Journal of Behdasht dar Arseh (i.e., Health in the Field)
Shahid Beheshti University of Medical Sciences
School of Public Health and Safety
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf
Vol.14 No.1, Spring 2026

Evaluation of the efficiency of advanced chemical oxidation processes for the removal of Cefazolin from aqueous solutions

Soheila Pourbaba, *Amirhossein Javid, Amirhesam Hassani, Ali Mashinchian Moradi, Seyedeh Hoda Rahmati
Department of Environmental Engineering, SR.C. Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Aims: The release of antibiotics into the environment through hospital wastewater and pharmaceutical effluents has become one of the major environmental and public health concerns. Cefazolin, a widely used first-generation cephalosporin antibiotic, has been frequently detected in wastewater treatment plant effluents and may contribute to the dissemination of antibiotic resistance and environmental hazards. The present study aimed to investigate and compare the performance of the peroxone (O_3/H_2O_2) and advanced photo-oxidation ($UV/O_3/H_2O_2$) processes for the removal of cefazolin from aqueous solutions.

Materials and Methods: This experimental laboratory-scale study was conducted in 2025. To evaluate the performance of the O_3/H_2O_2 and $UV/O_3/H_2O_2$ processes in removing cefazolin from aqueous solutions, the effects of operational parameters, including initial cefazolin concentration (1, 3, 5, 7, and 10 mg/L), solution pH (3, 7, and 9), ozone contact time (5 and 10 min), and UV irradiation time (15 and 25 min), were investigated. The residual concentration of cefazolin was determined using high-performance liquid chromatography (HPLC). After determining the optimum operating conditions, the removal efficiencies of the two processes were compared.

Results: The results demonstrated that under the optimum operating conditions, the $UV/O_3/H_2O_2$ process achieved a cefazolin removal efficiency of 98.8% at an initial concentration of 1 mg/L, an ozone contact time of 10 min, and a UV irradiation time of 25 min. In contrast, the O_3/H_2O_2 process exhibited a relatively lower removal efficiency under the same conditions. Furthermore, the removal efficiency of both processes was significantly influenced by solution pH, initial cefazolin concentration, ozone contact time, and UV irradiation time, with the highest removal efficiency obtained at pH 9.

Conclusion: The findings of this study indicate that the $UV/O_3/H_2O_2$ process is more effective than the O_3/H_2O_2 process for the removal of cefazolin from aqueous media. Therefore, UV-based advanced oxidation processes can be considered an efficient and promising approach for the removal of persistent antibiotics and the improvement of wastewater treatment performance for antibiotic-contaminated effluents.

Keywords: Cefazolin; Advanced photo-oxidation; Peroxone; UV irradiation.

Please cite this article as: Pourbaba S, Javid AH, Hasani AH, Mashinchian Moradi A, Rahmati SH. Evaluation of the efficiency of advanced chemical oxidation processes for the removal of Cefazolin from aqueous solutions. Journal of Behdasht dar Arseh 2026; 14(1):5-16. https://doi.org/10.22037/jhf.v14i1.52811

Corresponding Author: Department of Environmental Engineering, SR.C. Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Corresponding Author: Department of Environmental Engineering, SR.C. Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: ahjavid@iau.ac.ir
Received: 15 May 2026
Accepted: 23 August 2026

فصلنامه علمی-پژوهشی
بهداشت در عرصه
دوره ۱۴ شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۵ تا ۱۶
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf

بررسی کارایی فرایندهای اکسیداسیون شیمیایی پیشرفته در حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین از محلول‌های آبی

سهیلا پوربابا، امیرحسین جاوید*، امیرحسام حسنی، علی ماشینچیان مرادی، سیده هدی رحمتی

گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات دانشکده آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و اهداف: ورود آنتی‌بیوتیک‌ها به محیط‌زیست از طریق فاضلاب‌های بیمارستانی و پساب‌های صنایع دارویی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی و بهداشت عمومی تبدیل شده است. سفازولین، به‌عنوان یکی از آنتی‌بیوتیک‌های پر مصرف از خانواده سفالوسپورین‌ها، به طور گسترده در پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناسایی شده و می‌تواند در گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی و بروز مخاطرات زیست محیطی نقش داشته باشد. هدف از این مطالعه بررسی و مقایسه کارایی فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2) و فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) در حذف سفازولین از محلول‌های آبی بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه از نوع تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی با رعایت ملاحظات اخلاقی در سال ۱۴۰۴ انجام شد. به منظور بررسی کارایی فرآیندهای O_3/H_2O_2 و $UV/O_3/H_2O_2$ در حذف سفازولین از محلول‌های آبی، اثر پارامترهای عملیاتی بر راندمان حذف مانند غلظت اولیه سفازولین (۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر)، pH (۳، ۷ و ۹)، زمان تماس ازن (۵ و ۱۰ دقیقه) و زمان تابش فرابنفش (۱۵ و ۲۵ دقیقه) ارزیابی و غلظت باقی مانده سفازولین با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) اندازه‌گیری شد. پس از تعیین شرایط بهینه، راندمان حذف دو روش با یکدیگر مقایسه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که فرآیند $UV/O_3/H_2O_2$ در شرایط بهینه می‌تواند ۹۸/۸ درصد از سفازولین موجود در محلول آبی با غلظت اولیه ۱ میلی‌گرم بر لیتر، زمان تماس ازن ۱۰ دقیقه و زمان تابش لامپ UV ۲۵ دقیقه حذف نماید، در حالیکه فرآیند O_3/H_2O_2 در شرایط مشابه، راندمان حذف نسبتا پایین‌تری داشت. همچنین، راندمان حذف در هر دو فرآیند به pH محلول، غلظت اولیه سفازولین، زمان تماس ازن و زمان تابش فرابنفش وابسته بود؛ به‌طوری‌که بیشترین راندمان حذف در pH برابر ۹ حاصل شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که فرآیند $UV/O_3/H_2O_2$ در مقایسه با فرآیند O_3/H_2O_2 عملکرد مؤثرتری در حذف سفازولین در محیط‌های آبی دارد. بنابراین، استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر تابش فرابنفش می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد برای حذف آنتی‌بیوتیک‌های مقاوم و بهبود کیفیت تصفیه فاضلاب‌های حاوی این نوع آلاینده‌ها مورد توجه قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: سفازولین؛ پروکسون؛ فتواکسیداسیون پیشرفته؛ تابش فرابنفش.

Please cite this article as: Pourbaba S, Javid AH, Hasani AH, Mashinchian Moradi A, Rahmati SH. Evaluation of the efficiency of advanced chemical oxidation processes for the removal of Cefazolin from aqueous solutions. Journal of Behdasht dar Arseh 2026; 14(1):5-16. https://doi.org/10.22037/jhf.v14i1.52811

***نویسنده مسئول:** گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم تحقیقات دانشکده آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران.

Email: ahjavid@iau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

مقدمه

آنتی‌بیوتیک‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های نوظهور شناخته می‌شوند، زیرا به طور گسترده مصرف شده و در نتیجه ورود مداوم به محیط زیست، از پایداری نسبی برخوردار بوده و در چرخه‌های زیست محیطی باقی می‌مانند [۱]. فاضلاب بیمارستانی حاوی داروها، میکروارگانیسم‌ها، فلزات سنگین و مواد شیمیایی سمی است [۲]. آنتی‌بیوتیک‌ها به طور گسترده در ورودی و خروجی و لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناسایی شده‌اند و فرآیندهای متداول تصفیه بیولوژیکی قادر به حذف کامل این ترکیبات نیستند [۳]. تخلیه فاضلاب بیمارستانی ممکن است باکتری‌ها و ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک را وارد محیط زیست کند. اگر فاضلاب‌های حاوی این آلاینده‌ها، به درستی تصفیه نشود، غلظت بالای آنتی‌بیوتیک‌ها وارد رودخانه‌ها و سایر منابع آبی می‌شود. این شرایط باعث گسترش باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک می‌شود که یک تهدید جهانی برای سلامت انسان است [۴]. باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک (Antibiotic-Resistant Bacteria: ARB) به طور مداوم وارد محیط‌های آبی می‌شوند [۵]. ورود این آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی، کشاورزی و آبزیان می‌تواند اثرات سمی داشته، تعادل اکوسیستم‌ها را مختل کرده و سلامت انسان را به خطر اندازد [۶]. آنتی‌بیوتیک‌ها پس از مصرف توسط انسان و حیوانات، متابولیزه شده و از طریق ادرار و مدفوع دفع و وارد محیط‌زیست می‌شوند [۷]. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فناوری‌های متداول خود به طور مؤثری طیف وسیعی از آلاینده‌ها را حذف می‌کنند، اما به طور خاص برای حذف آنتی‌بیوتیک‌ها و آلاینده‌های نو ظهور طراحی نشده‌اند [۸]. سفازولین یک آنتی‌بیوتیک از نسل اول سفالوسپورین‌ها است که به طور گسترده در درمان و پیشگیری از عفونت‌های باکتریایی استفاده می‌شود. این دارو عمدتاً به صورت تغییر نیافته از طریق کلیه‌ها و ادرار دفع شده و در نتیجه وارد فاضلاب شهری و محیط‌های آبی می‌شود. [۹]. سفازولین دارای نیمه عمر پلاسمایی ۱/۲ تا ۲/۲ ساعت در بزرگسالان با عملکرد طبیعی کلیه بوده و عمدتاً به‌صورت تغییر نیافته از طریق کلیه‌ها و ادرار دفع می‌شود [۱۰].

فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (Advanced OxidationProcesses: AOP) یک فرآیند غیربیولوژیکی است که از رادیکال‌های هیدروکسیل برای تجزیه و کانی‌سازی ترکیبات آلی و معدنی در فاضلاب استفاده می‌کنند (۱۰). مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب ازن زنی با فرآیندهای بیولوژیکی می‌تواند راندمان حذف آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر آلاینده‌های نوظهور (Emerging Contaminants: ECs) را به طور قابل توجهی از فاضلاب بهبود بخشد [۱۱]. در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)، ترکیبات دارویی مقاوم از طریق واکنش با گونه‌های اکسیدکننده فعال مانند رادیکال هیدروکسیل تخریب شده و در شرایط مناسب تا حدی معدنی‌سازی می‌شوند؛ بنابراین این فرآیندها برخلاف روش‌های انتقال فاز، موجب انتقال آلاینده به فاز دیگری نشده و منجر به تجزیه شیمیایی آنها می‌شوند [۱۲]. فرآیندهای ترکیبی مبتنی بر ازن، از جمله O_3/H_2O_2 و $UV/O_3/H_2O_2$ به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن به ویژه رادیکال هیدروکسی ($OH^{\cdot}$)، از مؤثرترین فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای حذف آلاینده‌های آلی مقاوم محسوب می‌شوند. با این حال، کارایی این فرآیندها به عواملی مانند pH ، غلظت ازن و پراکسید هیدروژن، نسبت O_3/H_2O_2 و ترکیب ماتریس فاضلاب، به ویژه حضور مواد آلی طبیعی (Natural Organic Matter: NOM) وابسته است. علاوه بر این، چنین فرآیندهایی ممکن است منجر به تشکیل فرآورده‌های واسطه و برخی فرآورده‌های جانبی شوند که نوع و مقدار آنها به شرایط عملیاتی و ترکیب شیمیایی فاضلاب بستگی دارد [۱۳]. با وجود مطالعات متعدد در زمینه حذف آلاینده‌های دارویی با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، اطلاعات موجود درباره حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین و مقایسه عملکرد فرآیندهای مختلف اکسیداسیون پیشرفته در شرایط یکسان محدود است. از این‌رو، پژوهش حاضر در مقایسه عملکرد دو فرآیند O_3/H_2O_2 و $UV/O_3/H_2O_2$ در حذف سفازولین از محلول‌های سنتتیک، همراه با بررسی نظام‌مند اثر پارامترهای عملیاتی شامل غلظت اولیه، pH، زمان تماس ازن و زمان تابش فرابنفش و تعیین شرایط بهینه حذف این آنتی‌بیوتیک است.

مواد و روش‌ها

نوع مطالعه و محل انجام آزمایش‌ها

پژوهش حاضر یک مطالعه تجربی از نوع آزمایشگاهی- کاربردی است که با هدف مقایسه کارایی دو فرآیند اکسیداسیون پیشرفته شامل ازن‌زنی/ هیدروژن پراکسید ($O\square/H\square O\square$) و فتو ازون‌زنی/ هیدروژن پراکسید ($UV/O_3/H_2O_2$) در حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین در سال ۱۴۰۴ انجام شد. آزمایشات در مجتمع آزمایشگاهی زکریای رازی تحت پوشش دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران انجام شد.

مواد شیمیایی و معرف‌های مورد استفاده

پودر استاندارد آنتی‌بیوتیک سفازولین (Cefazolin) با درجه خلوص ۹۹٪ از شرکت داروسازی جابرابن حیان تهیه شد. هیدروژن پراکسید (H_2O_2) با غلظت تجاری ۳۰٪ وزنی- وزنی، استونیتریل با گرید کروماتوگرافی (HPLC Grade)، سدیم هیدروکسید (NaOH) و سولفوریک اسید (H_2SO_4) جهت تنظیم pH ، همگی از برند مرک (Merck, Germany) تهیه شدند. تمامی محلول‌های استوک و استاندارد با استفاده از آب دیونیزه فوق خالص (آب گرید HPLC (Milli-Q) مقاومت الکتریکی ۱۸,۲ MΩ·cm) تهیه شدند و برای تنظیم هیدروژن یون از محلول‌های رقیق با غلظت‌های ۰/۱و ۱ مولار اسید و باز استفاده گردید.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

طراحی آزمایش و متغیرهای مورد بررسی

آزمایش‌های این پژوهش به روش یک متغیر در زمان (One-Factor-at-a-Time) جهت ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرآیند حذف سفازولین طراحی و اجرا گردید. محلول‌های سنتتیک با حل کردن مقدار مشخصی از پودر سفازولین در آب دیونیزه تهیه شدند. آزمایشات در دو مرحله، ابتدا با غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک سفازولین متغیر و pH برابر ۹ (به‌دلیل تولید بیشتر رادیکال هیدروکسیل در محیط قلیایی) و مرحله بعد با غلظت اولیه بهینه به دست آمده آنتی‌یوتیک سفازولین از مرحله اول با pH متغیر انجام شد. متغیرهای مستقل مورد بررسی شامل غلظت اولیه سفازولین (۱۰ mg/L و ۷، ۵، ۳، ۱)، pH اولیه (۳، ۷ و ۹)، زمان تماس ازن (۱۰min و ۵) و زمان تابش لامپ فرابنفش ۱۲ وات با طول موج ۲۵۴ نانومتر (۲۵ min و ۱۵) بود که اثر آنها بر متغیر وابسته (غلظت نهایی و راندمان حذف آنتی‌بیوتیک) سنجیده شد. pH تنها در ابتدای هر آزمایش تنظیم شد و در طول فرآیند کنترل یا اصلاح مجدد نشد، زیرا هدف مطالعه که بررسی اثر pH اولیه بر راندمان حذف بود. تنظیم pH اولیه محلول‌ها با استفاده از محلول‌های رقیق سدیم هیدروکسید و سولفوریک اسید انجام گرفت. در فرآیند $UV/O_3/H_2O_2$، عملیات به صورت متوالی (Sequential) انجام شد. بدین صورت که ابتدا نمونه‌ها در حضور پراکسید هیدروژن تحت ازن‌زنی با زمان تماس (۵ min و ۱۰) قرار گرفتند. پس از اتمام مرحله ازن زنی، نمونه‌ها به محفظه فتوراکتور منتقل شده و به مدت ۱۵ و ۲۵ دقیقه در معرض تابش فرابنفش قرار گرفتند. در این پژوهش، تزریق ازن و تابش UV به صورت هم‌زمان انجام نشد و هدف، بررسی اثر متوالی دو مرحله اکسیداسیون بر راندمان حذف سفازولین بود.

مشخصات سامانه آزمایش

آزمایش‌ها در ظروف آزمایشگاهی شیشه‌ای با حجم کاربردی ۱ لیتر انجام گرفت. گاز ازن با دبی حجمی مشخص توسط یک دستگاه ازن‌ژنراتور با ظرفیت اسمی ۵ g/h و با استفاده از جریان هوای محیط به عنوان گاز خوراک) تولید شد و از طریق یک دیفیوزر سرامیکی حباب‌ریز به انتهای راکتور تزریق گردید[۱۴].

در فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2)، ابتدا غلظت هیدروژن پراکسید معادل ۵۰ mg/L یا ۱/۴۷ mmol/L (بر اساس نتایج مطالعات مقدماتی و پیش آزمون و به منظور جلوگیری از اثر بازدارندگی یا جاروب‌کنندگی رادیکال‌ها در غلظت‌های بالاتر) با رقیق‌سازی محلول تجاری ۳۰٪ وزنی– وزنی به راکتور اضافه شد و بلافاصله جریان ازن به درون سیستم هدایت گردید تا با تشدید تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$)، راندمان تجزیه سفازولین ارتقا یابد [۱۵].

