مطالعه مروری بر راهکارها و روش های متعارف و نوین فیزیکی ، شیمیایی و بیولوژیکی حذف میکروپلاستیکها از پساب

ماجد مقدم [*۱]، حسین آلبوغبیش [۲] , نجمه زاهدی [۳]

۱- ایران- تهران- دانشگاه جامع علمی کاربردی- مرکز علمی کاربردی شرکت ره آوران فنون

پتروشیمی majedmoghadam2@gmail.com

۲- ایران- تهران- دانشگاه جامع علمی کاربردی- مرکز علمی کاربردی شرکت ره آوران فنون

پتروشیمی HosseinGhobeyshavi3@gmail.com

۳- ایران- تهران- دانشگاه جامع علمی کاربردی- مرکز علمی کاربردی شرکت ره آوران فنون

پتروشیمی N_zahedi61@yahoo.com

خلاصه

میکروپلاستیک‌ها به عنوان آلاینده‌های نوظهور و با دوام، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان محسوب می‌شوند و ورود آنها عمدتاً از طریق فاضلاب‌های شهری و صنعتی اتفاق می‌افتد. این مقاله مروری، به ارزیابی جامع و تحلیل انتقادی روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مورد استفاده برای حذف میکروپلاستیک‌ها از پساب می‌پردازد. روش‌های متعارف تصفیه مانند ته نشینی، شناورسازی اگرچه در حذف بخشی از ذرات درشت‌تر مؤثرند، اما در حذف ذرات ریز و الیاف میکروپلاستیک کارایی محدودی دارند. در مقابل، فناوری‌های پیشرفته‌تر از جمله فیلتراسیون غشایی مانند اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون، فرآیندهای پیشرفته اکسیداسیون مانند فوتوکاتالیست، روش‌های جذبی با استفاده از جاذب‌های نوین مانند هیدروژل‌ها و روش‌های زیست‌محور با استفاده از باکتری‌ها، قارچ‌ها یا آنزیم‌ها دورنمایی امیدوارکننده‌تر را نشان داده‌اند و قابلیت حذف بالاتری را ارائه می‌دهند. این مرور، بر مقایسه سازوکارها، کارایی و محدودیت‌های هر روش و چالش‌های کلیدی آنها می پردازد. در نهایت، مقاله بر این نکته تأکید می‌کند که هیچ راه‌حل واحدی به تنهایی کافی نیست و یک رویکرد ترکیبی و چندمرحله‌ای، همراه با بهبود طراحی تصفیه‌خانه‌های مرکزی و توسعه فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه و پایدار، کلید کاهش مؤثر بار آلودگی میکروپلاستیکی ورودی به محیط‌های آبی است.

کلمات کلیدی: میکروپلاستیک، تصفیه پساب، فناوری‌های حذف، فیلتراسیون غشایی، انعقاد الکتریکی، جذب سطحی، روش‌های زیستی، رویکرد ترکیبی

۱. مقدمه

رشد فزاینده تولید و مصرف میکروپلاستیک ها در دهه های اخیر با وجود مزایای صنعتی و اقتصادی آن میراث نگران کننده ای از آلودگی پایدار در سراسر کره زمین برجای گذاشته است. از میان اشکال مختلف این آلودگی، میکروپلاستیک‌ها (ذرات پلاستیکی کوچکتر از ۵ میلی‌متر) به دلیل ابعاد میکروسکوپی، پایداری شیمیایی و پتانسیل بالای جذب و انتقال

آلاینده‌های سمی، به یک چالش زیست‌محیطی جهانی و همه‌گیر تبدیل شده‌اند. این ذرات که از طریق منابع اولیه (مانند میکروبیدهای محصولات آرایشی) و ثانویه (ناشی از تخریب تدریجی پلاستیک‌های بزرگ‌تر) وارد محیط می‌شوند، مسیر غالب خود به سوی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس ها را از سیستم های جمع آوری و تصفیه پساب پیدا می کنند. پلاستیک هایی با وزن وزن مولکولی بالا قابلیت تجزیه زیستی را ندارند زیرا میکروارگانیسم هایی که قادر به تجزیه متابولیکی این مواد باشند در طبیعت نادر هستند. تجزیه کامل آنها در طبیعت نیز ممکن است قرن ها به طول انجامد. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی، که به عنوان خط مقدم دفاع در برابر آلاینده‌ها طراحی شده‌اند، در مواجهه با این آلاینده نوظهور با کاستی‌های جدی مواجه هستند. روش‌های متعارف تصفیه، که عمدتاً بر حذف مواد آلی، جامدات معلق و مواد مغذی متمرکزند، اغلب فاقد کارایی لازم برای جداسازی کامل طیف وسیع و متنوع میکروپلاستیک‌ها از نظر اندازه، شکل، چگالی و ترکیب شیمیایی می‌باشند. در نتیجه، حجم قابل توجهی از این ذرات از سد تصفیه عبور کرده و به عنوان یک جریان ناپیدا، به محیط‌های آبی پذیرنده تخلیه می‌شوند و در نهایت وارد زنجیره غذایی شده و اثرات سمی و تجمعی آن‌ها بر سلامت اکوسیستم و انسان به موضوعی جدی برای پژوهش تبدیل شده است. با توجه به این تهدید فزاینده، توسعه و بهینه‌سازی راهکارهای مؤثر برای حذف و معدنی‌سازی میکروپلاستیک‌ها از جریان پساب به یک اولویت پژوهشی و فناورانه تبدیل شده است. رویکردهای متنوعی از جداسازی فیزیکی (مانند فیلتراسیون و ته نشینی) گرفته تا فرآیندهای شیمیایی پیشرفته (مانند اکسیداسیون و انعقاد) و حتی روش‌های بیولوژیکی امیدبخش (با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها) در حال بررسی و توسعه هستند. با این حال، هر یک از این فناوری‌ها با مزایا، محدودیت‌ها، چالش‌های اقتصادی و ملاحظات فنی خاص خود روبرو هستند. فقدان یک جمع‌بندی نظام‌مند و مقایسه‌ای از این روش‌ها، شکاف مهمی در مسیر طراحی سیستم‌های تصفیه مؤثر و انتخاب راهکارهای بهینه ایجاد کرده است.

هدف از نگارش این مقاله مروری، ارائه یک تحلیل جامع و نقادانه از آخرین پیشرفت‌های حاصل‌شده در حوزه فناوری‌های حذف میکروپلاستیک‌ها از پساب است.

۲. توزیع و تعامل میکروپلاستیک ها در محیط زیست

آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها به عنوان یک چالش زیست‌محیطی فراگیر و رو به گسترش شناخته می‌شود که منشأ اصلی آن فعالیت‌های انسانی در خشکی است. با رسیدن تولید سالانه پلاستیک در جهان به بیش از ۳۲۰ میلیون تن که سهم بسته‌بندی‌های یک‌بارمصرف از این مقدار بیش از ٪۴۰ است ، حجم عظیمی از زباله‌های پلاستیکی وارد محیط زیست می‌شود. برآوردها نشان می‌دهد سالانه بیش از ۱۲،۷ میلیون تن ذره میکروپلاستیک راهی اقیانوس‌ها می‌شود و اثرات مخربی بر حیات وحش و اکوسیستم‌های دریایی بر جای می‌گذارد. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که در صورت تداوم روند کنونی، ورود سالانه میکروپلاستیک‌ها به دریاها طی دو دهه آینده سه برابر شده و به طور میانگین ۵۰ کیلوگرم زباله پلاستیکی به ازای هر متر از خطوط ساحلی افزوده خواهد شد. این ذرات نه تنها در محیط‌های آبی، که در خاک نیز به وفور یافت می‌شوند و بر حاصلخیزی و عملکرد بیولوژیکی آن تأثیر منفی می‌گذارند. میکروپلاستیک‌ها در اشکال مختلفی از قبیل قطعات، فیلم‌ها، رشته‌ها و الیاف در نمونه‌های آب و رسوبات شناسایی شده‌اند. بخش قابل توجهی از این ذرات پیش از ورود به آب‌های پذیرنده، از مسیر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب عبور می‌کنند. ذرات ریزتر از ۱ میلی‌متر (میکروپلاستیک‌های بسیار ریز) اگرچه با چشم غیرمسلح قابل رؤیت نیستند، اما دارای تأثیرات زیستی قابل توجهی بر موجودات زنده هستند الگوی توزیع میکروپلاستیک‌ها به نوع پلیمر و درجه تخریب‌پذیری آن بستگی دارد. به عنوان نمونه، مطالعات انجام‌شده بر روی رسوبات ناشی از سیلاب‌های سال ۲۰۱۵ در شهر چنای هند، وجود مقادیر قابل توجهی از میکروپلاستیک‌ها را با

