دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۵۹-۴۷

"مقاله پژوهشی"

کاربرد فناوری نانو در تصفیه آب و حذف آلاینده‌ها

مجتبی جمعیتی*
گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران
*نویسنده مسئول مکاتبات: drmjamiati@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴)

چکیده

آب یکی از ضروری‌ترین عناصر حیات بر روی زمین است و اگر چه بیش از ۷۰ درصد از سطح کره زمین با آب پوشیده شده است اما کم‌تر از ۳ درصد از آن آب شیرین می‌باشد. از این مقدار ۷۹ درصد به قله‌های یخی تعلق دارد، ۲۰ درصد آن آب‌های زیرزمینی است که به راحتی قابل دسترسی نمی‌باشد و در مجموع در هر زمان تنها یک ده هزارم از کل آب‌های کره زمین به سادگی در دسترس انسان قرار دارد. در دسترس بودن آب سالم و پاک یکی از مهم‌ترین مسایل پیش روی بشر می‌باشد و به تدریج که مقدار مصرف آب بیش‌تر می‌شود، مواد آلاینده نیز به طرق مختلف باعث آلوده کردن منابع آبی می‌گردند و این مساله در آینده بحرانی‌تر خواهد شد. پذیرش حق برخورداری از آب به عنوان یک حق برای بشر ممکن است مهم‌ترین گام در برطرف کردن دشواری تامین این بنیادی‌ترین عنصر زندگی مردم باشد. فقدان دسترسی به آب تمیز و بهداشتی در کشورهای در حال توسعه، اولویت توسعه و استفاده از فن‌آوری جدید را بیش از پیش مطرح می‌کند. فن‌آوری نانو با راه‌کارهای نوین و جدید خود اظهار می‌دارد که مواد با پایه نانو می‌توانند به فن‌آوری‌های تصفیه آب ارزان قیمت‌تر، بادوام‌تر و مؤثرتری منجر شوند، که با این وجود بخشی از نیازهای کشورهای در حال توسعه را می‌توانند به نوعی برآورده سازند. فرایندهای تصفیه آب مبتنی بر نانوفناوری در مقایسه با روش‌های سنتی بسیار کارآمدتر هستند، زیرا این محلول‌ها می‌توانند با ویژگی‌هایی ساخته شوند که می‌توانند میزان جذب مواد را از آب افزایش دهند.

کلمات کلیدی: نانو تکنولوژی، کاتالیست، آلاینده‌ها، غشاء، نانو فیلتر.

مقدمه

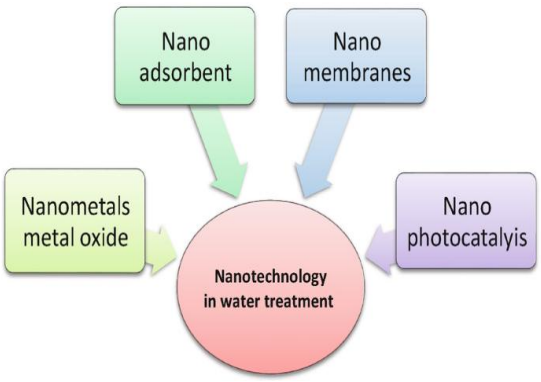
حدود دو سوم کره زمین را آب فرا گرفته است، که از این میزان آب حدود ۹۷ درصد آن غیر قابل آشامیدن هست. بر اساس پیش بینی سازمان ملل در سال ۲۰۳۵ میلادی حدود ٤٨ کشور (یعنی ۳۲ درصد جمعیت جهان) دچار کمبود آب آشامیدنی می‌شوند. کمبود منابع آب هم از نظر کیفی و هم از نظر کمی تهدیدی جدی برای جمعیت دنیا به ویژه برای کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. ۱۳٪ از جمعیت جهان هنوز به منابع آب سالم دسترسی ندارند. آلودگی محیط زیست و منابع آب در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های دنیای امروز است. فعالیت‌های انسانی علت اصلی آلودگی منابع آب مانند اقیانوس‌ها، رودخانه‌ها و ... هستند که نتیجه این آلودگی، کاهش کیفیت منابع آب سالم خانگی و صنعتی تا حد زیادی است. مواد شیمیایی سمی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی دارویی، هیدروکربن‌های پلی آروماتیک، حلال‌های آلی و معدنی، پاتوژن‌ها و سایر آلاینده‌ها به آب‌ها نفوذ کرده و در آن‌ها حل می‌شوند و در آب ایجاد رسوب می‌کنند. آلودگی صنعتی، همراه با پساب‌های خانگی، روان آب‌های کشاورزی و شهری، رودخانه‌ها را آلوده کرده و تصفیه آب را برای حذف همه آلاینده‌ها دشوار می‌کند. این آلودگی می‌تواند بر کیفیت رودخانه‌ها و کیفیت زندگی آبزیان تأثیر بگذارد و از طریق مصرف آب بر سلامت انسان نیز تأثیر بگذارد (۳-۱).

به منظور بهبود کیفیت آب، منابع طبیعی و تأمین آب مناسب برای استفاده انسان، روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. در آغاز قرن بیست و یکم نانوتکنولوژی به عنوان جایگزینی برای حذف بهتر آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین، جداسازی آب روغنی و فعالیت ضد میکروبی مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، با افزایش صنعتی شدن همراه با آلودگی رودخانه‌ها، آب دریا می‌تواند جایگزین جالبی برای منبع آب آشامیدنی پس از تصفیه کافی باشد. نانومواد به عنوان امکانی برای حذف نمک از آب دریا مورد مطالعه قرار می‌گیرند و نوشیدن آن را ممکن می‌کند. با این حال، نیاز به روشن شدن خطرات بالقوه که این نانومواد می‌تواند برای محیط زیست ایجاد کند، وجود دارد. بنابراین، هدف از این بررسی، توصیف کاربرد فناوری نانو در تصفیه فاضلاب در خصوص فلزات، حذف روغن از آب، فعالیت ضد میکروبی و نمک‌زدایی به منظور بهبود کیفیت آب و همچنین بحث در مورد خطر بالقوه آنها برای محیط زیست است (٤).