سپس ازن با نرخ دوز ۲۹/۱۶ mg/L.min توسط دستگاه ازن ژنراتور ۵g/h با زمان تماس (۱۰min و ۵) به داخل نمونه‌ها تزریق شد. در فرآیند فتوازون‌زنی/ هیدروژن پراکسید ($UV/O_3/H_2O_2$)، فرآیند اکسیداسیون با تزریق ازن و حضور غلظت ثابت هیدروژن پراکسید، تحت تابش یک لامپ فرابنفش کم فشار (UV-C) با توان اسمی ۱۲W و طول موج غالب ۲۵۴ nm به مدت ۱۵ و ۲۵ دقیقه انجام شد. در پایان هر یک از مراحل عملیاتی و به محض اتمام زمان‌های واکنش تعیین شده، نمونه‌ها سریعاً جهت متوقف ساختن واکنش‌های اکسیداسیون و جداسازی هرگونه ذرات معلق محتمل، از فیلتر سرسرنگی نایلونی (Nylon) با اندازه منافذ ۰/۴۵میکرومتر (Membrane Solutions, China) عبور داده شدند؛ همچنین از سدیم تیوسولفات به عنوان خاموش‌کننده (Quencher) برای حذف سریع H_2O_2 استفاده گردید. و برای آنالیزهای بعدی و تعیین غلظت باقیمانده آلاینده به دستگاه HPLC منتقل گردیدند. شماتیک و چیدمان سیستم تزریق گاز ازن به درون راکتور ناپیوسته با استفاده از دستگاه ازن ژنراتور در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱– چیدمان آزمایشگاهی و نحوه تزریق گاز ازن به نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ازن‌ژنراتور

Figure 1- Laboratory setup and ozone gas injection into the samples using an ozone generator

روش‌های آنالیز دستگاهی و تعیین کارایی حذف

سنجش غلظت باقیمانده آنتی‌بیوتیک سفازولین در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC، مدل Agilent 1200، ساخت کشور آمریکا) مجهز به آشکارساز (UV) و سیستم پمپ دو جزئی به همراه تزریق‌کننده اتوماتیک انجام شد. جداسازی توسط ستون فاز معکوس ODS C18 با مشخصات طول ۲۷۰ mm و قطر داخلی ۴/۶ mm صورت گرفت. فاز متحرک شامل مخلوط آب مقطر و استونیتریل (با نسبت ۷۰:۳۰) با نرخ جریان ثابت ۱ mL/min بود. حجم تزریق برابر با ۲۰ µL و طول موج آشکارساز بر روی ۲۷۰nm تنظیم گردید. در این شرایط، زمان بازداری (Retention time) سفازولین حدود ۴/۸ min به دست آمد. کلیه آزمایشات مطابق کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش آب و فاضلاب استفاده شد (Standarad method, 2012 APHA AWWA, CFWP) [۱۶].

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

راندمان حذف (به درصد) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{کارایی حذف}(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

که در این رابطه، C_0 نشان‌دهنده غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک سفازولین در نمونه (mg/L) و C_t بیانگر غلظت باقیمانده آن در زمان واکنش t (mg/L) است [۱۷].

یافته‌ها

نتایج حذف سفازولین در فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2)

ارزیابی کارایی فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2) در pH ثابت ۹ در تجزیه و حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین نشان می‌دهد (جدول شماره ۱) که با افزایش غلظت اولیه آلاینده، راندمان حذف کاهش می‌یابد، به طوری که در غلظت اولیه و ۱ mg/L بیشترین راندمان حذف در زمان تماس ازن ۱۰ min برابر با ۹۶/۹٪ و در غلظت اولیه ۱۰ mg/L، کمترین راندمان در همان زمان برابر با ۸۲/۷٪ بود. به عبارتی در غلظت پایین آنتی‌بیوتیک سفازولین، درصد حذف به صورت نسبتی بیشتر است، چون دوز ازن و رادیکال‌های $OH^{\bullet}$ به اندازه کافی برای تجزیه کل آنتی‌بیوتیک وجود دارد. در غلظت بالاتر آنتی‌بیوتیک (مثلاً ۵ یا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) درصد حذف، نسبتا کاهش می‌یابد؛ چون دوز O_3/H_2O_2 دیگر برای حذف همه مولکول‌ها کافی نیست. یعنی غلظت مطلق حذف شده بیشتر می‌شود، اما درصد حذف کمتر است. همچنین افزایش زمان تماس ازن از ۵ به ۱۰ دقیقه موجب بهبود راندمان حذف در تمامی غلظت‌ها شد که این امر بیانگر نقش مؤثر زمان تماس بیشتر در افزایش تجزیه سفازولین در فرآیندO_3/H_2O_2 است.

جدول ۱- درصد حذف آنتی بیوتیک سفازولین به روش پروکسون (O_3/H_2O_2) با غلظت‌های اولیه مختلف آنتی‌بیوتیک

Table 1- Cefazolin removal efficiency by chemical oxidation (O_3/H_2O_2) at different initial antibiotic concentrations

غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک (mg/L)	زمان تماس ازن (min)	غلظت ثانویه آنتی‌بیوتیک (mg/L)	درصد حذف
۱	۵	۰/۰۸۷	۹۱/۳
	۱۰	۰/۰۳۱	۹۶/۹
۳	۵	۰/۴۶۱	۸۴/۶
	۱۰	۰/۲۸۱	۹۰/۶
۵	۵	۰/۸۵۰	۸۳/۰
	۱۰	۰/۷۴۳	۸۵/۱
۷	۵	۱/۳۱	۸۱/۳
	۱۰	۱/۱۲	۸۴/۰
۱۰	۵	۱/۹۸	۸۰/۲
	۱۰	۱/۷۳	۸۲/۷

تأثیر زمان تماس ازن بر حذف سفازولین

با توجه به اینکه تزریق ازن به راکتور، توسط دستگاه ازن ژنراتورهای با توان ثابت ورودی ۵ g/h توسط دیفیوزر متخلخل تزریق شد نه نانو حباب، ازن‌زنی بیشتر حالت هوادهی داشت که انحلال‌پذیری پایینی انتظار می‌رفت. بدین منظور با افزایش زمان تماس از ۵ به ۱۰ دقیقه و با درنظرگیری ضریب تبدیل انحلال اکسیژن ۳۵ درصد، شدت واکنش و راندمان حذف سفازولین افزایش یافت. این امر به علت تولید بیشتر رادیکال‌های آزاد و افزایش قدرت اکسیدکنندگی در محیط است. البته در مقیاس واقعی تصفیه‌خانه فاضلاب، باید ملاحظات اقتصادی افزایش دوز ماده اکسیدکننده، روش تزریق، ایجاد خورندگی ناشی از ازن باقیمانده و تولید فرآورده‌های ثانویه ازن زنی مانند برومات را در نظر گرفت. افزایش زمان تماس بین ماده اکسیدکننده و آلاینده، موجب افزایش راندمان حذف از ۹۳/۱٪ به ۹۶/۹٪ به روش پروکسون شد.

نتایج حذف سفازولین در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$)

بررسی کارایی فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) در تجزیه و حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین نشان می‌دهد که اعمال متوالی تابش فرابنفش و تزریق ازن و پراکسید هیدروژن (۵۰ mg/L)، مقادیر غلظت ثانویه و درصد حذف را در شرایط pH قلیایی و غلظت‌های مختلف آلاینده مطابق جدول شماره ۲ تحت تأثیر قرار داده است.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

جدول ۲- درصد حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین به روش فتواکسیداسیون شیمیایی ($UV/O_3/H_2O_2$) با غلظت‌های اولیه مختلف

Table 2- Cefazolin removal efficiency by chemical photooxidation (UV/O□/H□O□) at different initial antibiotic concentrations

غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک (mg/L)	زمان تماس ازن (min)	زمان تابش UV (min)	غلظت ثانویه آنتی‌بیوتیک (mg/L)	درصد حذف
۱	۵	۱۵	۰/۰۲۷	۹۷/۳
	۱۰	۲۵	۰/۰۱۲	۹۸/۸
۳	۵	۱۵	۰/۱۳۱	۹۵/۶
	۱۰	۲۵	۰/۰۹۸	۹۶/۷
۵	۵	۱۵	۰/۲۹۸	۹۴/۰
	۱۰	۲۵	۰/۲۳۳	۹۵/۳
۷	۵	۱۵	۰/۴۳۱	۹۳/۸
	۱۰	۲۵	۰/۳۸۹	۹۴/۴
۱۰	۵	۱۵	۱/۰۱	۸۹/۹
	۱۰	۲۵	۰/۹۷۷	۹۰/۲

بیشترین حذف در غلظت اولیه ۱ میلی‌گرم بر لیتر با راندمان حذف تقریبی ۹۷/۳٪ و کمترین درصد حذف در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برابر ۸۹/۹ درصد به دست آمد. همچنین با افزایش زمان تماس ازن، بالاترین درصد حذف در غلظت اولیه ۱ میلی‌گرم بر لیتر برابر ۹۸/۸ و کمترین در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برابر ۹۰/۲ حاصل شد.

