**مروری بر حذف آلاینده ها از آب/فاضلاب با استفاده از انواع مختلف نانوذرات**

نویسندگان : ام تی امین ، آ.آ اَل اَذبا ، یو منظور

واحد تحقیقات آب اَلعمودی ، دانشگاه عربستان سعودی ، صندوق پستی 2460 ، ریاض 11451 ، عربستان سعودی

برای مکاتبات مربوطه لطفا با آقای ام اتی امین به آدرس ایمیل mtamin@ksu.edu.sa تماس حاصل فرمایید .

رشد سریع جمعیت ، کاهش منابع آبی و تغییرات آب و هوا که خود منجر به خشکسالی های طولانی مدت و سیلاب ها شده است آب آشامیدنی را در بسیاری از بخش های جهان به یک منبع رقابتی تبدیل نموده است . توسعۀ مواد و روش های پایدار و مقرون به صرفه جهت تامین آب سالم در مقادیر کافی ، نیاز صنعت آب است . تقاضای روز افزون برای آب که با دستورالعمل های سختگیرانۀ بهداشتی و پدیدار شدن آلاینده ها نیز همراه شده موجب گردیده است تا تکنولوژی های سنتی تصفیۀ آب/فاضلاب برای تامین آب سالم کافی ناکارآمد باقی بماند . فرآیندهای بسیار موثر و چند منظورۀ مبتنی بر نانوتکنولوژی ، راه حل های مقرون به صرفه ای برای تصفیۀ آب/فاضلاب در اختیار ما قرار می دهد که متکی بر زیرساخت های بزرگ یا سیستم های متمرکز نیستند . هدف از این مطالعه ، مرور کاربردهای ممکن نانوذرات/فیبرها برای حذف آلاینده ها از آب/فاضلاب است . این مقاله بطور خلاصه به بررسی اجمالی قابلیت دسترسی و طرز کار نانوموادهای مختلف ( ذرات یا فیبرها ) برای حذف ویروس ها ، مواد غیرارگانیک محلول در آب ، فلزات سنگین ، یون های فلزی ، ترکیب های کمپلکسی ارگانیک ، مواد ارگانیک طبیعی ، نیترات و سایر آلاینده هایی که در آب های سطحی ، آب های زیر زمینی و آب های صنعتی موجود هستند می پردازد . در پایان مقاله ، بر اساس رویه های فعلی کاربردهای نانوتکنولوژی در صنعت آب ، برای یک واحد تصفیۀ آب خودکفا به منظور حذف تمامی انواع آلاینده ها از فاضلاب ، توصیه هایی ارائه می دهیم .

**مقدمه**

آب تاثیر گسترده ای بر تمامی جنبه های زندگی انسان دارد شامل سلامت و بهداشت ، غذا ، انرژی و اقتصاد ؛ که البته تاثیر آب فقط به این موارد محدود نمی شود . علاوه بر اثرات محیطی ، اقتصادی ، اجتماعی و بهداشتی منابع ناچیز آب [1-4]، تامین آب سالم برای سلامت کودکان و افراد بی بضاعت ، امری ضروری است [5-6] . تخمین زده شده است که سالانه 20-10 میلیون نفر در اثر بیماری های آب آورده ، جان خود را از دست می دهند همچنین عفونت های غیر کشنده سالانه موجب مرگ بیش از 200 میلیون انسان می شود [7] . روزانه ، تقریبا 6000-5000 کودک ، در اثر اسهال مرتبط با آب ، جان خود را از دست می دهند [8,9] . در حال حاضر ، عدم دسترسی بیش از 0.78 ملیارد انسان به منابع آب سالم در سراسر جهان [10]، منجر به بروز مشکلات عمدۀ سلامت می شود . تخمین زده شده است که بیش از یک میلیارد انسان در جهان در دسترسی به آب سالم با کمبود مواجه هستند و ظرف دو دهه ، منابع فعلی آب تا یک سوم کاهش خواهد یافت .

بخشی از کل آب جاری که متشکل از جریان پایدار آب است بعنوان منبع آب سالم در نظر گرفته می شود که زندگی انسان ها بدان وابسته است . این جریان پایدار آب سالم ، 12500-15000 km3 در سال ، تخمین زده شده است [11,12] . که از این مقدار، کل آب سالم برای آبیاری ، صنعت و اهداف خانگی ، 4000 km3 در سال برآورد شده است [13] . پیش بینی شده است که این میزان برای سال 2025 ، به محدودۀ 4300-5000 km3 در سال ، افزایش یابد [14-16] . متناوباً ، قابلیت دسترسی به آب سالم تنها 0.5% از 1.4 میلیارد کیلومتر مکعب آب جهان است که بعلاوه بصورت ناکافی در سراسر جهان توزیع شده است [17] .

بدلیل تقاضای رقابت کنندۀ جمعیت فزاینده در سراسر جهان ، امکان افزایش منابع آب سالم ، محدود است ؛ همچنین انتظار می رود بدلیل تغییرات آب و هوایی و رشد جمعیت ظرف دو دهۀ آتی ، مشکلات مرتبط با آب ، بیشتر افزایش یابد [18] . تخمین زده شده است جمعیت سراسرجهان از حالا تا سال 2050 ، تقریبا تا 2.9 میلیارد انسان افزایش یابد ( بر طبق پیش بینی های متوسط سازمان ملل ) [15] . کمبود منابع آب سالم همچنین نتیجۀ سوءاستفاده ( بهره کشی ) از منابع آبی برای اهداف خانگی ، صنعتی و آبیاری در بسیاری از بخش های جهان است [19] . فشار بر منابع آب سالم که ناشی از تقاضای روز افزون جهان برای غذا ، انرژی و غیره است [20,21] بدلیل رشد جمعیت و تهدیدات تغییر آب و هوا ، بیشتر و بیشتر افزایش می یابد . آلوده نمودن منابع آب سطحی/زیرزمینی از دیگر دلالیل کاهش منابع آب سالم است [22-24] . سفره های آب در سراسر جهان بدلیل مشکلات چندگانۀ پیشروی آب شور ، فرسایش خاک ، بهداشت ناکافی ، آلودگی آب های سطحی/زیر زمینی توسط رشد جلبکی ، دترجنت ها ، کودهای شیمیایی ، آفت کش ها ، مواد شیمیایی ، فلزات سنگین و غیره ، در حال کاهش یافتن و آلوده شدن است [25-28] .

بروز میکرو آلاینده های نوظهور در آب های آلوده /فاضلاب ها ( مانند ترکیبات متلاشی کنندۀ اِندورسین ( (EDCs ) ، واحدهای سنتی تصفیۀ آب/فاضلاب را در برآورده نمودن استانداردهای محیطی را ناکارامد نموده است . تخلیۀ این ترکیبات در محیط های آبی ، بر روی تمامی ارگانیسم های زنده ، تاثیر گذاشته است . مواد و تکنولوژی های سنتی تصفیه نظیر کربن فعال شده ، اکسیداسیون ، لجن فعال شده ، نانوفیلتراسیون (NF ) و غشاهای اسمز معکوس ( RO ) در تصفیۀ آب هایی که بطور پیچیده و مختلط آلوده شده اند و محتوی داروها ، محصولات مراقبت فردی ، سورفکتانت ها ، افزودنی های گوناگون صنعتی و مواد شیمیایی بیشمار هستند کارامد نمی باشند . فرآیندهای سنتی تصفیه به اندازۀ کافی قادر نیستند طیف وسیعی از مواد شیمیایی سمی و میکروارگانیسم های بیماری زا را از آب خام حذف نمایند .

از آنجایی که سفره های آب در سراسر جهان بدلیل فاکتورهای متعددی نظیر پیشروی آب شور و آلودگی ناشی از آب های سطحی در حال کاهش است لذا اکنون زمان مناسب آن فرا رسیده است تا مشکلات آب را حل نماییم . با استفاده از تکنولوژی های بهتر تصفیه ، می توانیم مشکلات کمبود آب ، بهداشت ، انرژی و تغییر آب و هوا را کاهش دهیم . از طریق استفادۀ مجدد از فاضلاب می توان به ذخیرۀ قابل توجهی از آب آشامیدنی دست یافت ، این کار به نوبۀ خود مستلزم مواد و روش های توسعه یافته ای است که موثر ، مقرون به صرفه و قابل اعتماد باشد . اگرچه رقیق سازی جریان های فاضلابی مختلط می تواند به کاهش بار میکرو آلاینده های پایین دست ، کمک کند [29-30] اما در هر حال بدلیل اینکه حجم این مواد در حد میکرو گرم یا حتی نانو گرم در لیتر است بسیاری از آنها از عملیات سنتی تصفیۀ آب عبور می کنند .