این فناوری برای اولین بار حدود چهل سال پیش مطرح شد. البته روش های دیگری نیز برای دسترسی به آب قابل شرب وجود دارد که از جمله آن می توان به استفاده از دستگاه آب شیرین کن اشاره کرد که این سامانه بروی آب‌های شور دریا و یا رودخانه‌ها قرار گرفته و آب قابل شرب را برای ما تامین می‌کند. در ذیل به معایب استفاده از این سامانه و برتری فناوری نوین نانو بر این روش اشاره خواهیم کرد. در سال‌های اخیر ذرات نانو جهت تصفیه آب در سراسر دنیا توسعه یافته‌اند. تصفیه آب به دو بخش فیلتراسیون و گندزدایی تقسیم می‌شود که نانوتکنولوژی در هر دو بخش کاربرد دارد. نانوتکنولوژی مواد نانویی بسیاری را برای تصفیه آب‌های سطحی، زیرزمینی و پساب‌ها و حذف آلودگی‌های فلزی سمی و آلی، غیرآلی و

میکروارگانیسم‌ها ارایه می‌دهد. به وسیله فیلتراسیون نانو می‌توان مواد آلی طبیعی، آلودگی‌های میکروبی و آلی، نیترات و ارسنیک را از آب‌های سطحی و زیر زمینی حذف کرد. به وسیله اسمز معکوس می‌توان ترکیبات آلی، غیرآلی و آلودگی های میکروبی را از آب حذف و همچنین نمک‌زدایی کرد. با کمک جاذب‌های نانو، کاتالیزورها و غشاهای نانو می‌توان آلودگی‌های میکروبی و شیمیایی آب را حذف کرد. اما مواد نانو دارای اثرات سو نیز می‌باشند و برای تک سلولی‌ها و جانوران دریایی (دلفین و ماهی) سمی است (۶-۵).

نانو مواد مورد استفاده در سیستم تصفیه آب و پساب شامل نانو جاذب‌های پایه کربنی مثل نانولوله‌های کربنی، نانو ذرات پایه فلزی، نانو ذرات پلیمری و زئولیت‌ها هستند که به علت سطح فعال بالا، پتانسیل بالایی در جذب دارند و میزان جاذب در مقایسه با جاذب‌های متداول کاهش می‌یابد، بنابراین امکان استفاده از تجهیزات کوچک‌تر در سیستم‌های تصفیه پساب میسر می‌گردد. با توجه به مواد نانو، نانوتکنولوژی تصفیه آب به چهار گروه اصلی نانو فوتوکاتالیز، نانو جاذب‌ها، غشاهای نانو و نانو فلزات یا اکسیدهای فلزی تقسیم می‌شوند (۷):



شکل (۱): چهار گروه اصلی نانوتکنولوژی تصفیه آب

در کشورمان ایران، مشکل آب به ویژه آب شیرین با توجه به وضعیت جغرافیایی و قرار گرفتن آن در منطقه خشک و نیمه خشک از حساسیت زیادی برخوردار است. همچنین ذخایر آب کشور در حال کاهش و شور شدن است و آب‌های سطحی نیز با انواع آلودگی‌ها آلوده می‌شوند. بنابراین با نگاهی به مشکلات تامین آب در ایران و همچنین اهمیت تصفیه پساب‌های خانگی و صنعتی، استفاده از فناوری‌های نوین ضروری به نظر می‌رسد.

روش‌های تصفیه پساب با استفاده از نانومواد

فاضلاب یکی از مهمترین چالش‌های زیست محیطی در جهان است. فاضلاب حاوی طیف وسیعی از آلاینده‌ها، از جمله مواد آلی، فلزات سنگین و میکرو ارگانیسم‌ها است که می‌توانند به محیط زیست و سلامت انسان آسیب برسانند. فناوری نانو می‌تواند راه حل‌های جدیدی برای تصفیه فاضلاب ارائه دهد. ذرات نانو دارای خواص و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که می‌توانند برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از فاضلاب استفاده شوند. مزایای تصفیه فاضلاب با فناوری نانو عبارت است از:

حذف موثر آلاینده‌ها: ذرات نانو به دلیل اندازه کوچک خود می‌توانند به راحتی با آلاینده‌ها پیوند برقرار کرده و آنها را از فاضلاب جدا کنند. این امر باعث می‌شود که فناوری نانو برای حذف آلاینده‌های مقاوم به روش‌های تصفیه سنتی، مانند فلزات سنگین، مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها، بسیار موثر باشد.

کاهش هزینه‌ها: فناوری نانو می‌تواند هزینه‌های تصفیه فاضلاب را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این

امر به دلیل استفاده از مواد کم‌تر و فرآیندهای ساده‌تر است.

حفظ محیط زیست: فناوری نانو می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب کمک کند. این امر باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی تصفیه فاضلاب می‌شود (۵).

