

Performance Evaluation of a Rotary Photoreactor with Linear LED Sources for Removing Organic Dye Pollutants via Persulfate Activation, Monitoring Intermediates, and Optimizing Operational Parameters

Seyedeh Narges Saedi¹, Mohammad Hossein Rasoulifard^{2*}, Mir Saeed Seyed Dorraji¹, Rahmatollah Pourata¹, Negar Sehati³

1- Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Zanjan, P. O. Code: 4537138791, Zanjan, Iran.

2- Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, P. O. Code: 5166614769, Tabriz, Iran.

3- Health and Environment Research Center (HERC), Tabriz University of Medical Sciences, P. O. Code: 5166614711, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30-07-2025

Accepted: 27-09-2025

Available online: 15-06-2026

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: [10.30509/jscw.2025.167616.1252](https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167616.1252)

Keywords:

Rotary photoreactor

LED activation

Advanced oxidation processes (AOPs)

Basic Red 46

Persulfate

Intermediate products (GC-MS analysis)

ABSTRACT

In this study, a custom-designed rotary photoreactor equipped with LED light and activated persulfate was employed to remove the persistent dye Basic Red 46 from aqueous solutions. Key operational parameters including initial dye concentration, persulfate dosage, cylinder rotation speed, and light source position were investigated. The results demonstrated that lower dye concentrations, increased persulfate dosage up to 50 mM, a moderate rotation speed (6 rpm), and positioning the LED on the left side of the reactor significantly enhanced removal efficiency. Kinetic analysis confirmed that the degradation process followed a pseudo-first-order model. TOC analysis showed a considerable reduction in organic content, indicating effective breakdown of the dye structure. Furthermore, GC-MS analysis identified intermediate compounds with simpler structures confirming the mineralization of the dye. These findings clearly demonstrate the high efficiency of the LED/persulfate system in degrading resistant dye pollutants and highlight its potential for sustainable industrial wastewater treatment.



بررسی کارایی راکتور نوری چرخان با منابع نوری خطی LED در حذف آلاینده‌های آلی رنگزا با فعال‌سازی پرسولفات پایش محصولات حدواسط و بهینه‌سازی عوامل عملیاتی

سیده نرگس سعیدی^۱، محمدحسین رسولی فرد^{۲*}، میر سعید سیددراجی^۳، رحمت‌الله پورعطا^۴، نگار صحتی^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، کدپستی: ۴۵۳۷۱۳۸۷۹۱.

۲- استاد، گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، کدپستی: ۵۱۶۶۶۱۴۷۶۹.

۳- دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، کدپستی: ۴۵۳۷۱۳۸۷۹۱.

۴- استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، کدپستی: ۴۵۳۷۱۳۸۷۹۱.

۵- دکتری، مرکز تحقیقات سلامت و محیط‌زیست (HERC)، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران، کدپستی: ۵۱۶۶۶۱۴۷۱۱.

چکیده

در این مطالعه، از یک راکتور نوری چرخان طراحی شده مجهز به پرتو LED و فعال‌سازی پرسولفات برای حذف رنگزای بازیگ رد ۴۶ از محلول‌های آبی استفاده شد. عوامل کلیدی عملیاتی شامل غلظت اولیه رنگزا، مقدار پرسولفات، سرعت چرخش استوانه و محل قرارگیری منبع نور بررسی شدند. نتایج نشان دادند که کاهش غلظت رنگزا، افزایش غلظت پرسولفات تا ۵۰ میلی‌مولار، سرعت چرخش متوسط (۶ rpm) و قراردادن منبع نور در سمت چپ راکتور منجر به بهینه‌سازی عملکرد حذف شدند. تحلیل سینتیکی تطابق داده‌ها با مدل شبه مرتبه اول را تأیید کرد. آزمون TOC نیز کاهش چشم‌گیر بار آلی محلول را نشان داد که گواهی بر تخریب مؤثر ساختار رنگزا بود. همچنین، آزمون GC-MS شناسایی ترکیبات حدواسط با ساختارهای ساده‌تر را نشان داد که روند معدنی‌سازی رنگ را تأیید می‌کند. نتایج به‌روشنی کارایی بالای سیستم LED/پرسولفات در حذف مؤثر آلاینده‌های رنگی مقاوم و پتانسیل آن را در تصفیه پایدار پساب‌های صنعتی اثبات می‌کنند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167616.1252

واژه‌های کلیدی:

راکتور نوری چرخان

فعال‌سازی با LED

فرایندهای اکسایش پیشرفته

رنگزای قرمز بازیگ ۴۶

پرسولفات

محصولات حدواسط (تحلیل GC-MS)

۱- مقدمه

آلودگی منابع آبی ناشی از رنگزاهای مصنوعی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر محسوب می‌شود. رنگزاهای سنتزی مانند رنگزای بازیگ رد ۴۶ (BR 46) که در صنایع مختلف نظیر نساجی، چرم‌سازی و رنگرزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ترکیباتی پایدار، مقاوم به تجزیه زیستی و اغلب دارای ساختارهای پیچیده آروماتیک هستند. حضور این رنگزاهای در پساب‌ها، نه تنها منجر به ایجاد رنگ نامطلوب در منابع آبی می‌شود، بلکه می‌تواند با مهار فوتوسنتز در محیط‌های آبی و تولید ترکیبات سمی، به اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان آسیب برساند (۱-۳).

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای حذف رنگزاهای پساب‌ها توسعه یافته‌اند که شامل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی می‌شود. در میان این روش‌ها، فناوری‌های اکسایش پیشرفته (AOPs) به دلیل توانایی بالا در معدنی‌سازی ترکیبات آلی مقاوم و کاهش سمیت، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند (۴-۶). در این میان، استفاده از پرسولفات به‌عنوان یکی از اکسیدکننده‌های قدرتمند، به‌ویژه در حضور نور، مسیر مؤثری برای تولید رادیکال‌های سولفات ($SO_4^{\bullet-}$) با توان اکسیدکنندگی بالا فراهم می‌کند (۷، ۸). پرسولفات، به‌ویژه زمانی که به کمک پرتو فرابنفش (UV) یا دیود ساطع‌کننده نور (LED) فعال می‌شود، قادر است فرایندهای اکسایشی قوی‌تری را به راه بیان‌دازد و رنگزاهای را به سرعت تجزیه کند (۹، ۱۰).

منابع نوری مرسوم مانند لامپ‌های UV به‌رغم اثربخشی بالا، محدودیت‌هایی نظیر مصرف انرژی زیاد، هزینه نگهداری بالا و تولید حرارت دارند. در مقابل، دیودهای ساطع‌کننده پرتو (LED) به‌دلیل مصرف انرژی کم، طول عمر بالا و قابلیت تنظیم طول موج، گزینه‌ای مناسب برای فعال‌سازی فرایندهای اکسایش پیشرفته محسوب می‌شوند (۱۱-۱۳). ترکیب LED و پرسولفات، می‌تواند راهکاری مؤثر برای حذف رنگزاهای مختلف از محلول‌های آبی فراهم کند که در آن بدون نیاز به کاتالیزورهای پیچیده، می‌توان عملکرد مؤثری در تخریب ساختارهای رنگی پیچیده به‌دست آورد (۱۴-۱۶، ۹).