استفاده از تکنیک‌های شناسایی پیشرفته‌ای مانند طیف‌سنجی FTIR-ATR و میکروسکوپ‌های استریو نشان داد. در این نمونه‌ها، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن به عنوان پلیمرهای غالب شناسایی شدند. وقوع سیلاب‌ها موجب انتقال حجم عظیمی از گرانول‌های پلاستیکی از عرصه‌های خشکی به منابع آبی شد و میزان تجمع این ذرات را تا سه برابر نسبت به شرایط پیش از سیلاب افزایش داد. این یافته‌ها بر لزوم توجه جدی به مدیریت یکپارچه منابع آب و خاک و اتخاذ راهکارهای بلندمدت برای جلوگیری از ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط زیست تأکید دارد. [۱]

بر اساس شواهد علمی، میزان آزادشدن پلاستیک در خاک سالانه حدود ۴ تا ۲۳ برابر بیشتر از مقداری است که وارد محیط‌های دریایی می‌شود. ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک از مسیرهای متنوعی صورت می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به کاربرد کمپوست و لجن فاضلاب (به عنوان کود)، آبیاری با آب‌های بازیافتی، رواناب سطحی، پراکنش زباله و استفاده از پوشش‌های پلاستیکی (مالچ) در کشاورزی اشاره کرد. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، از جمله کشورهای آمریکای لاتین، استفاده از لجن فاضلاب و کمپوست به عنوان کود، یکی از منابع اصلی آلودگی خاک به میکروپلاستیک محسوب می‌شود.[۲].

میکروپلاستیک‌ها پس از ورود به اکوسیستم‌های آبی (شور و شیرین)، وارد تعامل پیچیده‌ای با موجودات زنده می‌شوند و از این طریق به شبکه‌های غذایی در سطوح تغذیه‌ای مختلف (از جمله گونه‌های سطحی، شناور و کف‌زی) نفوذ می‌کنند. فرآیند بلعیده شدن این ذرات توسط آبزیان به عوامل متعددی مانند نوع تغذیه، اندازه و دسترسی به طعمه‌های واقعی، رقابت، وضعیت فیزیولوژیکی جاندار و شرایط محیطی مانند دما وابسته است. هنگامی که میکروپلاستیک‌ها از طریق منابعی مانند رواناب کشاورزی، پساب صنعتی یا دفع غیراصولی پسماند وارد محیط‌های آبی می‌شوند، به سرعت با سایر مواد آلی و معدنی معلق در آب برهمکنش داده و سطح آن‌ها دچار دگرگونی می‌شود. تشکیل لایه زیستی بر روی سطح ذرات توسط میکروارگانیسم‌ها و همچنین رنگ ذرات می‌تواند به اشتباه، آن‌ها را برای برخی آبزیان به عنوان منبع غذایی جذاب جلوه دهد.

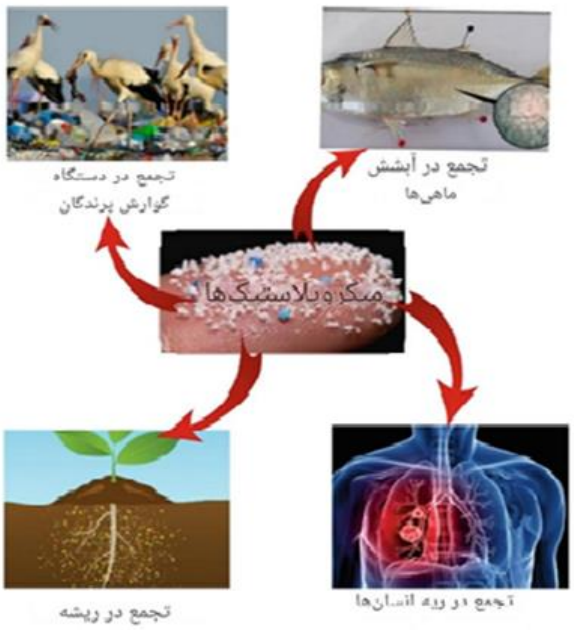
این ذرات بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مانند چگالی، در لایه‌های مختلف آب توزیع می‌شوند؛ ذرات سبک‌تر در سطح باقی می‌مانند، در حالی که انواع بزرگ‌تر و سنگین‌تر ممکن است به اعماق ستون آب یا بستر رسوبات نفوذ کنند. در نتیجه، هر سطح از زنجیره غذایی که آلوده شود، می‌تواند منبع انتقال میکروپلاستیک‌ها به سطوح تغذیه‌ای بالاتر از جمله شکارچیان و در نهایت انسان شود. شواهد متعددی از حضور میکروپلاستیک‌ها در مواد غذایی به ویژه محصولات دریایی، نمک دریایی و حتی آب آشامیدنی گزارش شده است. همچنین، این ذرات در دستگاه گوارش طیف وسیعی از آبزیان و نیز در نمونه‌های انسانی شناسایی شده‌اند. ورود این ذرات به بافت‌های زنده، پاسخ سیستم ایمنی را به عنوان یک جسم خارجی فعال می‌کند. خطر دیگر، نقش میکروپلاستیک‌ها به عنوان حامل برای سایر آلاینده‌های محیطی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، فلزات سنگین و افزودنی‌های شیمیایی خود پلاستیک مانند بیس فنول A و فتالات‌ها است که می‌توانند در بدن موجودات زهش شوند و اثرات سینرژیستیک و زیان‌باری ایجاد نمایند. این یافته‌ها بر ضرورت درک کامل سرنوشت و انتقال میکروپلاستیک‌ها در محیط و زنجیره غذایی و نیز اتخاذ راهکارهای فنی مؤثر برای حذف آن‌ها از منابع ورودی مانند پساب تأکید دارد.[۳]

۳. پیامدهای اکولوژیک و زیستی میکروپلاستیک ها

میکروپلاستیک‌ها با نفوذ به تمامی اجزای محیط زیست، وارد زنجیره‌های غذایی شده و در مکان‌های غیرمنتظره تجمع می‌یابند. ورود این ذرات به محیط‌های خاکی، موجب تغییر ویژگی‌های فیزیکی مانند ساختار و تخلخل، کاهش حاصلخیزی، اختلال در جامعه میکروبی و تداخل در چرخه طبیعی مواد مغذی می‌شود. این آلودگی که گاهی با عنوان

آلودگی سفید شناخته می‌شود، می‌تواند از طریق موجودات خاک‌زی مانند کرم‌های خاکی که این ذرات را می‌بلعند، هم در زنجیره غذایی منتقل شود و هم با حرکت این جانداران به اعماق خاک، راهی برای نفوذ میکروپلاستیک‌ها به سیستم‌های آب زیرزمینی ایجاد کند. در گیاهان، تجمع میکروپلاستیک‌ها می‌تواند سبب تأخیر در جوانه‌زنی بذر و اختلال در رشد رویشی و زایشی شود.

در اکوسیستم‌های آبی، میکروپلاستیک‌ها با تأثیر بر پارامترهایی مانند نرخ جریان، مواد آلی محلول و قدرت یونی، تعادل طبیعی محیط را بر هم می‌زنند. این ذرات پس از بلعیده شدن توسط آبزیان، در اندام‌هایی مانند آبشش‌ها، روده و کبد تجمع یافته و با ایجاد پاسخ‌های التهابی، انسداد دستگاه گوارش و اختلال در متابولیسم مواد زنوبیوتیک، سلامت آن‌ها را تهدید می‌کنند. مطالعات آسیب‌شناسی، حضور ذراتی مانند پلی‌استایرن را در بافت‌های ماهی زبرا تأیید کرده‌اند. افزایش چشمگیر حجم میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های دریایی ناشی از تخریب منابع گوناگونی همچون پوشش‌های بسته‌بندی، کیسه‌های پلی‌اتیلنی و ظروف پلاستیکی است که علیرغم قوانین بازدارنده، کماکان ادامه دارد. شکل ۱



