

## Original article

## Study of Efficiency of Photochemical Oxidation Process with UV/Peroxidisulfate for Removal of Alizarin Red S from Aqueous Solutions

Fariba Hafezi<sup>1</sup>  
Mohammad Amin Karami<sup>2</sup>  
Bahram Kamarehie<sup>2\*</sup>  
Ali Jafari<sup>1</sup>  
Mansoor Ghaderpoori<sup>2</sup>  
Mohammad Bazdar<sup>1</sup>  
Elahe Razipour<sup>1</sup>

- 1- BSc Student, Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Lorestan University of Medical Sciences, Khoranabad, Iran
- 2- Assistant Professor, Nutrition Health Research Center, Department of Environmental Health, School of Health and Nutrition, Lorestan University of Medical Sciences, Khoramabad, Iran

\*Corresponding author: Bahram Kamarehie, Nutrition Health Research Center, Department of Environmental Health, School of Health and Nutrition, Lorestan University of Medical Sciences, Khoramabad, Iran

Email: b.kamarehie@gmail.com

Received: 25 September 2016

Accepted: 20 December 2016

### ABSTRACT

**Introduction and purpose:** Treatment of dye wastewater produced by textile industries is a major challenge for the environment. About 15% of the total produced dyes in the world are released in sewages during dyeing activities. Alizarin red S (ARS), a synthetic dye produced from Alizarin sulfonate is the most widely used dye in the textile industry. The aim of this study was to remove ARS dye from aqueous solutions through advanced photochemical oxidation process using UV/peroxidedisulfate.

**Methods:** In this study, the effect of pH, concentration of persulfate, dye concentration, and UV radiation on removal of ARS were studied in laboratory scale using a reactor containing UV-C lamp (6 watts) by batch method. ARS concentration was determined by UV/Visible spectrophotometer.

**Results:** The results showed that removal efficiency increased by increasing the disulfate concentration, ultraviolet radiation intensity, and reaction time and decreased by increasing dye concentration and pH. The optimum condition was obtained at pH=7, peroxidisulfate concentration of 0.02 Mmol/L, and 50 mg/L dye concentration. Also, the ARS removal by UV/peroxidisulfate process follows a first-order kinetic.

**Conclusion:** Due to the high removal efficiency of this process in removing ARS (96.5%), use of this process can be a good choice in the treatment of dye and industrial wastewater.

**Keywords:** Advanced photochemical oxidation, ARS dye, UV/Peroxidisulfate, Textile wastewater, Wastewater treatment

► **Citation:** Hafezi F, Karami MA, Kamarehie B, Jafari A, Ghaderpoori M, Bazdar M, Razipour E. Study of Efficiency of Photochemical Oxidation Process with UV/Peroxidisulfate for Removal of Alizarin Red S from Aqueous Solutions. Journal of Health Research in Community. Autumn 2016;2(3): 12-22.

## مقاله پژوهشی

## بررسی کارایی فرآیند اکسیداسیون فتوشیمیایی اشعه ماورای بنفش با پراکسیددی سولفات در حذف رنگ Alizarin Reds از محلول های آبی

## چکیده

فریبا حافظی<sup>۱</sup>محمدامین کرمی<sup>۲</sup>بهرام کمرهئی<sup>۳</sup>علی جعفری<sup>۱</sup>منصور قادرپوری<sup>۲</sup>محمد بازدار<sup>۱</sup>الهه رضی پور<sup>۱</sup>

**مقدمه و هدف:** تصفیه پساب های رنگی حاصل از فعالیت صنایع نساجی، چالشی بزرگ برای محیط زیست می باشد. حدود ۱۵ درصد از کل تولیدات رنگ در جهان طی رنگرزی منسوجات در فاضلاب ها رها می شوند. آلزارین رد اس (ARS: Alizarin Red S) یکی از رنگ های مصنوعی است که از آلزارین سولفونات تولید شده و به طور گسترده ای در پساب صنایع نساجی یافت می شود. در این راستا، هدف از پژوهش حاضر، حذف رنگ ARS از محلول آبی با استفاده از روش اکسیداسیون فتوشیمیایی پیشرفته با کاربرد اشعه UV/پراکسیددی سولفات می باشد.

**روش کار:** در پژوهش حاضر اثر متغیرهای pH، غلظت پرسولفات، غلظت رنگ و اشعه UV در حذف ARS در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از یک راکتور حاوی لامپ UV با قدرت ۶ وات به روش ناپیوسته مورد مطالعه قرار گرفت. از دستگاه اسپکتوفوتومتر UV/Vis تک پرتویی نیز برای سنجش غلظت ARS استفاده شد. **یافته ها:** نتایج نشان داد که با افزایش غلظت دی سولفات، افزایش شدت تابش و زمان واکنش، بازده حذف افزایش و با افزایش غلظت رنگ و مقدار pH، بازده حذف کاهش یافت. شایان ذکر است که در پژوهش حاضر، pH برابر با ۷، غلظت پراکسیددی سولفات ۰/۰۲ میلی مول در لیتر و غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر به عنوان شرایط بهینه به دست آمد. همچنین، براساس نتایج مشخص شد که حذف ARS از سینتیک درجه اول پیروی می کند.

**نتیجه گیری:** با توجه به بازده بالای این روش در حذف رنگ ARS (۹۶/۵ درصد)، استفاده از آن می تواند گزینه مناسبی در تصفیه فاضلاب های رنگی و صنعتی باشد.

