JEHE Journal of Environmental Health Engineering , 2026; 14(1):113-130 Systematic Review Article

Narrative review of Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment

Received: 25 April 2026 , Accepted: 26 June 2026

Hojjat Nadimi[1,2*], Fatemeh Mortezazadeh[1,2], Mahdi Ahmadi Nasab[1], Fazlollah Changani[1]

[1] *Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[2] *Students' Scientific Research Center (SSRC), Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*

***Corresponding Author:**
h_nadimi@razi.tums.ac.ir

How to Cite This Article:
Nadimi H, Mortezazadeh F, Ahmadi Nasab M, Changani F. Narrative review of Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Journal of Environmental Health Engineering. 2026;14(1):113-30.

DOI:
10.66224/jehe.14.1.113

ABSTRACT

Background: The increasing presence of recalcitrant organic pollutants in wastewater necessitates advanced treatment technologies capable of achieving thorough degradation. Ozone-based advanced oxidation processes (O_3-based AOPs) have emerged as promising and increasingly sustainable solutions for this purpose. This narrative review critically evaluates their application and effectiveness, comparing global advancements with the current status and specific challenges observed in Iran.

Materials and Methods: A narrative review was conducted using systematic literature searches in ScienceDirect, PubMed, Web of Science, and Scopus, employing keywords related to wastewater treatment, advanced oxidation processes, ozone, and Iran. Of 178 articles retrieved (published between 2010 and 2025), 83 original peer-reviewed studies met the inclusion criteria following title/abstract and full-text screening and were included in the final analysis.

Results: O_3-based AOPs—including standalone ozonation, O_3/H_2O_2, O_3/UV, catalytic ozonation, O_3/persulfate, electro-peroxone, and cavitation-assisted hybrid systems—achieved removal efficiencies of 90–100% for pharmaceuticals, dyes, and pesticides, primarily through the dual mechanism of direct molecular ozone attack combined with indirect oxidation via hydroxyl (•OH) and sulfate ($SO_4^{\bullet-}$) radicals. Hybrid configurations generally outperformed standalone ozonation, with reaction rate constants increasing 2- to 10-fold and ozone consumption reduced by 30–70%, alongside improved biodegradability and reduced formation of toxic by-products. Emerging approaches such as ozone nanobubbles and cavitation-assisted systems further enhanced mass transfer efficiency and cost-effectiveness. In Iran, pilot-scale studies reported technical performance broadly comparable to international findings; however, full-scale implementation remains constrained by high energy demand (12–20 kWh/kg O_3), limited regulatory frameworks, and inadequate infrastructure.

Conclusion: Ozone-based AOPs represent effective and versatile technologies with growing potential for sustainable wastewater treatment and water reuse. Addressing existing research gaps—particularly regarding long-term toxicity monitoring, standardized experimental protocols, and comprehensive economic assessment—together with targeted policy support, could accelerate their broader adoption in addressing water quality challenges in Iran and globally.

Keywords: Wastewater Treatment; Oxidation-Reduction; Ozone; Water Pollutants

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE
Alborz University of Medical Sciences
مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۱۱۳ تا ۱۳۰
مقاله مرور ساختاریافته

مرور روایتی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن در تصفیه فاضلاب

تاریخ دریافت : ۱۴۰۵/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

حجت ندیمی[۱،۲*]، فاطمه مرتضی زاده[۱،۲]، مهدی احمدی نسب[۱]، فضل اله چنگانی[۱]

[۱] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

[۲] مرکز پژوهش‌های علمی دانشجویان(SSRC)، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول:**
h_nadimi@razi.tums.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:
Nadimi H, Mortezazadeh F, Ahmadi Nasab M, Changani F. Narrative review of Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Journal of Environmental Health Engineering. 2026;14(1):113-30.

DOI:
10.66224/jehe.14.1.113

چکیده

زمینه و هدف: افزایش آلاینده‌های آلی دیرتجزیه‌پذیر در منابع آبی، ضرورت به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه پیشرفته را بیش از پیش آشکار ساخته است. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن به‌عنوان یکی از راه‌حل‌ها موثر وپایدار مطرح می‌باشند. این مطالعه با هدف ارزیابی نقادانه کارایی این فرآیندها و مقایسه پیشرفت‌های جهانی با وضعیت کنونی ایران انجام شده است.

مواد و روش ها: این مرور روایی با جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های ScienceDirect ، PubMed، Web of Science و Scopus با کلیدواژه‌های مرتبط با فاضلاب، اکسیداسیون پیشرفته، ازن و ایران انجام شد. از میان ۱۷۸ مقاله بازیابی‌شده در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا اوایل ۲۰۲۶، پس از غربالگری، ۸۳ مطالعه اصیل داوری‌شده با معیارهای ورود مطابقت داشته و تحلیل گردیدند.

یافته ها: فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن، شامل ازن‌زنی تنها، ازن/پراکسید هیدروژن، ازن/فرابنفش، ازن‌زنی کاتالیستی، ازن/پرسولفات، الکترو-پراکسن و سامانه‌های ترکیبی به‌کمک کاویتاسیون، از طریق سازوکار دوگانه اکسیداسیون مستقیم و تولید رادیکال‌های رادیکال‌های هیدروکسیل و سولفات ، راندمان حذف بیش از ۹۰ تا ۱۰۰ درصد را برای ترکیبات دارویی، رنگ‌ها و آفت‌کش‌ها حاصل می‌نمایند. سامانه‌های ترکیبی در مقایسه با ازن‌زنی تنها، سینتیک واکنش را ۲ تا ۱۰ برابر افزایش و مصرف ازن را ۳۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهند، ضمن آنکه زیست‌تجزیه‌پذیری پساب را بهبود بخشیده و تشکیل محصولات جانبی سمی را به حداقل می‌رسانند. فناوری‌های نوینی مانند نانوحباب‌های ازن و کاویتاسیون، انتقال جرم و مقرون‌به‌صرفگی را ارتقا می‌دهند. در ایران، مطالعات پایلوت عملکرد فنی قابل‌قیاسی با معیارهای جهانی نشان می‌دهند، اما پذیرش مقیاس کامل به دلیل تقاضای بالای انرژی (۲۰-۱۲ کیلووات‌ساعت به ازای هر کیلوگرم ازن)، ضعف چارچوب‌های نظارتی و کمبود زیرساخت‌ها محدود مانده است.

نتیجه گیری: فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن، فناوری‌ای مؤثر، چندمنظوره و به‌طور فزاینده‌ای پایدار برای تصفیه پیشرفته فاضلاب و بازاستفاده از آب هستند. پر کردن شکاف‌های پژوهشی در پایش سمیت بلندمدت، تدوین پروتکل‌های استاندارد و ارزیابی اقتصادی، همراه با مشوق‌های سیاستی، می‌تواند نقشی محوری در ارتقای کیفیت منابع آب در ایران و جهان ایفا نماید.

واژه های کلیدی: تصفیه فاضلاب، رادیکال‌های هیدروکسیل، آلاینده‌های نوظهور، ازن زنی

مقدمه

توسعه شهرنشینی و رشد صنعتی به طور قابل ملاحظه‌ای بر حجم فاضلاب شهری در سطح جهان افزوده است؛ فاضلابی که آکنده از آلاینده‌های متنوع بوده و آلودگی آب را تشدید نموده و سلامت انسان و موجودات زنده را تهدید می‌کند[1]. با توجه به اینکه دو سوم جمعیت جهان با کمبود ماهانه آب مواجه هستند، بسیاری از مناطق به منابع جایگزین همچون نمک‌زدایی، جمع‌آوری آب باران و تصفیه فاضلاب متکی شده‌اند[2]. تصفیه فاضلاب در مقابله با بحران آب، از طریق جلوگیری از آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، امری حیاتی به شمار می‌رود.

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب[1] با بازیابی منابع ارزشمندی نظیر آب و مواد مغذی از فاضلاب، نقشی محوری در پیشبرد توسعه پایدار ایفا می‌کنند[3،4]. با این حال، بهره‌برداری از آن‌ها می‌تواند چالش‌های زیست‌محیطی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی خاک و آب و مشکلات مربوط به بو را به همراه داشته باشد[5]. پیچیدگی تصفیه فاضلاب ناشی از تنوع آلاینده‌های حاصل از منابع گوناگون است که استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مناسب و متناسب برای حذف مؤثر آلاینده‌ها را ضروری می‌سازد[6]. این فرآیندها برای مدیریت و بازیافت منابع آب شهری، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران، که تخلیه پساب‌های شیمیایی تصفیه‌نشده در آن تخریب زیست‌محیطی را تشدید می‌کند، حیاتی هستند؛ و بر ضرورت راهبردهای تصفیه پیشرفته برای تضمین پایداری بوم‌شناختی تأکید می‌ورزد[7،8].

مطالعات اخیر در ایران بر ضرورت حیاتی ارتقای عملکرد و پایداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، به‌ویژه در پاسخ به آلاینده‌های نوظهور و فشار بر منابع، تأکید دارند[9-11]. بر اساس یک گزارش، تنها حدود ۴۲ درصد از فاضلاب کشور تصفیه می‌شود و بیش از ۶۰ درصد از تأسیسات به سامانه‌های لجن فعال انرژی‌بر متکی هستند[12]. ارزیابی‌های چرخه حیات در شهرهایی مانند مشهد حاکی از مصرف قابل توجه انرژی و انتشار آلاینده‌هاست و نشان می‌دهد که اقداماتی نظیر بازیابی بیوگاز می‌تواند بار زیست‌محیطی را کاهش دهد[13]. اگرچه کیفیت پساب خروجی اغلب با استانداردهای ملی انطباق دارد اما حذف ریزپلاستیک‌ها و آلاینده‌های نوظهور همچنان محدود است. تخلیه پساب تصفیه‌نشده، کیفیت آب‌های زیرزمینی را تهدید می‌کند و بازاستفاده از فاضلاب برای آبیاری نیازمند کنترل دقیق تجمع فلزات سنگین است[14]. این یافته‌ها بر ضرورت حیاتی پایش مداوم و به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه نوآورانه برای کاهش آلاینده‌های پایدار، افزایش بازده عملیاتی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در راستای اهداف مدیریت پایدار زیست‌محیطی تأکید می‌کنند.