در سال‌های اخیر، مطالعاتی در نشریه‌های معتبر ابعاد کلیدی این رویکرد را نشان داده‌اند که به اختصار مرور می‌شوند. در خانواده مواد پیشرفته، شو^۱ و همکارانش روی کاتالیست‌های Co/@MXene فعال‌شونده با پرسیمونوسولفات (PMS) برای پساب رنگرزی، حذف نزدیک به کامل و پایداری عملیاتی را گزارش کردند که پتانسیل پیوند LED-پرسولفات-مواد نو را مستند می‌کند (۱۷). همچنین ژو^۲ و همکارانش نشان دادند کاتالیزورهای کربنی-فلزی (مانند

(Fe₃C/Fe@NC) می‌توانند فعال‌سازی PMS را به‌صورت فوق‌سریع تقویت کرده و مسیرهای رادیکالی غالب را تثبیت نمایند؛ نتیجه‌ای که برای رنگزاهای مقاوم نیز قابل تعمیم است (۱۸). از منظر طراحی راکتور، مطالعات راکتورهای فیلم‌نازک/استوانه‌ای نشان می‌دهد افزایش سطح تماس و بهبود انتقال جرم، فعال‌سازی پرسولفات (PS) با تابش UV-LED را تسهیل کرده و حذف رنگزاهای را تسریع می‌کند؛ به‌عنوان نمونه، پیکربندی‌های حلقوی LED با فیلم‌ریزان به تخریب کامل یا نزدیک به کامل انجامیده و برای سامانه‌های چرخان الهام‌بخش بوده‌اند (۲۰، ۱۹). از منظر مهندسی نور، یین^۴ و همکارانش گزارش کردند که جابه‌جایی طول موج از ۲۵۴ به ۲۲۲ نانومتر (Far-UVC) در سامانه UV/پراکسی‌دی‌سولفات، تولید رادیکال را تقویت و نرخ تخریب میکروآلاینده‌ها را معنادار افزایش می‌دهد؛ نکته‌ای که حساسیت فرایند به طیف تابشی را برجسته می‌کند (۲۱). از نظر سینتیک، هوآنگ^۵ و همکارانش نشان دادند هرچند بسیاری از رنگزاهای رفتار شبه‌مرتب اول دارند، اما با تغییر شرایط واکنشی، نیاز به مقایسه چندمدلی (مرتب‌بندی صفر/اول/دوم) پیرنگ می‌شود (۲۲). در بررسی‌های نوری-شیمیایی، لای^۶ و همکارانش نیز نشان دادند در حضور پرسولفات، pH اسیدی سرعت تخریب نوری را افزایش می‌دهد؛ موضوعی که اهمیت کنترل شیمی محلول را در کنار عوامل نوری یادآور می‌شود (۲۳).

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در زمینه فعال‌سازی پرسولفات، هنوز بسیاری از فرایندها در مقیاس‌های آزمایشگاهی بازده کافی نداشته یا محدود به شرایط خاصی هستند. در این میان، طراحی راکتورهایی با توانایی ارتقا تماس بین فازهای واکنش، بهره‌گیری بهینه از نور و افزایش انتقال جرم، نقش کلیدی در بهبود کارایی فرایند دارد. بر همین اساس، در این تحقیق، یک راکتور نوری چرخان نوآورانه طراحی و ساخته شده است که با ایجاد لایه‌های نازک از محلول روی سطح داخلی راکتور در حال چرخش، امکان نفوذ بهتر نور LED به داخل محلول واکنش را فراهم می‌کند. این طراحی با کاهش ضخامت لایه محلول و افزایش سطح تماس بین نور و فاز واکنش‌دهنده، منجر به افزایش بازده فرایند تخریب رنگزاهای می‌شود.

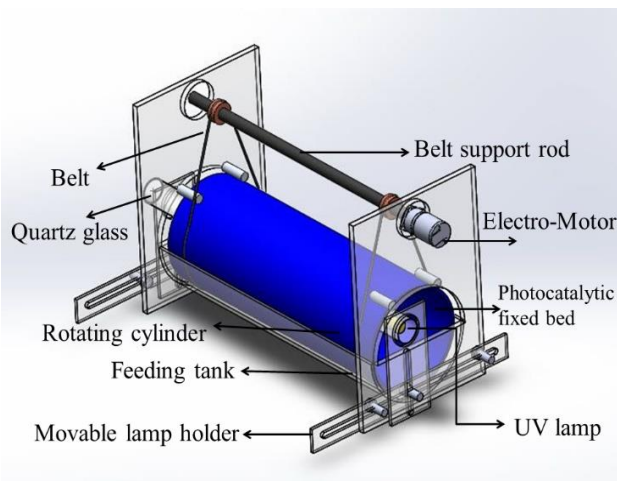
علاوه بر کارایی حذف رنگزاهای، بررسی سازوکار تخریب و شناسایی محصولات حدواسط نیز در ارزیابی ایمنی و اثر زیست‌محیطی فرایندهای اکسایش اهمیت دارد. در این راستا، در مطالعه حاضر از کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنج جرمی (GC-MS) برای شناسایی ترکیبات حدواسط حاصل از تخریب BR 46 استفاده شده تا بتوان مسیرهای احتمالی واکنش، پایداری محصولات و احتمال تشکیل ترکیبات سمی را بررسی کرد.

⁵ Hoang⁶ Lai⁷ Rotary photoreactor¹ Basic red 46² Shu³ Zhao⁴ Yin

(TOC) با دستگاه Shimadzu TOC-5000 به روش NPOC انجام شد؛ نمونه‌ها پس از اسیدی‌سازی ملایم و هواگیری، بر پایه استاندارد پتاسیم هیدروژن فتالات کالیبره شدند. برای شناسایی ترکیبات حدواسط و محصولات جانبی اکسایش آزمون GC-MS با دستگاه Agilent 7890B GC (متصل به طیف‌سنج جرمی ۵۹۷۷ Agilent A MS (Agilent Technologies, Canada) انجام گرفت؛ ستون HP-5MS با ابعاد $25 \times 0.25 \times 30 \text{ m}$ به کار رفت، هلیوم به‌عنوان گاز حامل با دبی 1 mL/min استفاده شد، یونش در حالت EI با انرژی 7 eV انجام گرفت و طیف‌ها با کتابخانه NIST تطبیق داده شد. تمامی دستگاه‌ها مطابق دستورالعمل سازنده پیش از آزمون‌ها تنظیم و کالیبره شدند و کنترل کیفیت شامل نمونه شاهد، نمونه بلانک و تکرار آزمون‌ها رعایت گردید.

۲-۳- طراحی و ساخت راکتور چرخان نوری

یک راکتور نوری چرخان مطابق شکل ۱ با قابلیت کنترل عوامل عملیاتی طراحی و ساخته شد. این سیستم شامل یک استوانه چرخان از جنس PVC به طول ۱۷ و قطر ۱۱ سانتی‌متر بود که داخل یک مخزن 500 میلی‌لیتری قرار می‌گیرد. منبع پرتو LED (365 نانومتر Seoul Opt، سری D) درون استوانه و بر روی پایه‌ای قابل تنظیم نصب شد. چرخش استوانه به کمک الکتروموتور انجام می‌شود و امکان تغییر سرعت چرخش، موقعیت منبع پرتو و شرایط تماس با محلول فراهم است. عملکرد چرخش منجر به ایجاد یک لایه نازک از محلول بر دیواره داخلی استوانه می‌شود که تماس مؤثرتری بین پرتو و محلول آلاینده فراهم می‌سازد. به‌منظور پیشگیری از گرمایش ناشی از تابش LED، راکتور به فن محوری برای خنک‌سازی مجهز شد و آزمون‌ها در شرایط محیطی ثابت انجام گرفت؛ بنابراین دما در طول آزمایش‌ها نزدیک به دمای محیط حفظ شد.



شکل ۱: شمایی از راکتور نوری چرخان.

Figure 1: Schematic of the rotary photoreactor.

