

۱. مقدمه

آب یک منبع حیاتی برای فرآیندهای صنعتی و همچنین بقای انسان است، اما به شدت توسط آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی و رویدادهای طبیعی تهدید می‌شود. آلودگی آب با افزایش جمعیت جهان، صنعتی‌شدن، شهرنشینی سریع و اثرات گسترده تغییرات اقلیمی تشدید شده است. این امر باعث آسیب‌های اکولوژیکی، به ویژه از کودهای شیمیایی آزاد شده در آب‌ها شده است. منابع آبی تحت فشار شدید این نیروهای ترکیبی قرار گرفته‌اند که منجر به محدودیت‌های کیفی و کمی شده است. اگرچه کمبود آب پاک یک مشکل عمده در کشورهای در حال توسعه است، اما آلودگی ناشی از شهرها و عملیات صنعتی باعث کمبود مداوم منابع آب آشامیدنی حتی در کشورهای صنعتی بسیار توسعه‌یافته می‌شود. نیازهای بالای آب بخش‌های مختلف صنعتی از طریق انتشار پساب‌های بسیار خطرناک و غیرقابل تجزیه بیولوژیکی، به چالش‌های اکوسیستم و تخریب محیط‌زیست کمک می‌کند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم، پرداختن به اثرات کمبود جهانی آب است. موادی از جمله آفت‌کش‌ها، پسماندهای دارویی، آلاینده‌های آلی و معدنی، آنتی‌بیوتیک‌ها، شستشوی فلزات سنگین به آب‌ها، علف‌کش‌ها، نشت نفت، اتروفیکاسیون آب‌ها، مسکن‌ها و رنگ‌ها، منابع مهم آلودگی آب هستند. این آلاینده‌ها ممکن است تجمع یافته و به محیط‌زیست آسیب جدی وارد کنند. به عنوان مثال، ممکن است باعث اتروفیکاسیون آب‌ها شوند که در نهایت بر اکوسیستم‌های آبی تأثیر می‌گذارد. سطح بالای نیاز به اکسیژن و سمیت شدید ناشی از نفوذ آلاینده‌ها به آب‌ها می‌تواند به سیستم‌های حیات آبی و کیفیت آب آسیب برساند. برای کاهش آسیب‌های مداوم ناشی از این سموم به محیط‌زیست و انسان، به تصفیه نیاز است. بنابراین، تکنیک‌های پیشرفته، مقرون‌به‌صرفه، مسئولانه از نظر زیست‌محیطی و بسیار مؤثر تصفیه فاضلاب ضروری هستند. بسیاری از روش‌های تصفیه، از جمله فرآیند غشایی، فیزیکی‌وشیمیایی، لخته‌سازی، بیولوژیکی، جذب‌سازی، انعقاد، رسوب‌گذاری، تصفیه فیزیکی و شیمیایی، فیلتراسیون و فرآیندهای اکسیداسیون، ایجاد و در آزمایشات مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا این مشکلات را حل کنند. با این حال، معایب اصلی آن‌ها مصرف بیش از حد انرژی، تصفیه ناکارآمد، تمایل به گرفتگی و تکنیک‌های

تصفیه محدود به حذف یک آلاینده خاص است. علاوه بر این، آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را نمی‌توان به طور مؤثر توسط روش‌های تصفیه فعلی حذف کرد. این فرآیندها نیازمند نیروی کار زیاد، ناکارآمد، کند و پرهزینه هستند. به دلیل مکانیسم هیجان‌انگیز و امیدوارکننده‌ای که امکان تخریب کامل آلاینده‌های مختلف را به مواد شیمیایی ساده‌تر می‌دهد، اکثر محققان در حال حاضر به روش پیشرفته تخریب فوتوکاتالیستی علاقه‌مند هستند. فوتوکاتالیز، فرآیندی که از نور برای تسریع یک واکنش نوری از طریق یک فوتوکاتالیست استفاده می‌کند، رویکردی نوآورانه برای تخریب آلاینده‌ها در فاضلاب ارائه می‌دهد. علاوه بر این، چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) جاذب‌های بسیار کارآمدی هستند که انتخابی‌پذیری عالی و ظرفیت جذب برای حذف فلزات سنگین از آب ارائه می‌دهند. جذب مبتنی بر MOF به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی مطلوب، مقرون‌به‌صرفه و کارآمد در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های آب مانند فلزات سنگین، رنگ‌های آلی و ترکیبات آلی پایدار ثابت شده است.

آخرین تحولات در فناوری جدید تصفیه فاضلاب در این مرور بررسی شده است. هدف، ارائه یک مرور جامع از جدیدترین پیشرفت‌ها در تصفیه فاضلاب با تمرکز بر پتانسیل استراتژی‌های نوآورانه برای دستیابی به اهداف مدیریت پایدار آب است. علاوه بر این، یک حوزه امیدوارکننده که توانایی تغییر کامل نحوه مدیریت و کاهش مشکلات زیست‌محیطی را دارد، ارتباط بین تصفیه فاضلاب، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی است. بنابراین، تحقیق تأکید کرد که با بهبود اثربخشی، دقت و خودکارسازی عملیات تصفیه فاضلاب، ادغام فناوری هوش مصنوعی یک پارادایم جدید برای مقابله با این مسائل ارائه می‌دهد. این ارزیابی تلاش می‌کند تا سیاست‌گذاران، محققان و متخصصان صنعت را در مورد امیدوارکننده‌ترین رویکردها برای مقابله با پیچیدگی‌های تصفیه فاضلاب با استفاده از آخرین پیشرفت‌های فناوری آگاه سازد.

بیشتر فاضلاب تولید شده توسط فرآیند تولید و اکتشاف میادین نفت و گاز به عنوان آب تولیدی (PW) شناخته می‌شود و شامل انواع هیدروکربن‌ها به صورت آزاد، پراکنده و محلول است. PW حاوی مخلوط پیچیده‌ای از مواد معدنی و آلی، از جمله واکس‌ها، رادیونوکلئیدها، اکسیژن محلول، جامدات سازند، نفت حل شده و پراکنده، فلزات سنگین، مواد شیمیایی تصفیه، گازهای محلول، نمک‌ها و میکروارگانیسم‌ها است. میادین گاز و نفت روزانه ۲۵۰ میلیون بشکه آب تولید می‌کنند که بیش از ۴۰ درصد آن در سراسر جهان به محیط‌زیست رها می‌شود. این رهاسازی PW به دلیل تصفیه ناکافی، خطر جدی برای آلودگی آب‌های سطحی، خاک و زیرزمینی ایجاد می‌کند. در نتیجه، از فناوری‌های مختلفی که در دسته‌های روش‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی قرار می‌گیرند، برای تصفیه PW استفاده می‌شود. فناوری‌هایی مانند انعقاد، جداسازی غشایی، اکسیداسیون شیمیایی، تجزیه میکروبی، فیلتراسیون و اکسیداسیون الکتروشیمیایی می‌توانند در حذف آلودگی از محیط مؤثر باشند. با این حال، این روش‌ها دارای معایبی از جمله هزینه بالا، تولید آلاینده‌های ثانویه و حذف ناکارآمد هستند. جذب به عنوان یک روش سازگار با محیط‌زیست، اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه و بازیابی آب تولیدی ارائه شده است. این روش یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های سنتی برای این منظور در نظر گرفته می‌شود و شامل حذف آلاینده‌های بیولوژیکی، آلی و معدنی است. می‌تواند جایگزین سایر روش‌های تثبیت شده برای تصفیه آلودگی فاضلاب شود. تطبیق‌پذیری آن به آن اجازه می‌دهد که به روش‌های متعددی اعمال شود. راندمان حذف آن بیش از ۹۹٪ است و جداسازی ترکیبات مورد نظر از یک محلول رقیق آسان است. همچنین در برابر مواد سمی مقاوم است و می‌تواند به راحتی از مواد جذب شده با استفاده از تکنیک‌های مختلف مانند عوامل دفع‌کننده، شستشو با استفاده از معرف‌های شیمیایی، فرآیندهای بیولوژیکی و عملیات حرارتی بازیابی شود. بسیاری از جاذب‌ها، از جمله زئولیت‌ها، کربن‌های فعال، آلومینای فعال و مواد ارزان قیمت مانند پیت، سنگ آهک و خاکستر پوسته برنج، می‌توانند در فرآیند جذب استفاده شوند. در میان جاذب‌ها، کربن فعال به عنوان پرکاربردترین ماده شناخته می‌شود. کربن فعال (AC) یک جامد آمورف، میکروکریستالی و غیرگرافیکی با نسبت سطح به حجم بالا، پایداری مکانیکی بالا، پایداری نوری بالا، پایداری حرارتی بالا، ساختار متخلخل و جامد و خلوص بالا است. علاوه بر این، AC به دلیل ظرفیت

بالای جذب گونه‌های مختلف، می‌تواند به عنوان جاذب برای حذف یون‌ها و آلاینده‌های آلی از فاضلاب استفاده شود. تکنیک‌های نوآورانه تصفیه فاضلاب شامل روش‌های مختلفی مانند الکتروانققاد، رویکردهای هیبریدی، فناوری نانو، فناوری غشایی و تولید ازن از طریق الکترولیز آب یا تخلیه کرونا است. هدف اصلی این فناوری‌ها حذف آلاینده‌ها و سموم مضر از فاضلاب، از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها، فلزات سنگین، هورمون‌ها، داروها، رنگ‌های مصنوعی و مواد بازدارنده شعله است. تکنیک‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی شامل انعقاد-لخته‌سازی، اکسیداسیون الکتروشیمیایی، فیلتراسیون غشایی، استخراج با حلال، تبادل یونی، رسوب‌گذاری، جذب، اکسیداسیون کاتالیستی و تخریب نوری در این فرآیند استفاده می‌شود، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. ادغام نانوذرات در این تکنیک‌ها به طور مؤثر تعدادی از آلاینده‌ها را حذف کرده است. با این حال، مصرف بالای انرژی این فناوری‌ها می‌تواند منجر به هزینه‌های بالا شود.

شکل ۱: فناوری‌های پیشرفته تصفیه فاضلاب



۳. حذف ترکیبات آلی

محیط‌های آبی حاوی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی هستند. این آلاینده‌ها را می‌توان به گروه‌هایی مانند هیدروکربن‌ها، نرم‌کننده‌ها، ارگانوهایلدها، سورفکتانت‌ها، رنگ‌ها و ترکیبات فنلی

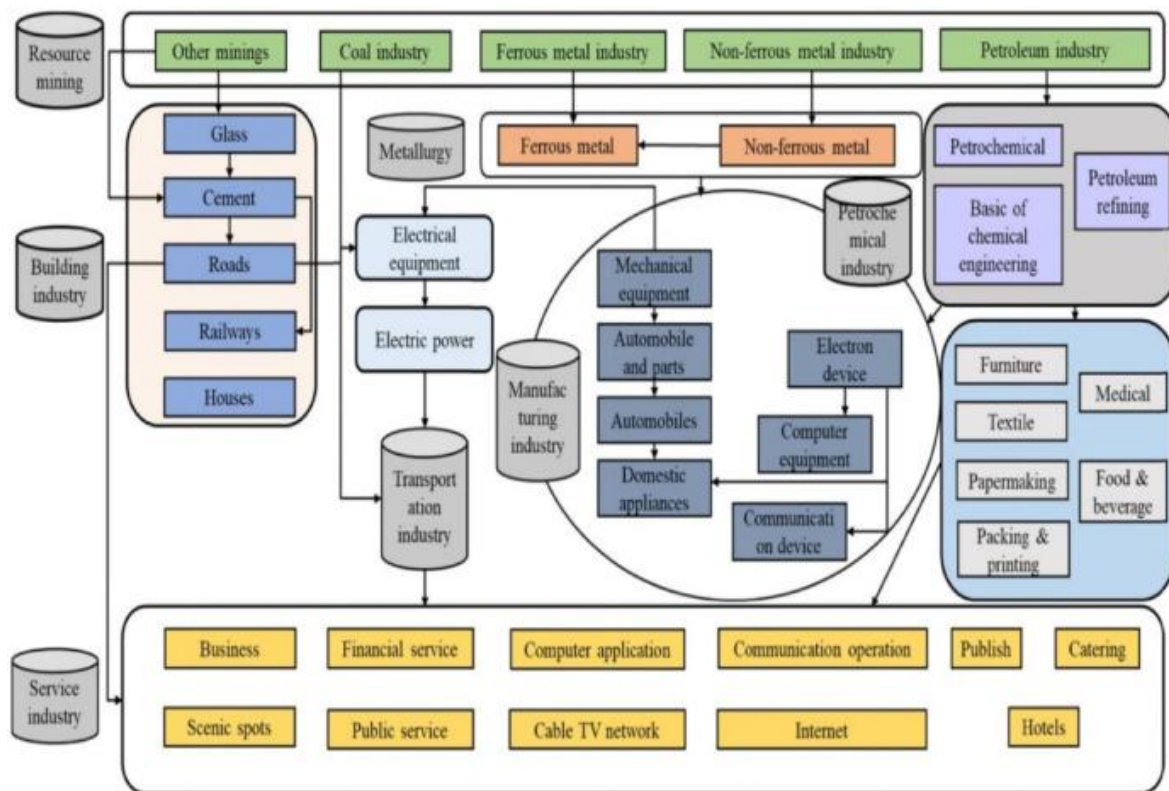
تقسیم کرد. تجزیه این آلاینده‌های آلی برای آب دشوار است، سمی، بالقوه سرطان‌زا و از نظر شیمیایی پایدار هستند. فرانک و بارد اولین بار در مورد تخریب نوری سیانید در آب بر روی TiO_2 کار کردند. پس از آن، کری گزارش داد که TiO_2 در زیر نور UV می‌تواند تخریب بی‌فیل‌های پلی‌کلره را کاتالیز کند، که پایه‌های تحقیقات آینده فوتوکاتالیز را پایه‌گذاری کرد. عملکرد اکسیداسیون تجزیه‌کننده مواد فوتوکاتالیستی نیمه‌رسانا برای آلاینده‌های آلی به طور رسمی توسط اولیس و همکاران ارائه شد و این کشف، زمینه تحقیقات آلودگی آلی را به یکی از شلوغ‌ترین زمینه‌ها تبدیل کرد. انواع نیمه‌رساناها، از جمله TiO_2 ، ZnO ، Fe_2O_3 ، C_3N_4 و نیمه‌رساناهای مبتنی بر بیسموت، به طور کلی در تجزیه طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی به ترکیبات قابل تجزیه بیولوژیکی یا کمتر سمی مؤثر بوده‌اند که سپس بیشتر به CO_2 و H_2O بی‌خطر معدنی می‌شوند.

۳.۱. هیدروکربن‌های نفتی

نفت یک منبع با ارزش است که در تولید بسیاری از مواد شیمیایی و انرژی استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بی‌احتیاطی در مراحل استخراج، حمل‌ونقل، فرآوری، ذخیره‌سازی و مصرف می‌تواند منجر به آلودگی شدید و اغلب غیرقابل برگشت محیط‌زیست شود. مخلوط پیچیده‌ای از صدها مولکول مختلف، عمدتاً هیدروکربن‌ها، نفت خام را تشکیل می‌دهند. مشخص شده است که نفت خام حاوی مقادیر ناچیزی از بسیاری از عناصر، از جمله نیتروژن (۰.۵٪-۰٪)، گوگرد (۰.۶٪-۰٪)، اکسیژن (۰.۵٪-۰.۵٪) و برخی فلزات است. ترکیبات با تنها کربن و هیدروژن در ساختار خود به عنوان

هیدروکربن‌های آروماتیک یا آروماتیک‌ها شناخته می‌شوند و همگی برای سیستم عصبی مرکزی مضر هستند. علاوه بر این، آلاینده‌های نفتی به دلیل سمیت، جهش‌زایی و سرطان‌زایی به عنوان یک تهدید عمده برای سلامت انسان و محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شوند. از جمله ترکیبات طبیعی نفت خام و بنزین، هیدروکربن‌های نفتی مانند بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن هستند. این ترکیبات اغلب در آب‌های سطحی و زیرزمینی به دلیل فعالیت‌های صنعتی، به ویژه جابجایی پتروشیمی‌ها، نشت مخازن یا روش‌های دفع نامناسب زباله یافت می‌شوند. فعالیت‌ها و بازده منظم پالایشگاه ممکن است تحت تأثیر غلظت بالای ترکیبات نفتی و لجن فعال قرار گیرد که نمی‌توانند به طور مؤثر توسط روش‌های مبتنی بر فرآیندهای استاندارد تصفیه فاضلاب حذف شوند. فرآیندهای مورد استفاده برای

حذف نباید آلاینده‌های ثانویه خطرناکی را علاوه بر فاضلاب در حداکثر مقدار مجاز برای رهاسازی در محیط تولید کنند. برای تصفیه بیشتر، خروجی فیلتراسیون فاضلاب توسط انعقاد و لخته‌سازی شناورسازی با هوای محلول (DAF) می‌تواند به یک راکتور بیولوژیکی منتقل شود. در حالی که تکنیک‌های پیشرفته انعقاد مانند لخته‌سازی و الکتروانعقاد نسبت به تکنیک‌های سنتی فیزیکی و شیمیایی پیشرفته‌تر هستند، عیب اصلی آن‌ها مقادیر زیاد لجن خطرناکی است که اغلب مقاومت می‌کند و قابل بازیابی نیست. مقادیر زیادی از ترکیبات نفتی را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های جداسازی فیزیکی جدا کرد و در برخی موارد، این ترکیبات را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مختلف بازیافت کرد. عیب اصلی این تکنیک‌ها مصرف بالای انرژی و همچنین گرفتگی و مسدود شدن مکرر ابزارها و تجهیزات مختلف است. هدف استفاده مجدد از آب را می‌توان با تصفیه ثالثیه با استفاده از تکنیک‌هایی مانند اکسیداسیون پیشرفته، اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون بیشتر محقق کرد. جذب یک تکنیک حیاتی است که با مواد معدنی و با کیفیت بالا کار می‌کند که می‌توانند با مواد ارزان قیمت و جاذب‌ها ترکیب شوند. علاوه بر کاهش مقدار لجن تولید شده، هزینه فرآیند را می‌توان با ترکیب فرآیند جذب با یکی از تکنیک‌های پیشرفته‌تر کاهش داد. گزارش‌های متعدد از منابع مختلف آب زیرزمینی منجر به شناسایی هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای شده است. قابل توجه است که ارتباط با صنعت (شکل ۲).



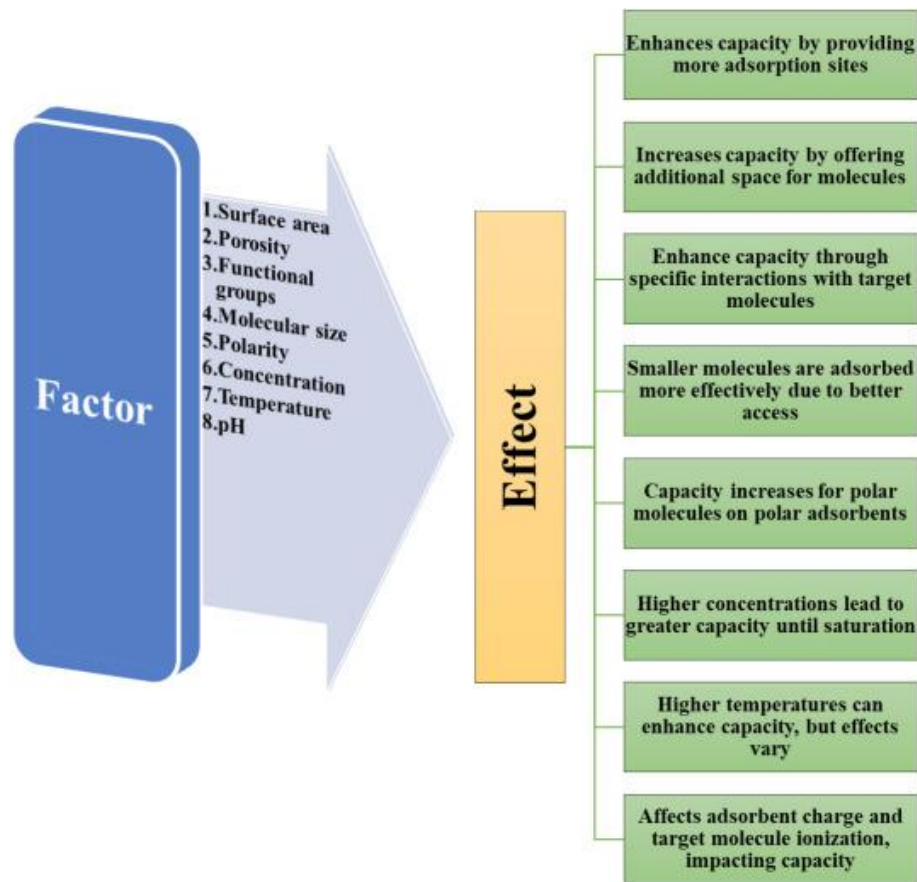
شکل ۲: روابط صنعت پتروشیمی و سایر صنایع

در مدیریت محیط‌زیست، حذف هیدروکربن‌های نفتی از آب بسیار مهم است، به ویژه در مناطق تحت تأثیر نشت نفت، تخلیه‌های صنعتی یا رواناب ناشی از فعالیت‌های مرتبط با نفت. مقدار آبی که باید تصفیه شود، نوع و غلظت هیدروکربن‌های موجود، ملاحظات مالی و الزامات نظارتی همگی در انتخاب فناوری برای حذف هیدروکربن‌های نفتی از آب نقش دارند. برای دستیابی به بهترین نتایج، اغلب از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. برای اطمینان از اینکه آب پس از تصفیه، معیارهای ایمنی و محیط‌زیستی را برآورده می‌کند، پایش و ارزیابی مداوم بازده تصفیه ضروری است. حذف کارآمد این آلاینده‌ها از آب با استفاده از روش‌های مختلف تصفیه امکان‌پذیر است. خلاصه‌ای از برخی روش‌های معمول در زیر آورده شده است.