**کلمات کلیدی:** اکسیداسیون فتوشیمیایی پیشرفته، تصفیه فاضلاب، حذف رنگ ARS، فاضلاب نساجی، UV، پراکسیددی سولفات

۱. دانشجوی کارشناسی، مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی لرستان، خرم آباد، ایران  
۲. استادیار، مرکز تحقیقات بهداشت تغذیه، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و تغذیه، دانشگاه علوم پزشکی لرستان، خرم آباد، ایران

\* نویسنده مسئول: بهرام کمرهئی، مرکز تحقیقات بهداشت تغذیه، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و تغذیه، دانشگاه علوم پزشکی لرستان، خرم آباد، ایران

Email: b.kamarehie@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۴

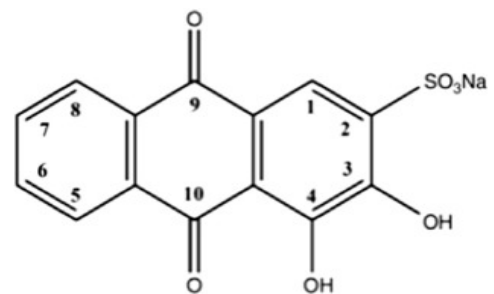
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۳۰

## مقدمه

ماهیت سمی دارند و منجر به ژنوتوکسیک، جهش زایی، سرطان و مرگ و میر می گردند [۲]. همچنین، آزادسازی پساب های رنگی به نهرها و بستر رودخانه ها، اثرات نامطلوبی بر کیفیت آب های زیرزمینی گذاشته و از نفوذ نور خورشید به رودخانه ها جلوگیری

پساب های رنگی حاصل از صنایع نساجی، یکی از مهم ترین منابع آلودگی های محیط زیستی به شمار می آیند [۱]. سالیانه بیش از یک میلیون تن رنگ های آلی تولید می گردند که ۱۵-۵ درصد از آن ها در محیط زیست تخلیه می شوند. بسیاری از این رنگ ها

می‌کند [۳،۴]. شایان توجه است که رنگ‌ها براساس ساختار شیمیایی گروه‌های عامل رنگی، به دسته‌های آزو، انتروکونیک، تریفنیل‌متان و پلیمریک تقسیم می‌شوند [۵]. در میان گروه‌های مختلف رنگ، آنتراکینون (حدود ۱۵ درصد) یکی از بزرگ‌ترین طبقات رنگ‌ها را تشکیل می‌دهند [۶]. رنگ آلزارین رد اس (ARS) که در این دسته قرار دارد، از آلزارین سولفونات گرفته شده و یک رنگ طبیعی می‌باشد که از گیاه روناس به دست می‌آید و قابلیت حل شدن در آب را دارد. شایان ذکر است که این رنگ از سه هزار سال قبل از میلاد شناخته شده است [۷]. آلزارین رد اس، یک رنگ اسیدی با فرمول  $C_{14}H_7NaO_7S$  و وزن مولکولی  $342/26$  گرم بر مول است که به عنوان عامل رنگ‌زا، به صورت گسترده در صنعت نساجی استفاده می‌شود [۸]. ساختار شیمیایی ARS در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار شیمیایی ARS [۸]

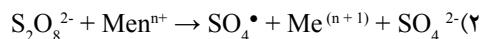
رنگ‌های آنتراکینون مانند ARS، آلاینده‌های مقاوم و ناسازگاری هستند که به دلیل مشکلات زیست-محیطی و موارد اقتصادی، حذف آن‌ها از فاضلاب‌های صنایع، امری حیاتی و مهم می‌باشد [۹،۱۰].

از جمله روش‌هایی که برای حذف رنگ از فاضلاب استفاده می‌شود، می‌توان به فرآیندهای زیستی، فرآیندهای ترکیبی شیمیایی و زیستی، اکسیداسیون شیمیایی، جذب، انعقاد و فرآیندهای غشایی

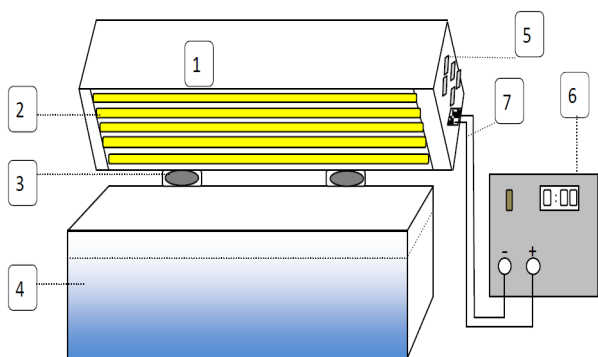
اشاره کرد که هر کدام دارای مزایا و معایب متفاوتی می‌باشند [۶]. فرآیندهای زیستی به دلیل مقاومت رنگ‌ها به تجزیه پذیری زیستی، در تصفیه فاضلاب‌های رنگی کارایی چندانی ندارند [۱۱]. همچنین، روش‌هایی مانند جذب و انعقاد توسط عوامل شیمیایی، به دلیل انتقال ماده رنگ‌زا از فاز محلول به فاز جامد باعث ایجاد آلودگی‌های ثانویه می‌گردند [۲]. امروزه، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به منظور حذف رنگ از فاضلاب‌های رنگی بکار برده می‌شوند که در اغلب این فرآیندها، مولکول‌های ماده رنگ‌زا حذف و تجزیه می‌گردند [۳]. لازم به ذکر است که فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به دلیل سادگی، هزینه پایین، بازده بالا و عدم تولید مقادیر زیاد لجن، یکی از تکنولوژی‌های مؤثر برای حذف اکثر آلاینده‌ها محسوب می‌شوند [۱۲،۱۳].

