/۷۷۵۲ | ۰/۸۵۵۷ | ۰/۸۳۱۸ | -۰/۴۴۶۷ | -۱/۰۵۹۳ | -۲/۸۵۵۸ |
| اول | ۰/۹۸۲۸ | ۰/۹۸۷۴ | ۰/۹۹۶۱ | ۰/۱۳۲۹ | ۰/۱۲۵۷ | ۰/۱۱۱۹ |
| دوم | ۰/۸۸۴۲ | ۰/۸۲۷۶ | ۰/۸۷۵۸ | ۰/۰۹۰۱ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۰۸۲ |




**شکل ۸. سینتیک واکنش درجه اول حذف رنگ متیلن بلو در شرایط بهینه**

## بحث

به‌منظور تعیین بهترین محدوده کارایی سیستم‌ها، غلظت‌های مختلف پرسولفات، غلظت‌های اولیه رنگ، غلظت‌های مختلف کربن فعال گرانوله و محدوده‌های مختلف pH در زمان‌های مختلف تابش اشعه UV موردمطالعه قرار گرفت.

علت کارایی فرآیند در محیط اسیدی را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که در شرایط اسیدی تولید رادیکال سولفات که دارای بیشترین پتانسیل اکسیداسیون و احیا نیز است در حداکثر مقدار خود بوده و به همان نسبت قدرت تخریبی رنگ توسط آن افزایش می‌یابد. همچنین در این شرایط هیدرولیز پرسولفات منجر به تولید پراکسید هیدروژن می‌شود که خود عاملی دیگر برای افزایش حذف رنگ در محیط اسیدی به شمار می‌رود (روابط ۵ و ۶)(۱۳).

$$S_2O_8^{2-} + 2H_2O \rightarrow HSO_4^- + H_2O_2 \qquad ۵$$

$$SO_4^{\cdot -} + H_2O \rightarrow H^+ + SO_4^{2-} + OH^\cdot \qquad ۶$$

از طرفی علت کاهش راندمان حذف رنگ را در شرایط قلیایی می‌توان این‌گونه بیان نمود که در شرایط قلیایی، رادیکال‌های سولفات به‌صورت رابطه ۷ با آنیون‌های هیدروکسیل برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش می‌دهد که پتانسیل رادیکال‌های سولفات برای اکسایش کاهش می‌یابد(۱۳).



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

$$SO_4^{\bullet} + OH \rightarrow SO_4^{2-} + OH \quad (۷$$

نتایج سایر مطالعات در این زمینه نیز بیانگر تأثیرگذاری حذف آلاینده‌ها با استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته با توجه به pH محیط است. در مطالعه رحمانی و همکاران (۱۳۹۶) بالاترین مقدار حذف رنگ متیلن‌بلو معادل ۷۲ درصد توسط فرآیند فتوفنتون در pH اسیدی حاصل‌شده بود(۱۶). نتایج مطالعه انجام‌شده توسط Villanueva SF و همکاران (۲۰۰۷)(۲۲) نیز بیانگر آن بود که در فرآیندهای UV-C/$K_2S_2O_8$ بیشترین کارایی حذف در محیط اسیدی بوده و با افزایش pH محیط راندمان حذف کاهش‌یافته است که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. Shiying و همکاران (۲۰۰۹) نیز در مطالعه تخریب اکسایشی محلول ترامتیل‌آمینوهیدروکسید با استفاده از فزایند UV/ پرسولفات نشان دادند که بازده حذف در pH اسیدی بیشتر است(۹). در مطالعه‌ای که Zhu و همکاران (۲۰۱۲) روی رنگ متیل نارنجی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بالاترین درجه از رنگ‌زدایی که منجر به حذف ۹۷ درصد رنگ شد در pH برابر با ۲ مشاهده شد که به جاذب الکترواستاتیک بین سطح مثبت کاتالیست و آنیون متیل نارنجی نسبت داده می‌شود(۲۳). ملکی و همکاران (۱۳۹۰) مطالعه‌ای در خصوص رنگزدایی مستقیم از رنگ blue 71 توسط فرآیند فوتوکاتالیستی انجام دادند، بر اساس نتایج دلیل کارایی بالاتر فرآیند در شرایط pH اسیدی را به این صورت بیان نموده‌اند که در یک محیط اسیدی یون‌های $H^+$روی سطح $TiO_2$ جذب می‌شوند. در این صورت الکترون‌های تولیدشده می‌توانند به‌وسیله یون‌های $H^+$ جذب‌شده و با تشکیل رادیکال هیدروکسیل رنگ موجود را حذف می‌نمایند. درصورتی‌که با افزایش pH تعداد سایت‌های با بار منفی افزایش می‌یابد و ازآنجایی‌که تعداد سایت‌های با بار منفی روی سطح فوتوکاتالیست نمی‌توانند در حذف رنگ مؤثر باشند لذا افزایش pH با کاهش توانایی حذف توسط فوتوکاتالیست همراه خواهد بود(۲۴). همچنین طی مطالعه Portjanskaja و همکاران (۲۰۰۷) در فرآیندهای فتواکسیداسیون ترکیبات آلی بهترین کارایی حذف در pH های اسیدی اتفاق افتاده است(۲۵).