۳.۱.۱. روش‌های فیزیکی

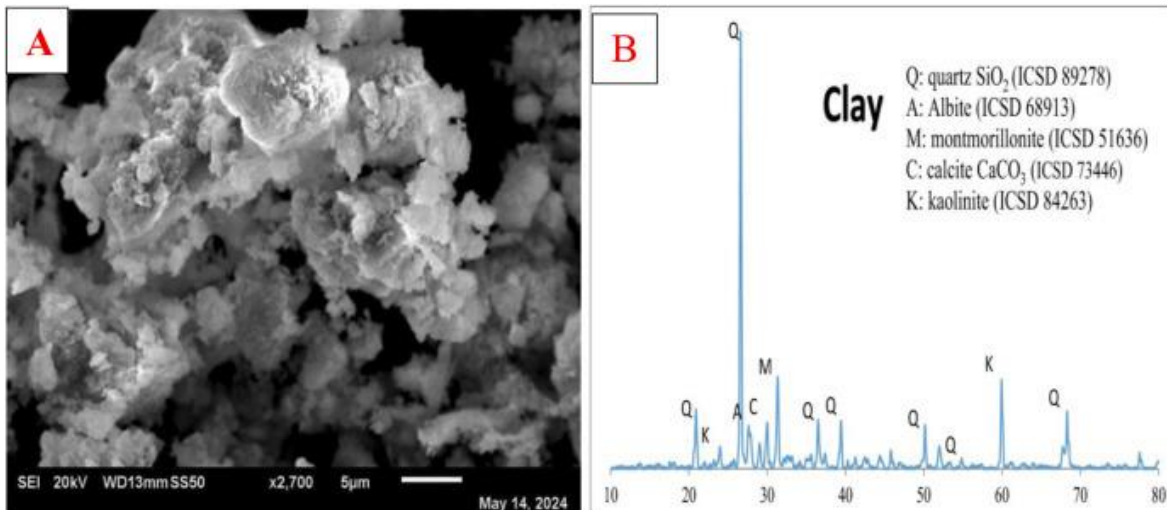
جذب: آب حاوی هیدروکربن‌های نفتی را می‌توان با استفاده از جاذب‌هایی مانند کربن فعال استخراج کرد. مولکول‌های هیدروکربن به سطح جاذب جذب می‌شوند. سیالات با استفاده از جاذب‌ها، مواد یا مخلوط‌های مواد نامحلول در طول جذب، اتصال فیزیکی یا هر دو بازیابی می‌شوند. جاذب‌ها باید ضد آب و قادر به جذب مولکول‌های روغن باشند. جاذب‌ها اغلب برای حذف تله نهایی روغن استفاده می‌شوند، اگرچه می‌توانند تنها راه حل تمیز کردن برای نشت‌های جزئی باشند. جاذب‌ها همچنین مزیت کاهش سرعت پخش لایه و کمک به تمیز کردن آن را دارند. سه دسته اصلی از مواد جاذب عبارتند از: آلی، معدنی و ترکیبی. مواد آلی طبیعی مانند مونوکسید کربن، نیتروژن، خاک اره، علف خشک، چوب ذرت، پر و سایر مواد عمدتاً کربن‌خوانا نمونه‌هایی از جاذب‌های آلی هستند. اگرچه جاذب‌های آلی می‌توانند تا ۱۵ برابر وزن خود روغن جذب کنند، اما استفاده از آن‌ها معایبی دارد. برخی از جاذب‌های آلی تمایل به جذب آب تقریباً به اندازه روغن دارند. جذب در نتیجه این امر غرق می‌شود. ذراتی مانند خاک اره که جمع‌آوری آن‌ها پس از پخش شدن در سطح آب دشوار است، توسط بسیاری از جاذب‌های آلی از دست می‌روند. جاذب‌های معدنی طبیعی می‌توانند تا ۲۰ برابر وزن خود روغن جذب کنند. مشابه جاذب‌های آلی، جاذب‌های معدنی به مقدار زیاد و با قیمت مناسب در دسترس هستند. سطح آب از این نوع جاذب‌ها استفاده نمی‌کند. مواد مصنوعی که پلاستیک‌ها را تقلید می‌کنند، از جمله پلی‌اورتان، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، نمونه‌هایی از جاذب‌های ترکیبی هستند. این مواد برای جذب مایعات روی سطح خود طراحی شده‌اند و معمولاً به شکل اسفنج استفاده می‌شوند. جاذب‌های ترکیبی دیگر شامل پلیمرهای لاستیکی و جمع‌شونده هستند که مایعات را روی ساختارهای جامد خود جذب کرده و باعث تورم مواد جاذب می‌شوند. جاذب‌های کامپوزیتی می‌توانند تا ۷۰ برابر وزن خود روغن جذب کنند. هنگام انتخاب جاذب‌ها برای تمیز کردن نشت‌ها، باید ویژگی‌های جاذب و انواع روغن را در نظر گرفت. فرآورده‌های نفتی سبک باعث جذب سریع‌تر روغن می‌شوند. علاوه بر این، روغن‌های با لایه ضخیم‌تر با موفقیت بیشتری به سطوح می‌چسبند. هنگام بازیابی مواد آب‌بندی، روغن سبک‌تر با ویسکوزیته کمتر نسبت به روغن سنگین‌تر با ویسکوزیته بالاتر که منجر به آلودگی ثانویه می‌شود، **easier to handle** است. اگرچه تکنیک‌های جذب برای تصفیه فاضلاب پیشرفت قابل توجهی داشته است، اما هنوز موانع و محدودیت‌هایی وجود دارد که

باید برطرف شوند. ظرفیت جذب، انتخابی‌پذیری و اتصال غیراختصاصی، تخریب و پایداری مواد، بازیابی و قابلیت استفاده مجدد جاذب، مقرون به صرفه بودن اقتصادی و مسائل زیست‌محیطی و نظارتی از جمله این محدودیت‌ها هستند. اثربخشی و کارایی روش‌های جذب برای تصفیه فاضلاب با ظرفیت جذب آن‌ها تعیین می‌شود. مقدار جذب شونده‌ای که یک جرم خاص از جاذب می‌تواند در شرایط خاص جذب کند، ظرفیت جذب نامیده می‌شود. ویژگی‌های جاذب (مانند سطح، تخلخل و گروه‌های عاملی)، جذب شونده (مانند قطبیت، غلظت و اندازه مولکولی) و شرایط جذب (مانند زمان تماس، pH و دما) همگی بر ظرفیت جذب تأثیر می‌گذارند (شکل ۳).



شکل ۳: عوامل مؤثر بر ظرفیت جذب و پیامدهای آن

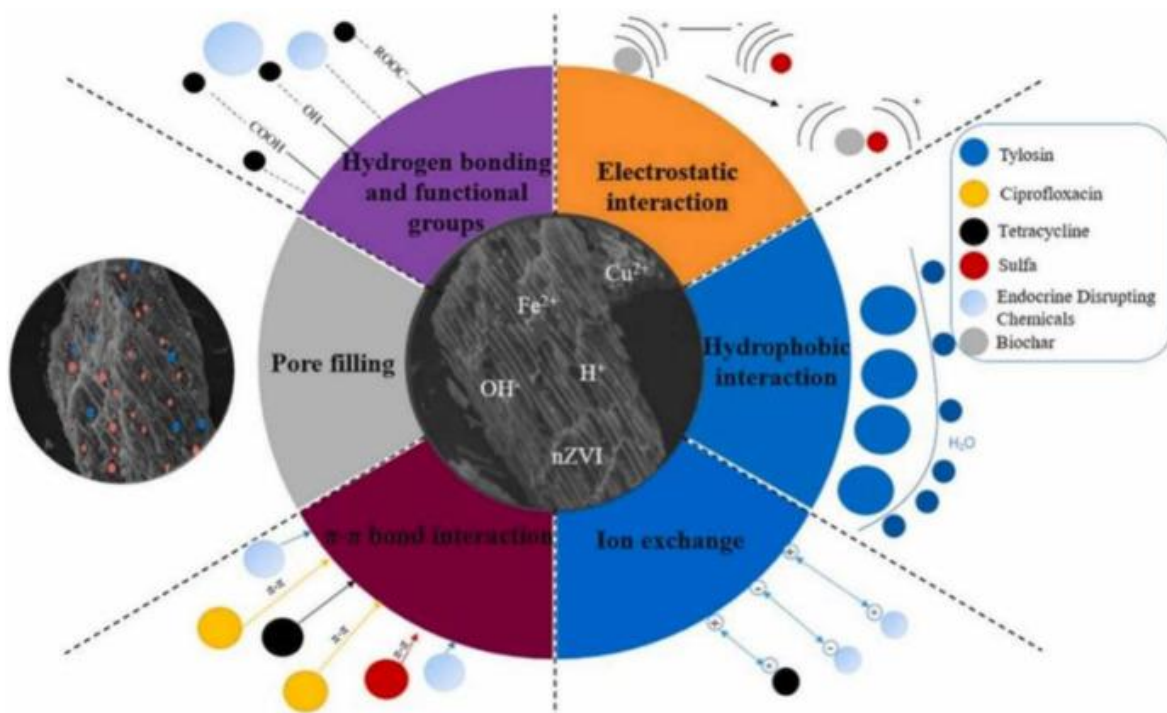
داود و همکاران نشان دادند که خاک رس طبیعی اصلاح‌شده (MC) یک جاذب امیدوارکننده، سازگار با محیط‌زیست و مقیاس‌پذیر برای تصفیه پیشرفته آب است. این مطالعه یک روش جدید و پایدار برای تصفیه آب با حذف یون‌های نیترات و آلاینده‌های آلی خطرناک با استفاده از خاک رس طبیعی پایدار حرارتی ارائه می‌دهد. این فرآیند ترکیبی از بازسازی حرارتی و جذب برای تضمین راندمان حذف بالا و قابلیت استفاده مجدد است. مواد دارویی (فنازوپیریدین و تتراسایکلین)، رنگ‌های صنعتی (متیل اورانژ و متیلن بلو) و یون‌های نیترات از جمله آلاینده‌های مورد بررسی هستند. این مواد بر اساس سمیت، پایداری و مقاومت در برابر روش‌های تصفیه استاندارد انتخاب شدند. راندمان حذف بالا در مطالعات جذب دسته‌ای انجام شده در شرایط ایده‌آل ($\text{pH} \approx 4$ ، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و غلظت آلاینده بین ۱۰ تا ۴۰ میلی‌گرم در لیتر) یافت شد. این بازده‌ها برای آلاینده‌های آلی بین ۸۴ تا ۹۳ درصد و برای نیترات ۸۹ درصد متغیر بود. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (XRD) برای تعیین ویژگی‌های ترکیبی و ساختاری که می‌تواند قابلیت‌های جذب آن را توجیه کند، مشخص شد (شکل ۴). بررسی XRD ساختار کریستالی این مواد معدنی را تأیید کرد که تصویر واضحی از ترکیب کانی‌شناسی MC ارائه داد. علاوه بر این، تصاویر SEM بزرگ‌نمایی از MC ها را نشان دادند که اطلاعات مهمی در مورد اندازه، شکل، ترکیب و کریستالوگرافی آن‌ها ارائه می‌داد.



شکل ۴: الف) الگوهای پراش اشعه ایکس از خاک رس کلسینه طبیعی. ب) تصاویر SEM از MC ها

مطالعات آینده باید بر بهینه‌سازی شرایط تجزیه حرارتی، ارزیابی این روش بر روی فاضلاب واقعی و گسترش کاربرد آن به طیف گسترده‌تری از آلاینده‌های جدید متمرکز شود. این روش یک راه‌حل واقع‌گرایانه و بلندمدت برای دستیابی به اهداف آب پاک به طور گسترده‌تر ارائه می‌دهد.

علاوه بر این، کان و همکاران نشان دادند که آزادسازی آلاینده‌های آلی میکرو جذب شده مضرتر از تماس مستقیم با ماهی قرمز است و نانولوله‌های کربنی کربوکسیله چنددیواره می‌توانند به کبد و آبشش ماهی قرمز آسیب برسانند. بر اساس تحقیقات اخیر، نانولوله‌های کربنی می‌توانند از رشد کاردیومیوسیت‌های موش جلوگیری کنند و برای حیوانات از آزمون و کوارتز سمی‌تر هستند. تمایل به تجمع در آب که بازیافت را دشوار می‌کند و هزینه‌های تولید رو به افزایش، کاربرد گسترده نانولوله‌های کربنی را بیشتر مختل می‌کند. گرافن به دلیل سطح ویژه بزرگ و فراوانی کانال‌های منافذ، حذف ناخالصی‌ها را تسهیل می‌کند. به گفته شو و همکاران، گرافن بیسفنول A (BPA, $C_{15}H_{16}O_2$) را بسیار کارآمدتر از سایر ترکیبات کربنی حذف کرد. به گفته چن و همکاران، گرافن تیمار شده با اسیدهای آمینه بیشترین توانایی را در جذب سولفامتوگسازول نشان داد. با این حال، آزمایشات نشان داده است که گرافن دارای اثرات بزرگنمایی زیستی قوی است. متابولیسم بیولوژیکی را مختل می‌کند و از طریق زنجیره غذایی در موجودات زنده تجمع می‌یابد. غلظت بالای گرافن در روده حلزون‌های آب شیرین و ماهی گورخری توسط لو و همکاران و سو و همکاران کشف شد. گرافن رسوب کرده در معرض خون و سلول‌ها قرار گرفت که متابولیسم بیولوژیکی را مختل کرد. مطالعات موجود نشان داده است که گرافن با وجود اطلاعات اندک در مورد اثرات گرافن بر انسان، یک خطر بالقوه برای انسان ایجاد می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵: مکانیسم جذب آلاینده‌های آلی میکرو از طریق کربن فعال زیستی

۳.۱.۲. روش‌های شیمیایی

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) هیدروکربن‌های نفتی توسط اکسیدان‌های قوی مانند پراکسید هیدروژن یا ازن که در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) استفاده می‌شوند، به مواد شیمیایی کم‌خطرتر تجزیه می‌شوند. این تکنیک برای **handling** مخلوط‌های پیچیده هیدروکربنی به خوبی کار می‌کند. علاوه بر این، AOPها رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) تولید می‌کنند که در اکسیداسیون آلاینده‌های مقاوم مؤثر هستند. $\text{OH}^\bullet$ پتانسیل اکسیداسیون استاندارد بالایی تا ۲.۸۰ ولت و سرعت واکنش بالایی در مقایسه با اکسیدان‌های معمولی مانند پرمنگنات پتاسیم، اکسیژن، کلر، ازن یا H_2O_2 دارد. بنابراین، هنگامی که $\text{OH}^\bullet$ با املاح معدنی و آلی واکنش می‌دهد، می‌توان به ثابت‌های سرعت بالا دست یافت. به طور کلی، AOPها از قابلیت‌های اکسیدان‌های مختلف برای تجزیه آلاینده‌های خطرناک با تبدیل آن‌ها از اشکال کاهش یافته به اشکال اکسید شده نهایی ایمن استفاده می‌کنند. به منظور کاهش اثرات منفی بر محیط زیست ناشی

از دفع آلاینده‌های اصلی در اکوسیستم آبی، این فرآیند آلاینده‌ها را به مواد بی خطر معدنی و تجزیه می‌کند. علیرغم اینکه این سیستم‌ها از اکسیدان‌های مختلفی استفاده می‌کنند، همگی معمولاً رادیکال‌ها را به یک روش تولید می‌کنند. این روش‌ها پتانسیل بالایی برای حذف آلاینده‌های آب دارند که حذف آن‌ها با روش‌های بیولوژیکی دشوار است. تشکیل $\text{OH}\cdot$ اکسیدان‌های قوی و در بهترین حالت، برهمکنش این رادیکال‌ها با آلاینده‌های هدف برای تبدیل آن‌ها به کربن و آب، دو مرحله اصلی AOP ها هستند H_2O_2 . زمانی ایجاد می‌شود که دو $\text{OH}\cdot$ با هم تماس پیدا کنند، همانطور که در معادله زیر نشان داده شده است:



دو مزیت اصلی AOP ها نسبت به سایر گزینه‌ها عبارتند از (i): خواص ضد عفونی کننده قوی آن‌ها که در بسیاری از موقعیت‌ها مفید است، و (ii) توانایی آن‌ها در نابودی مستقیم آلاینده‌های آلی. به عنوان مثال، اگر متیل ترت-بوتیل اتر از طریق استریپینگ حذف شود، ممکن است برای درمان موفق به مراحل اضافی مانند اکسیداسیون کاتالیستی نیاز باشد. با این حال، AOP ها آلاینده‌های آلی را مستقیماً حذف می‌کنند و نیاز به عملیات شیمیایی اضافی را برطرف می‌کنند. با این وجود، AOP ها تحت تأثیر تولید محصولات جانبی اکسیداسیون ناخواسته قرار می‌گیرند. سرعت واکنش کند این محصولات جانبی اکسیداسیون باعث تأخیر در معدنی سازی و تجمع ناخواسته می‌شود. علاوه بر این، برخی از AOP ها منجر به تشکیل ترکیبات معدنی می‌شوند، به عنوان مثال زمانی که از ناسیون برمید را به برمات تبدیل می‌کند. این مواد معدنی واکنش‌های اکسیداسیون را مسدود کرده و با AOP ها تداخل می‌کنند. این مواد $\text{OH}\cdot$ را که برای حذف و نابودی آلاینده‌های مربوطه در نظر گرفته شده‌اند، scavenge می‌کنند. در نتیجه، باید به مشکل scavenger های رادیکال و احتمال تولید مشتقات میانی نامطلوب از اشکال اکسید شده آلاینده‌ها پرداخته شود pH. بر غلظت رادیکال و تعادل اسید-باز مربوط به تولید $\text{OH}\cdot$ تأثیر می‌گذارد. دو عامل مهم در طراحی و ساخت سیستم‌های AOP کارآمد باید در نظر گرفته شود. اول، دوز شیمیایی، که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و ممکن است منجر به توسعه محصولات جانبی شود. دوم، باید پیکربندی راکتور و مدت زمان تماس را در نظر گرفت که اغلب در حین انجام یک مطالعه پایلوت به جای آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی تصمیم‌گیری

می‌شود. کارایی تخریب آلاینده‌های مورد نظر نیز تحت تأثیر کیفیت فاضلاب صنعتی و سایر عوامل عملیاتی است. به خوبی شناخته شده است که اکثر مواد آلی با رادیکال‌های اضافه شده واکنش نشان می‌دهند. میزان کدورت فاضلاب صنعتی بر توانایی آب در جذب نور UV تأثیر می‌گذارد که به نوبه خود بر کارایی سیستم تأثیر می‌گذارد.

