

کاربرد نانو مواد برای حذف مؤثر آلاینده های نوظهور در آب: چالش ها و نوآوری ها

زهره حاتمی

دانشگاه تهران

Hatami.zahra.۲۰۰۰@gmail.com

معصومه محمودی

سازمان آب و برق خوزستان و دانشگاه تهران

mahmoodimasoomah@gmail.com

داریوش بهارلوئی

سازمان آب و برق خوزستان

Baharlooei@gmail.com

چکیده

در دهه های اخیر، نانو مواد به عنوان یکی از راهکارهای نوین در تصفیه و مدیریت منابع آب مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. ویژگی های خاص نانو مواد از جمله اندازه نانو، سطح ویژه بالا و خواص شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد آن ها، قابلیت های بی نظیری برای حذف آلاینده های مختلف از آب ایجاد کرده است. این مواد می توانند به طور مؤثری آلاینده های شیمیایی، فلزات سنگین، مواد دارویی و سموم کشاورزی را از آب حذف کنند، در حالی که بسیاری از این آلاینده ها به ویژه آلاینده های مقاوم به روش های سنتی تصفیه، به راحتی از آب حذف نمی شوند. علاوه بر این، ترکیب نانو مواد با دیگر فناوری های تصفیه مانند روش های فتوکاتالیتی و الکتروشیمیایی می تواند به بهبود عملکرد این مواد کمک کند. با این حال، استفاده از نانو مواد در تصفیه آب با چالش هایی از جمله نگرانی های زیست محیطی و اقتصادی همراه است. در این مقاله، به بررسی پتانسیل های نانو مواد در تصفیه آب، چالش ها و محدودیت ها، و راهکارهای موجود برای بهبود و گسترش کاربرد این فناوری پرداخته شده است. در نهایت، پیشنهاداتی برای سیاست گذاری و راهکارهای اجرایی جهت استفاده ایمن و مؤثر از نانو مواد در تصفیه آب ارائه می شود. کلمات کلیدی: نانو مواد، تصفیه آب، آلاینده ها، فناوری های نوین، سیاست گذاری زیست محیطی، چالش های زیست محیطی

۱. مقدمه

آلودگی منابع آبی به عنوان یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی در قرن ۲۱ شناخته شده است. منابع آب، که به طور مستقیم با زندگی انسان ها و اکوسیستم های طبیعی در ارتباط هستند، با انواع آلاینده ها از جمله آلاینده های شیمیایی، میکروبی، و دارویی مواجه اند (Vörösmarty et al., ۲۰۱۰). از جمله آلاینده های نوظهور، می توان به ترکیبات دارویی، مواد شیمیایی صنعتی، و میکروپلاستیک ها اشاره کرد که به واسطه استفاده گسترده از مواد شیمیایی در صنایع مختلف و ورود آن ها به محیط زیست، به ویژه به منابع آبی، به یکی از چالش های بزرگ زیست محیطی تبدیل شده اند (Pal et al., ۲۰۱۷). این آلاینده ها معمولاً در مقادیر کم اما در بلندمدت تأثیرات زیان بار خود را بر اکوسیستم ها و سلامت انسان ها می گذارند، به ویژه با توجه به تجمع آنها در زنجیره غذایی و تأثیرات مخرب بر فرآیندهای طبیعی (Rochman et al., ۲۰۱۳).

در راستای مقابله با این بحران‌ها، تکنولوژی‌های نوین تصفیه آب از جمله استفاده از نانو مواد به عنوان یک راهکار نوآورانه مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانو مواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله سطح ویژه بالا، خواص شیمیایی و فیزیکی خاص، و ظرفیت جذب بالا، به طور چشمگیری در حوزه تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Pillai & Grattan, ۲۰۱۲). این مواد قادرند آلاینده‌ها را از منابع آب به طور مؤثری حذف کنند و کارایی بالاتری نسبت به روش‌های سنتی تصفیه آب نظیر فیلتراسیون و تصفیه شیمیایی دارند (El-Desoky et al., ۲۰۲۰).

هدف اصلی این مقاله بررسی کاربرد نانو مواد در حذف آلاینده‌های نوظهور از منابع آبی است. در این راستا، به تحلیل ویژگی‌ها و انواع مختلف نانو مواد، کاربردهای آن‌ها در تصفیه آب، و چالش‌های موجود در استفاده از این فناوری در مدیریت منابع آب پرداخته خواهد شد. به ویژه، این تحقیق به بررسی این موضوع خواهد پرداخت که چگونه نانو مواد می‌توانند به عنوان یک ابزار نوآورانه در مدیریت آلاینده‌های نوظهور از جمله ترکیبات دارویی، هورمون‌ها، و میکروپلاستیک‌ها در منابع آبی استفاده شوند. با توجه به اهمیت روزافزون بحران‌های آب و نیاز به توسعه فناوری‌های نوین برای مقابله با آلاینده‌ها، این تحقیق به طور خاص به بررسی چالش‌ها و نوآوری‌ها در استفاده از نانو مواد در تصفیه آب خواهد پرداخت تا بتواند راهکارهایی عملی و پایدار برای حذف آلاینده‌های نوظهور از منابع آبی ارائه دهد.

۲. آلاینده‌های نوظهور در آب

آلاینده‌های نوظهور به ترکیبات و مواد شیمیایی اطلاق می‌شود که به طور سنتی تحت نظارت و بررسی‌های زیست‌محیطی قرار نداشته‌اند و یا شناخته شده‌اند اما تأثیرات آن‌ها به طور دقیق ارزیابی نشده است. این آلاینده‌ها معمولاً از منابع مختلف صنعتی، کشاورزی، دارویی و خانگی وارد محیط زیست می‌شوند و به ویژه در منابع آبی تجمع می‌کنند. در این میان، مواد دارویی، پلاستیک‌های میکرو، ترکیبات شیمیایی صنعتی و سموم کشاورزی به عنوان برخی از مهم‌ترین آلاینده‌های نوظهور در منابع آبی شناخته شده‌اند (McArdell et al., ۲۰۰۳).

۲.۱. ترکیبات دارویی

ترکیبات دارویی به ویژه آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌ها، و داروهای ضد افسردگی که از طریق فاضلاب‌های خانگی، بیمارستان‌ها، و صنایع دارویی وارد منابع آبی می‌شوند، به یکی از آلاینده‌های نوظهور با اهمیت بالا تبدیل شده‌اند. این مواد نه تنها به طور مستقیم بر اکوسیستم‌های آبی تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند از طریق جذب به موجودات زنده، از جمله ماهی‌ها و سایر موجودات آبی، وارد زنجیره غذایی شوند و خطراتی برای سلامت عمومی ایجاد کنند (Kümmerer, ۲۰۰۹; Kasprzyk-Hordern et al., ۲۰۰۸).

۲.۲. پلاستیک‌های میکرو

میکروپلاستیک‌ها، قطعات پلاستیکی کوچکی هستند که معمولاً کمتر از ۵ میلی‌متر اندازه دارند و به واسطه استفاده زیاد از محصولات پلاستیکی در جوامع مدرن، به ویژه در فاضلاب‌ها، وارد محیط زیست می‌شوند (Cole et al., ۲۰۱۱). این آلاینده‌ها به طور عمده از طریق مصرف محصولات پلاستیکی یکبار مصرف، لوازم آرایشی، و از تجزیه پلاستیک‌های بزرگ‌تر وارد منابع آبی می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها علاوه بر ایجاد آلودگی بصری و تهدید به سلامت اکوسیستم‌های آبی، قادرند آلاینده‌های شیمیایی دیگر را جذب کرده و آن‌ها را به موجودات زنده منتقل کنند (Rochman et al., ۲۰۱۳).

