



مروری بر تصفیه آب و فاضلاب به کمک نانومواد

مترجم: آیدین هادی فکور

کارشناس ارشد مهندسی نانومواد، پژوهشگاه مواد و انرژی
 aidin.hadifakoor@gmail.com

همچنین برتری‌ها و آینده نانوکامپوزیت‌های مختلف را به اختصار بیان خواهیم کرد.

کلمات کلیدی: تصفیه آب، فناوری نانو و میکرو، نانومواد، نانوکامپوزیت

۱ مقدمه

پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۲۵، ۵۰٪ از جمعیت جهان در مناطقی زندگی کنند که تحت فشار کمبود شدید آب قرار دارد. تا سال ۲۰۱۵ تنها حدود ۲۰٪ از فاضلاب‌های جهان تصفیه می‌شد. در کشورهای در حال توسعه تقریباً ۷۰٪ از فاضلاب‌های صنعتی بدون کمک مناسب سازمان ملل به هدر خواهد رفت. برآورده کردن نیازهای آبی روزافزون، چه در کشورهای صنعتی و چه در حال توسعه، بسیار سخت است و رشد زیرساخت‌ها و روش‌های جدید تصفیه آب، سرعت کمتری نسبت به رشد نیاز به آب دارد. به همین دلیل، روش‌های جدید تصفیه آب با کارایی بالا و هزینه کم در اولویت قرار دارد. پیشرفت‌های اخیر در نانومواد منجر به تسهیل در استفاده از فناوری

در این مقاله مروری، کاربردهای کنونی نانومواد در تصفیه آب و فاضلاب توضیح داده می‌شود و استفاده از نانومواد گوناگون شامل نانومواد بر پایه کربن، نانوذرات فلزی و اکسید فلزی و همچنین نانوذرات فلزی نجیب در حذف آلودگی از آب مورد بحث قرار می‌گیرد. زمانی که از نانومواد برای کاربردهای بزرگ مقیاس در تصفیه آب صحبت به میان می‌آید، باید در نظر داشت که مشکلات ذاتی زیادی در مسیر قرار دارد مانند انباشتگی، مشکلات جداسازی، نشت نانومواد به آب‌های تماسی و همچنین اثرات مخرب احتمالی بر روی اکوسیستم و سلامتی انسان. مواد نانوکامپوزیتی که به تازگی تولید می‌شوند مجموعه‌ای از ویژگی‌های مثبت نانوذرات به همراه ویژگی‌های میزبان‌های جامد در ابعاد مختلف را به همراه دارند. این مسئله گامی بزرگ در راستای کاربردهای بزرگ مقیاس به شمار می‌رود. در این مقاله به‌طور ویژه مبحث نانوکامپوزیت‌های محیط‌زیستی مانند نانوکامپوزیت‌های ارگانیک و غیرارگانیک، غشاهای نانوکامپوزیتی و نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

نانو در فرآیند تصفیه آب شده است. تاکنون مطالعات مختلف نشان داده است که نانومواد قابلیت‌های فراوانی در تصفیه آب به ویژه در جذب فیزیکی، فرآیند غشایی، اکسیداسیون کاتالیستی و عفونت‌زدایی دارد. متاسفانه بیشتر گزارش‌ها در مورد نانومواد تنها در آزمایشگاه‌ها انجام شده و یا فقط نشان می‌دهد که این روش به‌طور کلی خوب است. یکی از فناوری‌های نانو که در بازار در دسترس است استفاده از نانوذرات تک ظرفیتی با استفاده از تزریق است. این روش به‌طور گسترده در آمریکا برای بهینه‌سازی آب‌های زیرزمینی به‌کار رفته است. از زمانی که قیمت نانومواد کاهش یافته، استفاده از آن‌ها در تصفیه آب آسان‌تر شده است؛ اما در هر صورت هنوز ضعف‌های ذاتی زیادی در زمینه استفاده مستقیم از نانوذرات در تصفیه آب وجود دارد.

اولاً، نانوذرات در سیستم‌های سیال، تمایل دارند تا در یک منطقه تجمع کنند که این منجر به افت شدید فشار می‌شود. دوم اینکه جدا کردن نانوذراتی که کارایی خود را از دست داده‌اند (به‌جز نانوذرات مغناطیسی)، از آب تصفیه شده بسیار دشوار است. این مسئله از منظر اقتصادی دلخواه نیست. سوم اینکه رفتار و سرنوشت نانومواد مصرف‌شده در تصفیه آب و فاضلاب به خوبی درک نشده است و تأثیر نانومواد در محیط‌های آبی و سلامتی انسان، می‌تواند پیشرفت‌ها در این زمینه را به تعویق بیندازد.

برای جلوگیری از اثرات مخرب نیاز به ساخت دستگاهی احساس می‌شود که هم‌زمان با اینکه فعالیت نانومواد در آن زیاد است از رهاسازی و جابه‌جایی نانومواد جلوگیری کند. نانوکامپوزیت‌ها گزینه‌ای مناسب در این مسیر به نظر می‌رسند. نانوکامپوزیت‌ها معمولاً با ساخت نانوذرات دلخواه روی مواد پایه، مانند پلیمرها یا غشاها ساخته می‌شوند. نانوکامپوزیت می‌تواند به‌صورت مواد چندفازی که یک بعد آن کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر است، تعریف شود. بعضی از نانوکامپوزیت‌ها در تصفیه آب بسیار کارا بوده‌اند؛ قابل استفاده مجدد، مقرون به‌صرفه و قابل رقابت با زیرساخت‌های کنونی.

نانوذرات و نانوکامپوزیت‌ها، هر دو در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند و عملکرد و مکانیزم گندزدایی توسط این نانومواد به‌طور ویژه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نمود این نانومواد در تصفیه آب به اختصار توضیح داده خواهد شد.

۲ توضیح مختصری درباره فناوری نانو در بخش آب

ابتدا توضیحی مختصر در زمینه‌های مانند جذب فیزیکی، جداسازی، اکسیداسیون کاتالیستی، گندزدایی و آشکارسازی خواهیم داد.

۱.۲ جذب فیزیکی و جداسازی

جذب فیزیکی یا فرآیند جداسازی بر پایه غشای، دو فناوری سرآمد برای تصفیه آب و فاضلاب به‌شمار می‌آیند. جذب‌کننده‌های سنتی غالباً با مشکلاتی مانند گنجایش و انتخاب‌پذیری کم و همچنین کوتاه بودن چرخه جذب-باززایی همراه بوده‌اند که به همین علت، این جذب‌کننده‌ها مقرون به‌صرفه نبوده‌اند.

جذب‌کننده‌های بر پایه نانومواد، مثلاً فلزها یا اکسیدهای فلزی نانومقیاس، نانولوله‌های کربنی، گرافن و نانوکامپوزیت‌ها معمولاً دارای سطح ویژه بزرگ، واکنش‌پذیری بالا، سرعت واکنش سریع و میل ترکیبی خاص با آلاینده‌های گوناگون هستند. کارایی جذب این مواد به مراتب بالاتر از جذب‌کننده‌های سنتی است.

در کنار جذب، جداسازی غشایی، مرحله‌ای مهم در تصفیه آب محسوب می‌شود که امکان احیاء آب از منابع غیرمعمول مانند فاضلاب‌های شهری را فراهم می‌آورد. حذف آلودگی‌ها با جداسازهای غشایی عمدتاً مبتنی بر اندازه است. در هر صورت، هنوز موانع زیادی برای پیشبرد فناوری غشاها وجود دارد، مثلاً متضاد بودن ذاتی انتخاب‌پذیری و تراوایی، مصرف انرژی زیاد و پیچیدگی‌های اجرایی. برای رفع این موانع، غشاها نانوکامپوزیتی پیشرفته با معرفی نانوذرات کاربردی به درون غشاها گسترش داده شده‌اند. این طبقه جدید غشاها ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی بهبودیافته‌ای از خود نشان می‌دهد که از این بین می‌توان به پایداری گرمایی یا مکانیکی بهینه شده و تخلخل و آب‌دوستی بهتر اشاره کرد. بعضی از این غشاها ویژگی‌های یگانه‌ای مانند تراوایی بهینه شده یا ویژگی‌های ضدسویی، ضد میکروبی و قابلیت‌های فوتوکاتالیستی از خود نشان داده‌اند. جذب‌کنندگی و جداسازی در فناوری نانو بسیار به بازار نزدیک هستند. بحث‌های بیشتری پیرامون کاربرد نانومواد در جداسازی و جذب در مواجهه با آلودگی‌های گوناگون در ادامه خواهد آمد.