هدف اصلی این تحقیق، توسعه یک سامانه مؤثر، ساده و قابل‌پیاده‌سازی برای حذف رنگزاهای مقاوم از محیط‌های آبی است که بتواند هم از نظر طراحی فنی (راکتور نوری چرخان)، هم از نظر کارایی تخریب (LED + پرسولفات)، و هم از نظر ارزیابی زیست‌محیطی (شناسایی محصولات حدواسط) در سطح علمی و کاربردی مؤثر واقع شود. نتایج این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز استفاده از فناوری‌های نوین در تصفیه آب و فاضلاب صنعتی باشد و الگویی برای طراحی نسل جدید راکتورهای نوری ارائه دهد. نوآوری این پژوهش در ترکیب هم‌زمان طراحی و ساخت یک راکتور نوری چرخان فیلم‌نازک با منابع نوری خطی LED و فعال‌سازی پرسولفات در pH نزدیک به خنثی، ارزیابی جامع سینتیک با مقایسه مدل‌های مرتبه صفر/شبه‌مرتبه اول/مرتبه دوم، پایش حدواسط‌ها با GC-MS برای تبیین مسیرهای تخریب و بهینه‌سازی عوامل عملیاتی (مقدار پرسولفات، سرعت چرخش، موقعیت نور) نهفته است. این چارچوب، ضمن پرهیز از استفاده از کاتالیزورهای پیچیده و بدون نیاز به تنظیم اسیدی/قلیایی گسترده، کارایی حذف در شرایط نزدیک به واقعی را نشان می‌دهد و گامی رو به جلو برای طراحی قابل‌مقیاس راکتورهای نوری LED-پرسولفات فراهم می‌سازد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این پژوهش از رنگزای بازیک رد ۴۶ ($C_{18}H_{21}BrN_6$; BR 46) و سدیم پرسولفات ($Na_2S_2O_8$)، هر دو از شرکت Merck (آلمان) استفاده شد. حلال‌های آلی به‌کاررفته برای استخراج و آماده‌سازی نمونه‌ها شامل استونیتریل، دی‌کلرومتان، n-هگزان و دی‌اتیل‌تر بودند که همگی با گرید GC از شرکت Romil (انگلیس) تهیه شدند. تمام محلول‌ها با آب دی‌یونیزه تازه تهیه‌شده آماده گردید و مواد شیمیایی بدون هرگونه خالص‌سازی اضافی استفاده شدند. برای جلوگیری از تجزیه نوری، محلول‌های رنگزا و اکسیدکننده تا زمان استفاده در ظروف شیشه‌ای کهربایی نگهداری شدند و محلول‌های کاری به‌صورت تازه از محلول مادر تهیه شد. همچنین پیش از آزمون، نمونه‌ها با حلال آلی مناسب استخراج شده و تحت جریان گاز نیتروژن تغلیظ شدند. طیف‌های جرمی به‌دست‌آمده با کتابخانه NIST مقایسه شدند تا ترکیبات شناسایی شوند.

۲-۲- تجهیزات و دستگاه‌ها

اندازه‌گیری غلظت رنگزا باطیف‌سنج UV-Vis مدل Shimadzu UV-DR 2800 در طول موج 520 نانومتر انجام شد. برای قرائت‌ها از ظرف کوارتز با طول مسیر 1 سانتی‌متر استفاده شد. منبع نوری از نوع LED خطی با طول موج مرکزی (365 نانومتر Seoul Opt، سری D) برای همه آزمایش‌ها به‌عنوان منبع تابش به کار رفت. به‌منظور ارزیابی معدنی‌سازی و اطمینان از صحت نتایج تخریب، سنجش کربن آلی کل

۲-۴- روش انجام آزمایش‌ها

محلول جلوگیری کرده و کارایی فرایند اکسایش نوری را کاهش می‌دهد. در بررسی سینتیکی، رابطه $-\ln(C/C_0)$ بر حسب زمان در تمامی غلظت‌ها خطی بود و ضریب تعیین (R^2) در بازه ۰/۹۸۵۱ تا ۰/۹۹۶۸ قرار گرفت که تأییدکننده پیروی واکنش از مدل سینتیکی مرتبه اول است. بیش‌ترین ثابت سرعت واکنش ($k=0/0529 \text{ min}^{-1}$) در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد، که نشان‌دهنده شرایط بهینه برای تابش نور و اختلاط مؤثر است. با افزایش غلظت، مقدار k کاهش یافته که می‌تواند ناشی از کاهش یکنواختی توزیع نور و واکنش‌دهنده‌ها باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تنظیم مناسب غلظت آلاینده تأثیر چشم‌گیری بر بهینه‌سازی عملکرد فرایند حذف دارد.

۲-۳- بررسی تأثیر و رفتار سینتیکی غلظت پرسولفات بر بازده حذف

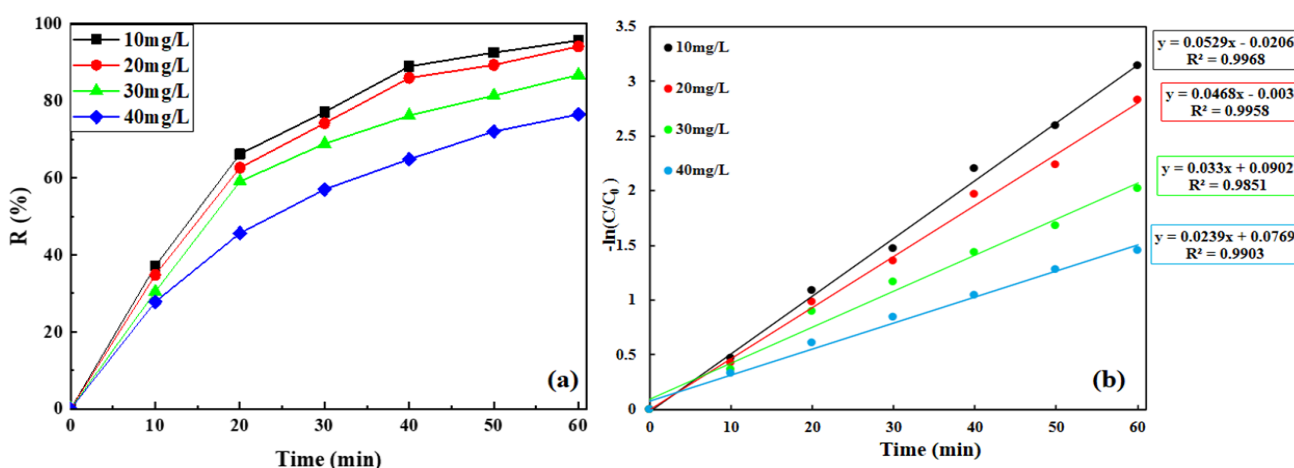
شکل‌های (a) و (b) به ترتیب تأثیر غلظت‌های مختلف پرسولفات و رفتار سینتیکی آن را در حذف رنگزای BR 46 نشان می‌دهند. مطابق با شکل ۳a، افزایش غلظت پرسولفات از ۱۰ به ۵۰ میلی‌مولار موجب بهبود قابل توجه در بازده حذف رنگ شد. این افزایش کارایی را می‌توان به تولید بیشتر رادیکال‌های سولفات و هیدروکسیل نسبت داد که فرایند اکسیداسیون را تقویت می‌کنند. با این حال، در غلظت‌های بالاتر از ۵۰ میلی‌مولار، بهبود بازده حذف بسیار محدود شده است. این کاهش در نرخ پیشرفت فرایند احتمالاً ناشی از تجمع بیش از حد رادیکال‌ها و افزایش احتمال نوترکیبی آن‌ها، به‌ویژه تشکیل پراکسید هیدروژن، است که منجر به کاهش تعداد رادیکال‌های آزاد مؤثر و کاهش تعامل آن‌ها با آلاینده می‌گردد.