شکل ۱ – تاثیر میکروپلاستیک ها بر پرندگان، حیوانات، گیاهان و انسان ها

پیامد نگران کننده تر ، پدیده زیست تراکم و زیست‌افزایش است. ذرات میکروپلاستیک که توسط موجودات رده پایین زنجیره غذایی بلعیده می‌شوند، در بدن شکارچیان سطوح بالاتر تجمع می‌یابند و غلظت آن‌ها در هر مرحله افزایش می‌یابد. این زنجیره در نهایت به انسان ختم می‌شود. پرندگان ساحلی که جذب ذرات رنگی می‌شوند، با بلعیدن این ذرات دچار آسیب‌های شدید گوارشی و مرگ می‌شوند. برای انسان، مواجهه از طریق منابع مستقیمی مانند آب آشامیدنی بسته‌بندی‌شده در بطری‌های پلاستیکی که خود منشأ نشر میکروپلاستیک هستند، یا مصرف محصولات دریایی آلوده رخ می‌دهد. مطالعات، وجود این ذرات را در دستگاه گوارش انسان تأیید کرده‌اند. نگرانی ویژه، مواجهه جمعیت‌های آسیب‌پذیر مانند نوزادان است. تحقیقات نشان می‌دهد که بطری‌های شیر پلی‌پروپیلنی می‌توانند در شرایط معمول استفاده مانند تماس با دمای بالامیلیون‌ها ذره میکروپلاستیک را آزاد کنند، که نیاز فوری به ارزیابی دقیق خطرات بهداشتی این مواجهه را پررنگ می‌سازد. علاوه بر اثرات فیزیکی، میکروپلاستیک‌ها به عنوان حامل برای سایر آلاینده‌های محیطی (مانند

آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار) عمل کرده و می‌توانند باعث اختلال در سیستم غدد درون‌ریز شوند. این پیامدهای چندگانه و گسترده، کنترل و حذف میکروپلاستیک‌ها در منبع اصلی ورود آن‌ها به محیط، یعنی جریان‌های پساب، را به یک ضرورت غیرقابل اجتناب برای حفظ سلامت اکوسیستم و انسان تبدیل کرده است.[۵][۴]

۴. تکنیک‌های استخراج و جداسازی میکروپلاستیک‌ها از ماتریس‌های محیطی

روش‌هایی که بتوانند به‌صورت پایدار و اقتصادی در مقیاس صنعتی ذرات و الیاف ریزپلاستیک را از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب حذف کنند، هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته‌اند. مستند شده است که حذف ریزپلاستیک‌ها از لجن می‌تواند به کاهش تخلیه آن‌ها به محیط‌های آبی کمک کند، اما این فرآیند موجب نابودی ذرات ریزپلاستیک نمی‌شود. در نتیجه، این ذرات همچنان امکان بازگشت به محیط‌های خاکی را خواهند داشت؛ به‌ویژه زمانی که لجن به‌عنوان بیوسالید یا کود مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت از طریق فرسایش دوباره وارد محیط‌های آبی شود.

بنابراین، تمرکز تحقیقات آینده باید بر امکان حذف یا تجزیه ریزپلاستیک‌ها در حین پردازش لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب باشد تا از رهاسازی مجدد آن‌ها به محیط جلوگیری شود. با این حال، این موضوع به ظرفیت و طراحی تصفیه‌خانه‌ها وابسته است، زیرا مطالعات نشان داده‌اند که برخی از انواع فرآیندهای تصفیه کارایی متفاوتی در حذف ریزپلاستیک‌ها با اشکال مختلف دارند.برخی از فناوری‌هایی که اثربخشی بالایی در حذف ریزپلاستیک‌ها ازپساب نشان داده‌اند، در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرند. با وجود این، باید توجه داشت که برخی از این فناوری‌ها هزینه‌بر بوده و نصب آن‌ها در تأسیسات موجود دشوار است.

۱.۴. روش های فیزیکی

۱.۱.۴. روش جداسازی مبتنی بر چگالی (شناورسازی)

روش شناورسازی یکی از متداول‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین تکنیک‌ها برای استخراج میکروپلاستیک‌ها از ماتریس‌های پیچیده‌ای مانند خاک و رسوبات است. اساس این روش، تفاوت در چگالی بین ذرات میکروپلاستیک و سایر اجزای نمونه (مانند ذرات معدنی و مواد آلی) است. در این فرآیند، نمونه با یک محلول شناورساز با چگالی مشخص (معمولاً بین ۱/۲ تا ۱/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب) مخلوط می‌شود. پس از دوره‌ای از ته‌نشینی یا سانتریفیوژ، ذراتی با چگالی کمتر از محلول (اکثر پلی‌اولفین‌ها مانند پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن) به سطح آمده و قابل جمع‌آوری هستند، در حالی که مواد سنگین‌تر در ته ظرف باقی می‌مانند.

انتخاب محلول شناورساز یک پارامتر حیاتی است که بازده استخراج و اقتصادی بودن روش را تعیین می‌کند. سدیم کلرید (NaCl) اشباع (چگالی ~۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب) به دلیل دسترسی آسان، هزینه ناچیز و سمیت پایین، پرکاربردترین محلول است. با این حال، کارایی آن محدود به استخراج پلیمرهای کم‌چگال (چگالی <۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب) است و برای جداسازی پلیمرهای سنگین‌تری مانند پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و پلی‌استایرن (PS) ناتوان است. برای غلبه بر این محدودیت، از محلول‌های با چگالی بالاتر مانند سدیم یدید (NaI) ، سدیم برمید (NaBr) و کلرید روی ($ZnCl_2$) استفاده می‌شود. اگرچه $ZnCl_2$ بازده استخراج بالاتری دارد، اما به دلیل سمیت برای اکوسیستم‌های آبی و مشکلات دفع، گزینه پایدار و ایمنی محسوب نمی‌شود. در سال‌های اخیر، NaBr به عنوان یک جایگزین مؤثرتر و سازگارتر با محیط‌زیست برای استخراج طیف وسیع‌تری از پلیمرها پیشنهاد شده است.[۶]

۱.۱.۱.۴. چالش ها و محدودیت های روش شناورسازی

۱. جذب سطحی ذرات: میکروپلاستیک‌ها، به ویژه ذرات ریز و الیاف، می‌توانند به شدت به ذرات خاک (مانند رس) چسبیده و استخراج آن‌ها را با مشکل مواجه کنند. استفاده از سورفکتانت‌هایی مانند توئین-۸۰ یا اعمال تیمار اولتراسونیک می‌تواند با کاهش کشش سطحی و شکستن پیوندها، بازده جداسازی را افزایش دهد.

۲. تداخل مواد آلی طبیعی: بقایای گیاهی، جلبک‌ها و مواد آلی با چگالی کم نیز در سطح محلول شناور می‌شوند و در تشخیص و شناسایی بصری میکروپلاستیک‌ها اختلال ایجاد می‌کنند. یک مرحله پیش‌تیمار اکسیداتیو با استفاده از محلول‌هایی مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) برای هضم و حذف این مواد آلی، یک راه‌حل استاندارد و ضروری قبل از شناورسازی است.

۳. پارامترهای عملیاتی: عواملی مانند نسبت جرم نمونه به حجم محلول، مدت و شدت همزدن، زمان ته‌نشینی و کارایی فیلتراسیون نهایی تأثیر مستقیمی بر بازیابی کمی و کیفی میکروپلاستیک‌ها دارند. استانداردسازی این پارامترها برای قابلیت مقایسه نتایج بین مطالعات مختلف حیاتی است.

در مجموع، روش شناورسازی یک ابزار اولیه ارزشمند برای غنی‌سازی نمونه است، اما انتخاب آگاهانه محلول شناورساز و بهینه‌سازی دقیق مراحل پیش‌تیمار و جداسازی، کلید دستیابی به بازدهی بالا و قابل اطمینان برای آنالیزهای کمی و کیفی بعدی است. برای تحلیل جامع آلودگی میکروپلاستیک، استفاده ترکیبی از این روش با تکنیک‌های جداسازی دیگر (مانند روش‌های مبتنی بر اندازه) توصیه می‌شود.[۷][۸]

۲.۱.۴. فیلتراسیون ماسه ای

فیلتراسیون سریع ماسه‌ای (RSF) یک فناوری رایج و مقرون‌به‌صرفه در تصفیه آب و پساب است که اغلب به عنوان بخشی از یک زنجیره چندمرحله‌ای به کار می‌رود. در این فرآیند، آب با عبور از بستری از دانه‌های ماسه با اندازه مشخص معمولاً لایه‌هایی از شن با قطر ۳-۵ میلی‌متر و زیرلایه‌ای از کوارتز ریزتر تحت نیروی ثقل یا فشار، فیلتر می‌شود [۵۸]. ذرات معلق و مواد لخته‌شده عمدتاً از طریق مکانیسم‌های به‌دام‌اندازی فیزیکی و جذب سطحی در خلل و فرج یا بر سطح دانه‌های ماسه حذف می‌شوند.