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته[2] شامل فناوری‌های تصفیه شیمیایی نظیر فوتوکاتالیست، واکنش‌های مبتنی بر فنتون، ازن‌زنی، فراصوت و روش‌های الکتروشیمیایی می‌شوند که برای حذف آلاینده‌های آلی پایدار در آب و فاضلاب به کار می‌روند[15]. اثربخشی این فرآیندها ناشی از تولید درجای گونه‌های واکنش‌پذیر، عمدتاً رادیکال‌های هیدروکسیل و سولفات، با پتانسیل اکسیداسیون قوی است که قادرند آلاینده‌های دیرتجزیه‌پذیر را به‌طور غیرانتخابی به محصولات نهایی پایدار تبدیل کنند. گونه‌های فعال اکسیژن از طریق مسیرهای فعال‌سازی مختلف، از جمله تابش فرابنفش، واکنش‌های کاتالیزشده با فلزات، ازن‌زنی و فعال‌سازی پرسولفات تولید می‌شوند و امکان تخریب ترکیبات دارویی، آفت‌کش‌ها، رنگ‌ها و سایر مواد شیمیایی صنعتی را فراهم می‌آورند. بسته به شرایط تصفیه، گونه‌های دیگری مانند اکسیژن یا سوپراکسید نیز ممکن است مشارکت داشته باشند[16].

1. WWTPs
2.AOPs

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته در تخریب آلاینده‌های مقاوم به روش‌های تصفیه متعارف مؤثر هستند و اغلب به نرخ‌های معدنی‌سازی بالای ۹۶ درصد دست یافته و زیست‌تجزیه‌پذیری پساب را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشند[۱۷,۱۸]. برخلاف کلرزنی سنتی که می‌تواند محصولات جانبی آلی کلردار مضر تولید کند، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته عموماً از تشکیل محصولات ثانویه سمی اجتناب می‌کنند و از نظر زیست‌محیطی ارجح هستند[۱۹]. با این حال، تشکیل و سمیت محصولات واسطه باید به دقت پایش شود، زیرا برخی از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته ممکن است به‌طور گذرا ترکیباتی با سمیت مشابه یا بیشتر از آلاینده‌های اولیه تولید کنند[۱۶]. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته را می‌توان به‌تنهایی یا در ترکیب با تصفیه‌های زیستی یا فیزیکی به کار برد و با بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و هدف‌گیری پروفایل‌های خاص آلاینده، با جریان‌های متنوع فاضلاب سازگار نمود[۲۰]. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن به عنوان فناوری‌هایی مؤثر و پایدار برای تخریب آلاینده‌های آلی دیرتجزیه‌پذیر و عوامل بیماری‌زا در تصفیه آب و فاضلاب مطرح شده‌اند[۲۱، ۲۲]. این فرآیندها از پتانسیل اکسیداسیون قوی ازن، هم از طریق اکسیداسیون مستقیم و هم از طریق تولید رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش‌پذیر، برای تجزیه طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های مقاوم به روش‌های تصفیه متعارف بهره می‌برند[۲۳]. در یک مطالعه، فاضلاب صنعتی بسیار آلوده با استفاده از یک فرآیند زیستی هوازی متوالی و به دنبال آن فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن تصفیه گردید.

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن، شامل O_3، O_3/UV و O_3/H_2O_2، بر روی فاضلاب واقعی نساجی اعمال شده‌اند و به حذف تقریباً کامل رنگ و کاهش قابل توجه COD و سمیت دست یافته‌اند[۲۴]. ادغام نانوحباب‌های ازن در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، افزایش سه برابری در نرخ واکنش‌ها برای تخریب رنگ‌های آلی تحت بار آلودگی بالا را نشان داده است[۲۵]. این روش تحت شرایط بهینه‌شده به تخریب ۱۰۰ درصدی رنگ‌هایی مانند متیلن بلو دست یافت و پتانسیل آن را برای تصفیه سریع و کارآمد برجسته ساخت. در تصفیه فاضلاب صنعتی حاوی آنتی‌بیوتیک، یک فرآیند تلفیقی ازن–الکتروفنتون به حذف COD تا ۹۶ درصد دست یافت و به طور قابل ملاحظه‌ای بهره‌وری مصرف ازن را بهبود بخشید که نشان‌دهنده اثرات هم‌افزایی قوی و افزایش تخریب آلاینده است[۲۶]. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن (O_3/UV و O_3/H_2O_2) در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری برای غیرفعال‌سازی بیش از ۹۹.۹ درصد از باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک و حذف ژن‌های مقاومت به کار رفته‌اند و خطرات زیست‌محیطی و بهداشت عمومی را کاهش می‌دهند[۲۷].

این مرور جامع، به‌طور منحصربه‌فردی مطالعات جهانی و ایرانی را در زمینه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن در تصفیه فاضلاب ادغام نموده و مقایسه‌ای عمیق از سازوکارهای زیربنایی، راندمان‌های تصفیه و چالش‌های عملیاتی در بسترهای متنوع فاضلاب ارائه می‌دهد. همچنین، آخرین پیشرفت‌ها در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌کمک کاویتاسیون را در بررسی کرده و جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی را در کنار کاربردهای عملی ارزیابی می‌کند. این مرور، شکاف‌های دانشی حیاتی و موانع خاص منطقه‌ای—به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه—برای پذیرش فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن را شناسایی کرده و توصیه‌های عملی برای بهینه‌سازی فرآیند ارائه می‌نماید. این تأکید دوگانه بر نوآوری فناورانه و پیاده‌سازی در دنیای واقعی با هدف افزایش پایداری و بهبود امکان‌پذیری اقتصادی سامانه‌های مدیریت فاضلاب صورت می‌گیرد.

روش‌ها

راهبرد جستجو

در این مرور روایتی، مقالات پژوهشی انگلیسی‌زبان و مطالعات توصیفی-مقطعی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ با تمرکز بر سامانه‌های تصفیه فاضلاب، به‌ویژه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن، مورد ارزیابی قرار گرفتند. جست‌وجوی منابع در تاریخ ۲۳ نوامبر ۲۰۲۵ و به‌صورت مستقل در چهار پایگاه اطلاعاتی بین‌المللی ScienceDirect، PubMed، Web of Science و Scopus انجام شد.

راهبرد جست‌وجو با ترکیب کلیدواژه‌ها از طریق عملگرهای منطقی AND و OR و با استفاده از عملگر کوتاه‌سازی (*) در پایگاه‌هایی که این قابلیت را پشتیبانی می‌کردند، به شرح زیر تدوین گردید:

"wastewater" OR "wastewater treatment" OR "effluent treatment") AND ("advanced oxidation process" OR "AOP" OR "ozone" OR "ozone-based" OR "O3-based" OR "ozonation") AND ("Iran" OR "global" OR "world")

این راهبرد جست‌وجو با اعمال جزئی در نحو نگارش (syntax) با فیلترهای هر پایگاه (مانند استفاده از Title/Abstract/Keywords در Scopus و Web of Science، و Title/Abstract در PubMed و ScienceDirect) در هر یک از چهار پایگاه اجرا شد. جست‌وجو به مقالات انگلیسی‌زبان و بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ محدود گردید و انواع مقاله شامل مقالات پژوهشی اصیل و مطالعات توصیفی-مقطعی بود؛ نامه به سردبیر، چکیده‌های همایشی و مقالات فاقد دسترسی به متن کامل از ابتدا مستثنی شدند.

پس از حذف رکوردهای تکراری، غربالگری در دو مرحله انجام شد: در مرحله نخست، عنوان و چکیده‌ی مقالات بر اساس ارتباط موضوعی با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن در تصفیه فاضلاب بررسی گردید و در مرحله دوم، متن کامل مقالات واجد شرایط برای تأیید نهایی معیارهای ورود و معیارهای خروج ارزیابی شد. فرآیند کامل شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات در شکل ۱ نشان داده شده است.

معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود به مطالعه شامل موارد زیر بود: (۱) مقالات پژوهشی اصیل و مطالعات توصیفی-مقطعی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵؛ (۲) مقالات به زبان انگلیسی یا فارسی؛ (۳) مطالعاتی با تمرکز روشن بر فرآیندهای تصفیه فاضلاب، به‌ویژه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن، اعم از مطالعات انجام‌شده در ایران یا در سطح بین‌المللی؛ (۴) مطالعاتی که حداقل یکی از پیامدهای زیر را به‌طور کمّی گزارش کرده باشند: راندمان حذف آلاینده، سازوکار واکنش، ثابت سرعت واکنش، یا داده‌های مقایسه‌ای بین فرآیندها؛ (۵) دسترسی به متن کامل مقاله.

معیارهای خروج شامل موارد زیر بود: (۱) مقالات به زبانی غیر از انگلیسی یا فارسی؛ (۲) کتاب‌ها، فصول کتاب و چکیده‌های همایشی/کنفرانسی به دلیل عدم بررسی همتا (peer review) کامل؛ (۳) رکوردهای تکراری شناسایی‌شده در بیش از یک پایگاه اطلاعاتی؛ (۴) سایر مقالات مروری (اعم از مرور روایتی یا مرور نظام‌مند) به‌منظور جلوگیری از ورود داده‌های ثانویه و تکرار غیرمستقیم یافته‌ها؛ (۵) مطالعاتی که فاقد داده‌های کمّی کافی بودند یا صرفاً به توصیف کلی فناوری بدون گزارش نتایج عملکردی پرداخته بودند؛ (۶) مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود.

