

# نقش فناوری نانو در تصفیه فاضلاب صنعتی

مترجم

امیر آذرنیا، کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شریف

کیفیت بالای آب، امری ضروری در بسیاری از فرآیندهای صنعتی است. این در حالی است که در بیشتر این فرآیندها، حجم زیادی فاضلاب صنعتی آلوده تولید می‌شود. فناوری نانو، ظرفیت تصفیه فاضلاب صنعتی با بازده بالاتر و هزینه کمتر را دارد، اما برای مشاهده تأثیر واقعی آن بایستی فناوری‌های بالقوه در مقیاس‌های بالاتر ظهور و بروز پیدا کند.

بخش اعظمی از آب‌های زیرزمینی و زیست‌محیطی، برای رفع نیازهای صنعتی و از جمله نیازهای کشاورزی استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، در آمریکا ۴۵ درصد از کل آب‌های سطحی در واحدهای صنعتی و کشاورزی مصرف می‌شود. در بسیاری از موارد، به‌ویژه در تولید محصولات غذایی و آشامیدنی، فرآوری مواد شیمیایی و ساخت ریزتراشه‌ها، نیاز مبرمی به استفاده از آب با خلوص بالا وجود دارد. معمولاً فرآوری آب با کیفیت بالا در محل مصرف آن و یا در واحدهای مربوطه، طی مجموعه‌ای از مراحل تصفیه آب انجام می‌شود. این مراحل، اغلب شامل یک مرحله یون‌زدایی به روش‌هایی مانند اسمز معکوس یا تقطیر است. در برخی از صنایع مانند استخراج معادن، آب به‌عنوان محلول یا حاملی در طی فرآیند استخراج، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از مواد ارزشمند از فرآوری این آب به دست می‌آید. در صنایع نفت و گاز نیز حجم زیادی از آب تصفیه شده، در مراحل خردایش هیدرولیک و تزریق آب مورد نیاز است. اگرچه با پیشرفت‌های اخیر در حوزه فرمولاسیون شیمیایی، امکان استفاده از آب با درجه شوری بالا برای خردایش هیدرولیک مهیا شده است، اما در مرحله تزریق سیال همچنان به تصفیه آب پیش از استفاده مجدد نیاز است. بی‌شک حوزه کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین است. به‌عنوان مثال، ۶۲ درصد از آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. با توجه به استفاده فزاینده از آب بازیافتی در صنعت کشاورزی، به تصفیه مطمئن آب پیش از استفاده مجدد نیاز است. وجود نمک‌ها و فلزات سنگین، به‌ویژه در مناطقی که آب بازیافتی مصرفی به‌خوبی تصفیه نشده است، باعث افت کیفیت خاک می‌شود. یکی از ضروریات فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، تأمین آبی است که به اندازه کافی تمیز باشد؛ با این حال، هزینه بالای تصفیه آب با استانداردهای دقیق از موانع جدی موجود است. از طرف دیگر، چالش‌هایی نظیر خشک‌سالی، آلودگی منابع آب و نیازهای روزافزون، میزان دسترسی آب برای مصارف کشاورزی و استخراج نفت و گاز را محدود می‌کند و لذا تولید غذا و انرژی به امری پیچیده تبدیل می‌شود.

بسیاری از فرآیندهای تولید صنعتی، حجم زیادی فاضلاب آلوده تولید می‌کنند. نوع آلاینده‌های موجود در فاضلاب صنعتی بسته به فرآیند تولید مورد استفاده می‌تواند شامل اجزای آلی خاص (مخلوطی از آن‌ها)، درجه شوری بالا، فلزات سنگین، pH بالا یا پایین و کدورت زیاد ناشی از ذرات غیرآلی باشد. فاضلاب صنعتی معمولاً به دلیل مشخصات منحصر به فرد آلاینده‌ها و تولید آن‌ها در موقعیت‌های مکانی دوردست، نیاز به تصفیه اولیه با استفاده از تجهیزات اختصاصی تصفیه آب در محل تولید دارد؛ بنابراین، استفاده از فناوری‌های نوین با قابلیت تصفیه مؤثر و اقتصادی آب بازیافتی به‌منظور توسعه اقتصادی پایدار و

حفاظت از محیط زیست امری حیاتی محسوب می‌شود. این فناوری‌ها تصفیه جریان‌های فاضلابی پیچیده را با هدف احیای مجدد آب و بازیابی انرژی و مواد ارزشمند، میسر می‌سازند.