نانو مواد برای بهبود کارایی فرایندهای فتوکاتالیستی و شیمیایی

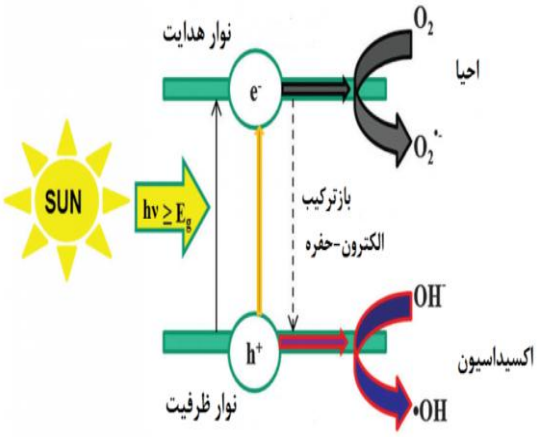
ذرات ریز آلاینده تاثیر بسیار بدی بر منابع آبی ما دارند و حذف آن‌ها از چرخه آبی نیازمند به منابع و دانش فنی بالایی است. تصفیه سریع مواد شیمیایی باقی مانده در فاضلاب به کمک نانوکاتالیست‌ها روش و رویکرد جدید محققان است. در زندگی روزمره، همه ما از بسیاری از مواد و محصولات شیمیایی، از جمله مواد آرایشی، داروها، قرص‌های ضد بارداری، کودهای گیاهی و مواد شوینده استفاده می‌کنیم و همه اینها، به سهولت زندگی ما کمک می‌کنند. با این حال، استفاده از چنین محصولاتی تأثیر منفی بر محیط زیست دارد ، زیرا در کارخانه‌های تصفیه آب امروزی ریز آلاینده‌ها و ریز پلاستیک‌ها را در بسیاری از مواقع، نمی‌توان به طور کامل از فاضلاب جدا کرد. آن‌ها نهایتاً به محیط زیست وارد می‌شوند و زندگی جانوران و گیاهان را تحت تاثیر می‌دهند. همین جانوران و گیاهان، به ویژه آبزیان، تحت عنوان غذا وارد بدن انسان می‌شوند و به این شکل، ما انسان‌ها مستقیماً تحت تاثیر ریزآلاینده و ریز پلاستیک‌ها قرار می‌گیریم (۸).

نانومواد در مقایسه با مواد در ابعاد بزرگ دارای سطوح بسیار بزرگ‌تری هستند. علاوه بر این، این مواد قادر به برهمکنش با گروه‌های شیمیایی مختلف به منظور افزایش میل ترکیبی آن‌ها با ترکیبات ویژه می‌باشند. همچنین نانومواد به عنوان لیگاندهای قابل بازیافت با ظرفیت و عملکرد انتخابی بسیار بالا، برای یون‌های فلزی سمی به هسته‌های رایواکتیو، حلال‌های آلی و معدنی به شمار می‌آیند. تصفیه فاضلاب به کمک نانو کاتالیزور می‌تواند جایگزین سومین مرحله تصفیه یعنی ضد عفونی با کلر شود تا موجودات زنده و ترکیبات آلی را به طور همزمان حذف و فاضلاب را به یک منبع آب مناسب تبدیل کند. موجودات زنده ریز به طور طبیعی ترکیبات ارگانیک بزرگ را به ذرات کوچک‌تری تبدیل می‌کنند، اما از آنجایی که این ترکیبات از نظر زیستی تجزیه ناپذیرند، برای تجزیه آن‌ها باید از نوعی انرژی استفاده کنیم. این انرژی از اشعه فرابنفش نور خورشید تامین شده و به همراه کاتالیزورهای نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی آزاد شده از واکنش سلول کاتالیزور نوری می‌تواند موجودات زنده ریز را از میان برده و ترکیبات تجزیه ناپذیر را تجزیه کند. این فرایند به دلیل امکان استفاده مجدد از کاتالیزورهای نوری از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. ذرات کاتالیزوری یا به صورت همگن در محلول پراکنده می‌شوند، یا به صورت ساختارهای غشایی رسوب داده شده هستند که تجزیه شیمیایی آلاینده‌ها را امکان پذیر می‌کنند. با توجه به کاربردها و قابلیت‌های فناوری نانو در صنعت آب و فاضلاب بسیاری از شرکت‌ها از این فناوری در تصفیه آب و فاضلاب استفاده می‌کنند و به همین دلیل امروزه استفاده از محصولات و تولیدات بر پایه فناوری نانو افزایش یافته است. این محصولات اغلب شامل نانوفیلترها و انواع حسگرهایی است که به منظور

تشخیص مواد و ذرات موجود در آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانو کاتالیزورها در زمینه‌های مختلفی از تصفیه آب، از جمله تصفیه آب آشامیدنی، تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب دریا، کاربرد دارند.

این فرآیند تصفیه فعالیت‌های فتوکاتالیستی را شامل می‌شود که عبارت است از برهمکنش انرژی نور با نانوذرات فلزی (نانوفلزات و نانوذرات اکسید فلز، مانند نانوذرات نقره، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، نانوذرات مغناطیسی و غیره). فعالیت‌های فتوکاتالیستی، میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها) و مواد آلی را از راه واکنش با رادیکال‌های هیدروکسیل از بین می‌برد. این نوع تصفیه به دلیل فعالیت های فتوکاتالیستی زیاد و گسترده مورد توجه قرار گرفته است. فعالیت‌های فوتوکاتالیست بر اساس تخریب باکتری ها و مواد آلی توسط واکنش با رادیکال های هیدروکسیل است. مواد مورد استفاده در نانوکاتالیست‌ها عموماً مواد معدنی مانند نیمه‌رساناها و اکسیدهای فلزی هستند. با این حال، برای در نظر گرفتن نانو فوتوکاتالیستی، باید برخی از الزامات را رعایت کنند. مزایای نانو کاتالیزورها در تصفیه آب در این قسمت بررسی شده است.

شکل (۲) شمایی از سازوکار فرآیند فوتوکاتالیستی را نشان می‌دهد. ماده نیمه‌رسانا با جذب تابش موج الکترومغناطیسی با انرژی برابر یا بزرگ‌تر از شکاف انرژی (band gap) آن برانگیخته می‌شود و به موجب آن الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش انتقال می‌یابد و در نتیجه به طور همزمان یک محل خالی از الکترون (h+) در نوار ظرفیت به نام حفره ایجاد می‌شود. بازترکیب زوج الکترون- حفره با مسیر انتقال بار رقابت می‌کند. حین فرآیند بازترکیب، الکترون برانگیخته شده انرژی اضافی خود را در قالب نشر فوتونی با انرژی تقریباً برابر با شکاف انرژی نیمه‌رسانا آزاد می‌کند. این انرژی اضافی می‌تواند به‌صورت تابش گرمایی نیز آزاد شود (۸).



شکل (۲): شمایی از واکنش-های فوتوکاتالیستی در سطح نیمه-رسانا با تابش فوتونی با انرژی برابر یا بیشتر از شکاف انرژی نیمه_رسانا [۸].