ابتدا محلول مادر رنگزای BR 46 تهیه و سپس به غلظت‌های مختلف رقیق شد. پس از افزودن پرسولفات به محلول‌ها، نمونه‌ها درون راکتور نوری با تابش پرتو LED و در شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. عوامل مورد بررسی شامل غلظت اولیه رنگزا (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر)، غلظت پرسولفات (۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌مولار)، سرعت چرخش استوانه (۳، ۶ و ۹ دور در دقیقه) و محل قرارگیری منبع پرتو LED، سمت چپ، مرکز و سمت راست استوانه بودند. pH محلول در همه آزمایش‌ها خنثی و زمان واکنش ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. تحلیل رفتار سینتیکی واکنش بر اساس تغییرات جذب در زمان‌های مختلف انجام شد و برازش مدل‌های سینتیکی برای هر سری آزمایش ارزیابی گردید. هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها گزارش شد. برای ترسیم و آماده‌سازی نمودارها از دو نرم‌افزار Excel و Origin استفاده شد؛ محاسبات و برازش‌های سینتیکی (استخراج k و R^2 و ترسیم $-\ln(C/C_0)$ -t در Excel انجام شد و از Origin صرفاً برای ترسیم و بهبود نمایش گرافیکی سایر نمودارها استفاده گردید.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی تأثیر و رفتار سینتیکی غلظت رنگزای BR 46 بر بازده حذف

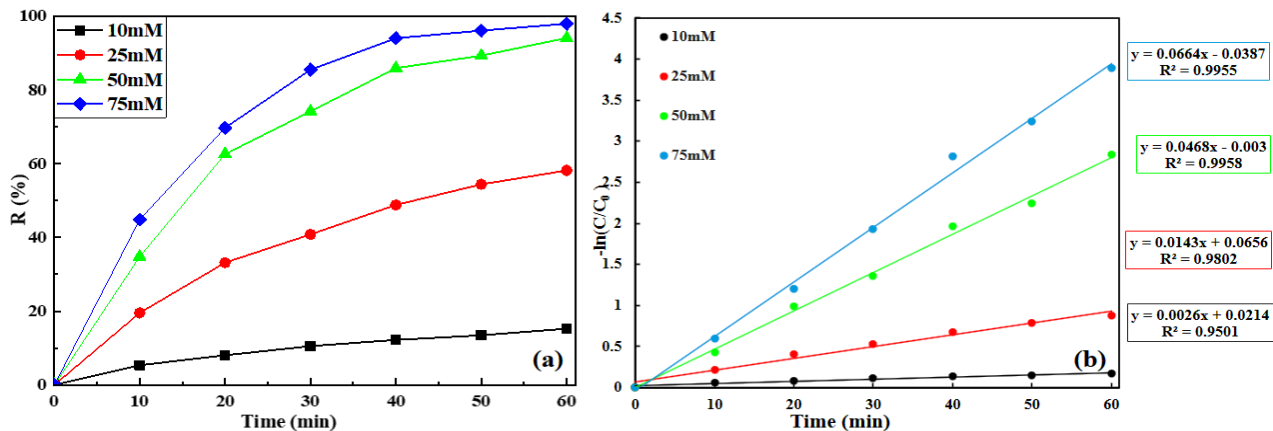
شکل‌های (a) و (b) به ترتیب تأثیر غلظت‌های مختلف رنگزای BR 46 بر بازده حذف و رفتار سینتیکی آن را نشان می‌دهند. افزایش غلظت رنگزا موجب رقابت بیشتر بین مولکول‌های رنگزا برای واکنش با رادیکال‌های آزاد شده و منجر به کاهش تعامل مؤثر این رادیکال‌ها با هدف می‌شود. همچنین، غلظت بالای رنگزا از نفوذ مناسب نور در



شکل ۲: (a) تاثیر غلظت اولیه رنگزای BR 46 بر بازده حذف (غلظت پرسولفات 50mg/l، pH طبیعی محیط، دور موتور ۶ دور بر دقیقه، منبع پرتو سمت چپ

استوانه) و (b) نمودار سینتیکی $-\ln(C/C_0)$ بر حسب زمان برای غلظت‌های مختلف رنگزای BR 46.

Figure 2: (a) Effect of the initial BR 46 dye concentration on removal efficiency (persulfate = 50 mg/L, natural pH, motor speed = 6 rpm, light source placed on the left side of the cylinder), and (b) Kinetic plots of $-\ln(C/C_0)$ versus time for different BR 46 dye concentrations.



شکل ۳: (a) تاثیر غلظت پرسولفات بر بازده حذف رنگزای BR 46 (غلظت رنگزا 20 mg/l، pH طبیعی محیط، دور موتور 6 دور بر دقیقه، منبع پرتو سمت چپ استوانه) و (b) نمودار سینتیکی $-\ln(C/C_0)$ بر حسب زمان برای غلظت‌های مختلف پرسولفات.

Figure 3: (a) Effect of persulfate concentration on the removal efficiency of BR 46 dye (dye concentration = 20 mg/L, natural pH, motor speed = 6 rpm, light source positioned on the left side of the cylinder), and (b) Kinetic plots of $-\ln(C/C_0)$ versus time for different persulfate concentrations.

سرعت‌های پایین‌تر، لایه مایع تشکیل نشده و نفوذ پرتو محدود می‌شود، در حالی که در سرعت‌های بالاتر، لایه ناپایدار و پاششی ایجاد شده و تماس نوری کاهش می‌یابد.

رفتار سینتیکی در این سه حالت نیز در شکل (b) ۴ نمایش داده شده است. داده‌ها با مدل سینتیکی شبه‌مرتبه اول برازش شده‌اند و رابطه $-\ln(C/C_0)$ با زمان در همه سرعت‌ها خطی است. ضریب همبستگی (R^2) در تمام موارد بیش از ۰/۹۵ به دست آمد که بیانگر تطابق خوب با مدل است. بیشترین مقدار ثابت سرعت واکنش min^{-1} $k = 0/0468$ در سرعت 6 دور بر دقیقه و کمترین مقدار min^{-1} $k = 0/0214$ در سرعت 3 دور بر دقیقه مشاهده شد. این نتایج بر اهمیت انتخاب بهینه سرعت چرخش برای افزایش کارایی سیستم کاتالیزوری نوری تأکید دارد.

۳-۴- بررسی تأثیر و رفتار سینتیکی محل قرارگیری منبع پرتو بر بازده حذف

تأثیر محل قرارگیری منبع نور بر بازده حذف رنگزای BR 46 در شکل (a) ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد محل قرارگیری منبع پرتو نقش کلیدی در عملکرد راکتور نوری چرخان دارد. بیشترین بازده زمانی حاصل شد که لامپ LED در سمت چپ استوانه و در فاصله‌ای حدود 1 سانتی‌متر از سطح محلول قرار داشت. این موقعیت موجب تأمین فوتون‌های بیشتر، افزایش تولید رادیکال‌های فعال و بهبود تماس نوری شد. در مقابل، در موقعیت‌های مرکزی و سمت راست، (شکل (c)) به دلیل کاهش شدت و یکنواختی تابش، بازده فرایند کاهش یافت. تحلیل سینتیکی (شکل (c)) ۵ نشان داد رابطه $-\ln(C/C_0)$ با زمان در تمام موقعیت‌ها خطی بوده و با مدل سینتیکی مرتبه اول تطابق دارد ($R^2 = 0/9789 - 0/9958$).