۲.۲ کاتالیز

اکسیداسیون کاتالیستی یا فوتوکاتالیستی، یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته برای از بین بردن اثرات آلودگی‌ها و میکروب‌های بیماری‌زا از آب است.

نانوکاتالیست‌ها با نسبت سطح به حجم بالا در مقایسه با مواد بالک متناظر خود، کارایی کاتالیستی بسیار بهبود یافته‌تری از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، بند گپ و ساختار کریستالی نیمه‌هادی‌های نانومقیاس، موجب بروز رفتارهای مرتبط با اندازه می‌شود. همچنین با به حرکت درآوردن نانوذرات در زیرلایه‌های مختلف، پایداری نانوکاتالیست‌ها بهبود یافته و نانوکامپوزیت‌های حاصل با فوتوراکتورهای موجود قابل مقایسه است.

۲.۲ گندزدایی

گندزدایی، آخرین اما حیاتی‌ترین مرحله در تصفیه آب است. یک گندزدایی ایده‌آل باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- طیف ضد میکروبی گسترده در زمان کوتاه
- تولید نکردن محصولات جانبی خطرناک
- سمیت کم برای زیست‌بوم و سلامتی انسان‌ها
- هزینه انرژی کم و عملیاتی شدن آسان
- قابلیت نگهداری آسان و اینکه خورنده نباشد
- قابلیت دفع به صورت امن

به‌تازگی، نانومواد زیادی با ویژگی‌های ضد میکروبی قوی تهیه شده است که شامل نانوذرات کیتوسان، نقره، TiO_2 ‌های نانوکاتالیست و نانومواد بر پایه کربن می‌شوند. این نانومواد میکروارگانیزم‌ها را با رهاسازی یون‌های فلزی سمی، آسیب زدن به سلول‌های غشایی با تماس مستقیم و یا تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی از بین می‌برند. برخلاف گندزدایی‌های سنتی این مواد جدید فرآیند ناکار کردن میکروارگانیزم‌ها را با رهیافتی پایدارتر انجام می‌دهند که با توجه به این مسئله انتظار می‌رود تولید مواد جانبی مضر بسیار کمتر شود. به‌علاوه زمانی که استراتژی‌های مناسب به‌کار گرفته می‌شود بعضی از نانوکندزداها می‌توانند با صرف انرژی کم به‌طور پیوسته با کارایی زیاد به‌کار گرفته شوند که این مسئله برای تمرکززدایی در روش‌های تصفیه آب بسیار مفید است.

۴.۲ سنجش

امروزه روش‌های سنجش و نظارت سنتی، از آشکارسازی میکرو آلودگی‌های با غلظت بسیار کم در آب عاجزند. آشکارسازی «در محل» و سریع بیماری‌زاها و آلاینده‌های بسیار خطرناک در شرایط اضطراری بسیار با اهمیت است. نانومواد مثل نانولوله‌های کربنی، گرافن، نقاط کوانتومی و فلزهای نجیب، خواص اپتیکی مغناطیسی و الکتروشیمیایی ویژه‌ای دارند. بعضی از نانومواد می‌توانند پاسخ‌های اسپکتروسکوپی را به مراتب بهبود ببخشند (جابه‌جایی رامان یا تشدید سطح پلاسمون). همچنین، نسل بعدی آشکارسازهای نانوکامپوزیتی به علت پتانسیل بالایی که در نظارت محیطی و سنجشی دارند به‌طور گسترده بررسی شده است.

۳ نانومواد مورد استفاده در تصفیه آب

در این بخش، شماری از نانومواد که می‌توانند در تصفیه آب و فاضلاب به‌کار روند معرفی شده است. سنتز این مواد، از بین بردن آلودگی‌ها و مکانیزم این فرایندها توضیح داده خواهد شد.

۱.۲ نانومواد بر پایه کربن

اکسید گرافن (GO) یک گرافن تک‌لایه با حالتی

بسیار اکسید شونده است که شامل گروه‌های عاملی اکسیژن دار زیادی مثل هیدروکسیل، کربوکسیل، کربونیل و گروه‌های اپوکسی است. اکسید گرافن کاهش یافته (RGO) نقص‌های بیشتر و رسانایی کمتری نسبت به گرافن دارد اما نسبتاً اصلاح آن‌ها با گروه‌های عاملی آسان‌تر است. به‌طور کلی مواد بر پایه گرافن جذب‌کننده‌های پرترفدار برای جذب آلودگی‌های مختلف از آب به‌شمار می‌آیند.

GO و GO/RGO های اصلاح شده به علت توانایی نبود کردن فلزهای سنگین مثل روی، سرب، کادمیوم، مس، جیوه و آرسنیک^۱ به‌طور گسترده مورد کاوش قرار گرفته‌اند. در کنار آنیون‌های فلزی، مواد بر پایه گرافن برای جذب آلودگی‌های آنیونی که نگرانی‌های جدی به وجود آورده‌اند به‌کار گرفته شدند. گرافن یک جذب‌کننده عالی برای فلوراید محسوب می‌شود. همچنین یک هیبرید گرافن- پلی پرول (PPy) نانو ساختار سه‌بعدی برای تصفیه پیکرات (ClO_4^-) پیشنهاد شده است که گنجایش جذب بسیار بالاتری نسبت به فیلم‌های PPy تکی از خود نشان داده است. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که اکسید گرافن گنجایش جذب اسید هومیک بسیار بیشتری نسبت به گرافیت و کربن فعال دارد. جذب برخی از آنتی‌بیوتیک‌ها (پادزیست‌ها)، تتراسایکلین، اکسایت تری سیکلین و داکسی‌سایکلین توسط GO نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

GO و کامپوزیت‌هایش همچنین پتانسیل زیادی برای از بین بردن رنگ از خود نشان داده‌اند. جذب برای رنگ‌های یونی اساساً وابسته به اندرکنش‌های الکترواستاتیک و پیوندهای کووالانسی است. GO قابلیت جذب بالایی برای رنگ‌های کاتیونی دارد اما جذب رنگ‌های آنیونی به علت دافعه قوی الکترواستاتیکی، ضعیف است. از سویی دیگر، گرافن و کامپوزیت‌های بر پایه گرافن به علت تبادلات یونی و ظرفیت پیوند کووالانسی، برای جذب رنگ‌های آنیونی خوب هستند.

در بسیاری از موارد، اصلاح سطح و هیبریداسیون دو راه تاثیرگذار برای بهبود قابلیت مصرف دوباره، جداسازی و کارایی مواد بر پایه گرافن به‌شمار می‌آید که این مسئله آن‌ها را تبدیل به یک گزینه جذاب برای جداسازی آب از آلودگی‌های گوناگون می‌سازد. در هر صورت، قیمت بالا یک عامل اساسی در این مسیر محسوب می‌شود. همچنین هنوز چالش‌هایی در مسیر اجرا وجود دارد مثل باز مصرفی بودن، ایمنی محیط‌زیستی و تطبیق پذیری با اجزای دیگر.

نانولوله‌های کربنی هم توانایی بالایی برای حذف بسیاری از ترکیبات ارگانیک شامل هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs)، ترکیبات فنلی، ترکیبات غشایی اندوکربن و آنتی‌بیوتیک‌ها دارند. نانولوله‌ها

معمولاً به صورت مخلوطی از جامدات معلق به‌کار می‌روند و جداسازی آن‌ها از آب سخت است. پژوهشگران یک کامپوزیت جدید گرانولی CNTs/AL₂O₃ که ویژگی‌های خوب مکانیکی، آب‌دوستی، مقاومت گرمایی و جذب سطحی خوب برای دو دارو (دی‌کلوفناک سدیم و کاربامازپین) را دارد، گسترش داده‌اند. داروهای جذب شده می‌توانند وارد فرآیند باززایی شوند.

۲.۳ نانوذرات فلزی و اکسید فلزی

فلزات و اکسیدهای فلزی نانومقیاس عموماً دارای آهن‌های نانومقیاس صفر ظرفیتی، اکسیدهای فریک، اکسیدهای آلومینیوم، اکسیدهای مگنت، اکسیدهای تیتانیوم، اکسیدهای مگنزیوم و اکسیدهای سریم هستند. جذب‌کننده‌های مغناطیسی نانومقیاس در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. شماری از مطالعات نشان می‌دهد که فلزها و اکسیدهای فلزی نانومقیاس، دارای جذب سطحی بسیار خوبی از نظر ظرفیت و انتخاب پذیری نسبت به آلودگی‌های فلزی مانند آرسنیک، کادمیوم، کروم، اورانیوم و سایر آلودگی‌های معمول مانند فسفات هستند.

