

مروری بر تصفیه‌ی آب و فاضلاب به کمک نانومواد



گامی بزرگ در راستای کاربردهای بزرگ مقیاس به شمار می‌رود. در این مقاله به‌طور ویژه مبحث نانوکامپوزیت‌های محیط زیستی مانند نانوکامپوزیت‌های ارگانیک و غیرارگانیک، غشاءهای نانوکامپوزیتی و نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین برتری‌ها و آینده‌ی نانوکامپوزیت‌های مختلف را به اختصار بیان خواهیم کرد.

در نظر داشت که مشکلات ذاتی زیادی در مسیر قرار دارد مانند انباشتگی، مشکلات جداسازی، نشت به آب‌های تماسی و همچنین اثرات مخرب احتمالی بر روی اکوسیستم و سلامتی انسان. مواد نانوکامپوزیتی که به‌تازگی تولید می‌شوند مجموعه‌ای از ویژگی‌های مثبت نانوذرات به همراه ویژگی‌های میزبان‌های جامد در ابعاد مختلف را به همراه دارند. این مسئله

در این مقاله، کاربردهای کنونی نانومواد در تصفیه‌ی آب و فاضلاب توضیح داده می‌شود و استفاده از نانومواد گوناگون شامل نانومواد بر پایه‌ی 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 تصفیه‌ی آب صحبت به میان می‌آید، باید

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 هزینه‌ی کم در اولویت قرار دارد.

پیشرفت‌های اخیر در نانومواد منجر به تسهیل در استفاده از فناوری نانو در فرایند تصفیه آب شده است. تاکنون مطالعات مختلف نشان داده است که نانومواد قابلیت‌های فراوانی در تصفیه آب به ویژه در جذب فیزیکی، فرایند غشائی، اکسیداسیون کاتالیستی و عفونت‌زدایی دارد. متأسفانه بیشتر گزارش‌ها در مورد نانومواد تنها در آزمایشگاه‌ها انجام شده و یا فقط نشان می‌دهد که این روش به طور 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 به طور گسترده در آمریکا برای بهینه‌سازی آب‌های زیرزمینی به کار 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 (بجز نانوذرات مغناطیسی)، از آب تصفیه شده بسیار دشوار است. این مسئله از منظر اقتصادی دلخواه نیست. سوم اینکه رفتار و سرنوشت نانومواد مصرف شده در تصفیه آب و فاضلاب به‌خوبی درک نشده است و تأثیر نانومواد در محیط‌های آبی و سلامتی انسان، می‌تواند پیشرفت‌ها در این زمینه را به تعویق بیناندازد.

برای جلوگیری از اثرات مخرب نیاز به ساخت دستگاهی احساس می‌شود که بتواند زمانی که فعالیت‌ها زیاد است رهایی نانومواد را کم کند و یا نانومواد را جابه‌جا کند. نانوکامپوزیت‌ها گزینه‌های مناسب در این مسیر به نظر می‌رسند. نانو کامپوزیت‌ها معمولاً با ساخت نانوذرات دلخواه روی مواد پایه، مانند پلیمرها یا غشاهای 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 به صرفه 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 به طور ویژه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نمود این نانومواد در تصفیه آب به اختصار توضیح داده خواهد شد.

توضیح مختصری درباره‌ی فناوری نانو در بخش آب

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

جذب فیزیکی و جداسازی

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

جذب‌کننده‌های بر پایه‌ی نانومواد، مثلاً فلزها یا اکسیدهای فلزی نانومقیاس، نانولوله‌های کربنی، گرافن و نانوکامپوزیت‌ها معمولاً دارای سطح ویژه‌ی 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 غشائی، مرحله‌ای مهم در تصفیه آب محسوب می‌شود که امکان احیاء آب از منابع غیرمعمول مانند فاضلاب‌های شهری را فراهم می‌آورد. حذف آلودگی‌ها با جداسازی غشائی عمدتاً متنی براندازه است. در هر صورت، هنوز موانع زیادی برای پیشبرد فناوری غشاهای وجود دارد، مثلاً متضاد بودن ذاتی انتخاب‌پذیری و تراوایی، مصرف انرژی زیاد و پیچیدگی‌های اجرایی. برای رفع این موانع، غشاهای نانوکامپوزیتی پیشرفته با معرفی نانوذرات کاربردی به درون غشاهای گسترش داده شده‌اند. این طبقه‌ی جدید غشاهای ویژه‌ی فیزیکی شیمیایی بهبود یافته‌ای 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 غشاهای ویژه‌ی فیزیکی گانه‌ای مانند تراوایی بهینه شده یا ویژه‌ی ضد رسوبی، 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.

کاتالیز

اکسیداسیون کاتالیستی یا فوتوکاتالیستی، یک فرایند اکسیداسیون پیشرفته برای از بین بردن اثرات آلودگی‌ها و میکروبی‌های 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 فوتوکاتالیزورهای موجود قابل مقایسه است.

گندزدایی

گندزدایی، آخرین اما حیاتی‌ترین مرحله در تصفیه آب است. یک گندزدایی ایده‌آل باید ویژه‌ی زی‌را داشته باشد: (۱) طیف ضد میکروبی گسترده در زمان کوتاه؛ (۲) تولید نکردن محصولات جانبی خطرناک؛ (۳) سمیت کم

برای زیست‌بوم و سلامتی انسان‌ها؛ (۴) هزینه‌ی انرژی کم و عملیاتی شدن آسان؛ (۵) قابلیت نگهداری آسان و زنگ نزدن؛ و (۶) قابلیت دفع به صورت امن.

به‌تازگی، نانومواد زیادی با ویژگی‌های ضد میکروبی قوی تهیه شده است که شامل نانوذرات کیتوسان، نقره، TiO_2 های نانو کاتالیست و نانومواد بر پایه‌ی کربن می‌شوند. این نانومواد میکروارگانیسم‌ها را با رهاسازی یون‌های فلزی سمی، آسیب زدن به سلول‌های غشائی با تماس مستقیم و یا تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی از بین می‌برند. برخلاف گندزدایی‌های سنتی این مواد جدید فرایند ناکار کردن میکروارگانیسم‌ها را با رهیافتی پایدارتر انجام می‌دهند، که با توجه به این مسئله انتظار می‌رود تولید مواد جانبی مضر بسیار کمتر شود. علاوه بر این، زمانی که با استراتژی‌های مناسب جداسازی تلفیق می‌شود بعضی از گندزداهای نانو می‌توانند به صورت پیوسته با بهره‌ی بالا و مصرف انرژی پائین بکار روند که این مسئله برای تمرکززدایی از فرایند تصفیه آب بسیار با اهمیت است.