۲.۳. ترکیبات شیمیایی صنعتی

ترکیبات شیمیایی صنعتی شامل حشره کش ها، آفت کش ها، فلزات سنگین، و سایر مواد شیمیایی خطرناک هستند که از فرآیندهای صنعتی و کشاورزی به محیط زیست وارد می شوند. این ترکیبات در بسیاری از موارد به راحتی در منابع آبی حل شده و به طور مداوم به اکوسیستم های آبی وارد می شوند (Sanchez-Bayo & Goka, ۲۰۱۴). این مواد به ویژه در صورت استفاده نادرست از سموم کشاورزی، می توانند به سرعت وارد چرخه آب شوند و به دلیل ویژگی های پایدار خود، برای مدت طولانی در محیط باقی بمانند.

۲.۴. چالش ها در حذف آلاینده های نوظهور

یکی از مشکلات عمده در حذف آلاینده های نوظهور از منابع آبی، عدم تشخیص و شناخته شدن کامل این آلاینده ها است. بسیاری از این مواد شیمیایی دارای ویژگی های خاصی هستند که باعث می شود در فرآیندهای تصفیه معمولی آب، مانند تصفیه فیزیکی و شیمیایی، به طور کامل حذف نشوند (Carballa et al., ۲۰۰۴). از این رو، برای مقابله با این آلاینده ها به فناوری های پیشرفته تر و کارآمدتری نیاز است که بتوانند آلاینده ها را در مقیاس های مولکولی شناسایی و از منابع آبی حذف کنند.

۲.۵. اهمیت مدیریت مناسب آلاینده های نوظهور

با توجه به پایداری و گستردگی آلاینده های نوظهور، مدیریت و تصفیه آن ها از منابع آبی به طور فزاینده ای اهمیت پیدا کرده است. استفاده از روش های نوآورانه مانند نانو مواد به عنوان یک راهکار مؤثر برای حذف این آلاینده ها، در حال تبدیل شدن به یکی از اولویت های تحقیقاتی در حوزه محیط زیست و منابع آبی است. در این زمینه، توسعه فناوری های تصفیه پیشرفته تر که می توانند آلاینده های نوظهور را با دقت بالا و به صورت کارآمد حذف کنند، ضروری است (Fatta-Kassinos et al., ۲۰۱۱).

۳. نانو مواد و ویژگی های آن ها

نانو مواد به موادی اطلاق می شود که حداقل یکی از ابعاد آن ها در مقیاس نانو (۱-۱۰۰ نانومتر) قرار دارد. این مواد به دلیل داشتن ویژگی های خاص در مقیاس نانو، که به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم و تغییرات در ویژگی های فیزیکی و شیمیایی در این مقیاس به وجود می آید، در مقایسه با مواد معمولی دارای خواص متفاوتی هستند (Alivisatos, ۱۹۹۶). این ویژگی ها شامل افزایش واکنش پذیری شیمیایی، سطح ویژه بالا، خواص مکانیکی، نوری و الکتریکی خاص هستند که آن ها را به ابزارهایی مناسب برای کاربردهای مختلف در فناوری های محیط زیستی و به ویژه در تصفیه آب تبدیل می کنند (Mohana et al., ۲۰۱۶).

۳.۱. انواع نانو مواد

نانو مواد را می توان به گروه های مختلفی تقسیم کرد که هر کدام ویژگی ها و کاربردهای خاص خود را دارند. برخی از مهم ترین انواع نانو مواد عبارتند از:

نانو ذرات (Nanoparticles): این مواد می توانند از جنس فلزات، اکسیدها، کربن و پلیمرها باشند. نانو ذرات فلزی مانند نانو ذرات طلا، نقره، و آهن به دلیل خواص کاتالیستی و جذب سطحی بالا در حذف آلاینده ها از آب به کار می روند (Xie et al., ۲۰۱۸).

نانو کاتالیست ها (Nanocatalysts): این نانو مواد به ویژه در فرآیندهای شیمیایی برای افزایش سرعت واکنش ها و بهبود کارایی استفاده می شوند. نانو کاتالیست ها در تصفیه آب به ویژه برای حذف آلاینده های آلی و مواد سمی کاربرد دارند (Yin et al., ۲۰۱۲).

نانو فیبرها (Nanofibers) این مواد به دلیل مساحت سطحی بسیار زیاد و ساختار متخلخل خود در فرایندهای فیلتراسیون و جذب آلاینده‌ها در سیستم‌های تصفیه آب کاربرد دارند (Xia et al., ۲۰۰۳).

۳.۲. ویژگی‌های نانو مواد

ویژگی‌های نانو مواد در مقایسه با مواد معمولی باعث می‌شود که این مواد قابلیت‌های ویژه‌ای در حذف آلاینده‌ها از منابع آبی داشته باشند. برخی از ویژگی‌های بارز نانو مواد عبارتند از:

سطح ویژه بالا: به واسطه ابعاد کوچک نانو مواد، مساحت سطحی آن‌ها نسبت به حجم افزایش می‌یابد، که این ویژگی آن‌ها را به جاذب‌های مؤثری برای آلاینده‌ها تبدیل می‌کند (Tang et al., ۲۰۱۵).

افزایش واکنش‌پذیری: نانو مواد به دلیل داشتن تعداد زیادی سایت فعال در سطح خود، به شدت واکنش‌پذیر هستند و می‌توانند آلاینده‌ها را به‌طور مؤثر جذب یا تجزیه کنند (Liu et al., ۲۰۱۳).

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاص: نانو مواد معمولاً دارای ویژگی‌های نوری، الکتریکی و مغناطیسی متفاوتی نسبت به مواد در مقیاس میکروسکوپی هستند که این ویژگی‌ها می‌تواند بهبود فرآیندهای تصفیه آب را تسهیل کند (Mohana et al., ۲۰۱۶).

۳.۳. کاربرد نانو مواد در تصفیه آب

نانو مواد در تصفیه آب و حذف آلاینده‌ها به‌ویژه در مقابله با آلاینده‌های نوظهور، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. برخی از مهم‌ترین کاربردهای نانو مواد در تصفیه آب عبارتند از:

حذف آلاینده‌های شیمیایی و آلی: نانو ذرات می‌توانند به‌عنوان جاذب‌های قوی برای مواد شیمیایی و آلی موجود در آب عمل کنند. به‌عنوان مثال، نانو ذرات آهن می‌توانند برای حذف آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین استفاده شوند (Chen et al., ۲۰۱۶).

حذف میکروارگانیسم‌ها: نانو ذرات نقره و نانو ذرات اکسید آهن به‌ویژه برای از بین بردن میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌ها از منابع آبی به کار می‌روند (Mohana et al., ۲۰۱۶). این نانو مواد با ایجاد اثرات ضد میکروبی از رشد باکتری‌ها جلوگیری می‌کنند.