۱.۲.۳ آهن صفر ظرفیتی نانومقیاس

آهن صفر ظرفیتی نانومقیاس (nZVI) دارای واکنش پذیری بالا نسبت به طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها است و به صورت گسترده به‌عنوان نابودکننده آلودگی‌ها استفاده می‌شود. لایه آهن (اکسی) هیدروکسید که با Fe^0 محاصره شده جذب‌کننده قدرتمندی است.

برخی از آلاینده‌ها مانند U(VI)، As(III/V)، Se(VI) پس از جابه‌جایی به سطح nZVI می‌توانند به حالت‌های اکسیداسیون پایین‌تر کاهش یابند. nZVI همچنین می‌تواند آلودگی‌های دیگر مثل نیترات، رنگ، آلاینده‌های سمی محیط‌زیستی و آنتی‌بیوتیک‌ها را به وسیله جذب، اکسیداسیون، کاهش و هم‌رسوبی از بین ببرد. در مجموع ثابت شده که nZVI بسیار واکنشی، مقرون به صرفه، ماده دوستدار محیط‌زیست است و راه‌های نابودی چند منظوره برای تصفیه فاضلاب رادر اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد.

۲.۲.۳ اکسیدهای آهن نانومقیاس

علاقه روزافزون برای استفاده از اکسیدهای آهن نانومقیاس برای تصفیه فاضلاب، ناشی از توانایی زیاد آن‌ها در جذب، سادگی اجرا و فراوانی آن‌ها است. بررسی جذب یون‌های فلزی (Zn(II), Cu(II), Cd(II), Pb(II)) حاکی از قابلیت جذب ۸۹٪ Cu، ۹۴٪ Cd، ۱۰۰٪ Pb و ۱۰۰٪ Zn روی هم‌اتیت نانو ساختار با غلظت ۵/۵ گرم در لیتر است.

جداسازی و بازیابی نانومواد بعد از پایان عملیات همواره به‌عنوان مشکلی تکنیکی وجود

داشته که نیاز به برطرف کردن این مشکل احساس می‌شود. استفاده از میدان مغناطیسی خارجی برای هدایت جذب‌کننده‌های اکسید آهن نانومقیاس مغناطیسی، راه‌حل‌های عملی و مناسب در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. گزارش‌های فراوانی درباره استفاده از مگنت‌ها و مگمات‌های نانومقیاس برای جذب آرسنیک، کروم، سلنیوم، مس، سرب و نیکل از محلول‌ها و سیستم‌های آب طبیعی گزارش شده است.

مگنت نانومقیاس هم یک جذب‌کننده مغناطیسی مهم با قیمت پایین، تغییرات ساده و دوستدار محیط‌زیست است. مگنت نانومقیاس برای از بین بردن آلاینده‌های فراوانی مثل فلزهای سنگین As(III/V)، Se(IV)، Cr(VI)، Cu(II)، Zn(II)، متیل بلوودی کلروپنول از محلول‌های آبی مناسب است.

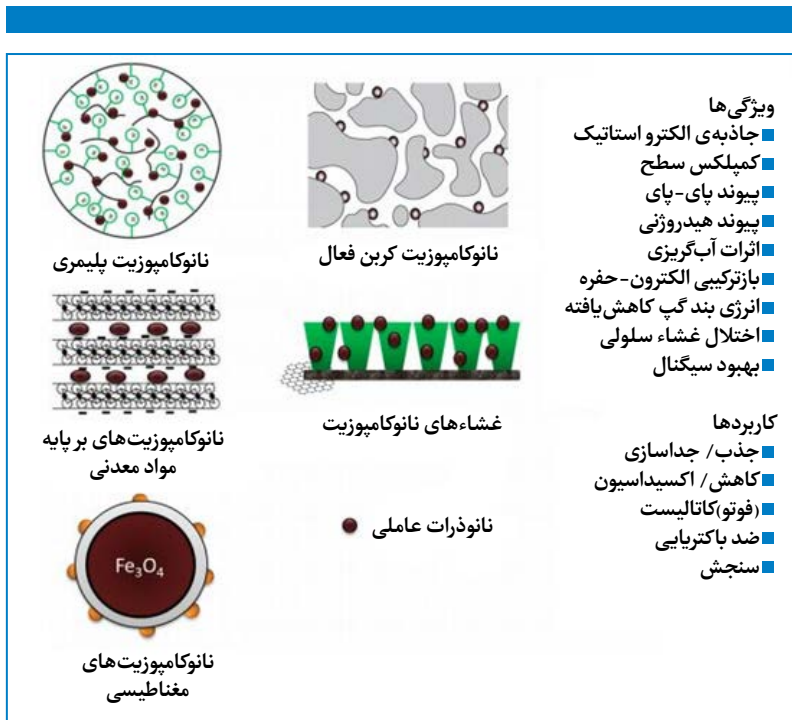
مگنت‌ها و مگمات‌های نانومقیاس با استفاده از روش سل-زل می‌توانند در مقیاس زیاد ساخته شوند. فرآیند جذب آلاینده‌ها عمدتاً توسط جذب خارجی صورت می‌گیرد که منجر به زمان جذب کوتاه می‌شود. علاوه بر این، جداسازی جذب‌کننده‌های مغناطیسی از آب تصفیه شده به وسیله مگنت‌ها به سادگی انجام می‌گیرد.

۳.۲.۳ اکسیدهای تیتانیوم نانومقیاس

خواص فوتوکاتالیستی TiO₂ به‌عنوان یک نیمه‌هادی سنتی، بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است. فوتوکاتالیست TiO₂ شامل ترکیباتی به شدت واکنشی مانند رادیکال‌های هیدروکسیل (OH[•])، آنیون‌های سوپراکسید (O₂⁻) و پروکسید (O₂^{•-}) است که می‌توانند ترکیبات ارگانیک را در حضور UV، نور مرئی یا نور خورشید تجزیه کنند. TiO₂ های نانومقیاس همچنین به‌طور گسترده‌ای در حذف آلودگی‌های میکروبی مانند ترکیبات غشایی اندوکربن، سیانوتوکسین‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر این، فوتوکاتالیست‌هایی که از TiO₂ های نانومقیاس در آن‌ها استفاده شده و زیر نور مصنوعی و طبیعی به‌کار گرفته می‌شوند، به‌طور گسترده برای تجزیه کردن آلاینده‌های ارگانیک گوناگون مثل آفت‌کش‌ها، رنگ‌ها، پلیمرها، آلاینده‌های فنولیک در فاضلاب، آلاینده‌های ارگانیک ماندگار و همین‌طور تصفیه آب‌های عادی به‌کار گرفته می‌شوند.

۴.۲.۳ اکسیدهای فلزی دیگر

در کنار مطالعات فراوان و استفاده گسترده از nZVI و جذب‌کننده‌های اکسید آهن نانومقیاس، بعضی از اکسیدهای فلزی دیگر دارای سطح ویژه بالا، ساختار میکرومخلخل و کشش کافی برای دیگر آلاینده‌ها هستند. اکسیدهای فلزی نانومقیاس که به‌طور گسترده استفاده می‌شوند شامل اکسید آلومینیوم، اکسید زینک، اکسید منگنز و اکسید سریم هستند.



شکل ۱. ساختار، خواص و کارکردهای بعضی نانوکامپوزیت‌های معمول

برای جذب آلاینده‌ها و غیرفعال کردن باکتری‌ها به‌کار برده شوند. نانوذرات طلا به خوبی می‌تواند Hg را با تشکیل Au_3Hg و Au_3Hg_3 جذب کند و ظرفیت جذب آن 4.065 g/g Au است. فعالیت‌های ضد میکروبی نانوذرات نقره برای ضد عفونی کردن آب به‌کار گرفته شده است، میکروارگانیسم‌های موجود در آب مانند *E. coli* ممکن است در برخورد با نانوذرات نقره غیرفعال شوند. پیشنهاد شده است که نانوذرات نقره توانایی آسیب رساندن به غشاهای سلولی را در صورت تماس مستقیم دارند و فعالیت‌های ضد میکروبی آن‌ها وابسته به اندازه ذرات و شکل کریستالی است. چگالی اتمی بیشتر، باعث فعالیت‌های ضد میکروبی بیشتری شود. نانوذرات نقره هم‌اکنون برای ضد عفونی کردن ماسک‌های جراحی، فیلترهای پارچه و حتی ماسک‌های تنفسی به‌کار برده می‌شوند.

نانوذرات نجیب فلزی برای تخریب فوتوکاتالیستی ویروس‌های موجود در آب مانند آفت‌کش‌ها، رنگ و ارگانیک‌های هالوژنی نیز به‌کار می‌روند.