سیستم های تصفیۀ بیولوژیکی نظیر لجن فعال شده و فیلترهای چکاندن بیولوژیکی قادر نیستند دامنۀ وسیعی از آلاینده ها را حذف کنند و بیشتر این ترکیبات ، در جریان فاضلاب ، محلول باقی می مانند [31-33] . در مطالعات مختلفی اثبات شده است که عملیات های شیمی-فیزیکی نظیر لخته کردن ، هماوری کردن ، نرم کردن به روش آهک در حذف EDC های مختلف و ترکیبات دارویی ، ناکارامد هستند [34-36] . کلرزنی اگرچه حفاظت مازادی در مقابل رشد مجدد باکتری ها و عوامل بیماری زا ارائه می دهد اما مزه و بوی نامطلوبی درآب ایجاد می نماید و علاوه بر این ، موجب تشکیل محصولات جانبی ناشی از گندزدایی (DBPs) در آب آشامیدنی قابل حمل ، می شود [40-43] . ازوناسیون بدلیل هزینۀ های بالا و طول عمر کوتاه ، بعنوان گزینه ای کم جاذبه در نظر گرفته می شود . نورکافت فرا بنفش (UV) و تبادل یون اگرچه گونه هایی از تصفیه های پیشرفته هستند اما گزینه هایی عملی برای حذف میکرو آلاینده ها نیستند [44] .

فرآیندهای غشایی نظیر میکرو فیلتراسیون ، اولترا فیلتراسیون ، NF و RO که فرآیند های فیلتراسیونی راندن با فشار هستند بعنوان تعدادی فرآیند جدید و بسیار کارامد در نظر گرفته می شوند [44-49] . این روش ها بعنوان گزینه های آلترناتیو حذف مقادیر زیاد میکرو آلاینده ها در نظر گرفته می شوند [50] . عملیات تصفیۀ آب/فاضلاب با استفاده از تکنیک های غشایی ، مقرون به صرفه و از نظر تکنیکی ، عملی است . این روش ها می توانند گزینه های بهتری نسبت به سیستم های سنتی تصفیه باشند زیرا بازده بالای آنها در حذف آلاینده ها ، استانداردهای محیطی را برآورده می کند [53] . اثبات شده است که NF و RO ، تکنولوژی های فیلتراسیونی کاملا کارآمدی در حذف میکرو آلاینده ها هستند [54,55] . RO نسبت به NF نسبتا کارامدتر است اما مصرف بالاتر انرژی در RO ، از جذابیت این روش نسبت به NF در موقعیت هایی که حذف آلاینده ها توسط مکانیسم های مختلفی نظیر همرفت ، نفوذ ( الک کردن ) و اثر بار الکتریکی صورت می گیرد می کاهد [56] . اگرچه فرآیندهای غشاییِ مبتنی بر NF ، در حذف بارهای بزرگی از میکرو آلاینده ها ، کاملا کارامد هستند [57] اما برای تصفیۀ میکرو آلاینده های نوظهور ، مواد و روش های تصفیۀ پیشرفته تری مورد نیاز است .

از آنجایی که صنعت آب نیازمند تولید آب آشامیدنی با کیفیت بالاست لزوم توسعۀ مواد و روش های پایدار و مقرون به صرفه به وضوح احساس می شود تا بر مبنای این روش ها ، چالش های تامین آب سالم در مقادیر کافی را حل نمود . در زمینۀ تصفیه آب ، ابتکارات زیادی وجود دارد ؛ در هر حال لازم است این روش ها پایدار اقتصادی و نسبت به تکنیک های موجود ، کارامدتر باشند . در این راستا ، تکنولوژی های سنتی تصفیۀ آب می بایست مدرن شوند بدین معنی که به روز شوند یا اصلاح شوند و یا توسط مواد و روش های در حال توسعه که موثر ، مقرون به صرفه و قابل اعتماد هستند جایگزین شوند . این امر علاوه بر مقابله نمودن با بدتر شدن روز به روز کیفیت آب آشامیدنی ، به ویژه در دستیابی به ذخیره های قابل توجهی از آب آشامیدنی از طریق استفادۀ مجدد از فاضلاب اهمیت دارد . در حل مشکلات مرتبط با کفیت و کمیت آب ، نانوتکنولوژی را موثر دانسته اند [58] . نانوموادها ( نظیر نانو لوله های کربنی (CNTs) و دندریمرها ) در توسعۀ فرآیندهای تصفیۀ کارامدتر در میان سیستم های پیشرفتۀ آب ، شرکت دارند [59] . جنبه های بسیار زیادی از نانوتکنولوژی برای حل مشکلات متعدد آب به منظور تضمین قابلیت پایداری محیطی ، وجود دارد . این مطالعه از طریق تمرکز بر چالش های تحقیقات آتی ، یک چشم انداز منحصر به فرد از یک تحقیق بنیادی درزمینۀ نانوتکنولوژی برای تصفیۀ آب/فاضلاب و استفادۀ مجدد ، ارائه می دهد .

این مقاله از سه بخش تشکیل شده است ؛ در بخش 1 ، بطور خلاصه روش های سنتی و فعلی تصفیۀ آب/فاضلاب را شرح دادیم . در بخش 2 بطور عمده به توصیف خواص و انواع نانومواد و اهمیت آنها در در تصفیۀ آب/فاضلاب می پردازیم . در بخش 3 ، انواع نانوموادها که بر غشاها برای تصفیۀ آلاینده های گوناگون از آب/فاضلاب تمرکز دارند را شرح می دهیم . کاربرد نانوموادها را بر اساس وظایف شان در فرآیندهای عملیات واحد مرور می کنیم . در بخش 4 ، در قالب نتیجه گیری و توصیه هایی برای کاربرد تمام عیار نانوموادها ، یک چشم انداز و خلاصه ارائه می دهیم .

2**.نانوتکنولوژی برای تصفیۀ آب/فاضلاب**

همزمان که سرچشمه ها/منابع آب سالم بدلیل خشکسالی های طولانی مدت ، جمعیت فزاینده ، تهدیدات تغییرات آب و هوایی و استانداردهای سخت گیرانۀ کیفیت آب در حال کاهش است تقاضا برای آب تمیز در سراسر جهان رو به افزایش است [60,61] . مردم در کشورهای در حال توسعه بدلیل منابع محدود و رو به کاهش آب سالم ، در حال استفاده از منابع غیر سنتی آب هستند ( نظیر فاضلاب های سطحی ( نزولات آسمانی جاری شده ) ، آب سالم آلوده شده ، آب شور و بدمزه ) . سیستم های فعلی تصفیۀ آب ، سیستم های توزیع ، عادات یکبار مصرف نمودن بهمراه طرح های بزرگ متمرکز دیگر تاب آوردنی نیستند . تحقیقاتی که در حال حاضر انجام می شوند به اندازۀ کافی به تشریح عملیات هایی که مطابق با استانداردهای سخت و دقیق کیفیت آب ، دسترسی به آب را برای تمامی مصرف کنندگان تضمین می کنند نمی پردازد [62] .

روزانه بسیاری از پیشرفت های تکنولوژیکی تجاری و غیر تجاری بکار گرفته می شوند اما نانوتکنولوژی بعنوان یکی از روش های پیشرفتۀ تصفیۀ آب و فاضلاب به اثبات رسیده است . پیشرفت ها در حوزۀ تحقیقات نانو مقیاس ، این امکان را فراهم آورده است تا برای تصفیۀ کارامد آب/فاضلاب و برآوردن استانداردهای همواره روز افزون کیفیت آب ، تکنولوژی های تصفیه ای ابداع گردد که از لحاظ اقتصادی ، عملی و از لحاظ محیطی ، پایدار هستند . پیشرفت ها در نانوتکنولوژی ، فرصت هایی را فراهم آورده است تا تقاضای نسل های بعدی برای آب سالم ، برآورده شود . چنین اظهار می گردد که نانوتکنولوژی با استفاده از انواع مختلف نانوذرات /نانوفیبرها می تواند بسیاری از مسائل کیفیت آب ، را به اندازۀ کافی حل و فصل نماید [63] . هنگامی که نانوتکنولوژی را با سایر رشته ها نظیر شیمی ، مهندسی و علوم مواد مقایسه می کنیم در می یابیم که نانو تکنولوژی از موادی با اندازهایی کوچکتر از 100 nm در حداقل یک بعد ( شکل 1) ، استفاده می نماید یعنی اندازه هایی در سطح اتم ها و مولکول ها [64,65] .

