Evaluation of the Efficiency of photocatalytic UV/ peroxymonosulfate process in the removal of cefexime antibiotic from aqueous solutions

Khazaei R [1], Rahmani A[2], Seidmohammadi A[3], Faradmal J[4], Leili M[5]

1. MSc Student of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0001-8524-4256
2. Professor of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan.
3. Associate Professor of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering and Social Determinants of Health Research Center, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.
4. Associate Professor of Biostatistics and Epidemiology, Department of Biostatistics and Epidemiology, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.
5. Associate Professor of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Student Research Committee, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran (Corresponding Author) Tel: +988138380398, E-mail: m.leili@umsha.ac.ir, ORCID: 0000-0001-6209-0038

ABSTRACT

Background and Aim: Pharmaceuticals, especially antibiotics, are new contaminants that because of their cumulative nature, adverse effects and drug resistance; have created a major environmental concern. The aim of this study was to evaluate UV/peroxymonosulfate (UV/PMS) process efficiency in the removal of cefexime antibiotic from aqueous solution.

Materials and Methods: This experimental laboratory study was conducted in batch mode. We assessed the effects of main operational parameters such as solution pH (3-9), reaction time (0-30 min), photocatalyst dosage (0.75-2.25 mmol/L), and initial concentration of cefexime (5-25 mg/L) on removal efficiency. Spectrophotometer (HACH DR-5000 UV–Vis) was used to measure the initial and final concentrations of cefexime.

Results: Under optimal condition (pH=7.5, irradiation time=30 min, C_0=5 mg/L, and PMS dosage=1.37 mmol/L), use of photocatalytic UV/peroxymonosulfate led to efficient removal of cefexime (93.18%).

Conclusion: The results of this study showed the acceptable performance of peroxymonosulfate process in the removal of cefexime.

Keywords: Advanced oxidation pocesses (AOP_S), Peroxymonisulfate, Cefexime, Ultraviolet radiation (UV)

Received: April 7, 2019 **Accepted:** June 26, 2019

How to cite the article: Khazaei R, Rahmani A, Seidmohammadi A, Faradmal J, Leili M. Evaluation of the Efficiency of photocatalytic UV/ peroxymonosulfate process in the removal of cefexime antibiotic from aqueous solutions. SJKU 2019;24(4):22-40.

Copyright © 2019 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 (CCBY-NC), 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 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

بررسی کارایی فرآیند UV/پراُکسی مونوسولفات درحذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم از محلول‌های آبی

رقیه خزائی[۱]، علیرضا رحمانی[۲]، عبدالمطلب صیدمحمدی[۳]، جواد فردمال[۴]، مصطفی لیلی[۵]

۱. دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. شناسه ارکید: ۴۲۵۶-۸۵۲۴-۰۰۰۱-۰۰۰۰

۲. استاد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۳. دانشیار مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات اجتماعی مؤثر بر سلامت و گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۴. دانشیار آمار زیستی و اپیدمیولوژی، گروه آمار زیستی و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۵. دانشیار مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران (مولف مسئول)، تلفن ثابت: ۰۸۱۳۸۳۸۰۳۹۸، پست الکترونیک: mostafa.leili@gmail.com، شناسه ارکید: ۰۰۳۸-۶۲۰۹-۰۰۰۱-۰۰۰۰

چکیده

زمینه و هدف: محصولات دارویی به ویژه آنتی‌بیوتیک‌ها از جمله آلاینده‌های نوپدیدی می‌باشند که به دلیل خاصیت تجمعی اثرات سوء مختلف و ایجاد مقاوم دارویی، نگرانی عمده زیست‌محیطی ایجاد نموده‌اند. بنابراین هدف این پژوهش، بررسی کارایی فرآیند فتوکاتالیستی UV/پراُکسی مونوسولفات درحذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم از محلول‌های آبی بود.

روش بررسی: این مطالعه تجربی آزمایشگاهی و در سیستم بسته انجام گرفت. در این مطالعه تأثیر مهمترین پارامترهای راهبری مثل pH محلول (۹-۳)، زمان واکنش (min ۳۰-۰)، دوز فتوکاتالست (۲/۲۵ – ۰/۷۵ میلی مول) غلظت اولیه سفیکسیم (۲۵-۵ میلی گرم بر لیتر) بر راندمان حذف مورد مطالعه قرار گرفتند. برای آنالیز نمونه‌های حاوی آنتی‌بیوتیک از دستگاه اسپکتروفتومتری (HACH DR-5000 UV–Vis) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که استفاده از فتوکاتالیست پراکسی مونو سولفات (PMS) به‌همراه UV راندمان خوبی در حذف آنتی‌بیوتیک داشته به‌طوری که درصد حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در غلظت اولیه بهینه ۵ mg/L تحت شرایط بهینه برای سایر پارامترها (زمان ۳۰ دقیقه، pH ۷/۵ و دوز کاتالیزور ۱/۳۷ میلی‌مول) برابر ۹۳/۱۸ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این مطالعه کارایی قابل قبول فرآیند فوتوکاتالیستی UV/PMS در تجزیه آنتی‌بیوتیک سفیکسیم را نشان داد.

کلید واژه‌ها: اکسیداسیون پیشرفته، پراُکسی مونوسولفات، سفیکسیم، اشعه ماوراء بنفش (UV)

وصول مقاله: ۹۸/۱/۱۸ اصلاحیه نهایی:۹۸/۳/۲۵ پذیرش: ۹۸/۴/۵

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

مقدمه

دسترسی به آب سالم و فراوان از نظر کمیت، کیفیت، بهداشت و اقتصاد در کشورهای جهان یک مشکل جدی است (۱). آبی که در اثر ورود ترکیبات و آلاینده‌های کشاورزی یا شیمیایی ارزش آن کم شده و غیرقابل استفاده برای مصارف مفید شده باشد را آب آلوده می‌گویند (۲). آلودگی آب با غلظت کمی از آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین سمی، داروها، هورمون‌ها و آفت‌کش‌ها یک مشکل جدی است (۵-۳). آنتی‌بیوتیک‌ها دسته‌ای از داروهای ضد عفونت هستند که سبب مرگ یا توقف رشد باکتری‌ها می‌شوند و از منابع طبیعی، سنتزی و یا نیمه سنتزی به دست می‌آیند. مصرف سالیانه آنتی‌بیوتیک‌ها بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ تُن برآورد شده است (۶). سفیکسیم یکی از مهمترین آنتی‌بیوتیک‌های مورد استفاده در درمان عفونت است. سفیکسیم را می‌توان به طور مؤثر در برابر ارگانیسم‌های مختلف باکتریایی و عفونت‌ها، ازجمله استافیلوکوک، آنفولانزای هموفیلی، اشریشیاکلی، تب استرپتوکوک، ورم لوزه، عفونت‌های گلو و غیره استفاده کرد. استاندارد حضور سفیکسیم در منابع آبی، به‌عنوان آلاینده آلی برابر ۵ µg/L است (۷). این مواد از طرق مختلف از قبیل فاضلاب صنایع داروسازی، بیمارستان‌ها، مواد دفعی انسان و حیوانات وارد محیط می‌شوند. هر چند که تاکنون روش‌های مختلفی همچون جذب با کربن فعال (۸)، اسمز معکوس (۹) و روش‌های بیولوژیکی (۱۰) را برای حذف این ترکیبات دارویی از محیط مورد بررسی قرار داده‌اند ولی فرایندهای متعارف تصفیه آب و فاضلاب قادر به تجزیه و حذف این ترکیبات نیستند. به‌علاوه اینکه هر کدام از این روش‌ها دارای معایبی هستند به‌عنوان مثال روش جذب، آلاینده را از بین نمی‌برند، بلکه صرفاً آن‌را از یک فاز به فاز دیگر منتقل می‌کند یا روش‌های بیولوژیکی ممکن است نسبت به سمیت این مواد دچار شوک شود. بخاطر محدودیت‌های ذکر شده، امروزه از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بعنوان یک روش مناسب برای حذف انواع ترکیبات شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است (۱۱). اساس فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر پایه تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل فعال (OH) است که با مواد آلی واکنش داده و موجب تخریب آنها می‌شوند. روش فتوکاتالیستی نیز جزء فرآیندهایی است که منجر به اکسیداسیون آلاینده‌ها و تبدیل آنها به مواد بی‌خطر می‌گردد و بر پایه استفاده از نور برای برانگیختگی الکترون‌ها و تولید رادیکال‌های اکسیدکننده، تجزیه و اکسیدکردن آلاینده‌ها توسط این رادیکال‌ها استوار است. فتوکاتالیست‌ها می‌توانند آلودگی‌های محیطی متعددی را در دمای اتاق از طریق اکسیداسیون با استفاده از نور خورشید یا نور مصنوعی به‌عنوان یک منبع انرژی از بین ببرند (۱۲). یکی از کاتالیزورهایی که در فرآیندهای فتوکاتالیستی استفاده می‌شود پرسولفات و پراُکسی مونوسولفات می‌باشد. آنیون پِرسولفات ترکیبی غیرانتخابی و نسبتاً پایدار و قوی‌ترین اکسیدان خانواده پراکسیژن است و پتانسیل اکسیداسیون احیای آن ۲/۱ ولت است (۱۱) و در مقایسه با پراکسید هیدروژن با پتانسیل ۱/۸ ولت و پرمنگنات با پتانسیل ۱/۷ ولت، اکسید کننده‌ی قوی تری محسوب می‌شود (۱۳). واکنش‌های زیر نحوه فعالسازی پراکسی مونو سولفات را نشان می‌دهد (۱۴):

$$\text{PMS or PDS} \rightarrow SO_4^{\cdot-} \qquad (۱)$$

(۲)

$$SO_4^{\cdot-} + OH^- \rightarrow SO_4^{2-} + O^{\cdot}H$$

بنابراین هدف اصلی این مطالعه، بررسی کارایی فرآیند UV-پراُکسی مونوسولفات در حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم از محلول‌های آبی می‌باشد که مکانیسم اصلی تجزیه از طریق فعالسازی کاتالیزور پراُکسی مونوسولفات با استفاده از UV می‌باشد. تأثیر مهمترین پارامترهای راهبری مثل pH، زمان پرتوتابی، دوز کاتالیزور و غلظت اولیه سفیکسیم بر کارایی تجزیه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