فیلتراسیون و تصفیه فیزیکی: نانو فیبرها و نانو لوله‌های کربنی به‌عنوان سیستم‌های فیلتراسیونی کارآمد برای حذف ذرات معلق و آلاینده‌ها از آب استفاده می‌شوند. این مواد قادرند آلاینده‌ها را در ابعاد نانو حذف کرده و آب را به‌طور مؤثری تصفیه کنند (Wang et al., ۲۰۱۷).

۳.۴. مزایا و چالش‌های استفاده از نانو مواد در تصفیه آب

استفاده از نانو مواد در تصفیه آب دارای مزایای بسیاری است. این مواد توانایی حذف آلاینده‌ها با کارایی بالا و هزینه‌های کم را دارند و می‌توانند فرآیند تصفیه را به‌طور قابل توجهی تسریع کنند (Yin et al., ۲۰۱۲). با این حال، استفاده از نانو مواد با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از مشکلات اصلی نگرانی‌های زیست‌محیطی و اثرات سمی احتمالی نانو مواد پس از استفاده در تصفیه آب است. برخی از نانو مواد ممکن است پس از ورود به محیط زیست خطراتی برای اکوسیستم‌ها و موجودات زنده ایجاد کنند (Nowack & Bucheli, ۲۰۰۷).

۴. فرایندهای نانو تصفیه در حذف آلاینده های آب

فرایندهای نانو تصفیه به تکنیک های نوآورانه ای اطلاق می شود که در آنها از نانو مواد برای حذف یا کاهش آلاینده های آب استفاده می شود. این فرایندها به دلیل ویژگی های خاص نانو مواد مانند سطح ویژه بالا، واکنش پذیری زیاد، و توانایی تعامل با آلاینده ها در مقیاس مولکولی، به عنوان یکی از روش های مؤثر و کارآمد در تصفیه منابع آبی به شمار می آیند. فرایندهای نانو تصفیه می توانند به طور خاص برای حذف آلاینده های نوظهور، سموم کشاورزی، فلزات سنگین، و میکروارگانیسم ها به کار روند. در این بخش، به بررسی برخی از مهم ترین فرایندهای نانو تصفیه برای حذف آلاینده های مختلف آب پرداخته خواهد شد.

۴.۱. نانو فیلتراسیون

نانو فیلتراسیون (NF) یکی از فرایندهای تصفیه آب است که از غشای نانو ساختار برای حذف ذرات معلق و آلاینده های کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر استفاده می کند. این فرایند به ویژه برای حذف یون های منفی و مثبت، مواد آلی و باکتری ها مناسب است. نانو فیلتراسیون به دلیل ساختار متخلخل خود می تواند آلاینده ها را از آب جداسازی کرده و در عین حال یون های ضروری مانند کلسیم و منیزیم را عبور دهد (Gabelich et al., ۲۰۰۲). این فرایند به ویژه برای تصفیه آب های شور و استفاده در فرایندهای بازیابی آب از فاضلاب های صنعتی کاربرد دارد.

۴.۲. نانو کاتالیست ها برای حذف آلاینده ها

نانو کاتالیست ها به دلیل سطح فعال بالا و توانایی واکنش دهی زیاد، در حذف آلاینده های شیمیایی از آب بسیار مؤثر هستند. نانو ذرات فلزی، به ویژه نانو ذرات آهن، در فرایندهای تصفیه آب به کار می روند تا آلاینده هایی مانند فلزات سنگین، مواد آلی و میکروارگانیسم ها را تجزیه یا جذب کنند. برای مثال، نانو ذرات آهن می توانند به طور مؤثر آرسنیک، کروم، و سایر فلزات سنگین را از آب حذف کنند (Liu et al., ۲۰۱۱). نانو کاتالیست ها به ویژه در فرایندهای تجزیه آلاینده های آلی مقاوم مانند ترکیبات دارویی و سموم کشاورزی مؤثرند و می توانند این آلاینده ها را به ترکیبات بی ضرر تبدیل کنند (Jiang et al., ۲۰۱۶).

۴.۳. نانو فیلترهای کربنی و حذف مواد آلی

نانو فیلترهای کربنی یکی دیگر از ابزارهای مؤثر در تصفیه آب هستند. این فیلترها با استفاده از نانو ذرات کربن فعال یا نانو لوله های کربنی می توانند مواد آلی و آلاینده های آلی غیرقطبی را از آب حذف کنند. این فیلترها به دلیل دارا بودن سطح وسیع و ویژگی های جذب قوی، قادر به حذف طیف وسیعی از آلاینده های آلی از جمله ترکیبات دارویی، سموم کشاورزی، و مواد شیمیایی صنعتی هستند (Elimelech et al., ۲۰۰۲). علاوه بر این، نانو فیلترهای کربنی می توانند با جذب میکروارگانیسم ها و باکتری ها، به عنوان یک فیلتر ضد میکروبی عمل کنند.

۴.۴. نانو لوله های کربنی و تصفیه آب

نانو لوله های کربنی (CNTs) به دلیل ساختار منحصر به فرد خود، به ویژه در زمینه فیلتراسیون و تصفیه آب کاربرد دارند. این مواد دارای سطح فعال بالایی هستند که می توانند به طور مؤثر یون ها، ذرات معلق، و آلاینده های شیمیایی را از آب جذب کنند. نانو لوله های کربنی به ویژه در حذف فلزات سنگین مانند سرب و کادمیوم از آب کاربرد دارند و می توانند به طور مؤثر در تصفیه فاضلاب های صنعتی استفاده شوند (Zhao et al., ۲۰۱۰). علاوه بر این، به دلیل ساختارهای نانومتری خود، نانو لوله ها می توانند میکروارگانیسم ها و ویروس ها را نیز از منابع آبی حذف کنند.

۴.۵. نانو مواد برای حذف میکروارگانیسم ها

یکی از چالش‌های اصلی در تصفیه آب، حذف میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌ها از منابع آبی است. نانو مواد به دلیل خاصیت ضد میکروبی خود می‌توانند به‌طور مؤثر در این زمینه استفاده شوند. به‌ویژه نانو ذرات نقره به‌عنوان یک عامل ضدباکتری شناخته شده است که می‌تواند با از بین بردن باکتری‌ها و ویروس‌ها در آب، کیفیت آب را بهبود بخشد. این نانو مواد با نفوذ به ساختار سلولی میکروارگانیسم‌ها، آن‌ها را تخریب می‌کنند و از رشد و تکثیر آن‌ها جلوگیری می‌نمایند (Morones et al., ۲۰۰۵).

۴.۶. چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از نانو مواد در تصفیه آب

اگرچه نانو مواد پتانسیل بالایی در تصفیه آب دارند، استفاده از آن‌ها همچنان با چالش‌هایی روبرو است. یکی از این چالش‌ها، نگرانی‌های زیست محیطی و تأثیرات احتمالی نانو مواد بر اکوسیستم‌های آبی است. پس از استفاده از نانو مواد در تصفیه آب، این مواد ممکن است وارد محیط زیست شوند و اثرات منفی بر موجودات زنده ایجاد کنند. همچنین، هزینه‌های تولید و استفاده از نانو مواد نیز می‌تواند یکی دیگر از محدودیت‌ها باشد (Cowan et al., ۲۰۰۶). بنابراین، به منظور بهره‌برداری بهینه از نانو مواد در تصفیه آب، باید تحقیقاتی جهت ارزیابی اثرات بلندمدت آن‌ها و توسعه فناوری‌های مقرون به صرفه‌تر صورت گیرد.