در این مقیاس ، مواد دارای خواص فیزیکی ، شیمیایی و بیولوژیکی تغییر یافته و جدیدی هستند که عمدتا بدلیل ساختار آنها ، نسبت بالاتر مساحت سطح به حجم است که تصفیه و بازسازی ، حس نمودن و آشکارسازی ، جلوگیری از آلودگی را عرضه می نماید [66,67] . خواص منحصر به فرد نانوموادها نظیر واکنش پذیری بالا و جدب سطحی قوی ، کشف می شود تا بر اساس وظیفه شان در عملیات واحدها ، در تصفیۀ آب/فاضلاب بکار گرفته شوند . این موضوع ، در جدول 1 نشان داده شده است [68] .

نانوذرات می توانند بصورت عمیق تر نفوذ کنند لذا آب/فاضلابی را تصفیه می نمایند که بطور کلی از طریق تکنولوژی های سنتی امکان پذیر نیست [69] . نسبت بیشتر مساحت سطح به حجم ، واکنش پذیری با آلاینده های محیطی را نشان می دهد .

در زمینۀ تصفیه و بازسازی ، نانوتکنولوژی این پتانسیل را دارد که کیفیت و کمیت آب را در طولانی مدت تامین نماید برای مثال غشاها ، امکان استفادۀ مجدد از آب و نمک زدایی را فراهم می آورد . علاوه بر این ، نانوتکنولوژی از طریق توسعۀ تجهیزات پایش پیوسته ، اندازه گیری های ارزان و زمان واقعی را ارائه می دهد [70,71] . نانوذراتی که قابلیت جذب ، برهم کنش و واکنش بالا دارند از طریق اختلاط با سوسپانسیون های آبی ، می توانند همانند کلوئید رفتار کنند و آنها همچنین می توانند اثرات اندازۀ کوانتوم را نشان دهند [72-76] . بدلیل اندازۀ کوچک نانوذرات ، بقا انرژی که منجر به صرفه جویی در هزینه می شود امکان پذیر است ؛ در هر حال هزینۀ کلی استفاده از این تکنولوژی می بایست با هزینۀ سایر تکنیک های موجود در بازار ، مقایسه شود [77] . شکل 2 ، تعدادی از انواع مختلف نانوموادها را نشان می دهد که می توانند در تصفیۀ آب/فاضلاب مورد استفاده قرار گیرند [78-80] .

از آنجایی که تکنولوژی غشایی بعنوان یکی از فرآیندهای پیشرفتۀ تصفیۀ آب/فاضلاب در نظر گرفته می شود نانومواد بطور کارامدی در توسعۀ فرآیندهای موثرتر و مقرون به صرفه تر فیلتراسیون آب شرکت جسته اند [81-91] . از نانوذرات بطور مکرر در ساخت غشاها استفاده شده است این کار ، امکان کنترل نفوذپذیری و مقاوت در برابر رسوب در ساختارهای گوناگون و قابلیت های مربوطه را فراهم می آورد [92-93] .

هم غشاهای پلیمری و هم غشاهای غیرآلی یا از طریق وارد کردن نانو ذرات در غشاهای متخلل یا از طریق فرآیندهای بِلندینگ ، تولید می شوند [94-96] . یک مثال از نانوموادی که به این شکل استفاده می شود عبارتست از ذرات اکسید فلزی مانند  . CNT ها نتایج مطلوب نفوذپذیری بهبود یافته ، غیرفعال نمودن باکتری ها و غیره را منجر شده اند [97,98] .

در آخر اینکه ، از واسطه های نانوفیبری بدلیل نفوذپذیری بالایشان و خواص اندازۀ کوچک منافذ ، برای بهبود سیستم های فیلتراسیون استفاده شده است [99] . واسطه های نانوفیبری از طریق یک فرآیند جدید و موثر فیبراسیون به نام الکتروریسی تولید می شوند و بسته به پلیمرهای انتخاب شده ، ممکن است خواص متفاوتی نشان دهند [100] . بطور خلاصه توسعۀ نانوموادهای مختلف نظیر نانوجاذب ها ، نانوکاتالیست ها ، زئولیت ها ، دندریمرها و غشاهای کاتالیتیکی نانوساختار امکان گندزدایی میکروب های بیماری زا ، حذف فلزات سمی و اجسام حل شدۀ ارگانیگ و غیر ارگانیک از آب/فاضلاب را فراهم نموده است . در بخش بعدی بر اساس مقالات موجود ، تلاش نموده ایم فاکتورهایی که ممکن است بر بازده فرآیندهای حذف تاثیر بگذارند را شرح بدهیم .

**3-حذف آلاینده ها با استفاده از نانوموادهای مختلف**

**3.1. گندزدایی .** آلاینده های بیولوژیکی را می توان به سه دسته تقسیم نمود ؛ میکروارگانیسم ها ، مواد ارگانیک طبیعی ( NOM ) ، سموم بیولوژیکی . آلاینده های میکروبی شامل عوامل بیماری زای انسان و میکروب های آزاد زی است [101-105] . در سیستم های سنتی تصفیۀ آب ، حذف سموم سیانوباکتریایی یک مسئلۀ مهم است [106,107] . بسیاری از جاذب های سطحی که شامل کربن فعال شده هستند انصافاً بازده های حذف خوبی دارند و مجدداً یک تعداد از فاکتورها بر فرآیند حذف ، تاثیر می گذارند [108-111] .

امکان آلودگی ناشی از باکتری ها ، تک یاخته ها و ویروس ها هم در آب های زمینی و هم در آب های سطحی وجود دارد . علاوه بر سرطان زا بودن و تشکیل محصولات جانبی مضر ، سمیت گندزایی شمیایی استاندارد با کلر همواره قید می گردد . دی اکسید کلر ، گران است و در حین فرآیند تولید منجر به تولید مواد خطرناکی نظیر کلریت و کلرات می شود . از سوی دیگر ، ازن هیچ اثر ثانوی ندارد اما فراورده های ارگانیک ناشناختۀ ناشی از واکنش را تولید می کند . در گندزدایی با UV ، برای اثر بخشی لازم است زمان در معرض UV قرار گرفتن را افزایش دهیم و هم چنین اثر جانبی وجود ندارد . علی رغم پیشرفت ها در تکنولوژی گندزدایی ، فجایع ناشی از عفونت آب آورده همچنان رخ می دهد . بنابراین تکنولوژی های پیشرفتۀ گندزدایی علاوه بر اینکه برای استفاده در مقیاس بزرگ می بایست مناسب باشد حداقل باید عوامل بیماری زای پدیدار شده را حذف کند . انواع مختلفی از نانومواد وجود دارد که این قابلیت را دارند که بیماری های آب آورده را که توسط میکروب ها ایجاد می شود را گند زدایی کنند مانند نقره ، تیتانیوم و روی . بدلیا ظرفیت بار این مواد ، آنها خواص آنتی باکتریال دارند . فتو کاتالیست های  و نانوذرات متالیک و اکسید فلزی جزء امید بخش ترین نانوموادها با خواص آنتی باکتریال هستند .

سودمندی یون های فلزی در گندزدایی آب توسط بسیاری از محقیقن بیان شده است [112] . این بخش از مقاله به تشریح کاربرد این نانومواد آنتی باکتریال در گندزدایی آب ، می پردازد .



شکل 1. مقایسۀ اندازۀ نانوذرات با سایر مواد که اندازۀ بزرگتر دارند .



جدول 1 . مثال هایی از کاربرد بالقوۀ نانو تکنولوژی در نصفیۀ اب/فاضلاب

3.1.1 **نانوذرات نقره .** نقره بدلیل سمیّت پایین و غیر فعال نمودن میکروبی ، فلزی است که بیشترین استفاده را در آب دارد و از مکانیسم آنتی باکتریال آن ، گزارش های خوبی ارائه شده است [117,118] . نانوذرات نقرا از نمک های این عنصر نظیر نیترات نقره و کلرید نقره استخراج می شود و در مقالات به کارایی این نمک ها بعنوان آفت کش ، استناد می شود [119-123] . اثر آنتی باکتریال وابسته به سایز است ، نانوذرات کوچکتر نقره ( 8nm ) بیشترین تاثیر را دارند درحالی که ذراتی با اندازۀ بزرگتر ( 11-23 nm ) منجر به فعالیت آنتی باکتریال پایین تر می شود [125] . همچنین ، نانوذرات مثلثی شکل کوتاه شدۀ نقره نسبت به ذرات کروی و میله ای شکل ، اثرات آنتی باکتریال بهتری نشان دادند که این امر نشان دهندۀ وابستگی این ذرات به شکل است [126] . مکانیسمی که در اثرات آنتی باکتریال نانوذرات نقره دخیل است برای مثال عبارتست از تشکیل رادیکال آزاد که به غشاء های باکتری آسیب می رساند [127,128] ، بر هم کنش با DNA باکتری ها ، چسبیدن به سطح سلول که خواص غشاء را تغییر می دهد ، آسیب رساندن به آنزیم [122,129,130] .