بر اساس نتایج این مرحله از انجام آزمایش‌های با افزایش غلظت پرسولفات تا ۱ mmol/L، کارایی فرآیند در حذف رنگ متیلن‌بلو افزایش‌یافته است. بر این اساس در زمان ۳۰ دقیقه، با افزایش غلظت پرسولفات از ۰/۲ به ۱ mmol/L، راندمان حذف از ۴۱ به ۹۹٪ افزایش‌یافته است؛ که از دلایل آن این است که با افزایش غلظت GAC، رادیکال پرسولفات بیشتری تولیدشده که باعث انجام واکنش با آلاینده موردنظر و تجزیه آلاینده به دی‌اکسیدکربن، آب و مواد معدنی می‌گردد(۲۵). همچنین نتایج بیانگر آن بود که با افزایش غلظت پرسولفات به ۲ mmol/L، تأثیر منفی در حذف رنگ متیلن‌بلو داشته و میزان حذف آن به ۸۴٪ کاهش یافت. علت این امر آن است که بر اساس روابط(۸ و ۹) با افزایش غلظت ماده اکسیدکننده به بیش از مقدار بهینه از یک سو رادیکال سولفات به رادیکال پرسولفات تبدیل می‌شود که دارای پتانسیل اکسیداسیون احیا کمتری نسبت به رادیکال سولفات است و از سوی دیگر رادیکال سولفات به‌عنوان رادیکال اسکاونجر عمل کرده و به عاملی برای تبدیل رادیکال سولفات به پرسولفات عمل می‌کند(۲۵).

$$S_2O_8^{2-} + SO_4^{\bullet} \rightarrow SO_4^{2-} + S_2O_8^{\bullet-} \quad (۸$$

$$SO_4^{\bullet} + SO_4^{\bullet} \rightarrow S_2O_8^{2-} \quad (۹$$

نتایج مطالعه قانعیان و همکاران (۱۳۸۹) در خصوص حذف رنگ توسط پرسولفات پتاسیم و نور خورشید نتایج بیانگر آن بوده است که غلظت پرسولفات مورداستفاده ۲ تا ۵ میلی‌مولار بوده و با افزایش غلظت راندمان افزایش داشت. با توجه به این‌که اثر غلظت‌های ۲ تا ۵ میلی مولار اختلاف چندانی نداشت برای بررسی از غلظت ۲ میلی‌مولار استفاده‌شده است(۲۶). همچنین این نتایج با یافته‌های پژوهش اسرافیلی و همکاران (۱۳۹۵) که از فرآیند