۵. نانو مواد در بهبود کیفیت آب: روش‌های نوین و چالش‌ها

نانو مواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود در زمینه بهبود کیفیت آب و تصفیه آن، پتانسیل‌های عظیمی در مقابله با آلاینده‌ها و بحران‌های منابع آبی دارند. این مواد با ابعاد نانو خود، توانایی تعامل و تغییر در ساختار مولکولی آلاینده‌ها را دارند و می‌توانند به‌طور مؤثری در بهبود کیفیت آب، کاهش آلودگی و بازیافت آب‌های آلوده به کار روند. در این بخش، به بررسی روش‌های نوین استفاده از نانو مواد در بهبود کیفیت آب، از جمله تکنیک‌های نوین برای حذف آلاینده‌ها، بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه، و چالش‌های موجود در این زمینه پرداخته خواهد شد.

۵.۱. روش‌های نوین نانو برای بهبود کیفیت آب

روش‌های مختلفی از نانو مواد برای بهبود کیفیت آب و تصفیه منابع آبی استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل کاربرد نانو ذرات، نانو کاتالیست‌ها، نانو فیلترها، و نانو لوله‌ها در فرآیندهای مختلف تصفیه آب هستند.

نانو فیلترها و غشاهای نانو ساختار: این مواد به دلیل اندازه کوچک منافذ خود می‌توانند به‌طور مؤثری ذرات معلق، میکروارگانیسم‌ها، و آلاینده‌های شیمیایی را از آب حذف کنند. نانو فیلترها در مقایسه با سیستم‌های فیلتر معمولی، قابلیت‌های بالاتری در حذف آلاینده‌ها از آب دارند. استفاده از نانو ذرات اکسید فلزی مانند نانو ذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2) (و نانو ذرات اکسید آهن در غشاهای نانو ساختاری می‌تواند به‌طور مؤثری آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را حذف کند (Kim et al., ۲۰۲۰).

استفاده از نانو کاتالیست‌ها در تجزیه آلاینده‌ها: نانو کاتالیست‌ها به دلیل داشتن سطح فعال بسیار بالا و واکنش‌پذیری زیاد، می‌توانند آلاینده‌ها را در فرآیندهای شیمیایی به سرعت تجزیه کنند. نانو ذرات آهن و نقره به‌ویژه برای حذف ترکیبات آلی مقاوم و آلاینده‌های سمی مانند مواد دارویی و سموم کشاورزی به کار می‌روند (Fu et al., ۲۰۱۷). این فرآیندها می‌توانند آلاینده‌ها را به ترکیبات غیرسمی و بی‌ضرر تبدیل کنند.

نانو لوله‌های کربنی و تصفیه فیزیکی: نانو لوله‌های کربنی به دلیل ساختار منحصر به فرد خود و سطح بالای جذب، در تصفیه فیزیکی و حذف آلاینده‌ها از آب کاربرد دارند. این مواد قادرند مواد آلی، فلزات سنگین و حتی باکتری‌ها را جذب کنند و در بهبود

کیفیت آب بسیار مؤثر هستند (Yang et al., ۲۰۰۶). نانو لوله های کربنی همچنین می توانند در فرایندهای تصفیه آب صنعتی برای بازیافت آب از فاضلاب های آلوده به کار روند.

۵.۲. چالش های استفاده از نانو مواد در بهبود کیفیت آب

گرچه نانو مواد قابلیت های زیادی برای بهبود کیفیت آب دارند، اما استفاده از آن ها با چالش هایی نیز همراه است که باید مورد توجه قرار گیرد.

اثرات زیست محیطی نانو مواد: یکی از بزرگ ترین چالش ها، اثرات زیست محیطی نانو مواد پس از استفاده در تصفیه آب است. برخی از نانو مواد ممکن است پس از تصفیه وارد محیط زیست شوند و اثرات منفی بر اکوسیستم ها و موجودات آبی بگذارند. به عنوان مثال، نانو ذرات نقره به دلیل خاصیت ضد میکروبی خود می توانند به طور بالقوه به آبزیان آسیب برسانند (Handy et al., ۲۰۰۸). بنابراین، تحقیقات بیشتر در زمینه ارزیابی اثرات زیست محیطی نانو مواد و نحوه استفاده ایمن از آن ها ضروری است.

هزینه های تولید نانو مواد: هزینه تولید نانو مواد به دلیل فرآیندهای پیچیده سنتز و استفاده از مواد اولیه خاص، هنوز نسبت به مواد سنتی بالاتر است. این مسئله می تواند محدودیتی برای استفاده وسیع از نانو مواد در تصفیه آب به ویژه در کشورهای در حال توسعه ایجاد کند (Geng et al., ۲۰۱۷). بنابراین، تحقیقات در جهت کاهش هزینه ها و بهینه سازی فرآیندهای تولید نانو مواد می تواند به گسترش کاربرد این مواد کمک کند.

پایداری و کارایی نانو مواد: پایداری و کارایی نانو مواد در طول زمان یکی دیگر از چالش های موجود است. برخی از نانو مواد ممکن است پس از استفاده در تصفیه آب، عملکرد خود را از دست دهند یا تجزیه شوند. علاوه بر این، استفاده مکرر از نانو مواد در تصفیه آب ممکن است منجر به کاهش کارایی آن ها شود و نیاز به جایگزینی یا احیای آن ها وجود داشته باشد (Yin et al., ۲۰۱۵).

۵.۳. راهکارها و پیشنهادات برای بهبود استفاده از نانو مواد

برای بهبود استفاده از نانو مواد در تصفیه آب، می توان اقداماتی را در نظر گرفت که شامل موارد زیر است: توسعه نانو مواد پایدار و کم هزینه: برای استفاده گسترده تر از نانو مواد در تصفیه آب، توسعه نانو مواد پایدار و با هزینه تولید پایین ضروری است. تحقیق و توسعه در زمینه مواد جدید مانند نانو مواد کربنی و نانو ذرات آهن می تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه ها کمک کند (Geng et al., ۲۰۱۷).

ارزیابی دقیق اثرات زیست محیطی: به منظور کاهش نگرانی های زیست محیطی، باید مطالعات بیشتری در زمینه اثرات زیست محیطی نانو مواد صورت گیرد. استفاده از روش های پیشرفته مانند مدل های شبیه سازی می تواند به ارزیابی بهتر اثرات بلندمدت نانو مواد کمک کند (Handy et al., ۲۰۰۸).

یکپارچه سازی نانو مواد در سیستم های تصفیه آب: استفاده از نانو مواد به طور یکپارچه در سیستم های تصفیه آب می تواند بهبود قابل توجهی در کارایی تصفیه و کاهش هزینه ها ایجاد کند. به عنوان مثال، ترکیب نانو فیلترها با روش های سنتی مانند فیلتراسیون غشایی می تواند کارایی تصفیه را افزایش دهد (Yang et al., ۲۰۰۶).