حذف موثر آلاینده‌ها: نانو کاتالیزورها می‌توانند طیف وسیعی از آلاینده‌ها را از آب حذف کنند. این آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین، مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها هستند.

کاهش هزینه‌ها: نانو کاتالیزورها می‌توانند هزینه‌های تصفیه آب را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. این امر به دلیل استفاده از مواد کمتر و فرآیندهای ساده‌تر است.

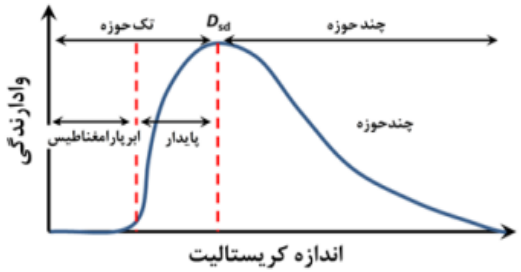
حفظ محیط زیست: نانو کاتالیزورها می‌توانند به کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی در فرآیندهای تصفیه آب کمک کنند. این امر باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی تصفیه آب می‌شود (۹-۱).

نانوجاذب‌ها سازگار با محیط زیست جهت تصفیه آب‌های زیر زمینی به وسیله اجزای معدنی و آلی

این روش تصفیه، از نانومواد آلی یا معدنی که میل ترکیبی زیادی نسبت به مواد جاذب دارند استفاده می‌کند، به عبارت دیگر، قابلیت حذف بسیاری از آلاینده‌ها را دارند. این نانوذرات برای حذف انواع مختلف آلاینده‌ها توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نانو جاذب‌های ایده‌آل، دارای ویژگی های مهمی مانند پتانسیل کاتالیزوری، اندازه کوچک، واکنش‌پذیری بالا و انرژی سطحی بزرگ هستند. گاهی اوقات تصفیه معمولی آب نمی‌تواند در حذف برخی از آلاینده‌ها مانند فلزات و میکروارگانیسم ها بسیار مؤثر باشد. مشکل دیگر تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی (DPBs)[1] است که برای سلامت انسان خطرناک است.

فلزات سنگین و همچنین برخی از آنیون ها سمیت بالایی دارند و این خاصیت می تواند باعث آسیب واقعی به انسان و اکوسیستم شود بر این اساس، محققان کارآیی نانو فروسیال مغناطیسی را که به عنوان یک منعقدکننده در آب عمل می کند، به عنوان جاذب احتمالی فلزات سنگین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش pH از ٤ به ٨، راندمان حذف فلز به تقریباً ۱۰۰ درصد افزایش یافت، این فلزات سنگین Fe^{2+} ، Pb^{2+} ، Zn^{2+} و Cu^{2+} بودند. سایر فلزات مورد تجزیه و تحلیل (Ni^{2+}، Mn^{2+} ، Co^{2+} ، Cd^{2+}) نیز افزایشی در راندمان حذف فلز داشتند، اما آن‌ها کم‌تر از ۹۰٪ باقی می‌مانند.

نانوجاذب‌ها بر اساس فرآیند جذب خود به نانوذرات فلزی، نانوذرات مغناطیسی، اکسیدهای مخلوط نانوساختار و نانوذرات اکسید فلزی تقسیم بندی می‌شوند. از ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین نانوجاذب‌های مغناطیسی می‌توان به نانوذراتی اشاره کرد که حداقل یک جز از هر نانوکامپوزیت مغناطیسی را تشکیل می‌دهند. نانوذرات مغناطیسی به دلیل خواص ویژه‌ای که در خود دارند مطالعات بسیاری را در سال‌های اخیر متوجه خود کرده‌اند و در زمینه تصفیه آب و جذب انواع آلاینده‌ها بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. نخسین بار دو فیزیکدان روسی، فرنکلن و آمریکایی، دورفمن پیش‌بینی کردند در صورتی که در ماده‌ای با خاصیت فرومغناطیسی ابعاد ذرات به کمتر از حد بحرانی برسند همانطور که در شکل ۳ مشخص است باعث ایجاد خاصیت انفرادی مغناطیسی در ذرات شده که در صورت حضور درمیدان مغناطیسی هم جهت شده و در صورت حذف میدان، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. به این خاصیت، سوپرپارامغناطیس می‌گویند که وادارندگی مغناطیسی وجود نخواهد داشت [۱۱-۱۰].



شکل (۳): وابستگی خاصیت وادارندگی به اندازه نانوذرات [۱۱].

[1] . Disinfection enhanced Raman scattering

مواد مبتنی بر کربن نیز به عنوان جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرند، آن‌ها یک نمونه نانولوله‌های کربنی (CNTs)[۲] هستند و نسبت سطح به حجم و توزیع اندازه منافذ بالایی دارند. با این ویژگی‌ها، CNTs قابلیت جذب مهمی را در مقایسه با کربن فعال دانه‌ای یا پودری ارائه می‌دهد. یکی دیگر از مواد مبتنی بر کربن، گرافن است، آن‌ها به دلیل محیط غنی از الکترون، جاذب های کارآمدی در نظر گرفته می شوند. اکسید گرافن همچنین ظرفیت جاذب بالایی به دلیل گروه‌های عملکردی قوی خود دارد.