۳.۱.۳. روش‌های بیولوژیکی

زیست‌درمانی: این فرآیند آلی از میکروارگانیسم‌ها (قارچ‌ها و باکتری‌ها) استفاده می‌کند که می‌توانند هیدروکربن‌های نفتی را به ترکیبات کم‌سمیت‌تر تجزیه کنند. با معرفی سوبه‌های میکروبی خاص یا مواد مغذی برای تشویق رشد میکروبی، می‌توان زیست‌افزایشی یا زیست‌تحریکی را بهبود بخشید. مطالعات متعدد نشان داده است که در اکوسیستم‌های آبی و خشکی، میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، مخمرها و قارچ‌ها) نقش عمده‌ای در تجزیه ترکیبات آلاینده، از جمله هیدروکربن‌ها دارند. هیدروکربن‌ها باید بتوانند به عنوان بسترهای اولیه توسط میکروارگانیسم‌های انتخابی پذیرفته شوند. این میکروب‌ها باید بتوانند آنزیم‌هایی تولید کنند که می‌توانند فرآیند هضم هیدروکربن را تسریع کنند و اطمینان حاصل کنند که هر گونه محصول جانبی سمی که تولید می‌کنند به محیط زیست آسیب نمی‌رساند. با این حال، هیچ میکروبی نمی‌تواند به تنهایی نفت خام را به طور کامل توزیع کند. در طول فرآیند تقطیر نفت خام، یک سری واکنش‌های زنجیره‌ای رو به جلو رخ می‌دهد که در آن میکروب‌های خاص ابتدا مولکول‌های نفت را هدف قرار می‌دهند. مواد شیمیایی میانی تولید شده توسط این روش به استفاده از یک کلاس متفاوت از میکروب‌ها نیاز دارد. کربن حاصل از آلودگی می‌تواند به عنوان منبع انرژی توسط میکروارگانیسم‌های بومی محلی (LMOs) در زمین و آب‌های زیرزمینی مناطق نفتی استفاده شود. این میکروارگانیسم‌ها در طول زمان با این شرایط سازگار شده‌اند. آلاینده‌ها توسط این میکروارگانیسم‌ها به محصولات نهایی (دی‌اکسید کربن و آب) تبدیل می‌شوند. مانند سایر روش‌های تصفیه، زیست‌درمانی یک استراتژی قابل دوام برای غلبه بر تمام چالش‌های مربوط به تصفیه موفقیت‌آمیز هیدروکربن‌های نفتی در نظر گرفته می‌شود. اما معایب قابل توجهی نیز دارد، مانند ناتوانی در پاکسازی کامل و حذف PWHC ها از خاک‌های آلوده. برخی از هیدروکربن‌های موجود در خاک‌های آلوده به PWHC می‌توانند به طور کامل تجزیه شوند،

در حالی که برخی دیگر به دلیل ماهیت پایدار برخی از مواد شیمیایی موجود، در برابر فرآیند طبیعی تجزیه مقاوم هستند و غیرقابل تجزیه هستند. به طور مشابه، این روش ممکن است برای پاکسازی زیرسطحی اشباع (در شرایط بدون اکسیژن) به خوبی کار نکند. علاوه بر این، این استراتژی نمی‌تواند از آلودگی PWHC آب‌های زیرزمینی جلوگیری کند.

۳.۱.۴. روش‌های الکتروشیمیایی

الکتروانقذاد یک روش الکتروشیمیایی است که در تصفیه و پالایش فاضلاب موفق بوده است. علیرغم کارایی بالا و سازگاری با محیط‌زیست این فرآیند، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی قابل توجه، کاربرد صنعتی آن را کمتر از حد امیدوارکننده کرده است. معایب اصلی انقذاد الکتریکی و شیمیایی شامل تولید مقادیر زیادی لجن سمی است که قابل بازیابی نیست و اغلب دفع می‌شود. ترکیب عنصری لجن نفتی شامل $Fe, P, Pb, Cu, Zn, Ca, Mg, Cd, K$ و N است. لجن نفتی یک ترکیب پیچیده است که حاوی مقادیر متفاوتی از روغن زباله، فاضلاب، ماسه و ذرات معدنی است. شرکت‌های نفتی مقادیر قابل توجهی لجن تولید می‌کنند که منبع اصلی آلودگی محیط‌زیست است. لجن‌های روغنی به عنوان زباله‌های خطرناک تحت قانون حفاظت از محیط‌زیست و قوانین **handling** مواد زائد خطرناک طبقه‌بندی می‌شوند. حتی اگر روغن‌زدایی شوند، این لجن‌ها را نمی‌توان در محل‌های دفن زباله دفع کرد مگر اینکه به طور کامل تصفیه شوند. لجن‌های تولید شده توسط صنعت نفت در مخازن نفت خام، مخازن محصولات پالایشگاه، نمک‌زدای‌ها و مکان‌های دیگر در طول تولید و فرآوری نفت تجمع می‌یابند. لجن‌هایی با روغن قابل بازیابی کمتر از ۴۰ درصد به عنوان لجن با روغن کم طبقه‌بندی می‌شوند. این لجن‌ها باید قبل از دفع تصفیه و بی‌خطر شوند. کارایی فرآیند الکتروانقذاد (ECP) اغلب برای تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده به نفت ارزیابی می‌شود و به عنوان کل هیدروکربن‌های نفتی (TPH) استخراج شده توسط مواد الکترود (عمدتاً آلومینیوم، آهن و فولاد) بیان می‌شود. بالاترین حذف TPH با اتخاذ پیکربندی الکترود فولاد-آهن به عنوان آند-کاتد به دست آمد. در بیشتر موارد، آزمایشات دسته‌ای و پیوسته نشان داد که ECP می‌تواند به طور مؤثر TPH را از آب حذف کند و آن را به یک فناوری بالقوه برای تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده به نفت تبدیل می‌کند. نمونه‌ای از موارد فوق، مطالعه منتشر شده‌ای است که از تکنیک الکتروانقذاد برای حذف کدورت از فاضلاب پتروشیمی

استفاده کرده است. آزمایشات دسته‌ای با مقادیر مختلف چگالی جریان، غلظت NaCl و زمان الکترولیز انجام شد و حداکثر بازده حذف کدورت 97.43% بود. علاوه بر این، مطالعه دیگری به بررسی تصفیه فاضلاب روغنی پالایشگاه گاز با الکتروانعقاد با استفاده از الکترودهای آلومینیومی پرداخت و تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی گازی فاضلاب خام و تصفیه‌شده نشان داد که بیشتر هیدروکربن‌های معمولی (نزدیک به 99%) در طول فرآیند حذف شدند. وارما و همکاران انعقاد-لخته‌سازی را به عنوان یک روش پیش تصفیه برای فاضلاب اسید ترفتالیک خالص (PTA) مطالعه کردند. تأثیر انعقادکننده‌های مختلف معدنی و آلی بر تصفیه فاضلاب با استفاده از فاضلاب جمع‌آوری‌شده از مخزن یکسان‌سازی جریان یک کارخانه تصفیه پساب مورد بررسی قرار گرفت. خواص ته‌نشینی و فیلتراسیون لجن نیز مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات jar نشان داد که فاضلاب زمانی بهترین تصفیه را دارد که 3000 میلی‌گرم در لیتر کلرید آهن در $\text{pH } 5.6$ اضافه شود. در شرایط بهینه، COD فاضلاب 75.5% کاهش یافت. فیلتراسیون گرانشی فاضلاب تصفیه‌شده نشان داد که افزودن پلی‌آکریل آمید کاتیونی (175 میلی‌گرم در لیتر) به انعقاد کلرید آهن، خواص فیلتراسیون را افزایش داده و مقاومت ویژه کیک را کاهش می‌دهد. کمک قابل توجه دیگری توسط ال-آشتوخی و همکاران انجام شد که استفاده از الکتروانعقاد را برای حذف ترکیبات فنلی از پساب زباله پالایشگاه نفت با استفاده از یک راکتور الکتروشیمیایی با آند بستر ثابت ساخته شده از حلقه‌های آلومینیومی راشینگ با جهت‌گیری تصادفی که در یک سبد پلاستیکی سوراخ‌دار در بالای کاتد افقی قرار داشت، بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که شرایط بهینه برای حذف ترکیبات فنلی چگالی جریان = 8.59 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، $\text{pH } 7$ ، غلظت $\text{NaCl } 1$ گرم در لیتر و دما = 25 درجه سانتی‌گراد بود. پس از 2 ساعت، 100% از جزء فنل از فاضلاب واقعی پالایشگاه با غلظت 3 میلی‌گرم در لیتر حذف شد. در مقایسه با سایر طرح‌های سلولی مورد استفاده در آزمایشات قبلی، طرح جدید آند سلول الکتروانعقاد امکان بازده بالاتر را با مصرف انرژی کمتر فراهم کرد. کار سعیدی و خلواتی-فهلپانی نیز تصفیه پساب روغنی از پالایشگاه‌های گاز را با استفاده از الکتروانعقاد با الکترودهای آلومینیومی توصیف کرد. کارایی حذف COD با تغییر فاصله الکترود، pH اولیه، سولفات سدیم (Na_2SO_4) به عنوان الکترولیت پشتیبان، دوز پلی‌آلومینیوم کلراید به عنوان کمک‌کننده انعقاد و

چگالی جریان مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که افزایش چگالی جریان، پلی‌آلومینیوم کلراید و تا حدی دوز Na_2SO_4 کارایی حذف COD را بهبود می‌بخشد. نتایج همچنین نشان داد که ۹۷٪ COD را می‌توان در شرایط عملیاتی بهینه حذف کرد. استفاده از Na_2SO_4 به عنوان الکترولیت پشتیبان، مصرف ویژه انرژی الکتریکی را از ۱۹.۴۸ کیلووات‌ساعت بر (کیلوگرم COD حذف شده $^{-1}$) به ۱۱.۰۵۷ کیلووات‌ساعت بر (کیلوگرم COD حذف شده $^{-1}$) کاهش می‌دهد. مطالعه کروماتوگرافی گازی فاضلاب خام و تصفیه‌شده نشان داد که تکنیک الکتروانecdاد بیش از ۹۹٪ از هیدروکربن‌های معمولی را حذف کرده است.

اخیراً، روش‌های غشایی به دلیل سادگی، تطبیق‌پذیری و افزایش بهره‌وری انرژی، به طور فزاینده‌ای برای تصفیه فاضلاب صنعتی و شهری استفاده می‌شوند. این روش‌ها را می‌توان بر اساس اندازه منافذ غشای مورد استفاده به چهار دسته تقسیم کرد: میکروفیلتراسیون (MF)، اولترافیلتراسیون (UF)، نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز معکوس (RO). غشاهای MF، UF و NF به ترتیب آلاینده‌هایی با اندازه‌های ۱۰۰۰-۱۰۰، ۵-۱۰۰ و ۱-۵ نانومتر را حذف می‌کنند. چندین مطالعه اخیر تصفیه فاضلاب صنعتی را با استفاده از روش‌های غشایی گزارش کرده‌اند. به عنوان مثال، RO و NF به طور مؤثر Cu^{2+} و Cd^{2+} را از فاضلاب مصنوعی حذف کردند. RO به ترتیب ۹۸٪ و ۹۹٪ از Cu^{2+} و Cd^{2+} را حذف کرد، در حالی که NF حدود ۹۰٪ از هر دو را حذف کرد. مطالعه دیگری نشان داد که RO ۹۹.۵٪ از Cu^{2+} و Ni^{2+} را حذف می‌کند. گلامبوس و همکاران کارایی حذف COD توسط RO و NF را در تصفیه فاضلاب بخش غذا بررسی کردند. این مطالعه از دو نمونه فاضلاب با سطوح COD پایه ۹۵۰۰ و ۱۱۶۰ پی‌پی‌ام استفاده کرد. **permeate RO** دارای COD کمتر از ۱۲۵ میلی‌گرم O_2 در لیتر است که آن را برای دفع در آب‌های طبیعی مناسب می‌کند. این مطالعه به بررسی نیازهای انرژی مربوط به فرآیندهای تصفیه پرداخت. اولترافیلتراسیون پشتیبانی‌شده توسط پلیمر (PSU) برای تصفیه فاضلاب مصنوعی حاوی فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گرفته است. باراکات و اشمیت قبل از فیلتراسیون، کربوکسی‌متیل سلولز (CMC)، یک پلیمر محلول در آب، را برای کمپلکس کردن اشکال کاتیونی فلزات سنگین مانند Cu^{2+} ، Ni^{2+} و Cr^{3+} اضافه کردند. این مطالعه نشان داد که pH بالا (≥ 7) تشکیل کمپلکس‌های CMC-فلز سنگین، رسوب‌گذاری و حذف اندازه‌های هیدروکسیدهای فلزی را

ترویج می‌کند. در بسیاری از موارد، تغییر pH محلول یک مرحله مهم در پس‌زدن فلزات سنگین است، زیرا pH بالا می‌تواند باعث رسوب هیدروکسیدهای فلزات سنگین شود که سپس می‌توانند با استفاده از غشاهای UF فیلتر شوند. جوانگ و شیا حذف Cu^{2+} و Zn^{2+} را از فاضلاب مصنوعی با فیلتراسیون غشایی تقویت‌شده با کیتوزان بررسی کردند. افزودن کیتوزان به محلول خوراک، حذف فلز را ۶ تا ۱۰ برابر افزایش داد که به دلیل گروه آمینو در کیتوزان است که به عنوان محل اتصال فلز عمل می‌کند. سایر پلیمرهای محلول در آب که به فلز متصل می‌شوند و برای حذف فلزات سنگین استفاده می‌شوند عبارتند از دی‌اتیل آمینواتیل سلولز و پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI). مواد معدنی نیز می‌توانند به حذف فلزات سنگین از راکتور غشایی کمک کنند. افزودن ۱۰ گرم در لیتر ورمیکولیت در pH = ۸ بیش از ۹۹٪ از Pb^{2+} ، Ni^{2+} و Cu^{2+} را حذف کرد. در نتیجه، فرآیند ترکیبی جذب-UF با تنظیم pH مناسب (> ۷) می‌تواند به عنوان یک مرحله پیش تصفیه برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی، مانند آبکاری فلزات، استفاده شود. جاذب‌ها می‌توانند کارایی حذف فلزات سنگین را در فرآیندهای غشایی بهبود بخشند. مالامیس و همکاران (۲۰۱۰) از جاذب‌هایی مانند بنتونیت، ورمیکولیت و کلینوپتیلولیت برای حذف Cu^{2+} از permeate لجن فعال با غلظت ۳۱۷ میلی‌گرم در لیتر استفاده کردند. جذب با ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر بنتونیت یا ورمیکولیت (pH: ۵.۵) (به دنبال اولترافیلتراسیون منجر به راندمان حذف Cu^{2+} در محدوده ۹۳.۸ تا ۹۶.۸ تا ۹۹.۴٪ شد. اولترافیلتراسیون به تنهایی فقط می‌توانست ۷۸.۳-۵۹.۴٪ از Cu^{2+} را حذف کند که نشان‌دهنده کارایی بهتر سیستم‌های UF تقویت‌شده با جاذب است. استفاده از زئولیت و بنتونیت گرفتگی را کاهش داد، اما ورمیکولیت اثرات ضدگرفتگی نداشت. در یک کار بعدی، کاتسو و همکاران حذف Ni^{2+} را با استفاده از یک سیستم ترکیبی جذب و UF مطالعه کردند. در pH 6، یک واحد UF دسته‌ای با غلظت اولیه Ni^{2+} ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از ۱۵ گرم در لیتر بنتونیت و ورمیکولیت به ترتیب به بازده حذف ۶۵.۳ و ۸۰٪ دست یافت. روش‌های غشایی همچنین برای تصفیه پساب صنعتی شور با محتوای آلی قابل توجه استفاده شده است. به عنوان مثال، جامدات معلق (SS) و COD کلوئیدی از فاضلاب فرآوری غذاهای دریایی از طریق غلظت اولیه با استفاده از یک سیستم UF، به دنبال بازیابی پروتئین برای استفاده در تولید آرد ماهی، کاهش یافت. تورانو و همکاران با

استفاده از MF و سانتریفیوژ تا ۸۰٪ SS و ۹۰٪ COD را از پساب کارخانه روغن زیتون حذف کردند. قابل ذکر است که، در حالی که RO کارآمدترین روش برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب است، به دلیل نیازهای بالای انرژی، به اندازه سایر فرآیندهای غشایی مانند MF، UF یا NF به طور گسترده استفاده نمی‌شود. علاوه بر این، محیط هوازی ممکن است تولید اکسیدهای فلزی را تشویق کند که می‌توانند غشاهای RO را زودرس گرفتگی کنند و نیاز به تعویض منظم غشا داشته باشند.

۳.۲. ترکیبات فنلی

فنل‌های موجود در فاضلاب از عملیات صنعتی مختلفی از جمله پالایشگاه‌ها، تولید رنگ، داروها و تولید نفت ناشی می‌شوند. آن‌ها در آب بسیار محلول، بسیار سمی و از نظر فیزیولوژیکی مقاوم هستند. محیط مایع، محل اصلی واکنش در فرآیند فوتوکاتالیستی برای تجزیه فنل و مشتقات کلروفنل و نیتروفنل آن است، و حمله رادیکال‌های هیدروکسیل به کربن حلقوی، انواع واسطه‌های اکسیداسیون را تولید می‌کند. واسطه‌های اولیه تولید شده در طی تخریب فوتوکاتالیستی فنل به عنوان هیدروکینون، کاتکول و p-بنزوکینون شناسایی شده‌اند. واسطه‌های واکنش، از جمله کلروهیدروکینون، ۴-کلروکاتکول و رزورسینول، در نهایت به استیلن، اسید مالئیک، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند. کلروفنل‌ها آلاینده‌های آب با سمیت متوسط هستند که تصور می‌شود سرطان‌زا باشند. محصولات جانبی اصلی که در طی تخریب فوتوکاتالیستی یافت می‌شوند شامل ۴-نیتروکاتکول، بنزوکینون، هیدروکینون و برخی اسیدهای آلی هستند. داروها، عملیات کک، تولید رزین، پلاستیک‌ها، رنگ، خمیر کاغذ، کاغذ و محصولات چوبی. رهاسازی این مواد بدون تصفیه ممکن است خطرات قابل توجهی برای سلامت انسان، حیوانات و سیستم‌های آبی ایجاد کند. فنل به عنوان یک آلاینده اولویت‌دار توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده (EPA) و فهرست انتشار آلاینده‌های ملی کانادا شناخته شده است. برای اطمینان از محیط‌زیست پایدار، مقامات نظارتی بین‌المللی محدودیت‌های سختگیرانه‌ای برای تخلیه فنل تعیین کرده‌اند. به عنوان مثال، EPA معیار خلوص آب کمتر از ۱ ppb را برای فنل در آب‌های سطحی تعیین کرده است. محدودیت‌های سمیت معمولاً بین ۹ تا ۲۵ میلی‌گرم در لیتر برای انسان و حیات آبریان است. فنل عواقب جدی برای سلامتی دارد که می‌تواند فوری و مزمن باشد. قرار گرفتن در معرض طولانی مدت

می‌تواند باعث تنفس نامنظم، ضعف عضلانی، لرزش، خیرگی و ایست تنفسی در انسان در دوزهای کشنده شود. پوست، چشم و غشاهای مخاطی انسان در اثر قرار گرفتن در معرض فنل تحریک می‌شوند. قرار گرفتن مزمن در معرض فنل می‌تواند باعث بی‌اشتهایی، کاهش وزن، اسهال، سرگیجه، ترشح بزاق و تیره شدن رنگ ادرار شود. حیوانات با قرار گرفتن مزمن در معرض فنل دارای تحریک در دستگاه گوارش و سیستم عصبی مرکزی و همچنین بافت‌های کبد، کلیه و قلب هستند. مطالعات حیوانی نشان داده است که وزن بدن جنین کاهش می‌یابد، تاخیر در رشد رخ می‌دهد و فرزندان به طور غیرطبیعی رشد می‌کنند. در نتیجه، فاضلاب آلوده به ترکیبات فنلی باید قبل از تخلیه تصفیه شود. این مقاله روش‌های استاندارد و پیشرفته برای استخراج فنل‌ها از پساب صنعتی را شرح می‌دهد. روش‌های متداول برای حذف فنل شامل تقطیر با بخار، استخراج مایع-مایع، جذب، استخراج فاز جامد، اکسیداسیون مرطوب با هوا، اکسیداسیون مرطوب کاتالیستی با هوا و تجزیه بیولوژیکی است. فناوری‌های پیشرفته حذف فنل شامل اکسیداسیون الکتروشیمیایی، اکسیداسیون نوری، ازن‌زنی، UV/H_2O_2 ، واکنش فنتون، فرآیندهای غشایی و تصفیه آنزیمی هستند.

۳.۲.۱. تقطیر

روش‌های تقطیر برای حذف فنل از آب همگی تغییراتی از تقطیر با بخار هستند، بنابراین نیاز به انرژی وجود دارد که باید به طور ارزان تأمین شود. روش‌ها می‌توانند مخرب یا غیرمخرب باشند و نوع دوم امکان بازیابی فنلیک‌ها را فراهم می‌کند. تقطیر با بخار یا تقطیر آزنوتروپیک، که بر اساس فراریت نسبی فنل است، می‌تواند آب حاوی آلاینده‌های فنل را فیلتر کند. در مطالعه دیگری، یک محلول آبی فنل به طور مستقیم به یک مشعل پلاسمای بخار جدید (تصفیه جت پلاسمای بخار) وارد شد و فنل به سرعت در جت پلاسمای حرارتی تجزیه شد و در نتیجه رادیکال‌های هیدروکسیل و تخریب اکسیداتیو آلاینده‌های آلی در محلول‌های آبی تولید شد. در فاز مایع، فنل پیروکاتکول، هیدروکینون، اسید مالئیک، اسید بوتاندیوئیک و اسید موکونیک را با H_2 ، CO و CO_2 به عنوان محصولات گازی اصلی تولید کرد. پلاسمای حرارتی بخار دارای آنتالپی و فعالیت بالا و در عین حال سازگار با محیط‌زیست است و آن را در زمینه پاکسازی محیط‌زیست جذاب می‌کند.

۳.۲.۲. جذب و استخراج

روش‌های جذب و استخراج برای حذف فنل از آب در غلظت‌های از trace تا درصد بسته به هزینه (از جمله انرژی) استفاده و استفاده مجدد از مواد ثانویه، جذب یا استخراج‌کننده لازم، موفق هستند. کربن فعال پرکاربردترین و بسیار مؤثرترین فناوری جذب است. گران است، اما در حذف آلاینده‌های آلی trace موفق بوده است. در نتیجه، گزینه‌های جدیدی در حال توسعه هستند، از جمله اصلاح شیمیایی کربن فعال، آغشته‌سازی با نانوذرات، منابع مختلف کربن، روش‌های فعال‌سازی مختلف و جایگزینی با جاذب‌های زیستی کم‌هزینه، مانند لیگنوسلولز و کیتین/کیتوزان، که جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای حذف ترکیبات فنلی هستند.