تأثیر تغییرات pH بر حذف سفازولین

ارزیابی اثر pH اولیه محلول بر کارایی فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2) در حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن غلظت اولیه بهینه (۱ mg/L)، تغییرات مقادیر pH (۳، ۷ و ۹) در کنار زمان‌های تماس مختلف ازن، مقادیر غلظت ثانویه و درصد حذف را مطابق جدول ۳ تغییر داده است. همچنین ارزیابی اثر تغییرات pH اولیه محلول بر کارایی فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) در حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین نشان می‌دهد که با اعمال غلظت اولیه بهینه (۱ mg/L)، تغییرات مقادیر pH در محیط‌های اسیدی، خنثی و بازی همراه با زمان‌های تماس ازن و تابش فرابنفش، مقادیر غلظت ثانویه و راندمان حذف را مطابق جدول ۴ تحت تأثیر قرار داده است. نتایج نشان می‌دهند که فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته با زمان تماس ازن ۱۰ دقیقه و زمان تابش UV ۲۵ دقیقه و pH برابر ۹ بهترین شرایط را برای سفازولین با راندمان حذف ۹۸/۸٪ درصد فراهم می‌کند. این امر ناشی از افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل در شرایط بازی است که به شدت فرآیند اکسیداسیون، کمک می‌کند. در مقادیر pH اسیدی و خنثی، راندمان حذف کاهش می‌یابد که می‌تواند به علت کاهش تولید یا پایداری رادیکال‌های فعال در آن شرایط باشد. pH اسیدی (۳) با زمان تماس ازن ۱۰ دقیقه و تابش UV ۲۵ دقیقه، میزان ۹۳/۳٪ حذف و pH خنثی (۷) با درصد حذف ۹۶/۵٪، باعث کاهش تولید رادیکال هیدروکسیل می‌شود. در pH پایین، ازن بیشتر به شکل O_3 باقی می‌ماند و تولید رادیکال‌ها کاهش می‌یابد.

جدول ۳- اثر مقادیر مختلف pH بر درصد حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین در غلظت اولیه بهینه (۱ mg/L) به روش پروکسون (O_3/H_2O_2)

Table 3- Effect of different pH values on cefazolin removal efficiency at the optimum initial concentration (1 mg/L) using chemical oxidation (O_3/H_2O_2).

pH	زمان تماس ازن (min)	غلظت ثانویه آنتی‌بیوتیک (mg/L)	درصد حذف
۳	۵	۰/۱۵۲	۸۴/۸
۳	۱۰	۰/۱۳۶	۸۶/۴
۷	۵	۰/۱۱۳	۸۷/۷
۷	۱۰	۰/۰۹۹	۹۰/۱
۹	۵	۰/۰۸۷	۹۱/۳
۹	۱۰	۰/۰۳۱	۹۶/۹

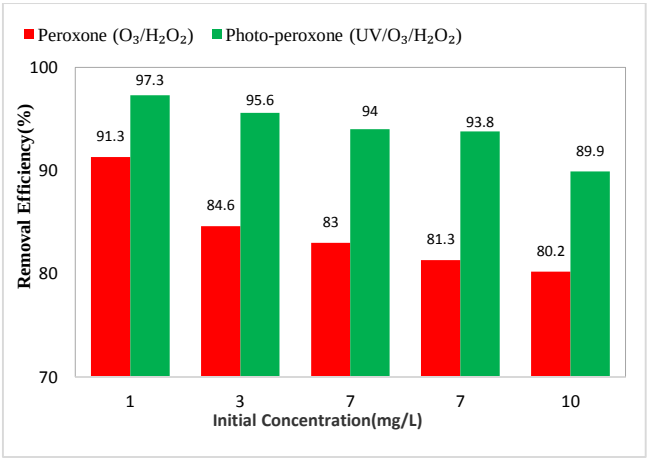
این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

جدول ۴- اثر مقادیر مختلف pH بر راندمان حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین در غلظت اولیه بهینه (۱ mg/L) به روش فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$)
Table 4. Effect of different pH values on cefazolin removal efficiency at the optimum initial concentration (1 mg/L) using chemical photooxidation (UV/O_3 /H_2 O_2)

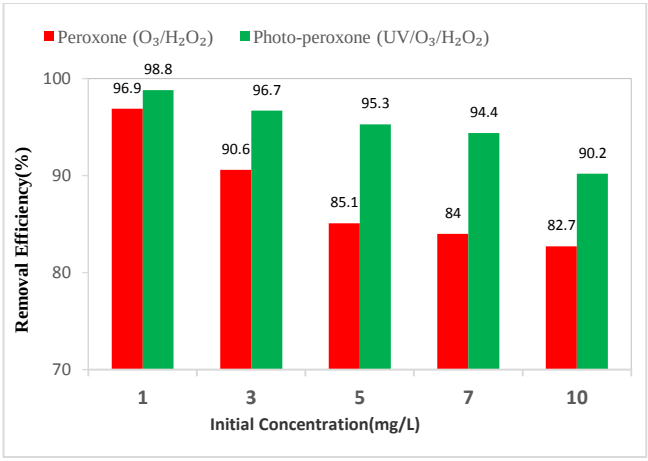
pH	زمان تماس ازن (min)	زمان تابش UV (min)	غلظت ثانویه آنتی‌بیوتیک (mg/L)	درصد حذف
۳	۵	۱۵	۰/۰۸۶	۹۱/۴
۳	۱۰	۲۵	۰/۰۶۷	۹۳/۳
۷	۵	۱۵	۰/۰۴۱	۹۵/۵
۷	۱۰	۲۵	۰/۰۳۵	۹۶/۵
۹	۵	۱۵	۰/۰۲۷	۹۷/۳
۹	۱۰	۲۵	۰/۰۱۲	۹۸/۸

مقایسه عملکرد دو فرآیند

مقایسه روند حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین حاکی از آن است که در تمامی غلظت‌های اولیه و زمان‌های تماس، فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) راندمان بالاتری نسبت به فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2) از خود نشان داده است. با افزایش غلظت اولیه آلاینده از ۱ به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، درصد حذف در هر دو فرایند با روندی کاهشی مواجه شده؛ در حالی که افزایش زمان تماس ازن و تابش فرابنفش موجب بهبود راندمان کلی حذف در هر دو فرآیند گردیده است. بررسی اثر pH اولیه محلول نشان می‌دهد که بیشترین درصد حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین در تمامی شرایط در pH قلیایی برابر ۹ حاصل شده است؛ به طوری‌که راندمان حذف در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) با زمان تماس ازن ۱۰ دقیقه و زمان تابش UV معادل ۲۵ دقیقه به حداکثر مقدار خود یعنی ۹۸/۸٪ رسیده است. مقادیر pH اسیدی (۳) و خنثی (۷) منجر به افت نسبی راندمان حذف در هر دو فرآیند گردیده‌اند. همچنین، در تمامی مقادیر pH، به‌کارگیری تابش فرابنفش و افزایش زمان‌های واکنش موجب بهبود چشمگیر کارایی سامانه نسبت به فرآیند بدون UV شده است.