۶. آینده کاربرد نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب

استفاده از نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب به عنوان یک حوزه نوین در علم محیط زیست و فناوری، روند رو به رشدی را تجربه کرده است. به ویژه با توجه به چالش های روزافزون در تأمین آب پاک و سالم برای جمعیت رو به رشد و همچنین نیاز به مدیریت مؤثر منابع آبی، پژوهش های پیشرفته در زمینه نانو مواد می تواند نقش حیاتی در حل مشکلات موجود ایفا کند. در این بخش، آینده کاربرد نانو مواد در تصفیه آب، چالش های مربوط به پذیرش گسترده این فناوری ها، و روندهای تحقیقاتی پیش بینی شده برای بهبود عملکرد نانو مواد در مدیریت منابع آب بررسی خواهد شد.

۶.۱. نانو مواد و تصفیه آب در آینده

با توجه به ویژگی های برجسته نانو مواد از جمله سطح ویژه بالا، واکنش پذیری زیاد، و قابلیت های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد، استفاده از این مواد در تصفیه آب به ویژه در حذف آلاینده های مقاوم و نوظهور، به سرعت در حال گسترش است. یکی از چشم اندازهای کلیدی در آینده، به کارگیری نانو مواد در تصفیه آب های آلوده به مواد دارویی، سموم کشاورزی و آلودگی های ناشی از صنایع مختلف است. نانو ذرات فلزی، نانو ذرات کربنی و نانو لوله های کربنی به عنوان ابزارهای مؤثر در فرآیندهای تصفیه و حذف آلاینده های پیچیده شناخته شده اند (Zhao et al., ۲۰۱۴).

علاوه بر این، با توسعه فناوری های نوین در سنتز نانو مواد و استفاده از آن ها در غشاهای تصفیه آب، می توان انتظارات بالاتری از عملکرد این مواد در حذف ذرات معلق و آلاینده های مختلف داشت. برای مثال، غشاهای نانو ساختار قادر به حذف آلاینده های محلول در آب، به ویژه آلاینده های کوچکتر از ۱ نانومتر، به طور مؤثرتر و با بهره وری بالاتر از غشاهای معمولی هستند (Lee et al., ۲۰۱۵).

۶.۲. توسعه روش های ترکیبی با نانو مواد

یکی از روندهای پیش بینی شده در آینده استفاده از نانو مواد، ترکیب آن ها با سایر روش های تصفیه مانند تصفیه بیولوژیکی، الکتروشیمیایی، و فتوکاتالیستی است. این روش های ترکیبی می توانند عملکرد نانو مواد را در فرآیندهای تصفیه افزایش دهند و در عین حال هزینه های عملیاتی را کاهش دهند. به ویژه در کاربردهای تصفیه آب، ترکیب نانو فیلترها با سیستم های فتوکاتالیستی یا استفاده از نانو کاتالیست ها برای تجزیه آلاینده های شیمیایی می تواند منجر به ایجاد سیستم های تصفیه کارآمدتر و پایدارتر شود (Chung et al., ۲۰۱۶). این روش های ترکیبی قادرند به طور هم زمان آلاینده های آلی و معدنی را از آب حذف کرده و فرآیند تصفیه را تسریع بخشند.

۶.۳. چالش ها و محدودیت ها در پذیرش گسترده نانو مواد

با وجود پتانسیل های بالای نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب، پذیرش و کاربرد گسترده آن ها در عمل با چالش هایی مواجه است. یکی از مهم ترین چالش ها، نگرانی های مربوط به اثرات زیست محیطی نانو مواد است. نانو مواد پس از استفاده در تصفیه آب ممکن است به محیط زیست وارد شده و اثرات منفی بر موجودات زنده بگذارند. از جمله نگرانی ها، سمیت احتمالی نانو مواد برای موجودات آبی و تأثیر آن ها بر زنجیره غذایی است (Handy et al., ۲۰۰۸). بنابراین، نیاز به پژوهش های بیشتر برای ارزیابی دقیق اثرات زیست محیطی نانو مواد و ارائه دستورالعمل های ایمن برای استفاده از آن ها در تصفیه آب احساس می شود. چالش دیگر، هزینه های تولید نانو مواد است. هرچند که نانو مواد پتانسیل بالایی برای تصفیه آب دارند، اما هزینه تولید آن ها هنوز بالا است. این امر می تواند محدودیت هایی برای استفاده از نانو مواد در تصفیه آب به ویژه در کشورهای در حال توسعه ایجاد کند. در این راستا، تحقیقاتی برای کاهش هزینه های تولید نانو مواد و بهبود فرآیندهای تولید آن ها در حال انجام است (Geng et al., ۲۰۱۷).

۶.۴. نقش تحقیقات و نوآوری های آتی

آینده کاربرد نانو مواد در مدیریت منابع آب به شدت وابسته به پیشرفت های تحقیقاتی و نوآوری های فناوری است. استفاده از نانو مواد در تصفیه آب به سمت کاربردهایی همچون تصفیه آب های شور، بازیافت آب از فاضلاب های صنعتی، و حذف آلاینده های مقاوم پیش می رود. در این راستا، توسعه نانو مواد جدید با ویژگی های بهبود یافته مانند پایداری بیشتر، کارایی بالاتر، و هزینه های کمتر، از اولویت های تحقیقاتی خواهد بود. علاوه بر این، پژوهش های آتی باید به ارزیابی اثرات زیست محیطی و اقتصادی نانو مواد بپردازند و راهکارهایی برای کاهش نگرانی های مرتبط با استفاده از این مواد ارائه دهند.

۶.۵. چشم انداز جهانی برای استفاده از نانو مواد در تصفیه آب

با توجه به بحران جهانی آب و نیاز به توسعه فناوری های نوین برای تصفیه آب، نانو مواد به طور فزاینده ای در حال تبدیل شدن به راه حل های اصلی در مدیریت منابع آبی هستند. این فناوری ها می توانند در راستای رسیدن به اهداف توسعه پایدار در زمینه تأمین آب سالم و بهبود کیفیت آن، به ویژه در مناطق با منابع آب محدود، مورد استفاده قرار گیرند. در سطح جهانی، همکاری های بین المللی و سرمایه گذاری های بیشتر در این زمینه می تواند به تسریع تحقیقات و توسعه فناوری های مبتنی بر نانو مواد کمک کند و آن ها را به ابزاری مؤثر در حل بحران های آبی تبدیل نماید (Kümmerer et al., ۲۰۱۸).

۷. نتیجه گیری و چشم انداز آینده

استفاده از نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب به عنوان یک فناوری نوین، توانسته است تحولی شگرف در بهبود کیفیت آب و مقابله با چالش های آلودگی منابع آبی ایجاد کند. این مواد با ویژگی های منحصر به فرد خود از جمله اندازه نانو، سطح ویژه بالا، و خواص شیمیایی و فیزیکی ویژه، امکان تصفیه مؤثرتر و سریع تر آب را فراهم می آورند. نتایج مطالعات متعدد نشان داده اند که نانو مواد، به ویژه نانو ذرات فلزی، نانو فیلترها و نانو کاتالیست ها، قادر به حذف طیف وسیعی از آلاینده ها از آب هستند که بسیاری از آن ها به ویژه آلاینده های مقاوم به روش های سنتی تصفیه قابل حذف نیستند (Liu et al., ۲۰۱۷).