کاربرد RSF در حذف میکروپلاستیک‌ها از جریان‌های آبی و به‌ویژه به عنوان یک واحد پیش‌تصفیه یا مرحله نهایی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات متعدد نشان می‌دهند که بازده حذف RSF برای میکروپلاستیک ها متغیر و وابسته به شرایط عملیاتی و ویژگی‌های نمونه است. در برخی مطالعات، بازده حذف بسیار بالا (۹۵ تا ۹۹.۹٪) گزارش شده است [11],[10],[9] با این حال، پژوهش‌های دیگر، بازده‌های متوسط تا پایین‌تری (بین ۶۴.۴ تا ۷۵.۵٪) را ثبت کرده‌اند [13],[12] این تغییرپذیری می‌تواند ناشی از عواملی مانند تنوع در مشخصات ذرات از جمله اندازه، شکل ، چگالی و بار سطحی و یا کیفیت آب ورودی و حضور مواد آلی طبیعی یا مواد منعقدشده که می‌توانند بر مکانیسم‌های جداسازی تأثیر بگذارند حاصل شده باشد علاوه بر این سرعت فیلتراسیون، عمق بستر، اندازه و یکنواختی دانه‌های ماسه نیز بی تاثیر نخواهند بود.

۱.۲.۱.۴. محدودیت ها و چالش های روش فیلتراسیون ماسه ای

۱. وابستگی به پیش‌تصفیه: برای دستیابی به بازده مطلوب در حذف میکروپلاستیک ها، معمولاً نیازمند یک مرحله انعقاد/لخته‌سازی شیمیایی قبل از فیلتر است که سطح پیچیدگی و هزینه عملیاتی را افزایش می‌دهد .

۲. مصرف آب برای شستشو: عملیات شستشوی معکوس مکرر، مقادیر قابل توجهی از آب تصفیه‌شده را مصرف می‌کند.

۳. خطر شکست فیلتر: در صورت اشباع شدن بستر یا تغییر ناگهانی کیفیت آب ورودی، امکان عبور ذرات ریزتر میکروپلاستیک ها وجود دارد.

۴. حساسیت در نمونه‌برداری: در غلظت‌های بسیار پایین میکروپلاستیک ها، حجم نمونه‌برداری ناکافی ممکن است به نتیجه منفی کاذب منجر شود و حضور میکروپلاستیک ها را دست‌کم بگیرد.

در نتیجه، فیلتراسیون سریع ماسه‌ای می‌تواند به عنوان یک گزینه عملی و مؤثر در سیستم‌های چندمرحله‌ای تصفیه برای حذف بخش عمده‌ای از میکروپلاستیک‌ها، به ویژه هنگامی که با فرآیند لخته‌سازی ترکیب شود، مورد توجه قرار گیرد. با این حال، برای اطمینان از حذف پایدار و کارآمد، طراحی و بهره‌برداری از آن باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص جریان ورودی و اهداف تصفیه انجام پذیرد.

۳.۱.۴. استخراج مغناطیسی

استخراج مغناطیسی یک روش نوین و امیدوارکننده برای جداسازی انتخابی میکروپلاستیک‌ها، به ویژه ذرات ریز و بسیار ریز (کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر)، از ماتریس‌های محیطی است. اساس این روش بر القای خاصیت مغناطیسی به ذرات غیرمغناطیسی پلاستیک استوار است. در این فرآیند، از نانوذرات اکسید آهن که به دلیل دارا بودن خاصیت سوپرمغناطیسی، نسبت سطح به حجم بالا، پایداری شیمیایی و هزینه نسبتاً پایین گزینه‌ای ایده‌آل هستند، استفاده می‌شود [14].

برای ایجاد امکان اتصال این نانوذرات به سطح پلاستیک‌های آب‌گریز، سطح آن‌ها با عامل‌های کوپل‌کننده سیلانی مانند هگزادسیل‌تری‌متوکسی‌سیلان (HDTMS) عامل‌دار می‌شود. این اصلاح شیمیایی، ایجاد یک لایه آب‌گریز از زنجیره‌های هیدروکربنی بلند بر روی نانوذرات را در پی دارد. این لایه از طریق برهمکنش‌های آب‌گریز به سطح اکثر پلیمرهای پلاستیکی متصل شده و کمپلکس‌های میکروپلاستیک-نانوذره را تشکیل می‌دهد [15]. این کمپلکس‌ها سپس به سادگی و با بازدهی بالا توسط اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی از محیط جداسازی می‌شوند.

۱.۳.۱.۴. چالش ها و محدودیت های استخراج مغناطیسی

کارایی این روش به شدت به اندازه ذرات میکروپلاستیک وابسته است. ذرات کوچک‌تر، به دلیل دارا بودن نسبت سطح به حجم بالاتر، امکان اتصال تعداد بیشتری از نانوذرات را فراهم کرده و در نتیجه کارایی جداسازی مغناطیسی را افزایش می‌دهند. با این حال، چالش‌های اصلی این روش شامل نیاز به جدا کردن نانوذرات از میکروپلاستیک‌های بازیافتی برای انجام آنالیزهای بعدی، و نیز بهینه‌سازی پوشش سطحی نانوذرات برای جذب مؤثر طیف گسترده‌ای از پلیمرها با درجات مختلف آب‌گریزی است.

۲.۴. روش های شیمیایی

۱.۲.۴. انعقاد الکتریکی

انعقاد الکتریکی یک روش الکتروشیمیایی مؤثر و امیدوارکننده برای حذف میکروپلاستیک‌ها از جریان‌های آبی است. این فرآیند در یک سل الکتروشیمیایی شامل یک آند قربانی‌شونده (معمولاً از جنس آهن یا آلومینیوم) و یک کاتد (اغلب از فولاد ضدزنگ) صورت می‌گیرد. با اعمال جریان مستقیم، واکنش‌های الکتروشیمیایی در دو الکترود رخ می‌دهد.

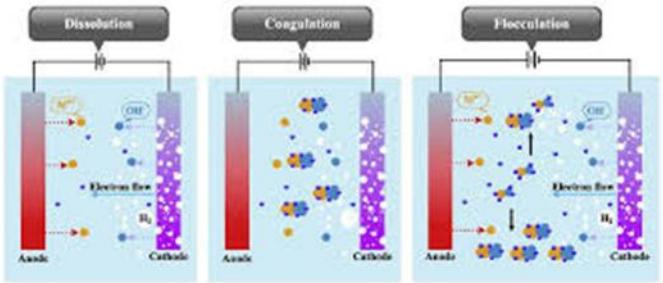
در آند، اکسیداسیون فلز منجر به رهاسازی یون‌های فلزی مانند Fe^{2+} یا Al^{3+} به داخل محلول می‌شود. این یون‌ها در ادامه هیدرولیز شده و به شکل هیدروکسیدهای فلزی نامحلول و ژلاتینی مانند $Fe(OH)_3$ یا $Al(OH)_3$ رسوب می‌کنند. همزمان، در کاتد، احیای آب منجر به تولید گاز هیدروژن و افزایش موضعی pH می‌گردد. مکانیسم حذف میکروپلاستیک‌ها در این فرآیند چندوجهی است:

۱. خنثی‌سازی بار: یون‌های فلزی با بار مثبت بالا، بار سطحی منفی ذرات کلوئیدی از جمله بسیاری از میکروپلاستیک‌ها را خنثی می‌کنند و پتانسیل زتا را کاهش می‌دهند.

۲. جذب و به‌دام‌اندازی در لخته: شبکه گسترده و متخلخل هیدروکسیدهای فلزی در حال تشکیل، ذرات ریز معلق از جمله میکروپلاستیک‌ها را به صورت فیزیکی در ساختار خود به دام می‌اندازد.

۳. شناورسازی با حباب‌های ریز : حباب‌های ریز هیدروژن تولیدشده در کاتد می‌توانند به لخته‌های تشکیل‌شده متصل شده و آن‌ها را به سطح آب برانند و جداسازی را تسهیل کنند.