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 بطور گسترده بررسی شده است.

نانومواد مورد استفاده در تصفیه آب

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

نانومواد بر پایه‌ی کربن

اکسید گرافن (GO) یک گرافن تک لایه با حالتی بسیار اکسید شونده است که شامل گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار 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. به طور کلی مواد بر پایه‌ی گرافن جذب‌کننده‌های پرطرفدار برای جذب آلودگی‌های مختلف از آب به‌شمار می‌آیند.

GO و RGO های اصلاح شده به علت توانایی نابود کردن فلزهای سنگین مثل روی، سرب، کادمیوم، مس، جیوه و آرسنیک به طور گسترده مورد کوشش قرار گرفته‌اند. در کنار آنتی‌بیوتیک‌های فلزی، مواد بر پایه‌ی گرافن برای جذب آلودگی‌های آبیونی که نگرانی‌های جدی بوجود آورده‌اند بکار گرفته شدند. گرافن یک جذب‌کننده‌ی عالی برای فلوراید محسوب می‌شود. همچنین یک هیبرید گرافن- پلی‌پروپیلن (PPY) نانوساختار سه بعدی برای تصفیه

پرکلرات (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 آنتی بیوتیک‌ها (پادزیست‌ها)، تتراسایکلین، اکسایتری سیکلین و داکسی سایکلین 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 اساسا وابسته به اندرکنش‌های الکترواستاتیک و پیوندهای کووالانسی است. GO قابلیت جذب بالایی برای رنگ‌های کاتیونی دارد اما جذب رنگ‌های آنیونی به علت دافعه‌ی قوی الکترواستاتیکی، ضعیف است. از سویی دیگر، گرافن و کامپوزیت‌های بر پایه‌ی 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 پایه‌ی گرافن به شمار می‌آید، که این مسئله آنها را تبدیل به یک گزینه‌ی 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 بازمصرفی بودن، ایمنی محیط زیستی 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 آنتی بیوتیک‌ها دارند. نانولوله‌ها معمولاً به صورت مخلوطی از جامدات معلق بکار می‌روند و جداسازی آنها از آب سخت است. پژوهشگران یک کامپوزیت جدید گرانولی $\text{CNTs}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 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 فرایند باززایی شوند.

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 به عنوان نابودکننده‌ی آلودگی‌ها استفاده می‌شود. لایه‌ی آهن (اکسی) هیدروکسید که با Fe^0 محاصره شده

جذب‌کننده‌ی قدرتمندی است.

برخی از آلاینده‌ها مانند As(III/IV) ، U(VI) ، Se(VI) می‌توانند به حالت‌های پس از جابه‌جایی به سطح nZVI می‌توانند به حالت‌های اکسیداسیون پایین‌تر کاهش یابند. nZVI همچنین می‌تواند آلودگی‌های دیگر مثل نیترات، رنگ، آلاینده‌های سمی محیط زیستی و آنتی بیوتیک‌ها را به وسیله‌ی جذب، اکسیداسیون، کاهش و هم-رسوبی از بین ببرد. در مجموع ثابت شده که nZVI بسیار واکنشی، مقرون به صرفه، ماده‌ی دوستدار محیط زیست است و راه‌های نابودی چند منظوره برای تصفیه‌ی فاضلاب در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد.

اکسیدهای آهن نانومقیاس

علاقه‌ی روزافزون برای استفاده از اکسیدهای آهن نانومقیاس برای تصفیه‌ی فاضلاب، ناشی از توانایی زیاد آنها در جذب، سادگی اجرا و فراوانی آنها است. بررسی جذب یون‌های فلزی Pb(II) ، Cd(II) ، Cu(II) ، Zn(II) حاکی از قابلیت جذب $\text{Cu} \ 78.9\%$ ، $\text{Cd} \ 94\%$ ، $\text{Pb} \ 100\%$ و $\text{Zn} \ 100\%$ روی هماتیت نانوساختار با غلظت 0.5 گرم در لیتر است.

جداسازی و بازیابی نانومواد بعد از پایان عملیات همواره به عنوان 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، راه حل‌های عملی و مناسب در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. گزارش‌های فراوانی درباره‌ی استفاده از مگنت‌ها و مگمایت‌های نانومقیاس برای جذب آرسنیک، کروم، سلینیوم، مس، سرب و نیکل از محلول‌ها و سیستم‌های آب طبیعی گزارش شده است. مگنت نانومقیاس هم یک جذب‌کننده‌ی مغناطیسی مهم با قیمت پایین، تغییرات ساده و دوستدار محیط زیست است. مگنت نانومقیاس برای از بین بردن آلاینده‌های فراوانی مثل فلزهای سنگین Cr(VI) ، Cu(II) ، Zn(II) و As(III/IV) ، Se(IV) ، متیل بلو و دی کلروپنول از محلول‌های آبی مناسب است.

مگنت‌ها و مگمایت‌های نانومقیاس با استفاده از روش سل-ژل می‌توانند در مقیاس زیاد ساخته شوند. فرایند 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 وسیله‌ی مگنت‌ها به سادگی انجام می‌گیرد.

۲-۳ اکسیدهای تیتانیوم نانومقیاس

خواص فوتوکاتالیستی TiO_2 به عنوان یک نیمه‌هادی سنتی، بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است. فوتوکاتالیست TiO_2 شامل ترکیباتی به شدت واکنشی مانند رادیکال‌های هیدروکسیل (OH)، آنیون‌های سوپراکسید (و پروکسید) است که می‌توانند ترکیبات ارگانیک را در حضور UV، نور مرئی یا نور خورشید تجزیه کنند. TiO_2 ‌های نانومقیاس همچنین به طور گسترده‌ای در حذف آلودگی‌های میکروبی مانند ترکیبات غشایی اندوکربن، سیانوتوکسین‌ها و آنتی بیوتیک‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر این، فوتوکاتالیست‌هایی که از TiO_2 ‌های نانومقیاس در آنها استفاده شده و زیر نور مصنوعی و طبیعی بکار گرفته می‌شوند، به طور گسترده

برای تجزیه کردن آلاینده‌های ارگانیک گوناگون مثل آفت‌کش‌ها، رنگ‌ها، پلیمرها، آلاینده‌های فنولیک در فاضلاب، آلاینده‌های ارگانیک ماندگار و همینطور تصفیه‌ی آب‌های عادی بکار گرفته می‌شوند.