نانولوله‌های کربنی غشاهای رسانای الکتریکی ایجاد می‌کنند. اندازه حفرات لایه به نوع پلیمرهای کاربردی مورد استفاده در اتصال عرضی نانولوله‌های کربنی وابسته است. اندازه منافذ غشاء از ۱۰۰ نانومتر تا زیر نانومتر متفاوت است. این نانوغشاها به طور گسترده برای تصفیه بیولوژیکی پساب صنعتی و نمک‌زدایی از آب شور صنعتی بهره برداری می‌شود. نانوذرات گرافن اکسید (GO)[۳] بر اساس همان اصل فرآیند تعرق[۴] یک برگ درخت عمل می‌کنند، به این معنا که، آب را از طریق ساختار ذرات GO جذب کرده و ضمن اینکه حرارت خورشید را جذب می‌کنند تا تشکیل بخار را تشدید نمایند، آب از طریق ساختار گرافن اکسید بیرون کشیده می‌شود. این روش در نمک‌زدایی از آب شور با انرژی خورشیدی استفاده می‌شود. نانوذرات سیلیکا فلوئورینه[۵] سطح انرژی کمی تولید می‌کند که مقاومت بالایی در برابر چربی نشان می‌دهد. این امر در عملیات تصفیه پساب حاوی روغن، پالایش نفت و صنایع فرآوری مواد غذایی بسیار مفید است. نانومواد لایه‌ای[۶] حاوی گرافن و گرافن اکسید، مولیبدن دی‌سولفید و مکسین‌ها[۷] (کربونیتریدها، کاربیدها و نیتریدهای فلزات واسطه فوق العاده نازک) به طور گسترده در تصفیه آب صنعتی استفاده می‌شوند (۱). در جدول (۱) مزایا، معایب و کاربردهای این نانوذرات ارایه شده است (۸-۷).

جدول (۱): خواص، کاربردها و جنبه‌های نوآورانه نانو جاذب‌ها (۸).

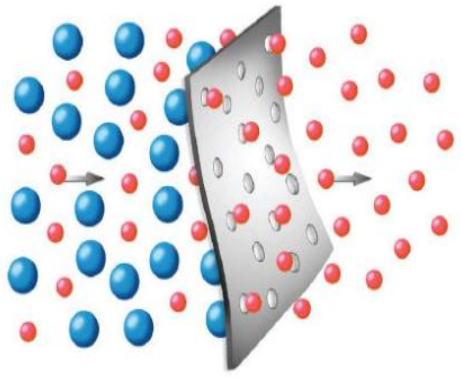
۲. Carbon nanotubes
۳. Graphene Oxide
۴. transpiration
۵. Fluorinated silica
۶. Layered nanomaterials
۷. MXenes

نانو جاذب	خصوصیات		کاربرد	نوآوری ها
	مزایا	معایب		
نانو جاذبهای فلزی	سطح جذب بالا، واکنش پذیری انتخابی	احتمال ریسک سلامتی	حذف مواد آلی و فلزات سنگین	افزایش سطح فعال
نانولوله‌های کربنی	سطح جذب بالا، ضد باکتری، قابلیت استفاده مجدد	هزینه تولید زیاد احتمال ریسک سلامتی	آلاینده های قابل تجزیه (داروها، آنتی بیوتیک ها)	نانولوله های کربنی فوق بلند با جذب نمک بسیار بالا
نانوجاذبهای پلیمری (دندریمرها)	عملکرد دوگانه (پوسته داخلی جذب ترکیبات آلی، شاخه های خارجی جذب فلزات سنگین)، قابل استفاده مجدد	فرآیند تولید چند مرحله‌ای پیچیده	حذف مواد آلی و فلزات سنگین	زیست تجزیه پذیر، زیست سازگار، بیو جاذب غیر سمی (ترکیبی از کیتوسان و دندریت)
زئولیتها	رهایش کنترل شده نانوسیلور، ضد باکتری	کاهش سطوح فعال بعلت بی تحرکی نانوسیلور	فرآیندهای ضدعفونی	نانو زئولیت ها با شکستگی القایی لیزر

غشاهای فیلتراسیون نانو متری به منظور افزایش بازیابی آب

در این روش تصفیه، نانوغشاها (به‌عنوان مثال، نانوفیلتراسیون، غشاهای خودآرا، نانو کامپوزیتی و غشاهای مبتنی بر نانو لوله‌ها، نانو روبان‌ها و نانو الیاف) قادرند آلاینده‌ها را از فاضلاب جدا کنند. نانو غشاها وظیفه جداسازی ذرات از فاضلاب را بر عهده دارند. آنها می توانند در حذف رنگ‌ها، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها بسیار کارآمد باشند.

نانو فیلتراسیون در زمینه‌های مختلفی از تصفیه آب، از جمله تصفیه آب آشامیدنی، تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب دریا، کاربرد دارد. با استفاده از نانو فیلترها، مواد معدنی مورد نیاز برای سلامت انسان در آب باقی می‌ماند و مواد سمی و مضر از آنها حذف می‌شود. استفاده از نانولوله‌های کربنی در ساخت فیلترها سبب سهولت در پاکسازی، افزایش استحکام و قابلیت استفاده مجدد و مقاومت در برابر گرما می‌شود. این فیلترها از دقت بسیار زیادی برخوردارند و می‌توانند ویروس‌هایی به اندازه ۲۵ نانومتر و عوامل بیماری‌زای بزرگ‌تر مانند باکتری کولای را به خوبی از آب حذف کنند. نانوفیلترها برای حذف محدوده وسیعی از ترکیبات به کار گرفته شده‌اند. از جمله حذف آفت‌کش‌ها مانند آترازین، سیمارین، دیورن، ایزپرتورن، ترکیبات آلی فرار مانند مشتقات کلردار آلی سبک مثل کلروفرو، تریکلرواتیلن، تتراکلرواتیلن، حذف محصولات جانبی حاصل از واکنش گندزدا با ترکیبات آلی آب از جمله هالومتان‌ها، حذف کاتیون‌ها و سختی، حذف کروم، اورانیوم، آرسنیک، آنیون‌ها، پاتوژن‌ها. کنترل مقدار آلاینده‌ها در آب تصفیه شده از دیگر مزایای کاربرد این روش به شمار می‌آید (۱۲).



شکل (٤): شمای کلی از نانوفیلتر

نانوذرات نقره، عوامل ضدمیکروبی می‌باشند که در طول تصفیه فاضلاب آلاینده‌های باکتریایی بسیاری را در خود جای می‌دهند. نانوذرات نقره و اکسید گرافن دو نقش را ایفا می‌کنند؛ اول با غیرفعال کردن سلول‌های

باکتریایی از آلودگی بیولوژیکی جلوگیری می‌کنند و سپس به علت ماهیت آب‌دوستی که دارند می‌توانند با تشکیل یک لایه قوی آبی، اتصال میکروبی را کاهش دهند (۱۳-۱).