پس از تشکیل لخته‌های حاوی آلاینده‌ها، این لخته‌ها از طریق ته‌نشینی یا شناورسازی از فاز مایع جدا شده و یک پساب شفاف باقی می‌ماند. گزارش‌ها حاکی از کارایی حذف بیش از ۹۹٪ برای میکروپلاستیک‌ها تحت شرایط بهینه مانند pH حدود ۷-۸، چگالی جریان مناسب و زمان ماند کافی است. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به نیاز ناچیز به مواد شیمیایی افزودنی، تولید لجن متراکم‌تر و امکان اتوماسیون اشاره کرد. مصرف انرژی و خوردگی تدریجی الکترودها از چالش‌های اصلی این فناوری است که با بهینه‌سازی جنس الکترودها مانند استفاده از آلیاژها یا پوشش‌های خاص و پارامترهای عملیاتی در حال رفع شدن است.[16] شکل۲



شکل ۲ – نمونه ای از انعقاد الکتریکی ذرات میکروپلاستیک ها و حذف از جریان آبی

۲.۲.۴. فرآیندهای الکترواکسیداسیون و میکروموتورهای فوتوکاتالیستی

۱.۲.۲.۴.الکترواکسیداسیون پیشرفته

الکترواکسیداسیون یک فرآیند الکتروشیمیایی است که از طریق تولید درجا گونه‌های اکسیدکننده قوی، به ویژه رادیکال‌های هیدروکسیل، منجر به تخریب و حذف میکروپلاستیک‌ها می‌شود. این رادیکال‌ها بر روی سطح یک آند با پتانسیل اکسیداسیون بالا، مانند الماس دوپ‌شده با بور (BDD) یا آندهای اکسید فلزی مخلوط (MMO)، تولید می‌شوند. رادیکال $OH^{\bullet}$ با حمله به زنجیره‌های پلیمری، نه تنها می‌تواند ابعاد ذرات را از طریق شکست زنجیره کاهش دهد، بلکه قادر است تا مرحله معدنی‌سازی کامل تبدیل به CO_2 و H_2O پیش رود. این روش به‌طور ویژه برای مواجهه با چالش میکروپلاستیک‌های اولیه ریز و الیاف مصنوعی که عمدتاً از شستشوی منسوجات (خروجی ماشین‌های لباسشویی) نشأت می‌گیرند، بسیار مناسب است. کارایی فرآیند به شدت تحت تأثیر جنس الکترود، چگالی جریان، ترکیب الکترولیت و زمان ماند است.[17]

۲.۲.۲.۴. میکروموتورهای فوتوکاتالیستی مبتنی بر TiO_2

این فناوری پیشرفته از نانو یا میکروموتورهای خودپیشران بهره می‌برد که با فوتوکاتالیست نیمه‌هادی عموماً دی‌اکسید تیتانیوم، پوشش داده شده‌اند و امکان ترکیب همزمان جداسازی و تخریب را فراهم می‌کنند. این میکروموتورها اغلب دارای ساختارهای ترکیبی لایه‌ای مانند پایه نیکل/طلا با پوشش TiO_2 هستند تا عملکرد بهینه‌ای داشته باشند. مکانیسم عملکرد در دو محور قابل‌تقسیم است:

۱. جداسازی فیزیکی و به‌دام‌اندازی: حرکت خودکار این ذرات، که می‌تواند توسط نور یا تجزیه یک سوخت مانند H_2O_2 تأمین شود، باعث ایجاد جریان‌های هم‌زدن موضعی و افزایش احتمال برخورد با میکروپلاستیک‌های معلق می‌شود. پس از برخورد، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند از طریق برهمکنش‌های فیزیکی بر سطح میکروموتورها جذب و تجمع یابند.
۲. تخریب فوتوکاتالیستی: با تابش نور معمولاً در محدوده UV، فوتوکاتالیست TiO_2 فعال شده و رادیکال‌های اکسیدکننده‌ای تولید می‌کند که به ساختار پلیمری میکروپلاستیک‌های جذب‌شده حمله کرده و آن‌ها را تخریب می‌نمایند.
مهم‌ترین مزیت این سیستم، فعالیت دوگانه و خودکفا آن است که نیاز به مراحل جداسازی پیچیده را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از نور به عنوان محرک اصلی و آب به عنوان محیط، آن را به یک فناوری نسبتاً سبز و امیدوارکننده تبدیل می‌کند. چالش‌های پیش‌رو شامل بهینه‌سازی راندمان حرکت و تخریب در مقیاس بزرگ، امکان بازیابی و استفاده مجدد از میکروموتورها، و سازگاری آن‌ها با محیط‌های پیچیده و کدر پساب است.[18]

۳.۲.۴. ژل‌های سیلیکای هیبریدی آلی-معدنی به عنوان جاذب‌های نوین

در میان روش‌های جذبی برای حذف میکروپلاستیک‌ها، ژل‌های سیلیکای هیبریدی آلی-معدنی به عنوان نسل جدیدی از مواد جاذب، توجه قابل‌ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. این مواد با طراحی هوشمندانه ساختار شیمیایی، مزایای هر دو جزء آلی و معدنی را یکجا ادغام می‌کنند. شبکه معدنی معمولاً مبتنی بر سیلیکا استحکام مکانیکی، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا را تأمین می‌کند، در حالی که بخش آلی مانند گروه‌های عاملی یا پلیمرهای گرافت‌شده امکان

تنظیم دقیق خاصیت سطح و برهمکنش انتخابی با آلاینده‌ها را فراهم می‌سازد. شبکه معدنی سیلیکا، پایداری در محیط‌های آبی با pHهای مختلف و مقاومت در برابر تخریب بیولوژیکی را تضمین می‌کند. بسیاری از این ژل‌ها را می‌توان پس از اشباع، از طریق عملیات ساده‌ای مانند شستشو با حلال‌های آلی ملایم یا تغییر pH، احیاء و مجدداً مورد استفاده قرار داد.

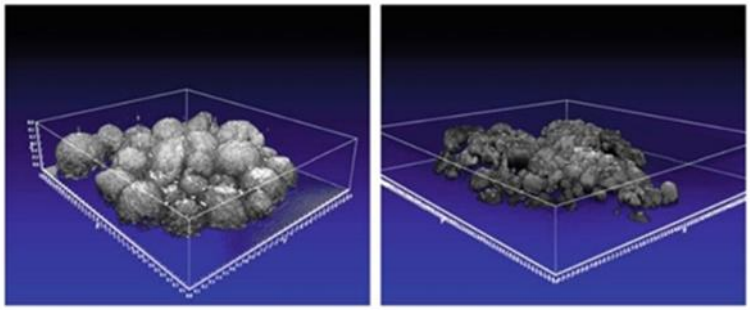
به گفته اشتورم و همکارانش که اخیرا از این روش استفاده کرده اند تشکیل ژل باید در زمانی رخ دهد که امکان تشکیل تجمع های بزرگ توسط ذرات ریز پلاستیک و تثبیت آنها در طول فرایند تشکیل ژل وجود داشته باشد. بنابراین اگر تشکیل ژل سریع رخ دهد تجمع امکان پذیر نخواهد بود و اگر آهسته پیش رود تثبیت ذرات امکان پذیر نیست.[19]

کارایی این ژل‌ها در حذف میکروپلاستیک‌ها عمدتاً از طریق برهمکنش‌های فیزیکوشیمیایی سطحی است که به طور هدفمند در حین سنتز مهندسی می‌شوند. مکانیسم‌های اصلی شامل:

۱. جذب فیزیکی (فیلتراسیون و به‌دام‌اندازی در تخلخل): ساختار متخلخل سه‌بعدی با توزیع اندازه حفرات کنترل‌شده (از مزوپور تا ماکروپور) می‌تواند ذرات میکروپلاستیک را بر اساس اندازه، به‌صورت مکانیکی به دام بیندازد. این امر خصوصاً برای ذرات با ابعاد مشخص مؤثر است. می‌توان با تغییر نسبت و نوع پیش‌ماده‌های آلی و معدنی (مانند تترااتوکسی‌سیلان و ارگانوسیلان‌ها)، میزان تخلخل، اندازه حفرات، نوع و تراکم گروه‌های عاملی سطحی را دقیقاً برای هدف حذف میکروپلاستیک‌های با شکل، اندازه و ترکیب شیمیایی خاص، تنظیم کرد.