۴ نانوکامپوزیت‌ها در تصفیه آب

بیشتر نانومواد که در بالا به آن‌ها اشاره شد به‌صورت نانوذرات استفاده شده‌اند. زمانی که به فعالیت‌های بزرگ‌مقیاس در تصفیه آب می‌پردازیم باید بعضی از مشکلات ذاتی مثل جمع‌شدگی، سختی جداسازی، نشت به آب‌های تماسی و اثرات مخربی که به انسان و طبیعت

نقش اساسی بازی می‌کنند. نانوذرات $MnOx$ و ZnO هم می‌توانند به‌عنوان کاتالیست برای فرآیند پیشرفته اکسیداسیون مورد استفاده قرار بگیرند. نانوسیم‌های $\beta\text{-MnO}_2$ برای کاتالیست ازوناسیون با استفاده از فرآیند هیدروترمال ساده به‌کار می‌روند. یک مطالعه دیگر نشان داد که نانوذرات طبیعی حساس به رنگ ZnO می‌توانند از نور خورشید برای تخریب باکتری‌ها و محتویات ارگانیک آن‌ها استفاده کنند. علاوه بر این، بعضی مطالعات نشان داده‌اند که با دوپ کردن N ، Zr ، Cu یا Ce به اکسیدهای فلزی نانومقیاس، فعالیت‌های فوتوکاتالیستی و پایداری نانوذرات اکسید فلزی مشابه می‌تواند بسیار بهبود پیدا کند.

۳.۳ نانوذرات فلزی نجیب

فلزهای نجیب از جمله طلا، نقره، پلاتینوم و پالادیوم، به علت اندازه اتم کوچک آن‌ها معمولاً انرژی یونیزاسیون زیاد و پتانسیل اکسیداسیون کوچک دارند. روش سنتز نانوذرات فلزات نجیب معمولاً از راه کاهش نمک‌های فلزی متناظر و هسته‌زایی کنترل شده نانوکریستال و رشد با عامل پایدارکننده است. در بیشتر مواقع، پلیمرها و سورفکتانت‌ها برای بهبود پایداری نانوذرات فلزی نجیب به‌کار برده می‌شوند.

نانوذرات طلا و نقره به علت ویژگی‌های اپتیکی ویژه، برای شناسایی رذپای آلاینده‌های ارگانیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کنار نظارت بر آلودگی، نانوذرات فلزی نجیب همچنین می‌توانند

آلومینا یک جاذب کلاسیک است و شکل گاما آلومینا قدرت جذب بیشتری نسبت به آلفا آلومینا دارد. گاما آلومینای نانومقیاس به علت سطح ویژه بالا و ظرفیت جذب بالا یک جاذب‌کننده امیدوارکننده به‌شمار می‌آید. نابودکنندگی بیشینه 96.6% در 25 میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهد که آلومینای نانومقیاس یک جاذب‌کننده مؤثر برای $Ti(III)$ از محلول‌های آبی به حساب می‌آید که در PH برابر با 4.5 توانایی جذب 100% دارد.

گاهی اوقات آلومیناهای نانومقیاس کشش ضعیفی به بعضی فلزهای سنگین نشان می‌دهند. برای غلبه بر این مشکل، اصلاحات شیمیایی و فیزیکی بر سطح نانوذرات گاما آلومینا توسط گروه‌های عاملی دارای اتم‌های دهنده مثل اکسیژن، نیتروژن، سولفور و فسفات باید انجام گیرد.

اکسیدهای منگنز نانومقیاس ($NMnOs$) عملکرد جذب بهتری برای بعضی آلاینده‌های ویژه از خود نشان می‌دهند زیرا سطح ویژه گسترده‌تر و ساختار آمورف آن‌ها مناسب‌تر است. در دهه‌های گذشته، $NMnOs$ برای جذب آلاینده‌های کاتیونی و آنیونی مورد بررسی قرار گرفته است که این موارد شامل یون‌های فلزی سنگین، نمک آرسنیک و فسفات می‌شود. این ماده مقرون به‌صرفه بوده و در طبیعت در دسترس است. محققان متوجه شدند که اکسید منگاس آبدار (HMO) برای از بین بردن $Hg(II)$ مؤثر است و با افزایش غلظت، PH و دمای محلول جاذب، میزان جذب $Hg(II)$ افزایش می‌یابد.

به‌عنوان یک ماده دوستدار محیط زیست، ZnO یک کاندیدای امیدوارکننده برای کاتالیست‌ها، سنسورهای گازی و سلول‌های خورشیدی است. ZnO عمدتاً برای جذب H_2S به‌کار می‌رود. به‌تازگی، مشخص شده است که ZnO ‌های نانومقیاس قادر به نابود کردن آلاینده‌های گوناگون با انتخاب‌پذیری و کارایی بالا هستند. این ماده با قدرت جذب بالا و گرینش‌گری در مقابل آلاینده‌های کاتیونی مثل فلزات سمی گوناگون، ظرفیت جذب غیراشباع بیش از 1600 میلی‌گرم بر گرم برای $Cu(II)$ از خود نشان داده است. چنین جذب ساختاری بهبود یافته‌ای، نتیجه شمار زیادی از مکان‌های قطبی روی دیواره‌های متخلخل درون نانوپلیت‌ها است. هیدرید $Cu(II)$ جذب شده می‌تواند تا حدی هیدرولیز شود که این امر منجر به تشکیل $Cu(OH)_2$ در دیواره‌های تخلخل‌ها شده و در نتیجه ظرفیت جذب را افزایش می‌دهد. ZnO ‌های نانومقیاس می‌توانند با موفقیت آلاینده‌های دیگر را نابود کنند. بیشینه ظرفیت ZnO ‌ها در دمای 303 کلوین برای $Cd(II)$ و $Hg(II)$ به ترتیب 378 و 714 میلی‌گرم بر گرم است. گروه‌های هیدروکسیل سطحی ZnO ‌های نانومقیاس در جذب فلزهای سنگین گوناگون

وارد می‌شود، مورد بررسی قرار بگیرد. یک رهیافت امیدوارکننده در استفاده از فناوری نانو، گسترش مواد نانوکامپوزیتی است که از ویژگی‌های میزبان و هم نانوذرات موجود استفاده ببرد. به علاوه، نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند رها کردن نانوذرات به طبیعت را آسان‌تر کنند و سازگاری فناوری نانو با

زیرساخت‌های کنونی را بهبود بخشند. انتخاب پایه برای نانوکامپوزیت‌ها بسیار حیاتی است و عامل اصلی در موفقیت نانوکامپوزیت نهایی است. در قیاس با نانومواد آزاد، عملکرد و قابلیت استفاده نانوکامپوزیت‌ها در مواردی مانند پخش نانوذرات، پایداری و بازیافت بسیار بهبود پیدا کرد؛

بنابراین مواد نانوکامپوزیت می‌توانند فاصله بین مقیاس نانو و مقیاس مزر را کاهش دهند. تاکنون، نانوکامپوزیت‌ها بهترین راه ممکن برای انتقال فناوری‌های تصفیه آب از آزمایشگاه به صنعت به‌شمار می‌روند. در جدول ۱ برتری‌ها و کاربردهای ممکن نانوکامپوزیت‌های مختلف بررسی می‌شود.