اکسیدهای فلزی دیگر

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

آلومینا یک جاذب کلاسیک است و شکل گاما آلومینا قدرت جذب بیشتری نسبت به آلفا آلومینا دارد. گاما آلومینای نانومقیاس به علت سطح ویژه‌ی بالا، ظرفیت جذب بالا یک جذب‌کننده‌ی امیدوار کننده به شمار می‌آید. نابودکنندگی بیشینه 96.6% در 25 میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهد است که آلومینای نانومقیاس یک جذب‌کننده‌ی موثر برای Ti(III) از محلول‌های آبی به حساب می‌آید که در PH برابر با 4.5 توانایی جذب 100% دارد.

گاهی اوقات آلومینای 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 (NMnO_2) عملکرد جذب بهتری برای بعضی آلاینده‌های ویژه از خود نشان می‌دهند زیرا سطح ویژه‌ی گسترده‌تر و ساختار آمورف آنها مناسب‌تر است. در دهه‌های گذشته، NMnO_2 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 به صرفه بوده و در طبیعت در دسترس است. محققان متوجه شدند که اکسید منگاس آبدار (HMO) برای از بین بردن Hg(II) موثر است و با افزایش غلظت، PH و دمای محلول جاذب، میزان جذب Hg(II) افزایش می‌یابد.

به عنوان یک ماده‌ی دوستدار محیط زیست، ZnO یک کاندیدای امیدوارکننده برای کاتالیست‌ها، سنسورهای گازی و سلول‌های خورشیدی است. ZnO عمدتاً برای جذب H_2S بکار 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 گزینش‌گری 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 بهبودیافته‌ی نتیجه‌ی شمار زیادی از مکان‌های قطبی روی دیواره‌های متخلخل درون نانولیت‌ها است. هیدرید Cu(II) جذب شده می‌تواند تا حدی هیدرولیز شود، که این امر منجر به تشکیل Cu_2O در دیواره‌های تخلخل‌ها شده و در نتیجه ظرفیت جذب را افزایش می‌دهد. ZnO ‌های نانومقیاس می‌توانند با موفقیت آلاینده‌های دیگر را نابود کند. بیشینه‌ی ظرفیت ZnO ‌ها در دمای 303 کلون

کند و ظرفیت جذب آن 4.065 g/g Au است. فعالیت‌های ضد میکروبی نانوذرات نقره برای ضد عفونی کردن آب بکار گرفته شده است، میکرو ارگانیزم‌های موجود در آب مانند E.coli ممکن است در برخورد با نانوذرات نقره غیر فعال 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 بیشتر می‌شود. نانوذرات نقره هم‌اکنون برای ضد عفونی کردن ماسک‌های جراحی، فیبرهای پارچه و حتی ماسک‌های تنفسی بکار برده می‌شوند.

نانوذرات نجیب فلزی برای تخریب فوتوکاتالیستی ویروس‌های موجود در آب مانند آفت‌کش‌ها، رنگ و

نانوذرات فلزی نجیب

فلزهای نجیب از جمله طلا، نقره، پلاتینوم و پالادیم، به علت اندازه‌ی 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 شده‌ی نانوکریستال و رشد با عامل پایدار کننده است. در بیشتر مواقع، پلیمرها و سورفکتانت‌ها برای بهبود پایداری نانوذرات فلزی نجیب بکار برده می‌شوند.

نانوذرات طلا و نقره به علت ویژگی‌های اپتیکی ویژه، برای شناسایی رد پای آلاینده‌های ارگانیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کنار نظارت بر آلودگی، نانوذرات فلزی نجیب همچنین می‌توانند برای جذب آلاینده‌ها و غیرفعال کردن باکتری‌ها بکار برده شوند. نانوذرات طلا به خوبی می‌تواند Hg را با تشکیل AuHg_3 و AuHg ، Au_3Hg جذب

برای Hg(II) و Cd(II) به ترتیب 378 و 714 میلی‌گرم بر گرم است. گروه‌های هیدروکسیل سطحی ZnO ‌های نانومقیاس در جذب فلزهای سنگین گوناگون نقش اساسی بازی می‌کنند. نانوذرات ZnO و MnOx هم می‌توانند به عنوان کاتالیست برای فرایند پیشرفته‌ی اکسیداسیون مورد استفاده قرار بگیرند. نانوسیم‌های $\beta\text{-MnO}_2$ برای کاتالیست ازوناسیون با استفاده از فرایند هیدروترمال ساده بکار می‌روند. یک مطالعه‌ی 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 Ce یا N ، Cu ، Zr به اکسیدهای فلزی نانومقیاس، فعالیت‌های فوتوکاتالیستی و پایداری نانوذرات اکسید فلزی مشابه می‌تواند بسیار بهبود پیدا کند.



ارگانیک‌های هالوژنی نیز بکار می‌روند.

نانو کامپوزیت‌ها در تصفیه‌ی آب

بیشتر نانوموادى که در بالا به آنها اشاره شد به صورت نانوذرات استفاده شده‌اند. زمانی که به فعالیت‌های بزرگ مقیاس در تصفیه‌ی آب می‌پردازیم باید بعضی از مشکلات ذاتی مثل جمع‌شدگی، سختی جداسازی، نشت به آب‌های تماسی و اثرات مخربی که به انسان و طبیعت وارد می‌شود، مورد بررسی قرار بگیرد. یک رهیافت امیدوارکننده در استفاده از فناوری نانو، گسترش مواد نانو کامپوزیتی است که از ویژگی‌های میزبان و هم نانوذرات موجود استفاده ببرد. به علاوه، نانو کامپوزیت‌ها می‌توانند رها کردن نانوذرات به طبیعت را آسان‌تر کنند و سازگاری فناوری نانو با زیرساخت‌ها کنونی را بهبود ببخشند. انتخاب پایه برای