۲. جذب سطحی از طریق برهمکنش‌های آب‌گریز: با وارد کردن گروه‌های عاملی آب‌گریز بلند زنجیر (مانند آلکیل‌سیلان‌ها یا گروه‌های فنیل) به ماتریس سیلیکا، می‌توان میل ترکیبی سطح جاذب را با سطح آب‌گریز اکثر پلیمرهای پلاستیکی افزایش داد. این برهمکنش‌های آب‌گریز (نیروهای واندروالسی) منجر به چسبندگی مؤثر میکروپلاستیک‌ها به سطح جاذب می‌شود. سطح ویژه بسیار بالا (حاصل از تخلخل نانومتری) و گروه‌های عاملی فعال فراوان، می‌توانند به ظرفیت جذب قابل‌توجهی برای میکروپلاستیک‌ها منجر شوند.

۳. جذب شیمیایی (در صورت وجود گروه‌های عاملی واکنش‌پذیر): در برخی طراحی‌های پیشرفته، گروه‌های عاملی خاصی (مانند آمین، تیول یا اپوکسید) که قادر به تشکیل پیوند کووالانسی یا پیوند هیدروژنی با گروه‌های عاملی روی سطح میکروپلاستیک‌های فرسوده‌شده هستند، وارد ساختار می‌شوند. این امر امکان اتصال قوی‌تر و حتی انتخابی برای پلیمرهای خاص را فراهم می‌کند.[20][21] شکل۳



شکل ۳- نمونه ای از تجمع تشکیل شده توسط میکروپلاستیک ها تحت توموگرافی همدوسی نوری

۳.۴. فرایندهای غشایی

۱.۳.۴. اسمز معکوس

فرآیندهای غشایی، به ویژه اسمز معکوس ، به عنوان یکی از کارآمدترین و پرکاربردترین فناوری‌ها برای گندزدایی، نمک‌زدایی و حذف آلاینده‌های نوظهور از آب شناخته می‌شوند. این فناوری با اعمال فشاری بیش از فشار اسمزی، مولکول‌های آب را از طریق یک غشای نیمه‌تراوا با ساختار متراکم و غیرمتخلخل وادار به عبور می‌کند، در حالی که املاح، یون‌ها و ذرات ریز از جمله میکروپلاستیک‌ها در پشت غشا باقی می‌مانند.

مکانیسم اصلی حذف در اسمز معکوس، مکانیکی است و بر پایه اندازه‌گیری یا سایز عمل می‌کند. اندازه حفره‌های موثر در غشاهای معمولاً در محدوده ۰/۱ تا ۱ نانومتر است که به مراتب کوچک‌تر از اندازه معمول میکروپلاستیک‌ها (۰/۱ میکرومتر به بالا) می‌باشد. این امر، این روش را به یک مانع فیزیکی بسیار مؤثر تبدیل می‌کند. مزایای کلیدی این روش شامل بازدهی حذف بسیار بالا (اغلب >۹۹٪ برای طیف وسیعی از آلاینده‌ها)، نیاز کم به مواد شیمیایی افزودنی و قابلیت اتوماسیون و یکپارچه‌سازی در سیستم‌های تصفیه است.

مطالعات متعددی کارایی بالای اسمز معکوس را در حذف میکروپلاستیک‌ها تأیید کرده‌اند. به عنوان مثال، پژوهشی روی سه تصفیه‌خانه بزرگ فاضلاب در سیدنی استرالیا نشان داد که فرآیند قادر است بین ۹۲ تا ۹۹٪ از میکروپلاستیک‌های پلی‌استایرن (PS) را حذف کند [22].

وجود هرگونه نقص ساختاری در غشا (مانند پارگی‌های میکروسکوپی)، شکاف در اتصالات یا نشتی در ماژول می‌تواند مسیری برای عبور تعداد کمی از ذرات ریز به ویژه الیاف ایجاد کند، که در غلظت‌های پایین اما بالقوه نگران‌کننده باقی می‌مانند .

آلودگی غشا توسط مواد آلی، معدنی و بیولوژیکی موجود در پساب، مهم‌ترین چالش عملیاتی RO است. تجمع میکروپلاستیک‌ها و سایر ذرات بر سطح غشا می‌تواند به سرعت منجر به کاهش شار عبوری، افزایش فشار عملیاتی و در نتیجه افزایش هزینه‌های انرژی و نگهداری شود. هزینه‌های اولیه نسبتاً بالا برای نصب سیستم RO و همچنین مصرف انرژی برای ایجاد فشار مورد نیاز از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شوند.[23]

۲.۳.۴. فناوری غشای پویا

فناوری‌های تصفیه پیشرفته، از جمله غشای پویا (DM)، به دلیل توانایی در حذف آلاینده‌های مقاوم و نوظهور که در روش‌های متعارف به‌طور ناقص حذف می‌شوند، مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته‌اند. این فناوری به‌ویژه در دو دهه اخیر، به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای سیستم‌های غشایی متداول (مانند میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون) در کاربردهایی مانند بیوراکتورهای غشایی (MBR) مطرح شده است.

غشای پویا یک غشای ثانویه تشکیل‌شده در محل است که از ذرات و مواد معلق موجود در خود جریان پساب مانند فلوک‌های بیولوژیکی، سلول‌های میکروبی و مواد کلوئیدی بر روی یک زیرلایه نگهدارنده با تخلخل درشت مانند پارچه‌های فیلتری، توری‌های پلیمری یا غشاهای اولترافیلتراسیون ایجاد می‌شود. این لایه پویا به‌مرور زمان تشکیل و تکمیل شده و نقش اصلی فیلتراسیون را بر عهده می‌گیرد. مکانیسم حذف در DM عمدتاً فیزیکی-مکانیکی است و شامل الک کردن و

جذب سطحی ذرات معلق از جمله میکروپلاستیک‌ها توسط این لایه متراکم می‌باشد [24] جالب توجه آن که خود این لایه با به‌دام‌اندازی ذرات ریزتر، از گرفتگی زیرلایه اصلی جلوگیری کرده و طول عمر آن را افزایش می‌دهد.
پتانسیل DM برای حذف میکروپلاستیک‌ها به‌ویژه ذرات با چگالی پایین و غیرقابل تجزیه زیستی مورد مطالعه قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که غلظت ذرات ورودی پارامتر کلیدی در تشکیل و کارایی غشای پویا است. غلظت‌های بالاتر، تشکیل سریع‌تر و لایه‌ای متراکم‌تر را تسهیل می‌کنند که می‌تواند منجر به کاهش کدورت و افزایش بازدهی حذف میکروپلاستیک ها شود. مطالعه لی و همکاران[25] نشان داد که فیلتراسیون با DM تحت نیروی جاذبه می‌تواند در حذف MPs کارآمدتر از برخی روش‌های متعارف عمل کند. این ویژگی، DM را به گزینه‌ای مناسب برای جریان‌های پساب با بار آلودگی معلق بالا تبدیل می‌نماید.

۱.۲.۳.۴. چالش ها و محدودیت های فناوری غشای پویا

۱. پایداری و کنترل فرآیند: نیاز به کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی (شار، فشار، غلظت ذرات) برای حفظ پایداری و یکنواختی لایه پویا وجود دارد
۲. تأثیر عملیات احیا: فرآیندهای مکرر تشکیل و برداشتن لایه پویا ممکن است در بلندمدت به کاهش نفوذپذیری یا آسیب به زیرلایه منجر شود.
۳. نوسان در کیفیت پساب: بلافاصله پس از احیای غشا و در مراحل اولیه تشکیل لایه جدید، ممکن است کیفیت پساب خروجی به‌طور موقت کاهش یابد.
۴. مصرف انرژی برای حفظ شار: در برخی پیکربندی‌ها ممکن است برای حفظ شار عبوری مطلوب به افزایش فشار و در نتیجه مصرف انرژی بیشتری نیاز باشد.