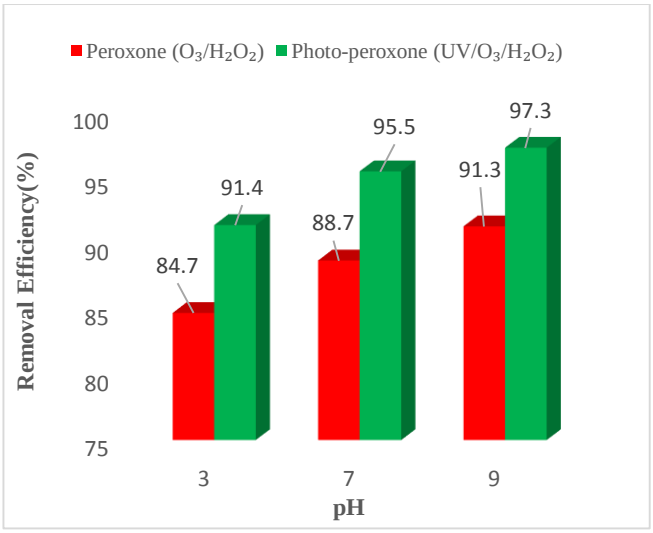


(الف)

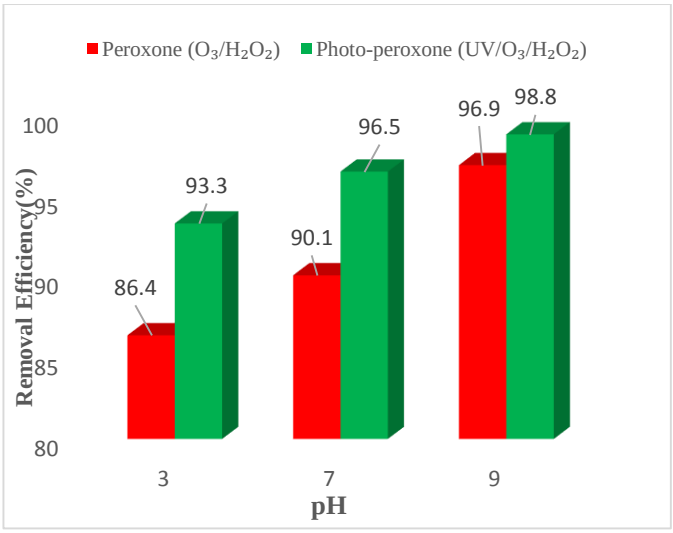


(ب)

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.



(ج)



(د)

شکل ۳- مقایسه کارایی فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2) و فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) در نمونه‌های سنتیک در حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین در شرایط (الف). در غلظت‌های مختلف و زمان ۵ دقیقه ازن‌زنی، تابش UV به مدت ۱۵ دقیقه و pH برابر ۹ (ب). در غلظت‌های مختلف و زمان ۱۰ دقیقه ازن‌زنی، تابش UV به مدت ۲۵ دقیقه و pH برابر ۹ (ج). در pH مختلف و زمان ۵ دقیقه ازن‌زنی، تابش UV به مدت ۱۵ دقیقه و غلظت آنتی‌بیوتیک ۱ mg/L (د). در pH های مختلف و زمان ۱۰ دقیقه ازن‌زنی، تابش UV به مدت ۲۵ دقیقه و غلظت آنتی‌بیوتیک ۱ mg/L

Figure 3- Comparison of the performance of the Proxone process (O_3 /H_2 O_2) and advanced photooxidation (UV/O_3 /H_2 O_2) for cefazolin removal from synthetic samples under the following conditions: (a) different initial concentrations, 5 min ozonation, 15 min UV irradiation, and pH 9; (b) different initial concentrations, 10 min ozonation, 25 min UV irradiation, and pH 9; (c) different pH values, 5 min ozonation, 15 min UV irradiation, and an initial antibiotic concentration of 1 mg/L; and (d) different pH values, 10 min ozonation, 25 min UV irradiation, and an initial antibiotic concentration of 1 mg/L

بحث

نتایج نشان داد که افزایش غلظت اولیه سفازولین از ۱ به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر موجب کاهش راندمان حذف در هر دو فرآیند می‌شود. در فرآیند پروکسون، راندمان حذف در زمان ۵ دقیقه از ۹۱/۳ ٪ در غلظت mg/L ۱ به۸۰/۳٪ در غلظت mg/L ۱۰ کاهش یافت؛ با افزایش زمان ازن‌زنی به ۱۰ دقیقه، این مقادیر به‌ترتیب به ۹۶/۹٪ و ۸۲/۷ ٪ رسید. در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) نیز راندمان حذف در غلظت mg/L ۱ از ۹۲/۱ ٪ در شرایط ۵ دقیقه ازن‌زنی و ۱۵ دقیقه UV به ۹۸/۸ ٪ در شرایط ۱۰ دقیقه ازن‌زنی و ۲۵ دقیقه UV افزایش یافت، در حالی‌که در غلظت mg/L ۱۰ این مقادیر به‌ترتیب ۸۹/۹ ٪ و ۹۰/۲ ٪ بود. بنابراین، افزایش زمان فرآیند موجب بهبود حذف شد، اما افزایش غلظت اولیه اثر محدودکننده‌ای بر راندمان داشت. این رفتار را می‌توان به کاهش نسبت ظرفیت اکسیدکنندگی به بار آلاینده و افزایش رقابت آلاینده و محصولات حدواسط برای گونه‌های فعال نسبت داد. عملکرد بالاتر فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$)، به‌ویژه رسیدن به راندمان ۹۸/۸٪ در غلظت mg/L ۱، نشان‌دهنده نقش مؤثر تابش UV در تقویت فرآیند اکسیداسیون از طریق افزایش تولید گونه‌های فعال است؛ با این حال، کاهش راندمان در غلظت mg/L ۱۰ نشان می‌دهد که این افزایش ظرفیت اکسیدکنندگی نیز در برابر بار بالاتر آلاینده محدودیت دارد. این یافته با مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که Bajpai و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی حذف سفازولین با الکتروکواگولاسیون، غلظت اولیه را در کنار pH، چگالی جریان و زمان فرآیند، از عوامل مؤثر بر عملکرد فرآیند معرفی کردند [۱۸]. در همین راستا، Sheikh و همکاران (۲۰۲۵) در حذف سفیکسیم با ازناسیون کاتالیستی ناهمگن، غلظت اولیه را از پارامترهای مؤثر بر عملکرد فرآیند گزارش کردند که اهمیت این عامل را در فرآیندهای مبتنی بر ازن نشان می‌دهد [۱۹]. همچنین، Amini-Badr و Behnajady (۲۰۲۲) در بررسی حذف فوتوکاتالیستی سفازولین با TiO□-P25، کاهش راندمان حذف را با افزایش غلظت اولیه گزارش کردند. این یافته با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد و نشان می‌دهد افزایش بار آلاینده می‌تواند ظرفیت گونه‌های فعال اکسیدکننده را محدود کند [۲۰]. مشابهت روند نتایج نشان می‌دهد که افزایش بار اولیه آلاینده و محدودیت ظرفیت گونه‌های اکسیدکننده می‌تواند رفتاری عمومی در فرآیندهای تصفیه و اکسیداسیون پیشرفته باشد.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

نتایج بررسی اثر pH نشان داد که pH محلول از عوامل مؤثر بر راندمان حذف سفازولین در هر دو فرآیند پروکسون(O_3/H_2O_2) و فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) است و تغییر شرایط شیمیایی محلول می‌تواند ظرفیت اکسیدکنندگی سامانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) ، با افزایش pH از ۳ به ۹، راندمان حذف در شرایط ۵ دقیقه ازن‌زنی و ۱۵ دقیقه تابش UV از ۹۱/۴٪ به ۹۷/۳٪ و در شرایط ۱۰ دقیقه ازن‌زنی و ۲۵ دقیقه UV از ۹۳/۳ ٪به ۹۸/۸٪ افزایش یافت. همچنین، افزایش زمان فرآیند در تمامی pHهای بررسی‌شده موجب بهبود راندمان شد. این روند را می‌توان به نقش pH در تجزیه ازن و افزایش تشکیل گونه‌های اکسیدکننده فعال، به‌ویژه رادیکال‌های هیدروکسیل، نسبت داد. در سامانه فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$)، حضور هم‌زمان UV و H_2O_2 می‌تواند تشکیل این گونه‌های فعال را تقویت کند و در نتیجه در شرایط قلیایی ظرفیت اکسیداسیون مؤثر افزایش یابد. یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات انجام‌شده در زمینه ازناسیون آلاینده‌های دارویی همخوانی دارد. Anjali و Shanthakumar (۲۰۲۲) در بررسی ازناسیون هم‌زمان آموکسی‌سیلین، سیپروفلوکساسین و استامینوفن pH=۹ را به‌عنوان شرایط بهینه فرآیند گزارش کردند و افزایش عملکرد در محیط قلیایی را به تشکیل بیشتر گونه‌های اکسیدکننده فعال نسبت دادند [۲۱]. همچنین Babaee و همکاران (۲۰۲۴) در حذف سیپروفلوکساسین و لووفلوکساسین با استفاده از میکروبابل‌های ازن، pH=۹ را در شرایط بهینه فرآیند تعیین کردند که تأییدکننده نقش مهم pH قلیایی در افزایش کارایی فرآیندهای مبتنی بر ازن است [۲۲]. همچنین، Ma و همکاران (۲۰۲۱) pH را در کنار غلظت آلاینده، دوز اکسیدکننده و زمان واکنش، از پارامترهای مهم مؤثر بر عملکرد فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته دانستند [۲۳]. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که pH می‌تواند با تغییر مسیرهای واکنش ازن و تولید گونه‌های فعال، بر عملکرد هر دو فرآیند پروکسون(O_3/H_2O_2) و فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) اثرگذار باشد.