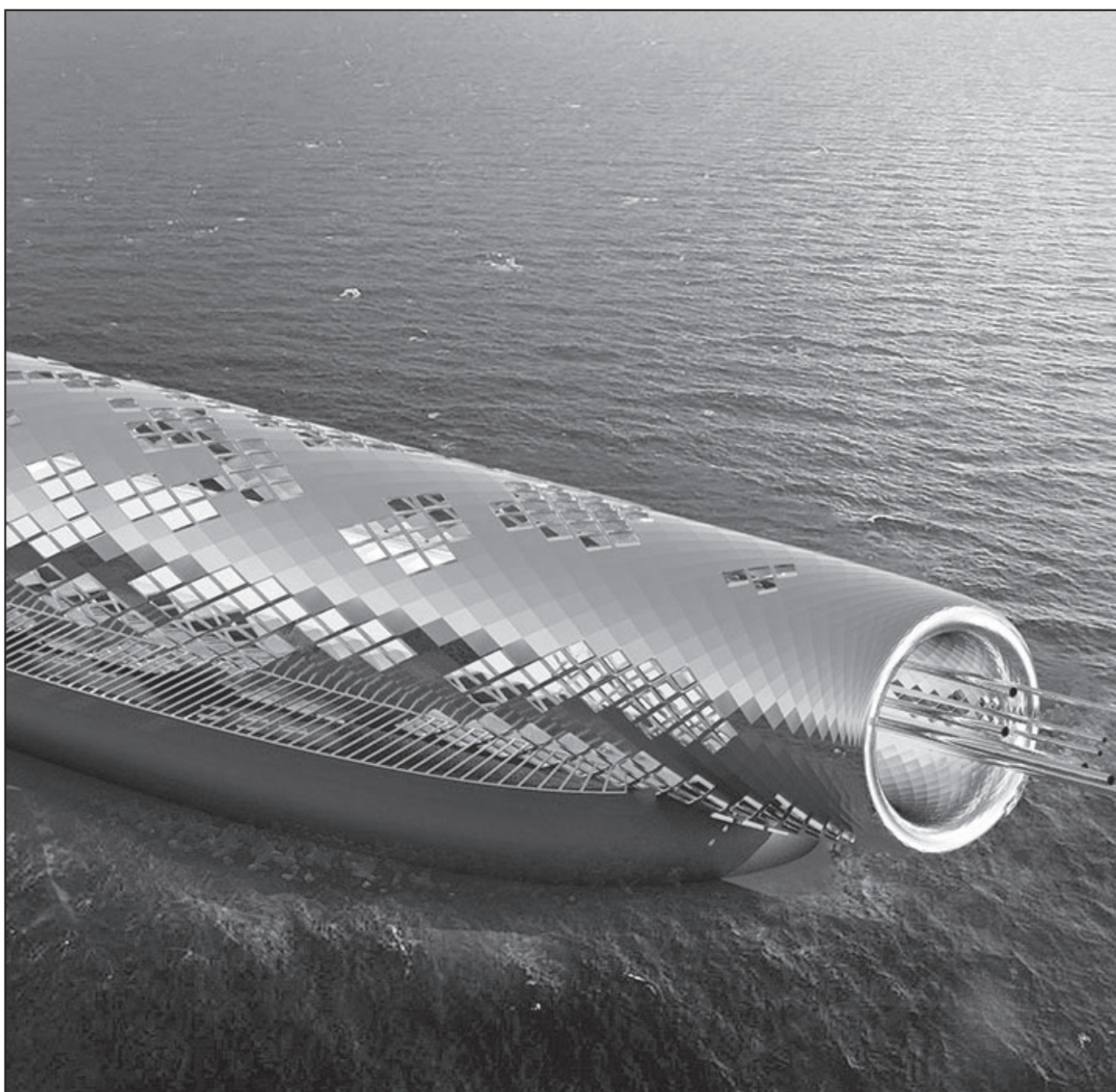
نانو کامپوزیت‌ها بسیار حیاتی است و عامل اصلی در موفقیت نانو کامپوزیت نهایی است. در قیاس با نانومواد آزاد، عملکرد و قابلیت استفاده‌ی نانو کامپوزیت‌ها در مواردی مانند پخش نانوذرات، پایداری و بازیافت بسیار بهبود پیدا کرد. بنابراین مواد نانو کامپوزیت می‌توانند فاصله‌ی بین مقیاس نانو و مقیاس مزوراکاهش دهند. تاکنون، نانو کامپوزیت‌ها بهترین راه ممکن برای انتقال فناوری‌های تصفیه‌ی آب از آزمایشگاه به صنعت به‌شمار می‌روند.

نانو کامپوزیت‌هایی با محافظت‌کننده‌های ارگانیک

پلیمرها یک پایه ویژه برای نانومواد به‌شمار می‌روند زیرا آنها معمولاً دارای تخلخل‌های قابل تنظیم، خواص مکانیکی عالی و گروه‌های عاملی هستند. نانو کامپوزیت‌های برپایه‌ی پلیمر

(FNCS) به علت فعالیت‌های صوتی در آب و تصفیه‌ی آب، مواد آینده‌داری به‌شمار می‌آیند. FNCS معمولاً پرتی‌های ذاتی نانوذرات و پایه‌های پلیمری را دارد. ترکیب کردن مستقیم و سنتز درون-آزمایشگاهی، دو استراتژی اساسی برای تولید FNCSهای 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 درمحل به‌وسیله‌ی آغازگرهای خاص، سنتز می‌شوند. یک روش دیگر سنتز درمحل، اضافه کردن نانوذرات در طول قطبی کردن مونومرهاست.

آلژینات، ماکرومولکول، رزین‌های متخلخل و یون‌های مبدل، بعضی از میزبان‌های پلیمری هستند، که تبادل کننده‌های یونی پلی‌استایرن، یکی از پایه‌های معمول به



بیشتری عنصر هستند که برای تشکیل کامپوزیتی که در آن نانولوله‌های کربنی به عنوان میزبان هستند از آنها استفاده می‌شود.

مواد هیبریدی ۱،۸-دی‌آمینونفتالین-MWCNT-COOH می‌تواند به عنوان جاذب‌های تاثیرگذار برای جداسازی (Cd(II) و (Pd(II) باشد. مکان‌های محدود قابل استخراج روی پلیمر/MWCNTs-COOH نشان‌دهنده‌ی تمایل زیاد به فلزهای سنگین است. ظرفیت بیشینه برای (Cd(II) و (Pd(II) حدود ۱۰۱،۲ و ۱۷۵،۲ mg/g بود و محدوده‌ی شناسایی این روش برای دو فلز سنگین به ترتیب ۰،۰۹ و ۰،۰۷ mg/ml بوده است. جذب DCB-۴،۴ با استفاده از نانولوله‌های کربنی چند دیواره‌ی پیوند زده شده با متیل متاکریلیت (MMA) مورد آزمایش قرار گرفت. از نانوکامپوزیت M-MWCNT-Fe₃C برای ناپودی «قرمز ۲۳» از محلول آبی با ظرفیت بیشینه ۸۵،۵ mg/g استفاده شد.