### ۱- چالش‌های پیش روی فناوری‌های موجود

غشاهای اسمز معکوس، جاذب‌ها و اکثر سطوح تبادل یون به ترتیب به فشار اسمزی و هیدرولیک و نیز رسوبات معدنی، ترکیبات ویژه با گروه‌های عاملی خاص و مواد شیمیایی مشخصی محدود می‌شوند. برای غلبه بر این چالش‌ها، لازم است فرآیندهای انجام شده در واحدهای مختلف تصفیه، قادر به حذف هم‌زمان آلاینده‌های متنوع شیمیایی (مواد آلی، غیرآلی و مواد خاص) و بازیافت انرژی و مواد ارزشمند (از قبیل عناصر قلیایی نادر، مواد مغذی و اسید و بازها) از طیف وسیعی از جریان‌های فاضلاب صنعتی باشند.

### ۲- فناوری نانو در تصفیه آب

انواع متعددی از نانومواد، در فرآیندهای مرتبط با تصفیه فاضلاب صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور تولید غشاهای رسانای جریان الکتریکی، شبکه‌های به هم پیوسته‌ای از نانولوله‌های کربنی (CNT) با اتصالات عرضی به صورت مجزا یا به صورت پوشش بر روی زیرلایه‌های متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. بسته به نوع پلیمرهای به کار برده شده برای برقراری اتصالات عرضی میان نانولوله‌های کربنی، اندازه حفرات در این غشاهای ۱۰۰ نانومتر تا زیر یک نانومتر قابل تغییر است؛ بنابراین، این دسته از مواد قابلیت استفاده در طیف وسیعی از کاربردها، از تصفیه زیستی فاضلاب صنعتی گرفته تا نمک‌زدایی شورابه‌های صنعتی را دارا هستند. این شبکه‌های به هم پیوسته از نانولوله‌های کربنی، عبور بار الکتریکی از سراسر سطح غشا را ممکن می‌سازند و لذا انرژی به طور مستقیم به فصل مشترک غشا/آب می‌رسد. این انرژی با هدف تأثیرگذاری بر روی نیروهای الکترواستاتیک، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و بهبود pH موضعی از طریق الکترولیز آب مصرف می‌شود. تبدیل انرژی الکتریکی برای جلوگیری از آلودگی و گرفتگی غشا (به عنوان مثال، رسوب زیستی، پوسته‌پوسته شدن مواد معدنی یا رسوب مواد آلی)، تغییر شکل آلاینده‌های آلی و غیرآلی و بهبود قابلیت انتخابی بودن غشا صورت می‌گیرد. علاوه بر این، با عامل دار کردن یا آلیش<sup>۲</sup> نانولوله‌های کربنی، واکنش پذیری کامپوزیت حاصل به شدت افزایش می‌یابد. نمک‌زدایی شورابه‌هایی با درجه شوری بالاتر از ۷۰ گرم بر لیتر،

تصفیه موفقیت آمیز آب آلوده علاوه بر فرآوری آب با کیفیت مطلوب، شامل نگهداری و حفاظت از فرآیندهای مربوط به واحدهای پایین دستی است. تصفیه فاضلاب صنعتی فرآیندی پیچیده بوده و غالباً نیاز است تا مراحل متوالی تصفیه چندین بار طی شود. این فرآیندها «زنجیره تصفیه» نامیده می‌شود. اگرچه تقطیر آب آلوده از بین رفتن تمامی آلاینده‌ها به جز آلاینده‌های فرار را تضمین می‌کند، اما به طور قابل ملاحظه‌ای گران است. علاوه بر این، تمامی آب‌های صنعتی نیازمند چنین تصفیه سنگینی نیستند. برای نمونه، در صورت حذف آلاینده‌های خاص از آب تولید شده در صنعت نفت و گاز، برای استفاده مجدد، به نمک‌زدایی کامل نیازی نیست؛ بنابراین، اتخاذ رویکرد تصفیه هدف‌دار (به جای استفاده از روش‌های فیزیکی مانند تقطیر که تنها آلاینده‌های مشخصی را از بین می‌برد و آب با کیفیت قابل تنظیم تولید می‌کند)، به طور قابل ملاحظه‌ای، قابلیت اجرایی بسیاری از فرآیندهای صنعتی را از نظر اقتصادی بهبود می‌دهد. علاوه بر این، اکثر فرآیندهای تصفیه موجود، از نظر اجرایی، با چالش‌های فراوانی روبه‌رو هستند. به عنوان نمونه، چربی موجود در فاضلاب، باعث لایه‌لایه شدن غشاهای تغییر ظرفیت جداسازی آن‌ها و جلوگیری از عملکرد متفاوت جاذب‌ها می‌شود. به این ترتیب، برای آنکه فرآیند تصفیه ممکن شود، انجام یک مرحله جداسازی چربی/آب الزامی است. میکروارگانیزم‌هایی که از مرحله پیش تصفیه حذف نشده‌اند، بر روی سطح غشاهای مخصوص نمک‌زدایی رسوب می‌کنند و مواد ضد عفونی‌کننده ته نشین نشده آب در مرحله پیش تصفیه، می‌تواند غشاهای نمک‌زدایی را اکسید یا نابود کند. مواد با حلالیت جزئی در آب آلوده، با حجم قابل توجهی، بر روی غشاهای رسوب کرده و عملکرد نمک‌زدایی از آب را کاهش می‌دهد. همچنین، آهن و مواد آلی باقی مانده می‌تواند رزین‌های مخصوص تبادل یون و جاذب‌های دیگر را آلوده کند. به این ترتیب، انجام فرآیند اکسیداسیون یا جذب سطحی پیش از تصفیه بیشتر آب الزامی است. به علاوه، ظرفیت فناوری‌های مورد بحث، به ویژه در زمینه بازیافت آب و کاهش درجه شوری به طور ذاتی محدود است. به عنوان مثال،