جدول ۱. میزبان‌های مختلف برای تهیه نانوکامپوزیت‌های محیط‌زیستی

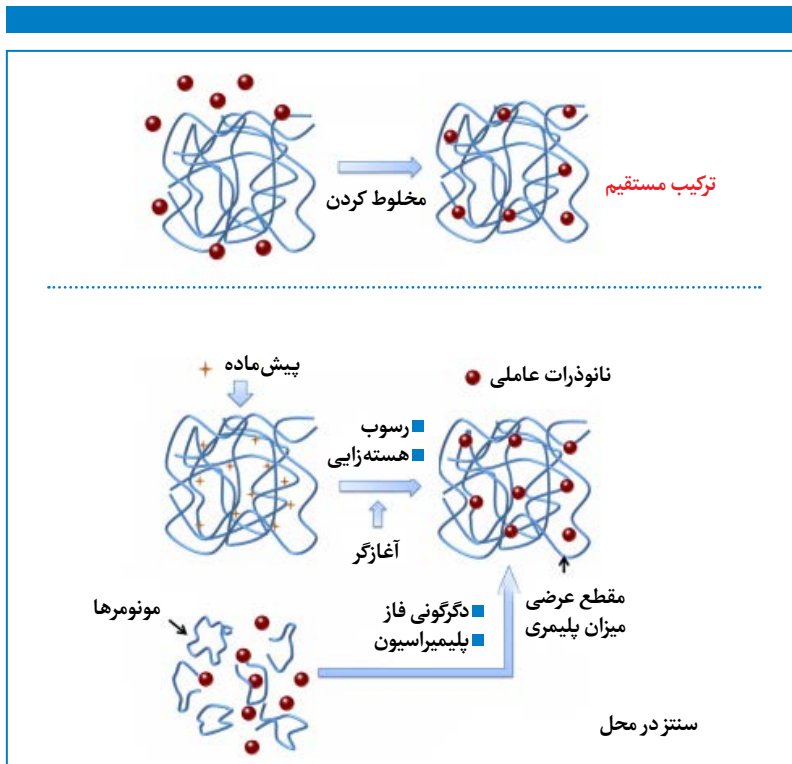
ویژگی‌ها	مزایا	میزبان
گرافن	ساختارهای لامینار، گزینندگی و آهنگ انتقال زیاد برای مولکول‌های آب، قدرت مکانیکی خوب	جذب فیزیکی، جداسازی، ضد میکروب
نانولوله کربنی	نانوکanal برای انتقال بسیار سریع مولکولی، قدرت مکانیکی بسیار زیاد	جذب فیزیکی، شناسایی
کربن فعال	کم هزینه، بسیار متخلخل، تطبیق پذیری بالا	جذب فیزیکی
سیلیکا	قدرت مکانیکی فوق‌العاده، پایداری شیمیایی بالا، ساختار قابل تنظیم	جذب فیزیکی، مواد الکترود، (فوتو) کاتالیست
پلیمر	دارای ساختار اتصال عرضی برای بی‌حرکتی پایدار، قدرت مکانیکی عالی، تطبیق پذیری و پایداری شیمیایی، ساختار قابل تنظیم، سطح باردار به پخش نانوذرات و آلودگی‌ها کمک می‌کند، راحتی در جداسازی	جذب فیزیکی، مواد الکترود، آشکارسازی، (فوتو) کاتالیست، ضد میکروبی
بیوپلیمر	دارای منابع زیاد و در دسترس، مولکول نسبتاً انعطاف‌پذیر، آب‌دوستی، دوست‌دار محیط‌زیست و کایرال	جذب فیزیکی، ضد میکروبی
معدنی‌ها	کم هزینه، پایداری شیمیایی، مقاومت گرمایی، دوست‌دار محیط‌زیست، ساختار منحصربه‌فرد برای تولید گروه‌های عاملی	جذب فیزیکی، قابل اصلاح در محل
غشاها	ساختار متخلخل، ویژگی‌های قابل تنظیم سطح، پایداری مکانیکی و گرمایی، تطبیق پذیری بالا	جذب فیزیکی، جداسازی، ضد میکروبی، (فوتو) کاتالیست
سطوح مغناطیسی	سادگی در اصلاح سطح، جداسازی راحت، کینتیک سریع	جذب فیزیکی، (فوتو) کاتالیست، هم‌انعقادی

۱.۴ نانوکامپوزیت‌هایی با محافظت‌کننده‌های اژگانی

پلیمرها یک پایه ویژه برای نانومواد به‌شمار می‌روند زیرا آن‌ها معمولاً دارای تخلخل‌های قابل تنظیم، خواص مکانیکی عالی و گروه‌های عاملی هستند. نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلیمر (PNCs) به علت امکان استفاده از کاربردهای صوتی آن در تصفیه آب، مواد آینده‌داری به‌شمار می‌آیند. PNCs معمولاً برتری‌های ذاتی نانوذرات و پایه‌های پلیمری را دارد. ترکیب کردن مستقیم و سنتز در محل، دو استراتژی اساسی برای تولید PNC‌های مختلف است. خصوصاً در ترکیب کردن مستقیم، نانوذرات مستقیماً به پلیمرها پیوند زده می‌شوند یا پیش‌ماده‌های نانوذرات ابتدا درون تخلخل‌های پلیمر اشباع می‌شوند و سپس با فرایندهای رسوب‌زایی و هسته‌زایی در محل به‌وسیله آغازگرهای خاص، سنتز می‌شوند. یک روش دیگر سنتز در محل، اضافه کردن نانوذرات عاملی هنگام قطبی کردن مونومرها است (شکل ۲).

آلژینات، ماکرومولکول، رزین‌های متخلخل و یون‌های مبدل، بعضی از میزبان‌های پلیمری هستند که تبادل‌کننده‌های یونی پلی‌استایرن، یکی از پایه‌های معمول به‌شمار می‌روند. این پایه دارای ساختار سه‌بعدی متخلخل است و سطحش متمایل به اصلاح با گروه‌های عاملی است. نانوکامپوزیت‌هایی که به آن‌ها اشاره شد پتانسیل فراوانی در نابودی آلاینده‌ها دارند. نانوذرات اشباع‌شده از قبیل La(OH)n و HFO ، ZrP ، ZrO_2 ، PEI اغلب باعث اتصال خاص به آلاینده‌های هدف از جمله فلزات سنگین P و F ، $\text{(Ni, As, Cr (III), Pb, Cu)}$ می‌شوند. این آلاینده‌ها معمولاً از راه مکانیزم‌های چندگانه مثل کمپلکسیون سطحی، جذب الکترواستاتیک و هم‌رسوبی نابود می‌شوند. همچنین، جذب‌کننده باردار می‌تواند پیش‌متمرکز شدن و نفوذ آلاینده‌های خاص را درون تخلخل‌های نانوکامپوزیت تسهیل کند. پیشنهاد شده است که پلیمرهای عرضی طی مکانیزمی به نام اثر سپری می‌توانند از نانوذرات احاطه‌شده

محافظت کنند. به علت سایز بزرگ PNC‌ها، آن‌ها را می‌توان به راحتی از آب‌های تصفیه‌شده جدا کرد یا در ستون‌هایی بدون افت فشار ذخیره کرد. در هر صورت تا الان تنها تعدادی مطالعه در دسترس است تا عملی بودن استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در آب توسط آن‌ها فهمیده شود. محصولات تجاری مانند HFO-201 و ArsenXnp به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. اخیراً استفاده از نانوکامپوزیت‌های HFO-201 برای نابودی فسفات فراگیر شده است. عملکرد HFO-201 پایدار بوده است و توانسته BV1500 فاضلاب واقعی حاوی فسفر را تصفیه کند. گونه‌های دیگر میزبان‌های پلیمری عمدتاً بیوپلیمرهایی مانند کیتوزان و سلولز هستند. سلولز در طبیعت بسیار یافت می‌شود. بیوپلیمرها به علت زیست‌تخریب‌پذیر بودن، می‌توانند مشکلات مهمی در طولانی مدت به وجود بیاورند. در هر صورت، سلولزها، پایداری شیمیایی و مکانیکی خوبی دارند زیرا پیوندهای مولکول‌های هیدروژن آن‌ها چگال هستند و به خوبی هم‌تراز شده‌اند. آن‌ها مشخصه‌هایی مثل آب‌دوستی



شکل ۲. طرحی از روش سنتز برای نانوکامپوزیت‌های پلیمری

مالاتیون یا آفت‌کش‌های ارگانوفسفات از آب‌های کشاورزی استفاده شده است. بیشترین ظرفیت در PH نزدیک به ۲ به $3.5 \text{ mg/g} \pm 0.22$ رسید. همچنین نانوکامپوزیت‌های نقطه‌کوانتومی / کیتوسان ZnS برای اجرای فعالیت‌های فوتو-کاتالیستی سطح بالا سنتز شده است. این مواد براساس روش شیمیایی کلئیدی دردمای اتاق سنتز شد. در معرض نور UV، رنگ‌های متلین آبی و متلین نارنجی به خوبی در ۱۲۰ دقیقه اکسیداسیون تخریب می‌شوند.