در پژوهش حاضر، افزایش زمان ازن‌زنی از ۵ به ۱۰ دقیقه موجب افزایش راندمان حذف سفازولین در هر دو فرآیند پروکسون(O_3/H_2O_2) و فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) شد. در فرآیند پروکسون و با نرخ دوز ثابت ازن ۲۹/۱۶ mg/L·min، راندمان حذف در غلظت اولیه ۱ mg/L از ۹۱/۳ ٪ به ۹۶/۹ ٪ افزایش یافت. همچنین، در غلظت‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ mg/L، راندمان حذف به‌ترتیب از ۸۴/۶٪، ۸۳٪، ۸۱/۳٪ و ۸۰/۳٪ به ۹۰/۶٪، ۸۵/۱٪، ۸۴٪ و ۸۲/۷٪ رسید. بیشترین افزایش راندمان در غلظت ۱ mg/L مشاهده شد، در حالی‌که با افزایش غلظت اولیه، اثر زمان تماس کاهش یافت که می‌تواند ناشی از محدودیت ظرفیت اکسیدکنندگی سیستم و رقابت بیشتر مولکول‌های آلاینده برای ازن باشد. در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) نیز افزایش زمان ازن‌زنی موجب بهبود حذف شد که نشان‌دهنده اهمیت زمان تماس مؤثر ازن حتی در حضور تابش UV است. این موضوع را می‌توان به افزایش فرصت تماس ازن و گونه‌های فعال اکسیدکننده با مولکول‌های سفازولین و در نتیجه تولید مؤثر رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) نسبت داد. در مراحل اولیه فرآیند، غلظت آلاینده بالا بوده و ازن مولکولی و رادیکال‌های هیدروکسیل با سرعت بیشتری با مولکول‌های سفازولین واکنش می‌دهند، اما با کاهش غلظت آلاینده، سرعت واکنش کاهش یافته و بخشی از ازن در واکنش‌های جانبی یا خودتجزیه مصرف می‌شود؛ بنابراین افزایش زمان تماس پس از رسیدن به زمان بهینه، تأثیر قابل‌توجهی بر راندمان حذف نخواهد داشت و تنها موجب افزایش مصرف ازن و انرژی می‌شود. این نتایج با یافته‌های Taoufik و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد؛ آنان در بررسی حذف آموکسی‌سیلین و سیپروفلوکساسین از فاضلاب بیمارستانی مدل به وسیله ازن‌زنی گزارش کردند که حذف کامل آموکسی‌سیلین در کمتر از ۳۰ دقیقه حاصل شد، در حالی که برای سیپروفلوکساسین زمان بیشتری مورد نیاز بود. اختلاف زمان مورد نیاز نسبت به مطالعه حاضر را می‌توان به تفاوت در نوع آنتی‌بیوتیک، ساختار شیمیایی آلاینده، شرایط عملیاتی و محیط واکنش نسبت داد. در پژوهش حاضر، به دلیل استفاده از محلول سنتتیک و غلظت اولیه پایین سفازولین (۱ mg/L)، گونه‌های فعال اکسیدکننده عمدتاً در واکنش با مولکول‌های سفازولین مصرف شده و در نتیجه، راندمان حذف مطلوب در مدت زمان کوتاه‌تر (۱۰ دقیقه) حاصل شد. [۲۴]. همچنین نتایج پژوهش Gmurek و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که پیشرفت تخریب آموکسی‌سیلین و سیپروفلوکساسین در فرآیندهای O_3 و O_3/H_2O_2 به زمان تماس وابسته است، اما زمان مورد نیاز برای دستیابی به تخریب بالا میان ترکیبات مختلف تفاوت دارد. این یافته با نتایج پژوهش حاضر سازگار است و نشان می‌دهد که زمان بهینه ازن‌زنی علاوه بر نوع فرآیند، به ساختار و واکنش‌پذیری آلاینده نیز وابسته است [۲۵]. Kharel و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهش خود بر اهمیت زمان و شدت تماس مؤثر با ازن در حذف ترکیبات دارویی و محصولات حاصل از ازن‌زنی تأکید کردند. با این حال، در سامانه‌های واقعی، وجود مواد آلی طبیعی، یون‌ها و سایر ترکیبات رقیب می‌تواند موجب افزایش مصرف ازن شده و زمان مورد نیاز برای دستیابی به راندمان مشابه را تغییر دهد [۲۶]. در مجموع، افزایش زمان ازن‌زنی تا ۱۰ دقیقه موجب بهبود حذف شد و این زمان در شرایط مطالعه حاضر به‌عنوان زمان مناسب انتخاب گردید. با توجه به افزایش مصرف ازن و انرژی، افزایش بیشتر زمان لزوماً از نظر عملیاتی توجیه‌پذیر نیست؛ بنابراین، انتخاب زمان بهینه باید با توجه هم‌زمان به غلظت اولیه آلاینده، نرخ دوز ازن و ظرفیت اکسیدکنندگی سیستم انجام شود.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$)، افزایش زمان تابش UV موجب بهبود راندمان حذف سفازولین شد. در آزمایش مقدماتی، افزایش زمان هم‌زمان ازن‌زنی و تابش UV از ۵ به ۱۰ دقیقه، راندمان حذف را از ۹۲/۱ ٪ به ۹۷/۱ ٪ افزایش داد. همچنین، در شرایط اصلی و در غلظت اولیه ۱ mg/L و ۹ =pH، افزایش زمان تابش از ۱۵ به ۲۵ دقیقه موجب افزایش راندمان از ۹۷/۳ ٪ به ۹۸/۸٪ شد. این روند را می‌توان به افزایش فرصت تابش UV با طول موج ۲۵۴ nm برای فعال‌سازی H_2O_2 و تولید گونه‌های اکسیدکننده فعال و تداوم واکنش‌های اکسیداسیون در حضور O_3 نسبت داد. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج مسیح‌پور و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد؛ آنان نیز افزایش راندمان حذف سفازولین را با افزایش زمان تابش در فرآیند TiO□/UVC گزارش کردند و راندمان حذف در ۲۵ دقیقه را ۹۵٪ به دست آوردند. در پژوهش حاضر، راندمان ۹۸/۸٪ در همین زمان حاصل شد که می‌تواند به مشارکت هم‌زمان O_3، H_2O_2 و UV و وجود مسیرهای اکسیداسیونی متعدد مرتبط باشد [۲۷]. همچنین، Amini-Badr و Behnajady (۲۰۲۲) اهمیت زمان تابش را در حذف فوتوکاتالیستی سفازولین تأیید کردند؛ هرچند به دلیل تفاوت در نوع فرآیند، کاتالیست و شرایط عملیاتی، مقایسه مستقیم زمان بهینه میان مطالعات باید با احتیاط انجام شود [۲۰]. روند مشابهی در پژوهش Pratiwi و همکاران (۲۰۲۴) نیز مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که فرآیند UV/ H_2O_2 در مقایسه با UV یا H_2O_2 به تنهایی، راندمان تخریب بیشتری ایجاد کرد و در شرایط بهینه، راندمان حذف آموکسی‌سیلین به ۹۹/۹۸٪ رسید که نشان‌دهنده نقش مؤثر تابش فرابنفش در تقویت فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته است [۲۸]. در مجموع، زمان تابش ۲۵ دقیقه در شرایط مطالعه حاضر به‌عنوان زمان مناسب انتخاب شد؛ زیرا ضمن دستیابی به راندمان بالای ۹۸/۸٪، افزایش بیشتر زمان با توجه به مصرف انرژی و کاهش تدریجی بهبود راندمان، ضرورت مشخصی ندارد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هر دو فرآیند پروکسون(O_3/H_2O_2) و فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) توانایی بالایی در حذف سفازولین داشتند، اما فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) عملکرد مطلوب‌تری نشان داد. در شرایط بهینه، راندمان حذف در فرآیند پروکسون ۹۶/۹ ٪ و در فرآیند فتواکسیداسیون پیشرفته، برابر با ۹۸/۸ ٪ بود. این افزایش ۱/۹ واحد درصدی را می‌توان به نقش تابش UV در تقویت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، تسریع تجزیه O_3 و H_2O_2 و فعال‌شدن مسیرهای اکسیداسیونی بیشتر نسبت داد. در فرآیند پروکسون، O_3 و H_2O_2 از طریق واکنش‌های زنجیره‌ای موجب تولید گونه‌های فعال اکسیدکننده می‌شوند، در حالی که در فرآیند ترکیبی، حضور UV با فعال‌سازی مسیرهای فوتوشیمیایی ظرفیت اکسیداسیونی سامانه را افزایش می‌دهد. Vásquez و همکاران (۲۰۲۵) در مقایسه فرآیندهای O_3، O_3/H_2O_2، UV/ O_3 و $UV/O_3/H_2O_2$ برای حذف آزیترومایسین، سفالکسین و داکسی‌سایکلین، بالاترین عملکرد را برای فرآیند $UV/O_3/H_2O_2$ گزارش کردند و این برتری را به تولید بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل نسبت دادند [۲۹]. این یافته با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد، زیرا در هر دو مطالعه، ترکیب UV با O_3 و H_2O_2موجب بهبود عملکرد سامانه شده است؛ هرچند تفاوت در نوع آلاینده و شرایط عملیاتی، مقایسه مستقیم راندمان‌ها را محدود می‌کند. همچنین، Azuma و همکاران (۲۰۲۲) فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن شامل O_3/H_2O_2، UV/O_3 و $UV/O_3/H_2O_2$ را برای غیرفعال‌سازی باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در فاضلاب بررسی کردند. اگرچه هدف اصلی مطالعه آنان غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها بود، بررسی سامانه‌های ترکیبی ازن و UV نشان‌دهنده نقش مسیرهای اکسیداسیون پیشرفته در بهبود عملکرد تصفیه است. این یافته از نظر مکانیزمی با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد و اهمیت استفاده هم‌زمان از UV و ازن در تقویت فرآیندهای اکسیداسیون را نشان می‌دهد [۳۰]. Maniakova و همکاران (۲۰۲۳) در مقایسه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای حذف ترکیبات دارویی و غیرفعال‌سازی عوامل بیماری‌زا، نقش مؤثر تابش UVC و فرآیندهای ترکیبی در افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را نشان دادند. اگرچه شرایط و فرآیند مورد استفاده با پژوهش حاضر یکسان نبود، یافته آنان از نقش تابش UV در تقویت فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته حمایت می‌کند و می‌تواند تفسیر مناسبی برای عملکرد بالاتر $UV/O_3/H_2O_2$ در مطالعه حاضر ارائه دهد [۳۱]. Cuerda-Correa و همکاران (۲۰۲۱) در یک مطالعه مروری بیان کردند که یکی از مزایای مهم سیستم $UV/O_3/H_2O_2$، تسریع تجزیه O_3 در حضور تابش UV و H_2O_2 و در نتیجه افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل است. این سازوکار با نتایج پژوهش حاضر سازگار است و می‌تواند توضیح‌دهنده افزایش راندمان فرآیند ترکیبی نسبت به پروکسون باشد [۳۲]. این موضوع با نتایج داوری مهذب و همکاران (۲۰۲۴) نیز همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که در مقایسه دو فرآیند اکسیداسیون پیشرفته برای حذف آنتی‌بیوتیک‌ها از فاضلاب شهری، فرآیند مبتنی بر ازن‌زنی (AOP1) تنها ۵۴/۶ تا ۷۰ درصد از آنتی‌بیوتیک‌های هدف را حذف کرد، در حالی‌که (AOP_2) شامل فرآیند فنتون /UV راندمان حذف ۹۰/۲ تا ۹۴/۲ درصد را به دست آورد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حضور تابش فرابنفش در کنار فرآیندهای اکسیداسیون، با افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، نقش مؤثری در ارتقای راندمان حذف آلاینده‌های دارویی دارد؛ موضوعی که با برتری فرآیند $UV/O_3/H_2O_2$ نسبت به $O3/H_2O_2$ در پژوهش حاضر نیز مطابقت دارد [۳۳].