ارزیابی کیفیت مطالعات

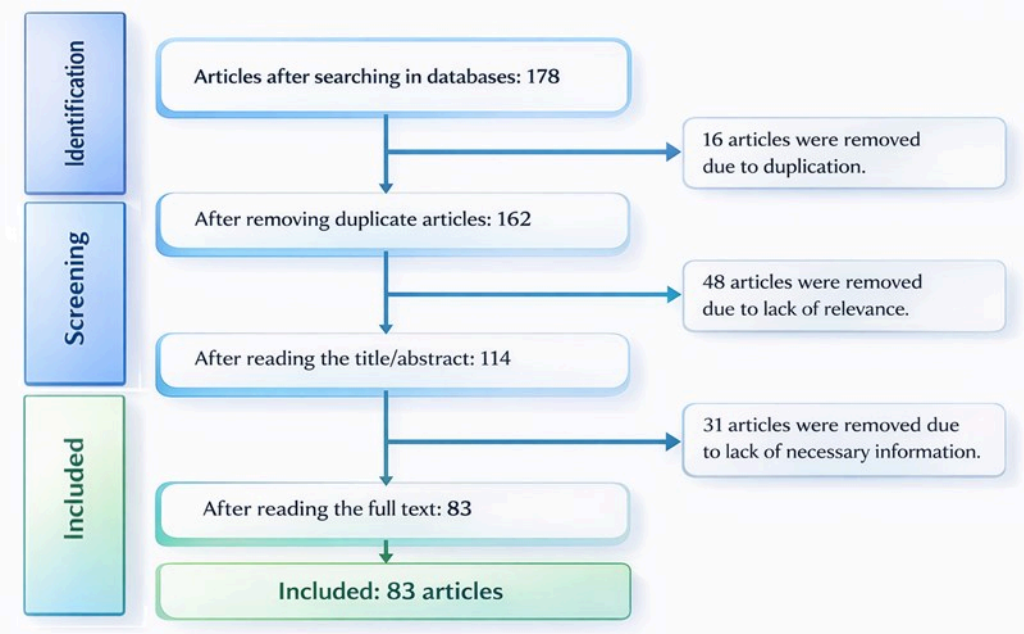
با توجه به ماهیت روایتی این مرور، از ابزارهای رسمی ارزیابی خطر سوگیری مختص مرورهای نظام‌مند و متاآنالیز (نظیر Cochrane RoB2 یا ROBINS-I) که برای کارآزمایی‌های بالینی و مطالعات مداخله‌ای بر روی انسان طراحی شده‌اند، استفاده نشد؛ چرا که این ابزارها با ماهیت مطالعات فنی-آزمایشگاهی حوزه تصفیه فاضلاب تطابق

ندارند. در عوض، کیفیت هر یک از ۸۳ مطالعه‌ی واردشده بر اساس یک چارچوب ارزیابی کیفیت ساده و مبتنی بر معیارهای زیر به‌صورت کیفی بررسی شد: (۱) شفافیت گزارش شرایط آزمایشی (دوز ازن، pH، دما، زمان تماس)؛ (۲) وجود گروه کنترل یا مقایسه‌ای مناسب؛ (۳) گزارش تکرارپذیری آزمایش (تکرار نمونه‌ها)؛ (۴) کاربرد روش‌های تحلیلی معتبر برای اندازه‌گیری آلاینده و محصولات جانبی؛ و (۵) مقیاس مطالعه (آزمایشگاهی، پایلوت یا مقیاس کامل). بر این اساس، مطالعات به سه سطح کیفیت «بالا»، «متوسط» و «پایین» طبقه‌بندی شدند. مطالعاتی که شرایط آزمایشی را به‌طور کامل گزارش نکرده بودند یا فاقد تکرار آزمایشی بودند (عمدتاً گزارش‌های مقیاس آزمایشگاهی اولیه)، در سطح کیفیت «پایین» قرار گرفتند و در تفسیر یافته‌ها با احتیاط بیشتری مورد استناد قرار گرفتند؛ این محدودیت در بخش بحث نیز به‌عنوان یکی از منابع ناهمگونی نتایج گزارش‌شده مورد اشاره قرار گرفته است.

یافته‌ها

مطالعات واردشده و خارج‌شده

در مجموع ۱۷۸ مقاله پژوهشی اصیل از پایگاه‌های اطلاعاتی مشخص‌شده در مرحله نخست بازیابی گردید. پس از حذف رکوردهای تکراری و ارزیابی عناوین و چکیده‌ها، ۶۴ مقاله به دلیل تکراری بودن یا عدم ارتباط موضوعی کنار گذاشته شدند و ۱۱۴ مطالعه برای ارزیابی متن کامل واجد شرایط باقی ماندند. در مرحله غربالگری بعدی، انتشاراتی که اطلاعات ناکافی یا ناقص داشتند حذف شدند و در نهایت مجموعه‌ای شامل ۸۳ مقاله در تحلیل جامع وارد گردید. فرآیند کلی جستجو و انتخاب در نمودار جریان فرآیند شناسایی و انتخاب مطالعات ارائه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار نمودار جریان فرآیند شناسایی و انتخاب مطالعات

مقدمه‌ای بر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته نمایانگر یک پیشرفت بزرگ در تصفیه مدرن آب و فاضلاب هستند که در دهه ۱۹۸۰ و در ابتدا برای خالص‌سازی آب آشامیدنی در پاسخ به حضور فزاینده آلاینده‌های آلی و معدنی پایداری که فناوری‌های متعارف قادر به حذف مناسب آن‌ها نبودند، ظهور کردند. از آن زمان، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به

سرعت تکامل یافته و در کاربردهای متنوعی از جمله پساب‌های صنعتی، فاضلاب دارویی، شیرابه محل دفن زباله، تخلیه‌های حاوی رنگ نساجی و پساب‌های ثانویه شهری گسترش یافته‌اند[۲۸]. توسعه آن‌ها تحت تأثیر فشارهای نظارتی فزاینده و نیاز مبرم به راه‌حل‌های پایداری بوده که قادر به مدیریت مخلوط‌های پیچیده و دیرتجزیه‌پذیر آلاینده‌ها باشند.

ویژگی اصلی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، تولید درجای گونه‌های فعال اکسیژن بسیار واکنش‌پذیر که عمدتاً رادیکال‌های هیدروکسیل[۱] و رادیکال‌های سولفات[۲] است که به‌طور غیرانتخابی و سریع طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های دیرتجزیه‌پذیر را تخریب می‌کنند[۲۹]. این رادیکال‌ها از طریق مسیرهای فیزیکوشیمیایی گوناگونی شامل ازن‌زنی، فرآیندهای مبتنی بر فرابنفش، واکنش‌های فنتون و فوتوفنتون، فوتوکاتالیست، اکسیداسیون الکتروشیمیایی، سونولیز و فعال‌سازی پرسولفات/پروکسی‌مونوسولفات تولید می‌شوند[۳۰، ۳۱]. در این میان، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن به دلیل سازوکار اکسیداسیون دوگانه منحصربه‌فرد خود برجسته هستند: حمله الکترون‌دوستی مستقیم توسط ازن مولکولی (انتخابی اما قدرتمند) و اکسیداسیون غیرانتخابی غیرمستقیم از طریق رادیکال‌های هیدروکسیل تشکیل‌شده در اثر تجزیه ازن، که می‌تواند توسط پراکسید هیدروژن، فرابنفش، کاتالیست‌های ناهمگن، پرسولفات یا pH قلیایی به‌طور چشمگیری شتاب گیرد[۳۲، ۳۳].

در سال‌های اخیر، ازن‌زنی کاتالیستی با استفاده از کاتالیست‌های ناهمگن (مانند اکسیدهای فلزی، فلزات واسطه نشانده‌شده بر پایه‌های مختلف، کربن فعال، زئولیت‌ها و مواد نانوساختار) و سامانه‌های ترکیبی ازن/پرسولفات به طور قابل ملاحظه‌ای بازده تولید $^{\bullet}OH$ و $SO_4^{\bullet-}$ را افزایش داده، مصرف ازن را کاهش داده و تشکیل محصول جانبی نامطلوب برومات را به حداقل رسانده‌اند و این فرآیندها را برای پیاده‌سازی در مقیاس کامل ساخته‌اند[۳۴، ۳۵].

در مقایسه با اکسیدان‌های متعارفی مانند کلر یا ازن‌زنی به‌تنهایی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن راندمان معدنی‌سازی بالاتر و کاهش تولید آلاینده‌های ثانویه را نشان می‌دهند[۳۶]. علاوه بر این، این فرآیندها زیست‌تجزیه‌پذیری فاضلاب را که با نسبت BOD_5/COD سنجیده می‌شود، به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده و به‌طور مؤثری مولکول‌های آلی پیچیده را با حداقل تولید لجن به CO_2، H_2O و یون‌های معدنی تبدیل می‌کنند[۳۷، ۳۸]. پیکربندی‌های ترکیبی مانند پراکسون[۳]، یووی/ ازن[۴]، ازن‌زنی کاتالیستی و ازن/پرسولفات اکنون به دلیل سینتیک بهبودیافته و مقرون‌به‌صرفگی اقتصادی خود به طور گسترده‌ای شناخته شده هستند[۳۷]. تلفیق فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن با تصفیه زیستی یا فرآیندهای غشایی (به عنوان پیش‌تصفیه یا پس‌تصفیه) نیز به عنوان یک راهبرد امیدوارکننده برای دستیابی هم‌زمان به راندمان حذف بالا و قابلیت اقتصادی مطرح شده است.

با وجود این مزایا، چالش‌های متعددی مانع از کاربرد گسترده فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن می‌شوند. این چالش‌ها شامل هزینه‌های نسبتاً بالای انرژی و عملیاتی در مقیاس بزرگ، ماهیت گذرای رادیکال‌ها که قابلیت گندزدایی را محدود می‌کند (برای مثال، نیمه‌عمر رادیکال‌های هیدروکسیل در محدوده میکروثانیه است)، و پتانسیل تشکیل محصولات تبدیل نامطلوب یا برومات در آب‌های حاوی برمید می‌باشند[۳۵]. در پاسخ، پژوهش‌های کنونی بر غلبه بر این موانع از طریق توسعه کاتالیست‌های جدید، مولدهای ازن با بازده انرژی بالا و سامانه‌های ترکیبی نظیر راکتورهای مبتنی بر UV-LED/خورشیدی، ازن‌زنی به‌کمک پلاسما و طراحی‌های توالی تصفیه زیستی-AOP برای تسهیل پذیرش گسترده‌تر متمرکز شده‌اند[۳۹].

1. • OH
2. $SO_4^{\bullet-}$
3. O3/H2O2
4. O3/UV

با این حال، مرور مطالعات موجود نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از این پژوهش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و با ماتریکس‌های آب مصنوعی یا ساده‌شده انجام شده‌اند؛ این امر تعمیم‌پذیری نتایج به فاضلاب واقعی با بار آلی و ترکیب یونی پیچیده‌تر را با محدودیت مواجه می‌سازد و لازم است در تفسیر داده‌های گزارش‌شده مد نظر قرار گیرد.

سازوکارها و کاربردهای فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن به عنوان یکی از روش ها ی امیدوار کننده در میان فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای تخریب ریزآلاینده‌های آلی سخت تخریب‌پذیر شناخته می‌شوند، که روش‌های متعارف زیستی و فیزیکوشیمیایی در حذف مؤثر آن‌ها ناتوان هستند[۳۹]. برخلاف ازن‌زنی به‌تنهایی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن از یک سازوکار دوگانه قدرتمند شامل، حمله الکترون دوستی مستقیم توسط ازن، و اکسیداسیون غیرانتخابی غیرمستقیم از طریق رادیکال‌های بسیار واکنش‌پذیر، عمدتاً رادیکال‌های هیدروکسیل و در سامانه‌های ترکیبی، رادیکال‌های سولفات بهره می‌برند[۴۰]. این ترکیب منجر به سینتیک تخریب به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر و درجات معدنی‌سازی بالاتر می‌شود و این فرآیندها را به‌ویژه برای پساب‌های پیچیده صنعتی و شهری مناسب می‌سازد[۳۳].