۴.۴. روش های زیستی

۱.۴.۴. هضم آنزیمی

هضم آنزیمی به عنوان یک روش انتخابی، ملایم و بسیار مؤثر برای استخراج میکروپلاستیک‌ها از نمونه‌های بیولوژیکی پیچیده مانند بافت ماهی، نرم‌تنان، رسوبات غنی از مواد آلی شناخته می‌شود. این روش مبتنی بر استفاده از آنزیم‌های اختصاصی (نظیر پروتئیناز K، کلاژناز، تریپسین یا پاپائین) برای تخریب و هضم ماتریس آلی (پروتئین‌ها، چربی‌ها، کربوهیدرات‌ها) در شرایط ملایم فیزیولوژیکی (دمای ۶۰-۳۷ درجه سانتی‌گراد و pH خنثی) است.
مهم‌ترین مزیت این روش، حفظ یکپارچگی شیمیایی و فیزیکی میکروپلاستیک‌ها است. برخلاف روش‌های هضم شیمیایی خشن با اسیدها یا بازهای قوی، شرایط ملایم آنزیمی از تخریب، تغییر شکل یا ذوب ذرات پلاستیکی جلوگیری می‌کند. این امر دقت آنالیزهای کمی و کیفی بعدی، مانند شناسایی پلیمر با روش‌های طیف‌سنجیFTIR ، رامان را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.
اجرای موفقیت‌آمیز هضم آنزیمی مستلزم رعایت سخت‌گیرانه‌ترین پروتکل‌های کنترل و پیشگیری از آلودگی است. حضور ذرات پلاستیکی در هوای آزمایشگاه، البسه، گرد و غبار و مواد مصرفی می‌تواند به شدت نتایج را مخدوش نماید. از این رو، نمونه‌ها باید در ظروف شیشه‌ای پیش‌تمیز شده، در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری و تمامی مراحل آماده‌سازی در محیطی با حداقل تردد و مجهز به هود جریان laminar انجام شود. یک پروتکل استاندارد معمولاً شامل مراحل خرد

کردن نمونه، انکوباسیون با محلول آنزیم، هم‌زنی، سانتریفیوژ و در نهایت فیلتراسیون محلول بر روی فیلترهای غشایی (سلولز نیترات یا پلی‌کربنات با تخلخل ۰.۲ تا ۲۰ میکرومتر) برای بازیابی میکروپلاستیک‌های آزاد شده است. زمان طولانی هضم (گاهی تا ۴۸ ساعت) و هزینه بالای آنزیم‌های خالص از محدودیت‌های عمده این روش محسوب می‌شوند.[26]

۲.۴.۴ بیوراکتورهای غشایی

بیوراکتورهای غشایی (MBR) یک فناوری پیشرفته تصفیه هستند که فرآیند زیستی لجن فعال متعارف را با جداسازی غشایی میکروفیلتراسیون یا اولترافیلتراسیون یکپارچه می‌کنند [27]. این سیستم با جایگزینی حوضچه ته‌نشینی ثانویه با یک ماژول غشایی با منافذ ریز (معمولاً ۰،۰۴ تا ۰،۴ میکرومتر)، امکان جداسازی کامل جامدات معلق، میکروارگانیسم‌ها و ذرات ریز را از پساب فراهم می‌کند. این ترکیب منجر به تولید پسابی با کیفیت بسیار بالا، کاهش چشمگیر فضای مورد نیاز و ساده‌سازی فرآیند می‌شود.

به دلیل مکانیسم دوگانه خود، یکی از مؤثرترین فناوری‌های موجود برای حذف میکروپلاستیک‌ها از پساب شهری شناخته شده‌است:

۱. جداسازی فیزیکی مستقیم: غشا به عنوان یک سد فیزیکی غیرقابل نفوذ برای ذراتی عمل می‌کند که بزرگ‌تر از اندازه منافذ آن هستند. این مکانیسم اصلی حذف میکروپلاستیک ها محسوب می‌شود.

۲. جذب و تجمع در زیست‌توده: توده میکروبی غلیظ در راکتور می‌تواند MPs را از طریق جذب سطحی در ساختار فلوک‌های لجن به دام بیندازد.

مطالعات متعدد کارایی بیش از ٪۹۹ را برای MBR در حذف میکروپلاستیک ها گزارش کرده‌اند [28] برای مثال، مطالعه‌ای در یک تصفیه‌خانه تمام‌مقیاس در چین، راندمان حذف ٪۹۹،۵ بر اساس جرم و ٪۸۲،۱ بر اساس تعداد ذرات را نشان داد که برتری روش MBR نسبت به فرآیندهای متعارف را تأیید می‌کند .این اختلاف بین حذف بر پایه جرم و عدد، نشان‌دهنده کارایی بیشتر سیستم در حذف ذرات بزرگ‌تر است.

تحقیقات نوظهور بر افزایش قابلیت MBR از طریق تخریب زیستی فعال میکروپلاستیک‌ها متمرکز است. هدف، تبدیل سیستم از یک دام‌گیر منفعل به یک تخریب‌کننده فعال است.

۱.۲.۴.۴. چالش ها و محدودیت های بیوراکتورهای غشایی

۱. هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی بالا: هزینه اولیه سیستم و تعویض دوره‌ای غشاها قابل توجه است.

۲. مصرف انرژی: به دلیل نیاز به هوادهی و حفظ شار غشایی به‌ویژه برای کنترل گرفتگی

۳. آلودگی غشا: اصلی‌ترین چالش عملیاتی که نیاز به پیش‌تصفیه دقیق، شستشوهای شیمیایی/فیزیکی منظم و کنترل بهینه پارامترها دارد.

تمرکز MPs در لجن: MPs حذف‌شده در لجن متمرکز می‌شوند که مدیریت و دفع ایمن این لجن را به یک چالش ثانویه مهم تبدیل می کند.

علاوه بر روش‌های اصلی، تکنیک‌های دیگری نیز بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میکروپلاستیک‌ها برای جداسازی توسعه یافته‌اند:

جداسازی الکترواستاتیکی: این روش از تفاوت در هدایت الکتریکی یا قابلیت باردار شدن ذرات استفاده می‌کند. نمونه خشک در معرض یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. ذرات با هدایت بالاتر سریع‌تر بار خود را از دست داده و

جدا می‌شوند، در حالی که ذرات عایق (مانند بسیاری از پلیمرها) باردار باقی مانده و به الکترود با بار مخالف جذب می‌شوند. این روش برای نمونه‌های خشک مانند رسوبات یا خاک‌های الک‌شده می‌تواند کارآمد باشد.
استخراج با روغن: این تکنیک ساده از آب‌گریزی مشترک روغن‌های گیاهی (مانند روغن زیتون) و پلیمرهای پلاستیک بهره می‌برد. با ایجاد یک امولسیون قوی از نمونه آبی و روغن، میکروپلاستیک‌ها از فاز آبی به فاز روغنی مهاجرت می‌کنند. پس از جدایش فازها، میکروپلاستیک‌ها از فاز روغنی استخراج می‌شوند. این روش غیرتهاجمی و کم‌هزینه است، اما امکان تداخل با لیپیدهای طبیعی موجود در نمونه وجود دارد.[29]

۵. نتیجه‌گیری

آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها در منابع آبی به یک چالش زیست‌محیطی و بهداشتی جدی تبدیل شده است. همان‌گونه که در این مقاله مروری بررسی شد، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به عنوان نقاط کانونی ورود این آلاینده‌ها به محیط‌های آبی، نیازمند فناوری‌های تصفیه هدفمند و کارآمد هستند. بررسی نظام‌مند روش‌های موجود نشان می‌دهد که هیچ فناوری واحدی به تنهایی قادر به حذف کامل طیف وسیع میکروپلاستیک‌ها با اشکال، اندازه‌ها و ترکیبات شیمیایی مختلف نیست.

روش‌های متعارف تصفیه مانند ته‌نشینی اولیه و فرآیندهای زیستی متداول، اگرچه در کاهش بار کلی ذرات معلق مؤثرند، اما در برابر میکروپلاستیک‌های ریز، الیاف و ذرات با چگالی پایین کارایی محدودی از خود نشان می‌دهند و بخش قابل‌توجهی از آنها را از فیلتر تصفیه عبور می‌دهند. در مقابل، فناوری‌های پیشرفته، چشم‌انداز امیدوارکننده‌تری ارائه می‌کنند:

فناوری‌های غشایی به ویژه بیوراکتورهای غشایی - MBR و اسمز معکوس - RO با بازده حذف بیش از ۹۹٪، مؤثرترین گزینه‌های موجود برای جداسازی فیزیکی محسوب می‌شوند. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی بالا، مصرف انرژی و پدیده گرفتگی غشا، کاربرد گسترده آنها را محدود می‌کند.

فرآیندهای الکتروشیمیایی (مانند انعقاد و اکسیداسیون الکتریکی) به دلیل امکان حذف همزمان طیف وسیعی از آلاینده‌ها، نیاز کم به مواد شیمیایی و امکان اتوماسیون، پتانسیل بالایی دارند. با این حال، مصرف انرژی و خوردگی الکترودها از موانع اصلی آنهاست.

روش‌های جذبی مبتنی بر نانومواد و هیبریدهای آلی-معدنی به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت تنظیم شیمیایی برای جذب انتخابی، گزینه‌های نوظهور و انعطاف‌پذیری هستند. با این حال، هزینه تولید، امکان رهایش نانومواد ثانویه و نیاز به احیای جاذب نیازمند توجه بیشتر است.