با وجود راندمان بالای فرآیندهای فرآیند پروکسون(O_3/H_2O_2) و فتواکسیداسیون پیشرفته ($UV/O_3/H_2O_2$) در حذف سفازولین، این

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

پژوهش دارای محدودیت‌هایی است. نخست، آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و بر روی محلول سنتتیک انجام شد؛ بنابراین، اثر ترکیبات زمینه‌ای موجود در فاضلاب واقعی مانند مواد آلی طبیعی، یون‌های معدنی و سایر آلاینده‌های همزمان بر کارایی فرآیند بررسی نشد. همچنین، فرآورده‌های واسطه حاصل از تجزیه سفازولین شناسایی و سمیت احتمالی آن‌ها ارزیابی نشد. از آنجا که فرآیندهای مبتنی بر ازن ممکن است منجر به تشکیل فرآورده‌های میانی و در حضور یون برمید، فرآورده‌های جانبی نظیر برومات شوند، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده شناسایی این ترکیبات با استفاده از روش‌هایی مانند LC–MS/MS یا HRMS و همچنین ارزیابی سمیت آن‌ها انجام شود. علاوه بر این، در این مطالعه میزان معدنی‌سازی آلاینده از طریق اندازه‌گیری TOC بررسی نشد؛ در حالی که اندازه‌گیری این شاخص می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره کارایی واقعی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته ارائه دهد. از دیگر محدودیت‌های این پژوهش، اندازه‌گیری نشدن تغییرات pH در طول فرآیند اکسیداسیون بود. بررسی تغییرات pH می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره روند تولید گونه‌های فعال اکسیدکننده، تشکیل فرآورده‌های میانی و مکانیسم تخریب سفازولین فراهم کند؛ از این رو، پیشنهاد می‌شود این موضوع در مطالعات آینده مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به هدف اصلی مطالعه انجام شده که مقایسه دو فرایند تصفیه پیشرفته شامل فرآیند پروکسون (O_3/H_2O_2) و فتواکسیداسیون پیشرفته($UV/O_3/H_2O_2$) در حذف آنتی‌بیوتیک سفازولین از محیط‌های آبی بود، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که هر دو فرایند توانایی بالایی در حذف این ترکیب دارویی دارند، اما فرایند فتواکسیداسیون پیشرفته با بهره‌گیری از عامل UV به همراه با H_2O_2، با درصد حذف ۹۸/۸ عملکرد مؤثرتری از خود نشان داد. با در نظر گرفتن کلیه نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فرایندهای پیشرفته اکسیداسیون به ویژه فتواکسیداسیون پیشرفته، یک گزینه امیدوارکننده برای حذف آنتی‌بیوتیک‌هایی مانند سفازولین از فاضلاب‌های دارویی است. این فرایندها نه تنها راندمان بالایی دارند بلکه می‌توانند به بهبود سلامت محیط‌زیست و کاهش خطر مقاومت آنتی‌بیوتیکی کمک نمایند.

تشکر و قدردانی

پژوهشگران این مطالعه، از گروه مهندسی محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران و گروه بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی که در اجرای پژوهش حاضر همکاری داشته‌اند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در تدوین این مقاله هیچ گونه تضاد منافعی وجود نداشته است.

تامین مالی مقاله

پژوهش حاضر با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران و پژوهشگران انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه مقطع دکتری مهندسی محیط زیست گرایش آب و فاضلاب با کد اخلاق IR.IAU.SRB.REC.1403.168 مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران می‌باشد.

