مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۹- شماره ۱ - سال ۱۴۰۳
www.ElitesJournal.ir

مروری بر راهکارهای موثر نانوسیالات در جهت بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب

محمدحسن کامیاب*[۱]، امین‌مسلمی‌پطرودی[۲]، علی‌اکبر عباسیان‌آرانی[۳]

۱-دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان
۲-کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی‌دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران
۳-استاد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان

*mohammadhkamyab@gmail.com

ارسال: بهمن ماه ۱۴۰۲ پذیرش: فروردین ماه ۱۴۰۳

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری، استفاده از تکنولوژی نانوسیالات به منظور بهبود عملکرد و کارایی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب ضرورت دارد. نانوسیالات، موادی هستند که در ابعاد نانومتری (به طور معمول در مقیاس ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) ویژگی‌های خاصی دارند که از آن‌ها برای بهبود فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب استفاده می‌شود. این ویژگی‌ها شامل بالاترین نسبت سطح به حجم، خواص فیزیکی و شیمیایی خاص مانند فعالیت آنتی‌باکتریال و آنتی‌ویروسی و قابلیت افزایش دسترسی به آلاینده‌ها در فرآیندهای تصفیه می‌شود. استفاده از نانوسیالات در فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب می‌تواند منجر به بهبود کیفیت آب و کاهش آلاینده‌ها، افزایش کارایی فرآیندهای تصفیه، و حفظ محیط زیست شود. این پژوهش به بررسی نقش موثر نانوسیالات در بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب می‌پردازد. با توجه به گسترده تحقیقات اخیر در این زمینه، مطالعه‌ای جامع از پژوهش‌های انجام‌شده ارائه می‌دهد. از جمله موضوعات مورد بررسی، تأثیر نانوذرات در بهبود عملکرد فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب، مکانیسم‌های عملکرد آن‌ها، نقاط قوت و ضعف این رویکردها و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه است. این پژوهش نقطه‌نظرات مختلف محققان را در مورد کاربرد نانوسیالات در تصفیه آب و فاضلاب جمع‌آوری و تحلیل می‌کند تا بهبودها و چالش‌های این فناوری را بررسی کند و به عنوان یک راهکار موثر در بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب معرفی شود.

واژگان کلیدی: نانوسیالات، فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب، بهینه‌سازی، بهبود عملکرد، نقاط قوت و ضعف.

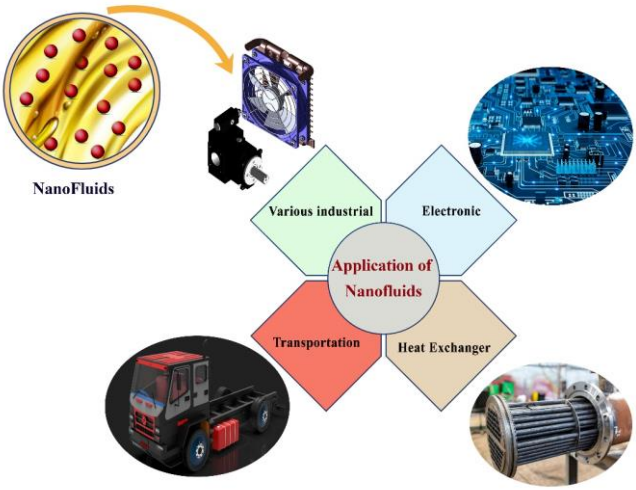
۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهان و بهبود کیفیت زندگی و ارتقای سطح بهداشت باعث تقاضای روز افزون منابع آب شده است. از طرفی کمبود منابع آب شیرین و توزیع نامتوازن این منابع باعث ایجاد تنشهای آبی در مناطقی از جهان خصوصا منطقه غرب آسیا و ایران شده است. همچنین آلودگی منابع آبی در دسترس ناشی از فعالیتهای انسانی، کشاورزی و صنعتی نه تنها باعث پدید آمدن مشکلات زیست محیطی شده، که سلامت انسان را نیز به خطر انداخته است. از این روی تامین آب بهداشتی مورد نیاز برای مصارف شرب، بهداشتی، صنعتی و کشاورزی به یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع بشری تبدیل شده است[۱].

سرانه آب برای هر ایرانی حدود ۱۵۰۰ متر مکعب است. (معادله یک سوم میانگین سرانه آب برای هر نفر در دنیا) پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۴۰ این سرانه به کمتر از ۸۰۰ متر مکعب رسد. این در حالی است که محدوده کمتر از ۱۰۰۰ متر مکعب به عنوان سرانه هر نفر در یک منطقه به عنوان مرز کم‌آبی شناخته می‌شود[۲]. با توجه به پیش‌بینی سازمان ملل متحد ایران در آینده نزدیک دچار تنش آبی شده و در صورت ادامه روند کنونی وارد شرایط کمیابی شدید آب می‌شود[۳].

در این میان فناوری‌های مختلفی در ارتباط با آب و تصفیه آن و همچنین بازیابی فاضلاب ابداع و توسعه داده شده است که نانو فناوری یکی از آنهاست. کاربرد مواد نانو در تصفیه آب و فاضلاب در کنار سایر فناوری‌های متداول به عنوان راه حل کمکی برای تصفیه آب و فاضلاب بدل شده است [۱].

نانوذرات دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی در زمینه‌های مکانیکی، حرارتی، مغناطیسی و الکتریکی هستند. اضافه کردن مقدار کمی از این نانوذرات به یک سیال، توانایی افزایش انتقال حرارت و بهبود خواص فیزیکی سیالات از جمله ویسکوزیته را دارد. ضریب هدایت حرارتی یکی از مهم‌ترین خواص ترموفیزیکی نانوسیالات است که در وسایل سرمایشی، گرمایشی و سایر تجهیزاتی که با فرآیند انتقال حرارت سروکار دارند، اهمیت دارد. به دلیل کاربرد گسترده نانوسیالات در این تجهیزات، تحقیقات بسیاری در زمینه مطالعه خواص و عملکرد آن‌ها انجام شده است[۷-۴] شکل(۱).



شکل ۱-کاربرد نانوسیالات

در گذشته‌های نه چندان دور با استفاده از روشهای متداول تصفیه آب با هدف حذف مواد معلق و عوامل بیماری‌زا کیفیت آب تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کرد. اما با ارتقای‌استانداردهای مرتبط با آب، همچنین ظهور و ورود آلاینده‌های جدید و افزایش غلظت آنها در محیطهای آبی نظیر فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی غیرمتعارف نظیر مواد دارویی و مواد خروجی از صنایع مختلف نیاز به فناوری‌های جدید تصفیه آب و فاضلاب بیش از پیش احساس شد [۸]، نانوفناوری یا به عبارت بهتر استفاده از نانوذرات در فرآیندهای مختلف تصفیه کاربرد فراوان دارد. استفاده از نانوذرات در ساخت انواع فیلترها، جاذبها، غشاها و حتی در بحثهای آنالیزی استفاده از نانوسنسورها جهت پایش کیفیت آب کاربرد فراوانی دارد. اما در اغلب اوقات این نانوذرات به صورت ثابت و ساکن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورتی که بتوان مشکل جداسازی نانوذرات از آب را حل کرد، می‌توان از نانوذرات به طور مستقیم در تصفیه آب و فاضلاب استفاده کرد، به طوری که نانوذره به عنوان آلاینده جدید وارد محیط زیست نگردد. از این روی کاربرد نانوسیالات، به معنای سیال حاوی نانوذره، در تصفیه فاضلاب محدود بوده و نسبت به سایر روشها کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۸]، جداسازی مهمترین مشکل کاربری نانوسیالات در تصفیه فاضلاب است. از این روی در صورتی که به گونه‌ای این مشکل برطرف شود، می‌توان از این فناوری نیز در کنار سایر روشها برای تصفیه آب و فاضلاب حتی با بازدهی بالاتر از روشهای متداول استفاده نمود. معمولا برای جداسازی نانوذره از سیال از روشهایی نظیر ته نشینی، لخته سازی، فیلتراسیون و استفاده از میدان مغناطیسی جهت جداسازی ذرات مغناطیسی شده، بهره می‌جویند [۹]، مشکل دیگر در استفاده از نانوسیالات، مساله توزیع ذرات در سیال است

(در بحث تصفیه آب و فاضلاب عموما سیال آب است). روشهای متعددی برای این امر وجود دارد که مهمترین آن استفاده از همزن یا هوادهی توأمان در راکتور تصفیه است. روش دیگر تهیه سوسپانسیون نانوذره از طریق باردار کردن ذرات یا مشتق سازی نانوذره به منظور بهبود انحلال پذیری آن در آب است. روش تهیه سوسپانسیون برای نانوذرات فلزی کاربرد دارد و روش مشتق سازی معمولا برای نانوذرات بر پایه کربن استفاده می‌شود [۱۰].