ژئولیت عموماً از تتراهدرون سیلیکون-اکسیژن و تتراهدرون آلومینیوم-اکسیژن تشکیل می‌شود. ژئولیت به علت مقرون به صرفه بودن و ساختار داخلی منحصر به فرد، به‌طور گسترده به عنوان جاذب، ماده‌ی تبادل کننده‌ی یونی و کاتالیست مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نتیجه مکان‌های پیوندی زیادی را بوجود می‌آورد. رفتار جذبی (Cu(II)، Pb(II) و (Co(II) روی نانوکامپوزیت‌های اتیلن وینیل استات-کلینوپتیلولیت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌هایی که از ذرات فعال شده‌ی HCL پر می‌شوند از خود ظرفیت بالایی در برابر این سه فلز نشان می‌دهند. نانوکامپوزیت‌های ۵-ZnO/HZSM برای جذب ۴-نیتروفنول (NPn-۴) تهیه شدند. محققان متوجه شدند که در PH=۵ در مدت ۹۰ دقیقه ۹۱٪ از ۴-نیتروفنول نابود می‌شود. برای تصفیه‌ی رنگ‌های صنعتی پیشرفته، نانوکامپوزیت‌های TiO₂-ژئولیت سنتز شده است. نتایج نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت از تخریب فوتوکاتالیستی جذب-جهت‌دار که برای ناپودی ترکیبات رنگی مفید است استفاده می‌کند.

بیوجار یک ماده‌ی پرکربن است که از راه پیرولیز زیست توده (Biomass) در محیط ناهواری تولید می‌شود. بسیار دسترس‌پذیر و مقرون به صرفه است. گسترش نانوکامپوزیت‌های برپایه‌ی بیوجار می‌تواند در کنترل آلودگی آب، فاضلاب‌ها و جداسازی کربن بکار برده شود. نانوکامپوزیت‌های بیوجار از دو راه متفاوت بدست می‌آیند، پیش-غنی کردن زیست‌توده‌ها با استفاده از پیش‌ماده‌های نانوذرات یا اشباع مستقیم نانوذرات بعد از پیرولیز. نانوکامپوزیت‌های Fe₂O₃/ بیوجار می‌توانند به‌طور مستقیم با پیرولیز گرمایی FeCl₃ سنتز شوند که جاذب خوبی برای (As(V) هستند. کامپوزیت‌های بیوجار پوشش داده شده با نانولوله‌های کربنی با مساحت سطحی ویژه‌ی ۳۵۹ g/m² سنتز شده و این ماده برای جذب آلودگی‌های رنگی بسیار خوب عمل می‌کند. نانوکامپوزیت‌های بیوجار/MgO فسفات را به خوبی ۸۳۵ mg/g جذب می‌کنند. جذب معمولاً توسط مکانیزم‌های مختلفی مثل تبادل یونی، تبادل پای-کاتیون، کمپلکس سطحی و هم-رسوبی رخ می‌دهد. به علاوه، نانوکامپوزیت بیوجار گرافیتی جدید C₂N₄ برای ناپودی رنگ‌ها از راه جذب و تخریب کاتالیستی همزمان بکار برده شد. بیشتر نانوکامپوزیت‌های برپایه‌ی معدنی‌ها به صورت پودری

PH ۳-۴ بررسی شده است. کیتوسان با ۵ wt% کامپوزیت گرافن اکساید (CSGO) دارای بیشترین ظرفیت جذب 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. اینچنین جداسازی بهینه و استخراج، (Ni(II)، (Cu(II)، (Co(II)، (Fe(III)، (Al(III)، (Pd(II) و (Zn(II) صورت گرفت. تقریباً ۹۵٪ ناپودی برای بیشتر عناصر مطالعه شده و ۱۶٪ ناپودی برای (Mn(II) بدست آمد. دانه‌های کامپوزیتی CNT-کیتوسان کروی با روش فریز-کستینگ سنتز شد. با چکاندن محلول مرکب در محلول نیتروزن، 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 جذب خوب (۴۳،۶ mg/g) بیلی‌روبین (در طول ۲ ساعت) قلمداد می‌شوند. نانوکامپوزیت‌های کیتوسان پوشش داده شده با مس (CuCH) برای ناپودی مالاتیون یا آفت‌کش‌های ارگانوفسفات از آب‌های کشاورزی استفاده شده است. بیشترین ظرفیت در PH نزدیک به ۲ به ۳،۵۳۲۲،۶ mg/g رسید. همچنین نانوکامپوزیت‌های نقطه کوانتومی/کیتوسان ZnS برای اجرای فعالیت‌های فوتوکاتالیستی سطح بالا سنتز شده است. این مواد بر اساس روش شیمیایی کلئیدی در دمای اتاق سنتز شد. در معرض نور UV، رنگ‌های متیلن آبی و متیلن نارنجی به‌خوبی در ۱۲۰ دقیقه اکسیداسیون تخریب می‌شوند.

نانوکامپوزیت‌هایی با پایه‌های غیر ارگانیک

پایه‌های غیر ارگانیک نانوکامپوزیت‌ها عمدتاً شامل کربن‌های فعال، CNTها و معدنی‌هایی طبیعی مثل ژئولیت، بیوجار و رس هستند. کربن‌های فعال (AC) جاذب‌های سنتی‌ای هستند که به‌صورت گسترده در تسهیل تصفیه‌ی فاضلاب‌ها بکار برده می‌شوند. AC یک جاذب بسیار متخلخل است که به اندازه‌ی کافی میکروتخلخل و سطح آبرگیز دارد و می‌تواند یک پایه‌ی عالی برای نانوذرات باشد. نانوذرات آهن (III) اکسید-هیدروکسید روی گرانول‌های AC توسط هیدرولیز اجباری FeCl₃ ثابت می‌شوند و اندازه‌ی نانوذرات آهن با اضافه کردن فسفات بسیار کاهش می‌آید. نانوکامپوزیت‌های AC-آهن باعث افزایش ۴۰ درصدی ظرفیت جذب (As(V) در نمونه‌های اولیه شدند. نانو-ZnO ها بر کربن‌های فعال گرانیولی اضافه شد تا توانایی ناپودی (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 به عنوان عامل شستشو می‌توانند باز یافت شوند. به‌علاوه، توسط لایه‌نشانی کاهشی با استفاده از NaBH₄، نانوذرات دولفری Fe/Pb که از AC اشباع شده است توسعه داده شد. ۹۰ درصد از ۲-کلروپوفنیل توسط نانوکامپوزیت AC سنتز شده در ۴۸ ساعت کاهش یافت و محصولات کاهنده کلروپوفنیل باقیمانده به‌طور همزمان جذب شدند. نانوکامپوزیت‌های نانولوله‌ی کربنی (CNT-NCs) به موادی اشاره دارد که شامل دو یا تعداد