تکنولوژی اکسیداسیون پیشرفته، براساس تولید گونه‌های اکسیدکننده قوی و بیشتر رادیکال‌های سولفات عمل می‌کند که دارای پتانسیل اکسیدکنندگی در حدود  $2/06$  ولت است که بسیار بیشتر از اکسیژن می‌باشد [۱۴].

مطالعات نشان داده‌اند که رادیکال سولفات ناشی از فعال‌سازی یون‌های سولفات و دی‌سولفات، تحت تأثیر عوامل فعال‌کننده مانند گرما، تابش اشعه ماورای بنفش (UV) و یون‌های فلزی می‌باشد (رابطه‌های ۱ و ۲) [۱۵].



رادیکال‌های سولفات که از نمک‌های پرسولفات سدیم ( $Na_2S_2O_8$ )، آمونیوم و پتاسیم تهیه می‌شوند [۱۵]، به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون قدرت اکسندگی بالا، واکنش‌پذیری غیرگزینشی، پایداری، حلالیت بالا و ارزانی، به عنوان یک اکسیدکننده قوی در صنایع مطرح شده‌اند [۱۶]. همچنین، مزیت‌های رادیکال‌های سولفات، آن‌ها را به عنوان عاملی مؤثر



شکل ۲: تصویر راکتور و تجهیزات مورد استفاده شامل: درپوش چوبی مکعبی، لامپ‌های UV، راکتور شیشه‌ای با پوشش آلومینیومی، کلید قطع و وصل لامپ‌ها، منبع نیرو و کابل‌های اتصال

کل راکتور با ورق آلومینیومی پوشش داده شده بود. در شکل ۲، تصویری از راکتور مورد استفاده نشان داده شده است.

محلول استوک به وسیله حل کردن ۱ گرم رنگ ARS در ۱ لیتر آب مقطر ساخته شد و غلظت‌های مورد استفاده نیز از راه رقیق‌سازی متوالی محلول استوک تهیه گردید. جهت تنظیم pH از محلول‌های ۰/۱ نرمال اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم استفاده شد. ذکر این نکته ضرورت دارد که از روش تأثیر یک متغیر در هر زمان برای بررسی اثر پارامترهای مختلف pH، دز پراکسی‌دی‌سولفات، زمان تماس، غلظت رنگ و تعداد لامپ UV در پنج مرحله مجزا بر بازده حذف ARS با میانگین سه‌بار تکرار در هر مرحله استفاده شد و همچنین محاسبه بازده حذف با کمک معادله ۳ صورت گرفت.

$$R\% = [(C_0 - C_t) / C_0] \times 100 \quad (3)$$

در این معادله که  $C_0$  غلظت اولیه رنگ و  $C_t$  غلظت رنگ در هر لحظه می‌باشد، سنتیک حذف رنگ ARS توسط فرآیند UV/Peroxodisulfate در محدوده زمانی ۰ تا ۶۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های درجه صفر، یک و دو جهت بررسی سنتیک واکنش استفاده گردید. در ادامه، به منظور ترسیم

در حذف رنگ‌ها و ترکیبات غیرقابل تجزیه از پساب‌های صنایع مطرح کرده است. لازم به ذکر است که پژوهش‌های زیادی در این ارتباط صورت گرفته و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شده است [۱۷-۱۹].

این پژوهش نیز در همین راستا و با هدف استفاده از فرآیند UV/Peroxodisulfate برای تولید رادیکال سولفات به منظور حذف و تجزیه رنگ آلیزارین رد اس از محلول‌های آبی صورت گرفت که نوآوری آن، استفاده از رادیکال‌های سولفات تولید شده برای اکسیداسیون و حذف رنگ آلیزارین رد اس بود. علاوه بر این، در پژوهش حاضر اثر متغیرهای مختلفی مانند pH، غلظت رنگ، غلظت پرسولفات و اشعه UV و نیز سنتیک‌های مختلف حذف رنگ مورد بررسی قرار گرفتند.

## روش کار

### مواد و تجهیزات

مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش شامل: سدیم پرسولفات، اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم بود که از شرکت Merck کشور آلمان تهیه گردید. لامپ UV ۶ وات نیز از شرکت Philips board کشور آلمان خریداری شد. علاوه بر این، به منظور سنجش غلظت ARS، دستگاه اسپکتوفتومتر UV/Vis تک‌پرتوی (مدل SQ2800، ساخت آمریکا) با طول موج ۲۶۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت.

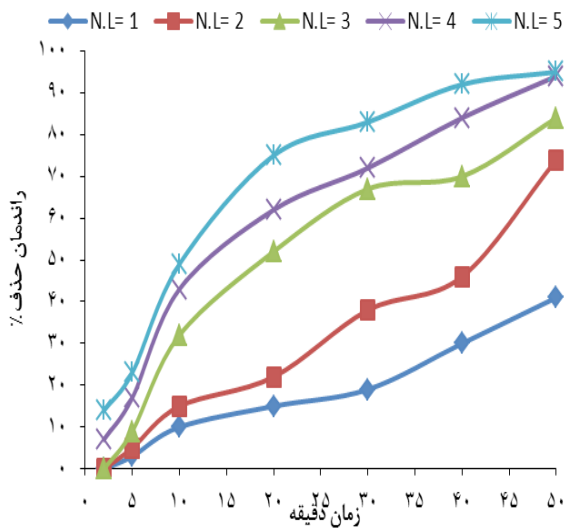
### روش کار

پژوهش حاضر از نوع مطالعات کاربردی بود که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. جهت انجام این پژوهش، یک دستگاه راکتور به ابعاد ۱۵×۳۰×۵ سانتی‌متر از جنس استیل متشکل از دو بخش (محفظه فرآیندی به حجم مفید ۱ لیتر و درپوش مجهز به ۵ لامپ UV ۶ وات) طراحی و استفاده شد. شایان ذکر است که

ها بیشتر بود؛ از این رو، محدوده ۷ به عنوان pH مناسب برای انجام مراحل بعدی مطالعه انتخاب گردید.