به طور کلی استفاده از نانوسیالات در پنج دسته گندزدایی، حذف فلزات سنگین، حذف مواد آلاینده آلی، نمک‌زدایی و حذف رنگ و بو از آب و فاضلاب طبقه‌بندی می‌شود که در این پیشینه تحقیق به طور مفصل به هر کدام از آنها و انواع نانوذرات مورد استفاده در این کاربردها پرداخته شده است. همچنین عملکرد نانوسیالات در فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در پایان نیز مشکلات ناشی از استفاده از نانوذرات به حالت غیرساکن و به همان صورتی که از آن به عنوان نانوسیال اطلاق شده است، اشاره می‌شود.

۲- کاربرد نانوسیالات در تصفیه آب و فاضلاب

استفاده از نانوذرات و پخش کردن آنها در سیال مورد نظر به دلیل فعالیت بالای ذرات مورد استفاده و سطح فعال زیاد از ذرات باعث توجه ویژه به این خصوصیت نانوذرات شده است. هر چند فناوری های مرتبط به صورتی که نانوذرات به صورت ثابت و در فاز ساکن مورد استفاده قرار گیرند، بیشتر مورد توجه بوده است. اما در خیلی از موارد در صورتی که نانوذره به طور مستقیم با آلاینده آب (آلاینده آلی، یونهای فلزی و یا عوامل بیماری‌زا) بازدهی حذف بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد[۱۰]. اتلاف نانوذره، خطرات ورود این مواد به محیط زیست و اکوسیستمهای آبی و خاکی و در نهایت ورود این مواد به چرخه غذایی انسان از حمله مخاطراتی است که استفاده از نانوذرات به حالت معلق و به صورت نانوسیال به همراه دارد [۱۱].

۲-۱-گندزایی

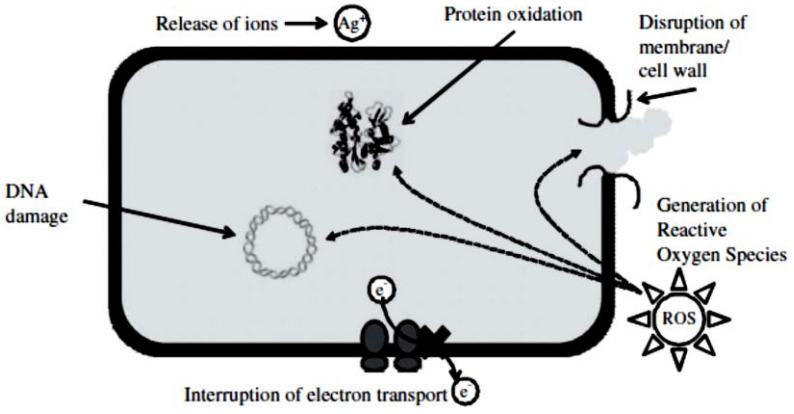
با توجه به استانداردهای مربوط به آب آشامیدنی، گندزدایی یکی از مهمترین و حیاتی‌ترین مراحل تصفیه آب خصوصاً در مصارف بهداشتی وآشامیدنی است. همچنین با توجه به استانداردهای مربوط به فاضلاب تصفیه شده وکاربری‌های مختلف آن، مرحله گندزدایی از پساب یکی از چالش‌های تصفیه فاضلاب است. برای گندزدایی روشهای متداول شیمیایی و فیزیکی مختلفی توسعه داده شده‌اند. مهمترین آنها استفاده از مواد شیمیایی گندزدا نظیر کلر و ازن است. یکی از مشکلات این مواد شیمیایی سمیت به نسبت بالای آنها برای انسان و محیط زیست است. از طرفی روشهای فیزیکی نظیر فیلتراسیون، پرتوپالایی و... یا بازدهی زیادی ندارند و یا قابلیت استفاده در حجم بالا فراهم نیست. در این میان مواد نانو را می‌توان به عنوان راه حلی جایگزین برای این مهم شناخت [۱۲]، در بررسی مقالات چاپ شده در زمینه کاربرد نانوذرات در تصفیه آب و فاضلاب استفاده از این مواد در گندزادیی کاربرد بیشتری نسبت به سایر کاربری‌ها داشته است [۱۳].

روشهای گندزدایی که در حال حاضر در تصفیه آب به کار می‌روند به طور موثری عوامل بیماری‌زای میکروبی را کنترل کرده است. اما در دهه‌های اخیر دوگانگی بین گندزدایی موثر این مواد از یک طرف و تشکیل محصولات جانبی مخرب ناشی از گندزدایی (DBP[1]) کاربرد این مواد را تا حدودی با مشکل مواجه کرده است. گندزداهای متداول که در تصفیه آب مورد استفاده قرار می گیرند شامل کلر، کلرامین و از ازن می‌توانند با ترکیبات مختلفی که در آب وجود دارند واکنش داده و مواد زیان‌باری را به وجود آورند که هم سلامت انسان را تهدید می‌کنند و هم به محیط زیست آسیب می‌زنند. بیش از ۱۰۰ نوع مختلف ازDBPها در مقالات علمی گزارش شده است که بیشتر آنها خاصیت سرطان‌زایی دارد. از طرفی دیگر مقاومت گونه‌های مختلف از میکروبها نظیر Cryprosporidium و Giardia به مواد گندزدا باعث افزایش دوز استفاده از این مواد می‌شود[۱۲]، از این روی نیاز به ابداع و توسعه مواد گندزدای قوی‌تر به گونه‌ای که مشکل تشکیلDBP مرتفع گردد، وجود دارد. در این میان استفاده از مواد نانو به دلیل فعالیت بالای این مواد و سطح تماس زیادی که ایجاد می‌کنند، به عنوان جایگزین مناسبی برای مواد شیمیایی متداول می‌تواند به کار

[1] Disinfectant Byproduct

گرفته شود[۱۳]، در میان نانومواد مورد بررسی که خاصیت گندزدایی مناسبی را از خودشان نشان داده‌اند، می‌توان به کیتوسان، نانوذرات نقره، فتوکاتالیستهای TiO2 وZnO، مواد بر پایه کربن شامل فولرنهای آبی و نانولوله‌های کربنی اشاره کرد. برخلاف روشهای متداول شیمیایی، این مواد اکسیدکننده‌های قوی نیستند و به همین دلیل مواد مخربDBP تولید نمی‌کنند و چنانچه به طور صحیح به کار گرفته شوند، می‌توانند به عنوان مکمل و یا حتی جایگزین برای روشهای متداول گندزدایی به کار گرفته شوند[۱۲]، همچنین از آنجا که استفاده از این مواد در حجم های پایین امکان‌پذیر است، می‌توان از این نانو مواد در تصفیه‌خانه‌های غیر متمرکز و کوچک مقیاس شهری و روستایی نیز استفاده کرد.

خاصیت گندزدایی نانوسیالات ناشی از واکنش این مواد با میکروارگانیسم ها از طریق مکانیزم های مختلف است. مهمترین مکانیزم های ضد میکروبی نانوسیالات در شکل ۲ مشخص شده است. نانو ذرات می‌توانند به طور مستقیم با سلولها واکنش دهند، نظیر اختلال در جابجایی الکترون بین غشایی، اختلال و نفوذ به پوشش سلولی یا اکسید کردن اجزای سلول یا تولید مواد ثانویه نظیر واکنشگرهای فعال اکسیژن(ROS[1])،آزادسازی یونهای فلزی حل شده که باعث تخریب سلول می‌شوند [۱۴]، به طور کلی ذرات کوچکتر از ۱۰ نانومتر اثر سمیت بیشتری بر روی باکتری‌ها و قارچها دارند [۱۳].



شکل ۲- مکانیسم های اثر نانومواد گندزدا[۱۲]

نانوذره نقره یکی از پرکاربردترین نانوذرات با خاصیت ضد میکروبی است. خاصیت ضد میکروبی نقره و یون نقره در آب از زمان‌های قدیم شناخته شده بوده است. اما مکانیزم ضدمیکروبی این ذره به طور کامل مشخص شده نیست. یونهای نقره باعث اختلال در تولید پروتئینهای درون سلولی و در نتیجه اختلال در تولید آنزیمهای مرتبط با تنفس سلولی می‌شود [۱۵]. همچنین تاثیر یون نقره Ag^+ بر روی باز تولید RNA و در نتیجه اختلال در تکثیر سلولی گزارش شده است. از طرفی دیگر نقره با ایجاد اختلال در غشای سلول و نفوذپذیری آن باعث اخلال در کار اجزای سلولی می‌شود. همچنین وجود ذرات نقره باعث تخریب مولکولهای لیپوپلی ساکارید و تجمع ذرات نقره در داخل غشای سلولی می‌شود [۱۶].

در میان انواع ذرات نانو تحقیقات بیشتری بر روی TiO_2 به طور عام بر روی کاربرد آن در تصفیه فاضلاب و به طور خاص بر روی خاصیت گندزدایی این ماده انجام شده است. این ماده به دلیل پایداری در آب، ارزان بودن و غیر سمی بودن آن در فرآیندهای تصفیه آب آشامیدنی بسیار مورد توجه است [۱۷].نانوذرات TiO_2 توانایی از بین بردن باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی را دارند اما در برابر باکتری‌های گرم مثبت به دلیل توانایی تشکیل اسپور در این باکتری‌ها اثر کمتری دارند [۱۸]. همچنین گزارشهایی از اثر نانوسیال حاوی TiO_2 بر روی ویروسهایی از جمله هپاتیت B و گونه‌های مختلفی از باکتریوفاژها گزارش شده است. غلظت مورد نیاز از TiO_2 برای کشتن باکتری بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ ppm است [۱۹].