نانوذرات تثبیت شده بدلیل فعالیت ضد میکروبی بالایی که دارند از اهمیت برخوردار شده اند [131] . گزارش شده است که نانوذرات بستر شدۀ نقره هم در برابر باکتری های گرم مثبت و هم در برابر باکتری های گرم منفی ، بسیار موثر و کارامد هستند [63] . در یک مطالعه نشان داده شد که فیبرهای استات سلولز که از طریق روش الکتروریسی مستقیم با نانوذرات نقره محاط شده اند [132] در مقابل هر دو نوع باکتری ، موثر است . از نانوذرات نقره همچنین در انواع مختلفی از پلیمرها برای تولید نانوفیبرهای ضد میکروبی و نانوکامپوزیت ها استفاده می شود [133-135] . در یک مطالعه ، تشک های نانوفیبر پلی اورتان مبتنی بر پلی () که محتوی نانوذرات نقره بودند بعنوان نانوفیبرهای ضد میکروبی ، ساخته شدند [136] . انواع مختلف نانوفیبرها که شامل نانوذرات نقره هستند برای کاربردهای ضد میکروبی ساخته می شوند و خواص ضد میکروبی بسیار خوبی از خود نشان می دهند [137-139] . از کف پلی اورتان که با نانوفیبرهای نقره روکش شده بود فیلترهای آبی ساخته شد که خواص آنتی باکتریال خوبی در مقابل اشیرشیا کُلی ( E.coli ) از خود نشان داده است [112] .

مثال های دیگری از میکرفیلترهای ارزان قیمت آب آشامیدنی وجود دارد که با استفاده از نانوذرات نقره ساخته شده اند و می تواند در مناطق دور افتاده در کشورهای در حال توسعه مورد استفاده قرار گیرد [140] . همچنین نانوذرات نقره کاربرد خود را در غشاهای فیلتراسیون آب یافته اند برای مثال در غشاهای پلی سولفون [141] برای کاهش رسوب بیولوژیکی و نیز اثربخشی خود را در مقابل گروه متنوعی از باکتری ها و ویروس ها به اثبات رسانده اند [142-148] . این غشاهای محتوی نانوذرات نقره ، فعالیت آنتی باکتریال خوبی در مقابل E.coli ، Pseudomonas و غیره داشتند [149-150] .

در آخر اینکه ، نانوکاتالیست نقره بتنهایی و بهمراه کربن که با آلومین پوشیده شده ، برای تخریب آلاینده های میکروبی در آب ، کارامد اثبات شده است [151] .

اگرچه از نانوذرات نقره بطور موثری در غیرفعالسازی باکتری ها و ویروس ها و نیز در کاهش رسوب بیولوژیکی غشاء استفاده شده است اما بدلیل زوال یون های نقره با گذشت زمان ، تاثیر طولانی مدت این ذرات در برابر رسوب بیولوژیک غشاء گزارش نشده است [152,153] . بنابراین برای کنترل طولانی مدت رسوب بیولوژیکی غشاء لازم است مطالعات بیشتری در زمینۀ کاهش زوال یون های نقره صورت بگیرد . متناوباً ، دوپه کردن نانوذرات نقره با سایر نانوذرات فلزی یا دوپه کردن کامپوزیت های نانوذرات نقره با نانوذرات اکسید فلز می تواند این موضوع را حل کند ، همچنین این کار می تواند منجر به حذف موازی ترکیبات ارگانیک/غیرارگانیک از آب/فاضلاب نیز بشود .

3.1.2 **نانوذرات  .** نانوذرات  جزء فتوکاتالیست های نوظهور و نوید بخش ترین آنها برای تصفیۀ آب است [154,155] . مکانیسم اساسی فتوکاتالیست های مبتنی بر یک نیمه هادی نظیر  ارزان قیمت ، که فعالیت فوتویی خوبی دارند و سمی نیز نیستند [156] عبارتست از تولید نمودن اکسنده های بسیار واکنش پذیر نظیر رادیکال های OH ، برای گندزدایی میکروارگانیسم ها ، باکتری ، قارچ ، جلبک ، ویروس ها و غیره [157-165] . گزارش شده است که  بعد از 8 ساعت قرار گرفتن در معرض نور شبیه سازی شدۀ خورشید ، قدرت ادامۀ حیات چندین عامل بیماری زای آب آورده نظیر پروتوزوا ، قارچ ، E.coli و pseudomonas aeruginosa را کاهش می دهد [166] . یک مطالعه ، غیرفعال سازی کامل باکتری های کُلی فُرم مدفوعی تحت نور خورشید را گزارش نمود که نشان دهندۀ بازده گندزدایی فتوکاتالیست  است [167] .

قابلیت فتوکاتالیتی محدود شدۀ  ، بدین معنی که فقط می بایست تحت اشعۀ UV انجام شود از طریق تعمیم جذب نوری  به ناحیۀ نور مرئی ، به شدت بهبود یافته است [168-169] . این بهبود ، از طریق دوپه کردن فلزات واسطه [170] و غیرفلزات آنیونی نظیر نیتروژن [171-180] ، سولفور [188-190] یا فلئور [191] در  بدست می آید . اخیراً ، دوپه کردن نقره از  منجر به بهبود غیرفعال سازی باکتریایی شده است حال یا از طریق حذف کامل و یا از طریق کاهش زمان غیرفعالسازی E.coli و بدین وسیله ، گندزدایی تحت طول موج های UV و پرتوهای خورشیدی را افزایش می یابد [192-197] .

همانگونه که گفته شد ، سنتز نانوذرات  که در نور مرئی فعال می شوند علاقۀ قابل توجهی را به خود جلب نموده اند [198] و نانوذرات و نانوکریستالین های  که با نور مرئی-UV تابش داده شده بودند فعالیت آنتی باکتریال قوی را در مقابل E.coli نشان دادند [199-202] . در دو مطالعه نشان داده شده است که سولفور ، آهن و نانوذرات دوپه شده با فلز ، تاثیر آنتی باکتریال قوی در مقابل E.coli دارند [203,204] . بعدها ،  بوسیلۀ نانوذرات اکسید فلزات واسطه بهبود یافت و فتوکاتالیست های نانو ساختار  ، پتانسیل بالایی برای گندزدایی آب نشان دادند . برای مثال ، فتوکاتالیست های نانوذرات  که با یون فلزی بهبود یافته و با نیتروژن دوپه شده بودند ( در یک مطالعه ، پلادیوم (pd) ) ) از طریق اکسیداسیون فتوکاتالیتیک تحت تابش نور مرئی ، بازده افزایش یافته ای را در گندزدایی E.coli ( باکتروم گرم منفی ) ،هاگ های aeruginosa pseudomonas ، bacillus subtilis نشان داده اند [205,206] .

کاتالیست های نانوذرات  که با نیتروژن دوپه شده اند بازده خود را در تخریب آلاینده های میکروبی در آب ، به اثبات رسانده اند [151] . غشاها و فیلم های  نانوساختار ، علاوه بر تجزیۀ آلاینده های ارگانیک تحت تابش UV و نور مرئی ، قابلیت گندزدایی

میکروارگانیسم ها را دارند [207] . بدلیل پایداری در آب ، از آن می توان در ساخت فیلم های باریک یا فیلترهای غشایی برای فیلتراسیون آب استفاده نمود [208,209] . در غیرفعالسازی فتوکاتالیتیکی E.coli ، نانو فیلم ها و نانومیله های  نسبت به نانوذرات تجاری  و فیلم های باریک تجاری به ترتیب فعالیت فتوکاتالیک بالاتری نشان دادند [191,210,211] . بسیاری از محققین ، مکانیسم غیرفعالسازی E.coli وقتی از فیلم های باریک استفاده می شود را بررسی نموده اند [212,213] . در یک مطالعه ، نانو کامپوزیت های  با CNT های چند جداره نسبت به نانوذرات تجاری  ، غیرفعالسازی کامل غشاء درونی نخم باکتری ها ( Bacillus cereus ) را نشان دادند [214] . فیلم های نانوذرات تثبیت شدۀ  ، E.coli K12 را در آب های سطحی و آب مقطر بطور موفقیت آمیزی غیرفعال نمودند [215] . نانوذرات  که در یک ماتریس پلیمری ایزوتاکتیک پلی پروپیلن ترکیب شده بودند در مقابل Enterococcus faecalis و pseudomonas aeruginosa ، فعالیت آفت کشی بالاتری نشان دادند [216] .