۳.۲.۳. حذف فنل توسط فرآیندهای غشایی

فناوری‌های غشایی برای تصفیه فنل قابل اعتماد و مقرون به صرفه هستند و مزایای متعددی از جمله مصرف انرژی کم، پساب با کیفیت بالا، ردپای کوچک و مقیاس‌پذیری آسان با ماژول‌های غشایی دارند. با این حال، گرفتگی غشایی می‌تواند در نتیجه ذرات و کلوئیدها در جریان‌های خوراک رخ دهد. مهم‌ترین روش‌های غشایی برای حذف فنل‌ها از فاضلاب شامل بیوراكتورهای غشایی استخراجی و غشاهای فیبر توخالی. راکتورهای غشایی فوتوکاتالیستی؛ فرآیندهای غشایی فشار قوی مانند نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و تبخیر از طریق غشا. و تقطیر غشایی.

۳.۲.۴. بیوراكتورهای غشایی استخراجی (EMBR) و غشاهای فیبر توخالی

یک EMBR تکنیک استخراج غشایی آبی-آبی را با تجزیه بیولوژیکی ترکیب می‌کند تا فنل را در فاضلاب به طور مؤثر حذف کند. لو و همکاران غشاهای فیبر توخالی کامپوزیتی با مقادیر مختلف نفوذ پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) را با اعمال یک لایه PDMS بر روی یک بستر فیبر توخالی پلی‌اترایمید (PEI) برای حذف فنل ایجاد کردند. پراوین و لو مطالعه کردند که چگونه غشاهای فیبر توخالی آغشته به تری‌اکتیل‌فسفین اکسید (TOPO) می‌توانند فنل را از فاضلاب حذف کنند. مزایای این تکنیک شامل طراحی جمع‌وجور و پیکربندی تجهیزات قابل تنظیم است که آن را در زمینه مهندسی محیط‌زیست مفید می‌کند.

۳.۲.۵. راکتورهای غشایی فوتوکاتالیستی (PMRs)

PMRها راکتورهای هیبریدی هستند که فوتوکاتالیس را با یک جداکننده غشایی ترکیب می‌کنند که هم به عنوان یک مانع ساده برای فوتوکاتالیست و هم به عنوان یک مانع انتخابی برای مولکول‌های در حال تخریب عمل می‌کند. حذف ذرات فوتوکاتالیست از آب تصفیه‌شده پس از تخریب ضروری است.

۳.۲.۶. اسمز معکوس (RO) و نانوفیلتراسیون (NF)

RO یک فناوری نمک‌زدایی مبتنی بر غشا برای جداسازی ذرات محلول، به ویژه یون‌ها، از محلول‌های آبی است، در حالی که NF معمولاً برای حذف آلاینده‌های آلی، نمک‌های معدنی، رنگ و سختی از محلول‌های آبی استفاده می‌شود. NF برای استفاده در جلوی یک واحد RO برای کاهش فشارهای RO ناشی از مواد آلی مناسب است.

۳.۲.۷. تبخیر از طریق غشا (PV)

PV اخیراً به عنوان یک روش جایگزین برای حذف مواد آلی با فراریت کم از فاضلاب محبوبیت پیدا کرده است. ویژگی‌های متمایز PV شامل مصرف انرژی کم، عدم آلودگی ثانویه، کارایی بالا و سهولت کار است. آب و ترکیبات آلی فرار معمولاً در سمت خوراک و تراوش‌شده غشا متمرکز می‌شوند و ترکیب تراوش‌شده به طور همزمان تبخیر می‌شود. غشاهایی مانند PDMS، پلیمرهای اورتان و غشاهای پلی (اتر بلوک آمید) (PEBA) برای حذف فنل استفاده شده‌اند. مطالعات قبلی نشان داد که PV با استفاده از غشای PEBA 2533 می‌تواند یک روش جایگزین برای استخراج فنل از جریان‌های فاضلاب باشد. در مقایسه با غشاهای PDMS و PDMS پر شده با زئولیت، این غشا انتخابی‌پذیری بالایی برای فنل نشان داد.

۳.۲.۸. تقطیر غشایی (MD)

روش MD یک جداسازی مبتنی بر غشا غیرهمدم است که با فناوری‌های موجود مانند RO که توسط فشار اسمزی محدود می‌شوند، رقابت می‌کند. محمدی و همکاران نیز تصفیه فاضلاب فنلی را با تقطیر غشایی خلأ (VMD) با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی بررسی کردند. این روش شامل

استفاده از یک غشای پلی تترافلوئورواتیلن (PTFE) با اندازه منافذ ۰.۲۲ میکرومتر بود. روش MD دو عیب قابل توجه دارد: گرفتگی غشا و خیس شدن منافذ.

۳.۲.۹. اکسیداسیون شیمیایی

اکسیدان‌های شیمیایی فنل‌های آبی را از بین می‌برند. روش‌ها هزینه‌های کم معرف و انرژی دارند و در شرایط ملایم (دما و pH، معمولاً در محدوده ppm یا بیشتر کار می‌کنند. رایج‌ترین مواد شیمیایی مورد استفاده در تصفیه اکسیداتیو فاضلاب شامل ازن، کلر، دی‌اکسید کلر، کلر آمین‌ها، فریت [Fe (VI)] و پرمنگنات [Mn (VII)] است. پرمنگنات و فریت به دلیل پتانسیل کاهش قوی خود به طور گسترده مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند.

۳.۲.۱۰. اکسیداسیون الکتروشیمیایی

اکسیداسیون الکتروشیمیایی یک روش تخریبی جایگزین برای فنل‌های آبی است که به معرف نیاز ندارد اما هزینه‌های تجهیزات و انرژی را به همراه دارد. همانطور که قبلاً توسط مارتینز-هویتل و همکاران و تاسیک و همکاران بحث شد، فرآیندهای اکسیداسیون الکتروشیمیایی به عنوان اکسیداسیون مستقیم یا غیرمستقیم طبقه‌بندی می‌شوند. جذب آلاینده‌ها بر روی سطح آند، مکانیسم تصفیه مستقیم یا آندی است. مواد آند شامل Pt ، PbO_2 ، SnO_2 ، IrO_2 و BDD (الماس دوپ شده با بور) است که به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. کارایی تصفیه تحت تأثیر عواملی مانند چگالی جریان، pH، ماده آند و ترکیب الکترولیت قرار می‌گیرد. تخریب فنل از سینتیک شبه درجه اول پیروی می‌کند و کارایی فرآیند با راندمان جریان ظاهری، شاخص اکسیداسیون الکتروشیمیایی یا راندمان جریان لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. اکسیداسیون غیرمستقیم از معرف‌های اکسایش-کاهش واسطه برای انتقال الکترون بین الکتروود و آلاینده استفاده می‌کند و از گرفتگی الکتروودها توسط آلاینده‌ها جلوگیری می‌کند. یون‌های کلرید با تشکیل Cl_2 یا ClO^- در اکسیداسیون الکتروشیمیایی کلر فعال، حذف ترکیبات فنلی را ترویج می‌کنند.

۳.۲.۱۱. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)

AOPها مجموعه‌ای از روش‌ها هستند که توانایی تولید رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}\cdot$) در محل را دارند که قادر به معدنی‌سازی بیشتر مواد آلی، از جمله فنلیک‌ها است AOP. های مورد بحث در زیر، $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ ، فنتون، اکسیداسیون مرطوب با هوا و ازن، همگی برای طیف وسیعی از غلظت‌های ترکیبات هدف فنلی قابل استفاده هستند.

۳.۲.۱۲. حذف فنل با تصفیه $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$

ترکیب تابش مایکروویو (MW) با تصفیه $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ به عنوان یک تقویت مؤثر برای حذف فنل از فاضلاب ثابت شده است. این رویکرد هیبریدی به طور قابل توجهی سینتیک واکنش را تسریع می‌کند، انرژی فعال‌سازی را کاهش می‌دهد، ردپای تجهیزات را به حداقل می‌رساند، رویه‌های عملیاتی را ساده می‌کند و کارایی کلی تصفیه را افزایش می‌دهد. اثر هم افزایی تصفیه $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ با کمک مایکروویو، تخریب اکسیداتیو فنل را با ترویج تولید رادیکال هیدروکسیل و بهبود فرآیندهای انتقال جرم افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، استفاده از تابش مایکروویو در ۲.۵ گیگاهرتز در ارتباط با یک سیستم $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ بهبود قابل توجهی در تخریب فنل نشان داده است. این تکنیک ترکیبی منجر به معدنی‌سازی کارآمدتر می‌شود، اگرچه به دوز بالاتر H_2O_2 برای دستیابی به تجزیه کامل آلاینده‌های آلی نیاز دارد. معرفی انرژی MW نه تنها تجزیه H_2O_2 را به رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش‌دهنده تسریع می‌کند، بلکه فرآیند اکسیداسیون کلی را نیز افزایش می‌دهد. در نتیجه، تبدیل فنل و راندمان حذف کربن آلی کل (TOC) تا ۵۰٪ در مقایسه با تصفیه $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ معمولی به تنهایی افزایش یافته است. این یافته‌ها پتانسیل فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته با کمک MW را به عنوان یک روش امیدوارکننده برای تصفیه فاضلاب، به ویژه برای حذف آلاینده‌های آلی مقاوم مانند فنل، برجسته می‌کند. تحقیقات بیشتر در مورد بهینه‌سازی پارامترهای MW، غلظت H_2O_2 و شرایط واکنش می‌تواند کارایی فرآیند را افزایش دهد و در عین حال مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

۳.۲.۱۳. تصفیه فنتون و شبه فنتون

معرف فنتون، که از H_2O_2 و یون‌های فرو در pH پایین تشکیل شده است، یک AOP است که می‌تواند آلاینده‌های آروماتیک را اکسید کند. آهن II با پراکسید هیدروژن واکنش می‌دهد و آهن III و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌کند. در یک محیط اسیدی، پراکسید هیدروژن آهن (III) را به $Fe(II)$ بازسازی می‌کند. علاوه بر این، تکنیک‌های افزایش دهنده شبه فنتون، فوتو-فنتون و الکترو-فنتون وجود دارند.

۳.۲.۱۴. اکسیداسیون مرطوب با هوا (WAO) و اکسیداسیون مرطوب کاتالیستی با هوا (CWAO)

اکسیداسیون مرطوب با هوا (WAO) می‌تواند برای تصفیه فاضلاب آلی سمی که در برابر تصفیه بیولوژیکی مقاوم است، با استفاده از دمای بالا و فشار بالا (WAO) یا ترکیبی از دمای بالا، فشار بالا و کاتالیست‌ها (CWAO) استفاده شود. در این فرآیند، مواد آلی قابل اکسیداسیون مانند فنل و ترکیبات فنلی در آب با اکسیژن گازی (هوای معمولی یا اکسیژن خالص) در دماهای ۱۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای ۲ تا ۴۰ مگاپاسکال مخلوط می‌شوند. غلظت اکسیژن در آب به طور قابل توجهی بیشتر از فشار اتمسفر است و آب به حالت مایع باقی می‌ماند. واکنش‌های اکسیداسیون در WAO مواد شیمیایی فنلی را به محصولات نهایی کم‌خطر مانند اسیدهای کربوکسیلیک، دی‌اکسید کربن و سایر مولکول‌های با وزن مولکولی کوچک تبدیل می‌کنند.

۳.۲.۱۵. تصفیه بیولوژیکی

درمان بیولوژیکی رایج‌ترین روش مورد استفاده برای فنل‌های آبی است و بنابراین اغلب به عنوان یک روش پایه یا مرجع برای ارزیابی سایر روش‌های مورد بحث در زیر استفاده می‌شود. این روش یک رویکرد کم‌هزینه، آسان برای طراحی و کم‌نیاز به نگهداری برای تبدیل محلول‌های فنلی به محصولات نهایی ساده است.

۳.۲.۱۶. تصفیه آنزیمی

درمان آنزیمی که از درمان بیولوژیکی الهام گرفته شده است، از یک زیست‌کاتالیست یا آنزیم برای انجام یک تبدیل بر روی مواد شیمیایی فنلی استفاده می‌کند و در نتیجه آن‌ها را از آب حذف

می‌کند. این روش می‌تواند مزایای قابل توجهی (از جمله مقرون به صرفه بودن) نسبت به درمان‌های بیولوژیکی و شیمیایی سنتی ارائه دهد، تا زمانی که آنزیم مورد نظر به عنوان یک کالا با قیمت مناسب در دسترس باشد.

۳.۳. حذف رنگ‌ها

آلاینده‌های رنگی موجود در فاضلاب صنعتی به دلیل سمیت و رنگ، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. آلودگی قابل توجهی در اثر دفع این آلاینده‌های رنگی در مکان‌های مختلف در سراسر جهان ایجاد شده است. به ویژه، از آنجایی که رنگ‌ها ممکن است در آب با چشم انسان قابل مشاهده باشند، حتی غلظت‌های بسیار کم آن‌ها به اندازه ۱ ppm برای برخی رنگ‌ها می‌تواند به عنوان یک سم جدی در سیستم آبی در نظر گرفته شود. از آنجایی که بیش از ۱۰۰۰۰ رنگ در دسترس صنعتی عملاً در بسیاری از صنایع مختلف از جمله دباغی‌ها، رنگ‌ها، لاستیک، پلاستیک‌ها، منسوجات، کاغذ، رنگ‌ها، لوازم آرایشی و چرم استفاده می‌شوند، احتمالاً بسیار آلوده‌کننده هستند. در سراسر جهان، سالانه بیش از ۷۰۰۰۰۰ تن رنگ تولید می‌شود. از این مقدار، ۱۲٪ در طول فرآوری یا ساخت هدر می‌روند و ۲۰٪ از این رنگ‌های از دست رفته به آلودگی محیط‌زیست ختم می‌شوند. موجودات آبی به شدت توسط بسیاری از آلاینده‌های آب تولید شده در صنعت تهدید می‌شوند. علاوه بر این، رنگ‌ها می‌توانند باعث ناراحتی دستگاه گوارش، تهوع، استفراغ، اسهال و التهاب در انسان و حیوانات شوند. در عملیات صنعتی، بیش از ۱۰۰۰۰۰ رنگ موجود در بازار برای محصولات مختلف ضروری است. بیشتر رنگ‌ها، از جمله متیل اورانژ (MO)، متیلن بلو (MB) و رودامین (RhB)، در آب محلول هستند، به راحتی قابل تجزیه بیولوژیکی نیستند و ممکن است برای محیط‌زیست مضر باشند.

Ag@AgCl@MIL-100(Fe)/CCF توسط دوان و همکاران با استفاده از سنتز درجا MOF و

کربوکسی‌متیل‌اسیون پارچه پنبه‌ای که به عنوان داربست استفاده می‌شد، تولید شد. رادیکال‌های هیدروکسیل اکسیدکننده قوی در طول فرآیند فوتوکاتالیز توسط واکنش الکترون‌های تولید شده نوری با O_2 تولید می‌شوند و یون‌های سوپراکسید توسط واکنش h^+ تولید شده نوری و H_2O تولید می‌شوند. این رادیکال‌ها به دلیل توانایی اکسیدکنندگی قوی خود، در نهایت مسئول تخریب رنگ MB می‌شوند. قابلیت بازیافت عالی و راندمان حذف همزمان استثنایی رنگ‌های محلول با استفاده از

فوتوکاتالیست‌ها یافت شد. نگوین و همکاران اثرات کامپوزیت‌های $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{rGO}$ را بر تخریب MB، RhB و MO مستند کردند و مسیرها و فرآیندهای تخریب را در معرض نور UV فرض کردند. علاوه بر این، در مقایسه با مواد منفرد، هتروجانکشن مواد $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{rGO}$ می‌تواند کاربرد عملی فوتوکاتالیستی، پایداری و قابلیت بازیافت فوق‌العاده‌ای را نشان دهد. این امر با ظرفیت جذب بالای رنگ، سطح وسیع، شکاف باند $\approx 3.2 \text{ eV}$ و کارایی جداسازی حامل‌های بار افزایش یافته توضیح داده می‌شود. به گفته پان و همکاران، در مقایسه با $\alpha\text{-AgVO}_3$ خالص و BiFeWO_6 ، کامپوزیت $\text{BiFeWO}_6/\alpha\text{-AgVO}_3$ با ۱ درصد وزنی BiFeWO_6 می‌تواند به طور قابل توجهی به حذف RhB کمک کند. نانوساختارهای $\text{SnO}_2\text{-MoS}_2$ بهبود قابل توجهی در تخریب فوتوکاتالیستی MB و RhB در مقایسه با MoS_2 یا SnO_2 خالص نشان دادند. این بهبود در تخریب فوتوکاتالیستی مسئول سطح ویژه بالا و جذب بهبود یافته نور مرئی بود. اسمیت و همکاران بر ریخت‌شناسی تثبیت ZnO روی PALF‌ها و کارایی فوتوکاتالیستی ZnO/PALF‌ها در حذف فاضلاب حاوی کنگو قرمز که به ریخت‌شناسی آن‌ها بستگی دارد، متمرکز شدند. تحت تابش UV/vis، کاتالیست عملکرد بالا (> ۹۵٪) و قابلیت استفاده مجدد برای تخریب کنگو قرمز نشان داد.

۴. حذف فلزات سنگین

حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب برای حفظ محیط‌زیست پاک و محافظت از سلامت انسان حیاتی است. فلزات سنگین عناصری با وزن اتمی بین ۶۳.۵ تا ۲۰۰.۶ و وزن مخصوص بیشتر از ۵.۰ هستند. فاضلاب‌های فلزات سنگین به طور فزاینده‌ای به طور مستقیم یا غیرمستقیم به محیط‌زیست تخلیه می‌شوند، زیرا صنایعی مانند آبکاری فلزات، معدن، کود، دباغی‌ها، باتری‌ها، کاغذ و آفت‌کش‌ها به سرعت توسعه می‌یابند، به ویژه در کشورهای در حال توسعه. فلزات سنگین، برخلاف آلاینده‌های آلی، قابل تجزیه بیولوژیکی نیستند و در موجودات زنده تجمع می‌یابند. بسیاری از یون‌های فلزات سنگین سمی یا سرطان‌زا هستند. فلزات سنگین سمی با اهمیت ویژه در تصفیه فاضلاب صنعتی شامل روی، مس، نیکل، جیوه، کادمیوم، سرب و کروم هستند. روی یک عنصر کمیاب است که برای سلامت انسان حیاتی است. برای عملکرد فیزیولوژیکی بافت زنده حیاتی است و فرآیندهای

متابولیک متعددی را تنظیم می‌کند. با این حال، مصرف بیش از حد روی می‌تواند منجر به مشکلات جدی سلامتی مانند گرفتگی معده، تحریکات پوستی، استفراغ، تهوع و کم‌خونی شود. مس نقش مهمی در متابولیسم پستانداران دارد. با این حال، جذب بیش از حد مس باعث مشکلات سمی‌شناسی عمده، از جمله استفراغ، گرفتگی عضلات، تشنج و حتی مرگ می‌شود. سطوح نیکل بیش از حد بحرانی ممکن است باعث مشکلات عمده ریوی و کلیوی، علاوه بر ناراحتی دستگاه گوارش، فیبروز ریوی و درماتیت پوستی شود. نیکل یک ماده سرطان‌زا برای انسان است. جیوه یک نوروکسین است که می‌تواند به سیستم عصبی مرکزی آسیب برساند. جیوه در مقادیر زیاد عملکرد ریوی و کلیوی را مختل می‌کند و باعث درد قفسه سینه و تنگی نفس می‌شود. خلیج میناماتا یک مورد برجسته مسمومیت با جیوه است. آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده کادمیوم را به عنوان یک ماده سرطان‌زای بالقوه برای انسان طبقه‌بندی کرده است. کادمیوم خطرات جدی برای سلامتی ایجاد می‌کند. قرار گرفتن مزمن در معرض کادمیوم باعث نارسایی کلیوی می‌شود و مقادیر بیش از حد قرار گرفتن در معرض می‌تواند منجر به مرگ شود. سرب می‌تواند بر سیستم عصبی مرکزی تأثیر بگذارد. سرب همچنین می‌تواند به کلیه‌ها، کبد و سیستم تولید مثل و همچنین فعالیت‌های اساسی سلولی و مغزی آسیب برساند. علائم سمی شامل کم‌خونی، بی‌خوابی، سردرد، سرگیجه، تحریک‌پذیری، ضعف عضلانی، توهم و آسیب کلیوی است. کروم عمدتاً در دو حالت Cr و $Cr(III)$ (VI) در محیط آبی وجود دارد. به طور کلی، $Cr(VI)$ سمی‌تر از $Cr(III)$ است. $Cr(VI)$ بر فیزیولوژی انسان تأثیر می‌گذارد، در زنجیره غذایی تجمع می‌یابد و خطرات جدی برای سلامتی از تحریک جزئی پوست تا سرطان ریه ایجاد می‌کند (جدول ۱). با مواجهه با قوانین به‌طور فزاینده‌ای سخت‌گیرانه، فلزات سنگین در حال حاضر آلاینده‌های اولویت‌دار محیط‌زیست و یکی از جدی‌ترین مشکلات محیط‌زیستی هستند. در نتیجه، فلزات سنگین خطرناک باید از فاضلاب حذف شوند تا از انسان و محیط‌زیست محافظت شود. چندین روش توصیف‌شده برای حذف یون‌های فلزات سنگین از منابع مختلف فاضلاب استفاده شد. این روش‌ها را می‌توان به عنوان جذب، غشایی، شیمیایی، الکتریکی و فوتوکاتالیستی طبقه‌بندی کرد.