اثر فعالیت آنتی‌باکتریایی TiO_2 به تولید ROS به خصوص رادیکالهای آزاد هیدروکسیل و پروکسید بازمی‌گردد [۱۲]. جذب بالای اشعه UV باعث فعالیت TiO_2 در زیر نور خورشید گردیده است و باعث بهبود گندزدایی از طریق خورشید در طی فرایند تصفیه آب می‌گردد استفاده از نور خورشید در تصفیه آب آشامیدنی فرآیندی زمان‌بر است. اما با استفاده از TiO_2 قابلیت جذب

[1] Reactive Oxygen Species

اشعه UV افزایش یافته و فرآیند گندزادیی‌تسریع می‌گردد [۲۰]. مهمترین شاخصه گندزدایی TiO_2 افزایش فعالیت آن با استفاده از نور مرئی از جمله نور خورشید و نتیجه افزایش فعالیت فتوکاتالیستی آن است. استفاده همزمان نانوذره نقره و TiO_2 فعالیت فوتوکاتالیستی محلول را افزایش داده و تاثیر مضاعفی بر روی سلولهای باکتری و ویروس دارد [۲۱].

مشابه TiO_2 نانوذرات ZnO نیز خاصیت جذب اشعه UV را دارند. به همین دلیل نانوذرات ZnO بر طیف وسیعی از باکتری‌ها خاصیت آنتی‌باکتریایی قوی دارد [۲۲]. مهمترین مکانیزم که برای خاصیت آنتی‌باکتریایی ZnO ذکر شده خاصیت تولید فتوکاتالیستی هیدروژن پروکسید است. نفوذ نانوذره و اختلال در فعالیتهای سلولی از دیگر عوامل گندزدایی ZnO است [۲۳]. همچنین در بعضی از تحقیقات اثر ZnO بر رشد و تکثیر باکتری بررسی شده است و مشخص شده، بدین صورت که نانوذره رشد باکتری‌ها را تحت تاثیر قرار داده و مانع از ازدیاد سلولهای باکتریایی در آب می‌شود [۲۴].یکی دیگر از نانوذرات مورد استفاده در فرایند گندزدایی نانوذرات مبتنی بر کربن است. فولرنها به حالت C_{60} در آب غیرمحلول هستند. اما با استفاده از مشتق‌سازی می‌توان انحلال‌پذیری آنها را در آب بالا ببرد. بیشترین فعالیت آنتی‌میکروبی فولرنها مربوط به مشتقات آنها است [۲۵]. همچنین نانوذرات فولرن به صورت سوسپانسیون به حالت nC_{60} مورد استفاده قرار می‌گیرند و از خود فعالیت ضدمیکروبی نشان داده اند. این خاصیت بر روی سلول‌های یوکاریوت بیشتر است. اما بر روی تک‌سلولی‌های پروکاریوت نیز اثر ضد میکروبی آنها مشاهده شده است [۲۶]. هنوز مکانیزم خاصی برای خاصیت ضد میکروبی فولرن مشخص نشده است، اما گروهی آن را به اکسیداسیون مستقیم سلولها و یا حلالهای عادی باقیمانده در نانوذرات طی عملیات آماده‌سازی می‌دانند [۱۲]. آنچه مشخص است استفاده از نانوذرات بر پایه کربن صرفا جهت گندزدایی کاربرد ندارد. اما در کنارکاربردهای دیگر این مواد در تصفیه آب و فاضلاب نظیر حذف رنگ و بو، می‌توانند اثر گندزدایی نیز در آب داشته باشد [۲۵].

نانومواد پپتیدی از جمله دیگر نانومواد مورد استفاده در گندزدایی است. مواد پپتیدی زیادی که دارای خاصیت ضد میکروبی هستند شناخته شده اند. اما تعدادی از این مواد به صورت مهندسی شده به حالت نانوذره درآمده و به صورت گندزداهای نوین مورد استفاده قرار می‌گیرند. مکانیزم ضد میکروبی این مواد بر اساس تشکیل کانالهایی در غشای میکروبی است که باعث فروپاشی خاصیت اسمزی در غشای سلولی می‌شود. پپتیدهای ضد میکروبی بر طبق ساختار پروتئینی شناخته شده سنتز می‌شوند و بر اساس همین نانوساختارهای پپتیدی شکل می‌گیرند. نانوپپتیدهای مهندسی شده از نظر اندازه، ریخت شناسی، پوشش دهی، مشتق‌سازی و دیگر خواص برای کاربردهای ضدمیکروبی خاصی به کار گرفته می‌شوند. کیتوسان به فرم نانوذره یکی از این نانوساختارهای پپتیدی پلیمری است که در برابر باکتری، ویروس و قارچ خاصیت ضد میکروبی از خود بروز می‌دهد. مکانیزم عملکرد کیتوسان بر اساس اندرکنش بین کیتوسان با بار مثبت و منفی است که باعث نفوذپذیری غشای سلولی و تخریب اجزای داخل سلول می‌شود. همچنین مشتقات مختلف گرفته شده از کیتوسان نظیر کیتوسانهای دارای گروه‌های مختلف آمینی با ایجاد لیگاندها با فلزات مختلف باعث جلوگیری از تولید فعالیت آنزیمی و اخلال در تولید RNA می‌شود[۱۲].

۲-۲- حذف فلزات سنگین

فلزات سنگین شامل سرب روی منگنز و نیکل و کادمیم و در بعضی منابع جیوه و مس اثرات مخرب بسیار زیادی بر روی سلامت انسان و محیط زیست دارند، به طوری که ورود آنها به اکوسیستم آبی و در نهایت چرخه غذایی انسان از طریق صنایع مختلف به یکی از معضلات جامعه بشری تبدیل شده است. استفاده از نانوفناوری برای جداسازی این فلزات از آب بیشتر به طور غیرمستقیم و جهت افزایش بازدهی روشهای مرسوم حذف فلزات سنگین به کار می‌رود [۲۷]. از آنجا که بیشتر نانوذرات از نوع نانوذرات فلزی یا اکسید فلزی هستند، جداسازی آنها می‌تواند خود چالشی جدید به وجود آورد [۲۸]. روشهایی که برای حذف فلزات سنگین به کار می‌رود شامل تبادل یونی، ته‌نشینی شیمیایی، انعقادسازی، حذف بیولوژیکی و الکتروشیمیایی و حذف با جاذب است. در میان این روشها استفاده از جاذب به عنوان روشی کارآمد و ساده از نظر طراحی و عملیاتی برای تولید آب تصفیه شده با کیفیت بالا استفاده می‌شود. نانوذرات اکسیدهای فلزی شامل منگنز اکسید، روی اکسید، آلومینیوم اکسید کروم اکسید و تیتانیوم اکسید به

عنوان مهم‌ترین جاذبها در این زمینه به کار می‌روند. اندازه و شکل این نانوذرات دو عامل بسیار مهم در عملکرد جذب این نانومواد هستند [۲۹]. کاربرد آهن‌اکسید نسبت به دیگر نانوذرات اکسید فلزی در تصفیه آب بیشتر است [۳۰]. همچنین از نانوسیال آهن مغناطیسی در نقش انعقادساز در حذف فلزات سنگین به کار رفته است. نتایج نشان از حذف نزدیک ۱۰۰٪ فلزات سنگین در pH قلیایی شامل یونهای فلزی سرب، روی و مس داشته. همچنین یونهای فلزی نیکل، منگنز، کوبانت و کادمیوم حذف نزدیک به ۹۰ درصد را با استفاده از این روش نشان داده‌اند [۳۱].