### اثر تابش UV

اثر اشعه UV در حذف رنگ در فرآیند UV/پراکسیددی سولفات در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان طور که در نمودار ۲ مشاهده می شود، با افزایش تعداد لامپ UV و به تبع آن اشعه UV، بازده حذف رنگ افزایش پیدا می کند.



نمودار ۲: اثر تابش UV در حذف رنگ ARS (غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر، pH=۷ و غلظت پراسولفات ۰/۰۲ مول)

### تأثیر غلظت پراکسیددی سولفات

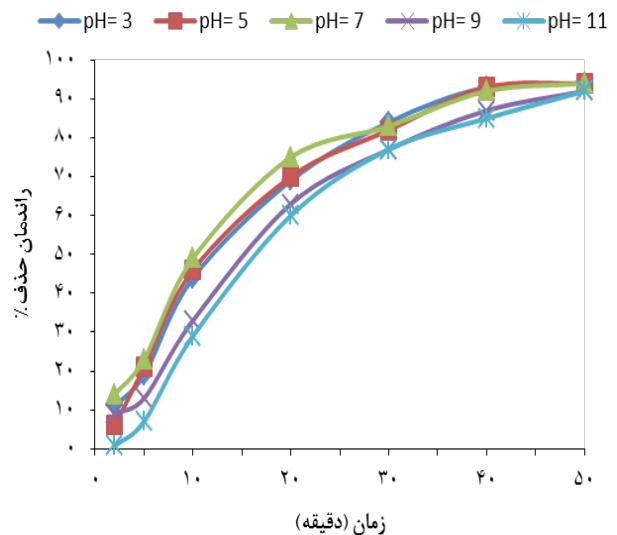
اثر پراکسیددی سولفات در بازده حذف رنگ ARS در نمودار ۳ نشان داده شده است. مطابق با شکل، با افزایش غلظت پراکسیددی سولفات از ۰/۰۵ تا ۰/۰۲ مولار، میزان حذف رنگ افزایش می یابد؛ اما، با افزایش غلظت پراکسیددی سولفات به بیش از ۰/۰۲ مول بر لیتر، میزان حذف رنگ نسبت به مقادیر بالاتر تغییر

مدل سینتیکی درجه صفر، یک و دو به ترتیب پارامترهای C،  $\ln(C/C_0)$  و  $1/C$  در مقابل زمان رسم شد. قابل توجه است که شیب خط در این نمودارها، نشان دهنده سرعت واکنش می باشد. همچنین، به منظور تعیین تطبیق بهترین مدل با داده های حاصل، ضریب رگرسیون همبستگی ( $R^2$ ) مورد استفاده قرار گرفت و تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار Excel انجام شد.

### یافته ها

#### pH اثر

pH یکی از فاکتورهای مهم در فرآیندهای اکسیداسیون مواد آلی می باشد. نتایج حاصل از اثر pH بر کارایی حذف ARS در فرآیند UV/Peroxodisulfate در نمودار ۱ نشان داده شده است. مطابق با نمودار، اختلاف بازده حذف در pH های ۳، ۵ و ۷، کمتر از ۵ درصد بوده و در زمان واکنش ۵۰ دقیقه، حداکثر بازده حذف در هر سه محدوده pH به ۹۴ درصد رسیده است. شایان ذکر است که در پایان زمان آزمایش، بازده حذف در pH=۷ از سایر pH

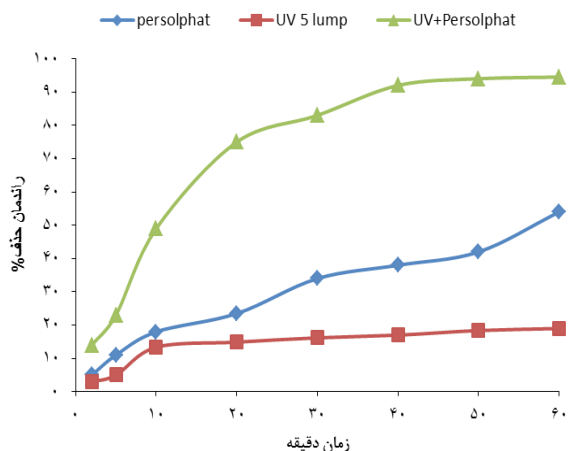


نمودار ۱: اثر pH بر بازده حذف رنگ ARS (غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر، ۵ عدد لامپ UV ۳۰ وات و پراکسیددی سولفات ۰/۰۲ مول)

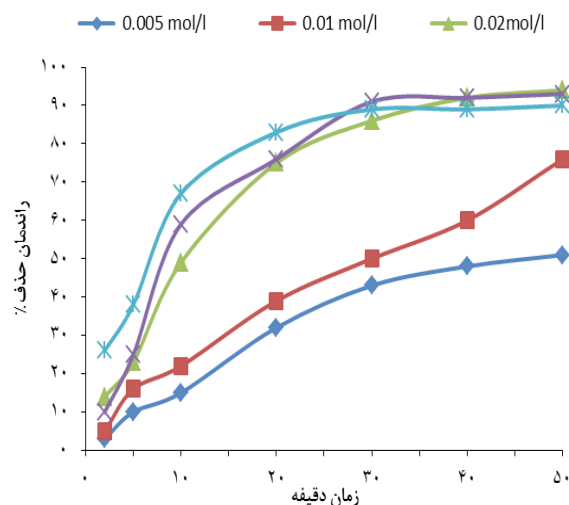
شده است. مطابق با نمودار، با افزایش غلظت رنگ، بازده حذف آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داشته است. نتایج نشان می‌دهند که اختلاف بازده حذف بین غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی گرم در لیتر در رنگ و زمان ۴۰ تا ۵۰ دقیقه ناچیز بود؛ اما غلظت‌های ۷۵ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، تأثیر کاهشی محسوسی در بازده حذف داشت؛ از این رو، غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر رنگ ARS به عنوان غلظت مناسب برای انجام مراحل بعدی انتخاب گردید.