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

اکسیداسیون پیشرفته بر پایه سولفات جهت حذف دی‌اتیل فتالات از محلول‌های آبی استفاده کرده بودند، مطابقت دارد(۲۷). همچنین نتایج به‌دست‌آمده با مطالعه‌ی Lin و همکارانش (۲۰۱۳) بر روی حذف بیس‌فنل A با فرآیند پرسولفات فعال‌شده به روش الکتریکی انجام داده‌اند همخوانی دارد در این مطالعه با افزایش غلظت پرسولفات از ۱ به ۱۰ میلی‌مولار راندمان حذف بیس فنل از ۵۷/۵ درصد به ۹۹/۲ درصد رسیده است ولی با افزایش غلظت پرسولفات از ۱۰ به ۲۰ میلی‌مولار راندمان ثابت مانده است(۲۸).

افزایش درصد حذف متیلن‌بلو با افزایش دز کاتالیزور، به دلیل افزایش مساحت سطح‌فعال و مؤثر در فرآیند حذف و درنتیجه امکان برخورد بیشتر کاتالیزگر با رنگ است. افزایش دوز کاتالیست سبب افزایش تعداد فوتون‌های جذبی شده و درنتیجه سبب افزایش تعداد مولکول‌های آلی جذب‌شده خواهد شد(۲۸). بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل۴ هرچند با افزایش میزان دزاژ کربن فعال گرانول از ۰/۵ تا ۲ گرم در لیتر افزایش‌یافته است؛ اما با افزایش دزاژ در مقادیر بیش از ۲ گرم در لیتر کارایی فرآیند در حذف رنگ روند تقریباً ثابتی را داشته است. با افزایش دزاژ کربن فعال گرانوله به دلیل غیراشباع ماندن بعضی از سایت‌های فعال آن، میزان حذف آلاینده کاهش می‌یابد. علت کاهش راندمان در دوزهای بیشتر از ۲ گرم بر لیتر را می‌توان به افزایش کدورت محلول و لذا کاهش میزان نفوذ و پراکندگی نور UV از سطح کاتالیزگر منتسب نمود. به‌این‌ترتیب حجم فعال‌شده نوری کاهش‌یافته و درنتیجه مقدار کمی از کربن فعال گرانوله فعال خواهد شد. دلیل دیگر را می‌توان به کلوخه شدن و ته‌نشینی در غلظت‌های بالای کاتالیزگر نسبت داد مطالعه‌ای که توسط مسعودنژاد و همکاران (۱۳۹۹) در خصوص حذف رنگ متیلن‌بلو توسط برگ ZIF-8 صورت گرفت نتایج حاکی از آن است میزان حذف رنگ با افزایش دوز جاذب تابیش از ۹۰٪ افزایش‌یافته که علت آن را افزایش نیروی گرادیان غلظت بیان نموده است و پس از ۱۵۰دقیقه واکنش به مرز تعادل رسیده است و راندمان حذف ثابت مانده است(۶). با توجه به این‌که در مقدار کربن فعال برابر ۲ گرم بیشترین میزان حذف اتفاق افتاد؛ بنابراین دوز کربن فعال برابر ۲g/L به‌عنوان دوز بهینه در نظر گرفته شد.

از دیگر دلایل کاهش حذف رنگ در مقادیر بالای کربن فعال را می‌توان به اشباع شدن سایت‌های فعال کاتالیزور و کاهش ظرفیت آن در طول فرآیند ناشی از افزایش دزاژ کربن فعال در حجم و غلظت ثابت محلول باعث نسبت داد. نتایج مطالعات قانعیان و همکاران (۱۳۸۹)(۲۶) و رضایی کلانتری و همکاران(۱۳۹۳)(۲۹) یافته‌های این مطالعه را تائید نموده‌اند. نتایج مطالعه‌ی Muthirulan و همکاران (۲۰۱۳) نیز بر تأثیر نقش غلظت کربن خالص در حذف رنگ آلیزارین سیانین سبز از محلول‌های تأکید نموده است(۳۰).