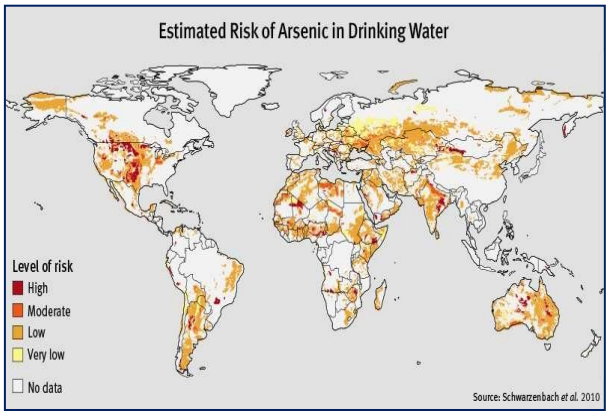
نانوذرات فلزی آهن در روش ته‌نشینی کاربرد بسیار وسیعی دارند. استفاده از نانوذره آهن به دلیل افزایش سطح و افزایش فعالیت یونهای آهن در محیط آب باعث بازدهی ته‌نشینی بیشتر شده است. همچنین با استفاده از نانوذرات مغناطیسی شده آهن فرایند حذف فلزات سنگین دچار تحول شگرفی شده و دیگر نیازی به حوضچه‌های ته‌نشینی نبوده است [۳۲]. استفاده از نانو مواد بر پایه کربن نظیر نانولوله‌های کربنی و فولرن به دلیل سطح فعال بیشتر نسبت به سایر جاذبها جز مواد پرکاربرد در حذف فلزات سنگین است. ظرفیت حذف این نانومواد در شرایط محیطی مختلف، pH و غلظتهای مختلف یونهای فلزی از جمله مواردی است که تحقیقات بسیاری روی آنها انجام شده است [۳۳]. همچنین استفاده از نانوذره گرافن اکسید برای حذف فلزات مس، روی و کادمیوم مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴]. عنصر شیمیایی آرسنیک[1] که در جدول تناوبی با علامت As مشخص شده و دارای عدد اتمی ۳۳ می‌باشد، یک شبه‌فلز سمی معروف بوده و به سه شکل زرد، سیاه و خاکستری یافت می‌شود. آرسنیک جزء فلزات سنگین بوده و ترکیبات آن به‌عنوان آفت‌کش، علف‌کش، حشره‌کش و همچنین در ساخت آلیاژهای مختلف بکار می‌رود. آرسنیک هم به صورت طبیعی از فرسایش پوسته زمین به وجود می‌آید و هم می‌تواند در نتیجه فعالیت‌های انسانی (مانند معدن‌کاری فلزی یا استفاده از آفت‌کش‌ها) تولید شود. این ماده شیمیایی ممکن است در آب‌های زیرزمینی موجود باشد و مصرف آن می‌تواند ناشی از بلع، جذب یا استنشاق این ماده شیمیایی صورت گیرد. مسمومیت با آرسنیک می‌تواند باعث ایجاد عوارض جدی در سلامتی (تأثیر بر پوست, کبد, شش‌ها، کلیه‌ها و سرطان) و حتی مرگ، در صورت عدم درمان شود. در جدول ۱ مهم‌ترین مشخصات شیمیایی این فلز سنگین آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی آرسنیک

مشخصه	مقدار
عدد اتمی	۳۳
عدد جرمی	۷۹/۹۲۱۵۸
نقطه ذوب	۸۱۴
نقطه جوش	۶۱۶
وزن مخصوص	خاکستری رنگ: ۵/۷۳ گرم بر سانتیمتر مکعب در ۱۴ درجه سانتیگراد
	زرد رنگ: ۲/۰۳ گرم بر سانتیمتر مکعب در ۱۸ درجه سانتیگراد
عدد اکسیداسیون	۳-، ۰، ۳+، ۵+
سختی	۳/۵

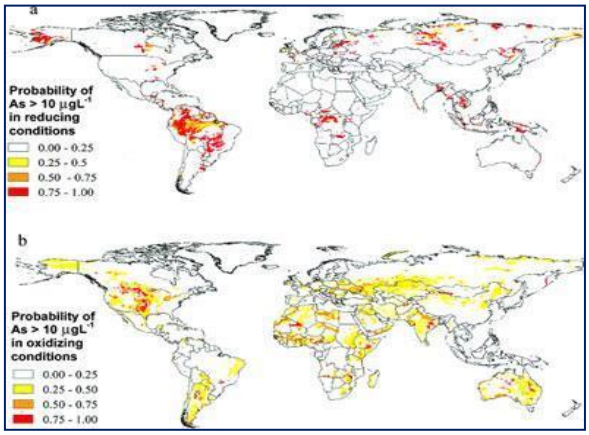
در شکل ۳ مناطق تحت خطر آلودگی آرسنیک در آب سازمان ملل در سال ۲۰۱۰ خطرات برآورد کرده است.

[1] Arsenic



شکل۳- مناطق تحت خطر آلودگی آرسنیک در آب سازمان ملل

همچنین سازمان ملل احتمال آلودگی آرسنیک در منابع آب های زیرزمینی جهانی برای کشور ها درسال ۲۰۰۸ در شکل ۴ چنین برآورد کرده است.



شکل٤-گزارش برآورد آلودگی آرسنیک در منابع آب زیز زمینی سازمان ملل

سازمان بهداشت جهانی نیز درآخرین نگارش استانداردهای آب آشامیدنی میزان مجاز آرسنیک را کمتر از ۰,۰۱ میلی گرم در لیتر (۱۰ میکرو گرم در لیتر) مشخص نموده است و همچنین حد مجاز آرسنیک در استاندارد ۱۰۵۳ ایران نیز همین مقدار است. استنشاق بخارات و غبارات آرسنیک باعث ایجاد اختلال در سیستم عصبی، عوارض گوارشی مانند تهوع، اسهال، شکم درد، سوزش پوست، درماتیت و التهاب حلق می‌گردد. اهمیت آرسنیک بدلیل اختلال در سنتز DNA و RNA می‌باشد. افزایش موارد تولد کودکان استثنایی، تولدهای با وزن کم، تولد کودکان ناهنجار و مرگ در اثر ترکیبات آرسنیک مشاهده شده است. آرسنیک ورودی به بدن مادر، جنین را در معرض این آلاینده قرار می‌دهد. شیوع روز افزون انواع آلودگی‌ها موجب افزایش سطح آرسنیک در غذاها شده و در نتیجه خطرات جبران‌ناپذیری برای سلامت بشر پدید آورده است. آلودگی خاک و آب به آرسنیک، خطر ورود آن را به چرخه غذایی افزایش می‌دهد. مطالعات اپیدمولوژیکی زیادی در مورد اثرات آرسنیک بر روی انسان انجام شده است. ظاهر شدن لکه‌های تیره یا روشن بر روی پوست و ظاهر شدن دانه‌های ذرتی‌شکل در کف پا و پوست از اختلالات پوستی مشخص منسوب به مصرف مزمن آرسنیک می‌باشد. آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان، آرسنیک را یکی از عوامل سرطان‌زایی انسان طبقه‌بندی کرده است. نوشیدن آب‌هایی که شامل شکل غیرآلی آرسنیک در مدت دراز هستند، نشان می‌دهد خطر ابتلا به سرطان پوست، تومورهای مثانه، شش، کبد و ریه افزایش می‌دهد. وجود سطح بالای آرسنیک در مدت طولانی در آب‌های آشامیدنی سبب ضخامت و رنگ‌پریدگی پوست، تهوع، اسهال، کاهش تولید سلول‌های خون، اختلال در ضربان قلب، زیان به رگ‌های خونی و بی‌حسی در دست‌ها و پاها می‌شود. در معرض قرار گرفتن در برابر آرسنیک در مدت کوتاه نیز منجر به حساسیتهای معدوی، روده‌ای، سخت شدن عمل بلع، تشنگی، کاهش غیرطبیعی فشار خون، تشنج و در موارد حادتر، نارسائی و کاهش ضربان قلب که منجر به مرگ می‌شود. آرسنیک ممکن است به‌وسیله تجزیه رسوبات و سنگ‌های معدنی وارد دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی گردد، همچنین این ماده از

طرق دیگری نیزهمچون تخلیه مستقیم فاضلاب‌های صنعتی، ته‌نشینی ذرات آرسنیک موجود در گردوغبار هوا و باران یا برف وارد آب‌ها می‌شود. ذرات آرسنیک به‌وسیله احتراق سوخت‌های فسیلی(به‌ویژه زغال سنگ)، آبکاری محصولات فلزی، مصارف کشاورزی (مانند آفت‌کش‌ها و افزودنی‌های خوراکی) یا خاکستر زباله‌سوزها و فاضلاب‌ها وارد هوا می‌شوند. آلودگی محیط زیست و مواد غذایی به عنصر سمی آرسنیک یکی از مسائل مهمی است که موجب به خطر انداختن بهداشت عمومی و سلامت موجودات زنده می‌شود.

۲-۳- تکنیک‌های غشائی (فیلترهای ممبران) به کمک نانوفیلتراسیون ها

غشاء مصنوعی (ممبران) برای از بین بردن آلاینده‌های بسیاری در آب از جمله عوامل بیماری زا، املاح و یونهای مختلف فلزی و.. مؤثر هستند. معمولاً، دو نوع فیلتراسیون غشایی استفاده می‌شود: غشاء کم فشار مانند میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون و غشاء فشار بالا مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس. میزان حذف آرسنیک از آب با ممبران هایRO ، به PH و حضور دیگر املاح بستگی دارد و حضور ذرات کلوئیدی تأثیر منفی در آن دارد. آهن و منگنز ممکن است در آن رسوب کنند و باعث گرفتگی ممبران RO شوند و چنین ممبرانی قابل احیاء نیست بنابراین در آبهایی که میزان بالای ذرات معلق دارند بهتر است از پیش تصفیه‌های مناسب برای جلوگیری از گرفتگی ممبرانها استفاده شود. فیلترهای میکروفیلتراسیون MF و اولترا فیلتراسیون UF دارای حفرهای بسیار بزرگتر از مولکولها و یونهای آرسنیک هستند و در حذف آرسنیک ناتوان هستند اما می‌توان با ترکیب روشهای انعقاد با آنها میزان زیادی از آرسنیک را حذف نمود. فیلترهای نانوفیلتراسیون NF هم توانایی محدودی در حذف آرسنیک دارند اما فیلترهای اسمزمعکوس همچون همیشه از عملکرد بالایی در حذف آرسنیک برخوردارند و طبق ادعای شرکت DOW در ممبرانهای ساخت خودش بالایی ۹۹٪ حذف آرسنیک را شاهد خواهیم بود. با توجه به مطالب بیان شده استفاده از یک روش جذب سطحی با نانو فلز به منظور تصفیه آب در شرایط پیش از بحران پیشنهاد می‌گردد.