### تأثیر هم‌افزایی UV و پرسولفات

بازده حذف رنگ ARS در حضور پراکسیددی‌سولفات تنها، اشعه UV تنها و فرآیند ترکیبی اشعه UV / پراکسیددی‌سولفات در نمودار ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت چشمگیری در میزان حذف رنگ ARS در حضور اشعه UV و نیز پراکسیددی‌سولفات و UV تنها وجود ندارد؛ درحالی که در سیستم ترکیبی اشعه UV / پراکسیددی‌سولفات در مدت زمان ۶۰ دقیقه، حذف رنگ به ۹۴/۵ درصد رسیده است. قابل ذکر است که میزان هم‌افزایی در زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب ۷، ۱۷/۶، ۳۶/۸، ۳۲/۸، ۳۷ و ۲۱/۵ درصد می‌باشد.



نمودار ۵: تأثیر UV بر بازده حذف رنگ ARS در فرآیندهای مختلف (غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر، ۵ عدد لامپ UV ۳۰ وات و پراکسیددی‌سولفات ۰/۰۲ مول)

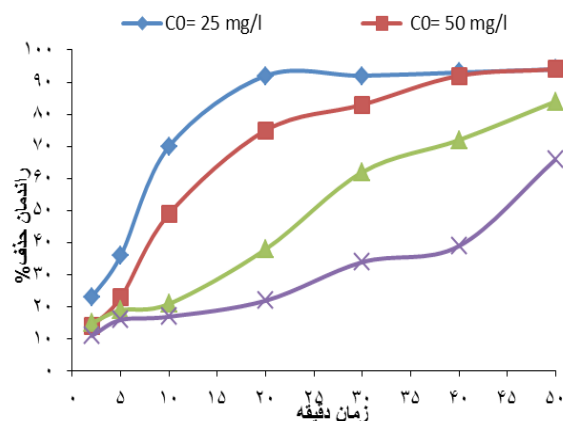


نمودار ۳: تأثیر پراکسیددی‌سولفات بر بازده حذف رنگ ARS (غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر، pH=۷ و ۵ عدد لامپ)

محسوسی را نشان نمی‌دهد؛ بنابراین، غلظت ۰/۰۲ مول بر لیتر پراکسیددی‌سولفات به عنوان غلظت مناسب برای انجام مراحل بعدی کار انتخاب گردید.

### تأثیر غلظت رنگ ARS

اثر غلظت رنگ ARS بر بازده حذف در نمودار ۴ نشان داده

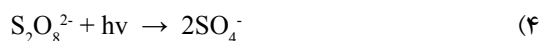


نمودار ۴: تأثیر غلظت رنگ ARS بر بازده حذف آن (غلظت پراکسیددی‌سولفات ۰/۰۲ مول، pH=۷ و ۵ عدد لامپ)

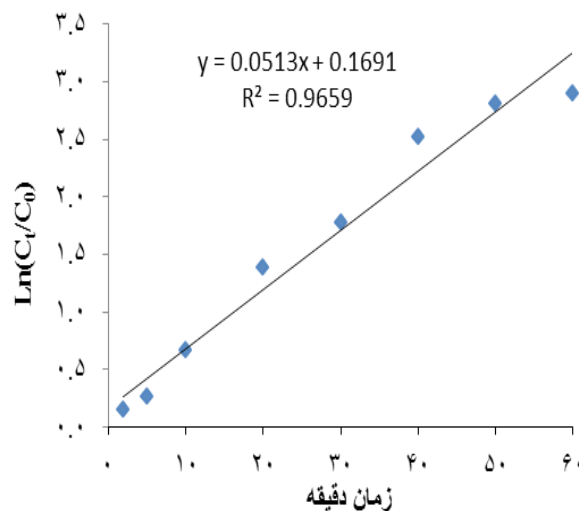
این ارتباط، مطالعات مختلف نتایج متفاوتی را گزارش کرده‌اند. در پژوهشی که توسط Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام شد، یافته‌ها بیانگر این بود که تولید رادیکال سولفات از PMS در شرایط pH خنثی بیشتر است [۲۰]. همچنین، عسگری و همکاران در پژوهشی به بررسی تأثیر همزمان امواج مایکروویو و سولفات در حذف پنتاکلروفنل از فاضلاب سنتتیک پرداختند. نتایج نشان داد که در pH قلیایی، بازده حذف بیشتر است [۲۱]. Wang و همکاران نیز در مطالعه تخریب اکسایشی محلول ترامتیل آمینو هیدروکسید با استفاده از فرآیند UV/پرسولفات نشان دادند که بازده حذف در pH اسیدی بیشتر می‌باشد [۲۲].