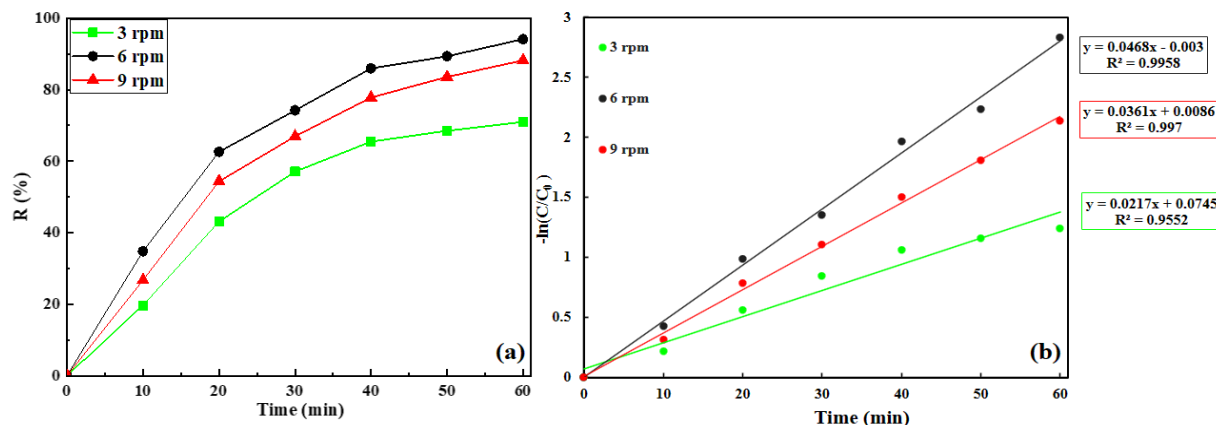
بر همین اساس، غلظت 50 میلی‌مولار به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد که علاوه بر ارائه بازده حذف بالا، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز مقرون به صرفه می‌باشد. در این سطح غلظت، عملکرد حذف رنگزا به مقدار حداکثری خود نزدیک شده و افزایش غلظت بیشتر (75 میلی‌مولار) تنها بهبود جزئی در حذف رنگزا به همراه داشته است.

در بخش سینتیکی (شکل (b)) ۳، رابطه بین $-\ln(C/C_0)$ و زمان در تمامی غلظت‌ها روندی خطی داشته و ضریب تعیین (R^2) بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹۵۵ نشان‌دهنده انطباق مناسب داده‌های تجربی با مدل سینتیکی مرتبه اول است. همچنین با افزایش غلظت پرسولفات، ثابت سرعت واکنش (k) نیز افزایش یافته است.

بالاترین مقدار k برابر $0/0664 \text{ min}^{-1}$ در غلظت 75 میلی‌مولار و کمترین آن $0/0214 \text{ min}^{-1}$ در غلظت 10 میلی‌مولار مشاهده شد. این روند افزایشی در مقادیر k نشان‌دهنده آن است که غلظت بالاتر پرسولفات با تولید رادیکال‌های بیشتر، منجر به افزایش سرعت تخریب رنگزا می‌گردد.

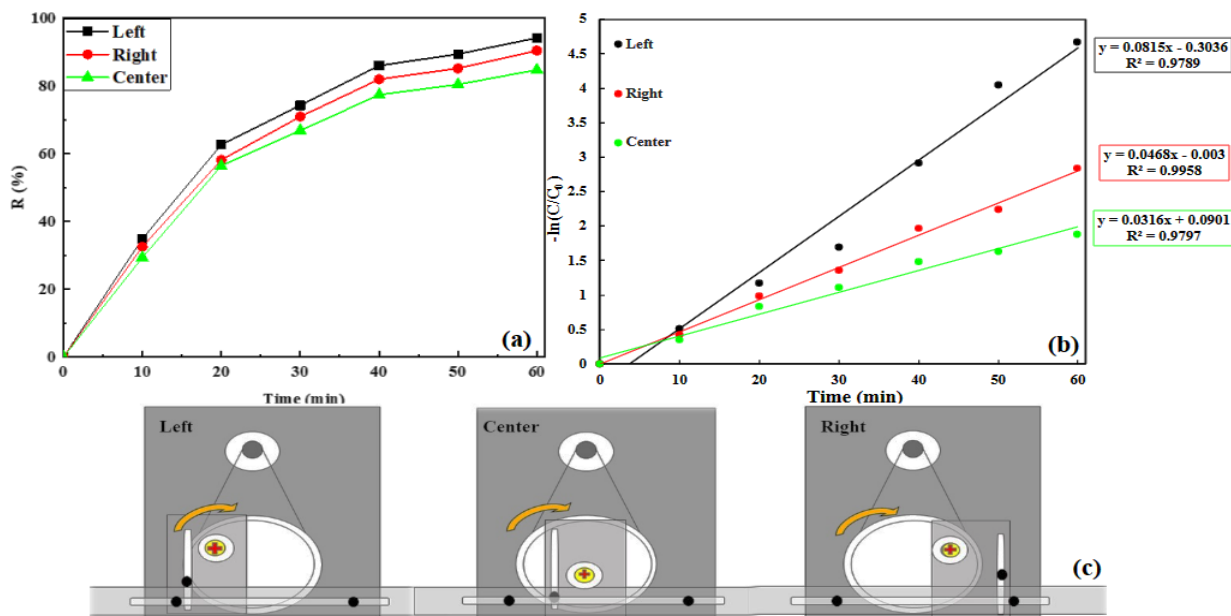
۳-۳- بررسی تأثیر و رفتار سینتیکی دور موتور بر بازده حذف

تأثیر سرعت چرخش استوانه بر کارایی حذف رنگزای BR 46 در سه دور موتور مختلف (3، 6 و 9 دور بر دقیقه) بررسی شد. شکل (a) ۴ تغییرات بازده حذف در این سه سرعت را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت از 3 به 6 دور بر دقیقه موجب افزایش بازده شد، ولی با افزایش بیشتر به 9 دور بر دقیقه، کاهش جزئی در عملکرد مشاهده گردید. در سرعت 6 دور بر دقیقه، بهترین عملکرد ثبت شد. این رفتار را می‌توان ناشی از تعادل بهینه بین ضخامت و یکنواختی لایه نازک محلول دانست؛ به طوری که در این سرعت، تشکیل یک فیلم نازک و پایدار منجر به جذب مؤثر پرتو و انتقال جرم بهتر شد. در



شکل ۴: (a) تاثیر سرعت چرخش استوانه بر بازده حذف رنگزای BR 46 (غلظت رنگزا 20 mg/l، غلظت پرسولفات 50 mg/l، pH طبیعی محیط، منبع پرتو سمت چپ استوانه) و (b) نمودار سینتیکی $-\ln(C/C_0)$ بر حسب زمان برای سرعت چرخش استوانه.

Figure 4: (a) Effect of cylinder rotation speed on the removal efficiency of BR 46 dye (dye concentration = 20 mg/L, persulfate = 50 mg/L, natural pH, light source positioned on the left side of the cylinder), and (b) Kinetic plots of $-\ln(C/C_0)$ versus time at different cylinder rotation speeds.



شکل ۵: (a) تاثیر محل قرارگیری منبع پرتو بر بازده حذف رنگزای BR 46 (غلظت رنگزا 20 mg/l، غلظت پرسولفات 50 mg/l، pH طبیعی محیط، دور موتور 6 دور بر دقیقه)، (b) نمودار سینتیکی $-\ln(C/C_0)$ بر حسب زمان برای محل قرارگیری منبع پرتو و (c) شمایی از محل قرارگیری منبع نور در راکتور نوری چرخان.

Figure 5: (a) Effect of light-source position on the removal efficiency of BR 46 dye (dye concentration = 20 mg/L, persulfate = 50 mg/L, natural pH, motor speed = 6 rpm), (b) Kinetic plots of $-\ln(C/C_0)$ versus time for different light-source positions, and (c) Schematic of the light-source placement in the rotary photoreactor.

R^2 و RMSE نشان می‌دهد که این مدل از دقت مناسبی در توصیف داده‌های تجربی برخوردار است.

۳-۵- کربن آلی کل (TOC)^۱

نتایج آنالیز TOC در شکل ۶ نشان داد که TOC در طول فرایند به‌طور قابل توجهی کاهش یافت.

بیشترین ثابت سرعت ($k=0.0815 \text{ min}^{-1}$) در موقعیت سمت چپ به دست آمد و کمترین مقدار ($k=0.0316 \text{ min}^{-1}$) مربوط به مرکز استوانه بود. این نتایج اهمیت طراحی دقیق جایگاه منبع نور برای بهینه‌سازی عملکرد فتوراکتور را برجسته می‌کند. نتایج برازش مدل سینتیکی مرتبه اول تحت شرایط مختلف عملیاتی در جدول ۱ ارائه شده است.

¹ Total Organic Carbon (TOC)

جدول ۱: مقایسه شاخص‌های برازش مدل سینتیکی مرتبه اول.

Table 1: Comparison of goodness-of-fit metrics for the first-order kinetic model.

		k (unit)	R ²	RMSE
rpm	3	0.0217 min ⁻¹	0.9552	0.845
	6	0.0529 min ⁻¹	0.9958	0.379
	9	0.0468 min ⁻¹	0.997	0.468
Light location	Left	0.0815 min ⁻¹	0.9789	0.239
	Center	0.0316 min ⁻¹	0.9797	0.091
	right	0.0468 min ⁻¹	0.9958	0.061
Dye dose	10 mg.L ⁻¹	0.0529 min ⁻¹	0.9968	0.060
	20 mg.L ⁻¹	0.0468 min ⁻¹	0.9958	0.060
	30 mg.L ⁻¹	0.033 min ⁻¹	0.9851	0.081
	40 mg.L ⁻¹	0.0239 min ⁻¹	0.9903	0.047
PDS dose	10 mM	0.0026 min ⁻¹	0.9501	0.011
	25 mM	0.0143 min ⁻¹	0.9802	0.040
	50 mM	0.0468 min ⁻¹	0.9958	0.060
	75 mM	0.0664 min ⁻¹	0.9955	0.089

۳-۶- شناسایی محصولات تخریب BR 46 با استفاده از آزمون

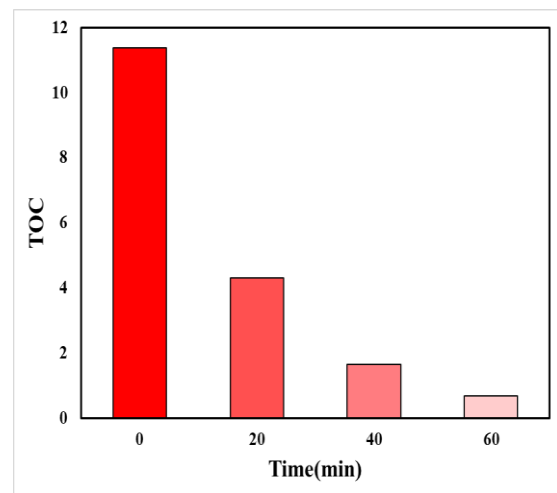
GC-MS

به منظور شناسایی و پایش محصولات حدواسط ناشی از تخریب رنگزای BR 46، نمونه‌هایی از محلول در بازه‌های زمانی ۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه برداشت و با استفاده از روش کروماتوگرافی گازی-طیفسنجی جرمی (GC-MS) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. این روش به دلیل دقت بالا در شناسایی ترکیبات آلی با ساختارهای متفاوت، گزینه‌ای مناسب برای بررسی مسیرهای احتمالی تخریب آلاینده‌ها در سیستم‌های اکسایش پیشرفته محسوب می‌شود.

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۷ و جدول ۲، در مراحل ابتدایی

واکنش، حضور ترکیبات آلی با وزن مولکولی بالا و ساختارهای پیچیده (نظیر مشتقات آزو و ترکیبات حلقوی) مشاهده شد. با گذشت زمان و ادامه فرایند، این ترکیبات دچار شکست ساختاری شده و به مولکول‌های ساده‌تر و سبک‌تر تبدیل شدند. این تجزیه تدریجی نشان‌دهنده شکستن پیوندهای C=C، C=N و N=N در ساختار رنگزا و تبدیل آن به ترکیبات حدواسط مانند الکل‌ها، اسیدهای آلی، آلدهیدها و کتون‌ها بود. در مرحله نهایی (۶۰ دقیقه)، کاهش محسوس در تعداد و غلظت ترکیبات آلی باقیمانده مشاهده شد، که نشان‌دهنده روند مؤثر معدنی شدن آلاینده‌ها در حضور پرسولفات و پرتو LED است.

این تغییرات کیفی در ساختار مولکولی ترکیبات با نتایج حاصل از آزمون کربن آلی کل (TOC) نیز هم‌راستا بود. کاهش قابل توجه مقادیر TOC در طول زمان، مؤید تخریب کامل یا نسبی ساختارهای آلی و تبدیل آن‌ها به محصولات معدنی کم‌خطرتر نظیر دی‌اکسید کربن، یون‌های معدنی و آب است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که فرایند فعال‌سازی پرسولفات با پرتو LED نه تنها در حذف رنگزا مؤثر بوده، بلکه توانسته به طور هم‌زمان تخریب ساختاری و کاهش بار آلی محلول را نیز فراهم آورد.



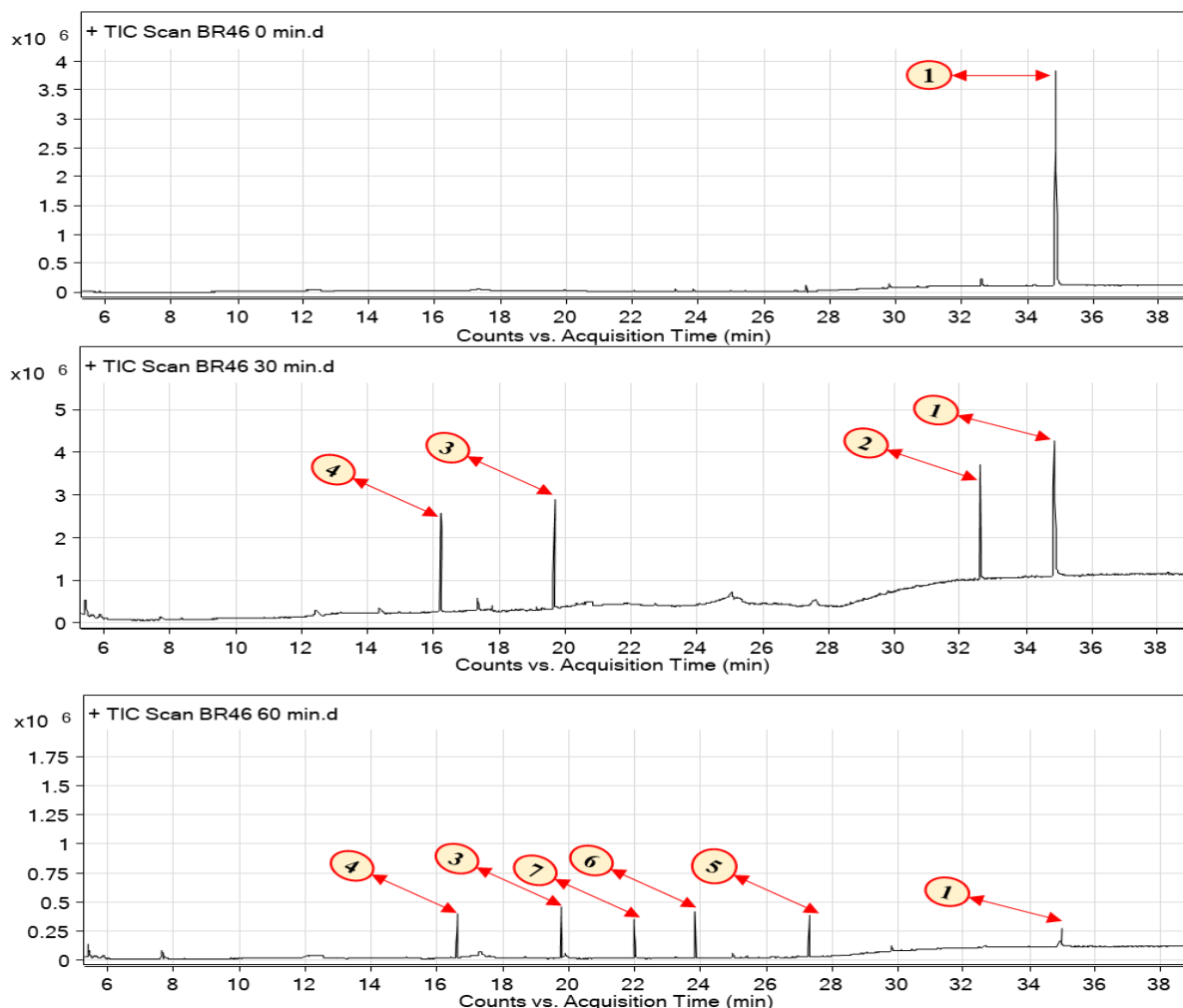
شکل ۶: روند کاهش کل کربن آلی (TOC) در طول زمان تحت فرایند اکسایش پیشرفته.

Figure 6: Time-course of total organic carbon (TOC) reduction during the advanced oxidation process.

مقدار اولیه TOC برابر با ۱۱/۳۸ mg/l بود که پس از ۲۰ دقیقه واکنش به ۴/۳ mg/l رسید، نشان‌دهنده حذف سریع ترکیبات آلی در مراحل اولیه فرایند است. در ادامه، میزان TOC پس از ۴۰ دقیقه به ۱/۶۵ mg/l کاهش یافت و در انتهای ۶۰ دقیقه، مقدار TOC به ۰/۶۹ mg/l رسید. این روند نشان می‌دهد که فرایند اکسایش به طور مؤثری موجب تخریب ساختار آلی رنگزای BR 46 شده و بخش عمده‌ای از ترکیبات آلی به محصولات معدنی تبدیل شده‌اند. همچنین، کاهش تدریجی نرخ حذف TOC در زمان‌های بالاتر می‌تواند به دلیل کاهش غلظت آلاینده و کاهش دسترسی به رادیکال‌های فعال باشد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پرسولفات فعال شده با نور LED می‌تواند یک راهکار مؤثر برای تخریب و معدنی‌سازی ترکیبات آلی مقاوم در محیط‌های آبی باشد (۲۰، ۲۴، ۲۵).

اکسایش نشان می‌دهد، که از آن می‌توان به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در تصفیه پساب‌های رنگی حاوی آلاینده‌های مقاوم یاد کرد (۲۶، ۲۷).

این یافته‌ها نقش کلیدی ترکیب پرتو LED و پرسولفات را در افزایش تولید گونه‌های رادیکالی فعال (به‌ویژه $SO_4^{\cdot-}$ و OH^{\cdot}) و بهبود فرایند



شکل ۷: کروماتوگرام‌های GC-MS (TIC) محلول BR46 در زمان‌های ۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه از فرایند کاتالیزوری نوری؛ قله‌های شماره‌گذاری شده با ترکیبات فهرست شده در جدول ۲ متناظر هستند.

Figure 7: GC-MS total ion chromatograms (TICs) of the BR46 solution at 0, 30, and 60 min of the photocatalytic process; the numbered peaks correspond to the compounds listed in Table 2.

جدول ۲: محصولات جانبی تخریب BR 46 شناسایی شده توسط دستگاه GC-MS.

Table 2: Degradation byproducts of BR46 identified by GC-MS.

شماره ترکیب	اسم نمونه	فرمول	ساختار
1	N-benzyl-4-[(2,4-dimethyl-1,2,4-triazol-4-ium-3-yl) diazenyl]-N-methylaniline;bromide	$C_{18}H_{21}BrN_6$	

جدول ۲: ادامه.

Table 2: Continued.

شماره ترکیب	اسم نمونه	فرمول	ساختار
2	4-hydroxy-N-methyl diphenylamine	C ₁₃ H ₁₃ NO	
3	Hydroxybenzene	C ₆ H ₆ O	
4	3-Amino-s-triazole	C ₂ H ₄ N ₄	
5	Bis(2-hydroxyethyl) methylamine	C ₅ H ₁₃ NO ₂	
6	1,4-Benzenediol	C ₆ H ₆ O ₂	
7	Benzyl alcohol	C ₇ H ₈ O	

داشت. پایش حدواسطها با GC-MS مسیره‌های شکستن پیوندهای اسیدهای آلی، آلدهیدها و کتون‌ها) را نشان داد که با کاهش TOC هم‌راستا است و نقش گونه‌های رادیکالی (SO₄^{•-} و OH[•]) را در زنجیره واکنش‌ها تقویت می‌کند. در جمع‌بندی کاربردی، ترکیب طراحی استوانه چرخان فیلم‌نازک با منبع LED خطی ۳۶۵ nm و فعال‌سازی پرسولفات، بدون استفاده از کاتالیزورهای پیچیده و بدون تنظیم خورنده pH، کارایی بالایی در حذف BR 46 ارائه می‌دهد و از منظر مقیاس‌پذیری بالقوه، سادگی سازه، طول عمر و ایمنی LED و امکان طراحی واحدبندی‌شده راکتور، مزیت ایجاد می‌کند. در عین حال، دو محدودیت اصلی این مطالعه باید مدنظر قرار گیرد: پایش‌ها در pH خنثی انجام شده و شدت تابشی مطلق به دلیل نبود رادیومتر کالیبره عددی‌سازی نشده است. بر این اساس، پیشنهادهاى آینده شامل

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که راکتور نوری چرخان فیلم‌نازک مجهز به LED و پرسولفات می‌تواند رنگزای مقاوم BR 46 را در pH نزدیک به خنثی به‌طور کارآمد تخریب کند. شرایط عملیاتی بهینه برای سامانه با mg/l ۲۰ Co= شامل مقدار پرسولفات ۵۰ mM، سرعت چرخش ۶ rpm و جانمایی منبع پرتو در موقعیت نزدیک‌به‌دیواره (سمت چپ در پیکربندی فعلی) تعیین شد؛ این ترکیب با ایجاد فیلم نازک پایدار، افزایش شار فوتون مؤثر و بهبود انتقال جرم، بیشترین بازده حذف را به همراه داشت. مدل‌سازی نشان داد که رفتار تخریب در گستره عملیاتی این کار غالباً از سینتیک شبه‌مرتب‌اول پیروی می‌کند. سنجش کربن آلی کل مؤید معدنی‌سازی مؤثر بود؛ مقدار TOC از ۱۱/۳۸ mg/l در آغاز فرایند به ۰/۶۹ mg/l در پایان ۶۰ دقیقه کاهش یافت و روند کاهشی آن با افت غلظت رنگزا و افزایش مقدار پرسولفات هم‌خوانی

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت های علمی، تجهیزاتی و پشتیبانی دانشگاه زنجان در اجرای این پژوهش سپاسگزاری می شود.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سنجش رادیومتری کالیبره و نگاشت شار فوتون، بررسی نظاممند اثر pH و ضخامت فیلم، و تکمیل تحلیل مقیاس پذیری (RTD)، انرژی ویژه بر حسب $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ و برآورد هزینه) است. با توجه به شواهد حاصل از سینتیک، TOC و GC-MS، سامانه LED/پرسولفات چرخان می تواند به عنوان گزینه ای مؤثر و قابل اتکا برای تصفیه پایدار پساب های رنگی صنعتی مورد توجه قرار گیرد.

۵- مراجع

- Goswami D, Gupta S, Jaiswal J, Chouksey S, Jha SN, Singh S, et al. Bioremediation of azo dye: A review on strategies, toxicity assessment, mechanisms, bottlenecks and prospects. *Sci Total Environ.* 2024;954: 176426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176426>.
- Shanmuganathan R, Brindhadevi K, Nguyen DD, Rajendran S, Ponnusamy VK, Pugazhendhi A, et al. Recent innovations and challenges in the eradication of emerging contaminants from aquatic systems. *Chemosphere.* 2023;332:138812. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138812>.
- Brillas E, Oliver R. Development of persulfate-based advanced oxidation processes to remove synthetic azo dyes from aqueous matrices. *Chemosphere.* 2024;349 :141766. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141766>.
- Loganathan P, Senthil-Kumar P, Arumugam AS, Kamaraj M, Govarthanan M. Bisphenols in water: Occurrence, effects, and mitigation strategies. *Chemosphere.* 2023;328:138560. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138560>.
- Lu Y, Zhang S, Rao J, Chen X, Ling L, Lin Z, et al. Microplastic remediation technologies in water and wastewater treatment processes: Current status and future perspectives. *Sci Total Environ.* 2023;868:161618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161618>.
- Zahmatkesh S, Hajiaghaei-Keshteli M, Rahmani A, Rezaia S, Ghaedi H, Mohammadiun M, et al. Combination of coagulation and adsorption technologies for advanced wastewater treatment for potable water reuse: By ANN, NSGA-II, and RSM. *J Environ Manage.* 2024;349:119429. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119429>.
- Wang B, Wang Y. A comprehensive review on persulfate activation treatment of wastewater. *Sci Total Environ.* 2022; 831:154906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154906>.
- Yang L, Xue J, Chu W, Wang L, Du L, Ji F, et al. Persulfate-based degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) in aqueous solution: Review on influences, mechanisms and prospective. *J Hazard Mater.* 2020;393:122405. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122405>.
- Matafonova G, Batoev V. Recent advances in application of UV light-emitting diodes for degrading organic pollutants in water through advanced oxidation processes: A review. *Water Res.* 2018;132:177-189. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.079>
- Luo CW, Huang CY, Tang CW, Chen CW, Dong CD, Chen SD, et al. LED illumination-assisted activation of peroxydisulfate by heterogeneous Cu₂S under alkaline condition for efficient organic pollutants removal. *Environ Res.* 2025;268:120634. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120634>.
- Hu H, Zhang Y, Tan Q, Xu L, Zhang G, Gao J, et al. Recent advances in iron-based catalyst-driven persulfate activation for organic pollutant degradation. *J Water Process Eng.* 2025;71:107423. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.107423>.
- Ghosh S, Das G, Gupta A, Bhowmick S, Mukherjee A. The efficacies of degrading antibiotic resistance genes (ARGs) by applying UV light emitting diodes (UV-LEDs) based advanced oxidation processes (AOPs). *Water Res.* 2025;270:123197. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.123197>.
- Silveira JE, Moraes JE, Moraes J, Teixeira AC, Sirtori C, Peralta-Hernández JM. UV-LED/ilmenite/persulfate for azo dye mineralization: The role of sulfate in the catalyst deactivation. *Appl Catal B Environ.* 2017;219:314-321. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.07.054>.
- Zou XY, Zhou T, Mao J, Wu X. Enhanced ronidazole degradation by UV-LED/chlorine compared with conventional low-pressure UV/chlorine at neutral and alkaline pH values. *Water Res.* 2019; 160:296-303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.064>.
- Liang R, Hu A, Hatat-Fraile M, Zhou N. Utilizing UV-LED pulse width modulation on TiO₂ advanced oxidation processes to enhance the decomposition efficiency of pharmaceutical micropollutants. *Chem Eng J.* 2019;361:439-449. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.117>.
- Song K, Taghipour F, Mohseni M. Microorganisms inactivation by continuous and pulsed irradiation of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). *Chem Eng J.* 2018;343:362-370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.020>.
- Shu D, Zhao G, Zhang J, Sun J, Liang S, Wu J, et al. Enhanced degradation and recycling of reactive dye wastewater using cobalt loaded MXene catalysts. *npj Clean Water.* 2024;7(1):88. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00384-5>.
- Zhao C, Li Y, Wang J, Li X, Gao S, Li A, et al. Ultrafast degradation of emerging organic pollutants via activation of peroxymonosulfate over Fe₃C/Fe@NCx: Singlet oxygen evolution and electron-transfer mechanisms. *Appl Catal B Environ.* 2023;321:122034. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.122034>

19. Moradi H, Rahmani A, Mohseni M. Mechanistic study on the synergy of cold plasma and sulfate radical in the degradation of azo and triarylmethane dyes using density functional theory. *J Environ Chem Eng.* 2023; 11(5):110559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110559>.
20. Hoang NT, Mwazighe FM, Hoang T, Le PC. Degradation of dyes by UV/Persulfate and comparison with other UV-based advanced oxidation processes: Kinetics and role of radicals. *Chemosphere.* 2022;298:134197. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134197>.
21. Yin R, Guo S, Li X, Li M, Dong H, Guan X. Far-UVC photolysis of peroxydisulfate for micropollutant degradation in water. *Environ Sci Technol.* 2024;58(13):6030-6038. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10323>.
22. Hoang NT, Mwazighe FM, Le PC. Kinetic study on the degradation of organic pollutants in UV/persulfate and in other advanced oxidation processes: Role of radicals and improvement of the degradation rates. *J Environ Chem Eng.* 2023;11(5):110456. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110456>.
23. Lai SC, Chen JC, Lin YC, Cheng SF, Lin AY. Solar photodegradation of the UV filter benzotriazole in the presence of persulfate. *J Environ Chem Eng.* 2023;11(1):109189. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109189>.
24. Li F, Zimmermann AR, Hu X, Shao J, Chen J, Gao B, et al. Biochar-activated persulfate for organic contaminants removal: Efficiency, mechanisms and influencing factors. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020;198:110653. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110653>.
25. Gupta S, Singh A, Jaiswal J, Chouksey S, Jha SN, Goswami D. Evaluation of activated persulfate under real solar light for degradation of organic pollutants: Kinetics, mechanism, and ecotoxicity. *J Environ Chem Eng.* 2023;11(5):110313. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110313>.
26. Hekmat A, Ghasemi S, Vossoughi M. Unveiling the synergistic effect of ionic liquid and metal-organic framework on the efficiency of BiVO₄: BiVO₄-MIL-100 (Fe) as a visible light-induced photocatalyst for Basic Red 46 degradation. *J Environ Chem Eng.* 2023;11(5):110658. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110658>.
27. Sharma K, Sharma P, Sharma S, Sharma S, Sharma R. Treatment of crude oil contaminated wastewater via an electrochemical reaction. *RSC Adv.* 2020; 10(4):1925-1936. <https://doi.org/10.1039/C9RA08915C>.

How to cite this article:

Saeedi SN, Rasoulifard MH, Dorraji MSS, Pourata R, Sehati N. Performance evaluation of a rotary photoreactor with linear led sources for removing organic dye pollutants via persulfate activation, monitoring intermediates, and optimizing operational parameters. *J Stud Color World.* 2026;16(1):15-34. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167616.1252> [In Persian].