این بازبینی مفصل ، کارایی آنتی باکتریال نانوذرات  را نشان داد اما مکانیسم های واقعی که در پس این کارایی قرار گرفته اند به خوبی تعریف نمی شوند به خصوص تحت نور مرئی . به علاوه ، کامپوزیت های نانوذرات  که از دوپه کردن با سایر نانوذرات فلزی بدست می آیند کارایی خود را نشان داده اند اما لازم است کاربردهای نانو فیبرها و فیلم های باریک  بررسی شود تا علاوه بر گندزدایی ، حذف موثر ترکیبات ارگانیک و غیر ارگانیک نیز مشخص گردد .



شکل 2. مثال هایی از انواع مختلف نانو موادها شامل ذرات ، کریستال ها ، لوله ها ، نوارها

3.1.3 **CNT ها و سایرین** . اثبات شده است که CNT ها در حذف عوامل بیماری زای باکتریایی ، بسیار موثر و کارا هستند . CNT ها ( یکی از نانو جاذب ها ) که برای حذف ناخالصی های بیولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته اند بواسطۀ قابلیت های عالی حذف آلاینده های بیولوژیکی از آب ، توجه خاصی رو به خود جلب نموده اند [63] . CNT ها در مقابل دامنۀ وسیعی از میکروارگانیسم ها شامل ویروس ها [223,224] و باکتری ها نظیر E.coli و salmonella [217-222] ، خواص ضد میکروبی دارند . جذب سموم سیانوباکتریایی روی CNT ها در مقایسه با جاذب های مبتنی بر کربن ، بیشتر است که این امر بدلیل مساحت سطح ویژه بزرگ ، قطر خارجی CNT ها ، ترکیب بزرگی از حجم مزو متخلخل و غیره است [225-228] .

محققین اثرات ضد میکروبی CNT ها را به خواص افسانه ای و منحصر به فرد فیزیکی ، سیتو سمّی و سطحی [229] ، شکل فیبری آنها [230,231] ، اندازه و طول لوله ها ، تعداد لایه ها ( یک یا چند جداره بودن ) نسبت می دهند [155,232] . مکانیسم های کُشتن باکتری ها توسط CNT ها همچنین ناشی از ایجاد تنش اکسید کننده ، اختلال در غشاء سلول و غیره نیز هست [233] . اگرچه CNT های تک جداره نسبت به CNTهای چند جداره در مقابل میکروارگانیسم ها ، آسیب رسان تر هستند [234] اما پراکندگی CNT ها نسبت به طول آنها ، پارامتر مهم تری است [235] . بسیاری از محققین علاوه بر قابلیت های جذب سطحی بالا توسط CNT های تک جداره ، آهنگ بسیار بالای جذب سطحی باکتری ها توسط آنها را مشاهده نمودند [236-244] .

غشاهای فیلتراسیونی که دربردارندۀ CNT های مرتب شده بر اساس شعاع هستند در حذف باکتری ها و ویروس ها در زمان بسیار کوتاه بسیار موثر و کارا هستند که این امر بدلیل مستثنی شدن اندازه و فیلتراسیون عمق است [245-247] . این ویژگی ها موجب می شود چنین فیلترهایی بعنوان تجهیزات مقرون به صرفه و عملی گندزدایی آب مورد استفاده قرار بگیرند . CNT ها همچنین می توانند رسوب بیولوژیکی غشاء را کاهش دهند ؛ در یک مطالعه ، یک غشاء نانوکامپوزیتی از CNT های تک جداره و پلی وینیل-N-کربازول به محض تماس مستقیم با باکتری ها ، غیرفعالسازی بالایی از خود نشان داد [248] . یک مثال دیگر از کنترل رسوب بیولوژیک در غشاهای نانوکامپوزیتی فیلم باریک عبارتست از CNT های تک جداره که بصورت کووالانسی با سطح غشاء کامپوزیتی فیلم باریک ، پیوند زده شده اند که خواص آنتی باکتریال متوسطی نشان داد [249] .

از میان سایر نانوموادها برای گندزدایی میکروبی ، اکسید آهن دو عاملی ( ) @  و  @ نانوذرات  بصورت موفقت آمیزی در مقابل باکتری ها شامل E.coli ، Staphylococcus epidermidis و Bacillus subtilis مورد استفاده قرار گرفتند بنابراین این ترکیب هم باکتری های گرم مثبت و هم باکتری های گرم منفی و نیز هاگ ها را پوشش می دهد [252,253] . نانو اکسید تنگستن و پالادیوم بهمراه نانوذرات ZnO ، خواص آنتی باکتریال خوبی در حذف E.coli از آب نشان داده اند [254,255] . اثبات شده است که ZnO و اکسید زیرکونیوم که با نیتروژن دوپه شده اند نیز مواد نانو ساختار آنتی باکتریال خوبی هستند [151,256] .

3.2 **نمک زدایی.** نمک زدایی بعنوان یک گزینۀ مهم برای دستیابی به منبع آب سالم در نظر گرفته می شود . علی رغم گران بودن ، فرآیندهای نمک زدایی مبتنی بر غشاء بیشتر قابلیت نمک زدایی را پوشش می دهد خارج از آن فقط RO ، 41% را پوشش می دهد [257] . پارامترهایی که هزینۀ نمک زدایی را کنترل می کنند عبارتست از حداکثر نمودن جریان آب از میان غشاء برای اینکه جرم گرفتگی به حداقل برسد . پیشرفت های اخیر در تکنولوژی غشاء منجر به بازده انرژی در واحدهای RO شده است [258] . NF نیز برای نمک زدایی آب دریا ، مورد ارزیابی قرار گرفته است [259] .

در توسعۀ غشاهای واکنش پذیر و نانوساختار که برای تصفیه و نمک زدایی آب/فاضلاب موثر تر و ارزان تر باشند نظیر فیلترهای CNT ، نانوموادها بسیار سودمند هستند [260] . نانوموادها فرصت هایی را فراهم می آورند تا هزینۀ نمک زدایی را کنترل نماییم و بازده انرژی آن را افزایش دهیم و در بین این نانوموادها ، CNTها [261,262] ، زئولیت ها [263,264] و گرافِن [265-267] چنین هستند . سنتز کنترل شدۀ طول و قطر CNT ها ، به آن ها این قابلیت را می بخشد تا در غشاهای RO مورد استفاده قرار گیرند تا به جریان های زیاد آب دست یابیم [268-270] .

غشاهای نانوکامپوزیتی فیلم باریک ، که شامل نقره و نانوذرات  بودند پس زنی خوبی از نمک نشان دادند [150,271] . در غشاهای سرامیکی کامپوزیتی  که با نانوذرات اکسید آهن ( ) روکش شده اند نشان داده شده است که قابلیت نفوذپذیری غشاء و پس زنی نمک تحت تاثیر تعداد روکش ها است [272,273] . با استفاده از غشاهای سرامیکی آلومینا که با نانوذرات سیلیکا روکش شده بودند ، پس زنی زیاد سدیم کلرید مشاهده شد [274] . غشاءهای مبتنی بر زئولیت برای RO ، جریان زیاد و خواص عالی از پس زنی یون نشان دادند [275,276] . مطالعات همچنین نشان دادند که غشاءهای گِرافِن برای نمک زدایی آب نسبت به غشاءهای پلیمری RO ، پتانسیل جریان آب بیشتری دارند [277] .

سایر نانوساختارها نظیر کریستال های مایع لیوتراپیک و آکواپرین ها نیز جریان زیاد و انتقال گزینشی آب را از خود نشان داده اند [278-280] . غشاهای نانوکامپوزیتی فیلم باریک زئولیت- پلی آمید ، روش های جدیدی برای طراحی غشاهای NF و RO با نفوذپذیری بیشتر آب و پس زنی زیاد نمک ارائه دادند [275,281] . استفاده از زئولیت ها در غشاءهای نانوکامپوزیتی فیلم باریک منجر به نفوذپری بیشتر و پس زنی بالاتر نمک شده است [282,283] .

از طریق پیوند دادن گروه های عامل نظیر کربوکسیل در سرآغاز CNT ها ، غشاءها پس زنی گزینشی بهتری برای برخی عناصر ارائه می دهند اما این کار منجر به کاهش نفوذ پذیری می شود که این امر ، CNT ها را در نمک زدایی ناتوان می سازد [281,284,285] . آقای هیندز به منظور پس زنی زیاد نمک ، برای CNTها یک قطر منحصر به فرد کمتر از 8 nm. نتیجه گرفت [286] . غشاءهای نانوکامپوزیتی ممکن است بعنوان غشاءهای ایده آل بکار گرفته شوند اما برای داشتن غشاءهای نمک زدایی که از لحاظ اقتصادی ، عملی و از لحاظ تجاری ، قابل قبول باشند فهم اساسی مکانیسم انتقال بهمراه انتخاب اندازۀ مناسب حفره از طریق حفظ متحدالشکلی ، لازم و ضروری است . اثرات تغذیه با آب واقعی دریا بر بازده نانوموادهای مختلف می بایست در قالب عملیات طولانی مدت و حفاظت از عملکرد غشاء مورد بررسی قرار بگیرد .