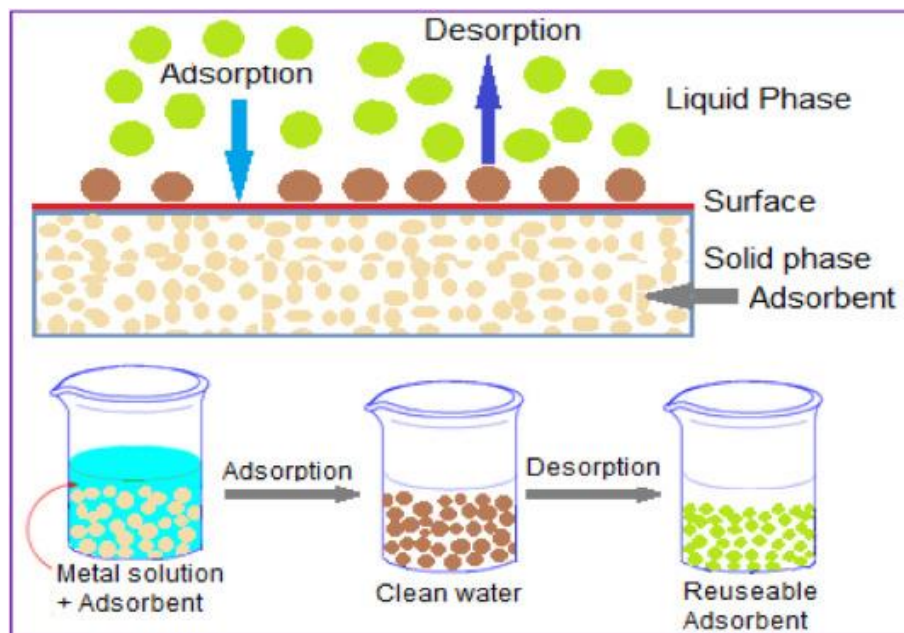
[جدول ۱: حداکثر محدودیت‌های مجاز و اثرات سلامتی فلزات سنگین]

Heavy Metal	Permissible Limits (USEPA) $\mu\text{g/L}$	Permissible Limits (WHO) $\mu\text{g/L}$	Health Hazards
Lead	6	10	Kidney problem, Central Nervous System Damage, loss of appetite, anemia, high blood pressure, suspected carcinogen, diminishing IQ, cause sterility, and muscle and joint pains
Arsenic	*	500	Gastrointestinal effects, skin, producing liver tumors, and carcinogenic
Copper	*	3000	Insomnia, diarrhea, irritation of nose, eyes, mouth, headache, dizziness, and stomachache, liver damage, and convulsions,
Mercury	0.03	1	Neurological disorder, Severe muscle pain, eyes and muscle membrane, dermatitis, anorexia and corrosive to skin, Neurotoxin, Kidney dysfunction, and circulatory disorder
Chromium	50	50	Allergic dermatitis, producing lung tumors, and suspected human carcinogen
Cadmium	10	3	Cause lung fibrosis, dyspnea and weight loss and carcinogenic
Nickel	200	20	Kidney Damage, reduced lung function, cancer of lungs and nasal sinus, causes chronic bronchitis, dermatitis, gastrointestinal disorder, and lung
Chromium	50	50	Allergic dermatitis, producing lung tumors, carcinogen, Nausea, and diarrhea
Zinc	*	5000	Neurological symptoms, anemia, causes short-term illness called “metal fume fever” and restlessness, depression, nausea, and skin irritation
Arsenic	*	500	Carcinogenic, skin, gastrointestinal effects and producing liver tumors

۴.۱. جداسازی مبتنی بر جذب

فناوری‌های جداسازی مبتنی بر جذب در حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب موفق هستند. مکانیسم جذب توسط خواص فیزیکوشیمیایی جاذب و فلزات سنگین و شرایط عملیاتی (یعنی مقدار

جاذب، دما، زمان جذب، غلظت اولیه یون‌های فلزی و مقدار (pH تعریف می‌شود. مکانیسم کلی فرآیند جذب-دفع با اصطلاحات آن در شکل ۶ نشان داده شده است. این روش از انواع جاذب‌ها، از جمله مواد طبیعی (مانند کربن فعال و خاک رس)، پلیمرهای مصنوعی و نانومواد پیشرفته (مانند اکسید گرافن) استفاده می‌کند. عملکردی سازی کارایی این جاذب‌ها را با افزایش ظرفیت اتصال آن‌ها برای فلزات خاص بهبود می‌بخشد. پیشرفت‌های اخیر شامل ادغام جذب با سایر روش‌های تصفیه برای افزایش کارایی کلی، و همچنین توسعه مواد هوشمندی است که به تغییرات محیطی پاسخ می‌دهند. در حالی که مطالعات پایلوت کاربردهای موفق در دنیای واقعی را نشان داده‌اند، مسائلی مانند اشباع جاذب، بازسازی و امکان‌سنجی اقتصادی همچنان وجود دارد.



شکل ۶: مکانیسم فرآیند جذب-دفع یون‌های فلزی در آب

۴.۱.۱. جاذب‌های مبتنی بر کربن

جاذب‌های مبتنی بر کربن، مانند کربن فعال، بیوچار و اکسید گرافن، به عنوان مواد امیدوارکننده برای استخراج یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب ظاهر شده‌اند. سطح بزرگ، ساختار متخلخل و

شیمی سطح قابل تنظیم آن‌ها ظرفیت جذب آن‌ها را برای فلزات مختلف مانند سرب، کادمیوم و جیوه افزایش می‌دهد. کربن فعال به دلیل ظرفیت جذب بالا و در دسترس بودن معمولاً استفاده می‌شود، در حالی که بیوچار تولید شده از زیست توده یک گزینه سازگار با محیط زیست با مزایای اضافی برای سلامت خاک ارائه می‌دهد. ساختار غیرمعمول اکسید گرافن امکان انتخابی پذیری عالی و نرخ جذب سریع را فراهم می‌کند. رایج ترین روش‌های اصلاح برای بهبود ساختار منافذ، استحکام مکانیکی، ظرفیت جذب، پایداری حرارتی و سطح ویژه عبارتند از سولفوراسیون، اکسیداسیون و نیتروژن دار کردن. آن‌ها عمدتاً به مواد جاذب وابسته هستند که گاهی اوقات می‌توانند بسیار پرهزینه باشند. بنابراین، هزینه جاذب باید در هنگام انتخاب بهترین جاذب‌ها در نظر گرفته شود. چالش‌ها شامل بازسازی جاذب‌ها برای استفاده مجدد و توسعه روش‌های تولید مقرون به صرفه است. تحقیقات در حال انجام بر روی بهبود این مواد و توسعه تکنیک‌های هیبریدی که جاذب‌های مبتنی بر کربن را با سایر فناوری‌های تصفیه ترکیب می‌کنند، برای بهبود کارایی و پایداری حذف فلزات سنگین از فاضلاب متمرکز است.

۴.۱.۲. جاذب‌های مبتنی بر کیتوزان

کیتوزان (CS)، یک بیوپلیمر مشتق شده از کیتین، به عنوان یک جاذب کارآمد برای حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب ظاهر شده است. فراوانی طبیعی، زیست تخریب پذیری و غیرسمی بودن آن را به یک گزینه سازگار با محیط زیست تبدیل کرده است. جاذب‌های مبتنی بر کیتوزان می‌توانند با موفقیت یون‌های فلزات سنگین را با مکانیسم‌هایی مانند تبادل یونی، کیلاسیون و جاذبه الکترواستاتیک به دلیل وجود گروه‌های عاملی آمینو و هیدروکسیل جذب کنند pH، دما و زمان تماس همگی تأثیر عمده‌ای بر کارایی جذب دارند. ترکیب کیتوزان با مواد دیگر، مانند نانوذرات یا کربن فعال، می‌تواند ظرفیت جذب و بازسازی آن را بهبود بخشد. از آنجایی که کیتوزان (CS) دارای گروه‌های هیدروکسیل ($-OH$) و آمینو ($-NH_2$) است، یک پلیمر جاذب طبیعی با میل ترکیبی بالا برای آلاینده‌های موجود در فاضلاب است. استحکام مکانیکی ناکافی و پایداری ضعیف آن، با وجود ویژگی‌های منحصر به فرد آن، بازسازی را ناکارآمد می‌کند. علاوه بر این، تخلخل کم، سطح ویژه کم، مقاومت در برابر انتقال جرم و بلورینگی بالای CS استفاده از آن را به صورت پودر یا پولک دشوار

می‌کند. برای حل این مشکلات، تغییرات ساختاری و شیمیایی پیشنهاد شده است. اصلاح شیمیایی CS با اتصال عرضی، پلی بین گروه‌های عاملی و زنجیره‌های پلیمری ایجاد می‌کند و به CS استحکام می‌بخشد. با این حال، این استراتژی جذب را کاهش می‌دهد. به طور کلی، جاذب‌های مبتنی بر کیتوزان یک راه‌حل طولانی‌مدت و کارآمد برای پاکسازی فاضلاب آلوده به فلزات سنگین ارائه می‌دهند و به حفاظت از محیط‌زیست و بازیابی منابع ارزشمند کمک می‌کنند.

۴.۱.۳. جاذب‌های معدنی

استفاده از جاذب‌های معدنی مانند کربن فعال ساخته شده از مواد معدنی، زئولیت‌ها و خاک‌رس‌ها در تصفیه فاضلاب به عنوان روشی برای حذف یون‌های فلزات سنگین در حال افزایش است. این مواد به دلیل ویژگی‌های خاص خود، از جمله سطح بزرگ، ظرفیت تبادل یونی و پایداری شیمیایی، در جذب آلاینده‌ها خوب عمل می‌کنند. جاذب‌های معدنی می‌توانند با موفقیت فلزات سنگین را از طریق فرآیند جذب، که اغلب شامل مکانیسم‌هایی مانند تبادل یونی، جذب سطحی و کمپلکس‌سازی است، متصل کنند. آن‌ها می‌توانند به شدت تحت تأثیر عواملی مانند pH، دما و وجود یون‌های رقیب قرار گیرند. علاوه بر این، کارایی آن‌ها را می‌توان با ایجاد تغییراتی برای افزایش ظرفیت جذب، مانند فعال‌سازی اسیدی یا تشکیل کامپوزیت با مواد دیگر، افزایش داد. به طور کلی، جاذب‌های معدنی یک راه‌حل مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب ارائه می‌دهند و در عین حال الزامات قانونی را نیز برآورده می‌کنند. استفاده از مواد معدنی طبیعی ممکن است مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد. با این حال، پس از چند چرخه، راندمان حذف ممکن است کاهش یابد. در نتیجه، تکنیک‌های اصلاح بسیاری برای بهبود کارایی حذف این جاذب‌ها، از جمله کلسینه کردن و آغشته‌سازی، پیشنهاد شده است. با این حال، این تغییرات به هزینه‌های فرآیند می‌افزایند و عوامل شیمیایی جدیدی را وارد محیط‌زیست می‌کنند. پیوند گروه‌های عاملی می‌تواند جاذب‌های چندمنظوره و سازگار با محیط‌زیست ایجاد کند که می‌توانند برای تصفیه انواع مختلف فاضلاب استفاده شوند. جاذب‌های خاک‌رسی نوآورانه کم‌هزینه و با کارایی بالا می‌توانند از طریق ساخت نانولوله‌های یک‌بعدی و نانوصفحه‌های دوبعدی بر اساس خاک‌رس توسعه یابند.

۴.۱.۴. جاذب‌های مغناطیسی

یک روش ابتکاری برای حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب، استفاده از جاذب‌های مغناطیسی است. ذرات آهن در یک نوع خاص از ماتریس مواد به نام جاذب مغناطیسی (معمولاً نانوذرات مغناطیسی، مانند Fe_3O_4) قرار دارند. مواد پایه ممکن است شامل زیست‌توده، کربن، پلیمرها، CS یا نشاسته باشد. این مواد مزایای جداسازی آسان با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی را با ظرفیت جذب بالا ترکیب می‌کنند. آن‌ها معمولاً از اکسیدهای آهن یا نانوذرات مغناطیسی اصلاح‌شده ساخته می‌شوند. فلزات سنگین را می‌توان به طور مؤثر توسط فرآیند جذب، که شامل مکانیسم‌هایی مانند کمپلکس‌سازی، تبادل یونی و جاذبه الکترواستاتیک است، متصل کرد. غلظت فلز اولیه، زمان تماس و pH از عوامل مهمی هستند که بر عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارند. جاذب‌های مغناطیسی را می‌توان به صورت عملکردی‌سازی یا تغییر سطح داد تا ظرفیت و انتخابی‌پذیری آن‌ها را برای فلزات سنگین خاص بهبود بخشد. به دلیل سهولت بازیابی و استفاده مجدد، آن‌ها یک راه‌حل تصفیه فاضلاب اقتصادی و پایدار را نشان می‌دهند که علاوه بر بهبود کیفیت آب، با مقررات نیز مطابقت دارد.

۴.۱.۵. جاذب‌های زیستی

یک روش سازگار با محیط‌زیست برای استخراج یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب، استفاده از جاذب‌های زیستی است که از منابع طبیعی از جمله جلبک‌ها، زیست‌توده میکروبی و ضایعات کشاورزی ساخته می‌شوند. این مواد به طور مؤثر فلزات سنگین را با روش‌های مختلفی مانند کمپلکس‌سازی، تبادل یونی و جذب متصل می‌کنند. غلظت یون‌های فلزی، pH، دما و زمان تماس از عوامل مهمی هستند که بر کارایی جذب زیستی تأثیر می‌گذارند. با ایجاد تغییرات، می‌توان انتخابی‌پذیری و توانایی اتصال جاذب‌های زیستی را به فلزات خاص افزایش داد. به طور کلی، آلاینده‌ها و سطح جاذب زیستی می‌توانند از طریق تماس الکترواستاتیک، تجمع، میکروترسیب، کمپلکس‌سازی/هماهنگی، تبادل یونی، احیا یا اکسیداسیون برهمکنش داشته باشند. یونیزاسیون گروه‌های عاملی روی سطح جاذب زیستی و چگالی بار سطح جاذب زیستی تحت تأثیر pH محلول هستند. کاتیون‌ها تقریباً در سطوح pH پایین پایدار هستند و می‌توانند با سطح جاذب زیستی پیوند

تشکیل دهند. با این حال، حلالیت کاتیون‌های فلزی در مقادیر بالاتر pH کاهش می‌یابد و ممکن است یک رویداد رسوب‌گذاری رخ دهد. از آنجایی که مکان‌های در دسترس بیشتری برای جذب زیستی فراهم می‌کند، مقدار جاذب زیستی تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف دارد. به دلیل شکستن پیوند، کاهش انرژی آزاد گیبس و کاهش ویسکوزیته محلول، ظرفیت جاذب زیستی ممکن است در دماهای بالاتر افزایش یابد. این عوامل مکان‌های فعال جاذب زیستی را بهبود می‌بخشند و تعداد برخوردها (تحرک و انرژی جنبشی) بین جاذب زیستی و یون‌های فلزی را افزایش می‌دهند که منجر به میل ترکیبی بالاتر می‌شود. استفاده از جاذب‌های زیستی، استفاده مجدد از مواد آلی را ترویج می‌دهد و علاوه بر ارائه یک رویکرد پایدار برای تصفیه آب آلوده، به ارزش‌گذاری زباله کمک می‌کند. آن‌ها به دلیل هزینه کم و زیست‌تخریب‌پذیری، یک راه‌حل جذاب برای مقابله با آلودگی فلزات سنگین و در عین حال ترویج پایداری محیط‌زیست هستند.

۴.۱.۶. جاذب‌های چارچوب فلز-آلی (MOFs)

به دلیل سطوح بزرگ، تخلخل قابل تنظیم و ساختارهای قابل عملکردی‌سازی، چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) به عنوان جاذب‌های بسیار کارآمد برای حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب محبوبیت فزاینده‌ای پیدا می‌کنند. این مواد کریستالی می‌توانند گروه‌های عاملی مختلفی به آن‌ها اضافه شود تا قابلیت‌های جذب آن‌ها را بهبود بخشد. یون‌های فلزی در آن‌ها به لیگاندهای آلی متصل هستند. توسعه چارچوب‌های سفارشی که می‌توانند به طور انتخابی فلزات سنگین خاصی مانند سرب، کادمیوم و آرسنیک را حتی در غلظت‌های پایین جذب کنند، نتیجه تحولات اخیر در سنتز MOF است. عملکرد جذب آن‌ها تحت تأثیر دما، pH و وجود یون‌های رقیب قرار می‌گیرد. MOFها یک جایگزین پایدار برای تصفیه فاضلاب هستند زیرا دارای ظرفیت بازسازی و استفاده مجدد هستند. رایج‌ترین روش برای ایجاد چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs)، سنتز شبکه‌ای است که شامل تشکیل یک پیوند قوی بین یون‌های فلزی و پیونددهنده‌های آلی است. هزاران MOF توسط محققان پیشنهاد شده است. مشاهده شد که بیشتر لیگاندهای آلی پرهزینه و خطرناک مورد استفاده برای ایجاد MOFهای متعدد، به دلیل ادغام آسان گروه‌های عاملی و پایداری هیدرولیتیک-حرارتی، مانند آمین، کربوکسیلیک، هیدروکسیل و اکسیژن، یا با اعمال فرآیند اتصال عرضی، خانواده-Zr

MOFها) مانند (UiO-66 یک ماده نانوساختار بالقوه برای کاربردهای جذب هستند. حتی با وجود ویژگی‌های جذاب MOF ها و توانایی قوی آن‌ها در استخراج یون‌های فلزات سنگین، برخی از فلزات هدف نمی‌توانند وارد ریزمنافذ آن‌ها شوند که منافذ بسیار کوچکی هستند. بیشتر آن‌ها همچنین در آب چندان پایدار نیستند. اگرچه MOF های حاوی Cu، Fe و Mn ایجاد شده‌اند، اما بیشتر آن‌ها پایداری شیمیایی ضعیفی دارند. در نتیجه، برای تنظیم دقیق ساختار MOF ها و مقیاس‌سازی این مواد برای کاربردهای فاضلاب صنعتی، به تحقیقات بیشتری نیاز است. علاوه بر این، مهم است که تکنیک‌های عملکردی‌سازی مختلف را برای بهبود پایداری و سینتیک جذب MOF ها پیشنهاد و اجرا کرد. پتانسیل آن‌ها به عنوان یک راه‌حل سازگار با محیط‌زیست برای آلودگی فلزات سنگین، با توانایی آن‌ها در سفارشی‌سازی برای کاربردهای خاص مشخص می‌شود. انتظار می‌رود MOF ها با پیشرفت تحقیقات، در توسعه روش‌های تصفیه فاضلاب ضروری باشند.

۴.۲. فیلتراسیون و جداسازی مبتنی بر غشا

حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب به دلیل افزایش استفاده از روش‌های فیلتراسیون مبتنی بر غشا، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. این روش‌ها به دلیل انتخابی‌پذیری بالا، کارایی و ادغام یکپارچه در سیستم‌های تصفیه موجود مورد توجه قرار می‌گیرند. با استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا، آن‌ها جداسازی آلاینده‌ها را بر اساس اندازه، بار یا میل شیمیایی امکان‌پذیر می‌کنند. پیشرفت‌های در غشاهای نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس به طور قابل توجهی پس‌زدن انتخابی یون‌های فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم و جیوه را بهبود بخشیده است. یکی از نوآوری‌های کلیدی در این زمینه شامل توسعه غشاهای هیبریدی است که پلیمرهای عملکردی‌سازی‌شده یا نانوذرات را برای افزایش جذب و بهبود انتخابی‌پذیری ترکیب می‌کنند. کارایی فیلتراسیون غشایی تحت تأثیر عواملی مانند پارامترهای عملیاتی، از جمله دما و فشار، و همچنین اندازه منافذ غشا قرار می‌گیرد. برای رفع چالش‌هایی مانند گرفتگی غشا و طول عمر محدود، اصلاحات سطح و تکنیک‌های پیشرفته تمیزکاری در حال بررسی هستند. تحقیقات در حال انجام بر افزایش دوام غشا و کاهش هزینه‌های عملیاتی متمرکز است و فیلتراسیون مبتنی بر غشا را به یک رویکرد امیدوارکننده و پایدار برای حذف فلزات سنگین در تصفیه فاضلاب تبدیل می‌کند.

پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های مبتنی بر غشا فراتر از فیلتراسیون معمولی رفته و رویکردهای جدیدی را برای حذف پیشرفته یون‌های فلزات سنگین ترکیب کرده است. الکترودیالیز یکی از این تکنیک‌ها است که با هدایت انتقال یون از طریق غشاهای تبادل یونی انتخابی تحت تأثیر میدان الکتریکی، یون‌های فلزات سنگین را به طور مؤثر از فاضلاب حذف می‌کند. این روش در مقایسه با رویکردهای سنتی، کارایی بالا و مصرف انرژی کاهش یافته را ارائه می‌دهد. رویکرد نوآورانه دیگر استفاده از بیوراکتورهای غشایی (MBRs) است که تصفیه بیولوژیکی را با فیلتراسیون غشایی ترکیب می‌کنند. MBR ها از میکروارگانیسم‌هایی استفاده می‌کنند که قادر به تجمع‌زیستی یا تبدیل آلاینده‌ها هستند، در حالی که جداسازی غشایی زیست‌توده را حفظ کرده و حذف فلز را تسهیل می‌کند.

تکنیک‌های نانوفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون بر غشاهایی با اندازه منافذ خاص برای پس‌زدن انتخابی یون‌های فلزات سنگین و در عین حال اجازه عبور مولکول‌های کوچک‌تر متکی هستند. پیشرفت‌های اخیر در مواد غشایی، مانند اکسید گرافن و کامپوزیت‌های پلیمری، به طور قابل توجهی هر دو انتخابی‌پذیری و تراوایی را بهبود بخشیده است. اولترافیلتراسیون (UF) در فشار تراممبران (TMP) پایین عمل می‌کند و از آنجایی که منافذ غشای آن ممکن است بزرگتر از یون‌های فلزات سنگین باشد، می‌توان از افزودنی‌ها برای افزایش اندازه یون برای حذف مؤثرتر استفاده کرد. دو رویکرد اصلی، اولترافیلتراسیون تقویت‌شده با پلیمر (PEUF) و اولترافیلتراسیون تقویت‌شده با میسل (MEUF)، برای رفع این محدودیت توسعه یافته‌اند. علاوه بر این، نانوفیلتراسیون (NF) املاح با وزن مولکولی بیشتر از ۲۰۰ دالتون و ذرات در محدوده ۰.۰۰۵-۰.۰۰۷ میکرومتر را هدف قرار می‌دهد و آن را بین فرآیندهای UF و اسمز معکوس (RO) قرار می‌دهد. غشاهای NF از کامپوزیت‌های پلیمری با لایه‌های نازک چندلایه حاوی گروه‌های شیمیایی با بار منفی تشکیل شده‌اند. غشاهای NF ضدگرفتگی با استفاده از $\text{CeO}_2/\text{Ce}_7\text{O}_{12}$ و PES از طریق وارونگی فاز با موفقیت توسعه یافته‌اند و بازده استخراج بین ۹۴٪ و ۹۸٪ برای Fe^{3+} ، Al^{3+} ، Co^{2+} ، Cd^{2+} و Cu^{2+} و اسید هیومیک را نشان می‌دهند.

سیستم‌های هیبریدی با ادغام فیلتراسیون غشایی با سایر روش‌های تصفیه مانند جذب یا فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، کارایی حذف فلزات سنگین را افزایش می‌دهند. به عنوان مثال، ترکیب فیلتراسیون غشایی با کربن فعال یا بیوچار به طور قابل توجهی حذف کلی آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، اصلاح سطح غشاها از طریق ترکیب گروه‌های عاملی یا پوشش‌های نانومواد، انتخابی‌پذیری را افزایش داده و گرفتگی را کاهش می‌دهد و عملکرد را در کاربردهای حذف فلزات سنگین بهینه می‌کند.

۴.۳. جداسازی مبتنی بر شیمی

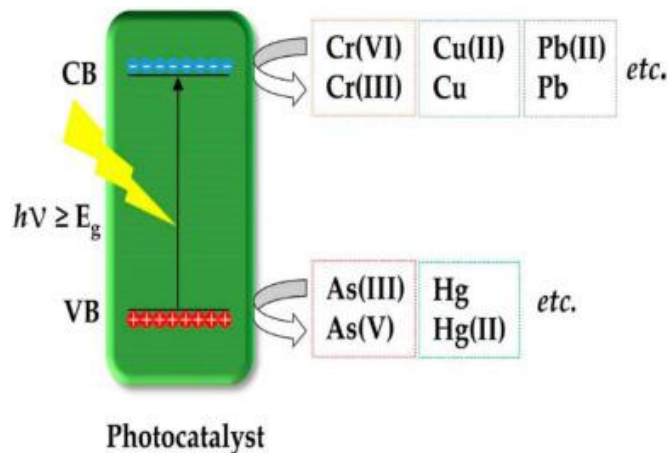
تکنیک‌های شیمیایی به خوبی تثبیت شده و اغلب برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب استفاده می‌شوند. روش‌های مبتنی بر شیمی، مانند تبادل یونی، تکنیک‌های الکتروشیمیایی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)، انعقاد و رسوب‌گذاری، در این بخش پوشش داده خواهند شد. تهدیدات قابل توجهی برای محیط‌زیست و سلامت انسان از فاضلاب آلوده به فلزات سنگین ناشی می‌شود. رویکردهای جداسازی مبتنی بر شیمی در سال‌های اخیر در حذف مؤثر این یون‌های خطرناک امیدوارکننده بوده است.

رسوب‌گذاری یکی از این روش‌ها است که در آن مواد شیمیایی به فاضلاب اضافه می‌شوند و با یون‌های فلزات سنگین واکنش می‌دهند و ترکیبات نامحلولی تولید می‌کنند که می‌توانند فیلتر شوند. سولفیدها و آهک (Ca(OH)_2) معرف‌های رایج هستند. رسوب‌گذاری شیمیایی، که به عنوان رسوب‌گذاری انعقادی نیز شناخته می‌شود، یکی از تثبیت‌شده‌ترین و موفق‌ترین فرآیندها است و به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. برای کمک به ته‌نشینی یون‌های فلزی محلول، شکل آن‌ها را به ذرات جامد تبدیل می‌کند. از طریق هم‌رسوبی، اصلاح pH یا تغییر پتانسیل اکسیدکننده، ماده منعقدکننده (انعقاد معرف) یون‌های فلزی را رسوب می‌دهد. حذف رسوبات معمولاً دنبال می‌شود. رسوب‌گذاری هیدروژنی به دلیل سهولت استفاده، مقرون به صرفه بودن و قابلیت تنظیم pH، یک روش رایج است. برای ایجاد رسوبات هیدروکسید فلزی نامحلول، یک هیدروکسید به فاضلاب در حال هم زدن اضافه می‌شود.

تبادل یونی روش دیگری است که از رزین‌ها برای اتصال خاص یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب استفاده می‌کند. با تنظیم روش می‌توان کارایی حذف برخی فلزات را بهبود بخشید. انعقاد شیمیایی، که در آن منعقدکننده‌هایی مانند سولفات آلومینیوم به فاضلاب وارد می‌شوند، باعث توده‌ای شدن فلزات سنگین به ذرات بزرگ‌تری می‌شود که به راحتی با فیلتراسیون یا ته‌نشینی استخراج می‌شوند. تجمع ذرات ناپایدار شده به عنوان لخته‌سازی شناخته می‌شود، در حالی که انعقاد به ناپایداری کلوئیدها با خنثی‌سازی نیروهای که آن‌ها را از هم جدا می‌کنند، اشاره دارد. آلومینیوم، سولفات فرو و کلرید فریک منعقدکننده‌های سنتی هستند که برای خنثی‌سازی بارهای یونی استفاده می‌شوند. با کمک یک لخته‌ساز، مانند پلی آلومینیوم کلراید (PAC)، پلی فریک سولفات (PFS)، پلی آکریل آمید (PAM) یا سایر لخته‌سازهای ماکرومولکولی، لخته‌سازی ذرات را به هم متصل می‌کند تا تجمعات بزرگ تشکیل دهد. اگرچه PE به عنوان یکی از مفیدترین لخته‌سازها در نظر گرفته می‌شد، لجن تولید شده ممکن است سمی باشد. بیشتر لخته‌سازها مصنوعی هستند و قابل تجزیه بیولوژیکی نیستند. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) گونه‌های واکنش‌دهنده‌ای تولید می‌کنند که قادر به اکسید کردن فلزات سنگین هستند و حذف و جداسازی آن‌ها را ساده می‌کنند. تکنیک‌های الکتروشیمیایی با استفاده از سلول‌های الکتروشیمیایی، احیا و رسوب یون‌های فلزات سنگین را روی الکترودها امکان‌پذیر می‌کنند و حذف آن‌ها از محلول را تسهیل می‌کنند. مطالعات کنونی بر اهمیت تطبیق این تکنیک‌ها با ترکیبات خاص فاضلاب، بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها تأکید دارند. ترکیب این روش‌ها با نانومواد یا جاذب‌های زیستی برای افزایش نرخ حذف و پایداری نیز در حال بررسی است. جداسازی مبتنی بر شیمی یک حوزه تحقیقاتی حیاتی برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در فاضلاب، حفاظت از محیط‌زیست و تولید منابع آب پاک‌تر باقی می‌ماند.

۴.۴. جداسازی مبتنی بر الکتریسیته

جداسازی مبتنی بر الکتریسیته یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب، به ویژه از طریق رویکردهای الکتروشیمیایی است. این روش‌ها از الکتریسیته برای تسهیل حذف فلز و تصفیه استفاده می‌کنند. یکی از این روش‌ها الکتروانعقاد است که از جریان الکتریکی برای تولید منعقدکننده‌ها در محل استفاده می‌کند. این منعقدکننده‌ها یون‌های فلزات سنگین را



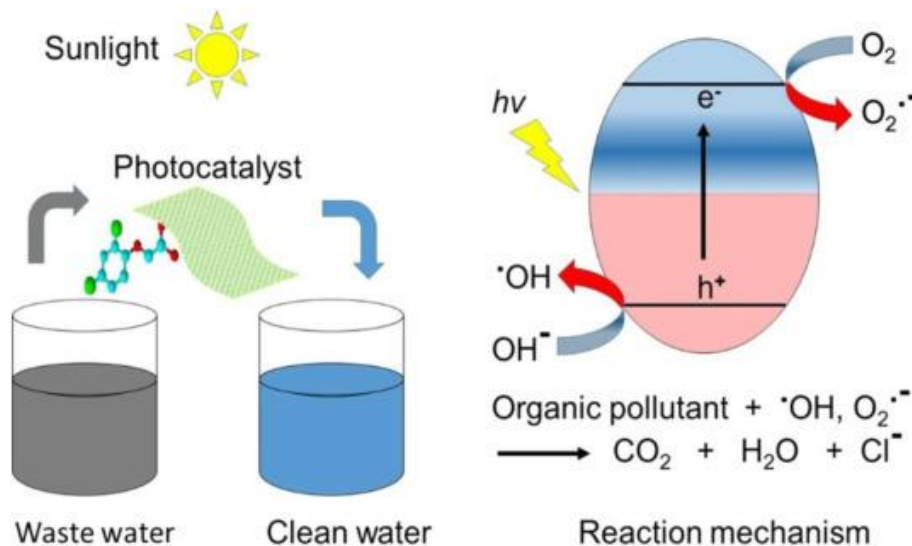
تجمع و ناپایدار می‌کنند و حذف آن‌ها را از طریق فیلتراسیون یا ته‌نشینی آسان‌تر می‌کنند. روش دیگر الکتروریسی است که در آن یون‌های فلزات سنگین با اعمال ولتاژ بر روی الکترودها احیا و رسوب می‌کنند. این تکنیک امکان بازیابی و بازیافت انتخابی فلزاتی مانند مس، نیکل و سرب را فراهم می‌کند. علاوه بر این، الکترودیالیز از غشاهای انتخابی یونی و میدان الکتریکی برای تغلیظ و حذف مؤثر یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب استفاده می‌کند. در یک سیستم الکتروشیمیایی، الکترون‌ها از آند (سمت مثبت)، جایی که اکسیداسیون رخ می‌دهد، به کاتد (سمت منفی)، جایی که احیا انجام می‌شود، حرکت می‌کنند. این فرآیندهای شیمیایی همزمان، که به عنوان واکنش‌های ردوکس (کاهش-اکسایش) شناخته می‌شوند، حذف فلزات را تسهیل کرده و به تصفیه آب کمک می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر بر بهینه‌سازی مواد و پیکربندی الکترودها برای افزایش کارایی و در عین حال به حداقل رساندن مصرف انرژی متمرکز شده است. علاوه بر این، محققان در حال بررسی ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در این سیستم‌ها برای بهبود پایداری هستند. به طور کلی، جداسازی مبتنی بر الکتروسیسته یک راه‌حل قابل‌دوام و کارآمد برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در فاضلاب ارائه می‌دهد.

در میان این فناوری‌های جدید اکسیداسیون پیشرفته، فوتوکاتالیس محبوب است و در تعدادی از حوزه‌ها نویدبخش است. یک تصویر شماتیک که اصول فرآیند فوتوکاتالیستی را نشان می‌دهد در شکل ۷ یافت می‌شود. فوتوکاتالیست‌ها معمولاً دارای معماری‌های نیمه‌رسانا هستند. اگر انرژی فوتون در نور تابشی بیشتر یا برابر با انرژی شکاف باند بین نوار ظرفیت (VB) نیمه‌رسانا و نوار رسانش (CB) باشد، الکترون‌ها (e^-) در نوار ظرفیت ممکن است به CB بپرند و ممکن است یک حفره با بار مثبت (h^+) در VB باقی بگذارند. هنگامی که ماده نیمه‌رسانا در معرض نور قرار می‌گیرد، این جفت h^+ و e^- ممکن است به سطح نیمه‌رسانا مهاجرت کرده و یک سری واکنش‌های اکسیداسیون و احیا را طی کنند که با تبدیل حالت‌های ظرفیت مختلف نشان داده می‌شود. نیازهای انرژی بالای نور فرودی برای شکاف باند وسیع و ماهیت به راحتی نوترکیب حامل‌های تولید شده نوری (e^+) و (h^+) عوامل محدودکننده اصلی در فرآیند فوتوکاتالیس هستند. بیشترین تحقیق بر روی TiO_2 ، رایج‌ترین فوتوکاتالیست، انجام شده است. با این حال، شکاف باند وسیع آن فقط به نور UV حساس است. در نتیجه، فوتوکاتالیست‌های بیشتری با شکاف‌های باند مناسب و مؤثر ایجاد و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نمونه‌هایی از این موارد عبارتند از ZnO ، C_3N_4 و کاتالیست‌های مبتنی بر بیسموت. مطالعات متعددی در مورد فوتوکاتالیس برای تصفیه فاضلاب آلی، شکافت آب برای تولید هیدروژن و اکسیژن و تثبیت نیتروژن در حال انجام است. گونه‌های فعال تولید شده دارای قابلیت‌های ردوکس قوی هستند و آلودگی بیشتری ایجاد نمی‌کنند زیرا فوتوکاتالیس فقط به نور به عنوان منبع انرژی نیاز دارد. استفاده از آن برای ردوکس در تصفیه آب بسیار امکان‌پذیر است.

[شکل ۷: نمودار شماتیک تصفیه فوتوکاتالیستی فلزات سنگین]

فرآیند فوتوکاتالیس شامل سه مرحله مهم است: تولید نوری حامل‌های باردار، جداسازی و انتشار حامل‌های باردار به سطح فوتوکاتالیست، و یک واکنش ردوکس روی سطح فوتوکاتالیست (شکل ۸). با استفاده از یک روش فوتوکاتالیستی دوگانه خورشیدی در فضای باز با جمع‌کننده صفحه تخت، $53.9\% Cu^{2+}$ ، $99.6\% Fe^{3+}$ و $99.4\% Zn^{2+}$ از پساب شستشوی خاک واقعی استخراج شد. با فوتوکاتالیس TiO_2 تحت UV خورشیدی شبیه‌سازی شده، EDDS و Cu^{2+} (از فاضلاب) 0.2 میلی‌مولار EDDS و $1.4-0.2$ میلی‌مولار $CuSO_4$ حذف شدند و به راندمان تبدیل 100% در درجه معدنی‌سازی

۲۴٪ دست یافتند. در مطالعه دیگری، حداکثر راندمان حذف Cu^{2+} ۴۱٪، Fe^{3+} ۱۰۰٪، Zn^{2+} ۱۰۰٪ و EDDS ۱۰۰٪ با استفاده از یک محلول شستشوی خاک مصنوعی (3.6×10^{-1} میلی‌مولار EDDS ، ۸.۰ $\times 10^{-2}$ میلی‌مولار Cu^{2+} ، 1.0×10^{-1} میلی‌مولار Fe^{3+} و 8.0×10^{-2} میلی‌مولار Zn^{2+}) به دست آمد. با استفاده از یک نانومیله TiO_2 دوپ شده با رودیوم/آنتیموان و نانولوله تیتانات (RS-TONR/TNT) در معرض نور مرئی، Zn^{2+} ، Pb^{2+} ، Cu^{2+} و Cd^{2+} و آلاینده آلی از فاضلاب با ۷۰ و ۸۰٪ راندمان تخریب برای رنگ و بیسفنول A به ترتیب بازیابی شدند. به طور کلی، جداسازی مبتنی بر فوتوکاتالیز یک روش بالقوه برای تصفیه مؤثر فاضلاب آلوده به فلزات سنگین است که به بازیابی منابع و پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند.

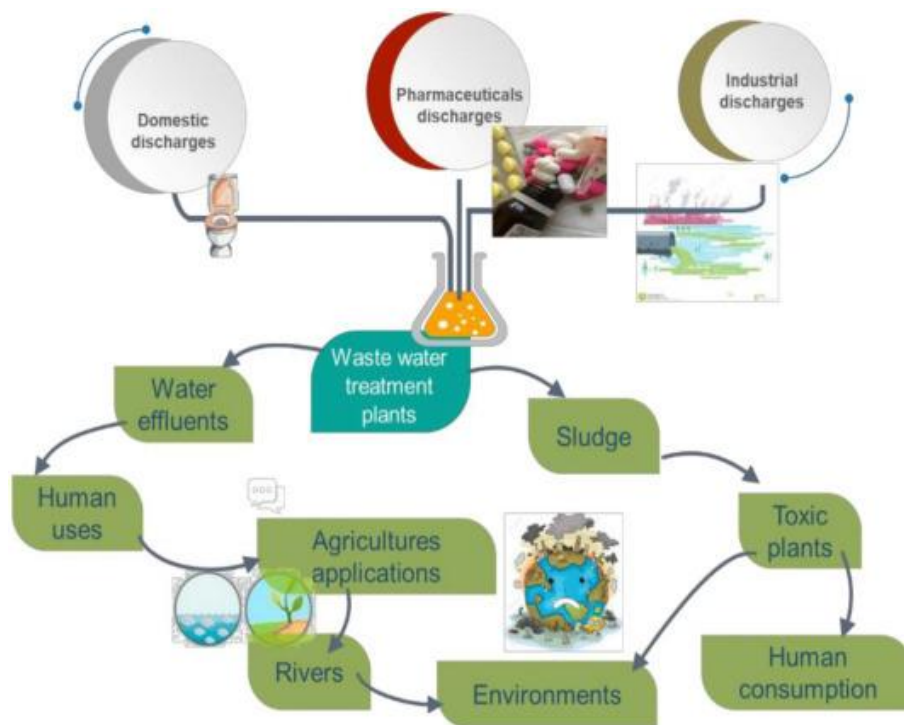


شکل ۸: نمودار نشان‌دهنده اصل فوتوکاتالیز نیمه‌رسانا برای تصفیه فاضلاب]

۵. حذف داروها

به دلیل اثرات مضر بر اکوسیستم، ترکیبات دارویی (PCs) به عنوان یک آلاینده رو به رشد، در سال‌های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. در مقابل، روش‌های تصفیه معمولی مانند

هوادهی، لخته‌سازی، اسمز معکوس و غیره، در **handling** این نوع ترکیبات محدودیت دارند. فوتوکاتالیز ناهمگن در میان همه این روش‌ها برای تجزیه مواد شیمیایی خطرناک مانند آنتی‌بیوتیک‌ها یکی از مؤثرترین روش‌ها است. در واقع، زمانی که باقیمانده‌های دارویی از فاضلاب تصفیه‌نشده حاوی داروهای مضر متعدد به محیط‌زیست تخلیه می‌شوند، افراد هنگام مصرف ماهی یا گیاهان آلوده که قبلاً آبیاری شده‌اند، به طور مستقیم در معرض قرار می‌گیرند (شکل ۹). انسان همیشه قربانی اعمال خود خواهد بود تا زمانی که راه‌حلی پیدا نکرده یا درمان‌های پیشرفته‌ای برای حذف باقیمانده‌های دارویی خطرناک تجربه نکرده باشد.