۲.۴ نانوکامپوزیت‌هایی با پایه‌های غیرازکائیک پایه‌های غیرازکائیک نانوکامپوزیت‌ها عمدتاً شامل کربن‌های فعال، CNTها و معدنی‌هایی طبیعی مثل ژئولیت، بیوجار و رس هستند. کربن‌های فعال (AC) جاذب‌های سنتی‌ای هستند که به صورت گسترده در تسهیل تصفیه فاضلاب‌ها به‌کار برده می‌شوند. AC یک جاذب بسیار متخلخل است که به اندازه کافی میکروتخلخل و سطح آبریز دارد و می‌تواند یک پایه عالی برای نانوذرات باشد. نانوذرات آهن (III) اکسید-هیدروکسید روی گرانول‌های AC توسط هیدرولیز اجباری FeCl_3 ثابت می‌شوند و اندازه نانوذرات آهن با اضافه کردن فسفات بسیار کاهش می‌یابد. نانوکامپوزیت‌های AC آهن باعث افزایش ۴۰ درصدی ظرفیت جذب As(V) در نمونه‌های اولیه شدند. نانو ZnO ها بر کربن‌های فعال گرانولی اضافه شد تا توانایی نابودی

Pb(II) را بهبود ببخشد. گروه‌های هیدروکسیلی تشکیل شده بر روی اکسیدها، گروه‌های عاملی سطحی مسئول جذب Pb(II) به حساب می‌آیند. نانوکامپوزیت‌های AC که با مگنتیت احاطه شده‌اند عملکرد فوق‌العاده‌ای در حذف آلاینده‌های آروماتیک از خود نشان دادند. جاذب‌های اشباع شده با استفاده از اتانول به‌عنوان عامل شستشو می‌توانند بازیافت شوند. به‌علاوه، توسط لایه‌نشانی کاهشی با استفاده از NaBH_4 ، نانوذرات دوفلزی Fe/Pb که از AC اشباع شده است توسعه داده شد. ۹۰ درصد از ۲-کلروبنزینیل توسط نانوکامپوزیت AC سنتز شده در ۴۸ ساعت کاهش یافت و محصولات کاهنده کلروبنزینیل باقیمانده به‌طور هم‌زمان جذب شدند. نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربنی (CNT-NCs) به موادی اشاره دارد که شامل دو یا تعداد بیشتری عنصر هستند که برای تشکیل کامپوزیتی که در آن نانولوله‌های کربنی به‌عنوان میزبان هستند از آن‌ها استفاده می‌شود. مواد هیبریدی ۱،۸-دی‌آمینونفتالن-MWCNT-COOH می‌تواند به‌عنوان جاذب‌های تاثیرگذار برای جداسازی Cd(II) و Pd(II) باشد. مکان‌های محدود قابل استخراج روی پلیمر/ MWCNTs-COOH نشان‌دهنده تمایل زیاد به فلزهای سنگین است. ظرفیت بیشینه برای Cd(II) و Pd(II) حدود 101.2 mg/g و 175.2 mg/g بود و محدوده شناسایی این روش برای دوفلز سنگین به ترتیب 0.09 ng/ml و 0.7 ng/ml بوده است.

و کایریتی از خود نشان می‌دهند. NC‌های بر پایه سلولز قابلیت تبادل یونی یا جذب خوبی دارند. آن‌ها معمولاً به حملات میکروبیولوژیکی مقاوم‌اند و پایداری گرمایی صوتی از خود نشان می‌دهند. بعضی رهیافت‌ها برای تولید NC‌های بر پایه سلولز توسعه داده شده است. یک روش کاملاً مشابه با نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. نانوکامپوزیت‌های سلولزی نانوذره/ باکتریایی طلا (AuNP/BC) با استفاده از سیترات کاهش‌دهنده محلول Au^{3+} در حضور هیدروژل BC در ۳۰۳ کلوین سنتز شدند. محققان متوجه شدند که جذب نه تنها روی صفحه نانوکامپوزیت AuNP/BC بلکه درون پایه نانوکامپوزیت هم اتفاق می‌افتد. به‌علاوه، درهم‌آمیختگی می‌تواند پاسخ‌های طیف‌سنجی بهبودیافت رامن سطح (SERS) را تا ۴ برابر تشدید کند.

کیتوسان، دومین پلی‌ساکارید فراوان بعد از سلولز است. کیتوسان دارای مشخصه‌های ویژه‌ای مثل واکنش‌پذیری بالا، رفتار چنگاله (کی‌لیت) سازی عالی و پایداری شیمیایی است. گروه‌های آمینو و هیدروکسیل کیتوسان به‌عنوان مکان‌های فعال برای آلاینده‌های آب عمل می‌کنند. به‌صورت کلی، کیتوسان‌های عرضی حتی در PH‌های کم، غیرمحلول هستند بنابراین در دامنه وسیعی از PH‌ها عمل می‌کنند. جذب بهبودیافته آلاینده‌ها توسط NC‌های بر پایه کیتوسان به خوبی مطالعه شده است. کامپوزیت‌های کیتوسان/گرافن/اکسید (CSGO) با سه مقدار متفاوت (wt%15، wt%10، wt%5) سنتز شده‌اند و شرایط بهینه برای جذب Au(III) و Pd(II) در PH 3-4 بررسی شده است. کیتوسان با 5 wt% کامپوزیت گرافن اکساید (CSGO5) دارای بیشترین ظرفیت جذب 1077 mg/g برای Au(III) و 217 mg/g برای Pd(II) است. کلئیدهای پایدار CS-AgNPs با پراکنده کردن سل‌های AgNP در محلول کیتوسان تهیه شد و در ادامه برای ساخت فیلمی با پایداری بالا و مقاومت مکانیکی خوب مورد استفاده قرار گرفت. این چنین جداسازی بهینه و استخراج Zn(II) ، Ni(II) ، Pb(II) ، Al(III) ، Cd(II) ، Cu(II) ، Co(II) ، Fe(III) تقریباً ۹۵٪ نابودی برای بیشتر عناصر مطالعه شده و ۱۶٪ نابودی برای Mn(II) به دست آمد. دانه‌های کامپوزیتی CNT- کیتوسان کروی با روش فریز-کستینگ سنتز شد. با چکاندن محلول مرکب در محلول نیتروژن، کامپوزیت‌های دانه‌ای بسیار متخلخل حاصل می‌شود که دارای کانال‌های جهت‌دار شده در دیواره‌های کانال هیبرید کیتوسان-نانولوله هستند. دانه‌های کامپوزیت ساختار متخلخل مرتبه‌ای و مزوپور از خود نشان می‌دهند و جاذب خوب (43.6 mg/g) بیلی‌روبین (در طول ۲ ساعت) قلمداد می‌شوند. نانوکامپوزیت‌های کیتوسان پوشش داده شده با مس (CuCH) برای نابودی

جذب DCB-4,4' با استفاده از نانولوله‌های کربنی چند دیواره پیوند زده شده با متیل متاکریلیت (MMA) مورد آزمایش قرار گرفت. از نانوکامپوزیت از محلول آبی با ظرفیت بیشینه ۸۵/۵ mg/g استفاده شد.

ژئولیت عموماً از تتراهیدرون سیلیکون-اکسیژن و تتراهیدرون آلومینیوم-اکسیژن تشکیل می‌شود. ژئولیت به علت مقرون به صرفه بودن و ساختار داخلی منحصر به فرد، به طور گسترده به عنوان جاذب، ماده تبادل کننده یونی و کاتالیست مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نتیجه مکان های پیوندی زیادی را به وجود می‌آورد. رفتار جذبی Co(II) و Cu(II)، Pb(II) روی نانوکامپوزیت های اتیلن وینیل استات-کلینوپیتیلولیت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت هایی که از ذرات فعال شده-HCL پرمی شوند از خود ظرفیت بالایی در برابر این سه فلز نشان می‌دهند. نانوکامپوزیت های ZnO/HZSM-5 برای جذب ۴-نیتروفنول (NPh-4) تهیه شدند. محققان متوجه شدند که در PH = ۵ در مدت ۹۰ دقیقه ۹۱٪ از ۴-نیتروفنول نابود می‌شود. برای تصفیه رنگ های صنعتی پیشرفته، نانوکامپوزیت های TiO_2 -ژئولیت سنتز شده است. نتایج نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت از تخریب فوتوکاتالیستی جذب-جهت دار که برای نابودی ترکیبات رنگی مفید است، استفاده می‌کند.