**3.3 حذف فلزات سنگین و یون ها .** برای حذف فلزات سنگین از آب/فاضلاب ، انواع مختلفی از نانوموادها معرفی شده اند نظیر نانوجاذب ها شامل CNT ها ، زئولیت ها و دندریمرها و آنها خواص جذب سطحی استثنایی دارند [63] . توانایی CNT ها برای جذب سطحی فلزات سنگین توسط بسیاری از محققین بررسی شده است [287] نظیر  [288] ،  [289] ،  [290] و  [291] و شبه فلزاتی نظیر ترکیبات آرسنیک ( As ) [292] . همچنین در تعدادی از مطالعات گزارش شده است که کامپوزیت های CNTs با آهن و اکسید سریُم  یون های فلزات سنگین را حذف می کنند [293-295] . از نانوذرات اکسید سریم که روی CNT ها قرار داده شده بودند بطور موثری برای جذب سطحی آرسنیک استفاده می شود [289] . سینتیک جذب سطحی سریع CNT ها عمدتا بدلیل سایت های جذب سطحی بسیار در دسترس و فاصلۀ کوتاه نفوذ درون ذره ای است [287] .

اثبات شده است که نانومواد مبتنی بر فلز نسبت به کربن فعال شده ، در حذف فلزات سنگین بهتر عمل می کنند [296] برای مثال جذب سطحی آرسنیک با استفاده از نانوذرات  و مگنتیت در سایز نانو [297,298] . استفاده از فتوکاتالیست ها برای کاهش یون های فلزی سمی در آب نظیر نانوذرات  ، به صورت مفصل بررسی شده است [299] . در یک مطالعه کارایی نانوکریستالین  در حذف اشکال مختلف آرسنیک ، به دقت شرح داده شده و نشان داده شده است که این نانوکریستالین با دارا بودن ماکسیمم بازده حذف آرسنیک در PH تقریباً خنثی ، نسبت به نانوذرات  تجاری ، فتوکاتالیست موثرتری است [300] . از یک نانوکامپوزیت از نانوذرات که روی ورقۀ گرافِن قرار داده شده بودند نیز برای کاهش Cr(VI) به Cr(III) در نور خورشید استفاده شد [310] . در یک مطالعۀ دیگر با استفاده از نانوذرات پالادیوم ، تصفیۀ Cr بصورت مشابه انجام شد [302] .

بسیاری از محققین ، قابلیت حذف فلزات سنگینی نظیر آرسنیک با استفاده از نانوذرات اکسید آهن ( ) بعنوان جاذب های مقرون به صرفه را مورد بررسی قرار دادند [303,305] .

محققین همچنین حذف آرسنیک با استفاده از مساحت سطح ویژه زیاد نانوکریستال های  را بررسی نمودند [306] . نانوکامپوزیت  که با پلیمر پیوند زده شده بود بصورت موفقیت آمیزی برای حذف یون های فلزات سنگین دو مرتبه ای مس ، نیکل و کبالت در دامنۀ PH ، 3 تا 7 مورد استفاده قرار گرفت [307] .

همچنین نانوذرات مگنتیت که با بیس فسفونات بهبود داده شده بود برای حذف سموم فلزی رادیواکتیو ، دی اکسید اورانیوم ( ) از آب با بازده بالا مورد استفاده قرار گرفت [308] . مطالعات نشان داده اند که آهن مرتبۀ صفر یا نانوذرات آهن ( یا  ) برای تبدیل یون های فلزی سنگین نظیر ،  ،  ،  ،  ،  بسیار موثر هستند [309-313] . همچنین در یک مطالعه با استفاده از نانوذرات و نانوذرات دو فلزی  ،  به  کاهیده شد [314] .

همچنین از نانوساختار های خودساختۀ گل مانند سه بعدی جدید اکسید آهن استفاده شد تا هم  و هم  بطور موفقیت آمیزی جذب نماید [315] . نانوساختارهای سه بعدی  بعنوان جاذب های خوب برای جذب As و Cr مورد استفاده قرار می گیرند [316] . بازده زئولیت های NaP1 برای حذف فلزات سنگین ( ) از فاضلاب مورد ارزیابی قرار گرفت [317,318] . همچنین از پلیمرهای درخت گونه برای تصفیۀ یون های فلزی سمی استفاده شد [319] . بسیاری از محققین ، کاربرد پذیری تک لایه های خودساخته روی پشتیان های مزومتخلخل برای حذف یون های فلزی سنگین را مورد ارزیابی قرار دادند [320-322] . از بیو پلیمرها برای تصفیۀ فلزات سنگین از پساب ها استفاده شده است [323,324] . همچنین در یک مطالعه ، از نانوذرات چیتوسان برای جذب سطحی  استفاده شد [325] .

NF برای حذف کاتیون ها و آرسنیک از آب های سطحی و زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت [326] و نشان داده شد که NF در حذف اورانیوم () از آب دریا ، بسیار موثر است [327] . غشاءهای نانوفیلتری جدید که از تلفیق نمودن پُلی مثبت ( هیدروکلرید آلیلامین ) و پُلی منفی ( سولفونات اِستیرِن ) در آلومینای متخلخل ساخته شده بود ابقای بالایی از  و  را نشان دادند [85] . وارد نمودن نانوذرات آهن ( hydr ) در مواد کربنی متخلخل این امکان را فراهم آورده است هم مواد ارگانیک و هم مواد غیر ارگانیک را حذف نماییم ، این امر چنین فیلترهایی را قادر می سازد تا بعنوان ادوات عملی مورد استفاده قرار گیرند [328,329] . از یک سیستم دندریمر-UF برای حذف  استفاده شد و حذف کامل این یون از آب ، حاصل شد [330] . در آخر اینکه ، برای حذف موثر آرسنیک ، محصولات تجاری وجود دارند و این مواد شامل نانوذرات و پلیمرهای اکسید آهن و دی اکسید تیتانیوم نانوکریستالین بعنوان واسطه به شکل مهره های کوچک اند [331,332] .

3.4 **حذف آلاینده های ارگانیک.** NOM متشکل از یک گروه متضاد از ترکیبات ارگانیک هایدروفبیک ( اسیدهای هیومیک و فولویک ) و ترکیبات ارگانیک هایدروفیلیک است و در آلودگی آب ، به طور قابل توجهی شرکت دارد [333-339] . گروه متنوعی از جاذب های سطحی مبتنی بر کربن برای حذف NOM از آب خام مورد استفاده قرار گرفته اند و فاکتورهای متعددی بر جذب سطحی NOM تاثیر می گذارد [340-343] .

**3.4.1 CNT ها .** انواع مختلف نانوموادها نظیر نانو جاذب های سطحی نظیر CNT ها ، موادهای پلیمری ( برای مثال دندریمرها ) و زئولیت ها ، خواص جذب سطحی استثنایی دارند و برای حذف مواد ارگانیک از اب/فاضلاب به کاربرده می شوند [63] . CNT ها بدلیل قابلیت های استثنایی که در تصفیه آب دارند ، توجه خاصی را به خود معطوف نموده اند و جذب سطحی مواد ارگانیک روی CNT ها بطور گسترده ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [287] . حذف NOM توسط CNT ها در مقایسه با جاذب های مبتنی بر کربن ، بیشتر است که این امر بدلیل مساحت سطح بزرگ و سایر فاکتورهاست [344,345] . CNT ها همچنین در حذف ترکیبات ارگانیک آروماتیک چند حلقه ای [346-348] و آتریزین [345] موثر و کارا هستند .

فیبرهای متخلخل کربن فعال شده که از طریق الکتروریسی CNT ها ساخته شده بود نسبت به کربن فعال شدۀ دانه ای ، برای بنزن ، تولوئن ، زایلن و اتیل بنزن ثابت های تعادل جذب ارگانیک بالاتری نشان دادند [349] . در یک مطالعه ، جذب سطحی 1و2-دی کلرو بنزن توسط CNT ها ، موثر نشان داده شده است [350] . در مقایسه با کربن فعال شده ، هم CNT های تک جداره و هم CNT های چند جداره برای تِری هالوم اتان ها ، ظرفیت های جذب بالاتری نشان دادند [293,351] . CNT های چند جداره بعنوان جاذب برای کلروفنول ها ، علف کش ها ، DDT ها و غیره مورد استفاده قرار گرفته اند [352-355] . در آخر اینکه ، پلیمرهای جدید با CNT های کارکرد دار شده ، حذف موثر آلاینده های ارگانیک از آب را از خود نشان دادند [295] .

