Gonbad Kavous University

Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment

Online ISSN: 2981-0280

Homepage: https://nawee.gonbad.ac.ir

Evaluation and selection of modern methods for removing persistent environmental pollutants in water resources using the analytic hierarchy process

Abbas Jahangiri[1]

Research Expert, Water and Wastewater Company of Markazi Province, Arak, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 January 2024

Revised 03 Febrary 2025

Accepted 24 May 2025

Published online 28 June 2025

Keywords:
Advanced oxidation processes
Analytical Hierarchy Process
Persistent environmental pollutants
Water resource quality
Water treatment
Expert Choice software

ABSTRACT

Objective: The emergence of persistent environmental pollutants in water resources poses a serious environmental challenge, threatening human health and ecosystems. This study aims to evaluate, analyze, and select the most efficient modern water treatment methods for the removal of these pollutants using the Analytic Hierarchy Process (AHP).

Methods: This study employed the descriptive-analytical approach conducted through a review of various scientific sources and data collection from 19 experts in the fields of environmental science and water engineering. The hierarchical structure included four main criteria (pollutant removal efficiency, economic cost, environmental compatibility, and feasibility) and four alternatives for pollutant removal (advanced oxidation processes, membrane technologies, adsorption with nanomaterials, and biological methods). Data analysis was performed using Expert Choice software version 11.

Results: Based on the data analysis, the criterion "pollutant removal efficiency" with a relative weight of 0.42 was identified as the most important factor. Among the alternatives evaluated, advanced oxidation processes were identified as the best method for pollutant removal from water resources based on the research criteria. Sensitivity analysis revealed that changes in the weights of the criteria had no significant impact on the ranking results, and the findings aligned with independent expert opinions.

Conclusions: Advanced oxidation processes were identified as one of the best options for removing persistent environmental pollutants. The findings of this study can serve as a solid foundation for policymaking and water resource management aimed at reducing persistent environmental pollutants and improving water quality.

*Corresponding author, E-mail: Jahangirieng@yahoo.com

Cite this article: Jahangiri, A (2024). Evaluation and selection of modern methods for removing persistent environmental pollutants in water resources using the analytic hierarchy process. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, http//doi.org/10.22034/nawee.2025.499431.1131

© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: http//doi.org/ 10.22034/nawee.2025.499431.1131

رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست
شاپا الکترونیکی: ۰۲۸۰-۲۹۸۱
Homepage: https://nawee.gonbad.ac.ir

ارزیابی و انتخاب روش‌های نوین برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی در منابع آب با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

عباس جهانگیری[۱] *

کارشناس تحقیقات، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی، اراک، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

کلیدواژه‌ها:
آلاینده‌های دیرپای محیطی
تصفیه آب
فرآیند تحلیل سلسله مراتبی
اکسیداسیون پیشرفته
کیفیت منابع آبی
نرم افزار Expert Choice
.

چکیده

هدف: ظهور آلاینده‌های دیرپای محیطی در منابع آب، به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی، سلامت انسان و اکوسیستم‌ها را تهدید می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی، تحلیل و انتخاب کارآمدترین روش‌های نوین تصفیه آب برای حذف این آلاینده‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام شده است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه، کاربردی و توصیفی-تحلیلی، با مرور منابع علمی مختلف و جمع‌آوری داده‌ها از طریق نظرات ۱۹ خبره محیط‌زیست و مهندسی آب صورت پذیرفت. ساختار سلسله‌مراتبی شامل چهار معیار اصلی (کارایی حذف آلاینده‌ها، هزینه اقتصادی، سازگاری محیط‌زیستی و قابلیت اجرا) و چهار گزینه برای حذف آلاینده ها (فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، فناوری‌های غشایی، جذب با نانومواد و روش‌های زیستی) طراحی و تحلیل داده‌ها با نسخه ۱۱ نرم‌افزار Expert Choice انجام شد.

نتایج: بر اساس تحلیل داده‌ها، معیار "کارایی حذف آلاینده‌ها" با وزن نسبی ۰/۴۲ به‌عنوان مهم‌ترین معیار شناخته شد. از میان گزینه‌های مورد بررسی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌عنوان بهترین روش حذف آلاینده ها از منابع آب از حیث معیارهای پژوهش، شناسایی گردید. تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر وزن معیارها تأثیر قابل توجهی بر نتایج رتبه‌بندی ندارد، و نتایج به‌دست‌آمده با نظرات مستقل کارشناسان نیز مطابقت دارد.

نتیجه گیری: فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی معرفی شدند. نتیجه گیری این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آبی با هدف کاهش آلاینده‌های دیرپای محیطی و ارتقاء کیفیت آب باشند.

*نویسنده مسئول، Email: Jahangirieng@yahoo.com

استناد: جهانگیری، عباس. (۱۴۰۴). ارزیابی و انتخاب روش‌های نوین برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی در منابع آب با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*،
http//doi.org/ 10.22034/nawee.2025.499431.1131

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

© نویسندگان.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، ظهور آلاینده‌های دیرپای محیطی از جمله ترکیبات شیمیایی مصنوعی و طبیعی نظیر داروها، هورمون‌ها، محصولات بهداشتی، مواد شیمیایی صنعتی، میکروپلاستیک‌ها و مواد شیمیایی پایدار در منابع آب، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهانی تبدیل شده است. این آلاینده‌ها در غلظت‌های کم اما خطرناک وارد منابع آبی می‌شوند و برخلاف آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار، اغلب به‌دلیل نبود استانداردهای نظارتی مناسب و ناتوانی سیستم‌های تصفیه آب قدیمی در حذف آن‌ها، به‌طور فزاینده‌ای در منابع آب شرب مشاهده می‌شوند(*Bhagat et al., 2024, Yadav et al., 2021*).

آلاینده‌های فوق به‌دلیل پایداری زیاد، خاصیت تجمعی و تأثیرات منفی بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست به‌شمارمی‌آیند. مطالعات نشان می‌دهد که این ترکیبات می‌توانند باعث اختلالات هورمونی، جهش‌های ژنتیکی و بیماری‌های مزمن در انسان و دیگر موجودات زنده شوند. با توجه به این چالش‌ها، حذف این آلاینده‌ها از منابع آب به یکی از اولویت‌های مهم در مدیریت منابع آبی تبدیل شده است(Kumar et al., 2021, Zhang et al., 2023).

سیستم‌های تصفیه آب سنتی که تاکنون برای حذف آلاینده‌های معمولی طراحی شده‌اند، کارایی لازم برای حذف این نوع آلاینده‌ها را ندارند. به‌همین‌دلیل، پژوهش‌ها و فناوری‌های نوینی در حوزه تصفیه آب توسعه یافته‌اند که می‌توانند به‌طور مؤثر این ترکیبات را حذف یا تجزیه کنند. از جمله این روش‌های نوین می‌توان به فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)[1]، فناوری‌های غشایی، جذب با استفاده از نانومواد و بیوتکنولوژی اشاره کرد. با این حال، انتخاب مناسب‌ترین روش برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی به‌دلیل پیچیدگی و تعدد معیارهای ارزیابی، همواره چالش‌برانگیز بوده است(*Loganathan et al., 2023, Cardoso et al., 2021*).

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در انتخاب روش‌های تصفیه مناسب برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی از منابع آب و وجود معیارهای مختلف (مانند کارایی، هزینه، سازگاری محیط‌زیستی و قابلیت اجرا)، انتخاب روش بهینه به یک چالش اساسی تبدیل شده است. در این راستا، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)[2] به‌ویژه فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی(AHP)[3] به‌عنوان یک ابزار مؤثر شناخته می‌شود. AHP به‌طور سیستماتیک و ساختاریافته امکان مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها را بر اساس معیارهای مختلف فراهم می‌آورد و از طریق فرایند مقایسات زوجی، وزن‌های نسبی معیارها را محاسبه می‌کند. این روش، به‌ویژه در شرایطی که اطلاعات دقیق و کمّی در دسترس نیست و نیاز به تحلیل جامع و چندبعدی وجود دارد، توانایی ارائه تصمیمات بهینه و قابل‌دفاع را دارد(*Chen, 2020*). بنابراین، AHP به‌عنوان یک ابزار قوی در انتخاب بهترین روش‌های تصفیه برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی، در این تحقیق انتخاب شده است.

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی و انتخاب کارامدترین روش‌های نوین برای حذف این آلاینده‌ها از منابع آب است. این هدف از طریق استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی محقق می‌شود که امکان مقایسه معیارها و گزینه‌ها را به‌صورت سیستماتیک فراهم می‌کند.

سیستم‌های تصفیه سنتی مانند فرایندهای انعقاد-لخته‌سازی، ته‌نشینی و کلرزنی برای حذف آلاینده‌های معمولی طراحی شده‌اند و کارایی کافی برای حذف این نوع آلاینده‌ها را ندارند. در مطالعه‌ای نشان دادند که تصفیه‌خانه‌های معمولی تنها می‌توانند درصد کمی از داروها و محصولات بهداشتی را حذف کنند و بخش عمده‌ای از آن‌ها وارد محیط‌زیست می‌شود(*Pai et al., 2020*). علاوه بر این، سیستم‌های سنتی اغلب با چالش‌هایی از جمله ناتوانی در حذف ترکیبات پایدار و پیچیده، تولید محصولات جانبی مضر و هزینه‌های عملیاتی زیاد در صورت به‌روزرسانی سیستم‌ها مواجه‌اند.

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوینی برای حذف این نوع آلاینده‌ها توسعه یافته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، فناوری‌های غشایی، جذب با استفاده از نانومواد، بیوتکنولوژی و روش‌های زیستی و غیره.

[1] Advanced oxidation processes

[2] Multiple Criteria Decision Making

[3] Analytic Hierarchy Process

فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی شناخته می‌شوند. در این روش‌ها، از تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل (•OH) برای تخریب ترکیبات آلی پیچیده استفاده می‌شود(*Najafinejad et al., 2023*). مطالعه بهارات و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده که استفاده از فرایند H_2O_2 می‌تواند تا ۹۹ درصد از ترکیبات دارویی را در فاضلاب‌های آلوده تجزیه کند(*Bharath et al., 2023*). محققان دیگر مانند وانگ و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از فرایند فتوفنتون را به‌دلیل کارایی زیاد و هزینه مناسب پیشنهاد کرده‌اند(*Wang et al., 2023*).

تکنولوژی‌های غشایی مانند اولترافیلتراسیون(UF)[1] ، نانوفیلتراسیون(NF)[2] و اسمز معکوس(RO)[3] برای حذف فیزیکی آلاینده‌ها به‌کارمی‌روند(*Fang et al., 2020*). فیجیوکا و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود نشان دادند که غشاهای نانوفیلتراسیون می‌توانند درصد بسیار زیادی از این نوع آلاینده‌ها را حذف کنند(*Fujioka et al., 2024*) . با این‌حال، چالش اصلی این روش‌ها، هزینه زیاد ساخت و نگهداری غشاها و رفع گرفتگی آن‌ها است.

استفاده از نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن و نانوجاذب‌های زیستی برای حذف آلاینده‌ها در سال‌های اخیر گسترش یافته است(*Xu et al., 2018*). نصرالله زاده و همکاران (۲۰۲۱) پس از انجام تحقیقی دریافتند که نانولوله‌های کربنی می‌توانند آلاینده ها را از آب به صورت کارا حذف نمایند. همچنین عنوان نمودند که نانومواد زیستی به‌دلیل زیست‌سازگاری و هزینه کمتر، به‌عنوان جایگزین مناسبی مطرح شده‌اند(*Nasrollahzadeh et al., 2021*).

استفاده از میکروارگانیسم‌ها و فرایندهای بیولوژیکی برای تجزیه آلاینده‌های دیرپای محیطی نیز یکی از راهکارهای مؤثر است(کسری کرمانشاهی و مبارک, ۱۴۰۳). عسگری و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیق خود استفاده از میکروارگانیسم‌ها و فرایندهای بیولوژیکی برای تجزیه آلاینده‌های دیرپای محیطی فاضلاب‌ها را پیشنهاد نموده‌اند.

برای انتخاب بهترین روش حذف آلاینده‌ها از منابع آب، می‌بایست عوامل مختلفی از جمله، هزینه، کارایی و غیره را با هم درنظرگرفت که این کار با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از جمله فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی صورت گیرد. در این روش، ابتدا یک ساختار سلسله‌مراتبی شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها تعریف می‌شود و سپس از طریق مقایسات زوجی وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها انجام می‌گردد(*Madzík and Falát, 2022*). در سال‌های اخیر، استفاده از این مدل در حوزه محیط‌زیست و مدیریت منابع آب و آب و فاضلاب گسترش یافته است که در اینجا به چند مورد از آنها به‌صورت نمونه اشاره می‌شود.

شکار و ماتیو (۲۰۲۳) تحقیقی با هدف ارزیابی مناطق بالقوه آب زیرزمینی و شناسایی مناطق مناسب برای سایت‌های تغذیه مصنوعی انجام نمودند. آنان ترکیبی از سیستم اطلاعات جغرافیایی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی قطعی و فازی برای دستیابی به این هدف را استفاده نمودند. در نهایت بیان نمودند که یافته‌های این مطالعه به تصمیم‌گیرندگان و مصرف‌کنندگان آب در منطقه تحقیقاتی کمک می‌کند تا از منابع آب زیرزمینی به‌طور پایدار استفاده کنند(*Shekar and Mathew, 2023*) .

قربانی و نور مرادی (۱۴۰۱) تحقیقی با هدف شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌های آب و فاضلاب در استان ایلام انجام دادند. آنان داده‌های مورد نیاز خود را با استفاده از پرسشنامه‌ای محقق‌ساخته جمع‌آوری نمودند. سپس برای اولویت‌بندی مراحل چرخه حیات پروژه از تکنیک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده کردند. درنهایت نتیجه‌گرفتند که طراحی و برنامه‌ریزی بالاترین اولویت و استقرار کمترین اهمیت را به خود اختصاص داده‌اند(قربانی و نورمرادی، ۱۴۰۱).

اصغری و جعفری (۱۴۰۳) تحقیقی با عنوان "بررسی تأثیر نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان بر پمپ‌های تصفیه‌خانه آب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان)" انجام نمودند. بدین‌منظور پرسش‌نامه‌هایی بر اساس اهداف و معیارهای تحقیق خودشان طراحی نمودند و وزن داده‌ها را به روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین کردند. درنهایت نتیجه گرفتند که عمر تجهیزات و تاسیسات با انجام نگهداری و تعمیرات دقیق و منظم افزایش یافته است(اصغری و جعفری، ۱۴۰۳).

[1] Ultrafiltration (UF)
[2] Nanofiltration (NF)
[3] Reverse Osmosis (RO)

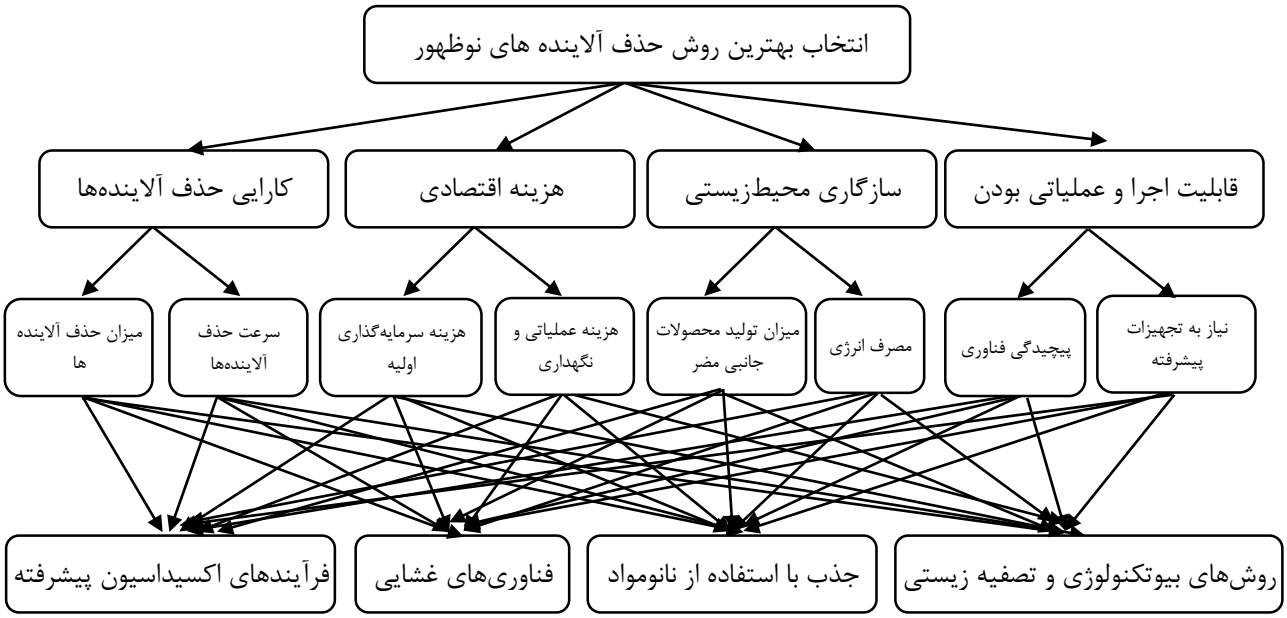
بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هرکدام از روش‌های نوین تصفیه آب مزایا و معایب خاص خود را دارند. درعین‌حال، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی و مقایسه این روش‌ها بر اساس معیارهای مختلف (مانند کارایی، هزینه، سازگاری محیط‌زیستی و...) مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، با توجه به ضرورت حذف آلاینده‌ها، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای شناسایی و انتخاب بهترین روش حذف استفاده شده است.

نوآوری این تحقیق در استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای ارزیابی و انتخاب روش‌های نوین تصفیه آب برای حذف آلاینده‌های دیرپا در استان مرکزی است. این مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که علاوه بر کارایی حذف آلاینده‌ها، به دیگر عوامل مهم مانند هزینه اقتصادی، سازگاری محیط‌زیستی و قابلیت اجرا نیز توجه کنند. همچنین، پژوهش حاضر با جمع‌آوری نظرات کارشناسان مختلف و تحلیل داده‌ها به‌طور سیستماتیک، تلاش دارد تا بهترین روش تصفیه آب برای حذف آلاینده‌های دیرپا را شناسایی کند که این خود گامی نو در مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط زیست است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش‌شناسی، توصیفی-تحلیلی است که در تابستان ۱۴۰۳ انجام شده است. در این پژوهش به‌طور مشخص از روش تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش حذف آلاینده‌ها از منابع آب استفاده شده است. به‌این‌منظور لازم است در ابتدا معیارها و گزینه‌های تصمیم مشخص شود. برای مشخص‌شدن این موارد و نیز جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز پژوهش، از دو روش اصلی استفاده شد: ۱. مطالعات کتابخانه‌ای که منابع علمی مختلف شامل مقالات، کتاب‌ها و گزارش‌های مرتبط با فناوری‌های نوین تصفیه آب بررسی و اطلاعات مورد نیاز در زمینه معیارها و عملکرد گزینه‌ها استخراج شد. ۲. نظرات خبرگان که از پرسشنامه مقایسات زوجی برای جمع‌آوری نظرات خبرگان در رابطه با مقایسه معیارها و گزینه‌ها استفاده شد. این خبرگان شامل متخصصان محیط زیست، مهندسان آب و فاضلاب و اعضای هیئت‌علمی دانشگاه های استان مرکزی و جمعا ۱۹ نفر بودند. برای دستیابی به اجماع نظر، از روش دلفی در دو مرحله استفاده شد.

بر اساس مرور مطالعات پیشین و نظر خبرگان، معیارها و زیرمعیارهای اصلی به شرح زیر انتخاب شدند: ۱ - کارایی حذف آلاینده‌ها که شامل زیر معیارهای "میزان حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی" و "سرعت حذف آلاینده‌ها" می‌شد. ۲- هزینه اقتصادی که شامل زیر معیارهای"هزینه سرمایه‌گذاری اولیه" و "هزینه عملیاتی و نگهداری" می‌شد. ۳-سازگاری محیط‌زیستی که شامل زیر معیارهای "میزان تولید محصولات جانبی مضر" و "مصرف انرژی" می‌شد. ۴- قابلیت اجرا و عملیاتی بودن که شامل زیر معیارهای "پیچیدگی فناوری" و "نیاز به تجهیزات پیشرفته" می‌شد. به‌طور مشابه گزینه‌های تصمیم ۴ مورد زیر شناسایی شدند: ۱- فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته. ۲-فناوری‌های غشایی (مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس). ۳- جذب با استفاده از نانومواد (مانند نانولوله‌های کربنی و گرافن). ۴- روش‌های بیوتکنولوژی و تصفیه زیستی. درخت سلسله‌مراتبی این مساله در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل۱- ساختار سلسله مراتبی مساله

پس از مشخص شدن ساختار سلسله‌مراتبی مساله، مقایسات زوجی بین معیارها و گزینه‌ها بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی انجام شد: ۱ اهمیت یکسان، ۳ اهمیت متوسط، ۵ اهمیت زیاد، ۷ اهمیت خیلی زیاد و ۹ اهمیت بسیار زیاد. که وزن نسبی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی محاسبه شد. برای اطمینان از دقت مقایسات، نرخ ناسازگاری محاسبه شد. سپس وزن معیارها و گزینه‌ها با یکدیگر تلفیق شده و اولویت نهایی هر گزینه محاسبه گردید. برای انجام محاسبات، نسخه ۱۱ نرم‌افزار Expert Choice به‌کارگرفته‌شد. این نرم‌افزار یکی از ابزارهای پرکاربرد در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی است که به کمک آن می‌توان به‌طور سیستماتیک مقایسات زوجی بین معیارها و گزینه‌ها را انجام داد و تصمیمات بهینه را استخراج کرد. استفاده از Expert Choice بر اساس چند فرضیه اصلی صورت می‌گیرد که عبارتند از: ۱) مقایسه زوجی بین معیارها و گزینه‌ها: در این نرم‌افزار، مقایسات زوجی بین معیارها و گزینه‌ها از طریق مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی انجام می‌شود که میزان اهمیت نسبی هر گزینه در برابر سایر گزینه‌ها و معیارها را نشان می‌دهد. ۲) استقلال معیارها: فرض بر این است که هر معیار به‌طور مستقل از دیگر معیارها تأثیرگذار است و تداخل یا وابستگی مستقیم بین معیارها وجود ندارد. ۳) ترکیب وزن‌ها و رتبه‌بندی: پس از انجام مقایسات زوجی، نرم‌افزار Expert Choice وزن‌های نسبی هر معیار و گزینه را محاسبه می‌کند و بر اساس این وزن‌ها، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها ارائه می‌شود. ۴) ثبات تصمیمات: فرض بر این است که تغییرات جزئی در وزن‌ها و مقایسات زوجی تأثیر زیادی بر نتایج نهایی نخواهد گذاشت. در واقع، تصمیمات نهایی باید به‌گونه‌ای پایدار و منطقی باشند که تغییرات کوچک در داده‌ها منجر به تغییرات بزرگ در نتایج نشوند. برای اطمینان از صحت و دقت نتایج حاصل از فرایند سلسله‌مراتبی از دو روش زیر استفاده شد: ۱- به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات وزن معیارها بر رتبه‌بندی گزینه‌ها تحلیل حساسیت انجام شد که این کار به شناسایی پایداری نتایج کمک می‌کند. ۲- نتایج نهایی رتبه‌بندی گزینه‌ها با نظرات مستقل کارشناسان مقایسه شد تا صحت نتایج تأیید گردد. خلاصه فرایند انجام پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خلاصه فرایند انجام پژوهش.

مرحله	شرح فعالیت
شناسایی و تعریف مسئله	بررسی ضرورت حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی و معرفی اهداف پژوهش
طراحی ساختار سلسله مراتبی	تعیین هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌های نوین تصفیه
جمع‌آوری داده‌ها	مرور ادبیات و نظرات خبرگان با استفاده از پرسشنامه مقایسات زوجی
تحلیل داده‌ها با روش AHP	محاسبه وزن معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice
اعتبارسنجی نتایج	تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج نهایی با نظر کارشناسان

نتایج و بحث

با استفاده از نظرات خبرگان و تشکیل ماتریس مقایسات زوجی برای معیارهای این تحقیق، وزن نسبی هر یک از معیارها محاسبه شد. که در جدول۲ ارائه شده است:

جدول ۲- وزن نسبی معیارها.

مرحله	شرح فعالیت
کارایی حذف آلاینده‌ها	۰/۴۲
هزینه اقتصادی	۰/۲۵
سازگاری محیط‌زیستی	۰/۱۸
قابلیت اجرا و عملیاتی بودن	۰/۱۵

بر اساس این نتایج، کارایی حذف آلاینده‌ها با وزن ۰/۴۲ به‌عنوان مهم‌ترین معیار انتخاب شد. این امر نشان‌دهنده اهمیت عملکرد روش‌های تصفیه در حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی از دیدگاه خبرگان است. معیار هزینه اقتصادی با وزن ۰/۲۵ در اولویت دوم قرار گرفت که بیانگر حساسیت تصمیم‌گیرندگان نسبت به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری است. سازگاری محیط‌زیستی و قابلیت اجرا و عملیاتی بودن نیز به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

به‌طور مشابه، مقایسات زوجی در سطح زیرمعیارها نیز انجام شد و نتایج وزن نسبی زیرمعیارها برای هر معیار در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳- وزن نسبی زیر معیارها.

معیار اصلی	زیر معیار	وزن نسبی
کارایی حذف آلاینده‌ها	میزان حذف آلاینده‌ها	۰/۷۰
	سرعت حذف آلاینده‌ها	۰/۳۰
هزینه اقتصادی	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۰/۶۵
	هزینه عملیاتی و نگهداری	۰/۳۵
سازگاری محیط‌زیستی	میزان تولید محصولات جانبی مضر	۰/۶۰
	مصرف انرژی	۰/۴۰
قابلیت اجرا و عملیاتی بودن	پیچیدگی فناوری	۰/۵۵
	نیاز به تجهیزات پیشرفته	۰/۴۵

همان‌گونه‌که در جدول ۳ مشخص است، میزان حذف آلاینده‌ها با وزن ۰/۷ به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیار در معیار کارایی حذف، شناسایی شد. این نشان می‌دهد که دستیابی به حداکثر حذف آلاینده‌ها در اولویت بالاتری نسبت به سرعت حذف قرار دارد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه با وزن ۰/۶۵ از دیدگاه خبرگان اهمیت بیشتری نسبت به هزینه عملیاتی و نگهداری دارد.

در مرحله بعد، مقایسات زوجی بین گزینه‌های روش‌های نوین تصفیه آب با توجه به هر معیار و زیرمعیار انجام شد و نمره نهایی گزینه‌ها با توجه به تمام معیارها و زیرمعیارها محاسبه گردید و از بیشترین به کمترین نمره رتبه‌بندی شدند که نتایج نمره هر گزینه و رتبه‌بندی نهایی آنها در جدول ۴ ارائه شده است:

جدول ۴- نمره و رتبه هر گزینه .

روش‌های تصفیه	نمره هر گزینه	رتبه
فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته	۰/۳۵	۱
فناوری‌های غشایی (مانند نانوفیلتراسیون)	۰/۲۸	۲
جذب با استفاده از نانومواد	۰/۲۲	۳
روش‌های بیوتکنولوژی و تصفیه زیستی	۰/۱۵	۴

روش‌های اکسیداسیون پیشرفته با وزن ۰/۳۵ به‌عنوان بهترین گزینه برای حذف آلاینده‌ها شناخته شدند. دلایل برتری این روش، کارایی بسیار زیاد آن در حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها و نیز توانایی تجزیه آلاینده‌ها به محصولات نهایی بی‌خطر است؛ بااین‌حال، چالش‌های این روش شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه زیاد و مصرف انرژی قابل‌توجه است. فناوری‌های غشایی با وزن ۰/۲۸ در رتبه دوم قرار گرفتند. این روش‌ها به دلیل بازدهی زیاد در حذف ذرات و آلاینده‌ها و عدم نیاز به مواد شیمیایی، از اهمیت زیادی برخوردارند. با این حال، خطر گرفتگی غشاء و هزینه‌های عملیاتی زیاد از چالش‌های این فناوری محسوب می‌شود. روش جذب با نانومواد (مانند نانولوله‌های کربنی) با وزن ۰/۲۲ رتبه سوم را به خود اختصاص داد. این فناوری به‌دلیل سطح ویژه بالا و کارایی حذف مناسب، گزینه مناسبی است؛ اما هزینه تولید نانومواد و نیاز به بازیابی آن‌ها چالش‌برانگیز است. این روش با وزن ۰/۱۵ در رتبه آخر قرار گرفت. هرچند روش‌های زیستی از نظر سازگاری محیط‌زیستی و هزینه‌های پایین عملیاتی مزیت دارند، اما زمان‌بر بودن فرایند و محدودیت در حذف برخی آلاینده‌های پیچیده موجب کاهش اولویت این گزینه شده است.

به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت بر روی تغییر وزن معیارها انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات وزن معیارها تأثیر جزئی بر رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها دارد و فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته در تمام سناریوها در رتبه اول قرار گرفتند. این نتایج می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران بخش آب در انتخاب فناوری‌های مناسب برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی کمک شایانی کند.

نتایج حاصل از تحلیل AHP نشان داد که معیار کارایی حذف آلاینده‌ها با وزن نسبی ۰/۴۲ بیشترین اهمیت را در فرایند تصمیم‌گیری دارد. این نتیجه بیانگر آن است که کارایی فناوری در حذف کامل آلاینده‌ها، اولویت اصلی تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران در انتخاب فناوری است. از میان زیرمعیارهای مرتبط با این معیار، میزان حذف آلاینده‌ها با وزن ۰/۷۰ نسبت به سرعت حذف آلاینده‌ها اهمیت بیشتری داشت. این یافته نشان می‌دهد که حتی اگر فناوری‌ها نیازمند زمان بیشتری برای تصفیه باشند، اولویت با روش‌هایی است که توانایی حذف کامل آلاینده‌ها را دارند. این موضوع با پژوهش‌هایی مانند نجف نژاد و همکاران (۲۰۲۳)، بهارات و همکاران (۲۰۲۳) و وانگ و همکاران (۲۰۲۳) که فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته را به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های حذف آلاینده‌های مقاوم معرفی کرده‌اند، تطابق دارد(*Najafinejad et al., 2023, Bharath et al., 2023, Wang et al., 2023*) .

معیار دوم از نظر اهمیت، هزینه اقتصادی با وزن نسبی ۰/۲۵ است. زیرمعیارهای این دسته نشان دادند که تصمیم‌گیرندگان حساسیت زیادی به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (با وزن ۰/۶۵) نسبت به هزینه‌های عملیاتی (۰/۳۵) دارند. این اولویت ممکن است ناشی از محدودیت منابع مالی در مراحل ابتدایی پیاده‌سازی پروژه‌های زیربنایی باشد. این مسأله چالش‌هایی برای فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند غشاهای نانویی، که معمولاً به سرمایه‌گذاری‌های زیاد نیاز دارند، ایجاد می‌کند. به‌همین‌دلیل، سیاست‌گذاری‌ها باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که از طریق ارائه مشوق‌های مالی، استفاده از این فناوری‌ها را تسهیل کنند. همچنین،

رویکردهایی مانند کاهش هزینه تولید تجهیزات یا استفاده از مواد بومی برای ساخت فناوری‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های کلی منجر شود.

معیار سازگاری محیط‌زیستی نیز اهمیت قابل‌توجهی با وزن نسبی ۰/۱۸ داشته است. زیرمعیارهای این بخش نشان دادند که تولید محصولات جانبی مضر (با وزن ۰/۶۰) تأثیر بیشتری در تصمیم‌گیری دارد. این یافته حاکی از آن است که فناوری‌هایی که کمترین اثرات جانبی زیست‌محیطی را دارند، نظیر روش‌های زیستی و استفاده از نانومواد زیست‌تخریب‌پذیر، بیشتر مورد توجه هستند. این موضوع اهمیت استفاده از فناوری‌های دوستدار محیط‌زیست در حفظ اکوسیستم‌های آبی و کاهش اثرات منفی ناشی از تصفیه آلاینده‌ها را برجسته می‌کند. از سوی دیگر، مصرف انرژی که وزن نسبی کمتری نسبت به تولید محصولات جانبی داشته، به‌ویژه در فناوری‌هایی مانند پلاسمای سرد یا اکسیداسیون نوری، نیازمند توجه بیشتر برای کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش بهره‌وری است.

معیار چهارم، قابلیت اجرا و عملیاتی بودن، نشان داد که پیچیدگی فناوری (با وزن ۰/۵۵) نسبت به نیازمندی‌های نگهداری و تعمیرات (۰/۴۵) اهمیت بیشتری دارد. این امر به‌ویژه در مناطقی که زیرساخت‌های مناسب یا نیروی انسانی متخصص محدود است، برجسته‌تر می‌شود. برای مثال، فناوری‌هایی که نیازمند تجهیزات پیچیده و دانش فنی بالایی هستند، ممکن است در مناطق دورافتاده یا کشورهای در حال توسعه کمتر قابل اجرا باشند. بنابراین، توسعه فناوری‌های ساده‌تر و قابل استفاده در شرایط مختلف جغرافیایی می‌تواند به پذیرش گسترده‌تر آن‌ها کمک کند.

در این تحقیق، چهار فناوری حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی با توجه به نمرات و رتبه‌های به‌دست‌آمده ارزیابی شدند. این فناوری‌ها بر اساس معیارهایی مانند کارایی، هزینه، سازگاری با محیط‌زیست و قابلیت اجرایی رتبه‌بندی شدند. تحلیل جزئی‌تر این فناوری‌ها به شرح زیر است:

۱. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته با کسب نمره: ۰/۳۵ رتبه اول را کسب نموده است. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته از جمله فناوری‌های پیشرو در حذف آلاینده‌ها به شمار می‌روند. این فناوری با تولید رادیکال‌های آزاد قوی، قادر است ترکیبات آلی مقاوم و پیچیده را به مؤثرترین شکل ممکن تجزیه کند. از مهم‌ترین مزایای این فناوری می‌توان به توانایی حذف آلاینده‌های مقاوم به تجزیه، انعطاف‌پذیری در حذف انواع آلاینده‌ها و تولید محصولات جانبی کمتر اشاره کرد. از محدودیت های این روش می‌توان به هزینه عملیاتی بالا به دلیل مصرف انرژی زیاد، وابستگی به شرایط فرایند مانند PH و غلظت آلاینده‌ها و چالش‌های اقتصادی در مقیاس صنعتی اشاره کرد. عملکرد بسیار خوب در تجزیه و حذف آلاینده‌ها، علی‌رغم هزینه و چالش‌های اجرایی، این فناوری را به انتخاب اول در میان سایر گزینه‌ها تبدیل کرده است(*Najafinejad et al., 2023*) .

۲. فناوری‌های غشایی (مانند نانوفیلتراسیون) با کسب نمره ۰/۲۸ رتبه دوم را کسب نموده است. فناوری‌های غشایی مانند نانوفیلتراسیون در حذف ذرات معلّق، مواد محلول و ترکیبات خاص عملکرد بسیار خوبی دارند. این فناوری به دلیل سادگی در اجرا و عدم تولید محصولات جانبی شیمیایی قابل توجه است. برخی مزایای کلیدی آن عبارت‌اند از: کارایی خوب در حذف ذرات کوچک و آلاینده‌های خاص، تطبیق‌پذیری برای کاربردهای مختلف و نیز کاهش نیاز به مواد شیمیایی اضافی در فرایند تصفیه. برخی معایب کلیدی آن عبارت‌اند از: هزینه زیاد اولیه برای سرمایه‌گذاری و نصب تجهیزات، نیاز به نگهداری و تعویض منظم غشاها و مشکلات مرتبط با مدیریت پساب‌های حاوی آلاینده‌های غشایی. این فناوری به دلیل توازن میان کارایی و هزینه، در جایگاه دوم قرار گرفته است. با این حال، چالش‌های مرتبط با نگهداری تجهیزات و هزینه‌های اولیه مانع از کسب رتبه بالاتر شده است(*Fang et al., 2020*) .

۳. جذب با استفاده از نانومواد با کسب نمره ۰/۲۲ رتبه سوم را کسب نموده است. استفاده از نانومواد برای جذب آلاینده‌ها به دلیل سطح ویژه بالا و خواص شیمیایی و فیزیکی بهبودیافته، از روش‌های جذاب در تصفیه محسوب می‌شود. این روش به دلایل زیر مورد توجه قرار گرفته است: امکان جذب انتخابی برخی آلاینده‌های خاص، هزینه کمتر نسبت به فناوری‌های پیچیده‌تر مانند AOPs و نیز قابلیت توسعه نانومواد خاص برای آلاینده‌های ویژه. برخی معایب مهم آن عبارت است از: ظرفیت محدود جذب و نیاز به جایگزینی جاذب‌ها پس از اشباع، پیچیدگی در بازیافت و دفع نانومواد استفاده شده و نیز نگرانی‌های زیست‌محیطی

در خصوص نشت احتمالی نانومواد به محیط. هرچند این فناوری در برخی موارد کارایی خوبی دارد، اما محدودیت‌های ظرفیت جذب و مدیریت نانومواد مانع از قرار گرفتن آن در رتبه‌های بالاتر شده است(*Xu et al., 2018, Nasrollahzadeh et al., 2021*) .

۴. روش‌های بیوتکنولوژی و تصفیه زیستی با کسب نمره ۰/۱۵رتبه چهارم را کسب نموده است. این روش‌ها بر پایه استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای حذف آلاینده‌ها طراحی شده‌اند و به‌دلیل طبیعت زیست‌محور، کمترین آسیب را به محیط‌زیست وارد می‌کنند. برخی مزایا عبارت‌اند از: هزینه پایین اجرای فرایند، کاهش قابل‌توجه تولید آلاینده‌های ثانویه و نیز سازگاری زیاد با محیط‌زیست. برخی معایب آن عبارت است از: زمان‌بر بودن فرایندهای زیستی در مقایسه با روش‌های فیزیکی یا شیمیایی، ناکارآمدی در حذف ترکیبات غیرقابل تجزیه زیستی و نیز وابستگی به شرایط محیطی خاص مانند دما، PH، و اکسیژن. این روش به‌دلیل محدودیت‌های قابل توجه در حذف آلاینده‌های پیچیده و زمان‌بر بودن، کمترین نمره را دریافت کرده است. با این حال، ظرفیت توسعه در شرایط خاص را دارد(کسری کرمانشاهی و مبارک، ۱۴۰۳؛ عسگری لجایر و همکاران، ۱۳۹۷) .

انجام تحقیق حاضر با محدودیت‌هایی مواجه بود که عبارتند از:

۱. محدودیت جغرافیایی و اقلیمی:

این پژوهش تمرکز اصلی خود را بر بررسی نظری فناوری‌ها معطوف کرده است و اثرات شرایط جغرافیایی و اقلیمی مختلف بر عملکرد فناوری‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. برای مثال، شرایط آب و هوایی، دما و میزان دسترسی به منابع انرژی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر کارایی و انتخاب فناوری‌های تصفیه داشته باشد.

۲. عدم ارزیابی پایداری بلندمدت:

یکی از کاستی‌های این مطالعه عدم بررسی اثرات بلندمدت فناوری‌ها بود. مسائل مربوط به دوام تجهیزات، تغییرات عملکردی در طول زمان، و اثرات زیست‌محیطی در دوره‌های طولانی از جمله عواملی هستند که می‌توانند تأثیر زیادی بر انتخاب فناوری مناسب داشته باشند.

۳. محدودیت روش‌شناسی:

روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی مورد استفاده در این پژوهش، به‌دلیل وابستگی به نظرات کارشناسان، ممکن است تحت تأثیر سوگیری‌های ذهنی قرار گیرد. اگرچه این روش امکان ارزیابی دقیق را فراهم می‌آورد، اما ترکیب آن با روش‌های دیگر مانند TOPSIS یا استفاده از رویکردهای فازی می‌تواند نتایج قابل اطمینان‌تری ارائه دهد.

۴. عدم بررسی اثرات اجتماعی:

ابعاد اجتماعی و فرهنگی، از جمله پذیرش عمومی و تأثیرات بر جامعه محلی، به‌طور مستقل در این پژوهش مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. این عوامل می‌توانند بر موفقیت اجرای فناوری‌ها و پذیرش آن‌ها توسط جوامع تأثیرگذار باشند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با هدف ارزیابی و انتخاب روش‌های نوین برای حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی در منابع آب، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان روشی جامع برای انتخاب بهترین گزینه‌ها استفاده شد. آلاینده‌های دیرپای محیطی به‌دلیل اثرات منفی بالقوه‌ای که بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم‌ها دارند، توجه ویژه‌ای در تحقیقات محیط‌زیستی به خود جلب کرده‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که: ۱) فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای حذف این آلاینده‌ها معرفی شدند. این روش به‌دلیل کارایی بالای حذف آلاینده‌ها و توانایی در مواجهه با آلاینده‌های مقاوم در برابر سایر روش‌ها، در رتبه اول قرار گرفت.۲) فناوری‌های غشایی نیز به‌عنوان یک گزینه مناسب دیگر شناسایی شدند. این فناوری به‌ویژه برای تصفیه آب‌های آلوده به آلاینده‌های در مقیاس میکرو و نانو مناسب است و می‌تواند به‌طور مؤثری آلاینده‌های مختلف را جدا کند.۳) جذب با استفاده از نانومواد، اگرچه کارایی خوبی دارد، اما به‌دلیل هزینه‌های زیاد تولید نانومواد و چالش‌های عملیاتی، در مقایسه با دیگر گزینه‌ها از لحاظ اقتصادی در رده پایین‌تری قرار گرفت. ۴) روش‌های بیوتکنولوژی و تصفیه زیستی، با اینکه دارای مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی هستند، اما زمان‌بر بودن فرایند و نیاز به شرایط خاص برای عملکرد بهینه، آن‌ها را به گزینه‌ای با محدودیت‌های

کاربردی تبدیل کرده است. درنهایت، براساس ارزیابی‌ها و تحلیل‌های به‌عمل‌آمده، انتخاب روش‌های تصفیه باید به‌طور دقیق بر اساس ویژگی‌های آلاینده‌ها، هزینه‌های اقتصادی و شرایط محیطی خاص هر منطقه انجام گیرد.

پیشنهادها

بر اساس نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود ۱- تحقیقات بیشتری در زمینه بهبود کارایی روش‌های تصفیه مانند AOPs و فناوری‌های غشایی انجام گیرد. به‌ویژه باید به دنبال کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری این فناوری‌ها بود تا بتوانند به‌طور گسترده‌تری در حذف با آلاینده‌های دیرپای محیطی استفاده شوند. ۲- در انتخاب روش‌های تصفیه، علاوه بر کارایی حذف آلاینده‌ها، باید هزینه‌های اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها به‌طور دقیق‌تری ارزیابی شود. انجام مطالعات هزینه-فایده[1] می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهینه کمک کند. ۳- پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، مقایسه‌ای جامع میان تمامی روش‌های موجود برای حذف آلاینده‌ها و بر اساس متغیرهای مختلف نظیر نوع آلاینده، منابع آب و وضعیت اقتصادی انجام شود تا راه‌حل‌های مناسب‌تر شناسایی گردد. ۴- به‌منظور تسریع در توسعه روش‌های نوین، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های حمایتی برای سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های علمی و فناوری‌های نوآورانه در زمینه تصفیه آب و محیط زیست فراهم شود. این امر می‌تواند به بهبود روش‌های تصفیه و توسعه راه‌حل‌های مقرون به‌صرفه و کارآمدتر کمک کند. ۵-به‌منظور تسهیل پذیرش و استفاده از فناوری‌های نوین در سطح صنعتی و عمومی، برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های تخصصی برای آگاهی‌رسانی و توانمندسازی کارشناسان و دست‌اندرکاران صنعت آب و محیط‌زیست پیشنهاد می‌شود. در پایان، با توجه به اهمیت روزافزون حذف آلاینده‌های دیرپای محیطی و اثرات منفی آن‌ها بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم‌ها، توجه ویژه به استفاده از فناوری‌های نوین و انجام تحقیقات کاربردی در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از تمامی خبرگان، کارشناسان و مسئولان شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی و نیز استادان و خبرگان دانشگاهی که در راستای انجام این تحقیق نقش کلیدی داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

اصغری, ع؛ جعفری, س. م. ۱۴۰۳. بررسی تأثیر نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان بر پمپ‌های تصفیه‌خانه آب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان). *مجله آب و فاضلاب*, ۳۵, ۸۶-۱۰۲.

عسگری لجایر، ب.، مقیسه، ا.، فرشچیان اسماعیلی، م.، عابدپور، م. ع.، باقریان آزیری، ن. ۱۳۹۷. بررسی پتانسیل فن‌آوری‌های نوین زیستی در حذف آلاینده‌های نوظهور از فاضلاب. *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۵، ۱۱-۲۴.

قربانی، ع.، نورمرادی، ز. ۱۴۰۱. بررسی و اولویت بندی ریسک های چرخه حیات پروژه های آب و فاضلاب با استفاده از تکنیک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP(مطالعه موردی پروژه های آب و فاضلاب استان ایلام).*نشریه عمران و پروژه*, ۴, ۱۱-۲۴.

کسری کرمانشاهی، ر.، مبارک، ا. ۱۴۰۳. کاربرد باکتری‌های عامل خوردگی در پاکسازی آلاینده‌های محیط زیست (ترکیبات شیمیایی، آفت‌کش‌ها، شوینده‌ها، پلاستیک‌ها). *زیست شناسی میکروبی*، ۱۳، ۴۱-۵۶.

Asgari lajayer, b., Moghiseh, A., Farshchian esmaeelee, M., Abedpoor, M.A., Bagherian Aziri, N. 2019. Study of the Potential of New Biological Technologies to Remove Emerging Contaminants from Wastewater. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(2), 11-24 (In Persian).

Asghari, A., Jafari, S.M. 2024. Investigating the Influence of Reliability Centered Maintenance on Water Treatment Plant Pumps (Case Study: Guilan Water Treatment Plant). *Journal of Water and Wastewater*; Ab va Fazilab (in persian), 35(1): 86-102 (In Persian).

[1] Cost-Benefit Analysis

Bhagat, J., Singh, N. & Shimada, Y. 2024. Southeast Asia's environmental challenges: emergence of new contaminants and advancements in testing methods. *Frontiers in Toxicology*, 6, 1322386.

Bharath, G., Banat, F. & Haija, M. A. 2023. Photoelectrochemical advanced oxidation processes for simultaneous removal of antibiotics and heavy metal ions in wastewater using 2D-on-2D WS2@ CoFe2O4 heteronanostructures. *Environmental Pollution*, 339, 122753.

Cardoso, I. M., Cardoso, R. M. & Da Silva, J. C. E. 2021. Advanced oxidation processes coupled with nanomaterials for water treatment. *Nanomaterials*, 11, 2045.

Chen, C.-H. 2020. A novel multi-criteria decision-making model for building material supplier selection based on entropy-AHP weighted TOPSIS. *Entropy*, 22, 259.

Fang, C., Ou, T., Wang, X., Rui, M. & Chu, W. 2020. Effects of feed solution characteristics and membrane fouling on the removal of THMs by UF/NF/RO membranes. *Chemosphere*, 260, 127625.

Fujioka, T., Takeuchi, H., Tahara, H., Murakami, H., Boivin, S. 202 .؛Effects of functional groups of polyfluoroalkyl substances on their removal by nanofiltration. *Water Research X*, 24, 100233.

Ghorbani, A. and Z. NoorMoradi. 2022. Investigating and Prioritizing Life Cycle Risks of Water and Sewage Projects Using AHP Hierarchical Analysis Process Technique (Case Study of Water and Sewage Projects in Ilam Province). *Civil and Project*, 4(6), 11-24. (In Persian).

Kasra Kermanshahi, R. and E. Mobarak. 2024. Applications of corrosion-causing bacteria in cleaning environmental pollutants (chemical compounds, pesticides, detergents, plastics). *Journal of Microbial Biology*, 13(50), 41-56. (In Persian).

Kumar, M., Chen, H., Sarsaiya, S., Qin, S., Liu, H., Awasthi, M. K., Kumar, S., Singh, L., Zhang, Z., Bolan, N. S. 2021. Current research trends on micro-and nano-plastics as an emerging threat to global environment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124967.

Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Nguyen, T. V., Cuprys, A. K., Ratnaweera, H. 2023. Bisphenols in water: Occurrence, effects, and mitigation strategies. *Chemosphere*, 328, 138560.

Madzík, P., Falát, L. 2022. State-of-the-art on analytic hierarchy process in the last 40 years: Literature review based on Latent Dirichlet Allocation topic modelling. *Plos One*, 17, e0268777.

Najafinejad, M. S., Chianese, S., Fenti, A., Iovino, P., Musmarra, D. 2023. Application of electrochemical oxidation for water and wastewater treatment: an overview. *Molecules*, 28, 4208.

Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Iravani, S., Varma, R. S. 2021. Carbon-based sustainable nanomaterials for water treatment: state-of-art and future perspectives. *Chemosphere*, 263, 128005.

Pai, C.-W., Leong, D., Chen, C.-Y.,Wang, G.-S. 2020. Occurrences of pharmaceuticals and personal care products in the drinking water of Taiwan and their removal in conventional water treatment processes. *Chemosphere*, 256, 127002.

Shekar, P. R. & Mathew, A. 2023. Integrated assessment of groundwater potential zones and artificial recharge sites using GIS and Fuzzy-AHP: a case study in Peddavagu watershed, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195**,** 906.

Wang, Z., Cheng, Y., Wang, C., Guo, R., You, J., Zhang, H. 2023. Optimizing the performance of Fe-based metal-organic frameworks in photo-Fenton processes: mechanisms, strategies and prospects. *Chemosphere*, 339**,** 139673.

Xu, J., Cao, Z., Zhang, Y., Yuan, Z., Lou, Z., Xu, X., Wang, X. 2018. A review of functionalized carbon nanotubes and graphene for heavy metal adsorption from water: Preparation, application, and mechanism. *Chemosphere*, 195**,** 351-364.

Yadav, D., Rangabhashiyam, S., Verma, P., Singh, P., Devi, P., Kumar, P., Hussain, C. M., Gaurav, G. K. Kumar, K. S. 2021. Environmental and health impacts of contaminants of emerging concerns: Recent treatment challenges and approaches. *Chemosphere*, 272**,** 129492.

Zhang, H., Shen, N., Li, Y., Hu, C., Yuan, P. 2023. Source, transport, and toxicity of emerging contaminants in aquatic environments: A review on recent studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30**,** 121420-121437.