در مطالعه حاضر، با افزایش تعداد لامپ‌ها، بازده حذف بیشتر شد. این پدیده بدین صورت توجیه می‌گردد که با افزایش تعداد لامپ UV، شدت تابش نور UV به نمونه مورد آزمایش بیشتر شده و در نتیجه، تعداد رادیکال‌های سولفات تولیدشده بیشتر گردیده و بازده حذف رنگ افزایش یافته است [۲۳]. این نتایج با یافته‌های خطایی و همکاران و سالاری و همکاران در ارتباط با حذف رنگ blue CI، همخوانی دارد [۲۴، ۲۵].

با افزایش غلظت ماده اکسیدکننده، میزان حذف ARS افزایش یافت. رادیکال سولفات طبق رابطه ۴ توسط آنیون پرسولفات تولید می‌گردد [۲۶].



در غلظت‌های بالاتر اکسیدان پرسولفات، سرعت واکنش و میزان حذف به دلیل افزایش غلظت رادیکال‌های آزاد افزایش می‌یابد [۲۷]. در مراحل اولیه تجزیه ARS، رادیکال سولفات که توانایی بالایی در حذف رنگ دارد، بر اثر اشعه UV تولید می‌شود. قابل ذکر است که افزایش غلظت عامل اکسیدکننده تا مقدار معینی می‌تواند سرعت واکنش را افزایش دهد. در این مطالعه مشاهده شد، با افزایش غلظت پراکسیددی سولفات به بیش



نمودار ۶: سینتیک حذف رنگ ARS توسط فرآیند UV/Peroxodisulfate (غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر، pH=۷، غلظت پرسولفات ۰/۰۲ مول و ۵ عدد لامپ ۳۰ وات)

#### سینتیک واکنش حذف رنگ ARS در فرآیند UV/پراکسیددی سولفات

به منظور بررسی سرعت حذف رنگ ARS از محلول‌های آبی با استفاده از فرآیند UV/Peroxodisulfate، سینتیک‌های حذف رنگ در مقادیر مناسب متغیرها مطالعه گردید. بررسی‌ها نشان داد که سرعت واکنش حذف رنگ در این فرآیند، بیشتر از سینتیک درجه اول پیروی می‌کند. در نمودار ۶، نمودار سینتیک واکنش نشان داده شده است.

#### بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، حذف رنگ ARS در pH خنثی بیشتر بود. به نظر می‌رسد گونه  $HSO_4^-$  که ناشی از تجزیه پرسولفات می‌باشد، تنها در pH های خنثی غالب است و حذف بیشتر رنگ در pH خنثی را می‌توان به این پدیده نسبت داد. در



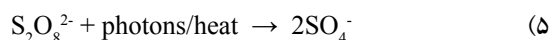
مشابهی را گزارش کرده‌اند [۳۱-۲۹]. علاوه بر این، کاهش حذف رنگ ARS را می‌توان به افزایش تعداد مولکول‌های رنگی به موازات افزایش غلظت رنگ و نیز آنیون‌های غیر آلی ناشی از تجزیه رنگ که برای جذب رادیکال‌های آزاد رقابت می‌کنند، نسبت داد. در این راستا، موسوی و همکاران و Siddique و همکاران نتایج مشابهی را به ثبت رسانده‌اند [۳۲، ۷].

با توجه به نتایج مطالعه حاضر، UV و پراکسیددی‌سولفات تنها، تأثیر ناچیزی بر حذف رنگ دارند؛ اما فرآیند ترکیبی UV/پراکسیددی‌سولفات به دلیل تولید و فعال‌سازی رادیکال سولفات و به تبع آن اکسید، تغییر ساختار و حذف رنگ، اثر هم‌افزایی بسیار زیادی بر بازده حذف داشته؛ به طوری که به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای بازده حذف را افزایش داده است [۲۴]. علاوه بر این، در پژوهشی که اسرافیلی و همکاران برای حذف دی‌اتیل فتالات از محلول‌های آبی با فرآیند اکسیداسیون پیشرفته بر پایه سولفات انجام دادند، مشخص شد که بازده حذف دی‌اتیل فتالات در حضور اشعه UV، افزایش چشمگیری داشته است [۲۶]. یافته‌های Astereki و همکاران در مورد حذف دی‌کلرو فنل با استفاده از فرآیند UV/پرسولفات نیز تأییدکننده هم‌افزایی بسیار زیاد اشعه UV و پرسولفات بر بازده حذف می‌باشد [۱۹].

نتایج نشان می‌دهد که حذف رنگ ARS، از واکنش درجه اول پیروی می‌کند و ثابت سرعت واکنش بر پایه غلظت ARS برابر با ۰/۰۵۱ بر دقیقه تعیین شد. در این راستا، Amalraj و Pius در پژوهشی، نتایج مشابهی در مورد تجزیه فتوکاتالیتیکی ARS و BBR با استفاده از فتوکاتالیست  $TiO_2$  به دست آوردند؛ از این رو، با استفاده از رابطه ۱۰ می‌توان تغییر غلظت و بازده حذف رنگ ARS در فرآیند UV/Peroxodisulfate را برآورد کرد [۳۳].

$$\ln(C/C_0) = -0.058t \quad (10)$$

از ۰/۰۲ مول بر لیتر، میزان حذف رنگ نسبت به مقادیر بالاتر تغییر محسوسی نمی‌یابد. این مسأله را می‌توان بدین صورت توجیه کرد که افزایش غلظت پراکسیددی‌سولفات با توجه به واکنش ۵ و ۶، موجب افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در اثر فرآیند فتولیز می‌گردد. افزایش غلظت رادیکال‌های هیدروکسیل نیز منجر به بازتولید پراکسید هیدروژن (با توجه به معادله ۷ و ۸) شده و در نتیجه، با کاهش رادیکال‌های هیدروکسیل در محیط، از میزان حذف رنگ کاسته می‌شود. همچنین، با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن بر اساس واکنش ۹، خود پراکسید هیدروژن به صورت روبشگر رادیکال هیدروکسیل عمل کرده و از غلظت آن در محیط می‌کاهد؛ بنابراین، درصد حذف رنگ‌ها تا حدودی کاهش پیدا می‌کند [۲۸].