**3.4.2 نانوذرات ** . همچنین از نانوموادهای اکسید فلزی نظیر  به علاوۀ  بعنوان کاتالیست برای فروپاشی سریع و نسبتاً کامل آلاینده های ارگانیک در فرآیندهای اوزوناسیون استفاده می شود [356,357] . از فتوکاتالیست هایی نظیر نانوذرات  بطور موثری برای تصفیۀ آب آلوده شده با آلاینده های ارگانیک نظیر بیوفنیل پلی کلر دار ( PCBs ) ، بنزن ها ، آلکان های کلردار، استفاده شده است [299] . در یک مطالعه ، با افزودن نانوذرات  ، حذف تمامی کربن ارگانیک از فاضلاب افزایش یافت [358] . همچنین از نانوذرات  در یک راکتور " falling film " برای تخریب میکروسیستین ها در آب استفاده شد [159] . اثبات شده است که CNT های چند جداره که با نانوذرات Fe ، کارکرد دار شده اند برای ترکیبات آروماتیک نظیر بنزن و تولوئن ، جاذب های سطحی موثری هستند [359] .

از طریق دوپه کردن فلزات نجیب در درون  می توان تجزیۀ ترکیبات ارگانیک را افزایش داد که این امر بدلیل افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل و غیره است [360-362] . برای مثال ، دوپه کردن سیلیسیم به درون نانوذرات  برای بهبود بازده این نانوذرات ، موثر است که این امر دلیل افزایش مساحت سطح و بلورینگی است [363,364] . نانوکریستال های  که با ترسیب های فلزات نجیب و غیره ، بهبود یافته بودند برای تخریب بلو متیلن در دامنۀ نور مرئی مورد استفاده قرار گرفتند [198,365,366] . نانوذرات  که با نیتروژن و آهن (III ) دوپه شدهبود نسبت به نانوذرات  تجاری موجود ، به ترتیب در تخریب رنگینه های آزو و فنول بهتر عمل کردند [367,368] . در یک مطالعه ، نانوذرات  که روی  متخلخل ، رسوب داده شده بود بطور موثری برای حذف TOC مورد استفاده قرار گرفت [369] . همچنین از نانو کامپوزیت های  با سیلیکای مزو متخلخل برای تصفیۀ آلاینده های آروماتیک [370-373] . در یک مطالعه ، یک کامپوزیت از  برای تخریب 4-نیتروفنول مورد استفاده قرار گرفت [374] . نانو لوله های  نسبت به مواد توده ساختار برای تخریب موثر تولوئن ، بهتر عمل نمودند [375] و مشخص شد که این نانو لوله ها در مقایسه با نانوذرات  ، برای تخریب ترکیبات آلی ، موثرتر و کارامدتر هستند [376] . یک محصول تجاری ( Purifics Photo-Cat System ) در حذف مواد ارگانیک ، بسیار موثر نشان داده شده است [377-379] .

3.4.3 **آهن مرتبۀ صفر .** نانوکاتالیست ها شامل فلزات نیمه هادی ، فلزات مرتبۀ صفر و نانوذرات دو فلزی بدلیل مساحت سطح زیاد و خواص وابسته به شکل ، برای تخریب آلاینده های ممحیطی نظیر PCB ها ، آفت کش ها و رنگینه های آزو مورد استفاده قرار گرفته اند [380] . همچنین اثابت شده است که نانوجاذب های مغناطیسی در حذف آلاینده های ارگانیک ، موثر هستند 381] [ . نانوموادهای اکسید آهن در مقایسه با مواد توده ای ، قابلیت های بهتری در حذف آلاینده های ارگانیک ، نشان داده اند [303,382,383] . همچنین از نانوذرات  برای اسیدهای هیومیک رنگی فاضلاب استفاده شده است [384] . ترکیبات ارگانیک کلر دار ، PCB ها و نیز یون های غیر ارگانیک نظیر نیترات و پرکلرات [388,389] با استفاده از  ، بطور موفقیت آمیزی تبدیل شدند [385,387] .

در تعدادی از مطالعات صورت گرفته در زمینۀ تصفیه ، اثبات شده است که ذرات  ، در تخریب ترکیبات ارگانیک کلردار سمی نظیر 2,2’ –دی کلرو بی فنیل ، موثر هستند [390,391] . ذرات تثبیت شدۀ  ، می توانند یک روش موثر برای تصفیۀ سیتو آب های زیرزمینی و فاضلاب های صنعتی باشند . [392] .  و  دو فلزی ، بعنوان واسطه های موثر کاهنده برای کاهش گونۀ متنوعی از آلاینده های ارگانیک نظیر PCB ها ، آفت کش ها ، رنگینه های ارگانیک ، آلکان های کلردار ، آلکن ها و آنیون های غیر ارگانیک ( مانند نیترات ها ) در آب/فاضلاب ، ظاهر شده اند که این امر بدلیل مساحت سطح زیادتر و واکنش پذیری بالاتر آنهاست [393,394] . بر طبق گزارش بسیاری از محققین ، نانوذرات دو فلزی  و  نسبت به Fe میکرو مقیاس تجاری ، برای هالوژن زدایی کاهندۀ ترکیبات ارگانیک کلردار، متان های بُرم دار ، و نیز برای کلر زدایی هیدرو ترکیبات آلیفاتیک کلردار ، آروماتیک های کلردار و PCB ها ، موثرتر است [395,402] .

**3.4.4 سایر نانوموادها .** در یک مطالعه ، فیلم های نیمه هادی ZnO نانوساختار شده برای تخریب آلاینده های ارگانیک (4-کلرو کَتِکول ) مورد استفاده قرار گرفت [403] . از نانوکاتالیست های Ag و فیبرهای آمیدوکسیم بطور موثری برای تخریب رنگینه های ارگانیک ، استفاده شد [404] . در یک مطالعه ، یک نانوکامپوزیت دو فلزی از  برای کاهش نیترات بکار برده شد [405] . با استفاده از هیدروژن و نانوذرات مبتنی بر Pd ، رَد های ترکیبات ارگانیک هالوژن دار ، تخریب زیستی شدند [301,406] . نانوذرات Pd و نانوذرات دو فلزی Pd/Au بطور موثری برای کلر زدایی هیدرو مادۀ تری کلرو اتیلن [TCE] مورد استفاده قرار گرفتند [407,408] . در یک مطالعه با استفاده از فیلم های نانوذرات اکسید منگنز ( ) و پر اکسید هیدروژن ، معدنی نمودن رنگینه های ارگانیک سرعت یافت [409] . به همین نحو ، نانو ساختارهای میان تهی سلسله مراتبی  برای حذف آلاینده های ارگانیک از پساب ها مورد استفاده قرار گرفت [410] . همچنین از نانوذرات تثبیت شدۀ فلز-پورفیروجِن ها بطور موفقیت آمیزی برای هالوژن زدایی کاهنده ترکیبات ارگانیک کلردار ( TCE و تترا کلرید کربن ) استفاده شد [411] . بسیاری از محققین ، کاربرد پذیری تک لایه های خود ساخته بر روی پشتیبان های مزو متخلخل برای حذف آنیون ها و رادیو نوکلئیدها را مورد ارزیابی قرار دادند [412,413] . از نانو کره هایی که بصورت ملکولی نشان دار شده اند برای حذف میکرو آلاینده ها از پساب های بیمارستانی استفاده شد [414] . در پایان اینکه همانگونه که در یک مطالعه بیان شده بود ، از نانوذرات تک آنزیمی می توان برای آلودگی زدایی دامنۀ وسیعی از آلاینده های ارگانیک استفاده نمود .

**3.4.5 غشاء ها .** اثبات شده است که تثبیت نانوذرات فلزی بر روی غشاء برای تخریب و کلرزدایی آلاینده های سمی موثر است [416] . از غشاءهای غیر ارگانیک که دربردارندۀ نانو یا نانو  بهبود یافته بودند بطور موثری برای تخریب کاهنده الاینده ها بویژه ترکیبات کلردار استفاده شده است [417,418] .اثبات شده است که استفاده از  تثبیت شده بر روی یک پشتیبان پلی اتیلن و یک شلاب  در ترکیب با غشاءهای پلیمری در تخریب به ترتیب 1و2-دی کلرو بنزن و ترکیبات دارویی بسیار موثر هستند [419,420] .