۳- حذف آلاینده های آلی

آلاینده‌های آلی شامل ترکیبات متداول آلی در فاضلاب شهری است که با استفاده از فرآیندهای متداول تصفیه فاضلاب نظیر سیستم لجن فعال به راحتی حذف می‌شوند. اما گروهی از ترکیبات آلی پیچیده هستند که نه تنها با استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی قابل حذف نیستند، بلکه برای میکروارگانیسم های شرکت کننده در فرآیند تصفیه مضر هستند و ممکن است حتی باعث اختلال در تصفیه بیولوژیکی شوند. مواد دارویی، مواد آلی زیست‌تخریب ناپذیر، آلاینده‌های نفتی و آلاینده‌های صنایع خاص همچون پتروشیمی، که حاوی مقادیر زیادی از آلاینده‌های آلی غیرمتعارف هستند، از جمله مواردی است که می‌بایست علاوه بر فرآیندهای متداول تصفیه زیستی از فرایندهای مکمل برای حذف آنها استفاده کرد [۳۵]. استفاده از نانوذرات در تصفیه این گونه آلاینده‌ها یکی از روشهای نوین با بازدهی مناسب است که مطالعات زیادی بر روی آنها انجام شده است [۳۶]. در تصفیه فاضلاب شهری که حاوی مقادیرکم آلاینده‌های آلی نامتعارف نظیر داروها یا رنگهای آلی است، می‌بایست قسمت عمده آلاینده‌های آلی از طریق فرآیندهای متداول تصفیه که برای این منظور توسعه داده شده‌اند، استفاده شود و از نانوسیالات به عنوان مکملی برای سیستم تصفیه متداول استفاده کرد. استفاده از نانوسیالات به تنهایی برای حذف آلاینده‌هایی که با فرآیندهای متداول تصفیه قابل حذف شدن هستند، به صرفه نیست [۳۷]. در تصفیه فاضلاب صنعتی بسته به میزان بار آلی می‌توان از نانوسیالات به طور مجزا بهره برد [۳۸].

دو مکانیزم عمده جهت حذف آلاینده‌های آلی با استفاده از نانوذرات معرفی شده است. تخریب آلاینده آلی و شکسته شدن آن به مولکولهای کوچکتر و ساده‌تر یکی از این مکانیزم ها است. در این روش با استفاده از نانوذراتی نظیر اکسیدهای فلزی تیتانیوم اکسید، روی اکسید، منگنز اکسید وآلومینیوم اکسید عمل فوتوکاتالیستی برای تسریع در فرآیند اکسیداسیون مواد آلی انجام می‌شود. همچنین بعضی دیگر از نانومواد می‌توانند خود به عنوان اکسیدکننده قوی در فرآیند شکسته شدن مواد آلی پیچیده نقش داشته باشند. از جمله این مواد می‌توان به TiO_2، اکسید روی، نانوذره گرافن وگرافن اکسید اشاره کرد [۳۵]. مکانیسم دیگری که از آن در حذف مواد پیچیده آلی می‌توان بهره برد، استفاده از جاذبهاست. جاذبهایی نظیر نانومواد بر پایه کربن همچون نانولوله‌های کربنی با توجه به سطح

تماس زیاد و فعالیت بالایی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. چیزی که در این میان اهمیت دارد این است که برای آلاینده‌هایی که با استفاده از فرآیندهای متداول بیولوژیکی قابل حذف هستند، استفاده از این جاذبها پیشنهاد نمی‌گردد [۳۷].

۴- حذف رنگ و بو

حذف رنگ و بو یکی از مهمترین مراحل تصفیه آب است. با حذف رنگ و بو هر چند نمی‌توان با اطمینان از سلامت آب مطمئن بود، اما برای خیلی از مصارف غیربهداشتی نظیر کشاورزی یا شستشو همین میزان از کیفت آب قابل قبول است. همچنین فاضلاب صنایع مختلفی نظیر صنایع رنگ سازی، نساجی و دامپروری صرفا با حذف رنگ و بو از فاضلاب بخش عمده‌ای از آلاینده‌های آب حذف شده و امکان باز چرخانی آب و یا رها ساختن آن در طبیعت وجود دارد [۳۹]. حذف رنگ و بو با استفاده از نانوجاذبهای معلق در آب که به راحتی قابل جمع‌آوری باشند، انجام می‌شود. استفاده از نانولوله‌های کربنی، گرافن و گرافن اکسید و TiO_2 از جمله موادی است که برای حذف رنگ و بو از آب و فاصلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۹]. نانوذرات مختلفی در کاربردهای مختلف تصفیه آب و فاضلاب کاربرد دارند وکماکان تحقیقات علمی بر روی این مواد و میزان راندمان حذف آلاینده‌های مختلف با استفاده از این مواد ادامه دارد [۴۰]. در بسیاری از روشهای نوین سعی در ترکیب و همنشانی نانوذرات مختلف ورسیدن به نانوذره‌ای است که ترکیبی از خواص مختلف نانوذرات مختلف را توأمان با هم داشته باشد. برای مثال در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۵ منتشر شده است، از ترکیب دو نانوذره TiO_2 و نقره که بر روی نانومواد کربنی بازنشانی شده بودند جهت بهبود خاصیت گندزدایی بهره برده شده است [۴۱]. همچنین در سالهای اخیر نانوذرات از جنس زیست مولکولهای نانومقیاس و پلیمرهای در مقیاس نانو نیز در تولید نانوسیالات و کاربرد آنها در تصفیه آب و فاضلاب استفاده شده است. چاچوبهای فلزی-آلی، $g\text{-}C_3N_4$[1] و نانوساختار کیتوسانی تعدادی از نانوذراتی است که در مقالات مختلف به آنها پرداخته شده است [۴۲]. به طور کلی می‌توان مکانیسم عملکرد نانوسیالات را در تصفیه آب و فاضلاب به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

جاذب: این دسته از نانوسیالات در نقش جاذب، انواع آلاینده‌های آب و فاضلاب را جذب می‌کنند. مهمترین کاربرد این نانوسیالات در حذف فلزات سنگین از آب است. مکانیسم حذف در این دسته از نانوسیالات برقراری پیوندهای لیگاندی بین نانوذره و یون فلزی است. همچنین نانوسیالات بر پایه کربن امکان جذب آلاینده‌های آلی به خصوص ترکیبات پیچیده‌ی آلی را در خود دارند. در این روش جداسازی آلاینده صرفا از طریق جذب و بدون تغییر خاصی در ساختار شیمیایی آلاینده انجام می‌شود.
نانوذراتی که به عنوان جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای خاصیت بالای افینیتی جذب برای مواد مختلف هستند. همجنین خاصیت کاتالیستی این نانومواد، اندازه کوچک ذرات، فعالیت بالا و سطح تماس زیاد، خاصیت جذب این موارد را نسبت به سایر جاذبها افزایش داده است. این مواد بر اساس فرآیند جذب به نانوذرات فلزی، نانوساختارهای اکسیدی، نانوذرات مغناطیسی و نانوذارت اکسید فلزی دسته‌بندی می‌شوند.

فوتوکاتالیست: اساس کار این نانوذرات بر اساس اندرکنش انرژی نورانی بر روی ناوذرات فلزی است. خاصیت فوتوکاتالیستی بر مبنای اندرکنش بین سلولهای زیستی نظیر باکتری و یا ویروس و یا مواد آلی با رادیکالهای هیدروکسیلی است. نانوذراتی نظیر TiO_2 و ZnO با داشتن خاصیت فوتوکاتالیستی، امکان شکستن ترکیبات پیچیده آلی به ترکیبات ساده‌تر که از طریق فرآیندهای بیولوژیک قابل حذف باشند را دارند. این خاصیت همچنین در فرآیندهای گندزادیی برای تخریب اجزای سلولی میکروارگانیسمها نظیر غشای سلولی و سایر اجزای درون سلولی انجام می‌پذیرد. بیشتر نانوذرات دارای خاصیات فوتوکاتالیستی از نوع غیر آلی و معدنی نظیر مواد نیمه‌هادی و ناوذرات اکسید فلزی هستند [۳۷].