شکل ۹: منابع آلودگی دارویی

حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب، به ویژه در مورد آلاینده‌های دارویی، توجه را به مسائل آلودگی محیط‌زیست و خطرات بهداشت عمومی جلب کرده است. استراتژی‌های فعلی بر استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تصفیه مانند موارد زیر متمرکز هستند:

۵.۱. تکنیک‌های جذب

با استفاده از بیوچار، کربن فعال یا نانومواد جدید که می‌توانند باقیمانده‌های دارویی و فلزات سنگین را به طور مؤثر متصل کنند، می‌توان کارایی حذف را افزایش داد. جذب با جاذب جامد پتانسیل یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تصفیه انواع مایعات و فاضلاب‌های حاوی محصولات دارویی را دارد. به عنوان یک گزینه مقرون به صرفه‌تر برای تصفیه فاضلاب، مطالعات زیادی در مورد استفاده از مواد کربنی برای حذف آلاینده‌های دارویی انجام شده است. جاذب‌ها را می‌توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد. زغال چوب، خاک‌رس‌ها، کانی‌های رسی، زئولیت‌ها و سنگ‌های معدنی نمونه‌هایی از جاذب‌های طبیعی هستند. این مواد طبیعی پتانسیل بالایی برای اصلاح و در نهایت بهبود ظرفیت جذب خود دارند. در بسیاری از موارد، آن‌ها همچنین به راحتی در دسترس و با قیمت مناسب هستند. جاذب‌های ساخته شده از زباله‌های خانگی و صنعتی، لجن فاضلاب، جاذب‌های پلیمری و محصولات و ضایعات کشاورزی به عنوان جاذب‌های مصنوعی شناخته می‌شوند. تخلخل، ساختار منافذ و ماهیت سطح جاذب از ویژگی‌های منحصر به فرد هر جاذب هستند. ضایعات میوه، خرما، نارگیل، تایرهای استفاده شده، پوست درخت و سایر مواد غنی از تانن، خاک اره، پوسته برنج، خاکستر بادی، زباله‌های نفتی، زباله‌های کود، سرباره کوره بلند، زباله‌های صنعت قند، کیتوزان و ضایعات فرآوری غذاهای دریایی، جلبک‌ها، پیت، خاک‌رس‌ها، گل قرمز، زئولیت‌ها، رسوب و خاک، سنگ‌های معدنی و غیره تنها چند نمونه از ضایعات مورد استفاده هستند. سه روش اصلی برای بررسی نحوه استفاده از مواد پیشرفته برای حذف PPCP ها از فاضلاب وجود دارد: کربن فعال (AC)، خاک‌رس‌ها و بیوچار. ژل پاسخ‌دهنده به دما، نانوذرات مغناطیسی و پلیمرهای قالب‌گیری شده مولکولی (MIPs) نیز از جمله مواد معاصر دیگری هستند که گزارش شده‌اند. اما در مقایسه، هنوز فاقد توسعه و مطالعات موردی هستند.

۵.۲. زیست‌درمانی

یک روش پایدار که از میکروارگانیسم‌هایی استفاده می‌کند که می‌توانند فلزات سنگین را تجمع‌زیستی کرده و در عین حال آلاینده‌های دارویی را تجزیه کنند. به دلیل توانایی‌های متابولیکی متنوع، باکتری‌ها نقش عمده‌ای در زیست‌کره ایفا می‌کنند و از چرخه‌های متابولیکی که برای همه حیات روی زمین ضروری هستند، پشتیبانی می‌کنند. محققان در حال بررسی امکان تجزیه

محصولات مراقبت شخصی و دارویی (PPCPs) توسط میکروارگانیسم‌های مختلف به مونومرهای قابل قبول محیط‌زیست هستند که ممکن است روشی جدید و جایگزین برای حذف باقیمانده‌های دارویی از محیط‌زیست ارائه دهد. فناوری‌هایی که از لجن (هوازی، فعال یا دانه‌ای) استفاده می‌کنند، عمدتاً به دلیل جمعیت‌های باکتریایی درگیر، در تصفیه فاضلاب شهری به ویژه مؤثر بوده‌اند. مطالعه‌ای که کارایی حذف محصولات دارویی مانند آتورواستاتین، کافئین، پاراستامول، زایلازین، تری‌متوپریم، سولفامتوکسازول، ناپروکسن، فلوکستین، دیکلوفناک، کلاریترومایسین، کاربامازپین، آتنولول، آزیترومایسین، اریترومایسین، کتوپروفن، متوپرولول، اریترومایسین، سیپروفلوکساسین، والزارتان، سیمواستان و لوزارتان را با استفاده از لجن فعال در لتونی در فاضلاب شهری ارزیابی کرد، نشان داد که این آلاینده‌های دارویی توسط *Verrucomicrobia*, *Actinobacteria*, *Nitrospirae*, *Bacteroidetes* و *Chloroflexi*, *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Firmicutes* تجزیه بیولوژیکی شدند. علاوه بر این، مشخص شد که برخی از آرایه‌ها و گونه‌های درگیر در حذف مواد دارویی مانند متوپرولول، ونلافاکسین، فلوکستین، آلپرنولول، پروپرانولول، بیزوپرولول، جمفیبروزیل، سالبوتامول، نورفلوکستین و β -17 استرادیول دارای بازده حذف ۹۰٪ یا بیشتر هستند.

۵.۳. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)

AOPها مزایای جالبی برای تصفیه موفقیت‌آمیز آلاینده‌های نوظهور ارائه می‌دهند، مانند راندمان بالای حذف آنتی‌بیوتیک‌ها و کاربرد سازگار اثبات‌شده آن‌ها در میان استراتژی‌های تصفیه متعددی که برای نابودی کارآمد ترکیبات نوظهور پایدار توسعه یافته‌اند. جالب اینجاست که مشخص شد این روش‌ها مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها برای پاکسازی آب‌های آلوده به داروهایی هستند که در آب به سختی حل می‌شوند. روش‌های تصفیه شامل ازن‌زنی، تخریب نوری، الکترو-فنتون و غیره با هزینه‌های بالای انرژی، هزینه‌های عملیاتی بالا و تولید محصولات جانبی که نیاز به بودجه اضافی دارند، با مانع مواجه هستند. به طور کلی، AOPها با تشکیل درجا گونه‌های اکسیژن واکنش‌دهنده با انتخابی‌پذیری کم، مانند رادیکال‌های آنیونی سوپراکسید (O_2^-)، رادیکال‌های هیدروکسیل ($HO^\bullet$)، H_2O_2 و O_3 تعریف می‌شوند که مسیرهای معدنی‌سازی کامل به CO_2 و H_2O و اسیدهای معدنی را فراهم می‌کنند. در شرایط عملیاتی خاص، این روش‌ها از نظر محیط‌زیستی مطلوب هستند. فرآیند

فنتون، که یکی از پرکاربردترین AOP ها است، به عنوان یک روش تصفیه قابل دوام برای حذف مؤثر تعدادی از ترکیبات فعال دارویی و افزایش قابلیت تجزیه بیولوژیکی فاضلاب در نظر گرفته می‌شود. اگرچه تجزیه مستقیم H_2O_2 یا فوتو-احیای Fe^{3+} به Fe^{2+} می‌تواند ناشی از گنجاندن یک منبع نور در این فرآیند باشد، می‌توان نرخ رادیکال OH را بیشتر افزایش داد. همچنین ادعا شده است که تکنیک فوتو-فنتون یک راه مؤثر برای تصفیه فاضلاب واقعی با سطوح بالای محتوای آلی در سیستم‌های ماتریس پیچیده است. یکی از پرکاربردترین AOP ها در سال‌های اخیر، روش الکترو-فنتون (EF) است که از واکنش سنتی فنتون برای تولید کاتالیستی الکتریکی رادیکال‌های OH استفاده می‌کند. با این وجود، برای جبران عملکرد ضعیف ناشی از کدورت آب، به هزینه‌های انرژی و معرف گران قیمت نیاز است، اگرچه (AOP) یکی از بهترین روش‌ها برای حذف مواد شیمیایی در حال توسعه است. کاربرد آن به عنوان یک تصفیه تکمیلی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری هنوز نادر است که عمدتاً به همین دلیل است (کاره و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، زمانی که هدف، معدنی‌سازی تقریباً کامل محلول‌های تصفیه‌شده باشد، AOP ها گران‌تر می‌شوند زیرا این عملیات به زمان‌های الکترولیز طولانی‌تری نیاز دارد که منجر به مصرف انرژی الکتریکی زیاد می‌شود.

۵.۴. تصفیه‌های متداول

در دهه‌های اخیر، تعداد فزاینده داروها در محیط‌زیست به یک مشکل بزرگ تبدیل شده است. این مواد می‌توانند اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان را به خطر بیندازند و از طریق استفاده انسانی و دامپزشکی وارد سیستم‌های فاضلاب شوند. در نتیجه، دانشمندان محیط‌زیست و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اکنون حذف کارآمد داروها را در طول تصفیه فاضلاب در اولویت قرار می‌دهند. این مقاله کارایی روش‌های تصفیه متداول مورد استفاده در مدیریت فاضلاب را در حذف آلاینده‌های دارویی بررسی می‌کند. داروها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که اثرات بیولوژیکی بر بدن داشته باشند. این شامل داروهای بدون نسخه، تجویزی و دامپزشکی است. با این حال، پس از مصرف، آن‌ها اغلب به سیستم‌های فاضلاب نفوذ کرده و به صورت متابولیزه‌نشده از بدن انسان خارج می‌شوند. نگرانی‌هایی در مورد ماهیت پایدار این آلاینده‌های نوظهور در پساب تصفیه‌شده و اثرات اکولوژیکی بالقوه آن‌ها وجود دارد، زیرا فرآیندهای معمولی تصفیه فاضلاب در ابتدا برای مقابله با آن‌ها طراحی نشده بودند.

تصفیه فاضلاب معمولاً شامل سه مرحله است: اولیه، ثانویه و ثالثیه. هر یک از این مراحل به کاهش تعداد آلاینده‌ها، از جمله داروها، کمک می‌کند. تصفیه اولیه اولین مرحله در تصفیه فاضلاب است و هدف آن حذف ذرات بزرگ و مواد ذرات از آب است. این روش شامل ته‌نشینی برای امکان غرق شدن مواد سنگین‌تر به کف مخزن و غربالگری برای حذف زباله است. تصفیه اولیه معمولاً در برابر داروهای محلول بی‌اثر است، که می‌توانند به راحتی از این مرحله عبور کنند، اگرچه در حذف ذرات بزرگ‌تر و زباله‌های آلی مؤثر است. تصفیه ثانویه بر مواد آلی که از نظر بیولوژیکی در حال تخریب هستند، متمرکز است. رایج‌ترین روش، فرآیند لجن فعال است که در آن آلاینده‌های آلی توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف می‌شوند. این میکروب‌ها می‌توانند برخی داروها را تجزیه بیولوژیکی کنند، اما بسیاری از داروها به دلیل ساختارهای شیمیایی خود در برابر تجزیه بیولوژیکی مقاوم هستند. به عنوان مثال، آنتی‌بیوتیک‌ها و برخی داروهای مصنوعی ممکن است پس از درمان بعدی تغییر قابل توجهی نکنند. سایر تکنیک‌ها، مانند فیلترهای چکنده، نیز در حذف داروها چندان خوب عمل نمی‌کنند زیرا بیشتر بر روی زباله‌های آلی متمرکز هستند تا آلاینده‌های خاص. به عنوان یک مرحله پرداخت اضافی، از تصفیه ثالثیه برای بهبود کیفیت پساب تصفیه‌شده استفاده می‌شود. این مرحله ممکن است شامل تعدادی روش، از جمله تصفیه شیمیایی و فیلتراسیون باشد. برخی از مواد محلول و ذرات زباله باقی‌مانده را می‌توان با استفاده از فیلتراسیون غشایی یا فیلترهای شنی حذف کرد. برخی از داروها را می‌توان با فرآیندهای شیمیایی مانند ازن‌زنی یا کلرزنی تجزیه کرد، اما آن‌ها همچنین می‌توانند محصولات جانبی سمی تولید کنند که خطر را برای محیط‌زیست افزایش می‌دهد. علیرغم بهترین تلاش‌ها، حذف کامل داروها برای تصفیه‌های ثالثیه متداول یک چالش باقی می‌ماند، زیرا این مواد پیچیده هستند. ساختار شیمیایی دقیق هر دارو تعیین می‌کند که کارایی حذف چقدر است و این تنوع قابل توجه است. چالش‌های ناشی از داروها با کاستی‌های روش‌های سنتی تصفیه فاضلاب برجسته می‌شود. بسیاری از مواد پایداری نشان می‌دهند و در برابر درمان‌های شیمیایی و بیولوژیکی رایج مقاوم هستند. در نتیجه، تعداد قابل توجهی از داروها ممکن است هنوز در پساب تصفیه‌شده وجود داشته باشند و در نهایت به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها تخلیه شوند. دامنه روزافزون محصولات دارویی، وضعیت را پیچیده‌تر می‌کند. هر روز داروهای جدیدی ساخته و به بازار

عرضه می‌شوند، اغلب بدون ارزیابی کامل از اثرات آن‌ها بر محیط‌زیست یا اینکه چگونه به خوبی توسط سیستم‌های تصفیه فاضلاب موجود حذف می‌شوند.

۵.۵. فرآیند الکتروانقذاد

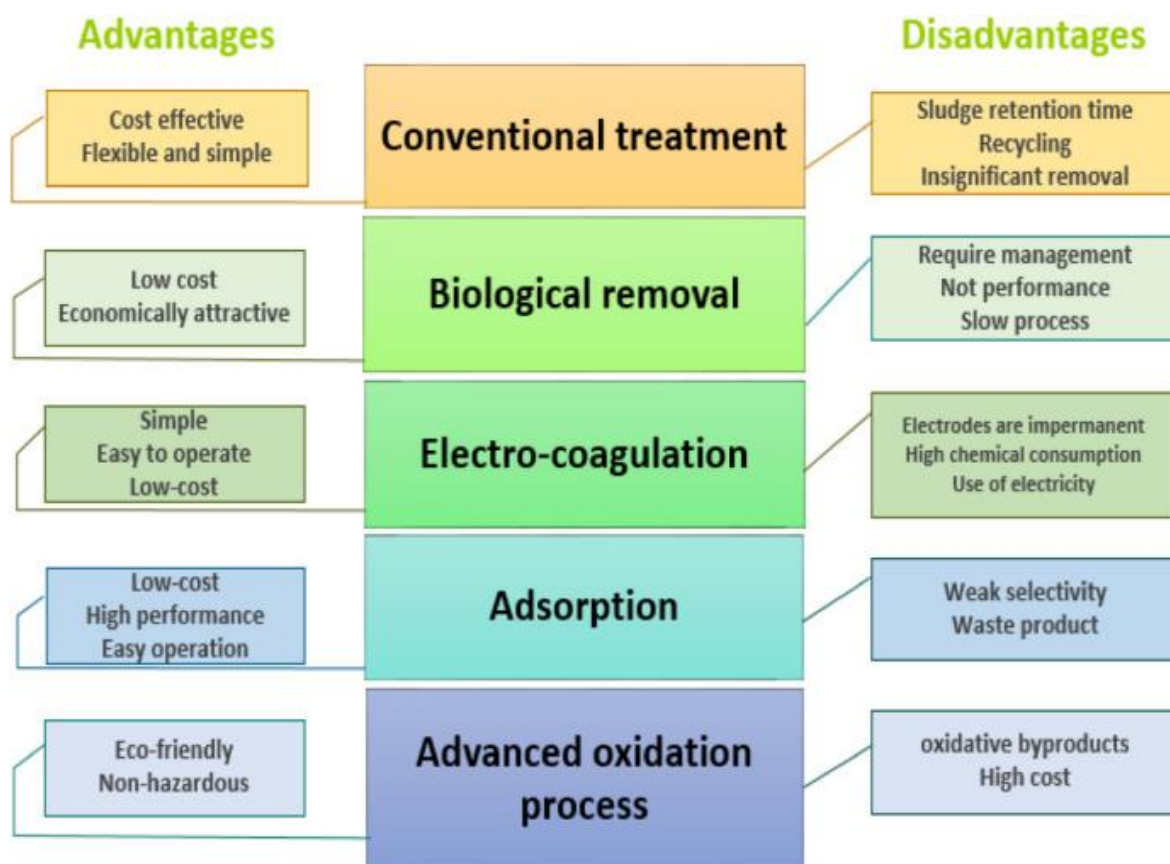
آسیب بالقوه‌ای که داروها می‌توانند به سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی وارد کنند، حضور آن‌ها در فاضلاب را به یک نگرانی محیط‌زیستی مهم تبدیل کرده است. روش‌های سنتی تصفیه فاضلاب اغلب در حذف کارآمد این آلاینده‌ها ناکام هستند و نیاز به فناوری‌های نوآورانه را برجسته می‌کنند. یکی از این رویکردهای امیدوارکننده، الکتروانقذاد (EC) است، فرآیندی که از جریان‌های الکتریکی برای حذف ناخالصی‌ها از فاضلاب استفاده می‌کند. این مقاله فرآیند الکتروانقذاد را بررسی می‌کند و مزایای آن را نسبت به روش‌های سنتی تصفیه و کارایی آن در حذف داروها برجسته می‌کند.

الکتروانقذاد یک فرآیند تصفیه فیزیکی‌شیمیایی است که از جریان‌های الکتریکی برای ناپایدار کردن و تجمع ذرات معلق، کلوئیدها و آلاینده‌های محلول در فاضلاب استفاده می‌کند. این فرآیند شامل آندهای فداکار، معمولاً از جنس آهن یا آلومینیوم، است که در طول تصفیه حل شده و یون‌های فلزی را در محلول آزاد می‌کنند. این یون‌ها با آلاینده‌ها برهمکنش می‌کنند و منجر به تشکیل ریزلخته‌هایی می‌شوند که به راحتی از طریق فیلتراسیون یا ته‌نشینی قابل حذف هستند. مطالعات نشان داده است که الکتروانقذاد یک روش مؤثر برای حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های دارویی از فاضلاب است. تحقیقات نشان می‌دهد که EC می‌تواند غلظت داروهای رایج در فاضلاب، از جمله ضد میکروب‌ها، مسکن‌ها و داروهای ضدالتهاب را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

عوامل متعددی بر اثربخشی الکتروانقذاد تأثیر می‌گذارند. نوع داروی موجود در فاضلاب نقش مهمی ایفا می‌کند، زیرا داروهای مختلف به دلیل ترکیبات شیمیایی و خواص متمایز خود، سطوح مختلفی از کارایی حذف دارند. به عنوان مثال، داروهای آب‌گریز معمولاً در مقایسه با داروهای آب‌دوست **easier to remove** هستند. شرایط عملیاتی مانند pH، زمان ماند و چگالی جریان نیز برای کارایی فرآیند الکتروانقذاد بسیار مهم هستند. با بهینه‌سازی این پارامترها، می‌توان حذف داروهای خاص را بهبود بخشید. علاوه بر این، انتخاب ماده الکترود بر کارایی کلی فرآیند و تولید منعقدکننده‌ها تأثیر

می‌گذارد. به عنوان مثال، الکترودهای آلومینیومی نتایج امیدوارکننده‌ای در حذف برخی داروها نشان داده‌اند.

الکتروانقصاد یک جایگزین قابل دوام برای حذف داروها از فاضلاب ارائه می‌دهد زیرا راندمان حذف بالا و استفاده از مواد شیمیایی **minimal** است. این روش به ویژه برای مقابله با نگرانی فزاینده آلودگی دارویی در آب‌ها جذاب است. با ادامه تحقیقات برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و بهبود طراحی سیستم، الکتروانقصاد پتانسیل بهبود قابل توجه فرآیندهای تصفیه فاضلاب و محافظت از اکوسیستم‌های آبی در برابر آلاینده‌های دارویی را دارد. پذیرش این فناوری پیشرفته می‌تواند راه را برای استراتژی‌های مدیریت فاضلاب پایدارتر از نظر محیط‌زیست در آینده هموار کند. مزایا و معایب فرآیندهای مختلف تصفیه برای حذف داروها در شکل ۱۰ خلاصه شده است.