رفتار اکسایشی ازن در آب به‌شدت به pH و ترکیب ماتریکس بستگی دارد. در pH اسیدی تا خنثی، ازن‌زنی مستقیم غالب است و به‌طور انتخابی با ساختارهای غنی از الکترون مانند پیوندهای دوگانه، حلقه‌های آروماتیک فعال‌شده و آمین‌ها واکنش می‌دهد[۴۱]. با این حال، تحت شرایط قلیایی یا در حضور تسریع‌کننده‌ها[1]، ازن به سرعت از طریق یک واکنش زنجیره‌ای تجزیه می‌شود که منجر به تولید •OH به عنوان اکسیدان اصلی می‌گردد. واکنش‌های کلیدی شامل معادلات (۱) تا (۶) می‌باشند[۲۲، ۲۷، ۴۲].

(1) $O_3 + OH^- \rightarrow HO_2^\bullet + O_2^-$ $k = 70\ M^{-1}\ s^{-1}$ (1)

(2) $O_3 + HO_2^\bullet \rightarrow \bullet OH + O_2^- + O_2$ (2)

(3) $O_3 + O_2^- \rightarrow O_3^{\bullet-} + O_2$ (3)

(4) $O_3^{\bullet-} + H^+ \rightleftharpoons \bullet OH + O_2$ $kforward = 5.2 \times 10^{10}\ M^{-1}\ s^{-1}$ (4)

(5) $O_3 + H_2O_2 \rightarrow \bullet OH + HO_2^\bullet + O_2$ (peroxone) (5)

(6) $O_3 + HSO_5^- \rightarrow SO_4^{\bullet-} + \bullet OH + O_2$ (O_3/PMS) (6)

(7) $O_3 + h\nu\ (254\ nm) \rightarrow O(^1D) + O_2 \rightarrow 2\ \bullet OH$ (O_3/UV) (7)

شایان ذکر است که ثابت‌های سرعت گزارش‌شده برای واکنش‌های فوق (معادلات ۱ تا ۷) عمدتاً در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و دمای ثابت تعیین شده‌اند؛ در حالی که در مطالعات میدانی، نوسانات pH، دما و حضور رادیکال‌های مصرف‌کننده (scavengers) نظیر بی‌کربنات و مواد آلی طبیعی می‌تواند سینتیک واقعی واکنش‌ها را به‌طور محسوسی از مقادیر گزارش‌شده در ادبیات منحرف سازد.

مقایسه کارایی و اثربخشی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن بسته به پیکربندی خاص، واکنش‌پذیری آلاینده هدف و ویژگی‌های ماتریکس آب، عملکردهای کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهند[۴۳]. مطالعات تطبیقی اخیر به‌طور پیوسته راندمان کلی حذف ریزآلاینده‌ها را به صورت ازن‌زنی کاتالیستی ، پراکسون، ازن / یووی، ازن/ پرسولفات و ازن‌زنی تنها، به

1.Promoters

ترتیب از زیاد به کم رتبه‌بندی می‌کنند؛ همچنین سامانه‌های نوظهور ازن‌زنی پلاسمایی و الکترو-پراکسون برای ترکیبات خصوصا دیرتجزیه‌پذیر، از سامانه‌های ترکیبی متعارف نیز پیشی گرفته‌اند[44، 45]. با این حال، این رتبه‌بندی در تمامی مطالعات یکسان نیست و در برخی گزارش‌ها ازن/پرسولفات عملکردی برابر یا برتر از پراکسون نشان داده است؛ این ناهمخوانی عمدتاً ناشی از تفاوت در نوع آلاینده هدف، غلظت اولیه اکسیدان‌های کمکی، pH ماتریکس و حضور یون‌های مصرف‌کننده‌ی رادیکال (نظیر کلراید و بی‌کربنات) است که مقایسه مستقیم نتایج میان مطالعات مختلف را دشوار می‌سازد.

ازن‌زنی به‌تنهایی عمدتاً متکی بر واکنش‌های انتخابی ازن مولکولی است و معمولاً تنها به تخریب جزئی آلاینده‌های مقاوم به ازن دست می‌یابد[46]. در مقابل، سامانه‌های ترکیبی از طریق تشدید تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و در برخی موارد، رادیکال سولفات، هم سینتیک واکنش و هم میزان معدنی‌سازی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند[47]. به عنوان مثال، فرآیندهای ازن‌زنی کاتالیستی و پراکسون به‌طور معمول ثابت‌های سرعت مشاهده‌شده شبه‌مرتبه اول را به میزان ۲ تا ۱۰ برابر افزایش داده و دوزهای ازن مورد نیاز را در مقایسه با ازن‌زنی تنها ۳۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهند؛ در حالی که الکترو-پراکسون و ازن‌زنی پلاسمایی می‌توانند انرژی الکتریکی به ازای هر مرتبه حذف (EE/O) را برای حذف بیش از ۹۰ درصد بسیاری از ترکیبات آلی جزئی، به مقدار ناچیز۰/۱۲تا ۰/۲۲ کیلووات‌ساعت بر متر مکعب کاهش دهند[19، 48]. این مقادیر عددی از مطالعاتی با غلظت‌های اولیه آلاینده، دمای واکنش و طراحی رآکتور متفاوت استخراج شده‌اند و مقایسه‌ی مستقیم آن‌ها با یکدیگر، بدون در نظر گرفتن این تفاوت‌های زمینه‌ای، می‌تواند تصویری گمراه‌کننده از برتری قطعی یک فرآیند نسبت به دیگری ارائه دهد.

آلاینده‌های شاخصی که به‌طور گسترده برای مقایسه عملکرد به کار می‌روند شامل کاربامازپین، دیکلوفناک، سولفامتوکسازول، ناپروکسن، جمفیبروزیل، بیسفنول آ، ۱۷-آلفا-اتینیل‌استرادیول، آترازین، آلاکلر، ایبوپروفن، کلوفیبریک اسید و کلرامفنیکل می‌باشند[49، 50]. این ترکیبات گستره وسیعی از واکنش‌پذیری نسبت به ازن (ثابت سرعت ازن 10^{-2} تا 10^{6} بر مول در ثانیه) و ثابت‌های سرعت رادیکال هیدروکسیل (10^{9} -10^{10}تا بر مول در ثانیه) را پوشش می‌دهند[51]. ترکیبات بسیار واکنش‌پذیر مانند کاربامازپین و بیسفنول آ معمولاً در اکثر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن به راندمان حذف بالای ۹۵ تا ۹۹ درصد دست می‌یابند، در حالی که گونه‌های مقاوم‌تری مانند ایبوپروفن، کلوفیبریک اسید و کلرامفنیکل اغلب برای رسیدن به حذف ۸۰ تا ۹۵ درصد به بهبود از طریق فرآیندهای کاتالیستی یا پراکسون نیاز دارند[52]. نکته قابل توجه آن است که بازه‌های گزارش‌شده برای راندمان حذف حتی برای یک آلاینده‌ی واحد (مانند ایبوپروفن) در مطالعات مختلف تا ۱۵ واحد درصد نوسان دارد که این امر بیش از آنکه ناشی از تفاوت ذاتی در واکنش‌پذیری آلاینده باشد، به تفاوت در طراحی رآکتور، دوز و روش تزریق ازن و مدت زمان تماس مرتبط است؛ فقدان یک پروتکل آزمایشی استاندارد در میان مطالعات بررسی‌شده، مقایسه کمّی دقیق نتایج را محدود می‌کند.

پیاده‌سازی‌های مقیاس کامل در اروپا و آسیا به‌طور معمول با دوزهای ویژه ازن در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۶۵ گرم ازن به ازای هر گرم کربن آلی محلول ($g\ O_3/g\ DOC$) عمل می‌کنند و به راندمان حذف بیش از ۹۰ درصد برای ریزآلاینده‌های بسیار واکنش‌پذیر و ۶۰ تا ۹۰ درصد برای آلاینده‌های با واکنش‌پذیری متوسط دست می‌یابند؛ به‌طوری که حذف آترازین در چندین تصفیه‌خانه سوئیسی با دوز ۰/۵میلی‌گرم ازن به ازای هر میلی‌گرم DOC از ۸۰ درصد فراتر رفته است. شایان ذکر است این ارقام از تأسیساتی با ترکیب آب خام، دمای فصلی و بار آلی ورودی متفاوت گزارش شده‌اند و مقایسه‌ی مستقیم عملکرد تصفیه‌خانه‌های مختلف تنها بر مبنای دوز ازن به ازای DOC، بدون لحاظ

این تفاوت‌های زمینه‌ای، می‌تواند نتیجه‌گیری را با خطا مواجه سازد.پارامترهای جایگزین نظیر کاهش جذب ویژه فرابنفش (UV_{A254})، نسبت ازن مصرفی به DOC حذف‌شده ($\Delta O_3/\Delta DOC$) و شاخص‌های طیف‌سنجی اکنون به عنوان استانداردهایی برای پایش سریع برخط و انطباق با مقررات در تأسیسات مقیاس کامل به کار می‌روند[۵۳، ۵۴].

عملکرد فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مختلف مبتنی بر ازن برای حذف آلاینده‌ها در جدول ۱ مقایسه شده است که در آن راندمان‌های حذف، پارامترهای عملیاتی و اثرات هم‌افزایی در انواع مختلف فاضلاب برجسته گردیده‌اند.