روش بررسی

روش انجام آزمایش‌ها

این مطالعه در آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام گرفت. مواد مورد استفاده در این آزمایش شامل پراُکسی مونوسولفات (PMS)، آنتی‌بیوتیک سفیکسیم، اسیدکلریدریک و هیدروکسید سدیم بود که همگی در گرید آنالیتیکی بودند. کلیه مواد از شرکت Merck آلمان تهیه گردید. متغیرهای اصلی مطالعه شامل pH، دوز کاتالیزور PMS، غلظت اولیه و نهایی سفیکسیم، و زمان تابش UV بود.

برای تهیه کلیه محلول‌های آزمایش از آب دیونیزه استفاده شد. برای تنظیم pH محلول از اسیدکلریدریک ۰/۱ و هیدروکسید سدیم ۰/۱ استفاده شد.

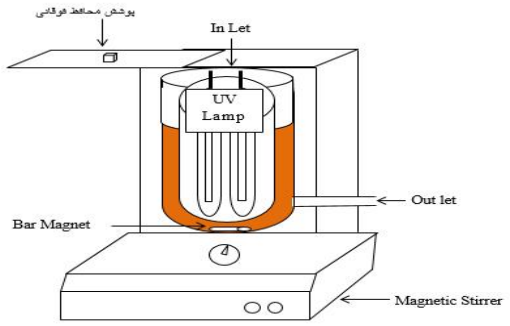
مراحل انجام آزمایش

الف) در ابتدا محلول استاندارد ppm ۱۰۰۰ آنتی بیوتیک از طریق حل کردن یک گرم از آنتی بیوتیک گرید آزمایشگاهی تهیه شد که از شرکت داروسازی لقمان خریداری شده بود. سایر محلول‌های مورد نظر با غلظت‌های مختلف از این محلول ساخته شد. در ادامه، حداکثر طول موج جذبی سفیکسیم از طریق اسکن جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر UV/Vis (HACH DR-5000 UV–Vis) تعیین شد که برابر ۲۸۸ نانومتر بود که در مطالعات دیگر نیز از این طول موج برای اندازه‌گیری این آنتی بیوتیک استفاده شده است (۱۵). سپس منحنی کالیبراسیون ساخته شد تا با تعیین معادله خط مربوطه، غلظت‌ها از روی مقدار جذب تعیین شود.

ب) تأثیر متغیرهای مورد نظر بر کارایی حذف آنتی بیوتیک در فاز دوم بررسی شد. برای انجام این مرحله، طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Minitab و R و با استفاده از طرح مرکب مرکزی روش منحنی پاسخ انجام گرفت. محدوده متغیرهای مورد نظر شامل pH (۹-۳)، دوز کاتالیزور (۲/۲۵ – ۰/۷۵ میلی مول)، غلظت اولیه سفیکسیم (۲۵-۵ میلی گرم بر لیتر) و زمان تابش UV (۳۰-۰ دقیقه) بود.

مشخصات راکتور

جهت انجام آزمایشات برای بررسی تأثیر متغیرهای ذکر شده بر کارایی حذف آنتی‌بیوتیک، از یک راکتور شیشه‌ای با حجم کلی ۱۲۰ mL، قطر درونی ۲۵ mm و ارتفاع ۴۰۰ mm استفاده شد. یک لامپ UVC در آن قرار داده شده و نانوذره پراکسی مونو سولفات به عنوان فتوکاتالیست استفاده شد. سپس ۱۰۰ CC از محلول حاوی غلظت‌های مختلف آنتی‌بیوتیک در داخل راکتور ریخته و لامپ روشن می‌شود. شماتیکی از پایلوت به کار برده شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک راکتور مورد استفاده در تحقیق

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

آنالیز نتایج: بهینه سازی بیشترین درصد حذف با استفاده از طرح مرکب مرکزی روش منحنی پاسخ، آنالیز واریانس و رگرسیون انجام شد. تمام آنالیزها با استفاده از نرم افزارهای R و Minitab انجام شد.

یافته‌ها

برای بررسی کفایت مدل و اثرات در مدل، آنالیز واریانس به کار گرفته شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داده شده در جدول ۱ نشان می‌دهد مدل برازش شده تحت شرایط مختلف پارامترهای مورد نظر ضریب تبیین (۰/۵۸) مطلوبی دارد که حاکی از پیش‌بینی و توافق مطلوب بین مقادیر مشاهده شده درصد حذف و مقادیر پیش‌بینی شده درصد حذف از مدل برازش شده است.

جدول ۱: نتایج تحلیل واریانس برازش رگرسیون درجه ۲ همراه با اثرات متقابل

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	P_value
اثرات مرتبه ۱	۲۱۱/۸۸	۴	۵۲/۹۷	۱۱/۷۸	<۰/۰۰۱
اثر متقابل دوز و غلظت اولیه	۱۴/۲۰	۱	۱۴/۲۰	۳/۳۰	۰/۰۷۵
اثر متقابل pH و دوز	۶۱/۷۲	۱	۶۱/۷۲	۱۳/۷۳	۰/۰۰۱
اثر مرتبه ۲ دوز	۱۳/۳۳	۱	۱۳/۳۳	۲/۹۶	۰/۰۹۲
باقیمانده‌ها	۲۱۵/۸۴	۴۸	۴/۵۰		
عدم برازش	۱۹۴/۵۲	۱۷	۱۱/۴۵	۱۶/۶۴	<۰/۰۰۱
خطای خالص	۲۱/۳۲	۳۱	۰/۶۹		

ضریب تبیین چندگانه(R^2): ۰/۵۸ ضریب تبیین تعدیل یافته ($R^2_{adjusted}$): ۰/۵۲

ضرایب رگرسیونی، خطای استاندارد، نتایج آزمون ضرایب رگرسیونی حاصل از مدل برازش شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: برازش رگرسیون درجه ۲ همراه با اثرات متقابل

فاکتور	برآورد ضریب	خطای استاندارد	مقدار t	P_value
عرض از مبدأ	۹۴/۵۰	۷/۱۰	۱۳/۳۲	<۰/۰۰۱*
زمان	۰/۳۳	۰/۰۶	۵/۴۳	<۰/۰۰۱*
pH	-۳/۲۶	۰/۷۸	-۴/۲۰	<۰/۰۰۱*
دوز	۳/۴۹	۶/۶۰	۰/۵۳	۰/۶۰۰
غلظت اولیه	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۹۸	۰/۳۳۰
دوز*غلظت اولیه	-۰/۲۷	۰/۱۵	-۱/۸۲	۰/۰۷۵**
دوز*pH	۱/۸۵	۰/۵۰	۳/۷۰	<۰/۰۰۱*
درجه ۲ دوز	-۳/۱۰	۱/۸۰	-۱/۷۲	۰/۰۹۱**

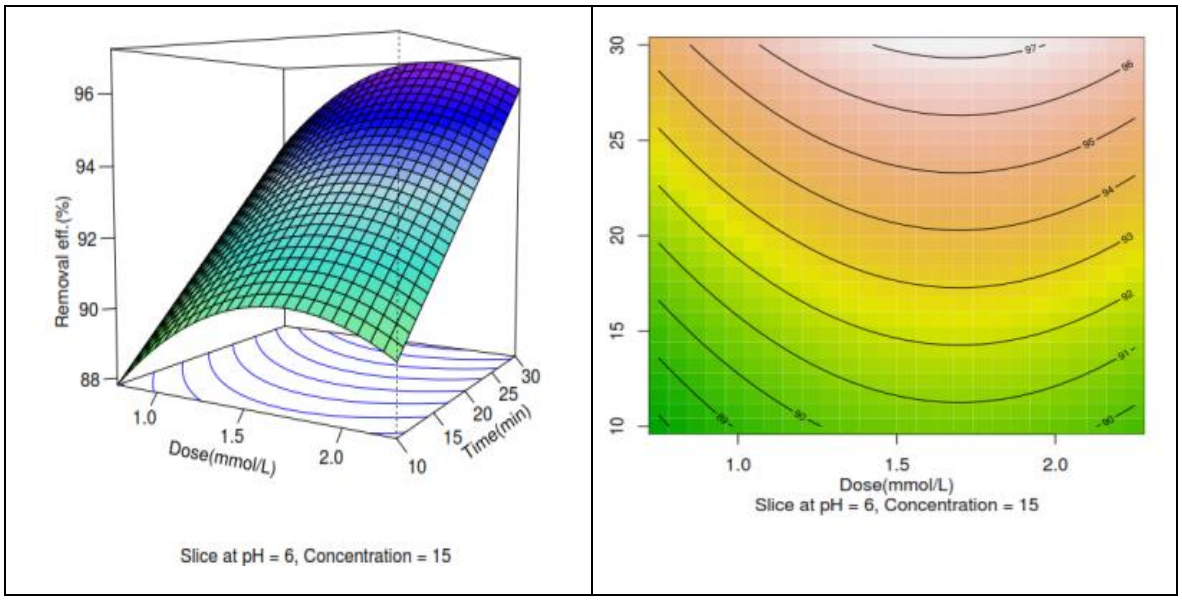
*معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱>

**معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

تـأثیر همزمـان دوز کاتـالیزور و زمـان پرتوتـابی UVC بـر کارایی حذف سفیکسیم در شکل ۲ نشـان داده شـده اسـت. همانطور که مشاهده می‌شود با ثابت نگهداشتن پـارامتر pH و غلظت اولیه، بـا افـزایش زمـان تمـاس و دوز کاتـالیزور تـا مقدار بهینه، راندمان حذف افزایش می‌یابد و زمان ۳۰ دقیقـه بیشترین راندمان حذف را دارا می‌باشد.