نظیر آنچه طی فرآیندهای تولید در صنایع نفت و گاز به وجود می‌آید، به دلیل نیاز به استفاده از فشارهای بالا در فرآیند استاندارد اسمز معکوس بسیار پیچیده است. در مورد این نوع شورا به‌ها، روش نمک‌زدایی مبتنی بر حرارت، بهترین روش خواهد بود. به دلیل مزیت جذب نور با پهنای باند وسیع و واپاشی غیرتشنعی پلاسما<sup>۲</sup>، نانوذرات پلاسما نشانده شده بر روی زیرلایه‌های متخلخل و فوم‌های مجزا یا شناور برای تولید حرارت مورد نیاز در تبدیل آب به بخار با استفاده از نور خورشید (به عنوان تنها منبع ورود انرژی)، به کار می‌روند. رویکردهای دیگری نیز برای نمک‌زدایی شورا به‌ها از طریق تولید بخار به کمک نور اتخاذ شده است که شامل استفاده از نانومواد با قابلیت جذب نور بالا نظیر کربن سیاه و نانوذرات Al-Ti-O است. یک رویکرد خلاقانه دیگر برای نمک‌زدایی از شورا به‌ها به کمک نور خورشید عبارت است از استفاده از نانوذرات اکسید گرافن (GO) شناور بر روی سطح آب. در اینجا، نانوذرات GO همانند برگ درخت فرآیند انتقال آب را بر عهده دارند. به این ترتیب که آب از طریق ساختار GO جذب شده و در عین حال گرمای خورشید به‌طور مؤثر برای تشکیل بخار مصرف می‌شود. یک رویکرد دیگر مبتنی بر فناوری نانو برای نمک‌زدایی حرارتی از شورا به‌هایی با درجه شوری بالا، استفاده از شبکه‌هایی از نانولوله‌های کربنی است که به عنوان مقاومت‌های الکتریکی، انرژی الکتریکی را به گرما تبدیل می‌کند. این شبکه‌ها قادرند با تبخیر مستقیم آب در فصل مشترک آب/غشا، بازده فرآیند نمک‌زدایی را به شدت افزایش دهند.

اصلاح سطوح و تغییر در انرژی سطحی مواد، روشی جالب توجه برای جلوگیری از ایجاد اتصالات سطحی است که به عنوان یکی از نگرانی‌های بزرگ در بسیاری از فرآیندهای تصفیه فاضلاب صنعتی مطرح است. استفاده از نانوذرات مختلف بر روی سطح غشا و درون حفرات آن، رویکردی جذاب برای تحقق این امر است. به عنوان نمونه، با استفاده از نانوذرات سیلیکای فلئوردار، می‌توان سطحی با انرژی پایین به دست آورد. این سطوح در برابر ترشوندگی با روغن بسیار مقاوم بوده و حین فرآیند تصفیه فاضلاب پرچربی - مانند آنچه طی تصفیه روغن یا فرآوری محصولات غذایی ایجاد می‌شود - کارایی بالایی دارند. در تصفیه آب با غلظت بالایی از باکتری‌ها، به منظور جلوگیری از اتصال میکروبی به سطوح از عوامل ضد میکروب از قبیل نانوذرات نقره و اکسید گرافن بر روی سطوح استفاده می‌شود. این ترکیبات دارای نقش دوگانه در جلوگیری از رسوب زیستی هستند. این نانومواد،