شمار 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 ناپودی آلاینده‌ها دارند. نانوذرات اشباع شده از قبیل، HFO، La(OH)₃، PEI، ZrP، ZrO₂ و اغلب باعث اتصال خاص به آلاینده‌های هدف از جمله فلزات سنگین (Ni, As, F, Cr (III), P می‌شوند. این آلاینده‌ها معمولاً از راه مکانیزم‌های چنگانه مثل کمپلکسیون سطحی، جذب الکترواستاتیک و هم-رسوبی نابود می‌شوند. همچنین، جذب‌کننده‌ی باردار می‌تواند پیش-مترکشدن 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 احاطه شده محافظت کنند. به علت سایز بزرگ PNCها، آنها را می‌توان به راحتی از آب‌های تصفیه شده 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 ArsenXnp و HFO-۲۰۱ به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. اخیراً استفاده از نانوکامپوزیت‌های HFO-۲۰۱ برای ناپودی فسفات فراگیر شده است. عملکرد HFO-۲۰۱ پایدار بوده است و توانسته ۱۵۰۰ BV 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 بوجود 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 و کاپالیته از خود نشان می‌دهند. NCهای برپایه‌ی سلولز قابلیت تبادل یونی یا جذب خوبی دارند. آنها معمولاً به حملات میکروبیولوژیکی مقاومت و پایداری گرمایی صوتی از خود نشان می‌دهند. بعضی رهیافت‌ها برای تولید NCهای برپایه‌ی سلولز توسعه داده شده است. یک روش کاملاً مشابه با نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. نانوکامپوزیت‌های سلولزی نانوذره‌ی لاکتریایی طلا با استفاده از سترات کاهش دهنده محلول Au³⁺ + حضور هیدروژل BC در ۳۰۳ کلین سنتز شدند. محققان متوجه شدند که جذب نه تنها روی صفحه‌ی نانوکامپوزیت AuNP/BC بلکه درون پایه نانوکامپوزیت هم اتفاق می‌افتد. به‌علاوه، درهم‌آمیختگی می‌تواند پاسخ‌های طیف‌سنجی بهبود یافته‌ی رامان 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 به عنوان مکان‌های فعال برای آلاینده‌های آب عمل می‌کنند. به‌صورت کلی، کیتوسان‌های عرضی حتی در PHهای کم، غیر محلول هستند بنابراین در دامنه‌ی وسیعی از PHها عمل می‌کنند. جذب بهبودیافته‌ی آلاینده‌ها توسط NCهای برپایه‌ی کیتوسان به‌خوبی مطالعه شده است. کامپوزیت‌های کیتوسان/گرافن/اکسید (CSGO) با سه مقدار متفاوت GO (۵ wt%، ۱۰ wt%، ۱۵ wt%) سنتز شده‌اند و شرایط بهینه برای جذب (Au(III) و (Pd(II) در

هستند و برای تصفیه‌های در-محل بکار می‌رود. در حال حاضر توجه ویژه‌ای به نانوکامپوزیت‌ها مغناطیسی (به علت راحتی جداسازی و جمع‌آوری آنها) شده است.

نانوکامپوزیت‌های پلیمری برپایه‌ی رس (CPNs) مخلوطی از پلیمر و معدنی‌های رس غیرارگانیک هستند که از ویژگی‌های ارگانیک و غیرارگانیک بهره‌مند هستند. CNPها پایداری مکانیکی و شیمیایی، مقاومت گرمایی، منطقه‌ی سطحی بالا و نفوذپذیری گازی کاهش‌یافته بسیار بهبودیافته‌تری از خود نشان دادند. CPNهای مختلف برای حذف آلاینده‌های معدنی غیر آلی و آلی مانند Co(II) ، Zn(II) ، Se(IV) و آترزین به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. CPN پلی کربنات سدیم / پلی اتیلن / مونتوریلونیت مشاهده شد که در برابر $E. coli$ فعالیت ضد میکروبی قوی نشان می‌دهند. CPNهای سپیولیت-PDAMAC (polydiallyldimethylammonium) پیش-تصفیه‌ی فاضلاب بکار برده شدند. به طور کلی، CPNها مواد پایدار آینده‌داری برای نابودی آلاینده‌ها به‌شمار می‌آیند.

غشاهای نانو کامپوزیت

غشاهای نانو کامپوزیت به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱) غشاهای نانو کامپوزیتی سنتی، (۲) نانوکامپوزیت‌های لایه‌ی نازک و (۳) غشاهایی با سطح پوشش داده شده. غشاهای نوع اول عموماً با روش فاز معکوس سنتز می‌شوند به‌صورتی که نانوذرات درون تخلخل‌ها و زیرلایه‌ی غشاهای وارد می‌شوند. برای نانوکامپوزیت‌های لایه‌ی نازک یک لایه‌ی بسیار نازک بر روی زیر لایه به عنوان لایه‌ی مانع کشیده شد که عموماً در غشاهای RO/NF بکار می‌رود. نانومواد در طول تغییرات فازی و فرایند پلیمراسیون بین‌وجهی به‌درون لایه‌های نازک وارد می‌شوند. سومین گونه؛ نانومواد با فرایندهایی مثل خودسامانی، لایه‌نشانی، جذب یا پیوندزنی شیمیایی بر روی سطح غشاهای لایه‌نشانی می‌شوند.

غشاهای نانو کامپوزیت که با نانوذرات کاری مثل نانو- TiO_2 پوشش داده می‌شوند ویژگی‌های هایپر-کاتالیستی یا فوتو-واکنشی از خود نشان می‌دهند. در معرض تابش UV، TiO_2 های احاطه شده با غشاهای PES از خود توانایی‌های ضد رسوبی نشان می‌دهند. گزارش جدیدی از غشای نانو کامپوزیت Anatase/Tetrate که می‌تواند به طور همزمان Cr(VI) و 4-Cl کلروفلر را از راه جذب و اکسیداسیون فوتوکاتالیستی حذف کند داده شده است. فوتوکاتالیست‌های خود-تمیز شونده توسط غشاهای نانو- ZnO/PVDF و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ی نازک TiO_2 بدست آمده است که شار آب در غشاهای تسهیل می‌کند. ساکن‌سازی نانوذرات آلومینا در طول وارونگی فازی PVDF برای تهیه‌ی غشاهای مخلوط پایه‌ی صورت گرفت. این فرایند آبدوستی، نفوذ آب، مقاومت به رسوب، بازیابی شار و پایداری مکانیکی را بهبود می‌بخشد در حالیکه چگالی و اندازه‌ی حفره‌ها ثابت می‌ماند. چنین غشاهایی قدرت مکانیکی پلیمرهای غشاهای سلولی و واکنش‌پذیری بالای آنها را ترکیب می‌کند. نفوذ بهبود یافته‌ی آب در غشاهای احاطه شده با نانوذرات ZrO_2 نیز مشاهده شد. اشباع نانوذرات نقره (AgNP) درون غشاهای باعث آنتی‌باکتریال شدن آن می‌شود. به‌جای وارد کردن Ag به فاز ارگانیک در حین فرایند پلیمراسیون، پژوهشگران AgNP را روی

سطح لایه‌ی نازک غشاء نشان‌دهند که منجر به جلوگیری از انحلال AgNP و Ag^+ در محیط شد. نانوکامپوزیت‌های لایه‌ی نازک ساخته شده، نمایش آنتی‌بیوتیکی خوبی همراه با شار آبی بهبود یافته نشان دادند.