طبق شکل ۶ هرچند رنگ موردمطالعه در حضور پرسولفات به‌صورت منفرد و در غیاب نور UV حدود ۴۲٪ حذف‌شده است؛ اما بررسی راندمان فرآیند نشان می‌دهد که این میزان حذف در مدت‌زمان واکنش یکسان، نسبت به شرایطی که از پرسولفات در حضور تحریک‌کننده نوری راندمان حذف رنگ کم‌تر است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تجزیه فتوکاتالیستی رنگ متیلن‌بلو درنتیجه حضور توأم پرسولفات و نور UV، در مقایسه با کاربرد مجزای این دو عامل بهبودیافته است. علت این امر را به این دلیل است که امواج UV به دلیل توانایی در تولید مستقیم رادیکال پرسولفات در محلول و به تبع آن اکسیداسیون و تغییر ساختار رنگ، می‌تواند اثر فرآیند هم‌زمان پرسولفات و کربن فعال گرانوله را افزایش دهد. باوجود محاسن و معایبی که امواج UV در بحث تصفیه آلاینده‌ها در منابع آبی دارند، نتایج پژوهش‌ها در چند سال اخیر نشان داده است که کاربرد امواج فرابنفش به‌تنهایی به دلیل کارایی کم و نیاز به زمان و انرژی زیاد محدود است و قابلیت استفاده در مقیاس‌های بزرگ را ندارد(۳۱). برای غلبه بر این مشکل، امواج UV به‌صورت



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

ترکیبی با فرآیندهای دیگر نظیر $UV/H_2O_2$، $UV/ S_2O_8$ و یا $UV/O_3$ ترکیب با فرآیندهای الکتروشیمیایی مانند UV/ الکتروفنتون، ترکیب با فرآیندهای نوری و فتوکاتالیستی انجام می‌شود که منجر به افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی می‌شود؛ بنابراین دلیل مؤثرتر بودن این فرآیند نسبت به روش‌های دیگر حضور چند عامل اکسیدکننده به‌طور هم‌زمان و اثر تشدیدکنندگی آن‌ها از طریق تولید رادیکال‌های پرسولفات است. تابش لامپUV موجب تولید و تحریک فوتون‌ها به سطح انرژی بالاتر و فعال‌سازی کاتالیزگر و درنتیجه تجزیه مواد آلی می‌شود(۳۱)؛ بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان‌دهنده نقش بسیار مهم امواج فرابنفش در فعال‌سازی کاتالیزگر کربن فعال گرانوله در تجزیه فتوکاتالیستی رنگ بود. هیچ‌یک از این روش‌ها به‌تنهایی نمی‌توانند عامل اصلی تجزیه‌کننده رنگ و مواد آلی باشند؛ بنابراین روش ترکیبی با کارایی ۹۸ درصد برای حذف رنگ و ۷۱ درصد برای کاهش COD مناسب‌ترین گزینه گزارش گردید. همچنین مشاهده شد که مقدار ثابت کربن فعال گرانوله به‌تنهایی در حذف رنگ کارآمد نیست و این مقدار اندک حذف‌شده به دلیل جذب سطحی رنگ بر سطح کاتالیست است که با افزایش زمان تماس، مقدار حذف آلاینده، به دلیل جذب سطحی افزایش‌یافته است. نتایج مشابهی نیز توسط محمودی و همکاران (۱۳۸۸) گزارش‌شده است، به‌طوری‌که محققان مذکور طی انجام آزمایش‌هایی بر روی تصفیه فاضلاب نساجی به این نتیجه رسیدند که اشعه فرابنفش به‌تنهایی نمی‌تواند عامل اصلی تجزیه‌کننده یعنی رادیکال‌های پرسولفات را به مقدار کافی تولید کند و اشعه ماوراءبنفش به‌طور مجزا باعث حذف مقدار کمی از ماده آلی می‌گردد که با مطالعه حاضر همخوانی دارد(۳۲). نتایج مطالعه حاضر با مطالعه رحمانی همکاران (۱۳۹۶) در خصوص حذف رنگ اسیدبلو توسط فرآیند سونوشیمیایی و پراکسیدهیدروژن و پرسولفات فعال‌شده با آهن فرو مطابقت دارد(۱۶).