سلول‌های باکتریایی را غیرفعال کرده و به دلیل ماهیت آب دوستی خود، با تشکیل لایه ضخیمی از آب، اتصال میکروبی را به حداقل می‌رسانند. راهکار متفاوت دیگر در به حداقل رساندن اتصال به سطوح، کاهش میزان آلاینده‌ها است. در شورا به‌هایی با درجه شوری بالا، نانوذرات مغناطیسی به‌طور طبیعی در فصل مشترک آب/چربی موجود در امولسیون‌های نفت خام جدایش می‌یابند. به این ترتیب، از برهم‌کنش آن‌ها با سطوح مانعت به عمل می‌آید و بازیابی آن‌ها از طریق اعمال میدان‌های مغناطیسی میسر می‌شود.

کشف و توسعه نانومواد لایه‌ای شامل اکسید گرافن، سولفید مولیبدن ( $MoS_2$ ) و لایه‌های نازک از کاربیدها، نیتربدها و کربونیتربدهای فلزات واسطه (MXenes)، به رشد سریع کاربرد آن‌ها در حوزه تصفیه فاضلاب صنعتی انجامیده است. به‌ویژه، وجود فواصل خاص بین لایه‌ای در این مواد منجر به توسعه نمک‌زدایی شورا به‌ها و جذب سطحی آلاینده‌های آبی شده است. گرافن تک‌لایه با اندازه حفرات مناسب، به دلیل ضخامت بسیار اندک خود، غشای ایده‌آلی برای نمک‌زدایی به شمار می‌آید. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این مواد امکان عبور آب با نرخ ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بزرگ‌تر از غشاهای اسمز معکوس را فراهم می‌کنند؛ اگرچه در این آنالیز اثر پلاریزاسیون غلظت در نظر گرفته نشده است. با وجود جذابیت فراوان، تولید غشاهایی از جنس گرافن تک‌لایه به دلیل دشواری در ساخت صفحات بزرگ و بدون عیب گرافن و ایجاد حفرات با اندازه مناسب، امری پیچیده است. با این حال، امکان تحقق این ایده در مقیاس بسیار کوچک با موفقیت همراه بوده است. استفاده از فاصله بین لایه‌ای اکسید گرافن به عنوان الک‌های مولکولی برای حذف یون‌ها از نظر تحقیقاتی دارای جذابیت قابل ملاحظه‌ای است. با آنکه اکسید گرافن خالص در داخل آب متورم می‌شود، اما عوامل متعددی می‌تواند فرآیند تورم آن را محدود کرده و امکان حذف هدفمند را فراهم سازد که شامل برقراری اتصالات عرضی هوشمند، احیای جزئی اکسید گرافن و یا تحدید فیزیکی لایه‌ها است. این رویکرد باعث ایجاد فواصل بین لایه‌ای تا زیر یک نانومتر می‌شود که حتی قادر به پس‌زدن یون‌های تک‌ظرفیتی است. نانومواد لایه‌ای دیگری نیز به عنوان مواد جاذب ویژه مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه، نشان داده شده است که  $MoS_2$  به دلیل وجود گروه‌های فعال S توانایی جذب انتخابی فلزات سنگین را دارد. از بین بردن و یا تغییر شکل ترکیبات آلی سمی یکی دیگر از

در حوزه تحقیقات کاربردی، (۲) احتیاط سرمایه‌گذار هنگام مواجهه با فناوری‌های نوین و (۳) عدم سرپرستی دولت در زمینه نظارت قانونی بر حوزه فناوری نانو. از طرف دیگر، سمیت بالقوه خود نانومواد نیز جای نگرانی است. این موضوع، تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه سمیت نانومواد برانگیخته است. مطالعات حاکی از آن است که قرار گرفتن دائمی در معرض نانومواد قطعاً برای سلامتی زیان بار خواهد بود؛ اما اثر مخرب رهایش نانومواد در محیط کم‌رنگ‌تر است، به ویژه اگر نانوماده مورد نظر بخشی از یک ماده کامپوزیتی باشد؛ چرا که با قرار گرفتن در محیط، فرآیندهایی نظیر کلوخته‌ای شدن<sup>۳</sup>، جذب سطحی بر روی مواد آلی طبیعی، رسوب کردن و اکسید شدن می‌تواند نانومواد را از حالت خالص و دست‌نخورده خود خارج کرده و لذا سمیت آن‌ها را تعدیل کند.