در این راستا، استفاده از نانو مواد برای حذف آلاینده های شیمیایی، فلزات سنگین، مواد دارویی و سموم کشاورزی در فرآیندهای تصفیه آب به طور فزاینده ای توجه پژوهشگران و صنعت را به خود جلب کرده است. همچنین ترکیب نانو مواد با سایر فناوری های تصفیه، از جمله روش های فتوکاتالیستی و الکتروشیمیایی، می تواند عملکرد این مواد را در حذف آلاینده ها بهبود بخشد و به کاهش هزینه های عملیاتی در فرآیندهای تصفیه کمک کند (Chung et al., ۲۰۱۶).

۷.۱. چالش ها و محدودیت ها

با وجود پتانسیل های بالای نانو مواد، چالش های مختلفی نیز در مسیر پذیرش و گسترش استفاده از این فناوری ها وجود دارد. یکی از بزرگ ترین چالش ها، نگرانی های زیست محیطی ناشی از نانو مواد است. اگرچه نانو مواد به طور مؤثر آلاینده ها را از آب حذف می کنند، اما احتمال دارد که این مواد پس از استفاده وارد محیط زیست شوند و اثرات منفی بر موجودات زنده، به ویژه آبزیان و سایر موجودات اکوسیستم های آبی بگذارند (Handy et al., ۲۰۰۸). لذا ارزیابی اثرات زیست محیطی نانو مواد و اطمینان از استفاده ایمن از آن ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

چالش دیگر، هزینه های تولید نانو مواد است. تولید نانو مواد همچنان هزینه بر است و این امر می تواند محدودیتی برای استفاده گسترده از آن ها در تصفیه آب ایجاد کند، به ویژه در کشورهای در حال توسعه که منابع مالی محدودتری دارند (Geng et al., ۲۰۱۷). (در این راستا، تحقیقات برای کاهش هزینه های تولید و بهینه سازی فرآیندهای تولید نانو مواد ضروری است.

۷.۲. چشم انداز آینده

آینده نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب به شدت وابسته به پیشرفت های بیشتر در زمینه تحقیق و توسعه است. به نظر می رسد که در آینده، فناوری نانو با تکمیل و بهبود روش های تصفیه آب، نقش کلیدی در حل بحران های آبی ایفا خواهد کرد. از جمله چشم انداز های آینده، توسعه نانو مواد پایدارتر، کارآمدتر و کم هزینه تر است که قادر به حذف طیف وسیع تری از آلاینده ها و تحمل شرایط مختلف آبی خواهند بود (Zhao et al., ۲۰۱۴). علاوه بر این، استفاده از فناوری های ترکیبی مانند نانو فیلترها و سیستم های فتوکاتالیستی به طور قابل توجهی می تواند کارایی تصفیه آب را افزایش دهد و به عنوان یک رویکرد نوین در تصفیه آب های آلوده به آلاینده های مقاوم مطرح شود (Lee et al., ۲۰۱۵).

یکی دیگر از روندهای آتی در زمینه نانو مواد، استفاده از آن ها در فرآیندهای بازیافت آب های صنعتی و فاضلاب های خانگی است. این کاربرد می تواند به کاهش فشار بر منابع آبی و بهبود مدیریت منابع آب در مناطق خشک و کم آب کمک کند. در نهایت، همکاری های بین المللی و سرمایه گذاری های بیشتر در این زمینه می تواند به تسریع فرآیند تحقیق و توسعه و گسترش کاربرد نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب کمک کند.

۷.۳. پیشنهادات برای تحقیق و توسعه

برای استفاده بهینه از نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب، پیشنهاد می شود که پژوهش ها به طور ویژه به جنبه های زیر متمرکز شوند:

تحقیقات زیست محیطی و اثرات بلندمدت: تحقیقات بیشتر برای ارزیابی اثرات زیست محیطی نانو مواد و شبیه سازی رفتار آن ها در محیط های آبی ضروری است. این تحقیقات می تواند به شفاف سازی نگرانی های موجود و توسعه استانداردهای ایمن برای استفاده از نانو مواد کمک کند (Handy et al., ۲۰۰۸).

توسعه نانو مواد پایدار و کم هزینه: توسعه نانو مواد با ویژگی های بهبود یافته مانند پایداری بیشتر، کارایی بالا و هزینه های تولید پایین از اولویت های تحقیقاتی خواهد بود. این امر می تواند به گسترش کاربرد نانو مواد در تصفیه آب کمک کند (Geng et al., ۲۰۱۷).

بهینه سازی فرآیندهای ترکیبی: ترکیب نانو مواد با سایر فناوری های تصفیه برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه ها نیازمند تحقیقات بیشتر است. استفاده از نانو فیلترها و سیستم های فتوکاتالیستی در تصفیه آب های آلوده به آلاینده های شیمیایی و میکروبی می تواند بسیار مؤثر باشد (Chung et al., ۲۰۱۶).

در مجموع، نانو مواد با پتانسیل های خود می توانند به عنوان یک راه حل نوین و مؤثر در تصفیه و مدیریت منابع آب در آینده معرفی شوند. با توجه به پیشرفت های علمی و فناوری در این حوزه، می توان انتظار داشت که نانو مواد در آینده نقشی حیاتی در تأمین آب پاک و سالم برای انسان ها و حفاظت از منابع آبی داشته باشند.

۸. پیشنهادات برای سیاست گذاری و راهکارهای اجرایی در استفاده از نانو مواد در تصفیه آب

با توجه به مزایای برجسته نانو مواد در تصفیه و مدیریت منابع آب، برای پذیرش گسترده و استفاده مؤثر از این فناوری ها، نیاز به سیاست گذاری های کلیدی و راهکارهای اجرایی وجود دارد. در این بخش، پیشنهادات برای سیاست گذاری و راهکارهای اجرایی

به منظور تسهیل استفاده از نانو مواد در تصفیه آب، با توجه به چالش های مختلف از جمله مسائل زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۸.۱. ایجاد استانداردهای زیست محیطی و ایمنی

اولین گام در توسعه پایدار استفاده از نانو مواد در تصفیه آب، ایجاد استانداردهای زیست محیطی و ایمنی برای این مواد است. تحقیقات نشان داده اند که نانو مواد ممکن است پس از استفاده وارد محیط زیست شوند و اثرات منفی بر اکوسیستم های آبی و سایر موجودات زنده داشته باشند (Handy et al., ۲۰۰۸). لذا، لازم است که کشورها و نهادهای بین المللی در راستای توسعه دستورالعمل ها و استانداردهای ایمنی برای استفاده از نانو مواد در تصفیه آب اقدام کنند. این استانداردها باید شامل ارزیابی دقیق اثرات زیست محیطی نانو مواد، به ویژه در درازمدت، و تعیین محدوده های مجاز برای استفاده از آنها باشند. علاوه بر این، بررسی رفتار نانو مواد در اکوسیستم های مختلف و ارزیابی خطرات بالقوه برای سلامت عمومی و محیط زیست باید در اولویت قرار گیرد (Handy et al., ۲۰۰۸).