غشاهای احاطه شده با نانولوله‌ها نیز شامل حفره‌های سرامیک به همراه نانولوله‌های پر شده در آن است. غشاء نانولوله-سرامیک بهینه شده، روغن را به صورت 100% پس‌می‌زند و شاری برابر با 36 bar/L/h m^2 دارد. همچنین مقاومت خوبی به رسوب ارگانیک نشان می‌دهد. به علاوه، نانوکامپوزیت‌های بر پایه‌ی گرافن پتانسیل زیادی در تصفیه‌ی آب غشائی، کمینه کردن مقاومت انتقالی و پیشینه کردن شار عبوری از خود نشان دادند. با ترکیب سدیم ردیف‌شده و اکسید گرافن، یک نانو کامپوزیت بر پایه‌ی گرافن تولید شد. کامپوزیت حاصل انتخاب‌پذیری بالا و آهنگ انتقال مولکول‌های آب خوبی از خود نشان داد. این خصوصیت باید به حضور گروه‌های اکسیدی، نقص‌های ساختاری، نقص ساختاری، شکاف‌های لبه به لبه و مناطق غیر اکسیدی نانوساختارهای GO نسبت داده شود که می‌تواند کانال‌های آبی فراوانی ایجاد کند. زمانی که غلظت GO $16 \text{ wt}\%$ می‌رسد یک شار بهینه‌ی عبوری $1699 \text{ g(m}^2\text{h)}$ بدست خواهد آمد. به علاوه، هر چه ابعاد نانوصفحات کوچکتر باشد نقص‌های ساختاری بیشتری و گروه‌های اکسیژن‌دار کمتری می‌توانند کانال‌های آبی بسازند. غشاهای نانو کامپوزیت لایه‌ی نازک (TFN) با یکی کردن اکسید گرافن با کیفیت‌های مختلف با پلی سولفون تهیه می‌شوند. زمانی که شار آب خالص عبور می‌کند، غشاهای TFN که از $0.3 \text{ wt}\%$ اکسید گرافن تشکیل شده‌اند بیشترین عبور آب را دارا هستند و درصد پس‌زنی آنها برای NaCl و MgCl_2 ، MgSO_4 ، Na_2SO_4 به ترتیب برابر با 95.2% ، 91.1% ، 62.1% و 59.5% است. به غیر از انتقال مولکول‌ها از میان غشاهای، غشاهای نانو کامپوزیت بر پایه‌ی گرافن دارای ویژگی‌های ضد رسوبی نیز هستند. چنین خواص رضایت بخشی می‌تواند به حضور گروه‌های اکسیژنی که منجر به سطح افزایش یافته‌ی ناحیه‌ی آبدوست و کاهش پتانسیل زتای منفی می‌شود نسبت داد. که این امر می‌تواند میکروارگانیزم‌ها را از طریق الکترو-دافعه دفع کند و مانع از پیوست سطحی میکروارگانیزم‌ها شود. در نتیجه گسترش غشاهای نانو کامپوزیت، کاربردهای فناوری غشاهای را به شدت بهینه کرده است. با در نظر گرفتن پیشرفت‌های تجاری فناوری غشاهای، غشاهایی که توسط نانومواد بهبود یافته‌اند برای فعالیت‌های بزرگ مقیاس بسیار مناسب هستند.

نانو کامپوزیت‌های مغناطیسی

نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی، نانومواد منحصر به فردی به حساب می‌آیند. آنها معمولاً دارای نانوساختارهای هسته-پوسته هستند که به راحتی و سرعت می‌توانند با یک میدان مغناطیسی خارجی جمع‌آوری شوند. نانوذرات کاربردی یا گروه‌های کاربردی می‌توانند روی نانوذرات Fe_3O_4 بوسه‌ی پیوند‌های شیمیایی یا لایه‌نشانی مستقیم، ساکن شده یا پیوند زده شوند. موادی که باید پوشش داده شوند شامل SiO_2 ، CNTs ، GO ، Pd ، Ag ، TiO_2 و غیره هستند. پوشش SiO_2 می‌تواند ناحیه‌ی سطحی بالا و تخلخل خوبی تولید کند، در حالیکه از هسته‌ی مغناطیسی در برابر خوردگی محافظت می‌کند. بعد از پوشش دهی،