بسیاری از مواد و فناوری‌های نانویی که در اینجا توصیف شدند به صورت تجاری تولید نشده و در دسترس نیستند (دست‌کم در مقادیر بزرگ). این امر مستلزم راه‌اندازی و توسعه اکوسیستم‌های تولیدی کاملاً جدید پیش از تولید صنعتی و انبوه آن‌ها است؛ مثال بارز آن نیاز به ساخت صفحات بزرگ و بی‌عیب اکسید گرافن برای استفاده در فرآیند نمک‌زدایی در مقیاس صنعتی است. مقیاس فرآیند، چالش عمده و نهایی در حوزه تصفیه فاضلاب صنعتی است. طی فرآیندهای صنعتی، حجم بزرگی از آب و فاضلاب به ترتیب مصرف و تولید می‌شود و لذا فرآیندهای تصفیه مبتنی بر فناوری نانو بایستی اقتصادی، صنعتی و مؤثر باشد تا امکان پذیر و موفقیت‌آمیز تلقی شود. در نهایت، ضروری است که مراکز دانشگاهی به جای توسعه یک فناوری و جستجوی کاربرد برای آن، در راستای تأمین نیازهای صنعت گام بردارند. حوزه تصفیه فاضلاب صنعتی نیازهای خاصی دارد و اگر پژوهشگران و مصرف‌کنندگان نهایی در کنار هم در جهت توسعه راه‌حل‌های ممکن برای مشکلات معین تلاش کنند، به نفع کل جامعه خواهد بود.

چالش‌های پیش روی تصفیه فاضلاب صنعتی است، به ویژه زمانی که تخریب زیستی این نوع از آلاینده‌ها ناچیز باشد. تخریب فوتوکاتالیستی ترکیبات مقاوم با استفاده از نانومواد بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانوذرات فوتوکاتالیستی از جنس اکسید فلز از قبیل دی‌اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ )، هنگامی که در معرض نور قرار می‌گیرند، گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌کنند. به منظور گسترش طول موج‌های فوتون فعال‌کننده، طیف وسیعی از عناصر مختلف را با این مواد می‌آیند تا واکنش‌پذیری آن‌ها زیر نور خورشید به شدت افزایش پیدا کند. یکی از جدیدترین پیشرفت‌های انجام شده در این زمینه، استفاده از نانوذرات پلاسما برای تولید گونه‌های فعال اکسیژن است. مزیت عمده این مواد پلاسما توانایی آن‌ها برای فوتوستیز توسط نور مرئی است که باعث کاهش نیاز به استفاده از لامپ‌های گران‌قیمت فرابنفش می‌شود. با این حال، همانند تمامی فرآیندهای تخریب فوتوکاتالیستی آلاینده‌های آبی مبتنی بر نور، با موانع قابل توجهی مواجه است. به ویژه، کاربرد این فناوری‌ها در مقیاس بالا به دلیل نیاز به فراهم کردن نسبت‌های سطح به حجم بزرگ در طراحی راکتور، امری دشوار و چالش برانگیز است.

### ۳- چالش‌ها و فرصت‌های پیش رو

استفاده از فناوری نانو در تصفیه فاضلاب صنعتی به واسطه کاهش هزینه‌های تصفیه و قابلیت حذف آلاینده‌هایی که طی فرآیندهای متداول پیشین غیرقابل حذف بودند، نوید تجاری‌سازی بسیاری از این فرآیندها را می‌دهد. با این وجود، هنوز هم موانع متعددی بر سر راه این امر وجود دارد که بایستی برطرف شود. اگرچه بسیاری از فناوری‌های ذکر شده دارای مدارک مستند دال بر امکان انجام موفق آن‌ها هستند، لیکن تنها تعداد اندکی از آن‌ها تا مرحله عملی پیش رفته است. موانع بسیاری بر سر راه تجاری‌سازی آن‌ها قرار دارد که شامل موارد زیر است: (۱) عدم سرمایه‌گذاری دولتی

#### پی‌نوشت‌ها

۱. Reactive oxygen species (ROS)

۳. Non-radiative plasmon decay

۲. Doping

۴. Aggregation

#### منبع

۱. David Jassby, Tzahi Y. Cath and Herve Buisson, The role of nanotechnology in industrial water treatment. Nature nano-technology 13, no. 8 (2018): 670-672.