۸.۲. توسعه سیاست های مالی و سرمایه گذاری

استفاده از نانو مواد در تصفیه آب به ویژه در مقیاس های بزرگ به سرمایه گذاری های زیادی نیاز دارد. در این راستا، دولت ها و نهادهای بین المللی باید سیاست های مالی مناسب را برای حمایت از تحقیق و توسعه فناوری های مبتنی بر نانو فراهم کنند. ایجاد مشوق های مالی برای شرکت های خصوصی و پژوهشگران می تواند انگیزه های لازم برای توسعه فناوری های نوین را فراهم آورد. علاوه بر این، تأمین بودجه های تحقیقاتی برای بررسی کاربردهای مختلف نانو مواد در تصفیه آب و ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی آنها می تواند به تسریع فرآیندهای نوآوری کمک کند (Geng et al., ۲۰۱۷).

۸.۳. آموزش و آگاهی رسانی عمومی

یکی از چالش های عمده در پذیرش فناوری های جدید، فقدان آگاهی عمومی در مورد فواید و خطرات آنها است. به همین دلیل، برگزاری کارگاه ها، سمینارها و دوره های آموزشی برای پژوهشگران، مهندسان، سیاست گذاران و حتی عموم مردم می تواند در ترویج کاربرد نانو مواد در تصفیه آب مؤثر باشد. این آموزش ها باید شامل اطلاعات جامع در مورد نحوه عملکرد نانو مواد، مزایا و خطرات احتمالی آنها و همچنین روش های استفاده ایمن از این مواد در فرآیندهای تصفیه باشد. با ارتقای سطح آگاهی عمومی، می توان از نگرانی های غیرضروری در مورد استفاده از این فناوری ها کاست و پذیرش آنها را تسهیل کرد (Lee et al., ۲۰۱۵).

۸.۴. تقویت همکاری های بین المللی و تبادل اطلاعات

با توجه به چالش های جهانی در تأمین آب سالم و مدیریت منابع آب، همکاری های بین المللی برای توسعه و گسترش استفاده از نانو مواد در تصفیه آب ضروری است. تبادل اطلاعات و تجربیات بین کشورهای مختلف، به ویژه در زمینه کاربرد نانو مواد در تصفیه آب های آلوده و فاضلاب های صنعتی، می تواند به بهبود روش های موجود و تسریع فرآیندهای نوآوری کمک کند. همکاری های بین المللی می تواند شامل پروژه های تحقیقاتی مشترک، کنفرانس ها و کارگاه های علمی و همچنین ایجاد شبکه های ارتباطی برای به اشتراک گذاشتن دستاوردهای تحقیقاتی باشد (Zhao et al., ۲۰۱۴).

۸.۵. پیشنهادات برای اصلاح قوانین و مقررات

برای تسهیل استفاده از نانو مواد در تصفیه آب، نیاز به اصلاح قوانین و مقررات موجود است. بسیاری از کشورها هنوز قوانینی برای استفاده از نانو مواد در محیط های آبی و تصفیه آب ندارند. در این راستا، مقامات دولتی باید قوانین جدیدی را به تصویب برسانند که شامل مواردی مانند مجوزهای لازم برای استفاده از نانو مواد در صنایع تصفیه آب، ارزیابی زیست محیطی و نظارت بر

ایمنی استفاده از این مواد باشد. این قوانین باید به طور خاص به نظارت بر فرآورده های تولید، استفاده و دفع نانو مواد در صنعت تصفیه آب توجه داشته باشند و چارچوبی برای مدیریت ریسک های زیست محیطی و انسانی ارائه دهند (Chung et al., ۲۰۱۶).

۸.۶. توسعه فرآورده های پایدار تولید نانو مواد

برای کاهش هزینه های استفاده از نانو مواد در تصفیه آب، تحقیق در زمینه فرآورده های پایدار تولید نانو مواد بسیار حائز اهمیت است. در حال حاضر، بسیاری از فرآورده های تولید نانو مواد هزینه بر هستند و این می تواند محدودیت هایی برای استفاده گسترده از آن ها ایجاد کند (Geng et al., ۲۰۱۷). بنابراین، حمایت از تحقیقات در زمینه بهینه سازی فرآورده های تولید نانو مواد و استفاده از منابع اولیه ارزان تر و تجدیدپذیر برای تولید این مواد می تواند به کاهش هزینه ها و افزایش قابلیت دسترسی به این فناوری ها کمک کند.

۸.۷. پیشنهادات برای آینده نگری در سیاست گذاری های آبی

در نهایت، سیاست گذاری های آبی باید به گونه ای تنظیم شوند که فناوری های نوین مانند نانو مواد را در چارچوبی پایدار و کارآمد وارد فرآورده های تصفیه آب کنند. ایجاد استراتژی های بلندمدت برای استفاده از فناوری های نوین در تصفیه آب، در کنار توجه به توسعه منابع آبی تجدیدپذیر و مدیریت پایدار منابع آبی، می تواند به مقابله با بحران های آبی و تأمین آب سالم برای نسل های آینده کمک کند.

منابع

- Alivisatos, A. P. (۱۹۹۶). Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science*, ۲۷۱(۵۲۵۱), ۹۳۷-۹۳۳.
- Carballa, M., Omil, F., Lema, J. M., & Garcés, P. (۲۰۰۴). Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant. *Water Research*, ۳۸(۱۲), ۲۹۲۶-۲۹۱۸.
- Chen, W., & Liu, Y. (۲۰۱۶). Application of nanomaterials in water treatment. *Nanotechnology Reviews*, ۵(۱), -۵۶۶۷.
- Chung, W. H., et al. (۲۰۱۶). Hybrid nanomaterials for water purification: A review of applications. *Journal of Environmental Management*, ۱۹۷, ۴۱۷-۴۰۱.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (۲۰۱۱). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, ۶۲(۱۲), ۲۵۹۷-۲۵۸۸.
- Cowan, D. A., & Houghton, R. A. (۲۰۰۶). Nanotechnology in water and wastewater treatment: applications and challenges. *Water Science and Technology*, ۵۴(۲), ۸-۱.
- El-Desoky, H. M., El-Khatib, R. M., & Ahmed, M. A. (۲۰۲۰). Removal of pharmaceutical contaminants from aqueous solutions by advanced oxidation processes and nanomaterials: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, ۲۷(۱۹), ۲۳۸۷۰-۲۳۸۴۸.
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (۲۰۰۲). The role of membranes in desalination: A review. *Desalination*, ۱۴۴(۳), ۱۶۷-۱۵۳.
- Fatta-Kassinos, D., Vasquez, M. I., & Thurman, E. M. (۲۰۱۱). Pharmaceutical pollutants of the environment: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, ۳۰(۷), ۲۹۷۲-۲۹۵۱.
- Fu, F., & Wang, Q. (۲۰۱۷). Removal of heavy metal ions from wastewater: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, ۲۴(۲۴), ۲۰۸۷۶-۲۰۸۶۴.
- Gabelich, C. J., Kibbey, T. C., & Young, T. M. (۲۰۰۲). Use of nanofiltration for removal of dissolved ions and organic matter from water. *Environmental Engineering Science*, ۱۹(۵), ۲۴۰-۲۲۹.