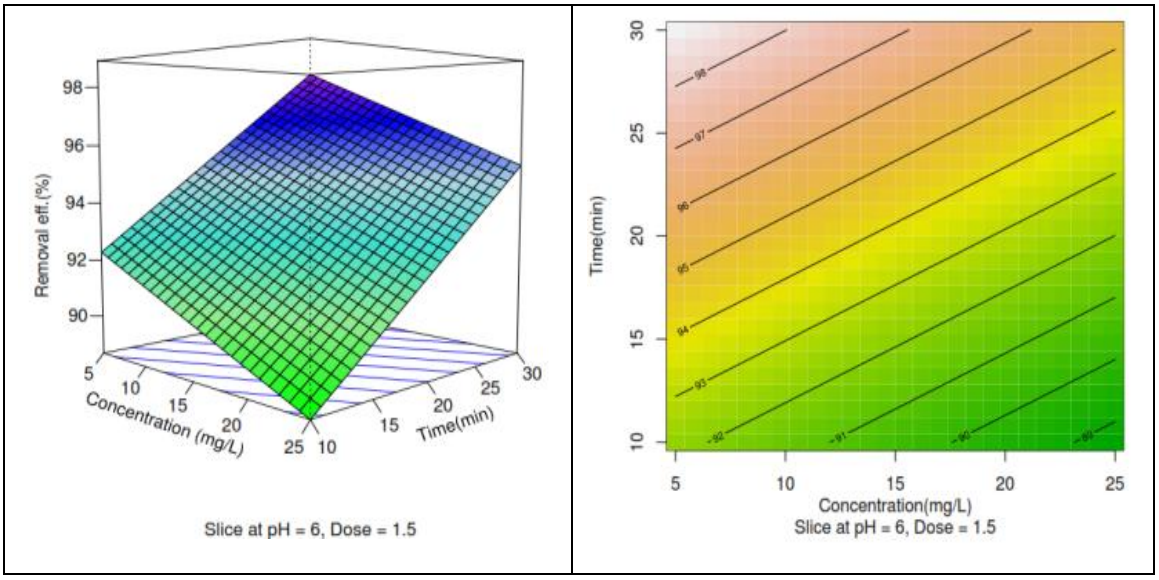


شکل ۲: ارتباط بین دوز کاتالیزور و زمان پرتوتابی بر کارایی حذف سفیکسیم

شکل دوبعدی و سه بعدی شماره ۳ تأثیر غلظت اولیه با ثابت نگهداشتن دوز کاتالیزور و pH را نشان مـی‌دهـد. همـانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اولیه در زمان ۳۰ دقیقه راندمان حذف کاهش می‌یابد و در غلظت اولیه ۵ میلی‌گـرم بر لیتـر بیشـترین رانـدمان حـذف مشـاهده مـی‌شـود ولـی در غلظـت‌هـای بـالاتر نیـز رانـدمان کـاهش چشـم‌گیـری نشـان نمی‌دهد.

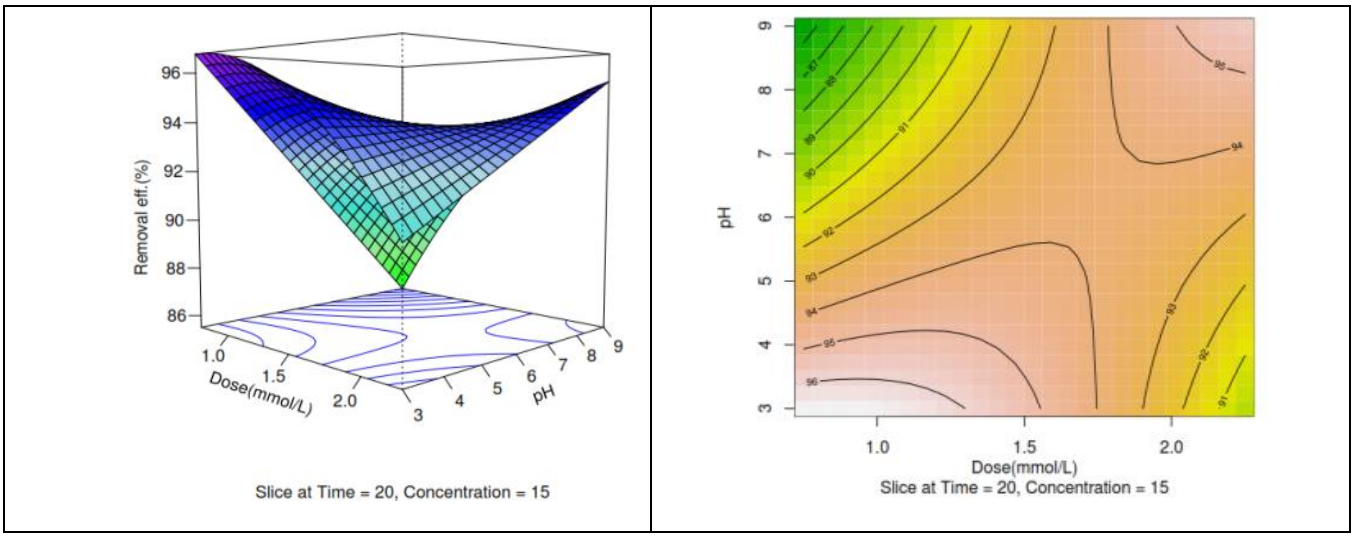
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]



شکل ۳: ارتباط بین غلظت اولیه سفیکسیم و زمان پرتوتابی بر کارایی حذف سفیکسیم

همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود راندمان حذف تحت تأثیر پارامتر pH به دوز بستگی دارد به طوری که در سطوح ثابتی از غلظت اولیه ۱۵ میلی گرم بر لیتر و زمان ماند ۲۰ دقیقه و دوز کاتالیزور برابر ۱/۵ میلی مول بر لیتر با متغیر گرفتن pH در دو سطح برابر ۳ و ۷ درصد حذف به ترتیب ۹۷ و ۹۳ درصد می‌باشد. هر چند در pH برابر ۳ درصد حذف نسبت به pH برابر ۷ بیشتر می‌باشد اما با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی و هزینه تأمین pH برابر ۷ راحت‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد و درصد حذف قابل قبولی دارا می‌باشد.

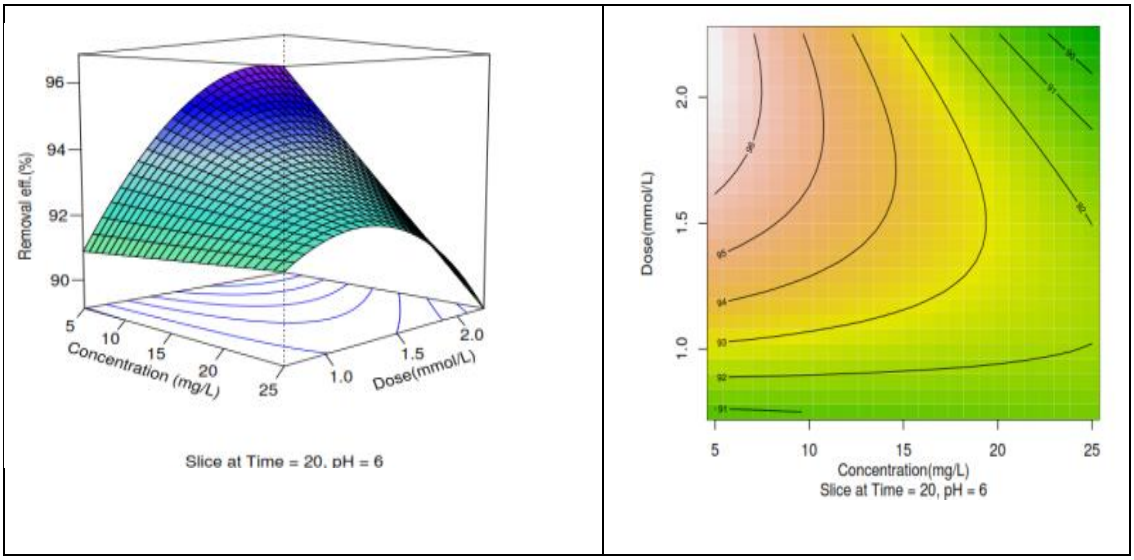


شکل ۴: تأثیر همزمان pH و دوز کاتالیست بر کارایی حذف

با توجه به شکل ۵، میانگین درصد حذف در سطوح ثابتی از زمان پرتوتابی برابر ۲۰ دقیقه و pH برابر ۶، درصد حذف با افزایش دوز به سطوح مختلفی از دوز کاتالیزور بستگی دارد.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]