غشاهای کامپوزیتی پلی اتر سولفون با نانو  بعنوان ماده افزودنی ، جریان های بیشتر و خواص ضد رسوب افزایش یافته ای را نشان دادند [421-423] . غشاء سرامیکی کامپوزیتی که از نانوذرات  درون یک زیر لایۀ لوله ای شکل  ساخته شده بود در مقایسۀ با غشاءهای  ، در جریان و کیفیت آب ، بهبود نشان داد [424] . از طریق دوپه کردن نانوذرات در غشاء  ، امکان کنترل رسوب غشا از طریق کاهش جذب قطرات روغن به سطح غشاء در تصفیۀ فاضلاب های روغنی ، فراهم آمد [425] . کامپوزیت نانوساختار شدۀ  و  بهمراه غشاءهای آلترا فیلتراسیون ، بطور موفقیت آمیزی میزان رسوب را کاهش داد و جریان نفوذ را بهبود بخشید [369] .

غشاء استات سلولز که با  بار گیری شده بود در کلرزدایی TCE ، موثر تشخیص داده شد [426] . یک غشاء واکنش پذیر محتوی  دو فلزی و  در کاهش tce بسیار موثر شناخته شد [427] . نانوذرات دو فلزی Fe/Ni و Fe/Pd بهمراه  بعنوان غشاء های کامپوزیتی متخلخل غیر ارگانیک-پلیمر بطور موفقیت آمیزی برای تخریب کاهنده حلال های ارگانیک هالوژن دار مورد استفاده قرار گرفتند [428-430] . در یک مطالعه ، از فیلم فلورید پلی وینیلیدن که محتوی Pd و Pd/Fe بود بطور موثری برای کلر زدایی PCB ها استفاده شد [431] که منجر به توسعۀ راکتور غشایی برای کلر زدایی دامنۀ وسعی از ترکیبات شد [391,432] . مشاهده شد که غشاء سرامیکی آلومینا-زیرکونیا-تیتانیا که با نانو ذرات  روکش شده بود نسبت به غشاء روکش نشده ، کربن ارگانیک حل شده را بهتر کاهش می داد که این امر تخریب NOM را افزایش می داد [273,433] . در پایان اینکه ، غشاءهای سرامیکی کامپوزیتی متشکل از  و CNTها منجر به افزایش نفوذ پذیری غشاء و فعالیت فتوکاتالیتی گردید [434-436] .

NF برای حذف NOM و نیترات ها از آب های سطحی/زیرزمینی مورد بررسی قرار می گیرد [326] و گزارش شده است که NF با کاهش ذاتی آلاینده های ارگانیک ، کیفیت آب را بهبود می بخشد [437] . به منظور توسعۀ روش های موثر تر تصفیۀ آب ، غشاء های نانوساختار شده ، واکنش پذیر و مقرون به صرفه با استفاده از نانو موادهای مختلف روکش می شوند و در یک مطالعه ، یک غشاء از نانوذرات  به تنهایی و دوپه شده با Fe ، Mn و La در مقابل سه نوع مختلف رنگینه های مصنوعی ، گزینش پذیری نشان دادند [84] . مشاهده شد همچنینغشاء هایی که محتوی سیلیکا بودند عملکرد ضد رسوب آنها بهبود یافت و جریان افزایش یافت [438] .

در زمینۀ بهبود فرآیندهای UF برای تصفیۀ آب هایی که محتوی حل شونده های ارگانیک و غیر ارگانیک هستند ، پلیمرهای درخت گونه بعنوان لیگاندهای انحلال پذیر در آب برای رادیو نوکلئیدها و آنیون های غیر ارگانیک مورد استفاده قرار می گیرند [439-440] . وقتی از یک غشاء کامپوزیتی متشکل از آلومینا و پلیمرها استفاده شد از طریق جذب لایه به لایۀ پلی الکترولیت ها و نانودرات تثبیت شدۀ طلا-سیترات ، کاهش تقریبا کامل 4-نیترو فنول مشاهده شد [89] . در آخر اینکه ، افزودن نانوذرات اکسید فلزی شامل سیلیکا ،  ، آلومینا و زئولیت ها به غشاء های پلیمری آلترا فیلتراسیون به کاهش رسوب کمک نموده است [441-445] .

**4.نتیجه گیری و چشم اندازها**

بدلیل جمعیت رو به رشد ، خشکسالی های طولانی مدت ، تغییرات آب و هوا و غیره ، آب سالم را به یک منبع رقابتی در بساری از نقاط جهان تبدیل نموده است . نانو موادها دارای خواص منحصر به فردی نظیر مساحت سطح زیاد ، اندازه ، شکل و ابعاد هستند که این موضوع آنها را برای کاربردهای تصفیۀ آب/فاضلاب نظیر گندزدایی ، جذب سطحی و جداسازی های غشایی بطور خاصی جذاب می سازد . بررسی مقالات مربوطه نشان داده است که تصفیۀ آب/فاضلاب با استفاده از نانوموادها ، یک حوزۀ نوید بخش برای تحقیقات فعلی و آتی است .

اصلاح سطح نانوذرات مختلف نظیر  ،  نانو مقیاس از طریق جفت نمودن آنها با یک فلز کاتالیتیک ثانویه می تواند منجر به افزایش کیفیت آب/فاضلاب گردد . این افزایش کیفیت از طریق افزایش گزینش پذیری و و واکنش پذیری مواد مواد انتخاب شده اتفاق می افتد . اصلاح سطح ممکن است منجر افزایش فعالیت فتوکاتالیتیکی ترکیبات انتخاب شده شود زیرا طول عمر گونه های اکسیژن واکنش پذیر کوتاه است . اصلاح سطح همچنین ممکن است جاذبۀ نانوموادهای اصلاح شده را به بسیاری از آلاینده های نوظهور آب افزایش دهد . همچنین اثبات شده است که نانوذرات دو فلزی برای تصفیۀ آلاینده های آب ، موثر هستند . در هر حال ، برای درک مکانیسم تخریب آلاینده ها توسط نانوذرات دو فلزی که مسئول بهبود بازده هستند می بایست مطالعات بیشتری صورت بگیرد . در هر حال برای کاربردهای میدانی واقعی ، به منظور کاربرد موفق نانو کامپوزیت های نو در تصفیۀ آب/فاضلاب درک بهبود یافته از مکانیسم فرآیند ، بسیار مهم است .

الکتروریسی ، راهی را در اختیار ما قرار تا خواص سطحی نانوموادها و فیلترهای نانوفیبری مختلف که بصورت موفقیت آمیزی بعنوان غشاءهای فیلتراسیونی ضد رسوب مورد استفاده قرار گرفته اند را بهبود ببخشیم . ویژگی نانوموادها عبارتست از :نسبت سطح به حجم بسیار زیاد و تخلخل بالایی دارند ، در مقابل عوامل بیماری زای آب آورده بسیار فعال هستند ، کمتر سمی هستند و و کمترین خطر را برای سلامتی دارند ، راه حل هایی ارائه می دهند تا آب سالم تضمین شود . دوپه کردن نانو موادهای تک منظوره برای ساخت واسطه /فیلترهای غشایی چند منظوره بسیار آسان است ؛ واسطه /فیلترهای غشایی چند منظوره واکنش پذیری و گزینش پذیری افزایش یافته ای برای آلاینده های مختلف دارند . اگرچه این نانو فیبرهای الکتروریسی شده از طریق یک روش ساده و مقرون به صرفه ساخته می شوند اما ساخت آنها در مقیاس صنعتی ، هنوز یک چالش است و ضروری است که این موضوع را از جنبۀ مهندسی در نظر بگیریم . استفاده از غشاءهای کامپوزیتی نانو فیبری برای تصفیۀ آب/فاضلاب ، بسیار محدود است و یک سیستم خودکفا ( شکل 3 ) برای حذف تمامی انواع آلاینده ها شامل باکتری ها/ویروس ها ، فلزات سنگین ، یون ها و ترکیبات ارگانیک پیچیده ، پیشنهاد می گردد . استفاده از غشاءهای کامپوزیتی نانو ساختار و نانوفیبرها می توانند به تخریب دامنۀ وسیعی آلاینده های ارگانیک و غیر ارگانیک در کاربردهای میدانی واقعی کمک می نمایند . درک بهتر ساخت غشاء های نانو کامپوزیتی قطعا گامی خواهد بود به سوی بهبود ساخت غشاءهای نانو کامپوزیتی چند منظوره . الگوی نانوذرات در شکم غشاء میزبان ، تغییرات در ساختارها ، خواص نانوموادها و بسترهای میزبان می تواند جزء اولویت کاربردهای میدان واقعی غشاءهای نانو فیبری برای تصفیۀ آب/فاضلاب باشد .



شکل 3 . طرح کلی فیلترهای کامپوزیتی نانو فیبری غشایی/واسطه ای پیشنهاد شده برای حذف کامل آلاینده ها از آب/فاضلاب