اکسیدکننده: تعدادی از نانوذرات در نفش اکسیدکننده در شکستن ترکیبات پیچیده آلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر چند اساس کار این نوع از نانوذارت بر اساس همان خاصیت فوتوکاتالیستی است که قبلا توضیح داده شد، اما گروهی، این مواد را در دسته اکسیدکننده‌ها قرار می‌دهند و روشهایی که از این مواد جهت حذف آلاینده‌ها استفاده می‌گردد را با عنوان فرآیندهای نوین

[1] Graphitic Carbon Nitride

اکسیداسیون (AOP[1]) شناسایی می‌کنند. TiO_2 مهمترین نانوذره در این دسته قرار می‌گیرد. در واقع استفاده از TiO_2 به عنوان تکنیکی نوین در شکستن مواد آلی و تبدیل آنها به مواد ساده‌تر آلی کاربرد دارد [۴۳].

انعقادساز: گروهی از نانوذرات نظیر یون آهن با ایجاد لخته و رسوب و امکان ته‌نشینی مواد آلاینده باعث حذف مواد آلاینده از آب و فاضلاب می‌شود. استفاده از این روش خصوصا از مراحل ابتدایی تصفیه کاربرد فراوانی [۳۱]. به طور کلی نانوسیالات حاوی نانوذرات مورد استفاده در تصفیه آب و فاضلاب را به سه دسته کلی نانوذرات فلزی، نانوذرات اکسید فلزی و نانوذرات بر پایه کربن طبقه‌بندی کرده‌اند [۲۶].البته در سالیان اخیر با توسعه روشهای تولید نانوذرات، نانوذرات زیستی و پلیمری نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در دسته سایر نانوذرات طبقه‌بندی شده‌اند [۴۴].

۵- نانوذرات فلزی

در سالیان اخیر نانوذرات فلزی زیادی از جمله آهن، روی، آلومینیوم و نیکل در تصفیه آلاینده‌ها از آب مورد استفاده قرار گرفته و تحقیقات مختلفی بر روی آنها انجام شده است. در این میان نانوذره آلومینیوم به دلیل قابلیت کاهندگی بالایی که دارد در آب ناپایدار بوده و کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در بین نانوذرات فلزی، آهن و نیکل به دلیل داشتن پتانسیل کاهندگی متناسب نسبت به سایر نانوذرات بیشتر مورد توجه بوده و کارآیی بیشتری در برابر آلاینده‌های اکسید شونده از خود نشان داده اند. همین طور آهن با وجود خاصیت کاهندگی ضغیفتر کاربردهای بیشتری در تصفیه فاضلاب به خود اختصاص داده است. این مساله به خاطر قابلیت جذب بالاتر این نانوذره. خاصیت ته‌نشینی و اکسیداسیون (در حضور اکسیژن محلول) و قیمت ارزانتر است[۴۵].

ناوذرات آهن در محیط آبی به وسیله‌ی H_2O یا H^+ اکسید شده و یون Fe^{2+} را تولید می‌کند. در واکنش اکسایش-کاهش بین یون Fe^{2+} و آلاینده‌ها Fe^{2+} به Fe^{3+} اکسید شده و فرم $Fe(OH)_3$ را تشکیل داده که به عنوان یک لخته‌ساز در pH بالا حذف بسیاری از آلاینده‌ها نظیر کروم را فراهم می‌کند. همچین نانوذره آهن توانایی شکستن ترکیبات آلی را با استفاده از اکسیداسیون آنها در حضور اکسیژن محلول دارند. با توجه به اندازه کروچک ذرات، سطح تماس بالا، خاصیت اکسیداسیون-احیا و فعالیت بالای نانوذره‌ی آهن امکان حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل ترکیبات آلی هالوژنه، ترکیبات نیتروآروماتیک، رنگهای آلی، فنول، فلزات سنگین و حتی آنیونهای معدنی نظیر فسفات و نیترات را دارد [۲۶]. علارغم مزایای بسیار زیادی که نانوذره آهن در تصفیه آب و فاضلاب دارد، مشکل جداسازی این نانوذره از پساب یک چالش به حساب می‌آید. استفاده از نانوذارت مغناطیسی می‌تواند این مشکل را برطرف کند. همچنین استفاده از روش امولسیون سازی نانوذره به حالت نانوسیال علاوه بر غلبه بر این چالش مشکل انتقال این نانوذره در غلظتهای بالا را نیز حل خواهد کرد [۴۶].

اگرچه بیشتر مطالعات بر روی نانوذره آهن انجام شده است. اما نانوذره روی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای نانوذره آهن شناخته شود. روی خاصیت کاهندگی بیشتری نسبت به آهن دارد. از این روی تخریب آلاینده‌ها سریعتر و بهتر انجام خواهد شد [۴۵].

ناوذره نقره یکی دیگر از نانوذرات پرکاربرد در تصفیه آب و فاضلاب خصوصا در بحث گندزدایی است. خاصیت آنتی‌باکتریالی نانوذره نقره و یون Ag^+ در نتیجه‌ی ایجاد اختلال در ساخت دیواره سلولی، تخریب غشای سلولی و نفوذ به داخل سلول و اختلال در تولید DNA از طریفی و اختلال در عملکرد آنزیمهای دورن و برون سلولی از طریفی دیگر ناشی می‌شود [۱۶]. به دلیل قیمت نسبتا زیاد نقره. استفاده از نقره به طور مستقیم به مفهموم نانوسیال بهره‌وری پایینی دارد، به همین دلیل نشاندن نانوذرات بر روی نانوکامپوزیتهای مختلف که امکان جذب را از طریق فرآیندی نظیر فیلتراسیون را تسهیل می‌کند، در سالهای اخیر مورد استفاده بوده است.

[1] Advanced Oxidation Process

۶- نانوذرات اکسید فلزی

نانوسیال حاوی اکسید فلزی شایل اکسید تیتانیوم، اکسید روی و اکسید آهن به عنوان پرکاربردترین نانوذرات اکسید فلزی شناخته می‌شوند [۴۵]. در میان نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید فلزی، TiO_2 به دلیل خاصیت فوتوکاتالیستی، قیمت منطقی و پایداری نوری، فیزیکی و بیولوژیکی مور توجه بیشتری بوده است. مهمترین کاربرد TiO_2 خاصیت فوتوکاتالیتسی این نانوذره در شکستن مواد آلاینده‌های آلی از طریق اکسیداسیون مواد و تبدیل کردن آنها به مواد ساده‌تر آلی با جرم مولکولی کمتر است [۴۳]. فعالیت فوتوکاتالیستی به توانایی تولید مواد واکنشگر اکسیژن (ROS) برمی‌گردد که به سرعت می‌تواند با آلاینده‌ها واکنش داده و باعث شکستن آنها شود. TiO_2 توانایی حذف آلاینده‌های آلی نظیر آلاینده‌های آلی کلرینه، هیدروکربنهای آروماتیکی چندحلقه‌ای، رنگهای آلی، فنول، آفت‌کشها، سیانید و فلزات سنگین را دارد (محمودیان and کریمی جشنی ۱۳۹۱). همچنین خاصیت آنتی‌میکروبی TiO_2 استفاده از این نانوذره را برای گندزادیی بسیار مورد توجه قرار داده است[۱۷]. همچنان جداسازی TiO_2 به صورت نانوسیال زمانی که محلول به صورت سوسپانسیونی در تصفیه به کار می‌رود یکی از چالشهای پیش‌رو است. به همین دلیل است که استفاده از نانوسیال حاوی تیتانیوم اکسید را با محدودیتهایی مواجه کرده است [۴۳].

اکسید روی یکی دیگر از نانوذرات پرکاربرد در تصفیه‌ی فاضلاب است. خاصیت فوتوکاتالیستی ZnO در کنار خاصیت اکسیدکنندگی کاربرد این نانوذره را به صورت سوسپانسیونی باعث شده است و در این میان با توجه به سمیت کمتر این نانوذره در اکوسیستمهای آبی امکان استفاده از این نانوذره به صورت نانوسیال بیشتر فراهم است [۴۸و۲۴].کاربرد اصلی نانوسیالات حاوی اکسید آهن در حذف فلزات سنگین است [۲۸].با توجه به قابلیت مغناطیسی شدن این نانوذره، مشکل جداسازی این نانوذره از نانوسیال بسیار کمتر بوده و صرفا با ایجاد میدان مغناطیسی، جداسازی این نانوذره با بازدهی بالایی انجام می‌شود [۳۶].

۷- اثرات زیست‌محیطی نانوذرات

با وجود تمام مزایایی که استفاده از نانوسیالات در تصغیه آب و فاضلاب دارد، اما نگرانی‌ها و چالشهایی نیز در این باره وجود دارد که استفاده از این مواد را با محدودیت مواجه ساخته است. یکی از مهمترین نگرانی‌ها در این باره، پراکندگی نانوذرات و ماندگاری آنها است که امکان ورود آنها را به اکوسیستمهای آبی افزایش می‌دهد [۴۹]. یکی از مواردی که اثر مخرب ورود نانوذرات به اکوسیستم آب شناخته می‌شود، پایداری فعالیت ضد میکروبی نانوسیالاتی است که در گندزادیی از آب و فاضلاب مورد استفاده بوده‌اند. برای مثال نانوذره‌ای مانند TiO_2 باقیمانده در فرآیندهای مختلف تصفیه می‌تواند همچنان فعالیت ضد میکروبی خود را حفظ کرده و در صورت ورود به اکوسیستم آبی باعث تغییر در جمعیت میکروارگانیسمهای طبیعی اکوسیستم شده و تعادل زیستی آن اکوسیستم را به هم بریزد [۲۲].