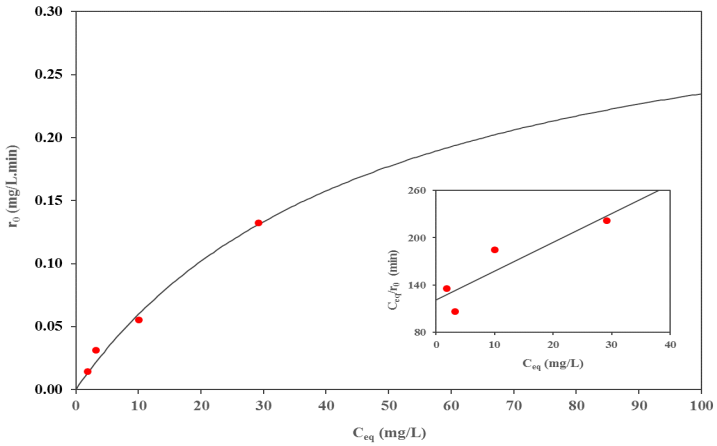
شکل ۵: تاثیر دوز کاتالیزور پراکسی مونوسولفات بر راندمان حذف

بر اساس مدل برازش شده و نتایج به دست آمده مقادیر بهینه برای پارامترهای زمان، pH، دوز پراکسی مونوسولفات و غلظت اولیه در ماکزیمم سازی درصد حذف به ترتیب ۳۰ دقیقه، ۷/۵، ۱/۳۷ میلی مول بر لیتر و ۵ میلی گرم بر لیتر به دست آمد که مقدار ماکزیمم برازش شده در این مقادیر ۹۶/۸۱ پیش‌بینی شد و با استفاده از آزمایش عملی مورد بررسی مجدد قرار گرفت که نتیجه آن ۹۳/۱۸ مشاهده شد که از نظر میزان حذف، راندمان قابل قبولی محسوب می‌شود.

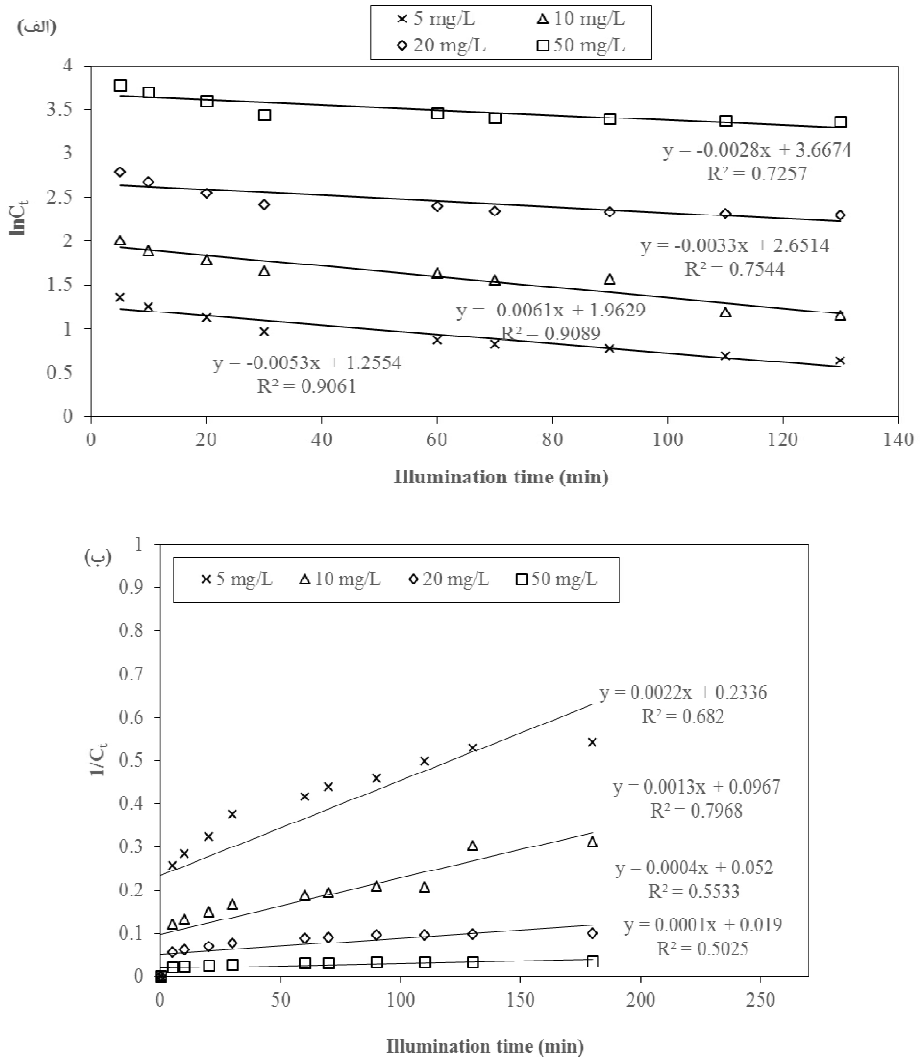
سینتیک فرآیندهای مختلف حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم با استفاده از سینتیک‌های لانگ‌موئر –هینشلود[1]، سینتیک درجه یک و درجه دو مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مربوط فرآیند UV تنها در شکل‌های ۶ تا ۷ و نتایج مربوط به فرآیند UV/PMS نیز در شکل‌های ۸ تا ۹ نشان داده شده است. در غلظت‌های بیشتر سفیکسیم روند حذف سفیکسیم با مدل‌های سنتیکی درجه یک و دو، برازش بهتری داشت. برای فرآیند UV/PMS در غلظت پایین (۵ میلی‌گرم در لیتر) ضریب R^2 کم و به میزان ۰/۹۷ و ۰/۹۴ به ترتیب برای مدل سنتیکی درجه یک و دو و در غلظت‌های بالاتر سفیکسیم (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) ضریب R^2 بیشتر شده و به میزان ۰/۹۸ و ۰/۸۳ به ترتیب برای مدل سنتیکی درجه یک و دو بدست آمد. برای فرآیند UV/PMS ضریب رگرسیون (R^2) برای سینتیک لانگ‌موئر –هینشلود برابر ۰/۹۸ می‌باشد. لذا سینتیک حذف آنتی‌بیوتیک مورد مطالعه بیشتر از مدل سینتیک لانگ‌موئر–هینشلود پیروی می‌نماید. بنابراین سینتیک حذف آنتی‌بیوتیک مورد مطالعه بیشتر از مدل سینتیک لانگ‌موئر–هینشلود پیروی می‌نماید. و در ادمه جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب پارامترهای سینتیک مدل لانگموئر هیشنلوود برای تجزیه سفیکسیم و پارامترهای سینتیکی درجه اول و دوم را برای تجزیه سفیکسیم را نشان می‌دهد.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]



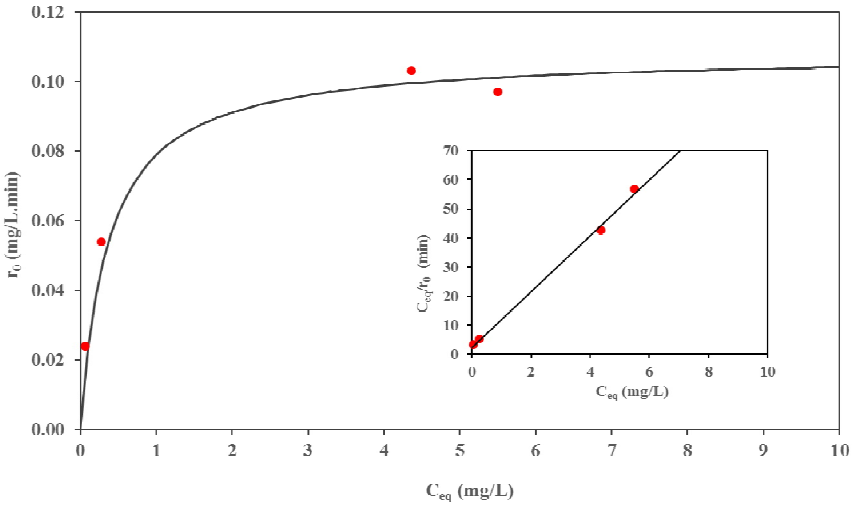
شکل ۶: سینتیک مدل لانگموئر- هیشنلوود حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در فرآیند UVتحت شرایط بهینه حذف