روش‌های زیستی (تکمیلی) مانند هضم آنزیمی یا توسعه بیوراکتورهای تخصصی، اگرچه اغلب کند و هزینه‌بر هستند، اما مسیر امیدوارکننده‌ای برای تخریب واقعی و معدنی‌سازی میکروپلاستیک‌ها، به جای صرفاً انتقال آنها به فاز لجن، ارائه می‌دهند.

راه‌حل پایدار، نه در رقابت، که در همکاری این فناوری‌ها نهفته است. یک رویکرد ترکیبی و چندمرحله‌ای، کارآمدترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین استراتژی است. در این استراتژی، روش‌های کم‌هزینه (مانند غربال‌گری، انعقاد شیمیایی و فیلتراسیون ماسه‌ای) به عنوان پیش‌تصفیه، بار آلودگی ورودی به واحدهای پیشرفته‌تر را کاهش می‌دهند. سپس، یک فناوری هسته‌ای کارآمد (مانند MBR یا انعقاد الکتریکی) بخش عمده میکروپلاستیک‌ها را حذف می‌کند.

در نهایت، یک پالایش نهایی (مانند جذب سطحی پیشرفته یا اکسیداسیون الکتریکی/نوری) می‌تواند باقی‌مانده ذرات ریز و ترکیبات شیمیایی آزادشده را هدف قرار دهد.در نهایت، موفقیت در مهار این آلودگی فراگیر، تنها از طریق همگرایی

تلاش‌های علمی، نوآوری‌های فنی، سیاست‌گذاری‌های حمایتی و ارتقای آگاهی عمومی ممکن خواهد بود. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب باید از نقش منفعل کنترل‌کننده آلودگی به نقش فعال بازیاب منابع و مانع نهایی ورود آلاینده‌های نوظهور ارتقا یابند. این مقاله مروری، چارچوبی از گزینه‌های فناورانه موجود و ضرورت یکپارچه‌سازی آنها را ارائه می‌دهد تا به عنوان نقشه راهی برای پژوهشگران، مهندسان و تصمیم‌گیران در این مسیر چالش‌برانگیز عمل کند.هر مقاله باید با ارائه توضیحات مشخص به جمع‌بندی نتایج تحقیق ارائه شده در بخش نتیجه‌گیری بپردازد.

۶. مراجع

۱.Prata, J. C. (2018). "Airborne microplastics: Consequences to human health?", Environmental Pollution, 234, pp115–126.

2.Karami, A. and Golieskardi, A. and Keong Choo, C.and Larat, V. and Galloway, T. S., and Salamatinia, B. (2017). “The Presence of Microplastics in Commercial Salts from different countries”. Scientific Reports, 7, pp 46173.

3.Wright, S. L. and Kelly, F. J. (2017). “Plastic and human health: a micro issue? “Environmental Science & Technology, 51, pp 6634–6647.

4. Mintenig, S. M, and Int-Veen, I., Löder and M. G. J. and Primpke, S., and Gerdts, G. (2017). “Identification of microplastic in effluents of wastewater treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging”. Water Research, 108, pp365–372.

5.Mai, L.and Bao, L.J.and Shi, L.and Wong, C.S.and Zeng, E.Y. (2018). “A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments”. Environmental Science and Pollution Research, 25(12), pp 11319–11332.

6.Imhof, H. K.and Schmid, J.and Niessner, R.and Ivleva, N. P. and Laforsch, C. (2012). “A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments.” Limnology and Oceanography: Methods, 10(7), pp524–537.

7.Ungureanu N, and Vlăduţ V. and, Paraschiv G (2020).” Electrocoagulation in wastewater treatment”. Ann Univ Craiova-Agric, Montanol, Cadastre Ser, 49(2), pp206–216.

8.Lin, L. and Zuo, L.Z., and Peng, J.P. and Cai, L.Q. and Fok, L. and Yan, Y. and Xu, X.R. (2018). “Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China”. Science of the Total Environment, 644, pp375–381.

9.Carr SA, and Liu J, and Tesoro AG (2016). “Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants”. Water Research, 91, pp 174–182.

10.Murphy F, and Ewins C, and Carbonnier F, and Quinn B (2016). “Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment”. Environmental Science & Technology, 50(11), pp 5800–5808.

11.Talvitie J, and Mikola A, and Koistinen A, (2017). “Solutions to microplastic pollution—removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies.” Water Res, 123, pp401–407.

12.Leslie HA, and Brandsma SH, and Van Velzen M.J.M, and Vethaak AD (2017).” Microplastics en route: field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota”. Environment International, 101, pp 133–142.

13.Bayo J, and López-Castellanos J, and Olmos S (2020). “Membrane bioreactor and rapid sand filtration for the removal of microplastics in an urban wastewater treatment plant”. Marine Pollution Bulletin, 156, pp 111211.

14.Grbic, J. and Nguyen, B. and Guo, E. and You, J. B. and Sinton, D., and Rochman, C. M. (2019). “Magnetic extraction of microplastics from environmental samples.” Environmental Science & Technology Letters, 6(2), pp 68–72.

15.Nabi, I.and Li, K.and Cheng, H.and Wang, T. and Liu, Yand Ajmal, S. and Zhang, L. (2020). "Complete photocatalytic mineralization of microplastic on TiO_2 nanoparticle film". iScience, 23(7), pp101326.
16.Shim WJ,and Hong S.H, and Eo., S.E (2017)." Identification methods in microplastic analysis: a review". Anal Methods, 9(9), pp1384–1391.
17.Liu, P.Q. and Ian, L. and Wang, H.(2019), " new insights into the aging behavior of microplastics accelerated by advanced oxidation process" Environmental science and technology, 53(7), pp 3579-3588
۱۸. گل سفیدی،ف. و بنیادی، ض. (۱۴۰۱)، " بررسی روش های حذف میکروپلاستیک ها به عنوان آلاینده های نوظهور از محیط آبی" چهارمین همایش دانشجویی تازه های علوم بهداشتی.
19.Sturm M.T,and Herbort A.F,and Horn H, and Schuhen K (2020). "Comparative study of the influence of linear and branched alkyltrichlorosilanes on the removal efficiency of polyethylene and polypropylene-based microplastic particles from water." Environ Sci Pollut Res, 27, pp10888–10898.
20.Herbort A.F,and Schuhen K (2016)." A concept for the removal of microplastics from the marine environment with innovative host–guest relationships". Environmental Science and Pollution Research, 24(12), 1–5.
21. Herbort A.F,and Sturm M.T, and Schuhen K (2018b). "A new approach for the agglomeration and subsequent removal of polyethylene, polypropylene, and mixtures of both from freshwater systems—a case study. "Environmental Science and Pollution Research, 25(15), pp15226–15234.
22.Scopetani C, and David C,and Pellinen J (2020)." Olive oil-based method for the extraction, quantification and identification of microplastics in soil and compost samples". Sci Total Environ,pp 733.
23.Poerio T,and Piacentini E,and Mazzei R (2019). "Membrane processes for microplastic removal. Molecules" (Basel, Switzerland), 24(22), pp 41-48.
24.Bali M, and Farhat S (2020). "Removal of contaminants and pathogens from secondary wastewater effluents using hollow fiber microfiltration membranes". International Journal of Environmental Science & Natural Resources, 23(3), pp78–84.
25.Li L,and Xu G, and Yu H, and Xing J (2018). "Dynamic membrane for micro-particle removal in wastewater treatment: performance and influencing factors". Science of the Total Environment, 627, pp 332–340.
26.Friesen, L.W.V. and Granberg, M.E. and Hassellov, M.(2019), " an efficient and gentle enzymatic digestion protocol for the extraction of microplastics . marine pollution bulletin, 142, pp 129-134
27.Ayol A,and Demiral Y.O, and Gunes S (2020). "Efficient treatment of domestic wastewaters by using a dynamic membrane bioreactor system". Journal of Membrane Science Research 74,pp136-145.
28.Lares M, and Ncibi M.C, and Sillanpaa M, (2018a). "Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology." Water Research, 133, pp236–246.
۲۹. سهیلی. ع. و ملاجعفری ، م.ح.(۱۴۰۳)، " بررسی روش های حذف نانوپلاستیک ها و میکروپلاستیک ها در تصفیه خانه های فاضلاب شهری" هشتمین کنگره سالانه بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست