



Advanced Nanoadsorbents and Nanomaterials for Water Pollutant Removal: A Review of Mechanisms, Applications, and Future Perspectives

Leila Sadat Alavi¹, Mahshid Golestaneh^{2,*}, Ali Gholami¹

¹ Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Kashan, Kashan, Iran

² Department of Chemistry Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

Received: 2026-04-10

Revised: 2026-05-05

Accepted: 2026-06-10

Abstract: Water contaminants, including pharmaceuticals, endocrine-disrupting compounds, pesticides, per- and polyfluoroalkyl substances, dyes, heavy metals, microplastics, and pathogenic microorganisms, are increasingly detected in aquatic environments and pose significant challenges to conventional water treatment technologies due to their persistence, toxicity, and complex behavior. Many existing treatment processes exhibit limited efficiency in completely removing these contaminants, creating an urgent need for more advanced and sustainable remediation strategies. This narrative review examines recent advances in smart nanoadsorbents and advanced nanomaterials for water purification and contaminant removal. Various classes of nanomaterials, including metal and metal oxide nanoparticles, carbon-based nanomaterials, metal-organic frameworks, covalent organic frameworks, nanocellulose-based materials, polymeric nanomaterials, nanostructured biochars, and nanostructured membranes, are discussed in terms of their structure, properties, and water treatment applications. Particular emphasis is placed on stimulus-responsive nanoadsorbents capable of responding to environmental triggers such as pH, temperature, light, and magnetic fields. Major removal mechanisms, including adsorption, photocatalytic degradation, membrane-based separation, electrochemical processes, antimicrobial inactivation, and redox reactions, are critically evaluated. The reviewed studies demonstrate that multifunctional and hybrid nanomaterial systems generally outperform single-component nanomaterials by providing enhanced removal efficiency, improved selectivity, greater stability, and superior reusability. Recent pilot-scale investigations and real-world applications further highlight the potential of these materials for practical water and wastewater treatment. Nevertheless, challenges related to production costs, scalability, regeneration, environmental safety, potential ecotoxicity, and regulatory acceptance continue to limit their widespread implementation. Overall, smart nanoadsorbents and advanced nanomaterials represent promising platforms for next-generation water treatment technologies; however, overcoming technical, economic, and regulatory barriers remains essential for their successful large-scale deployment.

Keywords: Smart nanoadsorbents; Advanced nanomaterials; Water treatment; Emerging contaminants; Photocatalysis

Corresponding Author. Email: m.golestaneh@cfu.ac.ir

How to Cite This Article:

Alavi L S, Golestaneh M, Gholami A. Advanced Nanoadsorbents and Nanomaterials for Water Pollutant Removal: A Review of Mechanisms, Applications, and Future Perspectives. Nanomeghyas. 2026;13(1):e737679 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2093110.1440



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

نانوجاذب‌ها و نانومواد پیشرفته برای حذف آلاینده‌های آب: مروری بر مکانیسم‌ها، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده

لیلا سادات علوی^۱ | مهشید گلستانه^{۲*} | علی غلامی

^۱ گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ گروه آموزش شیمی، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵ تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

چکیده: آلودگی منابع آبی ناشی از حضور آلاینده‌های آلی، غیرآلی و زیستی، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی جهان تبدیل شده است. آلاینده‌هایی نظیر داروها، مختل‌کننده‌های غدد درون‌ریز، آفت‌کش‌ها، ترکیبات پرفلوروآلکیل و پلی‌فلوروآلکیل، رنگ‌ها، فلزات سنگین، میکروپلاستیک‌ها و عوامل بیماری‌زا، به دلیل پایداری، سمیت و مقاومت در برابر فرآیندهای متداول تصفیه، تهدیدی جدی برای کیفیت آب محسوب می‌شوند. در این مطالعه، پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوجاذب‌ها و نانومواد پیشرفته برای حذف آلاینده‌های آب به صورت یک مرور روایتی مورد بررسی قرار گرفته است. انواع مختلف نانومواد شامل نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی، نانومواد کربنی، چارچوب‌های آلی-فلزی، چارچوب‌های آلی کووالانسی، نانوسلولز، نانومواد پلیمری، بیوچارهای نانوساختار و غشاهای نانوساختار از نظر ساختار، ویژگی‌ها و کاربردهای تصفیه آب تحلیل شده‌اند. همچنین، نانوجاذب‌های هوشمند پاسخ‌گو به محرک‌های محیطی نظیر pH، دما، نور و میدان مغناطیسی و نقش آن‌ها در بهبود کارایی حذف آلاینده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. مکانیسم‌های اصلی حذف شامل جذب سطحی، تخریب فوتوکاتالیستی، فرآیندهای اکسایش-کاهش، جداسازی غشایی، فرآیندهای الکتروشیمیایی و غیرفعال‌سازی زیستی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های هیبریدی و چندعملکردی در مقایسه با نانومواد منفرد، کارایی، گزینش‌پذیری، پایداری و قابلیت استفاده مجدد بالاتری دارند. همچنین، مطالعات پایلوت و کاربردهای واقعی بیانگر پتانسیل بالای این فناوری‌ها برای استفاده در سامانه‌های تصفیه آب و فاضلاب هستند. با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های تولید، مقیاس‌پذیری، سمیت بالقوه، ارزیابی چرخه عمر و الزامات مقرراتی، همچنان موانعی مهم در مسیر تجاری‌سازی و استقرار گسترده این فناوری‌ها به شمار می‌روند. در مجموع، نانوجاذب‌ها و نانومواد پیشرفته ظرفیت قابل توجهی برای توسعه نسل آینده فناوری‌های تصفیه آب دارند، اما تحقق این ظرفیت مستلزم ایجاد تعادل میان کارایی، پایداری، ایمنی و قابلیت کاربرد در شرایط واقعی است.

واژگان کلیدی: نانوجاذب‌ها، نانومواد پیشرفته، تصفیه آب، آلاینده‌های آب، آلاینده‌های نوظهور، فوتوکاتالیز

نویسنده مسئول: m.golestaneh@cfu.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله: علوی لیلا سادات، گلستانه مهشید، غلامی علی. نانوجاذب‌ها و نانومواد پیشرفته برای حذف آلاینده‌های آب: مروری بر

مکانیسم‌ها، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده. Nanomeghyas. 1405;13(1):e737679. doi: 10.22034/ns.2026.2093110.1440

این مقاله تحت مجوز دسترسی آزاد CC-BY منتشر شده است (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



۱- مقدمه

با توجه به بحران جهانی آب، هدف این مطالعه، ارائه یک مرور جامع از پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوجاذب‌های هوشمند و نانومواد پیشرفته، با تأکید بر مکانیسم‌های حذف، کاربردهای عملی و چالش‌های پیش‌رو است. در این راستا، تلاش شده است تا ارتباط میان ساختار، عملکرد و کاربرد این مواد به صورت منسجم تحلیل شود و مسیرهای آینده پژوهش در این حوزه تبیین گردد.

۲- روش

این مطالعه به روش مرور روایتی انجام شده است. جستجوی منابع در پایگاه‌های ScienceDirect، Scopus، Web of Science و Google Scholar انجام گرفت. کلیدواژه‌های Smart Nanomaterials، Nanoadsorbents، Emerging Wastewater Treatment، Contaminants، MOFs، COFs و Responsive Adsorbents به صورت منفرد و ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند. تمرکز اصلی بر مقالات منتشر شده در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۶ بود، اگرچه برخی مطالعات کلاسیک و بنیادی نیز برای تبیین مفاهیم پایه مورد استفاده قرار گرفتند. مقالات بر اساس ارتباط مستقیم با حذف آلاینده‌های نوظهور، کیفیت علمی، میزان استناد، گزارش داده‌های عملکردی و پوشش مکانیسم‌های حذف انتخاب شدند. در نهایت، منابع منتخب با رویکرد تحلیلی-مقایسه‌ای و مبتنی بر ارتباط میان ساختار، عملکرد، کاربرد و قابلیت انتقال فناوری سازمان‌دهی شدند.

۳- یافته‌ها

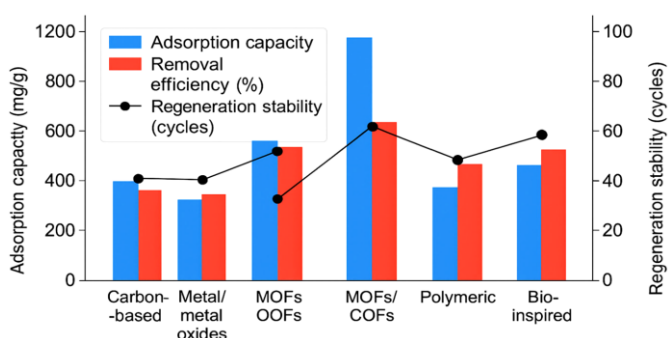
۳-۱- نانو مواد در تصفیه آب

فناوری نانو در سال‌های اخیر به عنوان یکی از مؤثرترین رویکردها برای بهبود فرآیندهای تصفیه آب مطرح شده است. نانومواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر سطح ویژه بالا، ساختارهای متخلخل قابل تنظیم، قابلیت عملکردی‌سازی شیمیایی و امکان ایجاد چندین مکانیسم حذف به طور همزمان، توانسته‌اند کارایی فرآیندهای تصفیه را به طور چشمگیری افزایش دهند [10]. این مواد قادرند طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های نوظهور شامل ترکیبات آلی مقاوم، فلزات سنگین، میکروپلاستیک‌ها و عوامل بیماری‌زا را با راندمان بالا حذف کنند. برخلاف فناوری‌های متعارف که عمدتاً بر یک مکانیسم مشخص متکی هستند، نانومواد می‌توانند به صورت همزمان از چندین مسیر شامل جذب سطحی، تخریب فوتوکاتالیستی، جداسازی غشایی و غیرفعال‌سازی زیستی برای حذف آلاینده‌ها بهره‌برند.

آلودگی آب همچنان یکی از چالش‌های زیست‌محیطی جدی و روبه‌گسترش در سطح جهانی محسوب می‌شود. آب پاک نه تنها برای مصارف آشامیدنی و بهداشتی ضروری است، بلکه نقش بنیادینی در پایداری اقتصادی، امنیت غذایی و سلامت اکوسیستم‌ها دارد. با این حال، رشد جمعیت، صنعتی‌شدن سریع و تشدید اثرات تغییرات اقلیمی، فشار فزاینده‌ای بر منابع آب شیرین وارد کرده و کمبود آب را به یک بحران جهانی فوری تبدیل کرده است [1,2]. در دهه‌های اخیر، ظهور و افزایش غلظت آلاینده‌های نوظهور شامل داروها، محصولات مراقبت شخصی، مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز، آفت‌کش‌ها، ترکیبات پرفلوروآلکیل و پلی‌فلوروآلکیل (PFAS) و میکروپلاستیک‌ها، به دلیل پایداری بالا، قابلیت انباشت زیستی و سمیت حتی در غلظت‌های بسیار پایین، نگرانی‌های قابل‌توجهی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها ایجاد کرده است [3,4]. آلاینده‌های نوظهور با کاهش کیفیت منابع موجود، این بحران را تشدید می‌کنند و بخشی از منابع آب را از چرخه مصرف ایمن خارج می‌سازند. بنابراین، توسعه فناوری‌های پیشرفته تصفیه و ضدعفونی، به ویژه آن‌هایی که امکان بازچرخانی و استفاده مجدد ایمن از فاضلاب را فراهم می‌کنند، نقش مهمی در کاهش فشار بر منابع طبیعی آب شیرین ایفا می‌کند [5].

در پاسخ به این چالش، نانو مواد هوشمند (Smart Nanomaterials) شامل نانوجاذب‌ها، فوتوکاتالیست‌ها، غشاهای نانوساختار و سامانه‌های هیبریدی به عنوان راهکارهایی تحول‌آفرین مطرح شده‌اند. این مواد با برخورداری از سطح ویژه بالا، تخلخل قابل تنظیم و امکان مهندسی شیمی سطح، قابلیت جذب انتخابی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های پیچیده را فراهم می‌کنند [6]. شواهد تجربی نشان می‌دهد که به عنوان مثال، نانوجاذب‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی که با گروه‌های عاملی COOH - اصلاح شده‌اند، تمایل بالایی به جذب تتراسایکلین در فاضلاب‌های بیمارستانی نشان می‌دهند. همچنین، نانوکامپوزیت‌های کیتوزان- FeO نه تنها در حذف مؤثر آرسنیک و باقی‌مانده‌های دارویی عملکرد بالایی دارند، بلکه امکان بازیابی مغناطیسی آسان را نیز فراهم می‌سازند [7]. فراتر از مطالعات آزمایشگاهی، نانومواد مبتنی بر اکسید گرافن (GO) نیز در مطالعات پایلوت در کشورهای چین و آلمان، بازدهی حذف بیش از ۹۵ درصد برای داروهایی نظیر ایوپروفن و دیکلوفناک را نشان داده‌اند که بیانگر ظرفیت بالای انتقال این فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به کاربردهای میدانی است [8]. افزون بر این، توسعه نانوجاذب‌های هوشمند با قابلیت پاسخ‌دهی به محرک‌هایی مانند pH، شرایط اکسایش-کاهش، میدان مغناطیسی یا نور، امکان جذب انتخابی و رهایش کنترل‌شده آلاینده‌ها را فراهم کرده و دامنه کاربرد این مواد را به طور قابل توجهی گسترش داده است [9].

چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs)، نانوسلولز و غشاهای نانوساختار هستند. عملکرد مقایسه‌ای انواع نانومواد جاذب (کربنی، فلزی/اکسیدی، MOF/ها/COFها، پلیمری و بیوجار) بر حسب ظرفیت جذب، بازده حذف و پایداری بازتولید در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مقایسه دسته‌های اصلی نانوجاذب بر اساس مبادلات عملکرد-فرآیند در جدول ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱ عملکرد مقایسه‌ای طبقات مختلف نانومواد جاذب بر حسب ظرفیت جذب، بازده حذف و پایداری بازتولید [11]

در سال‌های اخیر، توسعه نانومواد هیبریدی و چندعملکردی امکان ترکیب ویژگی‌های ساختاری و عملکردی مختلف را در یک سامانه فراهم کرده است. این رویکرد نه تنها موجب افزایش کارایی حذف، بلکه باعث بهبود گزینش‌پذیری، پایداری و قابلیت استفاده مجدد نیز شده است. همچنین، پیشرفت در روش‌های سنتز و مهندسی سطح، امکان طراحی نانومواد با خواص هدفمند را فراهم کرده است که می‌توانند به‌طور خاص برای حذف آلاینده‌های معین تنظیم شوند. این موضوع نقش مهمی در توسعه سامانه‌های تصفیه پیشرفته و سازگار با شرایط واقعی ایفا می‌کند.

۳-۲- نانومواد مورد استفاده در تصفیه آب

طیف گسترده‌ای از نانومواد به‌عنوان جاذب‌های کارآمد برای حذف آلاینده‌های نوظهور در محیط‌های آبی توسعه یافته‌اند این مواد را می‌توان بر اساس ساختار، ترکیب شیمیایی و مکانیسم عملکرد به چند دسته اصلی تقسیم‌بندی کرد. این دسته‌بندی به درک بهتر رفتار مواد و انتخاب مناسب آن‌ها برای کاربردهای مختلف کمک می‌کند. مهم‌ترین نانومواد شامل نانوذرات فلزی، نانومواد کربنی، چارچوب‌های آلی-فلزی (MOFs)،

جدول ۱ مقایسه دسته‌های اصلی نانوجاذب‌ها بر اساس مبادلات عملکرد-فرآیند [11]

نوع نانوجاذب	مکانیسم‌های غالب جذب	نقاط قوت کلیدی	محدودیت‌های بحرانی	مقیاس پذیری
مواد کربنی (GO، CNTs، نانوکربن فعال)	برهم‌کنش $\pi-\pi$ ، برهم‌کنش‌های آب‌گریز، جاذبه الکترواستاتیکی	پایداری شیمیایی بالا، تمایل گسترده به آلاینده‌ها	گرفتگی در اثر تشکیل رسوب، تجمع، چالش‌های جداسازی	بالا (در صورت تثبیت/گرانول‌سازی)
MOFs/COFs	دربرگیری میزبان-مهمان، پیوندهای هماهنگی	گزینش‌پذیری بالا، قابلیت تنظیم شیمی حفرات	ناپایداری هیدرولیتیکی، هزینه سنتز بالا	متوسط (نیاز به کامپوزیت‌سازی)
نانوجاذب‌های مغناطیسی	اتصال گروه‌های عاملی + بازیابی مغناطیسی	جداسازی سریع، آلودگی ثانویه کم	اکسیداسیون هسته، تخریب پوشش	بالا (مناسب برای سامانه‌های مدولار)
مواد پلیمری/زیستی	شناسایی گروه عاملی، قالب‌گیری مولکولی	پایداری مکانیکی، مقاومت در برابر گرفتگی در اثر تشکیل رسوب	ظرفیت کمتر برای آلاینده‌های آب‌گریز	بالا (سازگار با سیستم‌های پیوسته)

آلاینده‌ها را ارائه دهند که نشان‌دهنده هم‌افزایی میان خواص مواد فلزی و کربنی است [13].

نانومواد کربنی

نانومواد کربنی شامل گرافن، اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی و فولرن‌ها هستند که به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت اصلاح شیمی سطح، عملکرد بسیار مطلوبی در جذب آلاینده‌ها دارند [10]. این مواد قادرند از طریق برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ ، پیوندهای هیدروژنی و جاذبه‌های الکترواستاتیکی، طیف وسیعی از آلاینده‌های آلی را جذب کنند. در میان انواع نانومواد، نانومواد

نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی

نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی از پرکاربردترین نانومواد در تصفیه آب محسوب می‌شوند. این مواد به دلیل داشتن خواص فوتوکاتالیستی، ظرفیت جذب بالا و فعالیت ضد میکروبی، نقش مهمی در حذف آلاینده‌ها ایفا می‌کنند [12]. نانوذرات TiO_2 و ZnO به‌عنوان فوتوکاتالیست‌های مؤثر در تخریب آلاینده‌های آلی شناخته می‌شوند، در حالی که نانوذرات نقره به دلیل خاصیت ضد میکروبی قوی، در ضد عفونی آب کاربرد گسترده‌ای دارند. در این راستا، نانوذرات اکسید فلزی مانند TiO_2 در ترکیب با گرافن توانسته‌اند عملکرد دوگانه‌ای شامل جذب سطحی و تخریب فوتوکاتالیستی

پیوندهای کووالانسی قوی تشکیل شده‌اند. این تفاوت ساختاری موجب می‌شود که COFها معمولاً پایداری شیمیایی و حرارتی بالاتری، به‌ویژه در محیط‌های اسیدی و بازی، داشته باشند؛ در مقابل، وجود مراکز فلزی فعال در MOFها امکان برهم‌کنش اختصاصی‌تر با آلاینده‌ها و کاربرد گسترده‌تر آن‌ها در فرآیندهای جذب و فوتوکاتالیز را فراهم می‌کند. هر دو گروه قابلیت بازیافت و استفاده مجدد دارند، اما میزان حفظ ساختار و کارایی آن‌ها به نوع چارچوب و شرایط باززایی بستگی دارد [15,17].

نانومواد پلیمری

نانومواد پلیمری، به‌ویژه پلیمرهای قالب‌گیری‌شده مولکولی (MIPs)، به دلیل گزینش‌پذیری بالا نسبت به آلاینده‌های هدف، جایگاه ویژه‌ای در سامانه‌های جذب پیشرفته یافته‌اند [21].

نانوسلولز

نانوسلولز به‌عنوان یک ماده زیست‌تخریب‌پذیر و پایدار، توجه زیادی را در کاربردهای تصفیه آب به خود جلب کرده است. اصلاح سطح نانوسلولز با گروه‌های آمینی امکان جذب یون‌هایی مانند کروم را فراهم می‌کند، در حالی که ترکیب آن با TiO_2 یا CNTها منجر به بهبود عملکرد در تخریب آلاینده‌ها و افزایش پایداری مکانیکی می‌شود [22].

بیوجارهای نانوساختار

نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر بیوجار، به دلیل هزینه پایین، در دسترس بودن منابع اولیه و پایداری زیست‌محیطی، گزینه‌های جذابی برای تصفیه آب محسوب می‌شوند. بیوجار از طریق پیرولیز مواد آلی تولید می‌شود و با عملکردی‌سازی آن با نانوذرات فلزی، کارایی جذب و تخریب آلاینده‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این مواد می‌توانند از طریق مکانیسم‌های اکسایش-کاهش یا فوتوکاتالیز، در حذف آلاینده‌های آلی و معدنی نقش مؤثری ایفا کنند [23].

نانوکامپوزیت‌ها و جاذب‌های هیبریدی

نانوکامپوزیت‌ها و جاذب‌های هیبریدی یکی از رویکردهای غالب در طراحی مواد نوین هستند، زیرا با تلفیق ویژگی‌های چند کلاس مختلف از نانومواد، محدودیت‌های مواد منفرد را کاهش داده و کارایی کلی را افزایش می‌دهند [21]. اگرچه تمامی نانومواد معرفی‌شده در بالا الزاماً در گروه نانوجاذب‌های هوشمند قرار نمی‌گیرند، اما بسیاری از سامانه‌های هوشمند نسل جدید بر پایه همین مواد توسعه یافته‌اند. از این رو، شناخت ویژگی‌های ساختاری و عملکردی این بسترها، پیش‌نیاز درک طراحی و عملکرد نانوجاذب‌های پاسخ‌گو به محرک‌های محیطی محسوب می‌شود که در زیر شرح داده می‌شوند.

کربنی از جمله نانولوله‌های کربنی، اکسید گرافن و ساختارهای بیوجار نانوساختار، به دلیل سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی مناسب و قابلیت عملکردی گسترده، بیشترین کاربرد را به خود اختصاص داده‌اند [14]. نانومواد مبتنی بر گرافن، شامل اکسید گرافن و گرافن احیاشده، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی برجسته، از جمله گزینه‌های بسیار امیدوارکننده در تصفیه آب محسوب می‌شوند. وجود گروه‌های اکسیژنی در ساختار GO موجب افزایش پراکندگی آن در محیط‌های آبی می‌شود، در حالی که rGO به دلیل رسانایی بالا و حفظ بخشی از گروه‌های عاملی، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های زیست‌حسگری و انتقال دارو یافته است [15, 16]. توانایی GO در جذب فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی عمدتاً به حضور گروه‌های عاملی سطحی نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر GO و فلزات، بهبود قابل توجهی در خواص ضد میکروبی و فوتوکاتالستی نشان داده‌اند [17].

چارچوب‌های آلی-فلزی

چارچوب‌های آلی-فلزی (MOFs) دسته‌ای از مواد بلوری متخلخل هستند که عملکرد جذب آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر شیمی هماهنگی و طراحی لیگاندها قرار دارد. گروه‌های عاملی موجود در لیگاندهای آلی نقش تعیین‌کننده‌ای در گزینش‌پذیری جذب ایفا می‌کنند. بر اساس نظریه اسید-باز سخت و نرم (HSAB)، طراحی هدفمند MOFها برای حذف انتخابی آلاینده‌ها امکان‌پذیر است [18]. همچنین، وجود حفرات یکنواخت، سطح ویژه بسیار بالا و امکان اصلاح شیمیایی لیگاندها، MOFها را به یکی از مهمترین بسترها برای حذف آلاینده‌های نوظهور تبدیل کرده است. با این حال، پایداری برخی چارچوب‌ها در محیط‌های آبی و هزینه تولید در مقیاس صنعتی همچنان از چالش‌های مهم آن‌ها محسوب می‌شود [18, 19].

چارچوب‌های آلی کووالانسی

چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs) به‌عنوان دسته‌ای از مواد متخلخل بلوری، در سال‌های اخیر برای کاربردهای تصفیه آب به‌ویژه حذف ریزآلاینده‌هایی مانند داروها، ترکیبات مختل‌کننده غدد درون‌ریز و مواد PFAS مطرح شده‌اند. ساختار منظم حفرات، سطح ویژه بالا و قابلیت تنظیم شیمی سطح، امکان جذب گزینشی از طریق برهم‌کنش‌هایی مانند $\pi-\pi$ ، پیوند هیدروژنی و اثرات محدودیت فضایی را فراهم می‌کند. این دسته از مواد در کنار MOFها به دلیل ساختار متخلخل منظم و قابلیت تنظیم‌پذیری بالا، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [20]. در مقایسه با MOFهای نسل اولیه، COFها می‌توانند پایداری شیمیایی بالاتر و ظرفیت جذب رقابتی‌تری ارائه دهند.

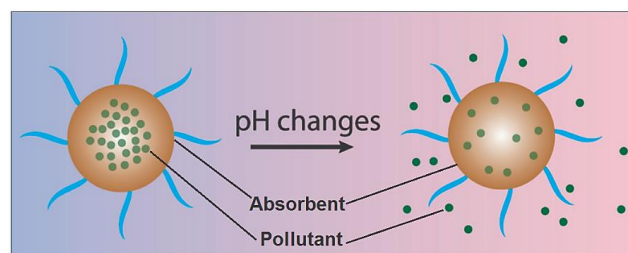
در مقایسه با چارچوب‌های آلی-فلزی، چارچوب‌های آلی کووالانسی از نظر ساختار و ویژگی‌های عملکردی تفاوت‌های اساسی دارند. MOFها از اتصال خوشه‌های فلزی به لیگاندهای آلی از طریق پیوندهای هماهنگی تشکیل می‌شوند، در حالی که COFها از واحدهای آلی متصل‌شده با

۳-۳- نانوجاذب‌های هوشمند

نانوجاذب‌های هوشمند به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین دسته‌های نانومواد، توانایی تنظیم رفتار جذب خود در پاسخ به محرک‌های محیطی را دارند. این محرک‌ها می‌توانند شامل pH، دما، نور، میدان مغناطیسی و یا ترکیبی از این عوامل باشند [24]. ویژگی اصلی این مواد، قابلیت کنترل‌پذیری و برگشت‌پذیری فرایند جذب است که امکان استفاده مجدد و افزایش کارایی عملیاتی را فراهم می‌کند. این رفتار هوشمند ناشی از حضور گروه‌های عاملی پاسخ‌دهنده مانند COOH ، NH_2 و گروه‌های سولفونات در سطح نانومواد است که در شرایط مختلف محیطی تغییر حالت داده و موجب تغییر در برهم‌کنش با آلاینده‌ها می‌شوند. شکل ۲ نمایی شماتیک از طراحی و مکانیسم‌های عملکرد نانوجاذب‌های هوشمند را نشان می‌دهد.

نانوجاذب‌های حساس به pH

یکی از مهم‌ترین محرک‌ها در سامانه‌های آبی، تغییرات pH است که به‌طور مستقیم بر حالت یونیزاسیون گروه‌های سطحی اثر می‌گذارد. در نانوجاذب‌های حساس به pH، تغییر در وضعیت پروتوناسیون یا دیپروتوناسیون موجب تغییر بار سطحی و در نتیجه تغییر در تمایل جذب نسبت به آلاینده‌های یونی می‌شود. به‌عنوان نمونه، نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با پلی‌اکریلیک اسید در محیط‌های اسیدی به دلیل افزایش جاذبه الکترواستاتیکی، ظرفیت بالایی در جذب آنتی‌بیوتیک‌های کاتیونی مانند تتراسایکلین و سیپروفلوکساسین نشان می‌دهند، در حالی که در شرایط قلیایی، فرایند و جذب تسهیل شده و امکان باز تولید مؤثر فراهم می‌شود. همچنین، اکسید گرافن آمین‌دار شده (GO-NH_2) رفتار گزینشی نسبت به آلاینده‌های آنیونی و برخی رنگ‌ها در شرایط خنثی از خود نشان داده و در محیط اسیدی امکان آزادسازی کنترل‌شده آلاینده و بازیابی کارآمد را فراهم می‌سازد. کارایی این سیستم‌ها به‌شدت تحت تأثیر عواملی مانند تراکم گروه‌های عاملی، تخلخل در دسترس و اثرات ماتریس شامل قدرت یونی و مواد آلی طبیعی قرار دارد. این نوع سامانه‌ها در مطالعات فاضلاب بیمارستانی نیز عملکرد قابل توجهی نشان داده و حذف بیش از ۹۰ درصد تتراسایکلین را حتی در شرایط متغیر ماتریس حفظ کرده‌اند [25]. اصول عملکرد نانوجاذب‌های حساس به pH در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- اصول عملکرد نانوجاذب‌های حساس به pH (با الهام از [26])

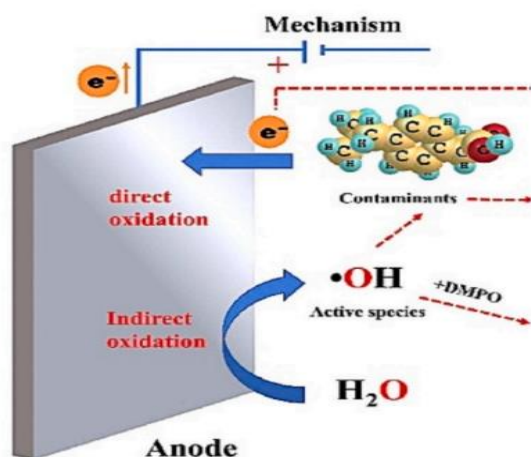
نانوجاذب‌های پاسخ‌دهنده به میدان مغناطیسی

نانوجاذب‌های مغناطیسی بر پایه نانوذرات Fe_3O_4 طراحی می‌شوند و یکی از مهم‌ترین مزیت‌های آن‌ها امکان جداسازی سریع و بدون نیاز به فیلتراسیون یا سانتریفیوژ از محیط آبی با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی است. این ویژگی، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای عملی و صنعتی تبدیل کرده است. در بسیاری از سامانه‌ها، نانوذرات مغناطیسی با پوشش‌های عملکردی مانند کیتوزان، β -سیکلودکسترین یا پلی‌دوپامین اصلاح می‌شوند تا ظرفیت جذب و گزینش‌پذیری افزایش یابد. برای مثال، نانوکامپوزیت‌های Fe_3O_4 -کیتوزان توانسته‌اند راندمان بالای حذف آرسنیک (V) و برخی داروهای پایدار را در پساب‌های صنعتی ایجاد کنند و در عین حال قابلیت استفاده مجدد در چندین چرخه را حفظ نمایند [27].

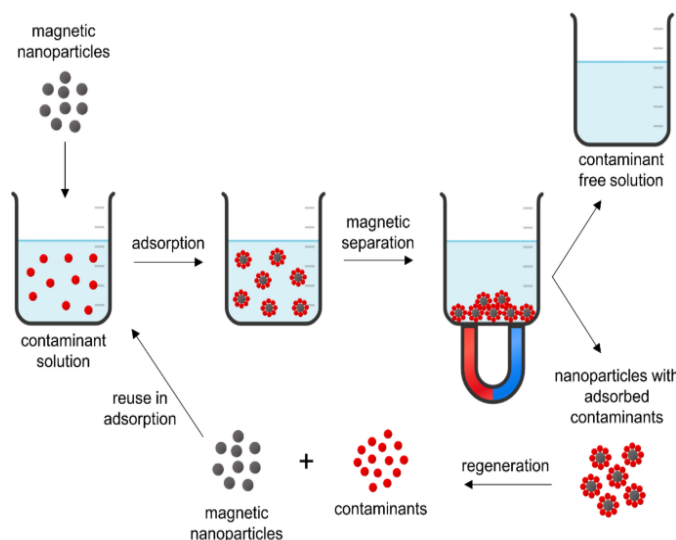
گزارش‌های پایلوت نشان داده‌اند که این سامانه‌ها در شرایط جریان پیوسته عملکرد پایدار خود را حفظ می‌کنند، اگرچه پایداری پوشش سطحی و جلوگیری از کاهش عملکرد در چرخه‌های طولانی همچنان یک چالش محسوب می‌شود. اصول عملکرد نانوجاذب‌های مغناطیسی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

نانوجاذب‌های فوتوکاتالیستی

نانوجاذب‌های فوتوکاتالیستی دسته‌ای از مواد هستند که فرایند جذب سطحی را با تخریب درجا آلاینده‌ها ترکیب می‌کنند (شکل ۴). در این سیستم‌ها، نانومواد نیمه‌رسانا مانند TiO_2 و ZnO تحت تابش نور فعال شده و گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌کنند که قادر به اکسیداسیون و تجزیه ترکیبات آلی هستند. افزایش کارایی این سیستم‌ها معمولاً از طریق ترکیب آن‌ها با نانوساختارهای کربنی مانند گرافن یا نانولوله‌های کربنی حاصل می‌شود، زیرا این ترکیب موجب بهبود انتقال الکترون و کاهش بازترکیب بارهای الکتریکی می‌شود. برای مثال، کامپوزیت‌های TiO_2 -گرافن توانسته‌اند در تصفیه فاضلاب شهری حاوی داروهایی مانند دیکلوفناک و ایبوپروفن بازده حذف بالای ۹۵ درصد را تحت تابش خورشیدی به دست آورند [29]. همچنین، نانوهیبریدهای ZnO-CNT در حذف تتراسایکلین تحت نور مرئی عملکرد قابل توجهی نشان داده‌اند [30].



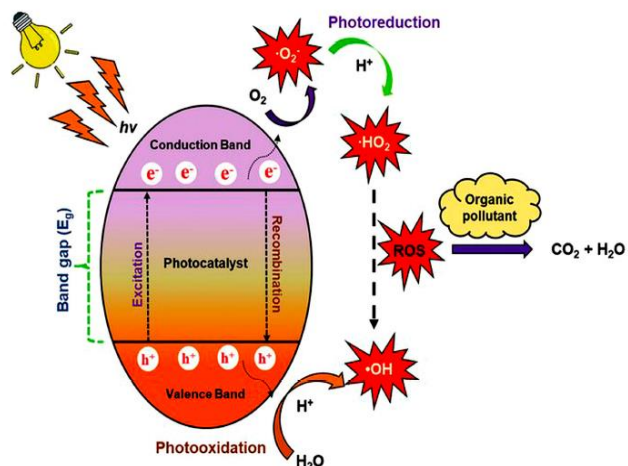
شکل ۵- اصول عملکرد نانو جاذب‌های ردوکس [34]



شکل ۳- اصول عملکرد نانو جاذب‌های مغناطیسی [28]

نانوجاذب‌های چندمحركی

با توجه به پیچیدگی واقعی فاضلاب‌ها، توسعه نانو جاذب‌های چندمحركی اهمیت ویژه‌ای یافته است. این سامانه‌ها قادرند به‌طور همزمان به چند محرك مانند pH، میدان مغناطیسی یا نور پاسخ دهند و در نتیجه انعطاف‌پذیری عملکردی بالاتری ارائه کنند (شکل ۶). برای مثال، کامپوزیت‌های $\text{GO-Fe}_3\text{O}_4$ -کیتوزان ترکیبی از پاسخ‌دهی pH و جداسازی مغناطیسی را ارائه می‌دهند و امکان حذف همزمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را فراهم می‌سازند [35]. در مطالعات فاضلاب بیمارستانی، این سامانه‌ها توانسته‌اند حذف بالای ۹۰ درصد برای ترکیباتی مانند تتراسایکلین و یون‌های سرب را به همراه بازیابی آسان نشان دهند [36]. همچنین، هیبریدهای $\text{TiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ -پلیمر، ترکیب همزمان فوتوکاتالیستی و جداسازی مغناطیسی را ممکن ساخته‌اند [37]. به دلیل توانایی پاسخ‌دهی همزمان به چند محرك و انعطاف‌پذیری عملکردی بالا، نانو جاذب‌های چندمحركی از امیدبخش‌ترین گزینه‌ها برای توسعه نسل آینده سامانه‌های هوشمند تصفیه آب محسوب می‌شوند. ترکیب این ویژگی‌ها در طراحی نانو جاذب‌های هوشمند منجر به ایجاد سامانه‌هایی با عملکرد بالا، گزینش‌پذیری مناسب و قابلیت استفاده مجدد در شرایط واقعی می‌شود.



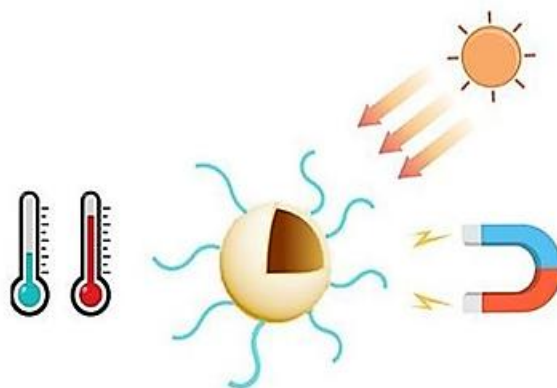
شکل ۴- اصول عملکرد نانو جاذب‌های فوتوکاتالیستی [31]

نانوجاذب‌های اکسایش-کاهش

در این گروه، تغییر حالت اکسیداسیون سطحی نقش کلیدی در کنترل جذب و تبدیل شیمیایی آلاینده‌ها دارد. نانومواد ردوکس-فعال نه تنها آلاینده‌ها را جذب می‌کنند، بلکه می‌توانند آن‌ها را به گونه‌های با سمیت کم‌تر تبدیل کنند. برای نمونه، نانوساختارهای سیلیکای مزوپور حاوی پیوندهای دی‌سولفید قادر به کاهش کروم شش‌ظرفیتی Cr(VI) به کروم سه‌ظرفیتی Cr(III) هستند که سمیت بسیار کمتری دارد [32]. همچنین، نانوالیاف فروسین‌دار با تغییر وضعیت اکسایش-کاهش، امکان جذب و واجذب چرخه‌ای رنگ‌های کاتیونی را با بازده بالا فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها در مطالعات میدانی نیز عملکرد پایداری در حذف آلاینده‌های صنعتی نشان داده‌اند [33]. اصول عملکرد نانو جاذب‌های ردوکس در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴-۳- تکنیک‌های تحلیلی و شناسایی

ارزیابی جامع نانو جاذب‌های هوشمند مستلزم استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های شناسایی فیزیکوشیمیایی، ساختاری و عملکردی است. از آنجا که عملکرد جذب این مواد به ویژگی‌هایی نظیر ساختار بلوری، شیمی سطح، مورفولوژی، تخلخل و پایداری بستگی دارد، شناسایی دقیق این خصوصیات برای درک رفتار جذب و پیش‌بینی عملکرد آن‌ها در کاربردهای واقعی ضروری است [11].



شکل ۶- نانوجاذب‌های چندمحركی

در میان روش‌های متداول شناسایی، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) یکی از مهم‌ترین ابزارها برای تعیین گروه‌های عاملی موجود بر سطح نانوجاذب‌ها به شمار می‌رود. این تکنیک امکان بررسی تغییرات شیمیایی ایجادشده در فرآیندهای سنتز، اصلاح سطح و همچنین برهم‌کنش میان جاذب و آلاینده را فراهم می‌کند. در کنار آن، پراش پرتو ایکس (XRD) برای تعیین ساختار بلوری، شناسایی فازهای تشکیل‌دهنده و بررسی میزان نظم ساختاری مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای مطالعه ویژگی‌های ریخت‌شناختی، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. این روش‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره اندازه ذرات، شکل هندسی، توزیع اندازه، زبری سطح و نحوه تجمع نانوذرات فراهم می‌کنند و درک بهتری از ارتباط میان ساختار و عملکرد جذب ارائه می‌دهند. افزون بر این، تعیین ویژگی‌های بافتی مواد از طریق تحلیل جذب-جاذب نیتروژن و محاسبه سطح ویژه به روش بروناور-مت-تالر (BET) انجام می‌شود. این روش امکان اندازه‌گیری سطح ویژه، حجم حفرات و توزیع اندازه منافذ را فراهم می‌سازد که از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر ظرفیت جذب محسوب می‌شوند [11].

پایداری حرارتی نانوجاذب‌ها نیز معمولاً با استفاده از آنالیز گرمایزی بررسی می‌شود. این تکنیک اطلاعاتی درباره رفتار تجزیه حرارتی، میزان مواد آلی موجود در ساختار و محدوده دمایی پایداری ماده ارائه می‌دهد که برای ارزیابی قابلیت استفاده مجدد و شرایط بهره‌برداری اهمیت دارد [38]. علاوه بر شناسایی ساختاری، ارزیابی عملکرد جذب بخش مهمی از فرآیند بررسی نانوجاذب‌ها را تشکیل می‌دهد. در این زمینه، مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی به‌عنوان ابزارهای اصلی برای تفسیر داده‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های ایزوترمی نظیر لانگمویر و فروندلیچ اطلاعاتی درباره ماهیت جذب، ظرفیت تعادلی و ناهمگنی سطح ارائه می‌کنند، در حالی که مدل‌های سینتیکی امکان بررسی سرعت جذب و تعیین مکانیسم‌های کنترل‌کننده فرآیند را فراهم می‌سازند [38].

ارزیابی کارایی نانوجاذب‌ها در حذف آلاینده‌های مختلف نیز نیازمند استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته است. برای اندازه‌گیری غلظت داروها،

آفت‌کش‌ها و سایر ریزآلاینده‌های آلی، معمولاً از کروماتوگرافی مایع متصل به طیف‌سنجی جرمی و کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی استفاده می‌شود. این روش‌ها به دلیل حساسیت و گزینش‌پذیری بالا، امکان شناسایی و اندازه‌گیری آلاینده‌ها را در غلظت‌های بسیار پایین فراهم می‌کنند. برای تعیین مقدار فلزات سنگین نیز طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القای یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها محسوب می‌شود [29]. با حرکت فناوری‌های نانویی از مقیاس آزمایشگاهی به کاربردهای پایلوت و صنعتی، اهمیت سامانه‌های پایش برخط نیز افزایش یافته است. در این سامانه‌ها، حسگرهای پیشرفته و تجهیزات اندازه‌گیری پیوسته برای کنترل عملکرد فرآیند، پایش کیفیت آب و ارزیابی پایداری نانوجاذب‌ها در شرایط عملیاتی واقعی به‌کار گرفته می‌شوند. چنین رویکردی امکان شناسایی سریع تغییرات عملکردی و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه را فراهم می‌سازد.

۳-۵- مکانیسم‌های حذف آلاینده

در حالی که بخش قبل بر طراحی نانوجاذب‌های هوشمند متمرکز بود، در این بخش سازوکارهای بنیادی حذف آلاینده‌ها مستقل از نوع نانوماده مورد بررسی قرار می‌گیرند. کارایی بالای نانومواد در تصفیه و ضدعفونی آب، ناشی از تنوع مکانیسم‌هایی است که این مواد برای حذف، تخریب یا غیرفعال‌سازی آلاینده‌ها به کار می‌گیرند [12]. مهم‌ترین این مکانیسم‌ها شامل برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی، پیوندهای هیدروژنی، تعاملات $\pi-\pi$ و سازوکارهای میزبان-مهمان هستند. این برهم‌کنش‌ها به‌صورت پویا و وابسته به شرایط محیطی عمل می‌کنند و نقش تعیین‌کننده‌ای در گزینش‌پذیری نهایی سیستم دارند. چگالی گروه‌های عاملی و ساختار حفره‌ای نانومواد نقش کلیدی در تعیین انرژی جذب و مسیرهای واکنش ایفا می‌کنند [39].

برخلاف بسیاری از فناوری‌های متعارف که عمدتاً بر یک مسیر حذف متکی هستند، نانومواد می‌توانند چندین فرآیند فیزیکی، شیمیایی و زیستی را به‌طور هم‌زمان فعال کنند. این ویژگی به‌ویژه در سامانه‌های هیبریدی و چندمنظوره اهمیت دارد؛ جایی که جذب، تخریب فوتوکاتالیستی، جداسازی غشایی و غیرفعال‌سازی میکروبی به‌صورت هم‌افزا عمل می‌کنند [10].

در سامانه‌های مبتنی بر نیمه‌رساناها، تولید گونه‌های فعال اکسیژن عامل اصلی تخریب آلاینده‌های آلی محسوب می‌شود، ولی در غشاهای نانو ساختار، افزایش نفوذپذیری و گزینش‌پذیری موجب ارتقای کارایی جداسازی می‌شود [40]. همچنین فعالیت ضد میکروبی بسیاری از نانومواد از مسیرهای متعددی شامل تخریب غشای سلولی، ایجاد تنش اکسیداتیو و آزادسازی یون‌های فلزی ناشی می‌شود. مکانیسم‌های مختلف حذف بسته به نوع نانوماده و آلاینده متفاوت است. جدول ۲ مکانیسم‌های غالب ضدعفونی و حذف آلاینده‌ها را در انواع مختلف نانومواد خلاصه می‌کند.

فرآیند جذب سطحی

جذب سطحی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها توسط نانومواد محسوب می‌شود. در این فرآیند، آلاینده‌ها از طریق مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی با سطح جاذب در تماس قرار گرفته و از فاز آبی جدا می‌شوند [47]. کارایی این فرآیند به ویژگی‌های ساختاری جاذب از جمله سطح ویژه، توزیع اندازه حفرات، شیمی سطح و نوع گروه‌های عاملی بستگی دارد.

در نانوجاذب‌ها، مکانیسم جذب می‌تواند از طریق جاذبه‌های الکترواستاتیکی، پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ ، نیروهای واندروالسی و یا سازوکارهای میزبان-مهمان انجام شود. این برهم‌کنش‌ها نقش اساسی در تعیین گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب دارند. علاوه بر این، تحلیل رفتار جذب معمولاً با استفاده از مدل‌های ایزوترمی لانگمویر و فروندلیچ و مدل‌های سینتیکی شبه‌مرتب اول، شبه‌مرتب دوم انجام می‌شود. همچنین استفاده از اصول نظریه اسید-باز سخت و نرم امکان طراحی هدفمند جاذب‌ها را فراهم می‌کند [48].

جدول ۲- برخی مکانیسم‌های مورد استفاده نانومواد در تصفیه پیشرفته آب

نانومواد	مکانیسم	عملکرد اصلی	آلاینده‌های هدف	منابع
فلزات/ اکسیدهای فلزی	فتوکاتالیز	تولید گونه‌های فعال اکسیژن برای تخریب آلاینده‌ها	رنگ‌های آلی و آفت‌کش‌ها	[41]
ساختار کربنی (گرافن، نانولوله‌های کربنی)	جذب سطحی	جذب آلاینده‌ها از طریق برهم‌کنش $\pi-\pi$ و کمپلکس‌سازی سطحی	رنگ‌ها، فلزات سنگین	[42, 43]
چارچوب‌های آلی-فلزی	جذب سطحی و کاتالیز	به دام انداختن و تخریب آلاینده‌ها در درون ساختارهای متخلخل	فلزات، ترکیبات آلی فرار، آنتی‌بیوتیک‌ها	[44, 45]
نانوذرات مغناطیسی	جذب سطحی و جداسازی مغناطیسی	جذب آلاینده‌ها و امکان بازیابی مغناطیسی	فلزات سنگین و روغن‌ها	[44]
نقاط کوانتومی	فتوکاتالیز	اکسایش-کاهش آلاینده‌ها با تحریک نوری	آلاینده‌های آلی	[10]
نانوذرات نقره، اکسید مس و اکسید روی	فعالیت ضد میکروبی	غیرفعال‌سازی میکروب‌ها و گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) از طریق تولید آزادسازی یون	باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها	[46]

تخریب فوتوکاتالیستی

تخریب فوتوکاتالیستی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته است که در آن نانومواد نیمه‌رسانا تحت تابش نور فعال شده و گونه‌های فعال اکسیژن نظیر رادیکال هیدروکسیل، سوپراکسید و پراکسید هیدروژن تولید می‌کنند. این گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر قادرند ترکیبات آلی مقاوم را به محصولات ساده‌تر و کم‌خطرتر تجزیه کنند.

در سال‌های اخیر، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها بر توسعه فوتوکاتالیست‌هایی بوده است که بتوانند از نور مرئی بهره‌برداری کنند، زیرا این امر امکان استفاده مؤثر از انرژی خورشیدی را فراهم می‌کند. در این راستا، ساختارهای هیبریدی مانند کامپوزیت‌های TiO_2 /گرافن عملکرد قابل‌توجهی از خود نشان داده‌اند؛ زیرا گرافن با تسهیل انتقال الکترون و کاهش بازترکیب زوج‌های الکترون-حفره، بازده فوتوکاتالیستی را افزایش می‌دهد [49].

در شرایط ایده‌آل، فرآیند فوتوکاتالیستی می‌تواند آلاینده‌های آلی را تا مرحله معدنی‌شدن کامل و تبدیل به CO_2 و H_2O پیش ببرد. علاوه بر این، توسعه غشاهای فوتوکاتالیستی خودتمیزشونده به‌عنوان یکی از پیشرفت‌های

مهم این حوزه مطرح شده است، زیرا این سامانه‌ها علاوه بر حذف آلاینده‌ها، می‌توانند تجمع مواد آلی بر سطح غشا را نیز کاهش دهند [48].

جداسازی غشایی و مکانیسم‌های ترکیبی

فناوری نانو نقش مهمی در تحول سامانه‌های فیلتراسیون مبتنی بر غشا ایفا کرده و موجب ارتقای چشمگیر عملکرد آن‌ها در تصفیه آب شده است. استفاده از نانومواد در ساختار غشاها می‌تواند موجب افزایش نفوذپذیری آب، بهبود راندمان دفع آلاینده‌ها و کاهش پدیده گرفتگی در اثر تشکیل رسوب شود [41]. ادغام نانومواد در ساختار غشاها، یکی از مهم‌ترین تحولات فناوری‌های تصفیه آب در دو دهه اخیر بوده است و استفاده از نانوموادمانند MOF، GO و نانوسولز موجب بهبود نفوذپذیری، افزایش گزینش‌پذیری و ارتقای مقاومت غشاها در برابر آلودگی می‌شود [47].

در طراحی سامانه‌های غشایی، فرآیندهای جداسازی مبتنی بر فشار شامل اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون جایگاه ویژه‌ای دارند. در میان این روش‌ها، غشاهای اسمز معکوس بالاترین سطح تصفیه را فراهم می‌کنند، در حالی که نانوفیلتراسیون به دلیل مصرف انرژی

ضد عفونی میکروبی

تأمین ایمنی میکروبی آب، یکی از مهم‌ترین اهداف سامانه‌های تصفیه آب است و نانومواد نقش فزاینده‌ای در دستیابی به این هدف ایفا می‌کنند [45,51]. پیشرفت‌های فناوری نانو منجر به توسعه نانوذراتی شده است که قادرند از طریق مکانیسم‌های مختلف، شامل تولید گونه‌های فعال اکسیژن، تخریب غشای سلولی، اختلال در فعالیت آنزیمی و آسیب به ماده ژنتیکی، میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا را غیرفعال کنند [52].

در این میان، نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی نظیر نقره، اکسید روی و اکسید مس از پرکاربردترین عوامل ضد میکروبی محسوب می‌شوند که توانایی بالایی در کنترل باکتری‌ها، ویروس‌ها و سایر عوامل بیماری‌زا دارند و در سامانه‌های مختلف تصفیه آب، غشاهای ضدباکتری و پوشش‌های ضدزیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد اثرات ضد میکروبی خود را از طریق مکانیسم‌هایی نظیر تخریب غشای سلولی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن، اختلال در عملکرد آنزیم‌ها و آسیب به مواد ژنتیکی اعمال می‌کنند [48].

علاوه بر کاربردهای مرتبط با تصفیه آب، برخی فناوری‌های پیشرفته ضد عفونی نظیر فراوری با فشار بالا نیز در صنایع غذایی برای کنترل آلودگی‌های میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرند [52]. در کنار روش‌های مبتنی بر نانومواد، رویکردهای زیست‌پالایی نیز در حذف عوامل بیماری‌زا و کاهش بار آلودگی زیستی محیط مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از سامانه‌های زیستی و میکروارگانیسم‌های مناسب می‌تواند به بهبود کیفیت آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی آلاینده‌ها کمک کند. این ویژگی‌ها موجب شده است که نانومواد ضد میکروبی در توسعه غشاهای ضدباکتری، پوشش‌های ضدزیستی و سامانه‌های تصفیه غیرمتمرکز آب مورد توجه قرار گیرند. با وجود این مزایای قابل توجه، یکی از دغدغه‌های اصلی در استفاده گسترده از این مواد، سمیت غیراختصاصی آن‌ها برای موجودات غیرهدف و احتمال اثرات زیست‌محیطی بلندمدت است. بنابراین، توسعه سامانه‌های ضد میکروبی با حداقل خطر زیست‌محیطی همچنان یکی از اولویت‌های پژوهشی این حوزه به شمار می‌رود.

۳-۶- کاربردهای نانومواد و نانوجاذب‌ها در تصفیه آب

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد در تصفیه و ضد عفونی آب به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و این مواد به دلیل ویژگی‌های ساختاری و عملکردی منحصر به فرد خود، به یکی از ارکان اصلی فناوری‌های نوین تصفیه آب تبدیل شده‌اند. سطح ویژه بالا، قابلیت عملکردی‌سازی شیمیایی، ساختارهای متخلخل قابل تنظیم و امکان ترکیب چندین مکانیسم حذف در یک سامانه، موجب شده است که نانومواد بتوانند طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی، غیرآلی و زیستی را با کارایی بالا حذف کنند. در این میان، غشاهای مبتنی بر اکسید گرافن و نانوذرات فوتوکاتالیستی عملکرد قابل توجهی در حذف آلاینده‌های آلی از خود نشان داده‌اند، در حالی که نانومواد نظیر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی و MOFs برای حذف فلزات سنگین به‌کار

کمتر به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی‌تر مطرح است [50]. در مقابل، اولترافیلتراسیون عمدتاً برای حذف ماکرومولکول‌ها و میکروبیولتراسیون برای حذف ذرات معلق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

غشاهای نانو ساختار قادرند تعادل مطلوبی میان سرعت انتقال آب و بازده حذف آلاینده‌ها برقرار کنند. در این میان، غشاهای دوبعدی مبتنی بر MXeneها به دلیل وجود کانال‌های انتقالی منظم و قابلیت تنظیم شیمی سطح، به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین نسل‌های غشاهای نانو ساختار شناخته می‌شوند [18].

در این میان، غشاهای نانوالیاف الکتروترسی شده به دلیل تخلخل بالا، نیاز انرژی پایین، نرخ شار آب زیاد و کارایی بالای حذف آلاینده‌ها، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. این نوع غشاها با بهره‌گیری از ساختار سه‌بعدی و سطح ویژه بالا، امکان بهبود انتقال جرم و افزایش کارایی جداسازی را فراهم می‌کنند.

همچنین، استفاده از نانوذرات TiO_2 و نقره در ساختار غشاها موجب ایجاد خواص فوتوکاتالیستی و ضد میکروبی می‌شود که علاوه بر حذف آلاینده‌ها، خطر رشد زیستی و گرفتگی غشا در اثر تشکیل رسوب را نیز کاهش می‌دهد [18]. توسعه روش‌های پیشرفته ساخت نیز امکان کنترل دقیق مورفولوژی و توزیع حفرات را فراهم کرده است [19]. در کنار این پیشرفت‌ها، توجه فزاینده‌ای به طراحی غشاهای زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط زیست معطوف شده است.

علاوه بر این، طراحی نانومواد قابل تنظیم بر اساس شرایط محلی منابع آبی، امکان توسعه راهکارهای متناسب با نیازهای منطقه‌ای را فراهم ساخته است. در مجموع، انتظار می‌رود نانومواد مهندسی شده نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه فناوری‌های نمک‌زدایی و تصفیه پیشرفته آب در آینده ایفا کنند. با این حال، گرفتگی غشا همچنان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های عملی این فناوری محسوب می‌شود و می‌تواند به افت عملکرد و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری منجر شود [51].

فیلتراسیون الکتروشیمیایی و غشاهای فعال اکسایش-کاهش

فیلتراسیون الکتروشیمیایی به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور در تصفیه آب، قابلیت ترکیب فرآیندهای جداسازی غشایی و واکنش‌های الکتروشیمیایی را در یک سامانه واحد فراهم می‌کند [51]. در این فناوری، غشاها علاوه بر ایفای نقش فیزیکی در جداسازی، به‌عنوان الکترودهای فعال نیز عمل می‌کنند و فرآیندهای اکسایش، کاهش یا خوردگی الکتروشیمیایی را تسهیل می‌نمایند. این ویژگی امکان حذف مؤثر ترکیبات آلی مقاوم، فلزات سنگین و برخی آلاینده‌های نوظهور را فراهم می‌کند. با این وجود، مصرف انرژی نسبتاً بالا، پیچیدگی طراحی تجهیزات و دشواری مقیاس‌سازی از جمله چالش‌های اصلی این فناوری محسوب می‌شوند [48].

رفتار نانومواد در شرایط واقعی، شامل تغییرات کیفیت آب، حضور آلاینده‌های متعدد، نوسانات دبی و شرایط بهره‌برداری طولانی مدت را فراهم می‌کنند. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، تفاوت قابل‌توجهی میان عملکرد این مواد در شرایط آزمایشگاهی و سامانه‌های واقعی وجود دارد. بسیاری از مطالعات در شرایط کنترل‌شده انجام شده‌اند، در حالی که در محیط‌های واقعی، حضور همزمان چندین آلاینده و مواد مزاحم می‌تواند عملکرد را تحت تأثیر قرار دهد [49]. در مقیاس پایلوت، استفاده از نانوجاذب‌ها در ستون‌های پیوسته، غشاهای نانو ساختار و سامانه‌های هیبریدی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب چند فناوری، مانند جذب و فوتوکاتالیز، می‌تواند کارایی حذف را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. همچنین، نانومواد در کاربردهایی مانند تصفیه فاضلاب صنعتی، حذف فلزات سنگین، حذف داروها و ضد عفونی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج مطالعات پایلوت نشان می‌دهد که موفقیت نهایی نانوجاذب‌های هوشمند تنها به ظرفیت جذب یا بازده حذف آن‌ها وابسته نیست، بلکه عواملی نظیر پایداری ساختاری، قابلیت بازتولید، ایمنی زیست‌محیطی، سازگاری با زیرساخت‌های موجود و هزینه‌های بهره‌برداری نیز در پذیرش صنعتی و تجاری این فناوری‌ها نقش تعیین‌کننده دارند. مسیر انتقال فناوری از مرحله طراحی آزمایشگاهی تا کاربرد صنعتی و شهری، در شکل ۷ نشان داده شده است. این مسیر شامل سنتز مواد در مقیاس پایلوت، یکپارچه‌سازی در سامانه‌های تصفیه موجود و در نهایت هم‌راستاسازی با اهداف توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی است.

لیستی از چندین مطالعه موردی که در آن‌ها نانوجاذب‌های هوشمند برای حذف داروها، مختل‌کننده‌های غدد درون‌ریز، آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها در ماتریس‌های واقعی فاضلاب با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است در جدول ۳ آورده شده است.

گرفته شده‌اند [16]. افزون بر این، نانوذرات نقره، روی و مس به دلیل خواص ضد میکروبی برجسته، در کنترل عوامل بیماری‌زا و ضد عفونی آب نقش مهمی ایفا می‌کنند. با وجود این مزایا، عملکرد بسیاری از این سامانه‌ها در ماتریس‌های پیچیده واقعی فاضلاب، تحت تأثیر حضور آلاینده‌های متعدد، مواد آلی طبیعی و یون‌های رقیب قرار می‌گیرد و ممکن است با نتایج به‌دست‌آمده در شرایط آزمایشگاهی تفاوت داشته باشد [10].

حذف فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های غیر آلی یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد نانومواد در تصفیه آب محسوب می‌شود. فلزات سنگینی مانند سرب، کادمیوم، کروم، جیوه و آرسنیک به دلیل سمیت بالا، قابلیت تجمع زیستی و پایداری در محیط، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی به شمار می‌روند. نانومواد متعددی برای حذف این آلاینده‌ها توسعه یافته‌اند که در میان آن‌ها اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانوسلولزهای اصلاح‌شده و چارچوب‌های آلی-فلزی از مهم‌ترین گزینه‌ها هستند. وجود گروه‌های عاملی فعال و سطح ویژه بالا در این مواد، جذب مؤثر یون‌های فلزی را امکان‌پذیر می‌سازد [48].

در کنار فناوری‌های مبتنی بر جذب، راهبردهای مکملی برای کنترل آلاینده‌های غیر آلی استفاده می‌شود. گیاه‌پالایی از این روش‌هاست که با استفاده از گیاهان انباشت‌کننده فلزات، آلاینده‌ها را از محیط حذف می‌کند. همچنین فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و سامانه‌های فیلتراسیون غشایی در حذف یون‌های نیتрат و فلورید عملکرد مطلوبی نشان داده‌اند [22].

کاربردها و عملکرد در مقیاس پایلوت و دنیای واقعی

اگرچه عملکرد نانومواد در مقیاس آزمایشگاهی اغلب بسیار امیدوارکننده گزارش شده است، اما موفقیت واقعی این فناوری‌ها به توانایی آن‌ها در حفظ عملکرد در شرایط عملیاتی و مقیاس‌های بزرگ‌تر بستگی دارد. به همین دلیل، مطالعات مقیاس پایلوت نقش مهمی در ارزیابی قابلیت انتقال فناوری از آزمایشگاه به صنعت ایفا می‌کنند [43,48]. این مطالعات امکان بررسی



شکل ۷- مسیر انتقالی نانوجاذب‌های هوشمند از آزمایشگاه به میدان

جدول ۳- مطالعات موردی کاربرد نانوجاذب‌ها در تصفیه فاضلاب

منبع	منبع فاضلاب/مطالعه موردی	عملکرد	سامانه نانو جاذب	آلاینده‌های شاخص	گروه آلاینده
[53]	فاضلاب بیمارستانی، چین	ظرفیت جذب $\approx 210 \text{ mg/g}$ میلی گرم بر گرم؛ بیش از ۹۰٪ حذف در ۶۰ دقیقه	نانولوله‌های کربنی کربوکسیله شده	تتراسایکلین، سیپروفلوکساسین	داروها
[54]	پایلویت تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، آلمان	بیش از ۹۵٪ حذف؛ بازتولید با نور خورشید؛ ۵ چرخه استفاده مجدد	نانوکامپوزیت TiO - Graphene	سولفامتوکسازول، دیکلوفناک	داروها
[55]	پساب شهری، هند	۹۲ تا ۹۶٪ حذف؛ بیش از ۸۰٪ کارایی پس از ۵ چرخه	نانوکامپوزیت FeO- chitosan	بیسفنول A، β -استرادیول	مختل کننده‌های غدد درون ریز
[56]	روان آب کشاورزی، آمریکا	ظرفیت جذب $250\text{--}200 \text{ mg/g}$ ؛ بیش از ۹۰٪ حذف	MOF نوع UiO-66-NH	آترازین، کلرپیریفوس	آفت کش‌ها
[57]	پساب معدنی، بنگلادش	بیش از ۹۸٪ حذف؛ قابل استفاده مجدد تا ۶ چرخه	FeO عامل دار شده با تیول	Cd(II)، Pb(II)، As(V)	فلزات سنگین
[58]	پساب تصفیه‌خانه فاضلاب، پایلویت انگلستان	بیش از ۸۵٪ جذب؛ بازتولید با آهنربا	نانوکامپوزیت گرافن اکساید-نانوالیاف مغناطیسی	ذرات پلی اتیلن و پلی استایرن $500 \text{ nm} \geq$	میکروپلاستیک‌ها / نانو پلاستیک‌ها
[13,20]	فاضلاب بیمارستانی، هند	بیش از ۹۰٪ حذف همزمان؛ بازتولید با تنظیم pH و جداسازی مغناطیسی	هیبرید GO-FeO-chitosan	آنتی بیوتیک‌ها + فلزات سنگین	سامانه‌های حاوی آلاینده‌های مختلط

در این میان، پدیده‌هایی نظیر گرفتگی غشا، تجمع و آگلومره شدن نانوذرات، و کاهش تدریجی ظرفیت جذب در چرخه‌های متوالی از مهم‌ترین محدودیت‌های عملی این سامانه‌ها محسوب می‌شوند [43]. این عوامل نه تنها کارایی حذف را کاهش می‌دهند، بلکه موجب افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری نیز می‌شوند.

قابلیت بازتولید و استفاده مجدد از نانوجاذب‌ها یکی از جنبه‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد آن‌ها است. اگرچه بسیاری از این مواد قابلیت بازیابی و استفاده مجدد را دارند، اما در عمل اغلب با کاهش تدریجی ظرفیت جذب، تغییر در ساختار سطحی یا افت پایداری مکانیکی مواجه می‌شوند که می‌تواند مزایای اقتصادی آن‌ها را محدود کند. علاوه بر این، برخی فرآیندهای بازتولید نیازمند مصرف مواد شیمیایی یا انرژی قابل توجه هستند که خود می‌تواند هزینه‌های بهره‌برداری را افزایش دهد.

از منظر اقتصادی، هزینه‌های بالای تولید نانومواد، استفاده از مواد اولیه گران قیمت و نیاز به تجهیزات پیشرفته، از موانع اصلی در مسیر تجاری‌سازی این فناوری‌ها به شمار می‌روند. یکی دیگر از موانع اساسی، مقیاس‌پذیری فرآیندهای سنتز و تولید نانوجاذب‌ها است، زیرا بسیاری از مواد پیشرفته در مقیاس آزمایشگاهی با روش‌های پیچیده و هزینه‌بر تولید می‌شوند و انتقال آن‌ها به مقیاس صنعتی همواره امکان‌پذیر یا مقرون به صرفه نیست [60].

۳-۷- چالش‌ها و محدودیت‌های فنی-اقتصادی و ریست محیطی حیاتی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه نانومواد و نانوجاذب‌های هوشمند برای تصفیه آب، کاربرد گسترده این فناوری‌ها در مقیاس صنعتی همچنان با چالش‌های متعددی مواجه است که در ابعاد فنی، اقتصادی و زیست محیطی قابل بررسی هستند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های فنی، فاصله قابل توجه میان عملکرد نانومواد در مقیاس آزمایشگاهی و شرایط واقعی است. بسیاری از این مواد در محیط‌های کنترل شده کارایی بالایی نشان می‌دهند، اما در سامانه‌های واقعی، حضور همزمان آلاینده‌های مختلف، مواد مزاحم و تغییرات شرایط عملیاتی می‌تواند موجب کاهش عملکرد آن‌ها شود [49]. همچنین، پیچیدگی ماتریس‌های واقعی فاضلاب نیز به عنوان یک عامل کلیدی مطرح است، زیرا برخلاف محلول‌های مصنوعی، این سیستم‌ها شامل مخلوطی از مواد آلی، یون‌های معدنی و ذرات معلق هستند که برای سایت‌های جذب رقابت کرده و کارایی حذف را کاهش می‌دهند. همچنین در سامانه‌های پیوسته، مشکلاتی نظیر گرفتگی غشاها، انسداد بسترهای جذبی و کاهش انتقال جرم می‌تواند عملکرد فرآیند را محدود سازد [59].

از این رو، توسعه روش‌های سنتز اقتصادی، تکرارپذیر و سازگار با تولید انبوه، یکی از پیش‌نیازهای تجاری‌سازی این فناوری‌ها محسوب می‌شود.

از دیدگاه زیست‌محیطی، نگرانی‌هایی در خصوص سمیت بالقوه نانومواد، پدیده آبشویی و سرنوشت آن‌ها در محیط‌های طبیعی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در این زمینه، ایمنی زیست‌محیطی و بهداشتی نانومواد است. رفتار این مواد به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و انرژی سطحی زیاد، تفاوت اساسی با مواد توده‌ای داشته و می‌تواند پیامدهای بالقوه‌ای برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد کند [11, 48]. به‌ویژه در مواردی که نانوذرات به‌صورت آزاد در سامانه‌های تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتمال انتشار آن‌ها به محیط و ورود به زنجیره‌های زیستی وجود دارد. از سوی دیگر، ارزیابی ریسک نانومواد هنوز به دلیل محدودیت داده‌های *in situ* و ناهمگونی محیط‌های واقعی، با عدم قطعیت همراه است [61].

نانوذرات به دلیل اندازه کوچک‌شان می‌توانند از طریق پوست، ریه‌ها، دستگاه گوارش و یا تزریق و کاشت به دستگاه گردش خون و لنفاوی وارد و در نهایت به بافت‌ها و اندام‌های بدن منتقل شوند. برخی از نانوذرات، بسته به ترکیب و اندازه‌شان، آسیب‌های برگشت‌ناپذیری به سلول‌ها وارد می‌کنند. البته باید توجه داشت که همه نانوذرات سمی نیستند. بسیاری از انواع نانوذرات غیرسمی هستند، و حتی برخی برای سلامتی مفیدند [62]. سمیت علاوه بر اندازه ذرات، به ترکیب شیمیایی و شکل آن‌ها نیز بستگی دارد.

علاوه بر ویژگی‌های ذاتی نانومواد مانند اندازه، شکل، ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های سطحی، عواملی نظیر غلظت، زمان مواجهه، قابلیت تجمع زیستی و تغییرات ساختاری نانوذرات در محیط نیز می‌تواند بر میزان سمیت آن‌ها اثرگذار باشند. بنابراین، ارزیابی ایمنی نانومواد هوشمند باید هم‌زمان با بررسی عملکرد حذف آلاینده‌ها انجام شود و تنها محدود به اندازه‌گیری بازده تصفیه نباشد [30, 48].

در این راستا، ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment; LCA)، نانومواد و توسعه مواد زیست‌سازگار به‌عنوان رویکردی مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های کمتر مورد توجه، ارزیابی جامع اثرات چرخه عمر است، زیرا در حالی که عملکرد بالای نانوجاذب‌ها معمولاً نشانه‌ای از پایداری تلقی می‌شود، اثرات مرتبط با استخراج مواد اولیه، سنتز، مصرف انرژی، بازتولید و دفع نهایی می‌تواند تصویر متفاوتی ارائه دهد.

ارزیابی چرخه عمر یک چارچوب جامع برای بررسی اثرات زیست‌محیطی نانومواد در تمام مراحل چرخه حیات، شامل تأمین مواد اولیه، فرآیند سنتز، اصلاح سطح، استفاده در فرآیند تصفیه، باززایی و مرحله پایان عمر ماده فراهم می‌کند. این رویکرد با در نظر گرفتن مصرف مواد و انرژی، انتشار آلاینده‌ها و پیامدهای بالقوه زیست‌محیطی، امکان مقایسه واقع‌بینانه‌تر فناوری‌های مبتنی بر نانومواد را فراهم می‌سازد [63]. LCA با برجسته کردن مراحل از چرخه عمر یک محصول که از نظر زیست‌محیطی بیشترین اهمیت را دارند، به تصمیم‌گیری آگاهانه کمک می‌کند. این امر برای هدف

قرار دادن مداخلاتی که می‌توانند اثرات زیست‌محیطی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند، بسیار مهم است. به عنوان مثال، اگر مرحله تولید بیشترین تأثیر را داشته باشد، تلاش‌ها می‌تواند بر اتخاذ تکنیک‌های تولید پاک‌تر، بهبود بهره‌وری انرژی یا تغییر به منابع انرژی تجدیدپذیر متمرکز شود [64].

مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که یکی از محدودیت‌های اصلی در اجرای LCA برای نانومواد، کمبود داده‌های شفاف درباره ورودی‌های فرآیند، مصرف انرژی، انتشار نانوذرات و سرنوشت آن‌ها در مرحله پایان عمر است. بسیاری از مطالعات، مراحل تولید یا عملکرد اولیه ماده را بررسی کرده‌اند، در حالی که مراحل دفع، بازیافت و احتمال آزادسازی نانومواد به محیط کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در نظر گرفتن مراحل بازیابی و بازیافت، برای ارزیابی جامع پایداری نانومواد هوشمند ضروری است [63].

در مقابل، طراحی نانومواد در قالب ساختارهای کامپوزیتی، تثبیت آن‌ها بر روی بسترهای پشتیبان و توسعه سامانه‌های قابل‌بازیابی می‌تواند علاوه بر کاهش خطر آبشویی، قابلیت ارزیابی و مدیریت بهتر چرخه عمر را فراهم کند. بنابراین، توسعه نسل آینده نانومواد هوشمند باید بر ایجاد تعادل میان کارایی حذف آلاینده‌ها، مصرف انرژی، قابلیت بازیابی، ایمنی زیست‌محیطی و شاخص‌های چرخه عمر استوار باشد.

علاوه بر چالش‌های فنی و زیست‌محیطی، مسائل مرتبط با مقررات، استانداردها و پذیرش اجتماعی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در استقرار موفق این فناوری‌ها ایفا می‌کنند. نبود دستورالعمل‌ها و استانداردهای جامع برای ارزیابی و استفاده از نانومواد، موجب ایجاد عدم قطعیت در فرآیندهای تأیید و صدور مجوز شده و می‌تواند سرعت پذیرش فناوری را کاهش دهد. همچنین، چارچوب‌های نظارتی موجود در کشورهای مختلف اغلب پراکنده و ناهمگون هستند و هنوز اجماع روشنی درباره معیارهای ارزیابی ایمنی و عملکرد نانومواد وجود ندارد [65].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه نانومواد هوشمند، چندین شکاف پژوهشی همچنان پابرجاست. کمبود مطالعات بلندمدت در شرایط واقعی، فقدان داده‌های جامع درباره سمیت و سرنوشت نانومواد، محدود بودن مطالعات مقیاس پایلوت، نبود پروتکل‌های استاندارد برای ارزیابی عملکرد و کمبود تحلیل‌های چرخه عمر از مهم‌ترین خلأهای موجود در این حوزه محسوب می‌شوند. رفع این شکاف‌ها می‌تواند مسیر انتقال فناوری از آزمایشگاه به کاربردهای صنعتی را تسریع کند.

۳-۸ چشم‌اندازهای آینده و پتانسیل انتقالی

چشم‌انداز آینده نانومواد پیشرفته و نانوجاذب‌های هوشمند فراتر از افزایش ظرفیت جذب یا توسعه مواد جدید است و به سمت یکپارچه‌سازی طراحی پیشرفته مواد با اصول پایداری، مقیاس‌پذیری و فناوری‌های دیجیتال حرکت می‌کند. در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به توسعه سامانه‌هایی معطوف شده است که علاوه بر کارایی بالا، قابلیت استقرار در شرایط واقعی،

پیاده‌سازی عملی را کاهش داده و زمینه را برای استفاده گسترده و ایمن از این فناوری‌ها در سامانه‌های تصفیه آب آینده فراهم سازند [15].

۳-۹- نتیجه‌گیری

یکی از یافته‌های کلیدی این مرور آن است که روند توسعه نانوجاذب‌ها از سامانه‌های جذب منفرد به سمت پلتفرم‌های هوشمند، چندمحركی و هیبریدی در حال حرکت است. این تحول موجب شده است که نقش نانومواد از جاذب‌های صرف فراتر رفته و به سامانه‌های فعال برای جذب، تخریب، جداسازی و پایش آلاینده‌ها تبدیل شوند. در این مطالعه، پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوجاذب‌های هوشمند و نانومواد پیشرفته برای حذف آلاینده‌های نوظهور از دیدگاه ساختار، مکانیسم‌های عملکرد و کاربردهای عملی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانومواد به دلیل ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه بالا، قابلیت اصلاح شیمیایی و توانایی فعال‌سازی همزمان چندین مکانیسم حذف، ظرفیت بالایی برای بهبود فرآیندهای تصفیه آب دارند.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، نقش تعیین‌کننده ترکیب چندین مکانیسم حذف در افزایش کارایی نانومواد است. فرآیندهایی نظیر جذب سطحی، تخریب فوتوکاتالیستی، واکنش‌های ردوکس، جداسازی غشایی و غیرفعال‌سازی زیستی در بسیاری از سامانه‌های پیشرفته به‌صورت همزمان عمل کرده و موجب افزایش چشمگیر راندمان حذف آلاینده‌ها می‌شوند. همچنین، توسعه نانوجاذب‌های هوشمند که قادر به پاسخ‌دهی به محرک‌های محیطی مانند pH، نور و میدان مغناطیسی هستند، امکان کنترل دقیق‌تر فرآیند جذب، افزایش گزینش‌پذیری و بهبود قابلیت بازتولید را فراهم کرده است. این ویژگی‌ها به‌ویژه در طراحی سامانه‌های چندعملکردی و هیبریدی نقش کلیدی ایفا می‌کنند.

با وجود این مزایا، بررسی‌ها نشان می‌دهد که فاصله قابل‌توجهی میان عملکرد نانومواد در مقیاس آزمایشگاهی و کاربردهای واقعی وجود دارد. بسیاری از سامانه‌ها در شرایط کنترل‌شده عملکرد مطلوبی دارند، اما در محیط‌های واقعی با چالش‌هایی نظیر حضور همزمان آلاینده‌های متعدد، مواد مزاحم و تغییرات شرایط عملیاتی مواجه می‌شوند. چالش‌های فنی نظیر گرفتگی غشا، تجمع نانوذرات، کاهش ظرفیت جذب در چرخه‌های متوالی و پدیده آبشویی، از مهم‌ترین موانع کاربرد عملی این فناوری‌ها محسوب می‌شوند. علاوه بر این، هزینه‌های بالای تولید، نیاز به مواد اولیه خاص و محدودیت‌های مرتبط با مقیاس‌پذیری، مانع از تجاری‌سازی گسترده بسیاری از نانومواد شده است.

از منظر زیست‌محیطی، سمیت بالقوه برخی نانومواد، سرنوشت آن‌ها در محیط و اثرات بلندمدت بر اکوسیستم‌ها از جمله نگرانی‌های اساسی به شمار می‌روند. در این راستا، ارزیابی چرخه عمر و توسعه نانومواد زیست‌سازگار به‌عنوان رویکردی کلیدی برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی مطرح شده است. همچنین، مسائل مرتبط با مقررات، استانداردسازی و پذیرش

هزینه‌های عملیاتی قابل قبول و سازگاری با الزامات زیست‌محیطی را نیز داشته باشند.

یکی از مهم‌ترین روندهای نوظهور در این حوزه، ادغام هوش مصنوعی و یادگیری ماشین و فناوری دوقلوهای دیجیتال در طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های تصفیه آب است. این فناوری‌ها می‌توانند با تحلیل حجم عظیمی از داده‌های تجربی، روابط میان ساختار و عملکرد نانومواد را شناسایی کرده و فرآیند کشف و بهینه‌سازی مواد جدید را تسریع کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که الگوریتم‌های هوش مصنوعی قادرند مواد امیدوارکننده را پیش از انجام آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه شناسایی کنند و بدین ترتیب زمان توسعه فناوری را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند.

در سطح عملیاتی نیز ترکیب هوش مصنوعی با اینترنت اشیا فرصت‌های جدیدی برای پایش برخط و مدیریت هوشمند سامانه‌های تصفیه آب فراهم کرده است. این رویکرد امکان جمع‌آوری مستمر داده‌ها، تشخیص زودهنگام اختلالات، پیش‌بینی افت عملکرد و بهینه‌سازی فرآیندهای بهره‌برداری را فراهم می‌سازد [66].

جهت‌گیری مهم دیگر، توسعه سامانه‌های چندمنظوره و هیبریدی است که چندین مکانیسم حذف را در یک ساختار واحد ترکیب می‌کنند. چنین سامانه‌هایی می‌توانند به‌طور همزمان جذب، فوتوکاتالیز، جداسازی غشایی و فعالیت ضد میکروبی را انجام دهند و در نتیجه برای تصفیه جریان‌های پیچیده فاضلاب مناسب‌تر باشند. همچنین استفاده از روش‌های سنتز سبز و مواد زیست‌مشتق، به‌عنوان راهبردی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های تولید، توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. یکی دیگر از رویکردهای آینده‌نگرانه، تثبیت و جاسازی نانوجاذب‌ها در پیکربندی‌های مدولار، غشایی یا کامپوزیتی است. این راهبرد ضمن حفظ مزایای عملکردی نانومواد، مشکلات مرتبط با بازیابی ذرات و انتشار احتمالی آن‌ها را کاهش می‌دهد و مسیر تجاری‌سازی را هموارتر می‌سازد [67].

از دیدگاه کاربردی، یکپارچه‌سازی نانوجاذب‌های هوشمند با سامانه‌های متعارف تصفیه آب، یکی از واقع‌بینانه‌ترین مسیرهای انتقال فناوری محسوب می‌شود. به‌عنوان مثال، نانوغشاهای مبتنی بر GO توانسته‌اند عملکرد حذف فلزات سنگین را بهبود بخشند، در حالی که ترکیب نانومواد با فرآیندهایی نظیر لجن فعال یا فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، موجب افزایش کارایی تخریب آلاینده‌ها شده است [43].

با وجود پتانسیل بالا، تحقق این چشم‌اندازها وابسته به رفع محدودیت‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی است. در این راستا، راهبردهای ایمنی-توسط-طراحی باید به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند توسعه فناوری در نظر گرفته شوند. همچنین ادغام ارزیابی‌های فنی-اقتصادی با تحلیل چرخه عمر برای تعیین قابلیت واقعی استقرار فناوری ضروری خواهد بود [48]. در نهایت، توسعه پروتکل‌های آزمون هماهنگ شده و چارچوب‌های استاندارد بین‌المللی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای انتقال موفق نانوجاذب‌های هوشمند از محیط پژوهشی به کاربردهای صنعتی و شهری محسوب می‌شود. چنین استانداردهایی می‌توانند شکاف موجود میان نوآوری‌های آزمایشگاهی و

[4] T. L. Rocha, L. Felix, D. Farias, "Ecotoxicological effects of emerging contaminants on aquatic species," *Toxics*, 12, 12-12, 2024. <https://doi.org/10.3390/toxics12080567>

[5] D. Gregucci, F. Nazir, M. M. Calabretta, E. Michelini, "Illuminating progress: the contribution of bioluminescence to sustainable development goal 6—clean water and sanitation—of the United Nations 2030 agenda," *Sensors (Basel)*, 23, 7244-7244, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23167244>

[6] R. Hou, J. Zhang, Q. Fu, et al., "The boom era of emerging contaminants: a review of remediating agricultural soils by biochar," *Science of the Total Environment*, 931, 172899-172899, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172899>

[7] P. Rout, T. C. Zhang, P. Bhunia, R. Surampalli, "Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: a review," *Science of the Total Environment*, 753, 141990-141990, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141990>

[8] F. Riva, E. Zuccato, E. Davoli, E. Fattore, S. Castiglioni, "Risk assessment of a mixture of emerging contaminants in surface water in a highly urbanized area in Italy," *Journal of Hazardous Materials*, 361, 103-110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.099>

[9] A. Gogoi, P. Mazumder, V. Tyagi, G. Chaminda, A. An, M. Kumar, "Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: a review," *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 169-180, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2017.12.009>

اجتماعی، نقش مهمی در استقرار موفق این فناوری‌ها در مقیاس صنعتی ایفا می‌کنند و نیازمند توجه بیشتر در مطالعات آینده هستند.

بر این اساس، مسیرهای آینده پژوهش در این حوزه باید بر توسعه نانومواد با هزینه کمتر، پایداری بالاتر، سمیت کمتر و قابلیت عملکرد در شرایط واقعی متمرکز شود. طراحی سامانه‌های هیبریدی، بهینه‌سازی فرآیندهای بازتولید و توسعه فناوری‌های قابل مقیاس‌پذیری از جمله اولویت‌های کلیدی در این زمینه محسوب می‌شوند. در مجموع، آینده فناوری‌های مبتنی بر نانوجاذب‌های هوشمند نه در توسعه مواد با ظرفیت جذب بیشتر، بلکه در طراحی سامانه‌های ایمن، پایدار، چندعملکردی و قابل استقرار در شرایط واقعی نهفته است که میزان موفقیت این فناوری‌ها به میزان توانایی آن‌ها در برقراری تعادل بین کارایی فنی، هزینه، ایمنی زیست‌محیطی و قابلیت مقیاس‌پذیری وابسته است. همچنین، ایجاد تعادل میان کارایی حذف آلاینده‌ها، قابلیت باززایی، ایمنی زیست‌محیطی و شاخص‌های ارزیابی چرخه عمر، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال موفق این فناوری‌ها از مقیاس آزمایشگاهی به کاربردهای صنعتی خواهد داشت.

۴- تعارض منافع

هیچ تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه کاشان و دانشگاه فرهنگیان به خاطر حمایت از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

[1] O. Ejiohuo, H. Onyeaka, A. Akinsemolu, O. F. Nwabor, K. F. Siyanbola, P. Tamasiga, Z. T. Al-Sharify, "Ensuring water purity: mitigating environmental risks and safeguarding human health," *Water Biology and Security*, 4, 100341-100341, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100341>

[2] S. R. Moon, M. M. Rahman, A. Rahman, A. A. Khan, M. A. Nazir, M. A. Islam, M. Abdulla-Al-Mamun, "Water resources and environmental sustainability: current challenges and future perspectives," *Resources*, 15, 31-31, 2026. <https://doi.org/10.3390/resources15020031>

- [17] S. Kandambeth, K. Dey, R. Banerjee, "Covalent organic frameworks: chemistry beyond the structure," *Journal of the American Chemical Society*, 141, 1807-1822, 2019.
<https://doi.org/10.1021/jacs.8b10334>
- [18] M. Ahmad, A. U. Rajapaksha, J. E. Lim, et al., "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review," *Chemosphere*, 99, 19-33, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>.
- [19] L. Kong, Y. Gao, Q. Zhou, X. Zhao, Z. Sun, "Biochar accelerates PAHs biodegradation in petroleum-polluted soil by biostimulation strategy," *Journal of Hazardous Materials*, 343, 276-284, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.040>.
- [20] J. Feng, "Application of nanomaterials in wastewater treatment," *MATEC Web Conference*, 386, 03002-03002, 2023.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/202338601003>.
- [21] A. Khan, S. F. Batool, R. Naz, et al., "Advanced applications of nanoparticles and nanotubes in the remediation of industrial, agriculture, and sewage wastewater and the production of biofertilizers for sustainable environmental management and agriculture practices," *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 9, 476-487, 2024.
<https://doi.org/10.36348/sjls.2024.v09i11.008>
- [22] S. Hossain, "Recent advances with CNT, nanocellulose and their composites in different industries," *Proceedings of International Exchange*
- [10] X. Qu, P. J. J. Alvarez, Q. Li, "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment," *Water Research*, 47, 3931-3946, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058>
- [11] D. Singh, B. Singh, "Nanotechnology-enabled adsorption of emerging contaminants: advances in smart nanoadsorbents and future prospects," *Water Environment Research*, 98, e70332-e70332, 2026.
<https://doi.org/10.1002/wer.70332>
- [13] Mandeep, P. Shukla, "Microbial nanotechnology for bioremediation of industrial wastewater," *Frontiers in Microbiology*, 11, 590631-590631, 2020.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.590631>
- [14] F. A. Ogundolie, S. Abubakar, "Nanotechnology in wastewater and sewage management," *Proceedings of the International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, 1-6, 2024.
<https://doi.org/10.1109/seb4sdg60871.2024.10630300>
- [15] G. Zhang, M. Tsujimoto, D. M. Packwood, T. M. Swager, D. Jiang, "Emerging porous organic frameworks for water purification," *Chemical Reviews*, 122, 11547-11603, 2022.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00866>
- [16] X. Wang, Z. Su, "Polyoxometalate-based metal-organic frameworks," *Handbook of Metal-Organic Frameworks*, 1-25, Springer Nature Singapore, 2025.

- [29] A. H. Khan, N. A. Khan, M. Zubair, et al., "Sustainable green nanoadsorbents for remediation of pharmaceuticals from water and wastewater: a critical review," *Environmental Research*, 204, 112243-112243, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112243>
- [30] L. V. Lawrence, C. Rewanwar, O. Shown, D. Vishnu, "Impact of nanoparticles in microalgal quantification: advancements in enhancing biomass valorization and evaluating toxicity effects," *Bioresource Technology Reports*, 32, 102354-102354, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102354>
- [31] V. K. Parida, S. K. Srivastava, A. K. Gupta, A. Rawat, "A review on nanomaterial-based heterogeneous photocatalysts for removal of contaminants from water," *Materials Express*, 13, 1-38, 2023. <https://doi.org/10.1166/mex.2023.2319>
- [32] J. Das, A. Saha, B. Lodh, S. Nag, "A comprehensive review on cutting-edge nanoengineered adsorbents for decontamination of heavy metals and dyes from wastewater," *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 13103-13121, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06292-9>
- [33] A. Sharma, N. Kumar, A. Mudhoo, V. K. Garg, "Phytobiomass-based nanoadsorbents for sequestration of aquatic emerging contaminants: an overview," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 109506-109506, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109506>
- [35] M. N. Garcia-Gonzalez, R. Quiroga-Flores, P. Borjesson, "Life cycle assessment of a nanomaterial-based adsorbent developed on lab and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES), 9, 123-130, 2023.
- [23] Z. Guo, R. Cao, H. Wang, et al., "High-performance polarization-sensitive photodetectors on two-dimensional β -InSe," *National Science Review*, 9, nwab098-nwab098, 2022. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab098>
- [24] R. Kaur, S. Sandhu, A. K. Pujari, S. Paul, J. Bhaumik, "Lignin-derived metal oxide nanoadsorbents for wastewater remediation," *ChemSelect*, 9, e202402934-e202402934, 2024. <https://doi.org/10.1002/slct.202402934>
- [25] D. S. Shirsath, V. S. Shirivastava, "Adsorptive removal of heavy metals by magnetic nanoadsorbent: an equilibrium and thermodynamic study," *Applied Nanoscience*, 5, 927-935, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0390-6>
- [26] W. Gao, J. M. Chan, O. C. Farokhzad, "pH-responsive nanoparticles for drug delivery," *Molecular Pharmaceutics*, 7, 1913-1920, 2010. <https://doi.org/10.1021/mp100253e>
- [27] A. Mudhoo, M. Sillanpaa, "Magnetic nanoadsorbents for micropollutant removal in real water treatment: a review," *Environmental Chemistry Letters*, 19, 4393-4413, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01289-6>
- [28] J. D. Candido, S. E. Weschenfelder, H. C. Ferraz, "A review on the synthesis and application of magnetic nanoadsorbents to the treatment of oilfield produced water," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 41, 1-21, 2024. <https://doi.org/10.1007/s43153-023-00331-0>

treatment: a critical review,” *Environmental Science: Water Research & Technology*, 8, 243-270, 2022. <https://doi.org/10.1039/D1EW00668J>

[42] S. Y. Wee, A. Z. Aris, “Endocrine-disrupting compounds in drinking water supply systems and human health risk implications,” *Environment International*, 106, 207-233, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.004>

[43] A. A. Keller, S. McFerran, A. Lazareva, S. Suh, “Global life cycle releases of engineered nanomaterials,” *Journal of Nanoparticle Research*, 15, 1692-1692, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1692-4>

[44] X. Hu, L. Mu, J. Wen, Q. Zhou, “Immobilization of TiO₂ into polystyrene beads for the photocatalytic degradation of dyes,” *Journal of Hazardous Materials*, 215–216, 292-298, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.039>

[45] B. Mi, “Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving,” *Science*, 343, 740-742, 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1250247>

[46] M. N. Chong, B. Jin, C. W. K. Chow, C. Saint, “Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review,” *Water Research*, 44, 2997-3027, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>

[47] B. S. Rathi, P. S. Kumar, “Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater,” *Environmental Pollution*, 280, 116995-116995, 2021.

scale for cadmium removal: comparison of the impacts of production, use and recycling,” *Cleaner Environmental Systems*, 4, 100071-100071, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100071>

[36] Y. H. Teow, K. C. Ho, A. W. Mohammad, “Life cycle assessment of magnetic nanoparticles in wastewater treatment: a review,” *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101275-101275, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101275>

[37] G. Barjoveanu, C. Teodosiu, I. Morosanu, R. Ciobanu, F. Bucatariu, M. Mihai, “Life cycle assessment as support tool for development of novel polyelectrolyte materials used for wastewater treatment,” *Nanomaterials*, 13, 840-840, 2023. <https://doi.org/10.3390/nano13050840>

[38] S. Eyley, S. Shariki, S. Dale, S. Bending, F. Marken, W. Thielemans, “Ferrocene-decorated nanocrystalline cellulose with charge carrier mobility,” *Langmuir*, 28, 6514-6519, 2012. <https://doi.org/10.1021/la3001224>

[39] X. Ge, J. Lu, L. Ma, J. Ma, “Life cycle assessment of different nitrogen-doped reduced graphene oxide production routes within early research,” *Polish Journal of Environmental Studies*, 30, 1601-1609, 2021. <https://doi.org/10.15244/pjoes/125561>

[40] M. Elimelech, W. A. Phillip, “The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment,” *Science*, 333, 712-717, 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>

[41] S. Al Aani, P. Z. Abdullah, N. Hilal, “Nanomaterials in membrane technology for water

- [54] L. Thangavelu, G. Veeraragavan, "A survey on nanotechnology-based bioremediation of wastewater," *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2022, 5063177-5063177, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5063177>
- [55] G. Kyzas, A. Mitropoulos, "Nanomaterials and nanotechnology in wastewater treatment," *Nanomaterials*, 11, 11-11, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11061539>
- [56] F. A. Oghyanous, "Nanoparticles in wastewater treatment," *IntechOpen*, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100239>
- [57] M. Jayasri, G. Shyamala, G. Thirumalarao, "Nano material application in wastewater treatment," *E3S Web of Conferences*, 619, 1123-1123, 2025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561904011>
- [58] F. A. Ogundolie, S. Abubakar, "Nanotechnology in wastewater and sewage management," *Proceedings of the International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1109/seb4sdg60871.2024.10630300>
- [59] M. Alam, R. Ambikapathi, S. Nabi, et al., "Advancements in green-synthesized transition metal/metal-oxide nanoparticles for sustainable wastewater treatment," *Materials Research Express*, 11, 102001-102001, 2024. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad86a4>
- [48] S. Kesarwani, D. B. Tripathy, R. Verma, Y. T. Hung, "Emerging nanomaterials for advanced water decontamination: opportunities and challenges," *Water Environment Research*, 98, e70358-e70358, 2026. <https://doi.org/10.1002/wer.70358>
- [49] B. S. Ramadan, Y. G. Wibowo, D. Anwar, A. T. Maryani, "A review of life cycle assessment of nanomaterials-based adsorbent for environmental remediation," *Global Nest Journal*, 26, 06216-06216, 2024.
- [50] T. F. Mastropietro, R. Bruno, E. Pardo, D. Armentano, "Reverse osmosis and nanofiltration membranes for highly efficient PFAS removal: overview, challenges and future perspectives," *Dalton Transactions*, 50, 5398-5410, 2021. <https://doi.org/10.1039/D1DT00360G>
- [51] J. Lee, H.-R. Chae, Y. J. Won, et al., "Graphene oxide nanoplatelets composite membrane with hydrophilic and antifouling properties for wastewater treatment," *Journal of Membrane Science*, 448, 223-230, 2013.
- [52] Y. Xu, Z. Shi, X. Shi, et al., "Epitaxial nucleation and lateral growth of high-crystalline black phosphorus films on silicon," *Nature Communications*, 11, 1330-1330, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14902-z>
- [53] H. Perez, O. J. Quintero Garcia, M. A. Amezcua-Allieri, R. Rodriguez Vazquez, "Nanotechnology as an efficient and effective alternative for wastewater treatment: an overview," *Water Science and Technology*, 87, 2971-3001, 2023. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.179>

2022.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114461>

[66] V. S. Kotwal, "A digital twin framework for intelligent water treatment, quality monitoring, and autonomous control," *International Journal of Applied Mathematics*, 38, 565-580, 2025.

[67] M. Schafer, O. Gretzschel, H. Steinmetz, "The possible roles of wastewater treatment plants in sector coupling," *Energies*, 13, 2088-2088, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13082088>

[60] M. Miseljic, S. I. Olsen, "Life-cycle assessment of engineered nanomaterials: a literature review of assessment status," *Journal of Nanoparticle Research*, 16, 2427-2427, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2427-8>

[61] Y. Choi, A. Sinha, J. Im, H. Jung, J. Kim, "Hierarchically porous composite scaffold composed of SBA-15 microrods and reduced graphene oxide functionalized with cyclodextrin for water purification," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11, 15764-15772, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b01845>

[62] Buzea C, Pacheco II, Robbie K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*, 2(4):17-71, 2007. <https://doi.org/10.1116/1.2815690>

[63] Nizam NU, Hanafiah MM, Woon KS. A content review of life cycle assessment of nanomaterials: current practices, challenges, and future prospects. *Nanomaterials*, 11(12):3324, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11123324>

[64] Ramadan BS, Wibowo YG, Anwar D, Maryani AT. A review of life cycle assessment of nanomaterials-based adsorbent for environmental remediation. *Global NEST Journal*, 26(7):06216, 2024. <https://doi.org/10.30955/gnj.006216>

[65] D. Saidulu, A. Srivastava, A. Gupta, "Enhancement of wastewater treatment performance using 3D printed structures: a major focus on material composition, performance, challenges, and sustainable assessment," *Journal of Environmental Management*, 306, 114461-114461,



Advanced Nanoadsorbents and Nanomaterials for Water Pollutant Removal: A Review of Mechanisms, Applications, and Future Perspectives

Leila Sadat Alavi¹, Mahshid Golestaneh^{2,*}, Ali Gholami¹

¹ Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Kashan, Kashan, Iran

² Department of Chemistry Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

Received: 2026-04-10

Revised: 2026-05-05

Accepted: 2026-06-10

Abstract: Water contaminants, including pharmaceuticals, endocrine-disrupting compounds, pesticides, per- and polyfluoroalkyl substances, dyes, heavy metals, microplastics, and pathogenic microorganisms, are increasingly detected in aquatic environments and pose significant challenges to conventional water treatment technologies due to their persistence, toxicity, and complex behavior. Many existing treatment processes exhibit limited efficiency in completely removing these contaminants, creating an urgent need for more advanced and sustainable remediation strategies. This narrative review examines recent advances in smart nanoadsorbents and advanced nanomaterials for water purification and contaminant removal. Various classes of nanomaterials, including metal and metal oxide nanoparticles, carbon-based nanomaterials, metal-organic frameworks, covalent organic frameworks, nanocellulose-based materials, polymeric nanomaterials, nanostructured biochars, and nanostructured membranes, are discussed in terms of their structure, properties, and water treatment applications. Particular emphasis is placed on stimulus-responsive nanoadsorbents capable of responding to environmental triggers such as pH, temperature, light, and magnetic fields. Major removal mechanisms, including adsorption, photocatalytic degradation, membrane-based separation, electrochemical processes, antimicrobial inactivation, and redox reactions, are critically evaluated. The reviewed studies demonstrate that multifunctional and hybrid nanomaterial systems generally outperform single-component nanomaterials by providing enhanced removal efficiency, improved selectivity, greater stability, and superior reusability. Recent pilot-scale investigations and real-world applications further highlight the potential of these materials for practical water and wastewater treatment. Nevertheless, challenges related to production costs, scalability, regeneration, environmental safety, potential ecotoxicity, and regulatory acceptance continue to limit their widespread implementation. Overall, smart nanoadsorbents and advanced nanomaterials represent promising platforms for next-generation water treatment technologies; however, overcoming technical, economic, and regulatory barriers remains essential for their successful large-scale deployment.

Keywords: Smart nanoadsorbents; Advanced nanomaterials; Water treatment; Emerging contaminants; Photocatalysis

Corresponding Author. Email: m.golestaneh@cfu.ac.ir

How to Cite This Article:

Alavi L S, Golestaneh M, Gholami A. Advanced Nanoadsorbents and Nanomaterials for Water Pollutant Removal: A Review of Mechanisms, Applications, and Future Perspectives. Nanomeghyas. 2026;13(1):e737679 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2093110.1440



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).