بیوچار یک ماده پرکربن است که از زرا پیرولیز زیست توده (Biomass) در محیط ناهوازی تولید می‌شود. بسیار دسترس پذیر و مقرون به صرفه است. گسترش نانوکامپوزیت های بر پایه بیوچار می‌تواند در کنترل آلودگی آب، فاضلاب ها و جداسازی کربن به کار برده شود. نانوکامپوزیت های بیوچار از دو راه متفاوت به دست می‌آیند، پیش غنی کردن زیست توده ها با استفاده از پیش ماده های نانوذرات یا اشباع مستقیم نانوذرات بعد از پیرولیز. نانوکامپوزیت های $\gamma-Fe_2O_3$ بیوچار می‌توانند به طور مستقیم با پیرولیز گرمایی $FeCl_3$ سنتز شوند که جاذب خوبی برای As(V) هستند. کامپوزیت های بیوچار پوشش داده شده با نانولوله های کربنی با مساحت سطحی ویژه $359 m^2/g$ سنتز شده و این ماده برای جذب آلودگی های رنگی بسیار خوب عمل می‌کند. نانوکامپوزیت های بیوچار/MgO فسفات را به خوبی ۸۳۵ mg/g جذب می‌کنند. جذب معمولاً توسط مکانیزم های مختلفی مثل تبادل یونی، تبادل پای-کاتیون، کمپلکس سطحی و هم-رسوبی رخ می‌دهد. به علاوه، نانوکامپوزیت بیوچار گرافیتی جدید C_3N_4 برای نابودی رنگ ها از راه جذب و تخریب کاتالیستی هم زمان به کار برده شد. بیشتر نانوکامپوزیت های بر پایه معدنی ها به صورت پودری هستند و برای تصفیه های در محل به کار می‌رود. در حال حاضر توجه ویژه ای به نانوکامپوزیت های مغناطیسی

(به علت راحتی جداسازی و جمع آوری آن ها) شده است.

نانوکامپوزیت های پلیمری بر پایه رس (CPNs) مخلوطی از پلیمر و معدنی های رس غیرارگانیک هستند که از ویژگی های ارگانیک و غیرارگانیک بهره مند هستند. CNP ها پایداری مکانیکی و شیمیایی، مقاومت گرمایی، منطقه سطحی بالا و نفوذپذیری گازی کاهش یافته بسیار بهبود یافته تری از خود نشان دادند. CPN های مختلف برای حذف آلاینده های معدنی غیرآلی و آلی مانند $Co(II)$ ، $Zn(II)$ ، $Se(IV)$ و آترازین به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. CPN پلی کربنات سدیم/ پلی اتیلن/ مونتموریلونیت مشاهده شد که در برابر E.coli فعالیت ضد میکروبی قوی نشان می‌دهند. CPN های سیپولیت (polydiallyldimethylammonium) PDAMAC برای پیش تصفیه فاضلاب به کار برده شدند. به طور کلی، CPN ها مواد پایدار آینده داری برای نابودی آلاینده ها به شمار می‌آیند.

۳.۴ غشاهای نانوکامپوزیت

غشاهای نانوکامپوزیت به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱) غشاهای نانوکامپوزیتی سنتی، ۲) نانوکامپوزیت های لایه نازک و ۳) غشاهایی با سطح پوشش داده شده. غشاهای نوع اول عموماً با روش فاز معکوس سنتز می‌شوند به صورتی که نانوذرات درون تخلخل ها و زیر لایه غشاها وارد می‌شوند. برای نانوکامپوزیت های لایه نازک یک لایه بسیار نازک بر روی زیر لایه به عنوان لایه مانع کشیده شد که عموماً در غشاهای RO/NF به کار می‌رود. نانومواد در طول تغییرات فازی و فرآیند پلیمراسیون بین وجهی به درون لایه های نازک وارد می‌شوند. سومین گونه نانومواد با فرآیندهایی مثل خودسامانی، لایه نشانی، جذب یا پیوند زنی شیمیایی بر روی سطح غشاها لایه نشانی می‌شوند.

غشاهای نانوکامپوزیت که با نانوذرات کاری مثل نانو TiO_2 پوشش داده می‌شوند ویژگی های هایپرکاتالیستی یا فوتوکاتالیستی از خود نشان می‌دهند. در معرض تابش UV، TiO_2 های احاطه شده با غشاهای PES از خود توانایی های ضد رسوبی نشان می‌دهند. گزارش جدیدی از غشای نانوکامپوزیت Anatase/Tetranate که می‌تواند به طور هم زمان Cr(VI) و 4-کلروفنیل را از راه جذب و اکسیداسیون فوتوکاتالیستی حذف کند، داده شده است. فوتوکاتالیست های خودتمیزشونده توسط غشاهای نانو ZnO/PVDF و نانوکامپوزیت های لایه نازک TiO_2 به دست آمده است که شار آب در غشاها را تسهیل می‌کند. ساکن سازی نانوذرات آلومینا در طول وارونگی فازی PVDF برای تهیه غشاهای مخلوط پایه صورت گرفت. این فرآیند آب دوستی، نفوذ آب، مقاومت به رسوب، بازیابی شار و پایداری مکانیکی را بهبود می‌بخشد در حالی که چگالی و

اندازه حفره ها ثابت می‌ماند. چنین غشاهایی قدرت مکانیکی پلیمرهای غشاهای سلولی و واکنش پذیری بالای آن ها را ترکیب می‌کند. نفوذ بهبود یافته آب در غشاهای احاطه شده با نانوذرات ZrO_2 نیز مشاهده شد. اشباع نانوذرات نقره (AgNP) درون غشاء باعث آنتی باکتریال شدن آن می‌شود. به جای وارد کردن Ag به فاز ارگانیک در حین فرآیند پلیمراسیون، پژوهشگران AgNP را روی سطح لایه نازک غشاء نشانند که منجر به جلوگیری از انحلال Ag^+ و AgNP در محیط شد. نانوکامپوزیت های لایه نازک ساخته شده، نمایش آنتی بیوتیکی خوبی همراه با شار آبی بهبود یافته نشان دادند.

غشاهای احاطه شده با نانولوله ها نیز شامل حفره های سرامیک به همراه نانولوله های پر شده در آن است. غشاء نانولوله سرامیک بهینه شده، روغن را به صورت ۱۰٪ پیس می‌زند و شاری برابر با $36 L/h m^2/bar$ دارد. همچنین مقاومت خوبی به رسوب ارگانیک نشان می‌دهد. به علاوه، نانوکامپوزیت های بر پایه گرافن پتانسیل زیادی در تصفیه آب غشائی، کمینه کردن مقاومت انتقالی و بیشینه کردن شار عبوری از خود نشان دادند. با ترکیب سدیم ردیف شده و اکسید گرافن، یک نانوکامپوزیت بر پایه گرافن تولید شد. کامپوزیت حاصل انتخاب پذیری بالا و آهنگ انتقال مولکول های آب خوبی از خود نشان داد. این خصوصیت باید به حضور گروه های اکسیدی، نقص های ساختاری، شکاف های لبه به لبه و مناطق غیراکسیدی نانو ساختارهای GO نسبت داده شود که می‌تواند کانال های آبی فراوانی ایجاد کند. زمانی که غلظت GO به ۱/۶ wt% می‌رسد یک شار بهینه عبوری $1699 g/(m^2h)$ به دست خواهد آمد. به علاوه، هرچه ابعاد نانوصفات کوچک تر باشد نقص های ساختاری بیشتری و گروه های اکسید دار کمتری می‌تواند کانال های آبی بسازند. غشاهای نانوکامپوزیت لایه نازک (TFN) با یکی کردن اکسید گرافن با کیفیت های مختلف با پلی سولفون تهیه می‌شوند. زمانی که شار آب خالص عبور می‌کند، غشاهای TFN که از ۰/۳ wt% اکسید گرافن تشکیل شده اند بیشترین عبور آب را دارا هستند و درصد پس زنی آن ها برای $NaCl$ ، Na_2SO_4 ، $MgSO_4$ ، $MgCl_2$ به ترتیب برابر با ۵۹/۵٪، ۶۲/۱٪، ۹۵/۲٪، ۹۱/۱٪ است. به غیر از انتقال مولکول ها از میان غشاها، غشاهای نانوکامپوزیت بر پایه گرافن دارای ویژگی های ضد رسوبی نیز هستند. چنین خواص رضایت بخشی را می‌تواند به حضور گروه های اکسیدانی که منجر به سطح افزایش یافته ناحیه آب دوست و کاهش پتانسیل زتای منفی می‌شود نسبت داد؛ که این امر می‌تواند میکروارگانیزم ها را از طریق الکترو-دافعه دفع کند و مانع از پیوست سطحی میکروارگانیزم ها شود. در نتیجه گسترش غشاهای نانوکامپوزیت، کاربردهای فناوری غشاها را به شدت بهینه کرده است. با در نظر

گرفتن پیشرفت‌های تجاری فناوری غشاها، غشاهایی که توسط نانومواد بهبود یافته‌اند برای فعالیت‌های بزرگ مقیاس بسیار مناسب هستند.