همچنین این نتایج با یافته‌های گزارش‌شده توسط Villanueva و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد. این محققین حذف رنگ اسیدی نارنجی۷ را در حضور نور، دی‌اکسیدتیتانیوم و پرسولفات بررسی کرده و گزارش نمودند که حدود ۶۶٪ از رنگ در حضور پرسولفات و در محیط فاقد نور پس از ۲ ساعت زمان واکنش حذف می‌گردد(۲۲). این نتایج ضرورت وجود یک عامل برانگیخته کننده را برای فرآیندهای فتوشیمیایی به اثبات می‌رساند. به‌طوری‌که Kuo و Ho (۲۰۰۱) نیز حضور عوامل تحریک‌کننده نوری را ضروری دانسته‌اند. این محققین در سال ۲۰۰۱ گزارش نمودند که علی‌رغم این‌که رنگ متیلن بلو بعضی از محدوده‌های نور مرئی را جذب می‌کند؛ اما تجزیه این آلاینده در شرایط استفاده هم‌زمان از فتوکاتالیست و پرتو ماورای بنفش نسبت به کاربرد منفرد پرتو بهتر انجام می‌گیرد(۳۳). در مطالعه عسگری و همکاران (۱۳۹۶) در خصوص حذف رنگ فاضلاب صنایع نساجی توسط فرآیند فتوکاتالیستی دی‌اکسیدتیتانیوم در حضور اشعه فرابنفش، میزان کاهش COD را ۶۴/۷۵٪ گزارش نمودند که دلیل مؤثر بودن فرآیند را در کاهش COD حضور عوامل اکسیدکننده به‌صورت هم‌زمان و اثر تشدیدکنندگی آن‌ها از طریق تولید رادیکال هیدروکسیل است از طرفی تابش لامپ UV موجب تولید و تحریک فوتون‌ها به سطح انرژی بالاتر و فعال‌سازی کاتالیزگر و درنتیجه تجزیه ماده آلی می‌گردد(۳۴). همچنین صیدمحمدی و همکاران(۱۳۹۵) به نتایج مشابهی برای حذف مترونیدازول دست یافتند(۳۵).

جهت دستیابی به اطلاعاتی در مورد عوامل مؤثر بر سرعت واکنش، ارزیابی سینتیک ضروری است. در این مطالعه نمودار در مقابل زمان واکنش رسم گردید که به‌صورت خط راست به دست آمد که شیب نمودار، ثابت سرعت واکنش (k) را نشان می‌دهد. بر این اساس ضریب همبستگی تجزیه رنگ متیلن بلو توسط فرآیند $UV/GAC/S_2O_8$، مطابقت بیشتری با واکنش درجه اول



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

دارد. در این راستا Amalraj و Pius (۲۰۱۴) در پژوهشی نتایج مشابهی در مورد تجزیه فتوکاتالتیکی رنگ‌های آلیزارین با استفاده از $TiO_2$ به‌دست آوردند(۳۶). در پژوهش دیگری نتایج حذف رنگ به‌وسیله روش فتوکاتالیستی با استفاده از نانو ذرات ZnO نشان‌دهنده پیروی فرآیند از مدل سینتیکی مرتبه اول بوده است(۳۷).

به‌منظور بررسی کارایی فرآیند در مقیاس محیطی علاوه بر حذف آلاینده مدنظر، کاهش بار آلودگی آلی نیز مهم است. آزمایش‌های مختلفی در این راستا وجود دارد که تعیین‌کننده میزان معدنی سازی فرآیند هستند. از آزمایش‌های سریع، ارزان و نسبتاً دقیق در این زمینه اندازه‌گیری COD است. کاهش COD بیانگر آن است که طی فرآیند اکسیداسیون فتوکاتالیستی موردمطالعه رنگ به‌طور کامل به مواد معدنی تبدیل نشده و ترکیبات واسط دیگری تولیدشده‌اند که مصرف‌کننده اکسیژن هستند و موجبات افزایش میزان COD در محلول شده‌اند(۳۸).

## نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور بررسی کارایی فرآیند فتوکاتالیستی در حذف رنگ متیلن‌بلو انجام شد. نتایج نشان داد افزایش pH سبب کاهش کارایی فرآیند می‌شود، به‌طوری‌که بیشترین راندمان حذف رنگ متیلن‌بلو در pH = ۳ به دست آمد. غلظت بهینه آنیون پرسولفات مورداستفاده ۱ میلی‌مول‌برلیتر بود و با افزایش آن راندمان حذف کاهش یافت. نقش کربن فعال گرانوله به‌عنوان کاتالیزور حائز اهمیت بوده و موجب افزایش سرعت فعال‌سازی پرسولفات شده و درنتیجه در افزایش کارایی فرآیند در مقایسه با شرایطی که از آن استفاده‌نشده است (سیستم توأم امواج فرابنفش/ پرسولفات) تأثیرگذار است. تجزیه رنگ متیلن‌بلو در فرآیند اکسیداسیون موردنظر از واکنش درجه اول تبعیت نموده و میزان ثابت سرعت واکنش در شرایط بهینه بهره‌برداری ۱۳/۲۹ است. میزان کارایی فرآیند در کاهش COD و TOC به ترتیب ۷۱ و ۶۹/۹ درصد بود. درنهایت نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد که فرآیند اکسیداسیون پیشرفته ($UV/GAC/S_2O_8$) به دلیل ایجاد هم‌افزایی در حذف رنگ متیلن‌بلو نسبت به هر فرآیند به‌تنهایی، فرآیند مناسبی است و به دلیل غیر سمی بودن، ارزانی و در دسترس بودن و به‌عنوان یک روش دوستدار محیط‌زیست می‌تواند برای حذف رنگ از پساب صنایع مختلف تولیدکننده رنگ مورداستفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به نتایج مطلوب فرآیند فوتوکاتالیستی $UV/GAC/S_2O_8$ در حذف رنگ متیلن‌بلو، می‌توان اظهار داشت که کارایی فرآیند موردنظر در حذف سایر رنگ‌ها موردبررسی قرار گیرد تا با تعیین دامنه عملکرد این فرآیند، قابلیت استفاده از آن برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگ‌های مختلف تعیین گردد.

## تشکر و قدردانی

این مقاله منتج از طرح شماره ۹۸۰۸۲۸۶۳۳۶ کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی همدان است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مسئولین محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی همدان و کارشناسان محترم آزمایشگاه دانشکده بهداشت همدان کمال قدردانی و سپاس را نمایند.

## منابع

1.Asadi F, Dargahi A, Almasi A, Moghofe E. Red Reactive 2 Dye Removal from Aqueous Solutions by Pumice as a Low-Cost and Available Adsorbent. Arch Hyg Sci. 2016;5(3):145-152.

2.Jäger I, Hafner C, Schneider K. Mutagenicity of different textile dye products in Salmonella typhimurium and mouse lymphoma cells. Mutat Res. 2004;561(1):35-44.

3.Haghighat GA, Sadeghi S, Saghi MH, Ghadiri SK, Anastopoulos I, Giannakoudakis DA, Colmenares JC, Shams M. Zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs) of various morphologies