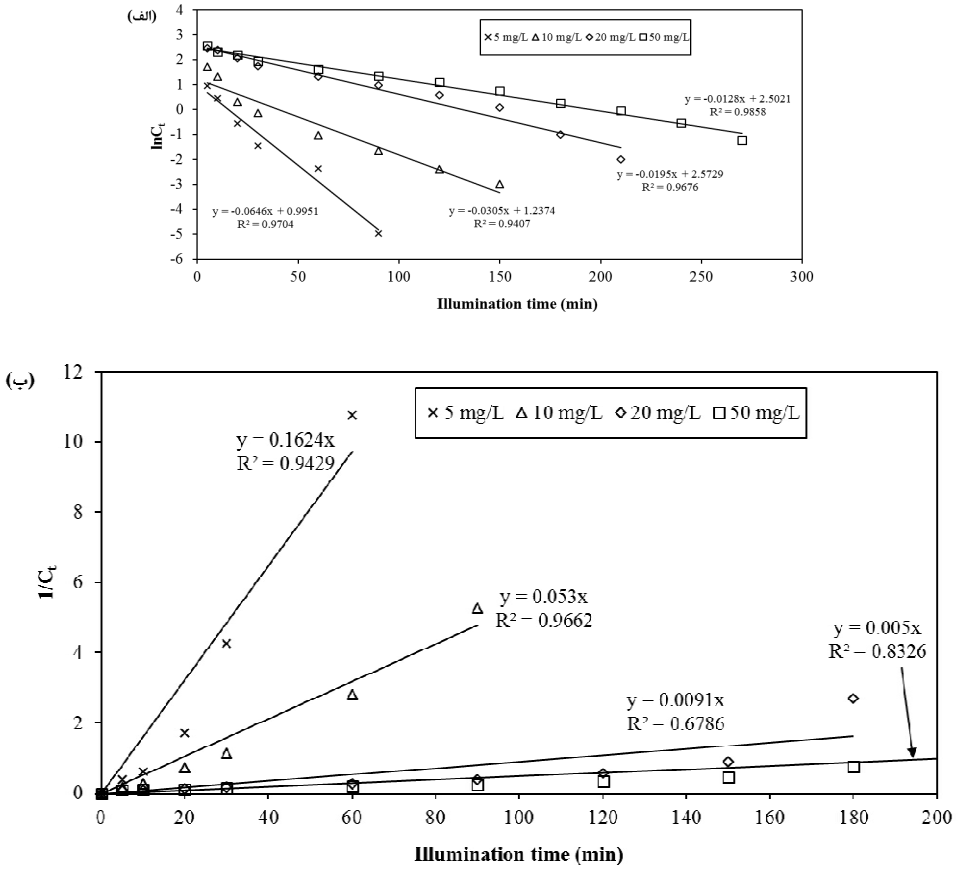
شکل ۷: (الف) سینتیک درجه یک و (ب) درجه دو حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در فرآیند فتولیزی تحت شرایط بهینه حذف

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]



شکل ۸: سینتیک مدل لانگموئر هیشنلوود حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در فرآیند UV/PMS تحت شرایط بهینه حذف



شکل ۹: (الف) سینتیک درجه یک و (ب) درجه دو حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در فرآیند UV/PMS تحت شرایط بهینه حذف

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

جدول ۳: پارامترهای سینتیکی مدل لانگموئر هیشنلوود برای تجزیه فتو کاتالیستی سفیکسیم

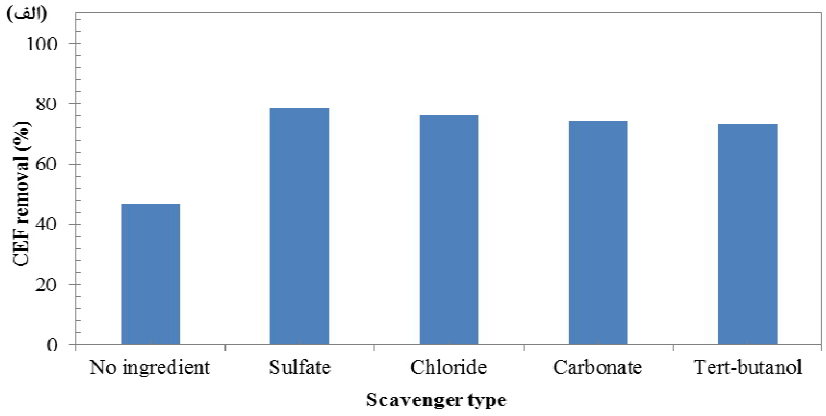
فرآیند	k_{LH} (mg/L-min)	K (L/mg)	R^2
فتولیز	۰/۳۴۸	۰/۰۲۱	۰/۹۸۷
پراُکسی مونوسولفات	۰/۱۰۸	۲/۷۱۷	۰/۹۸۲

جدول ۴: پارامترهای سینتیکی درجه اول و دوم برای تجزیه فتوکاتالیستی سفیکسیم

فرآیند	غلظت سفیکسیم (mg/L)	درجه اول کاذب		درجه دوم کاذب	
		K_1 (min^{-1})	R^2	K_2 (mg/L.min)	R^2
فتولیز	۵	۰/۰۰۵۳	۰/۹۰۶	۰/۰۰۲۲	۰/۶۸۲
	۱۰	۰/۰۰۶۱	۰/۹۰۹	۰/۰۰۱۳	۰/۷۹۷
	۲۰	۰/۰۰۳۳	۰/۷۵۴	۰/۰۰۰۴	۰/۵۵۳
	۵۰	۰/۰۰۲۸	۰/۷۲۶	۰/۰۰۰۱	۰/۵۰۲
U VC/PMS	۵	۰/۰۶۵۱	۰/۹۷۰	۰/۱۶۲۱	۰/۹۴۳
	۱۰	۰/۳۰۵۲	۰/۹۴۱	۰/۰۵۳۲	۰/۹۶۶
	۲۰	۰/۰۱۹۵	۰/۹۶۸	۰/۰۰۹۱	۰/۶۷۸
	۵۰	۰/۰۱۲۸	۰/۹۸۵	۰/۰۰۵۳	۰/۸۳۳

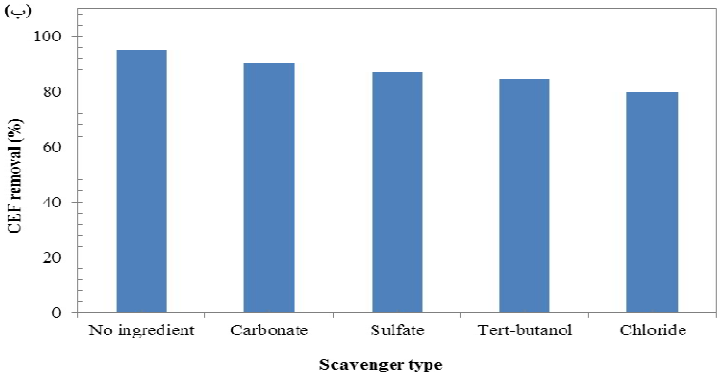
تأثیر رادیکال اسکاونجرها بر کارایی حذف سفیکسیم در فرآیندهای مورد مطالعه:

با توجه به اینکه وجود مداخله‌گرها در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مثل فرآیند استفاده شده در این مطالعه می‌تواند بر کارایی حذف آلاینده‌ی مورد نظر تأثیر داشته باشد این بخش از مطالعه، طراحی و انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]



شکل ۱۰: تأثیر حضور رادیکال اسکاونجرهای مختلف بر کارایی حذف سفیکسیم در فرآیندهای الف) فوتولیز، ب) UV/PMS

جدول ۵: محصولات تولیدی تجزیه فتوکاتالیستی سفیکسیم توسط دستگاه GC/MS

ترکیب	زمان ماند	Majorms ESI^+ fragment
Acetamide	۴/۱۵	۷۵/۶
2Amino-5-methyl benzoic acid	۴/۷۳	۱۳۲/۸
Methyl perapentyol	۵/۴۸	۲۰۷/۳
Etanimide acid	۷/۱۹۳	۲۸۱/۶
N,N-Dimethyl (trimethylsilyl) aniline	۸/۶۰	۷۲/۵

همانگونه که ملاحظه می‌شود مداخله‌گرها در فرآیند UV تنها علاوه بر اینکه باعث کاهش کارایی حذف نشده بلکه باعث افزایش راندمان نیز شده است که سولفات بیشترین تأثیر در افزایش راندمان و ترت بوتانل کمترین تأثیر در افزایش راندمان را داشته است. در مورد فرآیند UV/PMSهمانگونه که ملاحظه می‌شود حضور مداخله کننده‌ها باعث کاهش کارایی راندمان حذف شده است به طوری که در شرایط بهینه بدون مداخله کننده‌ها بیشترین راندمان حذف حدود ۹۵ درصد می‌باشد و در حضور مداخله کننده ها بیشترین راندمان نسبت به سایر مداخله کننده‌ها مربوط به کربنات که راندمان حدود ۸۵ درصد و کمترین راندمان مربوط به کلراید که حدود ۷۵ درصد می‌باشد.