۴.۴ نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی

نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی، نانومواد منحصر-به‌فردی به حساب می‌آیند. آن‌ها معمولاً دارای نانو ساختارهای هسته-پوسته هستند که به راحتی و سرعت می‌توانند بایک میدان مغناطیسی خارجی جمع‌آوری شوند. نانوذرات کاربردی یا گروه‌های کاربردی می‌توانند روی نانوذرات Fe_3O_4 به وسیله پیوندهای شیمیایی یا لایه‌نشانی مستقیم، ساکن شده یا پیوند زده شوند. موادی که باید پوشش داده شوند شامل SiO_2 , Ag, TiO₂, CNTs, GO, Pd. غیره هستند. پوشش SiO_2 می‌تواند ناحیه سطحی بالا و تخلخل خوبی تولید کند، در حالی که از هسته مغناطیسی در برابر خوردگی محافظت می‌کند. بعد از پوشش‌دهی، نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی حاصل معمولاً جذب بهبود یافته یا توانایی فوتوکاتالیستی با یک کینتیک سریع در مقابل آلاینده‌هایی مثل فلزهای سنگین، رنگ‌ها، فنول‌ها یا میکروب‌ها از خود نشان می‌دهند.

در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای از نانوسیم‌های مغناطیسی بر پایه Mn برای نابودی فلزهای سنگین سنتز شده است. یک روش ساده تک‌گام سلو تو مال برای تولید کره‌های مغناطیسی و توخالی کربنی پیشنهاد شده است که برای نابود کردن فلزهای سنگین مناسب است. به علاوه، نانوکامپوزیت‌های مگما/سیلیکا به عنوان کاتالیست‌های ناهمگون فنتون سنتز شده‌اند. این مسئله می‌تواند به خوبی آلاینده‌هایی مثل PNP و MB را تخریب کند. استفاده بلندمدت آبشویی قابل چشم‌پوشی Fe را نشان داد. پیشنهاد شده است که نانوذرات اصلاح شده با آمینواسیدها می‌توانند بیش از ۹۴٪ سلول‌های باکتری را در طول ۲۰ دقیقه در PH بین ۴-۱۰ جذب کنند. نانوکامپوزیت‌های $Fe_3O_4@SiO_2$ پلی (۱-وینیلیمیدازول)-پیوندی می‌توانند به خوبی برای جذب $Hg(II)$ در $PH=7$ با ظرفیت 346 mg/g به کار برده شوند. یک جاذب تحلیل رفته می‌تواند با 0.5 M HCl در مدت تنها ۱۰ دقیقه تولید شود. یک نانوذره جالب چندکاره زمانی که کژنای مشتق شده از پلی اتیلنمین، پیرامون هسته مرکزی مغناطیسی را پوشش می‌دهد، به دست می‌آید. نانومواد حاصل شده

می‌تواند از راه کی لیت و جذب آنیون‌ها توسط جاذبه الکترواستاتیکی فلزهای سنگین را گیر بی‌اندازد و باکتری‌ها را از راه نفوذ به غشاها غیرفعال کند. نانوکامپوزیت توسط EDTA و NaOH باززیایی و دوباره استفاده شود. به علاوه، نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی برای شتاب بخشیدن به انعقاد فاضلاب‌ها استفاده می‌شوند و بعضی از نانوذرات مغناطیسی پوشش داده شده با پلیمر برای تصفیه آلودگی‌های ناشی از نشت نفت به کار رفته‌اند.

به‌طور کلی، نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی مواد مختلفی هستند که پتانسیل زیادی برای تصفیه آب دارند. در هر صورت، هزینه تولید و نسبت آن با موادی که در حال حاضر به عنوان تصفیه‌کننده به کار می‌روند باید در مطالعه‌های بعدی مورد توجه قرار گیرد.

۵.۴ قابلیت مصرف مجدد نانوکامپوزیت‌ها

باززیایی نانوکامپوزیت‌های فرسوده برای بهبود پایداری آن‌ها بسیار با اهمیت است. معمولاً با در نظر گرفتن نوع آلودگی، ساختار آن و مکانیزم نابودی آلاینده‌ها، محلول‌های پایه و اسیدی برای شستشوی نانوکامپوزیت‌ها به کار می‌روند. واکنشگرهای معمول واجدبی:

$NaHCO_3$, $NaCl$, CH_3COONa , $NaOH$, $NaCO_3$ هستند. گزینه دیگر استخراج (ارگانیک) حلال است و کارایی و مقرون به صرفه بودن حلال باید مورد توجه قرار بگیرد. به علاوه، مخلوط حلال ارگانیک و محلول آبی شاید اثرات فوق‌العاده‌ای داشته باشد. رویکردهای پیشرفته اکسیداسیون با استفاده از واکنش‌گرهای فنتون، واکنشگرهای گرمایی یا رویکردهای فوتوکاتالیستی برای باززیایی مواد و دفع شورآب‌ها امکان‌پذیر است. در هر صورت، آن‌ها برای باززیایی نانوکامپوزیت‌های ارگانیک مناسب نیستند چرا که اکسیداسیون احتمالاً باعث شکسته شدن کامپوزیت خواهد شد. توسعه روش‌های نوین باززیایی برای مواد نانوکامپوزیت آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای صنعتی جذاب‌تر خواهد کرد.

۵ جمع‌بندی پایانی

نانومواد به‌طور گسترده به عنوان جاذب‌های بسیار کارآمد، فوتوکاتالیست‌ها و ضد عفونی‌کننده برای تصفیه آب مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها عموماً شایستگی‌های زیادی مثل ظرفیت بالا،

واکنش سریع، گرایش ویژه نسبت به آلاینده‌های هدف، پاسخ‌های بهبود یافته فوتوکاتالیستی در طیف گسترده‌تر و فعالیت‌های ضد میکروبی قوی‌تر از خود نشان می‌دهند. بدون شک آن‌ها امیدوارکننده‌ترین کاندیداها برای گسترش نسل بعدی فناوری تصفیه آب به حساب می‌آیند. البته هنوز مشکلات زیادی در راه کاربردهای صنعتی نانومواد وجود دارد. اول آنکه، نانومواد معمولاً ناپایدارند و به علت نیروی واندر والس بین آن‌ها تمایل به انباشتگی و تجمع دارند. دوم آنکه، به غیر از نانومواد مغناطیسی، بازیافت نانومواد که در تصفیه آب شرکت کرده‌اند بسیار مشکل است و این مسئله باعث می‌شود که استفاده از نانومواد غیراقتصادی و غیرقابل استفاده باشد و در انتها تغییرات و سمی بودن نانوذرات به وضوح فهمیده نشده است.

یک رویکرد امیدوارکننده برای پیشبرد کاربردهای نانومواد، گسترش مواد نانوکامپوزیتی است که هم از ویژگی‌های ماده میزبان استفاده می‌کنند و هم از خصوصیات نانومواد اشباع شده بر روی میزبان استفاده می‌کنند. میزبان‌هایی مثل پلیمرها، بیوپلیمرها، معدنی‌ها، کربن‌های فعال یا غشاها می‌توانند پراکنندگی و پایداری نانوذرات موجود در خود را تسهیل کنند. آن‌ها همچنین می‌توانند انتقال یا نفوذ آلاینده‌ها به میزبان و برهم‌کنش‌های بین وجهی را بهتر کنند. نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند به خوبی رهایی نانوذرات در آب را بهتر کنند. به علاوه، نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند تطابق فناوری نانو با فناوری‌هایی که امروزه استفاده می‌شود را بهبود ببخشند. ما معتقدیم نانوکامپوزیت‌ها تغییرات زیادی در فناوری‌های تصفیه آب به وجود خواهند آورد. کارهای آینده باید فهم برهم‌کنش‌های بین نانوذرات ساکن و میزبان را عمیق‌تر کند، تکنیک‌هایی برای ساخت میزبان و دست‌کاری نانوذرات را گسترش دهد و طراحی نانومواد چندکاره را منطقی‌تر کند.

در این میان، خطرها و اثرات نانومواد در محیط زیست باید مورد بررسی قرار گیرد و سنتز آن‌ها از راه شیمی سبز برای کم کردن اثرات مخرب زیست محیطی باید به صورت موازی پیگیری شود. پروتکل‌ها و رهنمودهایی برای کنترل استفاده از نانومواد برای کمینه کردن اثرات آن‌ها برای سلامت انسان و محیط زیست باید تهیه شود. انتظار می‌رود که این پروتکل‌ها، استانداردها و رهنمودها براساس فهم عمیق ما از اثرات نانو تهیه شوند.

پی‌نوشت:

1. Pb(II), Zn(II) Cu(II), Cd(II), Hg(II), As(III/V)

منبع:

1. Zhang, Yanyang, Bing Wu, Hui Xu, Hui Liu, Minglu Wang, Yixuan He, and Bingcai Pan. "Nanomaterials-enabled water and wastewater treatment." NanoImpact 3 (2016): 22-39.