[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

against eriochrome black-T (EBT): optimizing the key physicochemical features by process modeling. Colloids Surf A. 2020;606:125391.
4. Ahmadi E, Gholami M, Farzadkia M, Nabizadeh R, Esrafili A, Azari A. Evaluation of Diethyl phthalate and Diallyl phthalate biodegradation mechanisms in the treatment of synthetic wastewater. J Health in the Field. 2017;2(1). [In persian]
5.Wu J, Zhang H, Qiu J. Degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by a novel electro/$Fe^{2+}$/peroxydisulfate process. J Hazard Mater. 2012;215:138-45.
6.Massoudinejad M, Mohammadi A, Sadeghi S, Ghaderpoori M, Sahebi S, Alinejad A. Arsenic adsorption over dodecahedra ZIF-8 from solution aqueous: modelling, isotherms, kinetics and thermodynamics. Int J Environ Anal Chem. 2020:1-7.
7.Al-Momani F, Touraud E, Degorce-Dumas J, Roussy J, Thomas O. Biodegradability enhancement of textile dyes and textile wastewater by VUV photolysis. J Photoch Photobio A. 2002;153(1-3):191-7.
8. Hossieni S, Sadeghi S, Saghi MH, Ghadiri SK. Evaluation of photocatalytic process using GO/ZnO nanocomposites under LED irradiation for removal of Endocrine Disrupting Chemicals (EDCs) from aqueous solutions. SJKU. 2019;24(4). [In persian]
9.Shiying Y, Ping W, Xin Y, Guang W, Zhang W, Liang S. A novel advanced oxidation process to degrade organic pollutants in wastewater: Microwave-activated persulfate oxidation. J Environ Sci. 2009;21(9):1175-1180.
10.Zhang M, Chen X, Zhou H, Murugananthan M, Zhang Y. Degradation of p-nitrophenol by heat and metal ions co-activated persulfate. Chem Eng Sci. 2015;264:39-47.
11.Alinejad A, Sadeghi S, Ghaderpoori M, Sahebi S, Ghaderpoury A, Mohammadi AA, Saghi MH, Gholampour Y, Khani Jeihooni A. High adsorption of methylene blue from aqueous solutions using leaf-shaped ZIF-8. Int J Environ Anal Chem. 2019; 19:1-4.
12.Lei L, Gu L, Zhang X, Su Y. Catalytic oxidation of highly concentrated real industrial wastewater by integrated ozone and activated carbon. Appl Catal A-Gen. 2007;327(2):287-94.
13.Liu F, Yi P, Wang X, Gao H, Zhang H. Degradation of Acid Orange 7 by an ultrasound/ZnO-GAC/persulfate process. Sep Purif Technol. 2018;194:181-7.
14. Awwa A. Wef. Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 21st ed, American Public Health Association 2005;23.
15.Seidmohammadi A, Bahrami M, Omari S, Asadi F. Removal of Cephalexin From Aqueous Solutions Using Magnesium Oxide/Granular Activated Carbon Hybrid Photocatalytic Process. Avicenna J Environ Health Eng. 2019;6(1):24-32.
16.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. JMUMS. 2017;27(153):95-111. [In persian]
17.Zhang X, Zhang L, Hou L, Dong L, editors. Persulfate-enhanced Photocatalytic Degradation of Methylene Blue. 2016 5th International Conference on Sustainable Energy and Environment Engineering (ICSEEE 2016); 2016: Atlantis Press.
18.Son G, Lee H. Methylene blue removal by submerged plasma irradiation system in the presence of persulfate. Environ Sci Pollut Res. 2016;23(15):15651-6.
19.Ghauch A, Tuqan AM, Kibbi N, Geryes S. Methylene blue discoloration by heated persulfate in aqueous solution. Chem Eng J. 2012;213:259-71.
20.Mohamed MM, Al-Esaimi MM. Characterization, adsorption and photocatalytic activity of vanadium-doped TiO2 and sulfated TiO2 (rutile) catalysts: degradation of methylene blue dye. J Mol Catal. 2006;255(1-2):53-61.