این نتایج با یافته‌های پژوهش اسرافیلی و همکاران که از فرآیند اکسیداسیون پیشرفته بر پایه سولفات جهت حذف دی‌اتیل فتالات از محلول‌های آبی استفاده کرده بودند، مطابقت دارد [۲۶].

در مطالعه حاضر، با افزایش غلظت رنگ به بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، بازده حذف رنگ کاهش یافت؛ زیرا، غلظت بالای رنگ از نفوذ نور ماورای بنفش به عمق محلول جلوگیری کرده و در واقع، شبیه به یک فیلتر نور عمل می‌کند و موجب کاهش سرعت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌گردد؛ در نتیجه، به دلیل ناکافی بودن عامل اکسنده و محدود شدن مقدار آن، سرعت تخریب رنگ کاهش یافته و از بازده حذف، کاسته می‌شود. مطالعات صورت گرفته دیگر در این مورد، نتایجی



برای کاهش مصرف پرسولفات اولیه و خنثی‌سازی محلول نهایی طی پژوهش‌های آتی حاصل گردد، می‌تواند به‌عنوان روشی ارزان و کارآمد در تصفیه فاضلاب‌های رنگی بکار رود.

### قدردانی

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی شماره ۱-۱۵۷۶-۱۰-A مصوب در کمیته تحقیقات دانشجویی دانشکده بهداشت و تغذیه دانشگاه علوم پزشکی لرستان می‌باشد؛ از این رو، نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی و تجهیزاتی دانشگاه علوم پزشکی لرستان، به‌ویژه دانشکده بهداشت تشکر و قدردانی نمایند.

شایان ذکر است که در این رابطه،  $C_0$  و  $C$  به ترتیب غلظت اولیه و غلظت در زمان  $t$  رنگ بر حسب میلی‌گرم در لیتر بوده و  $t$ ، زمان واکنش بر حسب دقیقه است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میزان حذف ماده رنگ‌زا در فرآیند ترکیبی اشعه UV/ پراکسیددی‌سولفات، با کاهش غلظت رنگ و افزایش تعداد لامپ UV و تا حد معینی افزایش غلظت پراکسیددی‌سولفات افزایش می‌یابد؛ اما کارایی عوامل تابش UV و پراکسیددی‌سولفات به‌تنهایی مطلوب نمی‌باشد؛ زیرا، آن‌ها به‌تنهایی قادر نیستند انرژی لازم برای اکسید رنگ و یا عوامل اکسیدکننده مانند رادیکال سولفات و یا هیدروکسیل را به مقدار لازم تولید نمایند. در مجموع، سیستم ترکیبی UV/ پراکسیددی‌سولفات می‌تواند روش مؤثری در حذف رنگ و سایر ترکیبات مقاوم از فاضلاب باشد و اگر روش مناسبی

### References

- Albadarin AB, Mangwandi C. Mechanisms of alizarin red S and methylene blue biosorption onto olive stone by-product: Isotherm study in single and binary systems. *J Environ Manag* 2015; 164:86-93.
- Behnajady MA, Modirshahla N, Shokri M. Photodestruction of acid orange 7 (AO7) in aqueous solutions by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: influence of operational parameters. *Chemosphere* 2004; 55(1):129-34.
- Hisaindee S, Meetani MA, Rauf MA. Application of LC-MS to the analysis of advanced oxidation process (AOP) degradation of dye products and reaction mechanisms. *Trends Anal Chem* 2013; 49:31-44.
- Goel NK, Kumar V, Misra N, Varshney L. Cellulose based cationic adsorbent fabricated via radiation grafting process for treatment of dyes waste water. *Carbohydr Polym* 2015; 132:444-51.
- Fan L, Zhang Y, Li X, Luo C, Lu F, Qiu H. Removal of alizarin red from water environment using magnetic chitosan with alizarin red as imprinted molecules. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2012; 91:250-7.
- Yang XQ, Zhao XX, Liu CY, Zheng Y, Qian SJ. Decolorization of azo, triphenylmethane and anthraquinone dyes by a newly isolated *Trametes* sp. SQ<sub>01</sub> and its laccase. *Proc Biochem* 2009; 44(10):1185-9.
- Moussavi G, Mahmoudi M. Removal of azo and anthraquinone reactive dyes from industrial wastewaters using MgO nanoparticles. *J Hazard Mater* 2009; 168(2):806-12.
- Zucca P, Vinci C, Sollai F, Rescigno A, Sanjust E. Degradation of alizarin reds under mild experimental conditions by immobilized 5,10,15,20-tetrakis (4-sulfonatophenyl) porphine-Mn(III) as a biomimetic peroxidase-like catalyst. *J Mol Catal A Chem* 2008; 288(1):97-102.
- Rounaghi GH, Razavipanah I, Vakili-Zarch MH, Ghanei-Motlagh M, Salavati MR. Electrochemical synthesis of Alizarin Red S doped polypyrrole and its applications in designing a novel silver (I) potentiometric and voltammetric sensor. *J Mol Liq* 2015; 211:210-6.
- Sun J, Lu H, Du L, Lin H, Li H. Anodic oxidation of