یکی از خصوصیات مثبت نانوسیالات پراکندگی نانوذره در سیال به صورت سوسپانسیونی از نانوذراتی است که در اندازه‌های بسیار ریز در آب وجود دارند. بعد از فرآیند تصفیه با استفاده از نانوسیالات نیازمند روشی کارآمد برای جداسازی نانوذرات هستیم. استفاده از فیلتر غشایی، انواع روشهای لخته‌سازی و یا ایجاد میدان مغناطیسی برای جداسازی نانوذرات مغناطیسی از آب از جمله روشهایی که برای جداسازی نانوذره از آب و استفاده مجدد از آن به کار گرفته می‌شود. اگر چه در سالهای اخیر تلاشهای فراوانی برای افزایش بازدهی جداسازی این مواد شده است، اما همچنان درصد ناچیزی ار نانوذره حذف نشده و بعد از فرآیند جداسازی در آب تصفیه شده باقی می‌ماند [۲۲].

با افزایش مطالعات بر روی سمیت زیستی نانوذرات و اثرات آنها بر اکوسیستم، شناخت بشر از اثرات این مواد بر سلامت انسانها و سایر ارگانیسمها و میکروارگانیسمهای آبی افزایش یافته است. برای مثال بر اساس تحقیق منتشر شده در سال ۲۰۱۰ ذرات TiO_2 با اندازه کمتر از 100 nm برای سلامتی انسان و دیکر جانوران مضر شناخته شده است و این ماده در دسته عوامل سرطان‌زا برای انسان طبقه‌بندی شده است .

بسته به میزان تماس با نانوذرات اثرات زیانبار آنها بر سلامت می‌تواند متفاوت باشد. مواد در دو حالت توانایی ایجاد اثرات مخرب بر سلامتی انسان و حیوانات را دارند؛ ۱- تماس با آلاینده با غلظت کم در مدت زمان زیاد ۲- تماس با آلاینده در مدت زمان کم اما با غلظت زیاد. از آنجا که در مورد نانوذارت، میزان قابل توجهی از این مواد در طی فرآیندهای مختلف جداسازی از آب حذف می‌شوند، به همین دلیل عمده‌ی مطالعات زیست‌سمیتی این مواد بر روی اثرات آنها در اثر تماس دراز مدت در غلظتهای پایین است. برای مثال در مورد نانوذره نقره، شواهدی بر اثرات مخرب در تماس کوتاه مدت در غلظتهای پایین وجود ندارد. با این حال در تماس طولانی مدت باعث پاره شدن سلولهای پوستی و هضاهای مخاطی می‌گردد[۴۹]. یا در مورد میکروارگانیسمهای فوتوسنتز کننده، تماس با بعضی نانوذرات باعث اختلال در زنجیره تولید انرژی می‌گردد[۵۰]. همچنین گزارشهایی در مورد اثرات این نانوذره بر روی سلولهای عصبی وجود دارد. همچنین در مورد نانوذره ZnO گزارشهایی از اثرات این ماده بر سلولهای T بدن انسان در غلظتهای بیشتر از ۵ میلی مولار آمده است [۵۱]. از آنجا که هنوز غلظتهای بی خطر از نانوذرات باقیمانده در آب به طور دقیق مشخص نشده است، استفاده از این مواد در تصفیه آب و فاضلاب در غلظتهای بالا و مقیاسهای بزرگ پیشنهاد نمی‌شود.

در مقاله مروری منتشر شده توسط ناتس و همکاران در سال ۲۰۱۸ که به منظور بررسی مقالات منتشر شده در مورد ارزیابی اثرات سمیت نانوذرات بر ارگانیسمهای موجود در اکوسیستمهای مختلف منتشر شده بود، بیشترین بررسی روی نانوذره‌ی TiO_2 انجام شده بود. همچنین در مقالاتی که به بررسی تاثیر توأمان دو نانوذره بر اکوسیستم منتشر شده است، گزارش شده است که سمیت نانوذرات در این حالت بسیار بیشتر از حالتی است که هر کدام از نانوذرات به طور جداگانه در معرض ارگانیسمهای آبی قرار گرفتند [۵۲].

تجمع نانوذرات در سلولهای زیستی، یکی دیگر از چالشهای استفاده از این مواد در تصفیه فاضلاب است. اگر چه غلظت این مواد درآب بعد از به‌کارگیری فرآیندهای جداسازی به شدت کاهش یافته و در تحقیقات علمی اشاره‌ای به اثر آنها بر سلامت انسان و سایر ارگانیسمهای طبیعی در محیط زیست نشده است، اما به دلیل تجمع این مواد در توده‌های زیستی در دراز مدت باعث بروز مشکلات فراون از از جمله جهش زیستی، مرگ بافت زیستی و یا حتی اثرات سرطان‌زایی می‌شود. از طرفی دیگر با تجمع این مواد در بدن ارگانیسم های آبی نظیر ماهی‌ها امکان ورود آنها به چرخه غذایی انسان نیز وجود دارد. برای مثال تجمع نانوذرات فلزی و اکسید فلزی در بدن ماهی قزل‌آلای رودخانه‌ای گزارش شده است [۴۹]. در پایان اگرچه اطلاعات زیادی در مورد اثر نانوذرات مخنلف بر ارگانیسمهای آبی منتشر شده است، اما همچنان برای مشخص شدن غلظت بی‌خطر از هر نانوذره که بتوان آن را غیر مضر قلمداد کرد، تحقیقات بیشتر و تدوین استانداردهای جدید مرتبط با نانومواد به طور عام و نانوسیالات به طور خاص لازم است.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعه و بررسی پژوهش‌های اخیر، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیالات به عنوان یک راهکار موثر برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب دارای پتانسیل بالقوه‌ای است. این مواد با ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند افزایش انتقال حرارت، بهبود خواص فیزیکی سیالات و کاهش آلاینده‌ها، می‌توانند به کارایی و کارآیی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب کمک کنند. با این حال، همچنان نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه کاربردهای مختلف و اثرات بلندمدت استفاده از این تکنولوژی در محیط زیست و سلامت عمومی وجود دارد. از این رو، ادامه تحقیقات و توسعه فناوری نانوسیالات در زمینه تصفیه آب و فاضلاب امری ضروری و اساسی به‌شمار می‌آید.

۹- مراجع

۱. لطفیان, ا .خسروی پور, ب. (۱۳۹۱) کاربرد فناوری نانو در پایداری محیط زیست با تاکید بر پالایش آب و فاضلاب, دانشگاه تهران.

۲. معلمی مژگان (۲۰۱۸) بررسی تاثیر رشد درآمد سرانه بر رشد خالص واردات آب مجازی در کشورهای منتخب. فصلنامه علمی نظریه های کاربردی اقتصاد ۵(۱), ۱۵۸-۱۳۳.

3. Watkins, K. (2006) Human Development Report 2006-Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis. UNDP Human Development Reports (2006).

4. Esfe, M. H., Kamyab, M. H., Alirezaie, A., & Toghraie, D. (2021). Using radial basis function network to model the heat transfer and pressure drop of water based nanofluids containing MgO nanoparticles. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101475.

5. Hemmat Esfe, M., & Kamyab, M. H. (2021). Mathematical monitoring of agglomeration effects on thermophysical properties of water-based nanofluids using MLP and RSM. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 146, 739-756.

6. Esfe, M. H., Esfandeh, S., & Kamyab, M. H. (2020). History and introduction. In Hybrid Nanofluids for Convection Heat Transfer (pp. 1-48). Academic Press.

7. Hemmat Esfe, M., & Kamyab, M. H. (2020). Viscosity analysis of enriched SAE50 by nanoparticles as lubricant of heavy-duty engines. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 140, 79-93.

8. Qu, X., Alvarez, P.J.J. and Li, Q. (2013) Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. Water Research 47(12), 3931-3946.

9. Zhang, M., Yang, J., Cai, Z., Feng, Y., Wang, Y., Zhang, D. and Pan, X. (2019) Detection of engineered nanoparticles in aquatic environments: current status and challenges in enrichment, separation, and analysis. Environmental Science: Nano 6(3), 709-735.

10. Hwang, Y., Lee, J.-K., Lee, J.-K., Jeong, Y.-M., Cheong, S.-i., Ahn, Y.-C. and Kim, S.H. (2008) Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. Powder Technology 186(2), 145-153

11. Taylor, R., Coulombe, S., Otanicar, T., Phelan, P., Gunawan, A., Lv, W., Rosengarten, G., Prasher, R. and Tyagi, H. (2013) Small particles, big impacts: a review of the diverse applications of nanofluids. Journal of applied physics 113(1), 1.