نانو فیلتراسیون یک فناوری امیدوارکننده برای بهبود کیفیت آب است. این فناوری می‌تواند طیف وسیعی از آلاینده‌ها را از آب حذف کند و به کاهش هزینه‌های تصفیه آب و حفظ محیط زیست کمک کند. با این حال، نانو فیلتراسیون هنوز در مراحل اولیه توسعه است. چالش‌هایی در زمینه بهبود کارایی، پایداری و هزینه‌های نانو فیلتراسیون وجود دارد (۱٤).

حذف آرسنیک

امروزه با توجه به آلودگی آب‌های سطحی توسط انواع آلاینده‌ها مانند صنایع، بسیاری از این آب‌ها در واقع به نوعی پساب تبدیل شده‌اند که باید با استفاده از انواع فرایند تصفیه آب برای استفاده به حدود کیفی مورد نظر برسند. در میان این آلاینده‌ها فلزات سنگین به دلیل عدم تجزیه و همینطور اثرات مخرب بر روی سلامت انسان‌ها و موجودات زنده از اهمیت بالایی برخوردار هستند. وجود فلزات سنگین در منابع آب به صورت طبیعی و یا بر اثر فعالیت‌های بشر صورت می‌گیرد. آب‌های سطحی ناشی از آب کشاورزی دارای نیترات، فسفات و آرسنیک هستند، به خصوص در مناطقی که از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در کشاورزی استفاده می‌شود. یکی از آلاینده‌ها آرسنیک است که بر اثر فعالیت‌های بشری و یا طبیعی موجب آلودگی منابع آب برخی مناطق شده است. آرسنیک یک شبه فلز موجود در پوسته زمین است که جزء اصلی بیش از ۲۰۰ ماده معدنی را تشکیل می‌دهد. این عنصر شبه فلزی است که برای انسان، گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها سمی است. متوسط غلظت آن بین ۲ تا ppm ۵ است که یکی از آلاینده های غیر آلی آب آشامیدنی است (۱۵).

آرسنیک در اثر انحلال مواد معدنی موجود در سنگ‌ها و خاک‌هایی که تحت تاثیر عوامل فرساینده طبیعی قرار گرفته‌اند، در لایه‌های زمین پخش می‌گردد. این ماده بی بو ، بی مزه و بسیار سمی و سرطان زا می‌باشد که استفاده دراز مدت از آب آلوده به آن باعث ایجاد سرطان‌های پوستی، لنفاوی، کلیوی، صفرایی و ریوی می‌شود. بنابراین کاربرد فناوری‌های نوین برای حذف این عنصر از آب‌های آشامیدنی حائز اهمیت است. از میان روش‌های حذف آرسنیک فناوری جذب به دلیل مزایای آن مانند راه‌اندازی ساده‌تر، بازسازی آسان‌تر و راندمان حذف بالاتر به طور گسترده‌ای استفاده شده است. در این بین اکسیداسیون، انعقاد و ته‌نشینی، قدیمی‌ترین روش‌های شناخته شده برای حذف فلزات از آب است. از جمله ترکیبات آرسنیک موجود در آب As^{5+} (آرسنات) و As^{3+} (آرسنیت) می‌باشند. در حالت کلی آرسنات قدرت واکنش پذیری بالاتری داشته و به همین دلیل لازم است با انجام اکسیداسیون، آرسنیت به آرسنات تبدیل شود. برای این منظور از ترکیبات متعددی از قبیل پرمنگنات، هیپوکلریت و پراکسید هیدروژن و ازن استفاده می‌شود. پس از اکسید شدن آرسنیت، قدرت رسوب شدن و جذب بر سطوح جامد آن تا حد زیادی افزایش پیدا خواهد کرد.

در روش‌های تصفیه و حذف ذرات کلوئیدی، یکی از تکنیک‌هایی که در تصفیه شیمیایی فاضلاب و آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، انعقاد و لخته‌سازی می‌باشد. برای پیاده سازی این روش به منظور حذف آرسنیک از

ترکیباتی همچون آلوم، سولفات آهن و کلرید آهن استفاده میشود. اضافه شدن این ترکیبات به آب باعث می‌شود در مدت زمان بسیار کوتاه و حدود یک دقیقه، ذرات و یون‌ها با بار منفی به هم متصل شده و در نهایت منجر به اتصال آرسنیک به این رشته‌ها خواهند شد. در نهایت لخته‌های ایجاد شده به کمک تجهیزات مختلف از قبیل فیلترها جمع آوری خواهند شد.

به منظور افزایش راندمان حذف آرسنیک با کمک انعقاد، لازم است به PH آب توجه شود. چون هر یک از این ترکیبات از قبیل آلوم و کارید آهن در PHهای متفاوتی بهتر فرآیند انعقاد و لخته سازی را انجام می‌دهند. به عنوان مثال، آلوم در PH حدود ٦ تا ٨ بسیار خوب عمل نموده و این در حالیست که برای کلرید آهن باید PH کم‌تر از ٨ باشد. علاوه بر این، در برخی از شرایط نیاز به دوزهای بسیار بالایی از مواد منعقد کننده می‌باشد که می‌تواند منجر به بروز مشکلات دیگری گردند. در پژوهش هاشمی و همکاران (١٣٩٥) که برای حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی از آب آشامیدنی صورت گرفت، بیش‌ترین درصد حذف آرسنیک ٧٩ درصد محاسبه شد. در سیستم‌های تصفیه آب‌های سطحی با فرآیند متداول با استفاده از مواد منعقدکننده فریک یا آلوم، آرسنیک به آسانی در طول فرآیند انعقاد ته‌نشینی حذف می‌شود (١٨-١٥).