تعیین محصولات حاصل از تجزیه توسط دستگاه کروماتوگرافی جرمی:

در جدول ۵ محصولات تولیدی در زمان‌های مختلف تجزیه فتوکاتالیستی سفیکسیم توسط دستگاه GC/MS ارائه شده است.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

بحث

با توجه به اینکه pH محلول یکی از پارامترهای بسیار مهم در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته محسوب می‌شود لذا تأثیر تغییرات pH در این مرحله بررسی شد. مکانیسم اثر pH در فرآیندهای فتوکاتالیستی به نوع آلاینده و همچنین بار نقطه‌ی صفر (Z^0) مورد استفاده در فرآیند اکسایش فتوکاتالیستی و برهم‌کنش الکتروستاتیکی بین سطح کاتالیست و آلاینده بستگی دارد. برای آلاینده‌هایی که قدرت اسیدی کمی دارند عمدتاً تجزیه آلاینده در نتیجه جذب و تخریب در نزدیکی pH_{pzc}[1] کاتالیست‌ها به میزان خود می‌رسد. افزایش سرعت واکنش فتوکاتالیستی در pH های پایین به دلیل افزایش مقدار سطحی بار مثبت در شرایط اسیدی است. به‌علاوه اینکه، سرعت تجزیه بعضی از آلاینده‌ها که در محیط‌های اسیدی آبکافت می‌شود ممکن است با افزایش pH، افزایش یابد. با توجه به اینکه pH را نمی‌توان از یک سیستم به سیستم دیگر تعمیم داد بنابراین بهینه‌سازی pH عملیاتی باید در هر مطالعه‌ای انجام گیرد (۱۶). نتایج نشان داد کارایی حذف سفیکسیم در pH= ۷/۵ و pH= ۳/۵ بیشترین مقدار بوده است. راندمان حذف در این pHها در حدود به ترتیب ۹۶/۸۱ و ۹۳/۱۸ درصد می‌باشد. هرچند که در pH اسیدی نسبت به pH خنثی راندمان حذف بیشتر است ولی با توجه به اینکه تأمین شرایط لازم از نظر اقتصادی و اینکه دستیابی به شرایط خنثی نسبت به اسیدی راحت تر می‌باشد لذا pH=۷/۵ به عنوان pH بهینه در نظر گرفته می‌شود. به‌علاوه اینکه کارایی حذف ۹۳/۱۸ درصد در شرایط خنثی با راندمان برابر ۹۶/۸۱ درصد اختلاف خیلی زیادی ندارد و راندمان مطلوبی محسوب می‌باشد. در اینجا نیز افزایش سرعت واکنش فتوکاتالیستی در pHهای پایین به دلیل افزایش مقدارسطحی بار مثبت در شرایط اسیدی است (۱۷). صفری و همکاران در سال ۱۳۹۴ تجزیه‌ی فتوکاتالیستی آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین با استفاده از فرآیندهای $UV/TiO_2/H_2O_2$ و UV/TiO_2 را مورد بررسی قراردادند (۱۸). در این مطالعه محدوده‌ی pH ۵ تا ۱۱مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که pH نقش مهمی در تجزیه و حذف آنتی‌بیوتیک ایفا می‌کند که در آن با افزایش pH راندمان فرآیند به دلیل کاهش رادیکال‌های هیدروکسیل کاهش می‌یابد که نتایج این مطالعه نیز با آن همخوانی دارد. علت کارایی بالای فرآیندهای بررسی شده در pH اسیدی را می‌توان به واکنش‌های (۳) تا (۶) نسبت داد:

$$e^- + O_2 \longrightarrow O_2^{\cdot} \quad (۳)$$

$$O_2^{\cdot -} + H^+ \longrightarrow HO_2 \quad (۴)$$

$$2\,HO_2^{\cdot} \longrightarrow O_2 + H_2O_2 \quad (۵)$$

$$H_2O_2 + O_2^{\cdot -} \longrightarrow OH^{\cdot} + O_2 + OH \quad (۶)$$

علاوه بر این گزارش‌شده است که تجمع ذرات فتوکاتالیستی در شرایط اسیدی در مقایسه با شرایط خنثی کاهش می‌یابد. در نتیجه مساحت سطحی مؤثر کاتالیست افزایش می‌یابد؛ که این شرایط منجر به افزایش تجزیه فتوکاتالیستی در شرایط اسیدی می شود(۶). که با نتایج این مطالعه نیز همخوانی دارد.

زمان پرتوتابی نیز یک پارامتر تأثیرگذار در تعیین بازده حذف آلاینده توسط فرآیندهای فتوکاتالیستی محسوب می‌شود. نتایج نشان داد با افزایش زمان تماس در محدوده ۵ تا ۶۰ دقیقه، راندمان حذف سفیکسیم نیز افزایش می‌یابد ولی با توجه به روند تغییرات و لحاظ نمودن محدودیت‌های مربوط به زمان ماند و حجم راکتور، زمان تابش ۳۰ دقیقه بعنوان زمان بهینه جهت ادامه آزمایشات در نظر گرفته شد. بهینه سازی زمان واکنش در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، باعث صرفه جویی در هزینه‌های بهره برداری و انرژی مصرفی می‌شود با افزایش زمان ماند، روند واکنش اکسایشی- کاهشی و تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل

[1] corresponding to the point of zero charge

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

ادامه داشته و رادیکال‌های آزاد تولید شده، صرف تجزیه آلاینده و ترکیبات به دست آمده می‌شود. در غلظت‌های کم سفیکسیم، افزایش زمان واکنش باعث ادامه تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و تماس بیشتر این رادیکال‌ها با آنتی‌بیوتیک و در نهایت تجزیه بیشتر سفیکسیم می‌شود. با گذشت زمان، جایگاهای فعال برای حذف آنتی‌بیوتیک تغییر می‌کند و تعداد محصولات حاصل از واکنش پراکسی‌مونو سولفات در محیط آبی افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه‌ای که اسرافیلی و همکاران در سال ۱۳۹۶ در بررسی کارایی اکسیداسیون پیشرفته بر پایه پرسولفات برای حذف مترونیدازول از محلول‌های آبی انجام دادند، نشان داد که با گذشت زمان، راندمان حذف افزایش می‌یابد و از زمان ۳۰ دقیقه به بعد، افزایش حذف اندکی رخ می‌دهد و در این مطالعه نیز زمان واکنش بهینه برابر ۳۰ دقیقه بدست آمد (۱۹).

نتایج مطالعه نشان داد با افزایش غلظت اولیه از ۵ به ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، کارایی حذف از ۹۳/۱۸ درصد به ۹۱/۳۷ درصد کاهش پیدا می‌کند یعنی میزان غلظت و کارایی رابطه معکوس با یکدیگر دارند. البته همانگونه که مشاهده می‌شود تغییر غلظت تأثیر چشم گیری بر کاهش کارایی ندارد. با توجه به نتایج، غلظت ۵ mg/L بعنوان غلظت بهینه جهت انجام ادامه آزمایشات در نظر گرفته شد که در این غلظت و شرایط بهینه سایر پارامترها (pH=۷/۵، زمان تماس ۳۰ دقیقه) کارایی حذف برابر ۹۳/۱۸ درصد بدست آمد. چون در تمام محدوده غلظت‌های بررسی شده، زمان تماس و pH یکسان بوده است و از مقدار مشخصی دوز کاتالیزور استفاده شده، لذا مقدار رادیکال‌های تولیدشده ($^{\bullet}OH$) در این شرایط یکسان بوده و به همین خاطر هرچه غلظت آلاینده کمتر باشد نسبت مولکول‌های آلاینده به رادیکال‌های تولیدی نیز کمتر بوده و بنابراین راندمان حذف بیشتر خواهد بود (۱۱). Aguilar و همکاران در سال ۲۰۱۱ تجزیه‌ی فتوکاتالیستی استامینوفن در محدوده غلظت ۲۰۰-۲۰ میلی گرم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که تجزیه فتوکاتالیستی استامینوفن در غلظت‌های کمتر به زمان واکنش کمتری نیاز داشته در حالی که هرچه غلظت استامینوفن بیشتر شود به همان نسبت زمان مورد نیاز برای تجزیه بیشتر می‌شود که با نتایج حاصل همخوانی دارد. ضمن اینکه مطالعات سینتیک واکنش نشان داد که سرعت واکنش حذف از معادلات درجه‌ی صفر پیروی می‌کند (۲۰).

Safari و همکاران در سال ۲۰۱۳ موفق شدند با استفاده از فرآیند فتوکاتالیستی آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین را بعد از ۳۰ دقیقه به طور کامل تجزیه نمایند. در این تحقیق با افزایش غلظت آلاینده، کارایی تجزیه کاهش یافت. آنها دلیل این امر را نرسیدن نور به همه‌ی ذرات کاتالیست بیان کردند و درنتیجه عدم تحرک همه ذرات کاتالیست، مقدار تجزیه تا میزان قابل‌توجهی کاهش یافت (۱۸).

نتایج مربوط به بررسی تأثیر دوز کاتالیزور بر کارایی حذف نشان داد در غلظت های ۰/۷۵، ۰/۷۸، ۲/۱، ۲/۲۵، ۱/۳۷ میلی مول PMS درصد حذف آنتی‌بیوتیک به ترتیب ۹۱/۰۶، ۹۱/۰.۶، ۹۶/۱۴، ۹۴/۶۶ و ۹۳/۸۸ می‌باشد و شرایط پیش بینی طبق مدل در غلظت‌های بالا به ترتیب برابر ۹۹/۱۵، ۹۸/۸۷، ۹۸، ۱۰۰و ۹۶/۱۸ درصد می‌باشد. با افزایش غلظت فتوکاتالیست تا حد مشخص (بهینه)، راندمان حذف سفیکسیم افزایش می‌یابد، ولی بعد از نقطه بهینه، میزان افزایش حذف با شیب کمتری اتفاق می‌افتد؛ این امر به دلیل آن است که با افزایش فتوکاتالیست تا حد مشخص، سایت‌های فعال جهت واکنش افزایش می‌یابد. Dimitrakopoulou و همکاران در سال ۲۰۱۲ تجزیه و معدنی سازی آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین را با استفاده از فرآیند $UV\text{-}A/TiO_2$ مورد بررسی قرار دادند (۲۱). در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش غلظت فتوکاتالیست تا ۱۰۰ mg/L، کارایی حذف نیر افزایش پیدا می‌کند ولی با افزایش بیشتر غلظت از ۱۰۰ به ۲۵۰ mg/L و بیشتر، کارایی

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

فرآیند کاهش پیدا می‌کند زیرا به جای تولید آب و دی‌اکسیدکربن، موادی با قابلیت تجزیه‌ی سخت تر از ماده‌ی اولیه (آموکسی سیلین) تولید شدند. دلیل این امر چنین بیان شده که باافزایش غلظت فتوکاتالیست، تعداد مولکول‌های کاتالیزور تحت تأثیر UV و نیز تعداد مولکول‌های آلاینده جذب شده روی سطح کاتالیست افزایش پیدا کرده و متناسب با آن واکنش فتوکاتالیستی بهتر انجام می‌شود. اما در دوزهای بالاتر از حد بهینه غلظت فتوکاتالیست، تعداد مولکول‌های آلاینده با تعداد ذرات کاتالیزور تناسب نداشته و همچنین در غلظت‌های بالاتر به علت خوشه‌ای شدن و تراکم ذرات تعداد مکانهای قابل دسترس در سطح کاتالیست کاهش می‌یابد و در نتیجه کارایی کاهش پیدا می‌کند (۲۲). بنابراین تعیین مقدار بهینه کاتالیست برای کارآمدی سیستم فتوکالیستی ضروری است. این مقدار به نوع و غلظت آلاینده، نوع و ابعاد رآکتور نیز بستگی دارد. به‌علاوه، هر چند انتظار می‌رود که مصرف مقادیر بیشتری از کاتالیست، سطح تماس بیشتری را برای آلاینده فراهم نماید و سرعت واکنش نیز بالاتر رود، اما مصرف بیش از حد کاتالیست مقدار اشعه‌ی تابیده‌شده را به خاطر کدورت تولید شده توسط خود ذرات کاتالیست، کاهش می‌دهد که ازلحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست (۱۶). همچنین، مقدار بهینه کاتالیست بستگی زیادی به هندسه سیستم، نحوه‌ی تابش، شرایط عملیاتی، شدت نور دریافتی، غلظت آلاینده و نوع آلاینده دارد (۲۳).

به طور کلی نتایج نشان داد که استفاده از فتوکاتالیست پراکسی مونو سولفات (PMS) بهمراه UV راندمان خوبی در حذف آنتی‌بیوتیک داشته به طوری که درصد حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در غلظت اولیه بهینه 5mg/L تحت شرایط بهینه برای سایر پارامترها (زمان ۳۰ دقیقه، pH برابر ۷/۵ و دوز کاتالیزور ۱/۳۷ میلی‌مول) برابر ۹۳/۱۸ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه این آنتی بیوتیک سفیکسیم ساختار حلقوی داشته که توسط روشهای تصفیه بیولوژیکی معمول که در تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری استفاده می‌شود نمی‌تواند به شکل مناسب و قابل قبولی حذف شود لذا از فرآیند پیشنهادی این مطالعه می‌توان جهت پیش تصفیه غلظت‌های بالا و شکستن حلقه ذکر شده استفاده و به‌دنبال آن از روشهای بیولوژیکی جهت رسیدن به استانداردهای مورد نظر استفاده کرد. ضمن اینکه راندمان بدست آمده در محدوده مقادیر بدست آمده در سایر مطالعات می‌باشد (۲۴).

بررسی تاثیر مداخله کننده‌ها بر کارایی حذف :

نتایج نشان داد با اضافه کردن مداخله کننده‌ها همراه فتوکاتالیست پراکسی‌مونوسولفات راندمان حذف نسبت به حالتی که مداخله‌کننده‌ها اضافه نشده، کاهش پیدا می‌کند. دلایل مختلفی باعث می‌شود که راندمان حذف کاهش یابد یکی از دلایل این است که ترکیبات اضافه شده با آنیون هیدروکسیل واکنش داده و تولید رادیکال‌های آنیونی می‌کند و رادیکال‌های آنیونی قدرت اکسیداسیون بسیار کمتری از رادیکال های هیدروکسیل دارد (۱۸):

$$CO_3^{2-} + OH \rightarrow CO_3^{-} + OH \quad (۷)$$

$$SO_4^{2-} + OH \rightarrow SO_4^{-} + OH^{-} \quad (۸)$$

دلیل دیگر اینکه، آنیون‌های اضافه شده منجر به جذب بخشی از تابش‌های اشعه فرابنفش می‌شود و بنابراین مانع همولیز و فتوشیمیایی شدن مولکول‌های آب و محدود شدن تولید OH می‌شود بنابراین، به دلیل کاهش قابل ملاحظه رادیکال هیدروکسید در حضور این آنیون‌ها، کارایی حذف آلاینده نیز کاهش پیدا می‌کند (۲۵) که نتایج این مطالعه نیز این روند را نشان داد کاهش حذف آلاینده می‌شود.

Hoseini و همکاران در سال ۲۰۱۵، حذف آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین از محلول‌های آبی با استفاده از فرآیند نانوسونوشیمیایی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نیز نشان داد که غلظت‌های بالای یون‌های مداخله کننده کربنات و کلراید به عنوان عوامل رباینده‌ی رادیکال‌های هیدروکسیل عمل می‌کند بنابراین منجر به کاهش راندمان حذف تتراسایکلین می‌شود (۶). از طرف

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

دیگر، اثر مداخله کننـدهـا بـدون حضـور فتوکاتالیسـت (در حضورUV تنها) باعث افزایش راندمان حذف می‌شود زیرا UVC باعث می‌شود تا آنیون‌های اضافه شده به محلـول بـه رادیکـال ایـن ترکیبـات تبـدیل شـده بنـابراین پتانسـیل اکسیداسیون در مقایسه با UV تنها افزایش پیدا کند (۲۶).

تعیین سینتیک فرآیند در حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم :

در تمام فرآیندها، مطالعه‌ی سینتیک واکنش برای پی بـردن به نحوه‌ی انجام واکنش حذف آلاینده انجام مـی‌شـود. ایـن مطالعات به اجرای بهتر فرآیند در مقیـاس کـاربردی کمـک خواهد کرد. بـا توجـه بـه تـأثیر غلظـت آلاینـده بـر سـرعت واکنش‌ها، یک واکـنش مـی‌توانـد درجـه ی اول، دوم و یـا سوم باشد. با توجه به نتایج حاصل از بررسی سینتیک حذف سفیکسیم توسط فرآیند UV/PMS می‌توان نتیجـه گرفـت سینتیک حـذف آنتـی‌بیوتیـک مـورد مطالعـه بیشـتر از مـدل سینتیک لانگ‌موئر –هینشلود پیروی می‌نماید. مدل سینتیکی لانگمویر –هینشـلورد یکـی از مـدل‌هـای سـینتیکی متـداول اسـت کـه بـرای بررسـی سـینتیکی سیسـتم‌هـای هتـروژن مورداستفاده قرارگرفتـه اسـت. نتـایج مطالعـه‌ای کـه توسـط علیدادی و همکاران در سال ۱۳۹۶ بر روی تجزیه هتروژنـی و همـوژنی آنتـی‌بیوتیـک سیپروفلوکساسـین بـا اسـتفاده از کامپوزیت کیتوزان/ زئولیت انجام شد نشان داد که سینتیک فرآیند از مدل سینتیک لانگموئر پیـروی مـی‌کنـد (۲۷) کـه نتایج این مطالعه نیز با آن همخواهی دارد. در مطالعـه‌ای کـه توسط Sheydaei و همکاران در سال ۲۰۱۸ بر روی آماده سـازی ورق نـانو $N\text{-}TiO_2$ گـرافن اکسـید تیتـان بـر اثـر فتوکاالیستی اوزناسیون سفیکسیم انجام شد مشاهده شـد کـه سینتیک فرآیند از مدل لانگموئر هیشنلوود پیـروی مـی‌کنـد (۲۸). در مطالعـه دیگـری کـه اسـرافیلی و همکـاران در سال۱۳۹۷ در حذف فتوکاتالیستی آنتی‌بیوتیک مترونیدتزول انجام دادند مشاهده شد که سینتیک فرآیند و مطالعـه درجـه واکنش از مدل لانگموئر هیشنلوود پیروی می‌کنـد و مقـدار ثابت سرعت در شرایط بهینـه برابـر $0/02\ min^{-1}$ تعیـین شـد که نتایج این مطالعه نیز با آن همخوانی دارد (۲۹).