مشارکت مولفین

ایده و طراحی مطالعه: امیرحسین جاوید، سهیلا پوربابا
نظارت بر مطالعه: امیرحسین جاوید، امیرحسام حسنی
جمع‌آوری داده‌ها: سهیلا پوربابا
تحلیل و تفسیر داده‌ها: امیرحسین جاوید، سهیلا پوربابا
نگارش پیشنویس مقاله: سهیلا پوربابا
بازبینی مقاله از نظر محتوای علمی: امیرحسین جاوید، امیرحسام حسنی، سیده هدی رحمتی، علی ماشینچیان مرادی

استفاده از هوش مصنوعی

در تدوین مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

1- Sikder S, Toha M, Anik AH, Sultan MB, Alam M, Parvin F, et al. A comprehensive review on the fate and impact of antibiotic residues in the environment and public health: A special focus on the developing countries. Water Environment Research 2024; 96(2):e10987. https://doi.org/10.1002/wer.10987

2- Rafiei Z, Marioryad H, Jamshidi A, Hassani G, Naghmachi M. Investigation of hospital wastewater treatment using the UV/H_2O_2 /$S_2O_8^{2-}$ process as a combined AOP method. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 2024; 104(19):8263-73 (In Persian). https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2198090

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

3- Wang B, Xu Z, Dong B. Occurrence, fate, and ecological risk of antibiotics in wastewater treatment plants in China: A review. Journal of Hazardous Materials 2024; 469:133925.https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133925

4- WHO. Guidance on wastewater and solid waste management for manufacturing of antibiotics. Available from: https: //www. who. int/ publications/ i/ item/ 9789240097254. Accessed Sep 3, 2024.

5- Hassoun-Kheir N, Stabholz Y, Kreft JU, de la Cruz R, Romalde JL, Nesme J, et al. Comparison of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes abundance in hospital and community wastewater: A systematic review. Science of the Total Environment 2020; 743:140804. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140804

6- Singh A, Chaurasia D, Khan N, Singh E, Chaturvedi Bhargava P. Efficient mitigation of emerging antibiotics residues from water matrix: Integrated approaches and sustainable technologies. Environmental Pollution 2023; 328:121552. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121552

7- Samrot AV, Wilson S, Sanjay Preeth RS, Prakash P, Sathiyasree M, Saigeetha S, et al. Sources of antibiotic contamination in wastewater and approaches to their removal—an overview. Sustainability 2023; 15(16):12639. https://doi.org/10.3390/su151612639

8- Mishra S, Singh AK, Cheng L, Hussain A, Maiti A. Occurrence of antibiotics in wastewater: Potential ecological risk and removal through anaerobic–aerobic systems. Environmental Research 2023; 226:115678. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115678

9- DailyMed. Cefazolin for injection, USP [Internet]. Bethesda (MD): National Library of Medicine (US); 2024 [cited 2025 Jul 30]. Available from: https://dailymed.nlm.nih.gov/dailymed/lookup.cfm?setid=e8f40f72-3cf0-43dc-a797-fb98dd8af228

10- Wishart DS, Feunang YD, Guo AC, Lo EJ, Marcu A, Grant JR, et al. DrugBank 5.0: A major update to the DrugBank database for 2018. Nucleic Acids Research 2018; 46(D1):D1074-82. https://doi.org/10.1093/nar/gkx1037

11- Zhang X, Xue X, Hu J. Combined ozonation-biological activated carbon process for antibiotic resistance control in treated effluent from wastewater treatment plant. Water Research 2025; 268:122610. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122610

12- Niu J, Yuan R, Chen H, Zhou B, Luo S. Heterogeneous catalytic ozonation for the removal of antibiotics in water: A review. Environmental Research 2024; 262(Pt 2):119889. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119889

13- Michael-Kordatou I, Karaolia P, Fatta-Kassinos D. The role of operating parameters and oxidative damage mechanisms of advanced chemical oxidation processes in the combat against antibiotic-resistant bacteria and resistance genes present in urban wastewater. Water Research 2018; 129:208-30. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.007

14- Yang X, Zhang T, Liu Z, Zhang R, Chen C, Li Z, et al. Intensification of ozone gas/liquid mass transfer and ozonation efficiency: A critical review. Water Research 2026; 288(Pt B):124719. https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124719

15- Mohamadi F, Chen T, Hofmann R, Wang C. Evaluating interferences in the external calibration method for hydroxyl radical scavenging capacity measurement. Environmental Science: Water Research & Technology 2026; 12(7):2135-43. https://doi.org/10.1039/d6ew00171h

16- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 nd ed. Washington, DC: American Public Health Association; 2012.

17- Nazari SB, Fazlzadeh M, Parastar S, Aaligadri M, Rashtbari Y, Poureshgh Y. Investigation of amoxicillin removal efficiency from aqueous solutions using US/PS/CuO-Fe_3O_4 process. Heliyon 2025; 11(4):e42618 (In Persian). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42618

18- Bajpai M, Katoch SS, Kadier A, Ma PC. Treatment of pharmaceutical wastewater containing cefazolin by electrocoagulation (EC): Optimization of various parameters using response surface methodology (RSM), kinetics and isotherms study. Chemical Engineering Research and Design 2021; 176:254-66.

19-. Sheikh Y, Tazikeh-Lemeski E, Dadban Shahamat Y, Baei MT, Jalilian H. Degradation of cefixime antibiotic by heterogeneous catalytic ozonation process using novel LDH/zeolite nano-composite: Modeling and optimization process. Journal of Environmental Health Science and Engineering 2025; 23(1):17 (In Persian). https://doi.org/10.1007/s40201-025-00941-5

20- Amini-Badr A, Behnajady MA. Photocatalytic removal of cefazolin in a photoreactor packed with TiO_2 -P25 nanoparticles supported on glass beads: an artificial neural network modeling. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 2024; 104(17):5713-31 (In Persian). https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2130060

21- Anjali R, Shanthakumar S. Simultaneous degradation of amoxicillin, ciprofloxacin and acetaminophen in a mixture by ozonation: kinetics and mechanisms pathway. Journal of Cleaner Production 2022; 378:134509. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134509

22- Babaee Y, Saghravani SF, Feizy J. Predicting ciprofloxacin and levofloxacin decomposition utilizing ozone micro-nano bubbles through the central composite design method. Environmental Technology 2024; 45(22):4622-34. https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2260123

23- Ma D, Yi H, Lai C, Liu X, Huo X, An Z, et al. Critical review of advanced oxidation processes in organic wastewater treatment. Chemosphere 2021; 275:130104. https://doi.org/10.1039/d6ew00171h.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

24- Taoufik N, Boumya W, Achak M, Sillanpää M, Barka N. Comparative overview of advanced oxidation processes and biological approaches for the removal pharmaceuticals. Journal of Environmental Management 2021; 288:112404. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112404

25- Aleksić S, Žgajnar Gotvajn A, Premzl K, Kolar M, Turk SŠ. Ozonation of amoxicillin and ciprofloxacin in model hospital wastewater to increase biotreatability. Antibiotics 2021; 10(11):1407. https://doi.org/10.3390/antibiotics10111407

26- Kharel S, Stapf M, Miehe U, Ekblad M, Cimbritz M, Falås P, et al. Ozone dose dependent formation and removal of ozonation products of pharmaceuticals in pilot and full-scale municipal wastewater treatment plants. Science of the Total Environment 2020; 731:139064. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139064

27- Masihpour M, Nassehinia H, Rahmani A. Photocatalytic degradation of cefazolin over TiO_2 coated on the fixed bed under UVC and solar light. Desalination and Water Treatment 2020; 184:243-51 (In Persian). https://doi.org/10. 5004/ dwt.2020. 25180

28- Pratiwi WZ, Hadiyanto H, Widayat W. Response surface optimization of UV/H_2O_2 -based photo-oxidative degradation of amoxicillin. Results in Engineering 2024; 21:101836. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101836

29- Vásquez-Vásquez M, Araque-González M, Escobar-Zuluaga JE, Zúñiga-Benítez H, Peñuela GA. Assessment of the use of ozone-based technologies in the removal of azithromycin, cephalexin, and doxycycline in deionized water and hospital wastewater. Journal of Water Process Engineering 2025; 71:107303. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107303

30- Azuma T, Usui M, Hayashi T. Inactivation of antibiotic-resistant bacteria in wastewater by ozone-based advanced water treatment processes. Antibiotics 2022; 11(2):210. https://doi.org/10.3390/antibiotics11020210

31- Maniakova G, Rizzo L. Pharmaceuticals degradation and pathogens inactivation in municipal wastewater: A comparison among UVC photo-Fenton with chelating agents, UVC/H_2O_2 and ozonation. Journal of Environmental Chemical Engineering 2023; 11(6):111356. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111356

32- Cuerda-Correa EM, Alexandre-Franco MF, Fernández-González C. Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview. Water 2020; 12(1):102. https://doi.org/10.3390/w12010102

33- Davari Mohazab A, Jalalkamali N, Irandoost M. Assessing the efficacy of advanced combined oxidation processes for antibiotic pollutant removal in Kerman city sewage. Iranian Water Research Journal 2024; 18(3):39-56 (In Persian). https://doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14812.2611

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.