حذف رنگ

رنگ موجود در آب آشامیدنی نه تنها به خاطر ظاهر آن باید زدوده شود، بلکه چون این رنگ‌ها می‌توانند منشاء تولید تری هالومتان‌ها مانند ($CHCL_3$) نیز باشند، خطرناک محسوب می‌شوند . این ماده هنگام ترکیب با کلر موجب تشکیل کلروفرم و دیگر ترکیبات هالوژنه مضر و سرطان‌زا می‌شود. رنگ موجود در آب طبیعی معمولاً ناشی از وجود اسیدهای معدنی با جرم مولکولی $\frac{mol}{gr}$ ٨٠٠-٢٠٠٠ است. اسیدهای مذکور در اثر تجزیه مواد آلی موجود در آب حاصل می شوند. اغلب روش‌های متداول برای تصفیه آب قادر به جداسازی مواد فوق نیستند، لیکن با استفاده از غشاهای نانو می‌توان تا ٩٩ درصد این گونه مواد را به سهولت از آب جدا کرد. نانوفیلتراسیون یکی از روش‌های تصفیه غشایی می‌باشد که بسیاری از ترکیبات با جرم مولکولی بالا و محلول در آب را حذف می‌کند. مهم‌ترین مزیت فناوری‌های غشائی عملکرد انتخابی آن‌ها می‌باشد. فناوری‌های غشائی شامل روش‌هایی از قبیل میکروفیلتراسیون، الترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون است. نانوفیلتراسیون یکی از اقسام روش‌های فیلتراسیون غشایی است که توانایی حذف ذراتی با ابعاد بیش‌تر از ١ نانومتر (١٠ آنگستروم) را دارد. این غشاءها با کمک بارسطحی خود و اندازه حفره‌هایی که دارند سبب جداسازی یون‌ها از محلول خوراک می‌شوند. نانوفیلتراسیون از نظر هزینه انرژی دفع یون و ابعاد حفره‌ها در بین روش‌های دیگر شرایط بهینه‌ای را ایجاد کرده است. از غشاءهای نانوفیلتراسیون جهت رنگزدایی، تصفیه پساب‌های نساجی و غیره استفاده می‌شود (١٩-١٦-١).

حذف فلزات سنگین و مواد آلی:

نانوذرات TiO_2 از جمله فتوکاتالیست‌های نوظهور و امیدوارکننده برای تصفیه آب هستند. مکانیسم اساسی فوتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانا مانند TiO_2 کم‌هزینه که دارای نور فعالی خوب و غیرسمی هستند شامل تولید اکسیدان‌های بسیار واکنش‌پذیر،

مانند رادیکال‌های OH، برای ضدعفونی میکروارگانیسم‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، ویروس‌ها و غیره است. فیلم ها و غشاهای نانوساختار TiO_2 علاوه بر تجزیه آلاینده‌های آلی تحت تابش اشعه ماوراء بنفش و نور مرئی، قادر به ضد عفونی میکروارگانیسم‌ها هستند. به دلیل پایداری آن در آب، TiO_2 می‌تواند در لایه‌های نازک یا فیلترهای غشایی برای فیلتراسیون آب گنجانده شود. نانومیله‌ها و نانوفیلم‌های TiO_2 به ترتیب فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتری نسبت به نانوذرات تجاری TiO_2 و لایه‌های نازک TiO_2 برای غیرفعال‌سازی فوتوکاتالیستی نشان دادند. نانوذرات TiO_2 به دلیل ویژگی‌های نوری، دی‌الکتریک و فوتوکاتالیستی، ماده جذابی هستند. این خواص آن را قادر می‌سازد تا باکتری‌ها و مواد آلی مضر را از آب و هوا حذف کند. TiO_2 یک فوتوکاتالیست است که به طور گسترده به عنوان یک ماده خود تمیز شونده و خود ضدعفونی کننده برای پوشش سطح در بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود، زیرا غیر سمی است و خاصیت فوق‌العاده آبگریزی ناشی از نور را نشان می‌دهد و به طور گسترده به عنوان یک عامل ضد آلودگی محیطی استفاده می‌شود. نانو ذرات TiO_2 برای اکسید کردن آلاینده‌های آلی و به صورت دام‌های نانو مقیاس برای جذب فلزات سنگین در مکان‌های آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت ذکر شده این ذرات می‌توانند عامل اکساینده باشند و تولید آب یا دی اکسید کربن می‌کنند. مطالعات اخیر نشان می-دهد که از Tio_2 در مقیاس نانو می‌توان برای رفع آلاینده‌ها؛ ویروس‌ها و مواد شیمیایی آلی خطرناک استفاده کرد. ذرات نانو با سطوح مناسب (لیگاندها و معرف‌ها) می‌توانند برای جداسازی فلزات سنگین و برای غیر فعال کردن سطوح آلوده استفاده شوند. بدیهی است که فرآیندهای شیمیایی با کارایی بالاتر مواد آلاینده و ضایعات کم‌تری تولید می‌کنند (۲۰-۱۵).

نتیجه‌گیری

در بررسی حاضر، کاربرد فناوری نانو در تصفیه فاضلاب و آب تا حدودی توضیح داده شد. تصفیه معمولی آب گاهی اوقات در حذف برخی از آلاینده ها مانند فلزات سنگین، روغن و میکروارگانیسم‌ها چندان مؤثر نیست. برای بهبود این تصفیه، نانومواد به عنوان جایگزین احتمالی برای حذف این آلاینده‌ها در حال مطالعه هستند. همچنین با رشد شهرنشینی و صنعتی شدن به دنبال آن آلودگی آب، در آینده استفاده از منبع دیگری به عنوان آب آشامیدنی ضروری خواهد بود. یک احتمال آب دریا است و نمک‌زدایی که توسط نانومواد انجام می‌شود جایگزین جالبی برای حذف نمک از آب است. از فناوری نانو در میان فناوری‌های پیشرفته می‌توان برای این هدف و همچنین تصفیه آلاینده‌های غیرقابل درمان و خطرناک استفاده کرد. راه‌حل‌های مبتنی بر نانو، نویدهای زیادی برای بهبود کارایی و مقرون به صرفه بودن تصفیه فاضلاب صنعتی ارائه می‌دهند، اما تحقیقات بیش‌تری در مقیاس بزرگ مورد نیاز است. زیرا هزینه ساخت پایین برای استفاده گسترده از نانومواد حیاتی است. استفاده از این محصولات که به صورت تجاری در دسترس هستند، از یک طرف می‌تواند منجر به افزایش بازیابی آب و در نتیجه کاهش میزان هدر رفت آب در این صنایع شده و از طرف دیگر استفاده از برخی منابع آب غیرمتعارف را نیز برای این صنایع به ارمغان آورد. بنابراین مقایسه‌ای بین توزیع پژوهش‌های داخلی و

خارجی انجام شده بر روی کاربرد نانو ذرات در تصفیه آب و پساب، انجام شد که در شکل (۲) نمایش داده شده است.