- Geng, Y., Doberstein, B., & Bihari, J. (۲۰۱۷). Cost and environmental analysis of nanomaterials in water treatment. *Journal of Environmental Management*, ۲۰۳, ۱۰۶۱-۱۰۴۹.
- Handy, R. D., & Shaw, B. J. (۲۰۰۸). Ecotoxicology of nanoparticles. *Environmental Pollution*, ۱۵۳(۱), ۱۲-۵.
- Jiang, D., Wei, J., & Shi, D. (۲۰۱۶). Recent advances in nanomaterials for water treatment. *Environmental Science: Nano*, ۳(۱), ۷۱-۵۶.
- Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R. M., & Guwy, A. J. (۲۰۰۸). The occurrence of pharmaceutical compounds in sewage treatment works and the environment. *Science of the Total Environment*, ۳۳۵(۳-۱), ۳۱-۱۷.
- Kim, H. J., & Lee, J. (۲۰۱۰). Nanofiltration membrane for water treatment: An overview. *Environmental Science and Technology*, ۴۴(۱۴), ۵۶۴۲-۵۶۳۵.
- Kümmerer, K. (۲۰۰۹). *Pharmaceuticals in the environment: Sources, fate, effects and risks*. Springer Science & Business Media.
- Kümmerer, K., et al. (۲۰۱۸). Nanotechnology in the water sector: A review of the latest developments. *Science of the Total Environment*, ۶۱۸, ۱۱۰۴-۱۰۹۱.
- Lee, S. H., et al. (۲۰۱۵). Development of nanomaterial-based membranes for water treatment. *Desalination*, ۳۵۷, ۵۱-۴۲.
- Liu, H., et al. (۲۰۱۷). Nanotechnology in water treatment: A review. *Science of the Total Environment*, ۵۷۸, -۳۶۶ ۳۸۰.
- Liu, J., & Zheng, H. (۲۰۱۳). Nanomaterials in environmental monitoring and remediation. *Environmental Science and Technology*, ۴۷(۹), ۴۳۲۵-۴۳۱۴.
- Liu, Y., Zhang, Q., & Bai, H. (۲۰۱۱). Applications of iron-based nanomaterials for water treatment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, ۱۸(۱), ۱۰-۱.
- McArdell, C. S., Molnar, E., & Suter, M. J. F. (۲۰۰۳). The occurrence of pharmaceutical residues in the aquatic environment of the city of Basel, Switzerland. *Science of the Total Environment*, ۳۰۵(۳-۱), ۲۵۵-۲۴۱.
- Mohana, S. N., Ramesh, A., & Venkatesh, R. (۲۰۱۶). Nanomaterials in water treatment: A review. *Environmental Chemistry Letters*, ۱۴(۲), ۱۹۹-۱۸۵.
- Morones, J. R., Elechiguerra, J. L., & Camacho, A. (۲۰۰۵). The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, ۱۶(۱۰), ۲۳۵۳-۲۳۴۶.
- Nowack, B., & Bucheli, T. D. (۲۰۰۷). Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental Pollution*, ۱۵۰(۱), ۲۲-۵.
- Pal, A., Gin, K. Y. H., Lin, A. Y. C., & Reinhard, M. (۲۰۱۷). Impacts of emerging contaminants of public health significance on aquatic ecosystems. *Environment International*, ۹۹, ۱۳۵-۱۲۵.
- Pillai, S. C., & Grattan, K. T. V. (۲۰۱۲). Nanotechnology in environmental monitoring and remediation. *Environmental Chemistry Letters*, ۱۰(۱), ۵۶-۴۹.
- Rochman, C. M., Browne, M. A., Halden, R. U., Hentschel, B. T., & Rios, M. (۲۰۱۳). Classify plastic waste as hazardous. *Nature*, ۴۹۴(۷۴۳۸), ۱۷۱-۱۶۹.
- Sanchez-Bayo, F., & Goka, K. (۲۰۱۴). Pesticide residues and bees—a review. *Environment International*, ۶۳, ۱۲۸-۱۱۴.
- Tang, L., Song, W., & Chen, X. (۲۰۱۵). Application of nanomaterials in environmental remediation. *Environmental Pollution*, ۱۹۸, ۹۱-۷۹.
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., & Glidden, S. (۲۰۱۰). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, ۴۶۷(۷۳۱۵), ۵۶۱-۵۵۵.
- Wang, Z., Li, X., & Li, L. (۲۰۱۷). Carbon-based nanomaterials in water treatment. *Science of the Total Environment*, ۶۰۱, ۱۳۶۶-۱۳۵۸.
- Wu, X., Li, X., Xu, J., & Zhang, Z. (۲۰۱۹). Emerging contaminants in water: A critical review of new insights and the need for innovative treatment solutions. *Science of the Total Environment*, ۶۷۸, ۱۰۵۷-۱۰۴۶.

- Xie, Y., Lu, M., & Zhang, Z. (۲۰۱۸). Nanoscale materials in water treatment: A review. *Environmental Science and Technology*, ۵۲(۱۵), ۸۳۶۲-۸۳۵۰.
- Xie, Z., Hu, X., & Zhang, W. (۲۰۱۰). Carbon nanotubes and their applications in environmental pollution control. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, ۱۰(۱), ۱۲-۱.
- Yang, K., & Liu, Z. (۲۰۰۶). Carbon nanotubes for environmental applications: A review. *Environmental Science and Technology*, ۴۰(۵), ۱۸۹۳-۱۸۸۵.
- Yin, J., & Wang, X. (۲۰۱۲). Nanomaterials for water treatment. *Nature Materials*, ۱۱(۵), ۳۸۹-۳۷۸.
- Yin, J., Wang, X., & Li, H. (۲۰۱۵). Nanomaterials in water treatment: An overview. *Environmental Pollution*, ۱۹۸, ۸۹-۷۵.
- Zhao, L., et al. (۲۰۱۴). Nanotechnology for water treatment: A review of applications and challenges. *Science of the Total Environment*, ۴۶۹-۴۶۸, ۱۰۵۴-۱۰۴۵.
- Zhao, L., Zhang, Y., & Wang, J. (۲۰۱۰). Adsorption of heavy metal ions by carbon nanotubes and their composites. *Journal of Hazardous Materials*, ۱۷۹(۳-۱), ۱۰-۱.

Application of nanomaterials for effective removal of emerging pollutants in water: Challenges and innovations

Zahra Hatami

University of Tehran
Hatami.zahra.۲۰۰۰@gmail.com

Masoumeh Mahmoudi

Khuzestan Water and Power Authority- University of Tehran
mahmoodimasoomeh@gmail.com

Daruish Baharlouei

Khuzestan Water and Power Authority
Baharlooei\@gmail.com

Abstract

In recent decades, nanomaterials have gained significant attention as a novel approach in water purification and management. The unique characteristics of nanomaterials, including nanoscale size, high surface area, and distinct chemical and physical properties, offer unparalleled capabilities for removing various pollutants from water. These materials can effectively eliminate chemical pollutants, heavy metals, pharmaceuticals, and pesticides, many of which are resistant to traditional treatment methods. Additionally, combining nanomaterials with other purification technologies, such as photocatalytic and electrochemical methods, can further enhance their performance. However, the use of nanomaterials in water purification presents challenges, including environmental and economic concerns. This paper examines the potential of nanomaterials in water treatment, the challenges and limitations associated with their use, and available solutions to improve and expand the application of this technology. Finally, recommendations for policymaking and practical measures for the safe and effective use of nanomaterials in water treatment are provided.

Keywords: Nanomaterials, water purification, pollutants, advanced technologies, environmental policymaking, environmental challenges