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]

21.Hung CM, Chen CW, Liu YY, Dong CD. Decolorization of methylene blue by persulfate activated with FeO magnetic particles. Water Environ Res. 2016;88(8):675-86.
22.Villanueva S, MartÌnez S. TiO2-assisted degradation of acid orange 7 textile dye under solar light. Sol Energy Mater Sol Cells. 2007;91:1492-5.
23.Zhu H, Jiang R, Fu Y, Guan Y, Yao J, Xiao L, et al. Effective photocatalytic decolorization of methyl orange utilizing TiO2/ZnO/chitosan nanocomposite films under simulated solar irradiation. Desalination. 2012;286:41-8.
24.Maleki A, Mahvi AH, Shahmoradi B. Hydroxyl radical-based processes for decolourization of direct blue 71: A comparative study. Asian J Chem. 2011;23(10):411. [In persian]
25.Portjanskaja E, Preis S. Aqueous photocatalytic oxidation of lignin: the influence of mineral admixtures. Int J Photoenergy. 2007;2007.
26.Ghaneian M, Ehrampoush M, Ghanizadeh G, Dehvary M, Abootoraby M, Jasemizad T. Application of solar irradiation/K2S2O8 photochemical oxidation process for the Removal of reactive blue 19 dye fromaqueous solutions. IJHE. 2010;3(2):165-176.
27.Esrafili A, Rezaei Kalantary R, Azari A, Ahmadi E, Gholami M. Removal of diethyl phthalate from aqueous solution using persulfate-based (UV/Na2S2O8/Fe2+) advanced oxidation process. JMUMS. 2016;25(132):122-135.[In persian]
28.Lin H, Wu J, Zhang H. Degradation of bisphenol A in aqueous solution by a novel electro/$Fe^{3+}$/peroxydisulfate process. Sep Purif Technol. 2013;117:18-23.
29.RezaeiKalantary R, JonidiJafari A, Kakavandi B, Nasseri S, Ameri A, Azari A. Adsorption and magnetic separation of lead from synthetic wastewater using carbon/iron oxide nanoparticles composite. JMUMS. 2014;24(113):172-183.[In persian]
30.Muthirulan P, Meenakshisundararam M, Kannan N. Beneficial role of ZnO photocatalyst supported with porous activated carbon for the mineralization of alizarin cyanin green dye in aqueous solution. J Adv Res. 2013;4(6):479-84.
31.Kordkandi SA, Forouzesh M. Application of full factorial design for methylene blue dye removal using heat-activated persulfate oxidation. J Taiwan Inst Chem Eng. 2014;45(5):2597-604.
32.Mahmoodi NM, Arami M. Degradation and toxicity reduction of textile wastewater using immobilized titania nanophotocatalysis. J. Photochem. Photobiol. B, Biol. 2009;94(1):20-4.
33.Kuo W, Ho P. Solar photocatalytic decolorization of methylene blue in water. Chemosphere. 2001;45(1):77-83.
34.Asgari G, Seidmohammadi A, Bagheri M, Chavoshi S. Evaluating the efficiency of dye removal from textile industry wastewater using the titanium dioxide photocatalytic process under UV-LED light irradiation: A case study, Hamadan Nakh Rang Factory. Avicenna J Clin Med. 2017;24(2):143-51.
35.Seidmohammadi A, Asgari G, Torabi L. Removal of metronidazole using ozone activated persulfate from aqua solutions in presence of ultrasound. JMUMS. 2016;26(143):160-73.[In persian]
36.Amalraj A, Pius A. Photocatalytic degradation of alizarin red S and bismarck brown R using TiO2 photocatalyst. J Chem Appl Biochem. 2014;1(1):1-7.
37.Behnajady M, Modirshahla N, Hamzavi R. Kinetic study on photocatalytic degradation of CI Acid Yellow 23 by ZnO photocatalyst. J Hazard Mater. 2006;133(1-3):226-32.
38.Gu L, Wang J, Zou Z, Han X. Graphitic-C3N4-hybridized TiO2 nanosheets with reactive {0 0 1} facets to enhance the UV-and visible-light photocatalytic activity. J Hazard Mater. 2014;268:216-23.

[ Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-05 ]

[ DOI: 10.52547/sjku.26.3.52 ]