منابع

[1] Mohammadi, S., 2013, Nano technology applications in water industry and environment. Proceedings of the 8th Iran Chemistry Education Seminar 2013 August 28-29, Faculty of Chemistry, Semnan University.
[2] McCarthy, A.A., 2005, Dendritic NanoTechnologies, inc. Chem. Biol., 12 (5), 499-501.
[3] Ponomarev, P., 2009, Study and application of flotation in schemes for waste water purification. Environmental Research, Engineering and Management, 50 (4), 51-56.
[4] Jamiati, M., 2021, Modeling of MaximumSolar Power Tracking by Genetic Algorithm Method. Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment, 12(2), 118–124.
[5] Malode, S. J., Prabhu, K. K., Shetti, N. P., 2020, Electrocatalytic behavior of a heterostructured nanocomposite sensor for aminotriazole. New J. Chem, 44(44), 19376-19384.
[6] Zhao Z., Zheng J., Wang M., Zhang H. & Han C. C., 2012, High performance ultrafiltration membrane based on modified chitosan coating and electrospun nanofibrous PVDF scaffolds. J. Membr. Sci., 394–395, 209–217.
[7] Aliofkhazraei, M., Ali, N., 2014, Recent Developments in Miniaturization of Sensor Technologies and Their Applications, Comprehensive Materials Processing, 13, 245-306.
[8] Nagar, A., Pradeep, T., 2020 Clean Water through Nanotechnology: Needs, Gaps, and Fulfillment, ACS Nano, 14(6), 6420-6435.
[۹] Jassby, D., Cath., T.Y. and Buisson, H., 2018, The role of nanotechnology in industrial water treatment. Nature Nanotech, 13, 670–672.
[10] Wu, L., Mendoza Garci, A., Li, Q., Sun, S., 2016, Organic Phase Synthesis of Magnetic Nanoparticles and Their Application. Chemical Reviews, 116(18), 10473–10512.
[11] Mehrmohammadi, M., Yoon, K. Y., Qu, M., Johnston, K. P., Emelianov, S. Y., 2011, Enhanced pulsed magneto-motive ultrasound imaging using superparamagnetic nanoclusters. Nanotechnology, 22(4), 045502.
[12] Ghadboland, A., Zahedkarkaj, S., Haji Mohammadi, R., 2014, A brief review on wastewater treatment by using nano materials. The Application of Chemistry in Environment, 22(6), 1-4.
[13] Schertel, L., Vignolini, S., 2020, Nanotechnology in a Shrimp Eye's View. Nature Nanotechnology, 15, 87-88.
[14] Barman J., Tirkey A., Batra S., Paul A.A., Panda K., Deka R., Babu P.J., 2022, The role of nanotechnology based wearable electronic textiles in biomedical and healthcare applications. Mater. Today Commun, 32, 104055.
[15] Karimi, S., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., 2024, Investigation of Arsenic Removal from Drinking Water Using Alum Coagulant. Journal of Water and Wastewater Science and Technology (JWWSE), 8(4), 4-10.
[16] Patil, A., Mishra, V., Thakur, S., Riyaz, B., Kaur, A., Khursheed, R., Patil, K., Sathe, B., 2019, Nanotechnology Derived Nanotools in Biomedical Perspectives: An update. Current Nanoscience, 15, 137-146.
[17] Jamiati, M., Mehdipour, K. P., 2020, The calculation of total fragment excitation energy for photofission of Uranium isotopes. Turkish Journal of Physics, 44(4), 364–372.
[18] Lv, P., Xie, D., Zhang, Z., 2018, Magnetic carbon dots based molecularly imprinted polymers for fluorescent detection of bovine hemoglobin. Talanta, 188, 145-151.
[19] Shon, H. K., Phuntsho, S., Chaudhary, D. S., Vigneswaran, S., Cho, J., 2013, Nanofiltration for water and wastewater treatment – a mini review. Drinking Water Engineering and Science, 6, 47-53.
[20] Rahmati, H. S., Mohamadbeigy, K., Bagheri, R., Sadati Kiadehi, M. S., 2022, An Overview of Nano Adsorbents Application in Water and Wastewater Treatment System. Human and Environment, 61, 71-84.

“Research article”

Application of nanotechnology in water purification and removal of pollutants

Mojtaba Jamiati *
Department of Physics, Naragh Branch, Islamic Azad University, Naragh, Iran
*Corresponding author: drmjamiati@gmail.com

Abstract
Water is one of the most essential elements of life on earth, and although more than 70% of the earth's surface is covered with water, less than 3% of it is fresh water. of this amount, 79% belongs to the ice peaks, 20% of which are easily accessible groundwater, and in total, only one ten thousandth of the total water on earth is simply available to humans at any time. the availability of safe and clean water is one of the most important issues facing mankind, and gradually, as the amount of water consumption increases, pollutants also contaminate water sources in various ways, and this issue will become more critical in the future. accepting the right to water as a right for humanity may be the most important step in addressing the difficulty of supplying this most fundamental element of people's lives. the lack of access to clean and sanitary water in developing countries is a priority for the development and use of new technology. nanotechnology, with its new and innovative solutions, states that nano-based materials can lead to cheaper, more durable and more effective water treatment technologies, which can nevertheless meet some of the needs of developing countries in some way. nanotechnology based water treatment processes are much more efficient compared to traditional methods as these solutions can be made with features that can increase the amount of material absorbed from water.

Keywords: Nano technology, Catalyst, Pollutants, Membrane, Nano filter.