12. Li, Q., Mahendra, S., Lyon, D.Y., Brunet, L., Liga, M.V., Li, D. and Alvarez, P.J.J. (2008) Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. Water Research 42(18), 4591-4602.

13. Malika, M. and Sonawane, S.S. (2019) Review on Application of nanofluid/Nano Particle as Water Disinfectant. Journal of Indian Association for Environmental Management (JIAEM) 39(1-4), 21-24.

14. Cioffi, N. and Rai, M. (2012) Nano-antimicrobials: progress and prospects, Springer Science & Business Media.

15. Bahcelioglu, E., Unalan, H.E. and Erguder, T.H. (2020) Silver-based nanomaterials: A critical review on factors affecting water disinfection performance and silver release. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1-35.

16. Tugulea, A.-M., Bérubé, D., Giddings, M., Lemieux, F., Hnatiw, J., Priem, J. and Avramescu, M.-L. (2014) Nano-silver in drinking water and drinking water sources: stability and influences on disinfection by-product formation. Environmental Science and Pollution Research 21(20), 11823-11831.

17. Lydakis-Simantiris, N., Riga, D., Katsivela, E., Mantzavinos, D. and Xekoukoulotakis, N.P. (2010) Disinfection of spring water and secondary treated municipal wastewater by TiO2 photocatalysis. Desalination 250(1), 3.۳۵۵-۵۱

18. Ripolles-Avila, C., Martinez-Garcia, M., Hascoët, A.-S. and Rodríguez-Jerez, J.J. (2019) Bactericidal efficacy of UV activated TiO2 nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria on suspension. CyTA-Journal of Food 17(1), 408-418.

19. Reddy, P.V.L., Kavitha, B., Reddy, P.A.K. and Kim, K.-H. (2017) TiO2-based photocatalytic disinfection of microbes in aqueous media: a review. Environmental research 154, 296-303.

2. Chockalingam, K., Ganapathy, A., Paramasivan, G., Govindasamy, M. and Viswanathan, A. (2011) NiO/TiO2 nanoparticles for photocatalytic disinfection of bacteria under visible light. Journal of the American Ceramic Society 94(8), 2499-2505.

21. Rodríguez-Méndez, A., Guzmán, C., Elizalde-Peña, E.A., Escobar-Alarcón, L., Vega, M., Rivera, J.A. and Esquivel, K. (2017) Effluent disinfection of real wastewater by Ag–TiO2 nanoparticles photocatalysis. Journal of nanoscience and nanotechnology 17(1), 711-719.

22. Adams, L.K., Lyon, D.Y. and Alvarez, P.J.J. (2006) Comparative eco-toxicity of nanoscale TiO2, SiO2, and ZnO water suspensions. Water Research 40(19), 3527-3532.

23. Zhang, L., Li, Y., Liu, X., Zhao, L., Ding, Y., Povey, M. and Cang, D. (2013a) The properties of ZnO nanofluids and the role of H2O2 in the disinfection activity against Escherichia coli. Water Research 47(12), 4013-4021.

24. Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Povey, M. and York, D. (2007) Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). Journal of Nanoparticle Research 9(3), 479-489.

25. Thines, R., Mubarak, N., Nizamuddin, S., Sahu, J., Abdullah, E. and Ganesan, P. (2017) Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: a review. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 72, 116-133.

26. Lu, H ,.Wang, J., Stoller, M., Wang, T., Bao, Y. and Hao, H. (2016) An overview of nanomaterials for water and wastewater treatment. Advances in Materials Science and Engineering 2016.

27. Parvin, F., Rikta, S.Y. and Tareq, S.M. (2019) Nanotechnology in Water and Wastewater Treatment. Ahsan, A. and Ismail, A.F. (eds), pp. 137-157, Elsevier.

28. Anjum, M., Miandad, R., Waqas, M., Gehany, F. and Barakat, M.A. (2019) Remediation of wastewater using various nano-materials. Arabian Journal of Chemistry 12(8), 4897-4919.

29. El-sayed, M.E.A. (2020) Nanoadsorbents for water and wastewater remediation. Science of The Total Environment 739, 139903.

30. Stoimenov, P.K., Klinger, R.L., Marchin, G.L. and Klabunde, K.J. (2002) Metal oxide nanoparticles as bactericidal agents. Langmuir 18(17.٦٦٨٦-٦٦٧٩ ,(

31. Hatamie, A., Parham, H., Zargar, B. and Heidari, Z. (2016) Evaluating magnetic nano-ferrofluid as a novel coagulant for surface water treatment. Journal of Molecular Liquids 219, 694-702.

32. Gutierrez, A.M., Dziubla, T.D. and Hilt, J.Z. (2017) Recent advances on iron oxide magnetic nanoparticles as sorbents of organic pollutants in water and wastewater treatment. Reviews on environmental health 32(1-2), 111-117.

33. Wadhawan, S., Jain, A., Nayyar, J. and Mehta, S.K. (2020) Role of nanomaterials as adsorbents in heavy metal ion removal from waste water: A review. Journal of Water Process Engineering 33, 101038.

34. Wang, S., Sun, H., Ang, H.-M. and Tadé, M. (2013) Adsorptive remediation of environmental pollutants using novel graphene-based nanomaterials .Chemical engineering journal 226, 336-347.

35. Lu, F. and Astruc, D. (2020) Nanocatalysts and other nanomaterials for water remediation from organic pollutants. Coordination Chemistry Reviews 408, 213180.

36. Stucky, G., Keller, A.A., Shi, Y., Wang, P., Shi, Q .and Liang, H. (2012) Use of magnetic nanoparticles to remove environmental contaminants, Google Patents.

37. Kyzas, G.Z. and Matis, K.A. (2015) Nanoadsorbents for pollutants removal: a review. Journal of Molecular Liquids 203, 159-168.

38. Larbi, L., Fertikh, N .and Toubal, A. (2014) Study of Material Used in Nanotechnology for the Recycling of Industrial Waste Water. Physics Procedia 55, 317-323.

۳۹. هراتی نژادتربتی, ا. (۱۳۹۱) نانوتکنولوژی و کاربردهای آن درصنعت آب فاضلاب و اثرات آن برمحیط زیست, دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان.

40. Adeleye, A.S., Conway, J.R., Garner, K., Huang, Y., Su, Y. and Keller, A.A. (2016) Engineered nanomaterials for water treatment and remediation: Costs, benefits, and applicability. Chemical engineering journal 286, 640-662.

41. Dizaj, S.M., Mennati, A., Jafari, S., Khezri, K. and Adibkia, K. (2015) Antimicrobial activity of carbon-based nanoparticles. Advanced pharmaceutical bulletin 5(1), 19.

42. Wu, Y., Pang, H., Liu, Y., Wang, X., Yu, S., Fu, D., Chen, J. and Wang, X. (2019) Environmental remediation of heavy metal ions by novel-nanomaterials: a review. Environmental pollution 246, 608-620.

43. Lee, S.-Y. and Park, S.-J. (2013) TiO2 photocatalyst for water treatment applications. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 19(6), 1761-1769.

44. Sadegh ,H., Ali, G.A., Gupta, V.K., Makhlouf, A.S.H., Shahryari-ghoshekandi, R., Nadagouda, M.N., Sillanpää, M. and Megiel, E. (2017) The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment. Journal of Nanostructure in Chemistry 7(1), 1-14.

45. Yang, Y., Zhang, C. and Hu, Z. (2013) Impact of metallic and metal oxide nanoparticles on wastewater treatment and anaerobic digestion. Environmental Science: Processes & Impacts 15(1), 39-48.

46. Zhang, W.-x. (2003) Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. Journal of Nanoparticle Research 5(3-4), 323-332.

۴۷. محمودیان, ل. and کریمی جشنی, ا. (۱۳۹۱) کاربرد نانوفناوری در تصفیه آب و فاضلاب با تمرکز بر TiO2, دانشگاه تهران.

48. Zhang, L.L., Liu, X.M., Chen, B. and Li, Z.F۲۰۱۳) .b) Disinfection of Municipal Wastewater Using ZnO Nanofluids, pp. 474-479, Trans Tech Publ.

49. Kabir, E., Kumar, V., Kim, K.-H., Yip, A.C. and Sohn, J.R. (2018) Environmental impacts of nanomaterials. Journal of Environmental Management 225, 261-271.

50. Klaine, S.J., Alvarez, P.J., Batley, G.E., Fernandes, T.F., Handy, R.D., Lyon, D.Y., Mahendra, S., McLaughlin, M.J. and Lead, J.R. (2008) Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. Environmental Toxicology and Chemistry :An International Journal 27(9), 1825-1851.

51. Reddy, K.M., Feris, K., Bell, J., Wingett, D.G., Hanley, C. and Punnoose, A. (2007) Selective toxicity of zinc oxide nanoparticles to prokaryotic and eukaryotic systems. Applied physics letters 90(21), 213902.

52. Naasz, S., Altenburger, R. and Kühnel, D. (2018) Environmental mixtures of nanomaterials and chemicals: The Trojan-horse phenomenon and its relevance for ecotoxicity. Science of The Total Environment 635, 1170-1181.