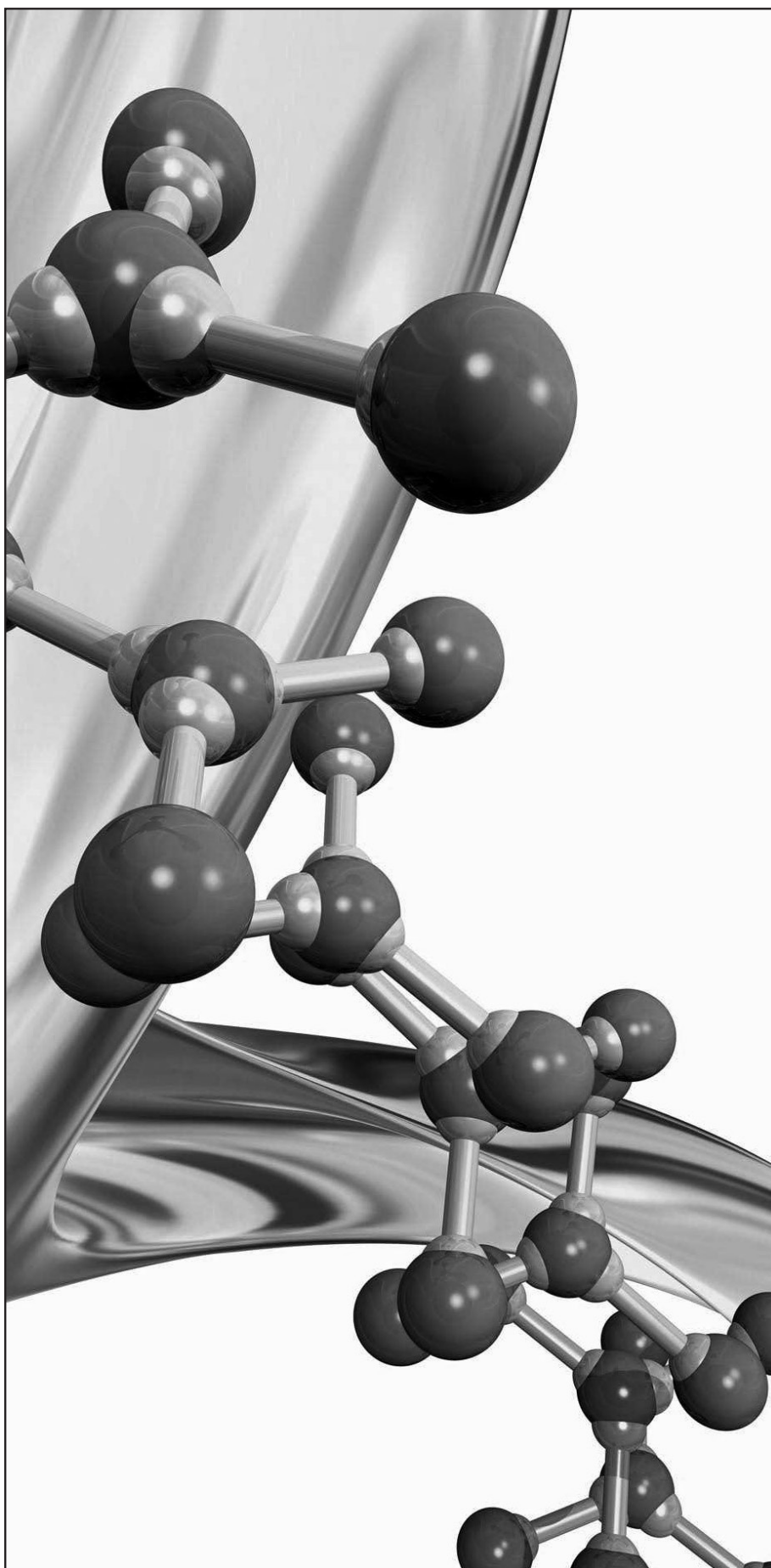
نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی حاصل معمولاً جذب بهبود یافته‌ی توانایی فوتوکاتالیستی با یک کینتیک سریع در مقابل آلاینده‌هایی مثل فلزهای سنگین، رنگ‌ها، فنول‌ها یا میکروب‌ها از خود نشان می‌دهند.

در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای از نانوسیم‌های مغناطیسی برپایه‌ی Mn برای نابودی فلزهای سنگین سنتز شده است. یک روش ساده‌ی تک‌گام سلووترمال برای تولید کره‌ی خلاء کربن مغناطیسی که برای نابود کردن فلزهای سنگین مناسب است پیشنهاد شده است. به علاوه، نانوکامپوزیت‌های مگمات اسلیک‌به‌عنوان کاتالیست‌های ناهمگون فنتون سنتز شده‌اند. این مسئله می‌تواند به خوبی آلاینده‌هایی مثل PNP و MB را تخریب کند. استفاده‌ی بلندمدت آبشویی قابل چشم‌پوشی Fe را نشان داد. پیشنهاد شده است که نانوذرات اصلاح شده با آمینواسیدها می‌توانند بیش از 94% سلول‌های باکتری را در طول 20 دقیقه در PH بین $4-10$ جذب کنند. نانوکامپوزیت‌های $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ پلی (۱-وینیلپیمیدازول)-پیوندی می‌توانند به خوبی برای جذب Hg(II) در $\text{PH}=7$ با ظرفیت 346 mg/g بکار برده شوند. یک جاذب تحلیل‌رفته می‌تواند به 0.50 MHCl در مدت تنها 10 دقیقه تولید شود. یک نانوذره‌ی جالب چندکاره زمانی که کُرّانای مشتق شده از پلی‌اتیلن‌مین، پیرامون هسته‌ی مرکزی مغناطیسی را پوشش می‌دهد بدست می‌آید. نانومواد حاصل شده می‌تواند از راه کی‌لیت و جذب آنیون‌ها توسط جاذبه‌ی الکترواستاتیکی فلزهای سنگین را گیر بیاننداد و با کتری‌های را از راه نفوذ به غشاهای غیرفعال کند. نانوکامپوزیت توسط EDTA و NaOH باززایی 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 تصفیه‌ی آلودگی‌های ناشی از نشت نفت به کار رفته‌اند.

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

قابل مصرف مجدد بودن نانو کامپوزیت‌ها

باززایی 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 بکار می‌روند. واکنشگرهای معمول واجذب NaOH ، Na_2CO_3 ، NaHCO_3 هستند. گزینه‌ی 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 فوق‌العاده‌ی داشته باشد. رویکردهای پیشرفته‌ی اکسیداسیون به استفاده از واکنش‌گرهای فنتون، واکنشگرهای گرمایی یا رویکردهای فوتوکاتالیستی برای باززایی مواد و دفع شورآب‌ها امکان‌پذیر است. در هر صورت، آنها برای باززایی نانوکامپوزیت‌های ارگانیک مناسب نیستند چرا که اکسیداسیون احتمالاً باعث شکسته شدن کامپوزیت خواهد شد. توسعه‌ی روش‌های نوین باززایی برای مواد نانوکامپوزیت آنها را برای استفاده در کاربردهای صنعتی جذاب‌تر خواهد کرد.



جمع بندی پایانی

نانومواد به طور گسترده به عنوان جاذب‌های بسیار کارآمد، فوتوکاتالیست‌ها و ضدعفونی کننده 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 واندروالس بین آنها تمایل به انباشتگی و تجمع دارند. دوم آنکه، به غیر از نانومواد مغناطیسی بازیافت نانومواد ی 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 امیدوار کننده 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، بیو-پلیمرها، معدنی‌ها، کربن‌های فعال یا غشاهای می‌توانند پراکنندگی و پایداری نانوذرات موجود در خود را تسهیل کنند. آنها همچنین می‌توانند انتقال یا نفوذ آلاینده‌ها به میزبان را بهتر کنند و برهم کنش‌های بین‌وجهی 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 بوجود خواهند آورد. کارهای آینده باید فهم برهم کنش‌های بین نانوذرات ساکن و میزبان را عمیق‌تر کند، تکنیک‌هایی برای ساخت میزبان و دستکاری نانوذرات 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 بر اساس فهم عمیق ما از اثرات نانو تهیه شوند.

منبع:

Zhang, Yanyang, Bing Wu, Hui Xu, Hui Liu, Minglu Wang, Yixuan He, and Bingcai Pan. «Nanomaterials-enabled water and wastewater treatment» NanoImpact ۳ (۲۰۱۶): ۲۲-۳۹.

مترجم - آیدین هادی فکور