- anthraquinone dye alizarin reds at Ti/BDD electrodes. *Appl Surf Sci* 2011; 257(15):6667-71.
11. Erdem E, Colgeçen G, Donat R. The removal of textile dyes by diatomite earth. *J Colloid Interface Sci* 2005; 282(2):314-9.
  12. Robinson T, McMullan G, Marchant R, Nigam P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour Technol* 2001; 77(3):247-55.
  13. Hammad Khan M, Jung JY. Ozonation catalyzed by homogeneous and heterogeneous catalysts for degradation of DEHP in aqueous phase. *Chemosphere* 2008; 72(4):690-6.
  14. Karunakaran C, Anilkumar P, Manikandan G, Gomathisankar P. Solar-powered potentially induced TiO<sub>2</sub>, ZnO and SnO<sub>2</sub>-catalyzed iodine generation. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2010; 94(5):900-6.
  15. Yang S, Wang P, Yang X, Shan L, Zhang W, Shao X, et al. Degradation efficiencies of azo dye Acid Orange 7 by the interaction of heat, UV and anions with common oxidants: Persulfate, peroxymonosulfate and hydrogen peroxide. *J Hazard Mater* 2010; 179(1):552-8.
  16. Shukla PR, Wang S, Sun H, Ang HM, Tade M. Activated carbon supported cobalt catalysts for advanced oxidation of organic contaminants in aqueous solution. *Appl Catal B Environ* 2010; 100(3):529-34.
  17. Panbehkar Bishe M, Ayati B. The effect of Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> oxidant on improving the efficiency of photo-catalytic process of nano-TiO<sub>2</sub> immobilized on concrete in DB71 removal. *Iran J Health Environ* 2014; 7(1):105-14 (Persian).
  18. Ghaneian MT, Ehrampoush MH, Ghanizadeh GH, Dehvary M, Abootoraby M, Jasemizad T. Application of solar irradiation/K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> photochemical oxidation Process for the removal of reactive blue 19 dye from Aqueous solutions. *Iran J Health Environ* 2010; 3(2):165-76 (Persian).
  19. Astereki S, Kamarehie B, Jafari A. 2-chlorophenol removal of aqueous solution using advanced oxidation processes resulting from iron/persulfate and ultra violet/persulfate. *Iran J Toxicol* 2016; 10(4):1-8.
  20. Zhang T, Zhu H, Croué JP. Production of sulfate radical from peroxymonosulfate induced by a magnetically separable CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel in water: efficiency, stability, and mechanism. *Environ Sci Technol* 2013; 47(6):2784-91.
  21. Asgari G, Chavoshani A, Seid-Mohammadi A, Rahmani A. Removal of pentachlorophenol using microwave assisted persulfate from synthetic wastewater. *J Water Waste* 2013; 25(3):29-37. (Persian)
  22. Yang S, Wang P, Yang X, Wei G, Zhang W, Shan L. A novel advanced oxidation process to degrade organic pollutants in wastewater: microwave-activated persulfate oxidation. *J Environ Sci* 2009; 21(9):1175-80.
  23. Lin YT, Liang C, Chen JH. Feasibility study of ultraviolet activated persulfate oxidation of phenol. *Chemosphere* 2011; 82(8):1168-72.
  24. Khataee AR, Mirzajani O. UV/peroxydisulfate oxidation of CI Basic Blue 3: modeling of key factors by artificial neural network. *Desalination* 2010; 251(1):64-9.
  25. Salari D, Niaei A, Aber S, Rasoulifard MH. The photooxidative destruction of CI Basic Yellow 2 using UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process in a rectangular continuous photoreactor. *J Hazard Mater* 2008; 166(1):61-6.
  26. Esrafil A, Rezaei Kalantary R, Azari A, Ahmadi E, Gholami M. Removal of diethyl phthalate from aqueous solution using persulfate-based (UV/Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>/Fe<sup>2+</sup>) advanced oxidation process. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2016; 25(132):122-35 (Persian).
  27. Shih YJ, Putra WN, Huang YH, Tsai JC. Mineralization and defluorization of 2,2,3,3-tetrafluoro-1-propanol (TFP) by UV/persulfate oxidation and sequential adsorption. *Chemosphere* 2012; 89(10):1262-6.
  28. Watts R, Teel A. Treatment of contaminated soils and groundwater using ISCO. *Pract Period Hazard Toxic Radio Waste Manag* 2006; 10(1):2-9.
  29. Devi L, Kumar S, Reddy K. Photo fenton like process Fe<sup>3+</sup>/(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>/UV for the degradation of Di azo dye congo red using low iron concentration. *Open Chem* 2009; 7(3):468-77.
  30. Anipsitakis GP, Dionysiou DD. Transition metal/UV-based advanced oxidation technologies for water decontamination. *Appl Catal B Environ* 2004; 54(3):155-63.
  31. Gu L, Wang J, Zou Z, Han X. Graphitic-C 3 N 4-hybridized TiO<sub>2</sub> nanosheets with reactive facets to enhance the UV-and visible-light photocatalytic activity. *J Hazard Mater* 2014; 268:216-23.
  32. Siddique M, Siddique M, Farooq R, Khan ZM, Khan Z, Shaikat SF. Enhanced decomposition of reactive blue 19 dye in ultrasound assisted electrochemical reactor. *Ultrason Sonochem* 2011; 18(1):190-6.

33. Amalraj A, Pius A. Photocatalytic degradation of alizarin red S and bismarck brown R using  $\text{TiO}_2$  photocatalyst. J Chem Appl Biochem 2014; 1(1):1-7.