در کروماتوگرام حاصل از آنالیز نمونه در زمان ۵/۴۸ دقیقـه یک پیک مشخص مشاهده مـی‌گـردد کـه احتمـالاً ناشـی از وجود آلاینده آمین متیل ایزوکسازول در داخل نمونه اسـت (۳۰). این پیک با مساحت کمتری نسبت بـه نمونـه اولیـه در نمونه بعد از واکنش هـم وجـود داشـت کـه بیـانگر حضـور مقادیری از حضور آنتـی‌بیوتیـک بعـد از واکـنش مـی‌باشـد. همچنین در زمان ۴/۷۳ دقیقه یک پیک با ارتفاع نسبتا کوتاه در مقایسه ترکیب اصلی آنتی‌بیوتیک مشاهده که ایـن پیـک در نمونه قبل از واکنش مشاهده نشد که این ماده با مطابقـت بـا لایبـرری ترکیـب 2-Amino-5- methylbenzoic acid را نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان ترکیـب واسـطه حین اکسیداسیون سفیکسیم تولید شده باشـد. دومـین پیـک نسبتاً بلندی که قبل و بعد از واکنش مشـاهده شـد، در زمـان ۸/۶۰ دقیقه است که با عنـوان ترکیـب N,N-Dimethyl (trimethylsilyl) aniline شناسایی می‌شـود کـه موئیـد حضور آنتی‌بیوتیک در محلول می‌باشد.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج مطالعه نشان داد که فرآیند فتوکاتالیستی UV/پراکسی مونو سولفات قابلیت بالایی در حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم دارد. بهترین شرایط به دست آمده در حذف آنتی‌بیوتیک مورد مطالعه، شامل pH ۷/۵، غلظت آلاینده ۵ میلی گرم بر لیتر، دوز کاتالیست ۱/۳۷میلی مول بر لیتر و زمان برابر ۳۰ دقیقه می‌باشد. سینتیک حذف سفیکسیم نیز از مدل سینتیک لانگموئر هیشنلوود پیروی می‌کند. بالاخره اینکه وجود مداخله کننده‌ها در شرایط بهینه فتوکاتالیستی UV/پراکسی‌مونو سولفات باعث کاهش راندمان حذف می‌شود.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر بخشی از پایان‌نامه دانشجوی کارشناسی ارشد خانم رقیه خزائی با شماره طرح ۹۶۰۴۲۷۲۶۶۵ و با کد اخلاق IR.UMSHA.REC.1396.298 می‌باشد. بنابراین نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم پزشکی همدان به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

1. Ma J, Liu W. Effectiveness of ferrate (VI) preoxidation in enhancing the coagulation of surface waters. Water Res 2002;36:4959-62.
2. Aguilar C, Montalvo C, Ceron J, Moctezuma E. Photocatalytic degradation of acetaminophen. Int J Environ Res 2011;5:1071-78.
3. Khodadadi M, Saghi MH, Azadi NA, Sadeghi S. Adsorption of chromium VI from aqueous solutions onto nanoparticle sorbent: chitozan-Fe-Zr. J Mazandaran Univ Med Sci 2016;26:70-82. [In Persian]
4. Leili M, Pirmoghani A, Samadi MT, Shokoohi R, Roshanaei G, Poormohammadi A. Determination of pesticides residues in cucumbers grown in greenhouse and the effect of some procedures on their residues. Iran J Public Health 2016;45:1481-90.
5. Rahbar A, Farjadfard S, Leili M, Kafaei R, Haghshenas V, Ramavandi B. Experimental data of biomaterial derived from Malva sylvestris and charcoal tablet powder for Hg^{2+} removal from aqueous solutions. Data Brief 2016;8:132-5.
6. Hoseini M, Safari GH, Kamani H, Jaafari J, Mahvi A. Survey on Removal of Tetracycline Antibiotic from Aqueous Solutions by Nano-Sonochemical Process and Evaluation of the Influencing Parameters. IJHE 2015;8:141-52. [In Persian]
7. Environmental Protection Agency (EPA). National primary drinking water regulations: Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule. Final rule. Federal Register 2002;67:1811.
8. Leili M, Fazlzadeh M, Bhatnagar A. Green synthesis of nano-zero-valent iron from Nettle and Thyme leaf extracts and their application for the removal of cephalexin antibiotic from aqueous solutions. Environ Technol 2018;39:1158-72.
9. Košutić K, Dolar D, Ašperger D, Kunst B. Removal of antibiotics from a model wastewater by RO/NF membranes. Sep Purif Technol 2007;53:244-9.
10. Yazdanbakhsh A, Paseban A, Ghorbanpoor R. Inhibitory Effects of the Amoxicillin on Treatment Efficiency of Synthetic Wastewater in A Sequencing Batch Reactor. JNKUMS 2015;7:669-82. [In Persian]
11. Samarghandi MR, Leili M, Harati R, Tarlani Azar M, Maleki S. Efficiency of Electro/persulfate Process by Iron Electrode in Removing Furfural from Aqueous Solution. J Mazandaran Univ Med Sci 2014;24:95-108. [In Persian]

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

12. Yari K, Seidmohammadi A, Khazaei M, Bhatnagar A, Leili M. J Environ Health Sci Engineer 2019;17:337-51.
13. Yukselen-Aksoy Y, Khodadoust AP, Reddy KR. Destruction of PCB 44 in Spiked Subsurface Soils Using Activated Persulfate Oxidation. Water Air Soil Poll 2010;209:419-27.
14. Liu X, Zhang T, Zhou Y, Fang L, Shao Y. Degradation of atenolol by UV/peroxymonosulfate: kinetics, effect of operational parameters and mechanism. Chemosphere 2013;93:2717-24.
15. Shooshtari NM, Ghazi MM. An investigation of the photocatalytic activity of nano α-Fe_2O_3/ZnO on the photodegradation of cefixime trihydrate. Chem Eng J 2017;315:527-36.
16. Cardona P, Patricia S. Coupling of photocatalytic and biological proceses as a contribution to the detoxification of water: catalytic and technological aspects [dissertation]. EPFL, Swiss Federal Institute of Technology: Lausanne; 2001.
17. Esmaeili S, Dehvari M, Babaei AA. Degradation of Acid Orange 7 Dye with PMS and H2O2 Activated by CoFe2O4/PAC Nanocomposite. Arch Hyg Sci 2019;8:35-45.
18. Safari GH, Hoseini M, Kamali H, Moradirad R, Mahvi AH. Photocatalytic degradation of tetracycline antibiotic from aqueous solutions using UV/TiO2 and UV/H2O2/TiO2. IJHE 2014;5:203-13. [In Persian]
19. Azadbakht F, Esrafili A, Yeganeh Badi M, Sajedifar J, Amiri M. Efficiency of persulfate-based advanced oxidation process (UV/$Na^2S_2O_8$) in removal of metronidazole from aqueous solutions. J Mazandaran Univ Med Sci 2017;27:119-29. [In Persian]
20. Aguilar C, Montalvo C, Ceron J, Moctezuma E Photocatalytic degradation of acetaminophen. Int J Environ Res 2011;5:1071-8.
21. Dimitrakopoulou D, Rethemiotaki I, Frontistis Z, Xekoukoulotakis NP, Venieri D, Mantzavinos D. Degradation, mineralization and antibiotic inactivation of amoxicillin by UV-A/TiO_2 photocatalysis. J Environ Manage 2012;98:168-74.
22. Verma A, Dixit D. Photocatalytic degradability of insecticide chlorpyrifos over UV irradiated titanium dioxide in aqueous phase. Int J Environ Sci 2012;3:743.
23. Wang K-H, Hsieh Y-H, Chou M-Y, Chang C-Y. Photocatalytic degradation of 2-chloro and 2-nitrophenol by titanium dioxide suspensions in aqueous solution. Appl Catal B: Environmental 1999;21:1-8.
24. Wang LK, Hung Y-T, Lo HH, Yapijakis C. Waste treatment in the food processing industry: CRC Press; 2005.
25. Moussavi G, Hossaini H, Jafari SJ, Farokhi M. Comparing the efficacy of UVC, UVC/ZnO and VUV processes for oxidation of organophosphate pesticides in water. J Photochem Photobiol A Chem 2014;290:86-93.
26. Jafari SJ, Moussavi G, Hossaini H. Degradation and mineralization of diazinon pesticide in UVC and UVC/TiO_2 process. Desalination Water Treat 2016;57:3782-90.
27. Alidadi H, Dolatabadi M, Mehrabpour M, Dehghan A. The efficacy of ciprofloxacin removal by Chitosan/Zeolite composite from aqueous solution: Response surface methodology, kinetic and isotherm studies. Journal of Health in the Field 2017;5:1-12. [In Persian]
28. Sheydaei M, Shiadeh HRK ,Ayoubi-Feiz B, Ezzati R. Preparation of nano N-TiO_2/graphene oxide/titan grid sheets for visible light assisted photocatalytic ozonation of cefixime. Chem Eng J 2018;353:138-46.
29. Esrafili A, Khosravi S, Gholami M, Farzadkia M, Abdorahimi G. Photocatalytic removal of metronidazole using magnetic TiO_2 nanocatalyst (Fe_3O_4@SiO_2@TiO_2): Synthesis,

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]

characterization, and operational parameters. J Mazandaran Univ Med Sci 2018;27:97-115. [In Persian]
30. Ji Y, Ferronato C, Salvador A, Yang X, Chovelon J-M. Degradation of ciprofloxacin and sulfamethoxazole by ferrous-activated persulfate: implications for remediation of groundwater contaminated by antibiotics. Sci Total Environ 2014;472:800-8.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.29252/sjku.24.4.22]