جدول ۱. مقایسه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن برای حذف آلاینده‌ها

نویسندگان، سال	کشور	نوع فاضلاب	مقیاس مطالعه	زمان تماس	دوز ازن	pH	کارآمدترین روش حذف آلاینده	آلاینده‌های مطالعه‌شده	فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مقایسه‌شده	منبع
Liu و همکاران، ۲۰۱۹	بلژیک	پساب ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب	آزمایشگاهی	بر اساس باقی‌مانده ازن (زمان ثابت گزارش نشد)	حداقل دوز لازم برای تولید رادیکال •OH	۷–۸	O_3/H_2O_2 (با دوز بهینه H_2O_2)	ریزآلاینده‌های آلی (TrOCs)	O_3، O_3/H_2O_2، O_3/UV	۵۵
Jasim و همکاران، ۲۰۲۰	عراق	فاضلاب روغنی نیروگاه	آزمایشگاهی	80دقیقه	گزارش نشده	۷(دامنه بررسی ۲–۱۲)	UV/H_2O_2	روغن، COD، TOC	UV، UV/H_2O_2، O_3، O_3/H_2O_2	۲۲
Albakrey و همکاران، ۲۰۲۰	عراق	فاضلاب مصنوعی و صنعتی	آزمایشگاهی	گزارش نشده	۲ گرم بر ساعت	متغیر	O_3/UV	COD و ترکیبات آلی و معدنی	ازن‌زنی متداول، O_3/UV	۵۶
Sharma و Ruparelia، ۲۰۲۲	هند	فاضلاب مصنوعی حاوی رنگ	آزمایشگاهی	گزارش نشده	دبی گاز ازن ۳۰–۶۰ لیتر بر ساعت	بررسی در دامنه ۲–۱۲	پرسولفات/O_3/UV	رنگ Reactive Red 120	O_3، O_3/UV، پرسولفات/O_3/UV	۲۷
Sharma و همکاران، ۲۰۲۱	هند	فاضلاب مصنوعی حاوی رنگ	آزمایشگاهی	گزارش نشده	۳۰–۶۰ لیتر بر ساعت	2–12 (عملکرد بهتر در محیط قلیایی)	پرسولفات/O_3/UV	رنگ Reactive Black 5	O_3، O_3/UV، پرسولفات/O_3/UV، کاتالیست/O_3	۵0
Aboo و همکاران، ۲۰۱۸	عراق	فاضلاب صنعتی	آزمایشگاهی	گزارش نشده	۴۸۰–۹۶ mg/L·h	pH بهینه مطالعه شد	ازن‌زنی	COD و رنگ	ازن‌زنی (راکتور ستون حباب نیمه‌پیوسته)	۵۷
Rajabizadeh و همکاران، ۲۰۱۹	ایران	محلول‌های آبی شبیه‌سازی‌شده پتروشیمی	آزمایشگاهی	زمان تماس بهینه	نرخ تزریق ازن بهینه	pH بهینه‌سازی شد	O_3/UV	نیتروآنیلین-p (PNA)	O_3، O_3/UV	۵۸
Jamil و همکاران، ۲۰۲۳	پاکستان	فاضلاب واقعی نساجی	آزمایشگاهی	گزارش نشده	۰/۲ تا ۰/۸ mg/min	گزارش نشده	الکتروفلوکولاسیون + ازن‌زنی کاتالیستی	آلاینده‌های نساجی	ازن‌زنی، ازن‌زنی کاتالیستی، الکتروفلوکولاسیون + ازن‌زنی کاتالیستی	۵۹
Snyder و همکاران، ۲۰۰۶	ایالات متحده	آب سطحی و پساب تصفیه‌شده	بنچ، پایلوت و صنعتی	متغیر	متغیر	گزارش نشده	O_3/H_2O_2	مختل‌کننده‌های غدد درون‌ریز، داروها و آفت‌کش‌ها	O_3، O_3/H_2O_2	۳۸

بحث

ارزیابی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن

کارایی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن به‌خوبی تثبیت شده است؛ با این حال، کاربرد پایدار این فرآیندها مستلزم ارزیابی جامعی است که نه تنها عملکرد حذف، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی محصولات جانبی اکسیداسیون و امکان‌پذیری اقتصادی را نیز مد نظر قرار دهد. سامانه‌های ترکیبی که ازن را با سایر اکسیدان‌ها یا روش‌های فعال‌سازی ادغام می‌کنند، راندمان‌های تصفیه بالایی را در پساب‌های پیچیده نشان می‌دهند[19، 60]. این سامانه‌ها به‌طور معمول به حذف ۷۰ تا ۱۰۰ درصدی غلظت ترکیبات آلی هدف (بر حسب کاهش غلظت آلاینده اولیه) و معدنی‌سازی ۶۰ تا ۸۵ درصدی کربن آلی کل در پساب‌های صنعتی و شهری دست می‌یابند[61]. برای نمونه، Guo و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از یک پیکربندی بهینه‌شده ازن-پرسولفات به حذف ۷۰ درصد COD و ۷۹.۳ درصد TOC در فاضلاب پتروشیمی دست یافتند[49]. به‌طور مشابه، Tichonovas و همکاران (۲۰۱۷) کاهش کامل سمیت زیستی (بر اساس آزمون بازدارندگی رشد باکتری) و معدنی‌سازی قابل‌توجه بر حسب کاهش TOC را از طریق ازن‌زنی فوتوکاتالیستی با به‌کارگیری کاتالیست‌های پایدار مبتنی بر TiO_2 گزارش نمودند[31]. افزون بر این، معرفی نانوحباب‌های ازن به طور قابل ملاحظه‌ای سینتیک اکسیداسیون را شتاب بخشیده است، به‌طوری که برخی مطالعات کاهش کامل غلظت رنگزاهای آزو (بر حسب حذف جذب نوری در طول موج ماکزیمم) را در مدت تقریبی ۳۰۰ ثانیه گزارش کرده‌اند که نزدیک به سه برابر سریع‌تر از سامانه‌های متعارف میکروحباب است[25] . مقایسه این سه مطالعه نشان می‌دهد که برتری عملکردی گزارش‌شده در هر یک، تا حد زیادی وابسته به نوع پساب مورد آزمون (پتروشیمی در برابر رنگزا) و مقیاس آزمایش (آزمایشگاهی در برابر پایلوت) است؛ ازاین‌رو نتایج آن‌ها را نمی‌توان به‌طور مستقیم و بدون در نظر گرفتن این تفاوت‌های زمینه‌ای با یکدیگر مقایسه یا تعمیم داد.

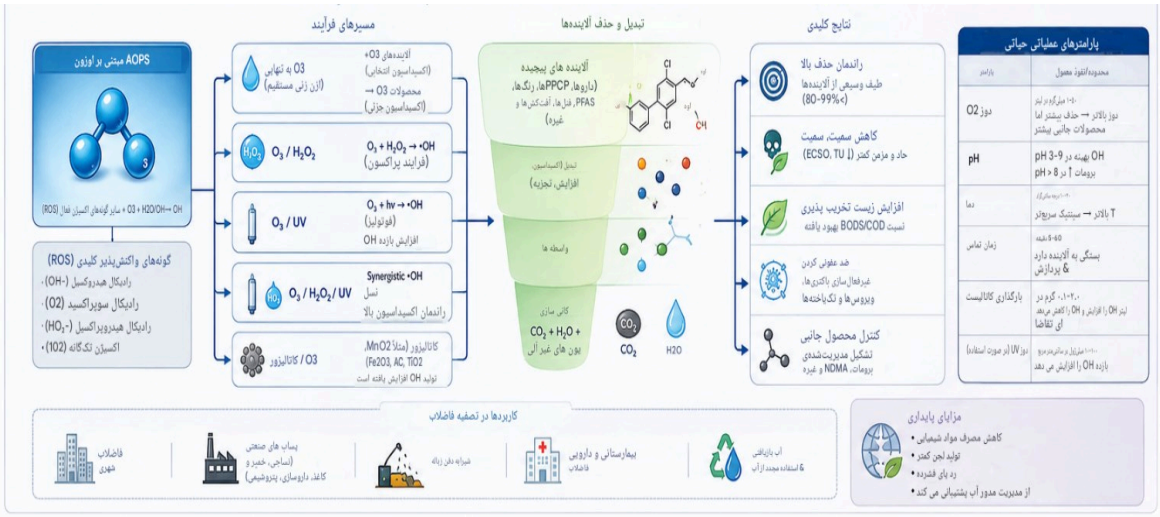
علیرغم این عملکردهای قوی در حذف آلاینده‌ها، نگرانی‌هایی در مورد تشکیل محصولات واسطه‌ای که ممکن است سمیت حاد یا مزمن از خود بروز دهند، همچنان باقی است. مطالعات متعددی نشان می‌دهند که معدنی‌سازی ناقص در طی ازن‌زنی می‌تواند ترکیباتی با پروفایل‌های سم‌شناسی برابر یا تشدیدشده تولید کند[62]. برای مثال، ازن‌زنی رنگ‌های آزو اغلب آمین‌های آروماتیک و کینون‌هایی تولید می‌کند که برخی از آن‌ها ویژگی‌های سرطان‌زایی یا سمیت سلولی، با مقادیر LC_{50} (غلظت کشنده) بین ۰/۵ تا ۵ میلی‌گرم در لیتر برای دافنی ماگنا[1] از خود نشان می‌دهند[63]. در نمونه‌ای دیگر، اکسیداسیون اولیه کلرفنوینفوس بازدارندگی رشد باکتری آلی‌ویبریو فیشری[2] را تا ۸۰ درصد افزایش داد، هرچند تصفیه بعدی با پرسولفات تحت نور مرئی سمیت را به زیر ۱۰ درصد کاهش داد[64]. ازن‌زنی تیامتوکسام نیز به‌طور مشابه محصولات واسطه‌ای با مقادیر LC_{50} در حدود ۲/۱ میلی‌گرم در لیتر تولید کرد که با ترکیب اولیه قابل قیاس بود[60]. علاوه بر این، محصولات جانبی گندزدایی نظیر کلروفرم، دی‌کلرواستونیتریل و دی‌بروموا‌ستونیتریل به عنوان عوامل غالب در پاسخ‌های سمیت سلولی شناخته شده‌اند، به‌طوری که محصولات جانبی نیتروژن‌دار تا ۸۳ درصد از سمیت سلولی کلی را به خود اختصاص می‌دهند[23]. در مجموع، یافته‌های موجود درباره‌ی سمیت محصولات واسطه ناهمگون و گاه متناقض‌اند: در حالی که برخی مطالعات افزایش موقت سمیت را در مراحل میانی گزارش کرده‌اند، مطالعات دیگر (مانند تصفیه تکمیلی با پرسولفات) کاهش سمیت نهایی را نشان داده‌اند.

1. Daphnia magna
2.Aliivibrio fischeri

این تناقض بیانگر آن است که ارزیابی سمیت نباید صرفاً بر پایه غلظت آلاینده اولیه انجام شود، بلکه نیازمند سنجش زیستی در طول کل مسیر تخریب و نه فقط در نقطه پایانی فرآیند است؛ محدودیتی که در بسیاری از مطالعات بررسی‌شده رعایت نشده است.از منظر اقتصادی، اگرچه تولید ازن به‌طور معمول نیازمند ۱۲ تا ۲۰ کیلووات‌ساعت انرژی به ازای هر کیلوگرم ازن است، پیشرفت‌های فناورانه به طور قابل ملاحظه‌ای مقرون‌به‌صرفه‌گی آن را بهبود بخشیده‌اند[۶۵]. پیکربندی‌های ترکیبی و سامانه‌های نانوحباب می‌توانند مصرف ویژه ازن را ۳۰ تا ۷۰ درصد کاهش دهند و بدین ترتیب هزینه به ازای هر واحد آلاینده حذف‌شده را پایین آورند[۵۷، ۶۶]. Mousset و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که پیکربندی‌های پیشرفته ازن‌زنی کاتالیستی و پراکسون در صورت بهینه‌سازی برای بازاستفاده از کاتالیست و بازیابی انرژی، می‌توانند با سامانه‌های الکتروفنتون رقابت کرده یا از آن‌ها پیشی بگیرند[۶۵]. مزایای اقتصادی اضافی ناشی از کاهش نیاز به مواد شیمیایی، حداقل تولید لجن و بهبود زیست‌تجزیه‌پذیری پساب‌های تصفیه‌شده است که همگی هزینه‌های عملیاتی پایین‌دستی را کاهش می‌دهند[۶۷].

تحولات سیاستی به‌طور فزاینده‌ای از رویکردهای نوین تصفیه حمایت می‌کند[۶۸، ۶۹]. راهبردهای دولتی اکنون شامل یارانه‌ها، مشوق‌های مالیاتی و تأمین مالی با بهره کم با هدف ترویج فناوری‌های پایدار زیست‌محیطی می‌باشد[۶۹]. تقویت این ابتکارات، استقرار در مقیاس بزرگ فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن را شتاب خواهد بخشید[۷۰]. انتظار می‌رود گسترش زیرساخت‌های ازن همچنین به ایجاد اشتغال در حوزه‌های مهندسی محیط زیست، بهره‌برداری از سامانه‌ها و پایش منجر شود و بدین ترتیب به اهداف ملی اقتصاد سبز کمک نماید[۷۰].

ارزیابی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن از منظر زیست‌محیطی مستلزم بررسی توأمان مزایا و مخاطرات بالقوه این فناوری‌هاست. همان‌طور که در شکل ۲ به‌صورت شماتیک ترسیم شده است.



شکل ۲. چارچوب یکپارچه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن در تصفیه فاضلاب: مکانیسم‌ها، مسیرها و نتایج کلیدی

چالش‌ها و چشم‌اندازهای آتی در پیاده‌سازی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن

همانند تمامی فرآیندها، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن نیز از محدودیت‌های ذاتی و چالش‌های عملیاتی مبرا نیستند. یکی از مسائل عمده، فقدان پروتکل‌های استاندارد و چارچوب‌های نظارتی است که مقایسه داده‌های عملکردی را پیچیده ساخته و پذیرش یکنواخت را در مناطق مختلف مهار می‌کند[۵۶]. ایجاد معیارهای ارزیابی استاندارد و رویه‌های آزمایشی یکسان برای ارزیابی‌های محک و توسعه مقیاس از آزمایشگاه به مقیاس صنعتی ضروری است[۷۱]. پذیرش عمومی و مشارکت ذی‌نفعان نیز همچنان موانع حیاتی باقی مانده‌اند و نیازمند تلاش‌های متمرکز آموزشی و تربیتی برای اطمینان از آگاهی نسبت به مزایای فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و الزامات عملیاتی آن‌ها هستند[۷۲].

چالش‌های عملیاتی شامل مصرف بالای انرژی و هزینه‌های تولید ازن است که می‌توان از طریق طراحی بهینه فرآیند و صرفه‌جویی ناشی از مقیاس، آن‌ها را تعدیل نمود[۷۳]. مشوق‌های دولتی و حمایت‌های سیاستی با جبران سرمایه‌گذاری‌های اولیه و تقویت نوآوری فناورانه، نقش مهمی در تشویق پذیرش ایفا می‌کنند[۷۴]. افزون بر این، سامانه‌های پایش برخط بلادرنگ برای بهینه‌سازی فرآیند، تضمین حذف هدفمند آلاینده‌ها و در عین حال به حداقل رساندن تشکیل محصولات جانبی مضر نظیر برومات ضروری هستند[۷۵]. فناوری‌های پیشرفته تحلیلی در ترکیب با راهبردهای کنترل خودکار، امکان تنظیم دقیق دوزهای ازن و شرایط واکنش را برای افزایش کارایی و ایمنی فراهم می‌آورند[۷۶].

به‌علاوه، ازن‌زنی پیش‌سازها در pH بالا می‌تواند N-نیتروزودی‌متیل‌آمین[1] بسیار سرطان‌زا را در سطوح نانوگرم در لیتر تولید کند، در حالی که مواد پر- و پلی‌فلوروآلکیل[2] اغلب در برابر معدنی‌سازی کامل مقاومت نشان می‌دهند که این امر استفاده از راهبردهای تصفیه متوالی یا ترکیبی را ضروری می‌سازد. تلفیق فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن با تصفیه‌های مکمل، از جمله فرآیندهای زیستی و سامانه‌های کاتالیستی، نویدبخش بهبود کارایی کلی تصفیه و مقرون‌به‌صرفگی اقتصادی است[۷۷]. پژوهش‌های آتی برای توسعه کاتالیست‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه و طراحی‌های راکتوری که بهره‌برداری پیوسته و بازیابی کاتالیست را تسهیل کنند، مورد نیاز است[۷۸]. همچنین، گسترش استفاده از سامانه‌های ترکیبی می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده، زیست‌تجزیه‌پذیری مواد آلی را بهبود بخشیده و مفاهیم تخلیه مایع صفر[3] را ترویج نماید[۹].

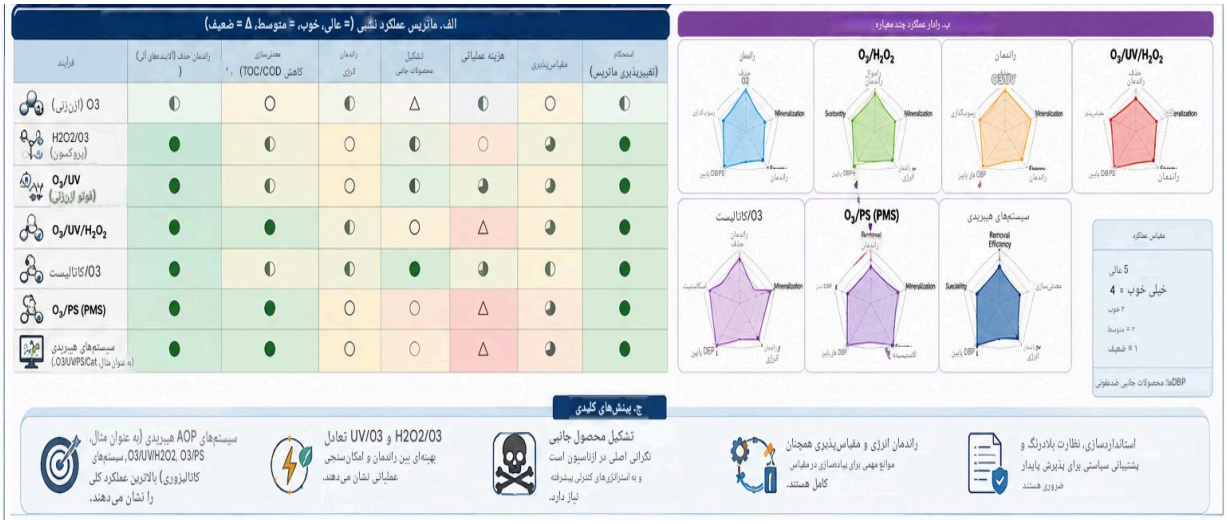
در ایران نیز با وجود پژوهش‌های آزمایشگاهی متعدد درباره‌ی ازن‌زنی و سامانه‌های ترکیبی آن، فاصله‌ی محسوسی میان یافته‌های علمی و پیاده‌سازی صنعتی این فناوری‌ها در کشور وجود دارد. یارانه‌ی گسترده‌ی حامل‌های انرژی، هزینه‌ی نسبتاً بالای تولید ازن را در مقایسه با روش‌های متعارف کلرزنی یا لخته‌سازی از نظر اقتصادی کمتر رقابتی می‌سازد، در حالی‌که فقدان استانداردهای الزام‌آور برای حذف ریزآلاینده‌های نوظهور (نظیر باقیمانده‌های دارویی) در ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست، انگیزه‌ی سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و دولتی در این فناوری را کاهش می‌دهد.

از منظر زیرساختی نیز، بسیاری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی کشور بر پایه‌ی فرآیندهای متعارف بیولوژیکی طراحی شده‌اند و ارتقای آن‌ها به سامانه‌های اکسیداسیون پیشرفته مستلزم سرمایه‌گذاری زیربنایی، تأمین تجهیزات وارداتی مولد ازن و نیروی متخصص بهره‌بردار است. تحریم‌های اقتصادی و محدودیت دسترسی به فناوری‌های روز نیز روند بومی‌سازی و توسعه‌ی تجهیزات را کند کرده است.

1.NDMA
2.PFAS
3. Zero-Liquid Discharge

در نتیجه، توسعه‌ی این فناوری در ایران بیش از آنکه با موانع علمی مواجه باشد، به چالش‌های سیاست‌گذاری، تأمین مالی و اجرایی گره خورده است.

برای پیشبرد این حوزه، اتخاذ رویکردی کل‌نگر که عوامل نظارتی، فنی، اقتصادی و اجتماعی را مورد توجه قرار دهد، حیاتی است[۷۲]. تلاش‌های هماهنگ شامل سیاست‌گذاران، پژوهشگران، صنعت و جوامع، توسعه راه‌حل‌های پایدار و مقیاس‌پذیر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن را برای چالش‌های متنوع فاضلاب تسهیل کرده و از سلامت محیط زیست و عموم محافظت خواهد نمود(شکل۳)[۴۸، ۷۹].



شکل ۳. ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن برای تصفیه فاضلاب

محدودیت‌ها ی مطالعه ی حاضر

این مطالعه با محدودیت‌های قابل‌توجهی همراه است که در تفسیر یافته‌ها باید مدنظر قرار گیرد. نخست، ماهیت روایتی این مرور، به‌جای مرور نظام‌مند، امکان ارزیابی کمّی یکپارچه (متاآنالیز) داده‌های عملکردی را فراهم نمی‌کند و انتخاب مطالعات، هرچند مبتنی بر معیارهای مشخص، از سوگیری انتخاب (selection bias) نویسندگان مصون نیست. دوم، محدود ساختن جست‌وجو به مقالات انگلیسی و فارسی احتمالاً باعث حذف شواهد منتشرشده در سایر زبان‌ها، به‌ویژه از کشورهای آسیای شرقی که سهم قابل‌توجهی در این حوزه دارند، شده است. سوم، ناهمگونی گسترده در گزارش‌دهی پارامترهای عملیاتی میان مطالعات اولیه (که در بخش یافته‌ها بدان اشاره شد) امکان مقایسه‌ی کاملاً دقیق میان فرآیندها را محدود می‌سازد. از منظر فناوری نیز، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن با محدودیت‌های ذاتی مواجه‌اند: وابستگی شدید عملکرد به کیفیت آب خام و غلظت مواد مصرف‌کننده‌ی رادیکال (نظیر بی‌کربنات و برمید)، هزینه‌ی بالای سرمایه‌ای و انرژی‌بر برای تولید ازن که مقیاس‌پذیری اقتصادی را در کشورهای با زیرساخت انرژی محدود دشوار می‌سازد.

نتیجه‌گیری

این مرور روایتی نشان داد که فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازن، به‌ویژه در پیکربندی‌های ترکیبی، عملکردی برتر نسبت به ازن‌زنی تنها در حذف آلاینده‌های دیرتجزیه‌پذیر دارند، هرچند میزان این برتری به‌شدت به نوع آلاینده، ماتریکس آب و شرایط عملیاتی وابسته است و

نباید به‌صورت مطلق تعمیم داده شود. مهم‌ترین شکاف‌های پژوهشی شناسایی‌شده عبارت‌اند از: فقدان پروتکل‌های آزمایشی استاندارد، کمبود داده‌های میدانی در مقیاس واقعی، و ارزیابی ناکافی سمیت محصولات واسطه در طول مسیر تخریب. بر این اساس، پژوهش‌های آینده باید بر اجرای مطالعات پایلوت با فاضلاب واقعی، تدوین پروتکل‌های گزارش‌دهی یکسان، و انجام سنجش‌های زیستی سیستماتیک تمرکز کنند. تحقق این اولویت‌ها، همراه با حمایت‌های سیاست‌گذاری هدفمند، پیش‌شرط گذار این فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به کاربرد پایدار صنعتی است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان صمیمانه از تمامی افرادی که با حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و همکاری‌های ارزشمند خود در انجام و تکمیل این مطالعه یاری‌رسان بودند، قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، علمی، شخصی یا حرفه‌ای مرتبط با انجام، تحلیل، تفسیر و انتشار این مطالعه وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی اختصاصی از سازمان‌ها، نهادهای دولتی، مؤسسات تجاری یا سایر منابع تأمین مالی انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه از نوع مروری بوده و صرفاً بر اساس بررسی و تحلیل مطالعات و منابع علمی منتشرشده انجام شده است. در این پژوهش از نمونه‌های انسانی یا حیوانی، اطلاعات شناسایی‌کننده افراد و هیچ‌گونه مداخله تجربی استفاده نشده است؛ بنابراین، دریافت کد اخلاق برای این مطالعه ضروری نبوده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و مفهوم‌پردازی مطالعه، نظارت بر روند پژوهش: حجت ندیمی

گردآوری و استخراج داده‌ها: مهدی احمدی‌نسب، فاطمه مرتضی‌زاده، فضل‌الله چنگانی

تحلیل و تفسیر یافته‌ها: مهدی احمدی‌نسب، فاطمه مرتضی‌زاده، فضل‌الله چنگانی

جستجو و بررسی منابع: فاطمه مرتضی‌زاده مهدی احمدی‌نسب، فضل‌الله چنگانی

نگارش اولیه مقاله: مهدی احمدی‌نسب

بازنگری علمی و تأیید نسخه نهایی مقاله: حجت ندیمی، مهدی احمدی‌نسب، فاطمه مرتضی‌زاده، فضل‌الله چنگانی

References

1. Mortezazadeh F, Nasab MA, Javid A, Changani F, Dehghani MH. A review of UV-based advanced oxidation processes in wastewater treatment systems. Desalination and Water Treatment. 2025:101388.
2. Dhakal N, Salinas-Rodriguez SG, Hamdani J, Abushaban A, Sawalha H, Schippers JC, et al. Is desalination a solution to freshwater scarcity in developing countries? Membranes. 2022;12(4):381.
3. Al-Khatib LA, AlHanaktah AM. Wastewater Treatment Plant Upgrade and Its Interlinkages with the Sustainable Development Goals. Resources. 2025;14(4):62.
4. Poyatos JM, Muñio M, Almecija M, Torres J, Hontoria E, Osorio F. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art. Water, Air, and Soil Pollution. 2010;205(1):187-204.
5. Abuhasel K, Kchaou M, Alquraish M, Munusamy Y, Jeng YT. Oily wastewater treatment: overview of conventional and modern methods, challenges, and future opportunities. Water. 2021;13(7):980.
6. Kumar P, Singh J. Perspective and challenges of synergistic removal of toxic contaminants from effluent using different treatment techniques. Microbial Niche Nexus Sustaining Environmental Biological Wastewater and Water-Energy-Environment Nexus: Springer; 2025. p. 419-51.
7. Zehtabian E, Masoudi R, Yazdandoost F, Sedghi-Asl M, Loáiciga HA. Investigation of water allocation using integrated water resource management approaches in the Zayandehroud River basin, Iran. Journal of Cleaner Production. 2023;395:136339.
8. Afolalu SA, Ikumapayi OM, Ogedengbe TS, Kazeem RA, Ogundipe AT. Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods–an overview. Materials Today: Proceedings. 2022;62:3282-8.
9. Mirzaei R, Mesdaghinia A, Hoseini SS, Yunesian M. Antibiotics in urban wastewater and rivers of Tehran, Iran: Consumption, mass load, occurrence, and ecological risk. Chemosphere. 2019;221:55-66.
10. Mirzaei R, Yunesian M, Nasseri S, Gholami M, Jalilzadeh E, Shoeibi S, et al. Occurrence and fate of most prescribed antibiotics in different water environments of Tehran, Iran. Science of the total environment. 2018;619:446-59.
11. Daliri M, Martinez-Morcillo S, Sharifinia M, Javdan G, Keshavarzifard M. Occurrence and ecological risk assessment of antibiotic residues in urban wastewater discharged into the coastal environment of the Persian Gulf (the case of Bandar Abbas). Environmental Monitoring and Assessment. 2022;194(12):905.
12. Akbarzadeh A, Valipour A, Meshkati SMH, Hamnabard N. Municipal wastewater treatment in Iran: current situation, barriers and future policies. Journal of Advances in Environmental Health Research. 2023;11(1):60-71.
13. Alizadeh S, Zafari-Koloukhi H, Rostami F, Rouhbakhsh M, Avami A. The eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants in the city of Mashhad using emergy and life cycle analyses. Journal of Cleaner Production. 2020;249:119327.
14. Saravanan A, Kumar PS, Jeevanantham S, Karishma S, Tajsabreen B, Yaashikaa P, et al. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development .Chemosphere. 2021;280:130595.
15. Deng Y, Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. Current pollution reports. 2015;1(3):167-76.
16. Wang J, Wang S. Toxicity changes of wastewater during various advanced oxidation processes treatment: An overview. Journal of Cleaner Production. 2021;315:128202.
17. Mukherjee J, Lodh BK, Sharma R, Mahata N, Shah MP, Mandal S, et al. Advanced oxidation process for the treatment of industrial wastewater: A review on strategies, mechanisms, bottlenecks and prospects. Chemosphere. 2023;345:140473.
18. Khan AH, Khan NA, Ahmed S, Dhingra A, Singh CP, Khan SU, et al. Application of advanced oxidation processes followed by different treatment technologies for hospital wastewater treatment. Journal of Cleaner Production. 2020;269:122411.
19. Guo K, Wu Z, Chen C, Fang J. UV/chlorine process: an efficient advanced oxidation process with multiple radicals and functions in water treatment. Accounts of Chemical Research. 2022;55(3):286-97.
20. Li S, Yang Y, Zheng H, Zheng Y, Jing T, Ma J, et al. Advanced oxidation process based on hydroxyl and sulfate radicals to degrade refractory organic pollutants in landfill leachate. Chemosphere. 2022;297:134214.
21. Mahmoodi M, Pishbin E. Ozone-based advanced oxidation processes in water treatment: Recent advances, challenges, and perspective. Environmental Science and Pollution Research. 2025;32(7):3531-70.
22. Jamali GA, Devrajani SK, Memon SA, Qureshi SS, Anbuchezhiyan G, Mubarak NM, et al. Holistic insight mechanism of ozone-based oxidation process for wastewater treatment. Chemosphere. 2024;359:142303.
23. Lin Q, Dong F, Li C, Cui J. Disinfection byproduct formation from algal organic matters after ozonation or ozone combined with activated carbon treatment with subsequent chlorination. Journal of Environmental Sciences. 2021;104:233-41.
24. Bilińska L, Gmurek M, Ledakowicz S. Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs–Biodegradability, toxicity and cost assessment. Chemical Engineering Journal. 2016;306:550-9.
25. Koundle P, Nirmalkar N, Boczkaj G. High performance ozone nanobubbles based advanced oxidation processes (AOPs) for degradation of organic pollutants under high pollutant loading. Journal of Environmental Management.2025: 374:124107.
26. Han Y, Zhang L, Liu K, Tao J, Wei F. An Experimental Study on the Novel Ozone-Electro-Fenton Coupled Reactor for Treating Ofloxacin-Containing Industrial Wastewater. Water. 2025;17(11):1649.
27. 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.
28. Wang JL, Xu LJ. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application. Critical reviews in environmental science and technology. 2012;42(3):251-325.
29. Singh A, Majumder A, Saidulu D, Bhattacharya A, Bhatnagar A, Gupta AK. Oxidative treatment of micropollutants present in wastewater: A special

emphasis on transformation products, their toxicity, detection, and field-scale investigations. Journal of Environmental Management. 2024;354:120339.

30. Scaria J, Nidheesh PV. Comparison of hydroxyl-radical-based advanced oxidation processes with sulfate radical-based advanced oxidation processes. Current Opinion in Chemical Engineering. 2022;36:100830.
31. Tichonovas M, Krugly E, Jankunaite D, Racys V, Martuzevicius D. Ozone-UV-catalysis based advanced oxidation process for wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research. 2017;24(21):17584-97.
32. Priyadarshini M, Das I, Ghangrekar MM, Blaney L. Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. Journal of environmental management. 2022;316:115295.
33. Bavasso I, Montanaro D ,Petrucci E. Ozone-based electrochemical advanced oxidation processes. Current Opinion in Electrochemistry. 2022;34:101017.
34. Li X, Fu L, Chen F, Zhao S, Zhu J, Yin C. Application of heterogeneous catalytic ozonation in wastewater treatment: an overview. Catalysts. 2023;13(2):342.
35. Psaltou S, Sioumpoura K, Kaprara E, Mitrakas M, Zouboulis A. Transition metal ions as ozonation catalysts: an alternative process of heterogeneous catalytic ozonation. Catalysts. 2021;11(9):1091.
36. Ji Y, Wang C, He L, Chen X, Wang J, Zhang X, et al. Comparison of ozone-based AOPs on the removal of organic matter from the secondary biochemical effluent of coking wastewater. Environmental Technology. 2024;45(10):1943-55.
37. Sgroi M, Anumol T, Vagliasindi FG, Snyder SA, Roccaro P. Comparison of the new Cl2/O3/UV process with different ozone-and UV-based AOPs for wastewater treatment at pilot scale: Removal of pharmaceuticals and changes in fluorescing organic matter. Science of the total environment. 2021;765:142720.
38. Hübner U, Spahr S, Lutze H, Wieland A, Rüting S, Gernjak W, et al. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment–Guidance for systematic future research. Heliyon. 2024;10.(۹)
39. Wang J, Yuan R, Feng Z, Ma F, Zhou B, Chen H. The advanced treatment of textile printing and dyeing wastewater by hydrodynamic cavitation and ozone: Degradation, mechanism, and transformation of dissolved organic matter. Environmental Research. 2022;215:114300.
40. Rekhate CV, Srivastava J. Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater-A review. Chemical Engineering Journal Advances. 2020;3:100031.
41. Krystynik P. Advanced oxidation processes (AOPs)–utilization of hydroxyl radical and singlet oxygen. Reactive oxygen species: IntechOpen; 2021.
42. Tufail A, Price WE, Mohseni M, Pramanik BK, Hai FI. A critical review of advanced oxidation processes for emerging trace organic contaminant degradation: Mechanisms, factors, degradation products, and effluent toxicity. Journal of Water Process Engineering. 2021;40:101778.
43. Derco J, Gotvajn AŽ, Čižmárová O, Dudáš J, Sumegová L, Šimovičová K. Removal of micropollutants by ozone-based processes. Processes. 2021;9(6):1013.
44. Koundle P, Nirmalkar N, Momotko M, Boczkaj G. Ozone nanobubble technology as a novel AOPs for pollutants degradation under high salinity conditions. Water Research. 2024;263:122148.
45. Xiao W, Zhang H, Wang X, Wang B, Long T, Deng S, et al. Interaction mechanisms and application of ozone micro/nanobubbles and nanoparticles: a review and perspective. Nanomaterials. 2022;12(12):1958.
46. Merényi G, Lind J, Naumov S, Sonntag Cv. Reaction of ozone with hydrogen peroxide (peroxone process): a revision of current mechanistic concepts based on thermokinetic and quantum-chemical considerations. Environmental science & technology. 2010;44(9):3505-7.
47. Xu A, Fan S, Meng T, Zhang R, Zhang Y, Pan S, et al. Catalytic ozonation with biogenic Fe-Mn-Co oxides: Biosynthesis protocol and catalytic performance. Applied Catalysis B: Environmental. 2022;318:121833.
48. Mansouri L, Tizaoui C, Geissen S-U, Bousselmi L. A comparative study on ozone, hydrogen peroxide and UV based advanced oxidation processes for efficient removal of diethyl phthalate in water. Journal of Hazardous Materials. 2019;363:401-11.
49. Guo W, Li C, Zhao J, Ding Y, Yang Q, Guan H. The treatment of petrochemical wastewater via ozone-persulfate coupled catalytic oxidation: mechanism of removal of soluble organic matter. Environmental Science and Pollution Research. 2024;31(20):29400-14.
50. Zhang T, Zheng L, Yang X, Demeestere K, Van Hulle SW. Integrated spectral based monitoring, optimization and control of the combined ozonation and powdered activated carbon adsorption process to remove organic micropollutants from secondary effluent. Water Research. 2025;268:122588.
51. Gągol M, Przyjazny A, Boczkaj G. Effective method of treatment of industrial effluents under basic pH conditions using acoustic cavitation–a comprehensive comparison with hydrodynamic cavitation processes. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2018;128:103-13.
52. Quintero-González CA, Martínez J, Calva-Yáñez JC, Oropeza-Guzmán MT. Physicochemical wastewater treatment improvement by hydrodynamic cavitation nanobubbles. Journal of Water Process Engineering. 2025;69:106581.
53. Yao W, Rehman SWU, Wang H, Yang H, Yu G, Wang Y. Pilot-scale evaluation of micropollutant abatements by conventional ozonation, UV/O3, and an electro-peroxone process. Water Research.2018;138:106-17.
54. Liu Z, Hosseinzadeh S, Wardenier N, Verheust Y, Chys M, Hulle SV. Combining ozone with UV and H2O2 for the degradation of micropollutants from different origins: lab-scale analysis and optimization. Environmental technology. 2019;40(28):3773-82.
55. Liu Z, Demeestere K, Van Hulle S. Comparison and performance assessment of ozone-based AOPs in view of trace organic contaminants abatement in water and wastewater: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021;9(4):105599.
56. Khan ZUH, Gul NS, Sabahat S, Sun J, Tahir K, Shah NS, et al. Removal of organic pollutants through hydroxyl radical-based advanced oxidation processes. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2023;267:115564.

57. Lucas MS, Peres JA, Puma GL. Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O3, O3/UV and O3/UV/H2O2) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. Separation and purification technology. 2010;72(3):235-41.
58. Mukherjee A, Mullick A, Teja R, Vadthya P, Roy A, Moulik S. Performance and energetic analysis of hydrodynamic cavitation and potential integration with existing advanced oxidation processes: A case study for real life greywater treatment. Ultrasonics Sonochemistry. 2020;66:105116.
59. Liu Z ,Chys M, Yang Y, Demeestere K, Van Hulle S. Oxidation of trace organic contaminants (TrOCs) in wastewater effluent with different ozone-based AOPs: comparison of ozone exposure and• OH formation. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019;58(20):8896-902.
60. Wang J, Wang S. Reactive species in advanced oxidation processes: Formation, identification and reaction mechanism. Chemical Engineering Journal. 2020;401:126158.
61. Gerrity D, Gamage S, Holady JC, Mawhinney DB, Quiñones O, Trenholm RA, et al .Pilot-scale evaluation of ozone and biological activated carbon for trace organic contaminant mitigation and disinfection. Water research. 2011;45(5):2155-65.
62. Basant N, Gupta S. QSAR modeling for predicting mutagenic toxicity of diverse chemicals for regulatory purposes. Environmental Science and Pollution Research. 2017;24(16):14430-44.
63. Ramireddy VSR, Kurakula R, Chellam PV, James A, van Hullebusch ED. Systematic computational toxicity analysis of the ozonolytic degraded compounds of azo dyes: Quantitative structure-activity relationship (QSAR) and adverse outcome pathway (AOP) based approach. Environmental Research. 2023;231:116142.
64. Zawadzki P. Toxicity changes of chlorfenvinphos using ozone, ultraviolet light-assisted ozonation, photocatalysis and persulfates activated by visible light. Journal of Ecological Engineering. 2025;26(7).
65. Mousset E, Loh WH, Lim WS, Jarry L, Wang Z, Lefebvre O. Cost comparison of advanced oxidation processes for wastewater treatment using accumulated oxygen-equivalent criteria. Water Research. 2021;200:117234.
66. Noshadi E, Changizian M, Behbahani-Nejad M. Enhancing wastewater treatment efficiency through hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes: Experimental insights and comparative analysis .Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2025;166:105604.
67. Wu C, Zhou Y, Sun X, Fu L. The recent development of advanced wastewater treatment by ozone and biological aerated filter. Environmental Science and Pollution Research. 2018;25(9):8315-29.
68. Piadeh F, Alavi-Moghaddam MR, Mardan S. Assessment of sustainability of a hybrid of advanced treatment technologies for recycling industrial wastewater in developing countries: Case study of Iranian industrial parks. Journal of Cleaner Production. 2018;170:1136-50.
69. Ahmadian A, Ahmadi S, Goharrizi B. Roles of reactive species in photocatalysis: effect of scavengers and inorganic ions on dye removal from wastewater. International Journal of Environmental Science and Technology. 2023;20(6):6433-48.
70. Ahmadi E, McLellan B, Ogata S, Tezuka T. An integrated, socially equitable design for sustainable water and energy supply in Iran. Energy Research & Social Science. 2021;81:102262.
71. Kaiser H-P, Köster O, Gresch M, Périsset PM, Jäggi P, Salhi E, et al. Process control for ozonation systems: a novel real-time approach. Ozone: science & engineering. 2013;35(3):168-85.
72. Melhim SH, Isaifan RJ. The Energy-Economy Nexus of Advanced Air Pollution Control Technologies: Pathways to Sustainable Development. Energies. 2025;18(9):2378.
73. Lim S, Lee W, Na S, Shin J, Lee Y. N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during ozonation of N, N-dimethylhydrazine compounds: Reaction kinetics, mechanisms, and implications for NDMA formation control. Water Research. 2016;105:119-28.
74. Garrido-Cardenas JA, Esteban-García B, Agüera A, Sánchez-Pérez JA, Manzano-Agugliaro F. Wastewater treatment by advanced oxidation process and their worldwide research trends. International journal of environmental research and public health. 2020;17(1):170.
75. Ghorbani M, Eisazadeh H. Removal of COD, color, anions and heavy metals from cotton textile wastewater by using polyaniline and polypyrrole nanocomposites coated on rice husk ash. Composites Part B: Engineering. 2013;45(1):1-7.
76. Ghanbari F, Khatebasreh M, Mahdavianpour M, Lin K-YA. Oxidative removal of benzotriazole using peroxymonosulfate/ozone/ultrasound: synergy, optimization, degradation intermediates and utilizing for real wastewater. Chemosphere. 2020;244:125326.
77. Fakhri B MS, Ghassemi Barghi N, Moradnia Mehdikhanmahaleh M, Raeis Zadeh SMM, Mousavi T, Rezaee R, et al. Pharmaceutical wastewater toxicity: An ignored threat to the public health. Sustainable Environment. 2024;10(1):2322821.
78. Nadimi Hojjat AZ, Forough Riahimanesh, Mehdi Salari. Investigating the indicators of corrosiveness and sedimentation of drinking water in the villages of East Kakhk. Journal of Environmental Health Enginering. 2024;11(4):394-405.
79. Malik SN, Ghosh PC, Vaidya AN, Mudliar SN. Hybrid ozonation process for industrial wastewater treatment: Principles and applications: A review. Journal of Water Process Engineering. 2020;35:101193.