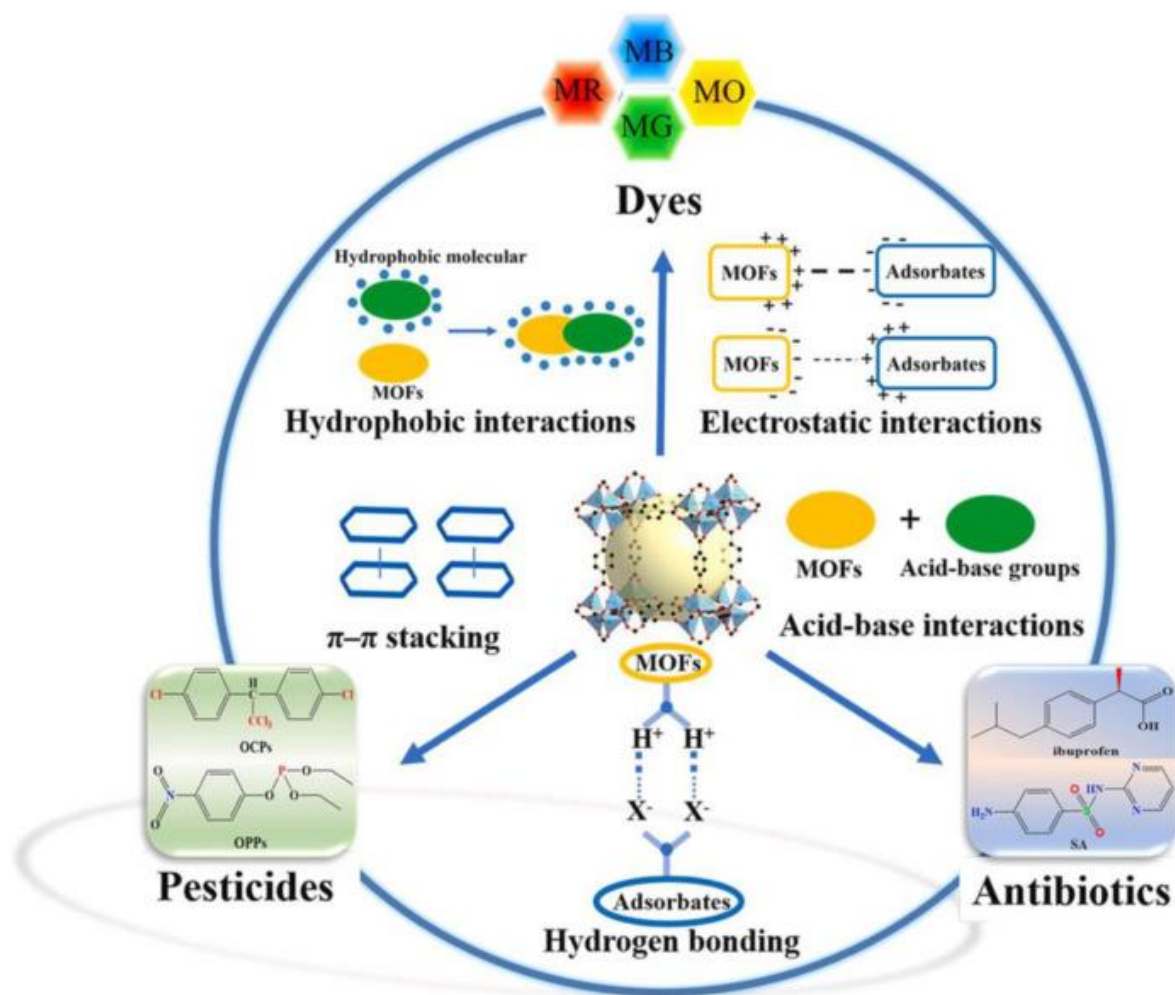


شکل ۱۰: مزایا و معایب فرآیندهای مختلف تصفیه برای حذف داروها

۶. حذف آفت‌کش‌ها

آفت‌کش‌ها علاوه بر کاربرد در جلوگیری از تخریب در طول ذخیره‌سازی یا حمل‌ونقل، به عنوان تنظیم‌کننده‌های رسیدن، عوامل نازک‌کننده میوه، مواد برگ‌زدای، خشک‌کننده‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد استفاده می‌شوند. با این حال، یکی از علل اصلی آلودگی آب نیز استفاده از آفت‌کش‌ها است. هر آفت‌کشی دارای عوارض جانبی سمی است و سرطان‌زا است. آفت‌کش‌ها از نظر بیولوژیکی مقاوم و سمی هستند. آفت‌کش‌ها، حتی مقادیر کم، می‌توانند باقی بمانند و تأثیر قابل توجهی بر سلامت انسان و اکوسیستم داشته باشند. از آنجایی که فوتوکاتالیست نیمه‌رسانا پایداری شیمیایی و خواص ضدتخریب بیولوژیکی ارائه می‌دهد، در صنعت تخریب آفت‌کش‌ها نیز استفاده شده است. بیشتر مواد نیمه‌رسانای مورد استفاده در تخریب فوتوکاتالیستی آفت‌کش‌ها در اکسیدهای فلزی مختلف) مانند ZnO و TiO_2) یافت می‌شوند. از هتروجانکشن $\text{p-n Ag/Ag}_2\text{O-TiO}_2$ مزوپروس برای تخریب فوتوکاتالیستی علف‌کش دایمتنامید P-در حضور نور مرئی استفاده شد. آفت‌کش‌ها عمدتاً از سه طریق وارد سیستم آبی می‌شوند: (الف) منطقه کشاورزی، جایی که به طور گسترده برای کنترل آفات برای محافظت از محصولات در برابر آفات استفاده می‌شوند. (ب) ضایعات شرکت‌های تولید کننده آفت‌کش؛ و (ج) استفاده مسکونی. علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، جونده‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه نمونه‌هایی از آفت‌کش‌ها هستند. استفاده بیش از حد و کنترل‌نشده از آفت‌کش‌ها می‌تواند از طریق رواناب کشاورزی آب‌ها را آلوده کند و حیات آبریان و سلامت انسان را به خطر بیندازد. سازمان بهداشت جهانی (WHO) بیان می‌کند که به جز دی‌آلدرین، هپتاکلر، اپوکسید آلدرین و هپتاکلر که محدوده قابل قبول ۰.۳ پی‌پی‌ام دارند، حداکثر سطح مجاز هر آفت‌کش منفرد و مجموع آفت‌کش‌ها در آب آشامیدنی به ترتیب ۰.۱ و ۰.۵ پی‌پی‌ام است. قرار گرفتن بیش از حد در معرض آفت‌کش‌ها می‌تواند باعث مشکلات گوارشی، پوستی، سرطانی، عصبی، غدد درون‌ریز، تولید مثل و تنفسی در انسان شود. تضمین آب آشامیدنی پاک و حفاظت از زیستگاه‌های آبی مستلزم حذف آفت‌کش‌ها از آب است. ترکیبی از تکنیک‌های طراحی شده برای مقابله با انواع خاص آفت‌کش‌های موجود و استفاده مورد نظر از آب تصفیه‌شده اغلب برای حذف مؤثر آفت‌کش‌ها از

آب ضروری است. برای تأمین منابع آب ایمن و پاک، بهبود این تکنیک‌های تصفیه با تحقیقات و پیشرفت‌های فناوری مستمر ضروری است. آب آلوده به آفت‌کش را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی با موفقیت تصفیه کرد. علاوه بر این، تخلخل افزایش یافته، منافذ قابل تنظیم و سهولت تولید MOF ها توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بیشتر اوقات، از برهمکنش‌های $\pi-\pi$ ، تبادل یونی، پیوند هیدروژنی، برهمکنش‌های اسید-باز و برهمکنش‌های الکترواستاتیک در روش حذف مواد سمی با استفاده از MOF ها استفاده می‌شود. در فرآیند جذب، برهمکنش‌های الکترواستاتیک بین MOF های با بار مخالف (جاذب‌ها) و بارهای سطحی روی آلاینده‌ها (جذب‌شونده‌ها) ضروری هستند. شکل ۱۱ مکانیسم‌های جذب MOF ها را در حذف آلاینده‌ها از فاضلاب توصیف می‌کند. در اینجا به چند روش رایج اشاره می‌شود.



شکل ۱۱: فرآیندهای جذب MOF ها

۶.۱. روش‌های فیزیکی

نوعی از رویکرد تصفیه که در آن استفاده از نیروهای فیزیکی غالب است، به عنوان عملیات واحد فیزیکی شناخته می‌شود. دسته روش‌های فیزیکی نه تنها شامل جذب، بلکه تکنیک‌های فیلتراسیون غشایی مانند الکترودیالیز، اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون نیز می‌شود. فرآیندهای غربالگری، اختلاط، لخته‌سازی، ته‌نشینی، شناورسازی و فیلتراسیون معمولاً در صنعت استفاده می‌شوند. علاوه بر این، روش فیزیکی به روش‌هایی اطلاق می‌شود که صرفاً فیزیکی هستند و برای بهبود یا تصفیه فاضلاب، شامل هیچ تغییر شیمیایی یا بیولوژیکی قابل توجهی نمی‌شوند. روش دیگر، جذب را

می‌توان به عنوان یک تکنیک جداسازی تعادلی توصیف کرد که برای ضدعفونی آب به خوبی کار می‌کند.

۶.۲. روش‌های شیمیایی

هنگامی که صحبت از تصفیه فاضلاب می‌شود، روش‌های واحد شیمیایی مشابه تصفیه فیزیکی هستند و از میکروارگانیسم‌ها استفاده نمی‌کنند. تصفیه شیمیایی نوعی تصفیه است که در آن آلاینده‌ها از طریق افزودن مواد شیمیایی یا از طریق سایر واکنش‌های شیمیایی حذف یا تبدیل می‌شوند. فرآیندهای تصفیه شیمیایی رسوب‌گذاری، جذب و ضدعفونی نمونه‌هایی هستند. فاضلاب‌های صنعتی اغلب به صورت شیمیایی تصفیه می‌شوند زیرا میکروارگانیسم‌ها همیشه نمی‌توانند آلاینده‌های موجود در آن‌ها را به طور مؤثر حذف کنند. علاوه بر این، این روش شامل مواد شیمیایی القاکنده لخته‌سازی مانند کلسیم، آهن یا آلومینیوم است که به پساب رنگی اضافه می‌شوند. از عوامل دیگری نیز در این روش استفاده شده است. برای بهبود روش، ممکن است این دو ماده با هم نیز وارد شوند. اکسیدان‌های قوی که آفت‌کش‌ها را به ترکیبات کم‌خطرتر تجزیه می‌کنند عبارتند از پراکسید هیدروژن، ازن و کلر. برای برخی از مواد شیمیایی آفت‌کش، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل بسیار مؤثر هستند. علاوه بر این، افزودن منعقدکننده‌ها می‌تواند به تجمع ذرات آفت‌کش کمک کند که سپس می‌توانند با فیلتراسیون یا ته‌نشینی حذف شوند.

۶.۳. گیاه‌پالایی

برخی از گیاهان می‌توانند آفت‌کش‌ها را از آب آلوده جذب کرده و آن‌ها را تجزیه کنند. این تکنیک از روش‌های طبیعی گیاهان برای حذف یا تثبیت آلاینده‌ها استفاده می‌کند. گیاه‌پالایی یک روش سازگار با محیط‌زیست و پایدار برای تصفیه آب آلوده با گیاهان است. این روش از توانایی ذاتی برخی از گونه‌های گیاهی برای جذب، جمع‌آوری و گاهی تجزیه آلاینده‌هایی مانند آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین و مواد شیمیایی آلی استفاده می‌کند.

۶.۴. تصفیه الکتروشیمیایی

تصفیه الکتروشیمیایی به استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی برای تصفیه آب و فاضلاب آلوده اشاره دارد. این رویکرد یک تکنیک قدرتمند و همه‌کاره برای مقابله با آلودگی آب را نشان می‌دهد و یک راه مؤثر برای تصفیه طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها ارائه می‌دهد. به دلیل کارایی، سازگاری و توانایی **handling** آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین، ترکیبات آلی و میکروارگانیسم‌ها، تصفیه الکتروشیمیایی به یک جزء حیاتی از استراتژی‌های مدیریت آب مدرن تبدیل شده است. با ادامه پیشرفت‌های فناوری، انتظار می‌رود بهبودهای آینده در کارایی، مقرون به صرفه بودن و مقیاس پذیری، کاربرد آن را در محیط‌های صنعتی و شهری گسترش دهد. تصفیه الکتروشیمیایی با استفاده از فرآیندهای شیمیایی که توسط انرژی الکتریکی هدایت می‌شوند، یک راه حل نوآورانه و پایدار برای تصفیه آب ارائه می‌دهد.

تصفیه الکتروشیمیایی شامل چندین مکانیسم اساسی است که به حذف آلاینده‌ها کمک می‌کند. یکی از فرآیندهای اولیه الکترولیز است که در آن جریان الکتریکی از آب آلوده عبور داده می‌شود. این جریان از طریق الکترودهای غوطه‌ور (آندها و کاتدها) یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و واکنش‌های الکتروشیمیایی را تسهیل می‌کند که آلاینده‌ها را تخریب یا حذف می‌کنند. یک مکانیسم کلیدی در تصفیه الکتروشیمیایی، واکنش‌های اکسایش-کاهش (ردوکس) است. در آند، واکنش‌های اکسیداسیون گونه‌های واکنش دهنده‌ای مانند کلر و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌کنند که به طور مؤثر آلاینده‌های آلی را اکسید و تخریب می‌کنند. به طور همزمان، واکنش‌های احیا در کاتد رسوب گذاری یون‌های فلزی را تسهیل می‌کنند و به حذف کارآمد آن‌ها از آب کمک می‌کنند. فرآیند پرکاربرد دیگر الکتروانفکاد است که در آن هیدروکسیدهای فلزی در آند تولید می‌شوند. این منعقدکننده‌ها ذرات معلق و آلاینده‌ها را به لخته‌های بزرگتر تجمع می‌دهند و حذف آن‌ها را از طریق ته‌نشینی یا فیلتراسیون ساده می‌کنند. این روش به ویژه در تصفیه فاضلاب حاوی جامدات معلق، روغن‌ها و فلزات سنگین مؤثر است. الکتروریسی یکی دیگر از تکنیک‌های الکتروشیمیایی ضروری است که برای استخراج فلزات سنگین از آب استفاده می‌شود. از طریق واکنش‌های احیا که روی سطح کاتد رخ می‌دهد، یون‌های فلزی به صورت جامد رسوب می‌کنند و امکان حذف انتخابی و بازیابی بالقوه آن‌ها را برای استفاده مجدد فراهم می‌کنند. علاوه بر این، تصفیه الکتروشیمیایی

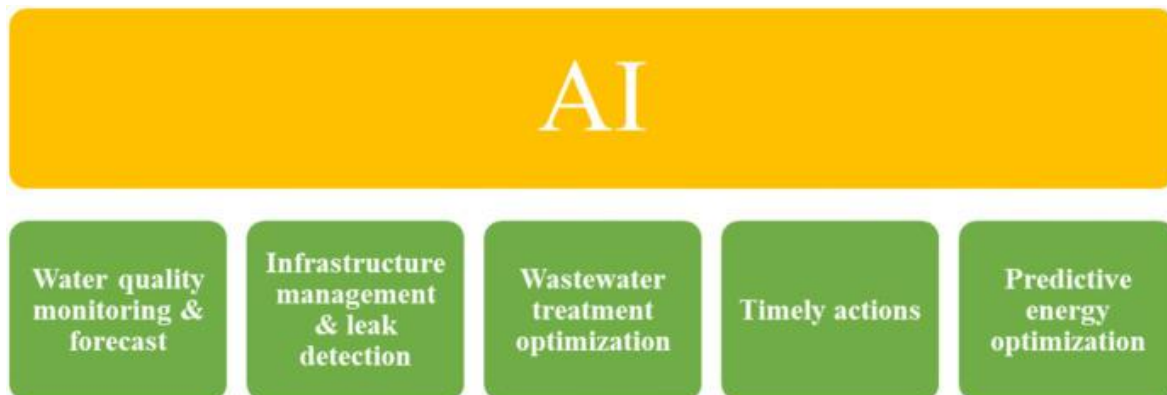
می‌تواند فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) را افزایش دهد، که در آن برخی از سیستم‌ها اکسیدان‌های قوی مانند پراکسید هیدروژن یا ازن تولید می‌کنند. این اکسیدان‌های بسیار واکنش‌دهنده تجزیه آلاینده‌های آلی پیچیده را تسهیل می‌کنند و تخریب آلاینده‌های پایدار را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند.

به طور کلی، تصفیه الکتروشیمیایی به عنوان یک فناوری تصفیه آب امیدوارکننده به تکامل خود ادامه می‌دهد و راه‌حل‌های پایدار و کارآمد از نظر انرژی را برای مدیریت فاضلاب صنعتی و شهری ارائه می‌دهد. تحقیقات در حال انجام بر بهینه‌سازی مواد الکتروود، کاهش مصرف انرژی و ادغام سیستم‌های هیبریدی برای افزایش کارایی تصفیه و امکان‌سنجی اقتصادی متمرکز است.

۷. کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

مصرف آب توسط انسان، مدیریت فاضلاب را به یک موضوع پیچیده تبدیل کرده است و روش‌های سنتی مدیریت فاضلاب دارای معایب خاص خود هستند. مدیریت فاضلاب بدون شک از هوش مصنوعی بهره‌مند می‌شود، که در کاربردهای مختلفی برای بهبود نتایج استفاده شده است، اما با مجموعه معایب خاص خود همراه است. با هوش مصنوعی ترکیب‌شده با اینترنت اشیا (IoT)، خودکارسازی، تنظیم، کنترل و بسیاری از بخش‌های پیچیده دیگر یک نهاد مدیریت فاضلاب ساده‌تر می‌شود. خطاها و خطرات انسانی نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تصفیه فاضلاب یک نوآوری قابل توجه با مزایای متعدد است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، فرآیندهای تصفیه فاضلاب را دقیق‌تر، صحیح‌تر، راحت‌تر، پیچیده‌تر، مقرون‌به‌صرفه‌تر و زمان‌کارآمدتر می‌کنند. تجزیه و تحلیل داده‌ها، مدل‌های پیش‌بینی و مدیریت فرآیندهای تصفیه فاضلاب با کمک هوش مصنوعی و یادگیری ماشین بهتر انجام می‌شود. فراتر از تکنیک‌های سنتی تصفیه، این پیشرفت‌های فناوری برای تحلیل، تخمین و بهینه‌سازی انرژی استفاده می‌شوند. سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی قادر به پیش‌بینی کیفیت تخلیه، ارائه توصیه‌های عملیاتی و پایش ویژگی‌های بیولوژیکی و شیمیایی فاضلاب هستند. استفاده از هوش

مصنوعی در مدیریت آب و فاضلاب با پنج کاربرد اصلی نشان داده می‌شود: کنترل تصفیه آب، بهینه‌سازی پیش‌بینی‌کننده انرژی، مدل‌سازی فاضلاب، پاسخ سریع و بهینه‌سازی تصفیه فاضلاب (شکل ۱۲). این کاربردها نشان می‌دهند که هوش مصنوعی چگونه پایداری، کارایی و مصرف انرژی مدیریت منابع آب را بهبود می‌بخشد. کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تصفیه آب فرصت‌های متعددی را نیز ارائه می‌دهد، از جمله خودکارسازی فرآیند و تفسیر داده‌های بزرگ. تحلیل بلادرنگ داده‌های بزرگ، شناسایی الگوها و زیبایی‌های غیرعادی و توسعه استراتژی‌های تصفیه که نتایج را بهبود می‌بخشد، باید با این فناوری‌ها امکان‌پذیر باشد. فناوری‌های پیشرفته تصفیه‌خانه‌های آب که از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین استفاده می‌کنند، کیفیت و کارایی آب را بهبود می‌بخشند و در عین حال هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین همچنین به تحلیل پیش‌بینی‌کننده کمک می‌کنند، که مدلی برای نگهداری قبل از خرابی و زمان‌بندی آن بر اساس مشخصات نشان می‌دهد. روشی پیش‌بینی‌کننده مانند این به کاهش زمان توقف، افزایش عمر مفید و حفظ سطح مناسب کارایی فرآیند تصفیه کمک می‌کند.



شکل ۱۲: کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تصفیه فاضلاب

مدیریت فاضلاب یک مسئله فوری است زیرا جهان با شهرنشینی، صنعتی‌شدن و تراکم جمعیت رو به رشد دست و پنجه نرم می‌کند. فلزات سنگین، میکروپلاستیک‌ها و داروها تنها چند نمونه از آلاینده‌های پیچیده موجود در پساب‌های مدرن هستند که فناوری‌های سنتی تصفیه فاضلاب در **handling** آن‌ها با مشکل مواجه هستند. در این چارچوب، فناوری‌های نوآورانه در حال توسعه هستند تا فرآیندهای تصفیه فاضلاب را متحول کنند و یکی از حوزه‌های بالقوه امیدوارکننده، فناوری نانو است. بنابراین، فناوری نانو، هوش مصنوعی و سایر فناوری‌های نوظهور برای بهبود تصفیه فاضلاب به عنوان فناوری‌های آینده برای تصفیه فاضلاب توصیه شدند.

فناوری نانو: فناوری نانو بر دستکاری ماده در مقیاس اتمی و مولکولی، معمولاً در محدوده ۱-۱۰۰ نانومتر، متمرکز است. این حوزه پتانسیل قابل توجهی برای افزایش کارایی فرآیندهای حذف آلاینده‌ها، به ویژه در تصفیه فاضلاب، ارائه می‌دهد. نوید فناوری نانو در نسبت سطح به جرم بالای مشخصه نانوذرات نهفته است. سه روش اصلی برای استفاده از فناوری نانو در تصفیه فاضلاب وجود دارد: استفاده از نانوذرات منفرد، ترکیب آن‌ها به شکل پودر یا گرانول و ادغام آن‌ها در غشاهای پلیمرها. در زمینه موانع واکنش‌دهنده تراوا و فوتوکاتالیست‌ها، ذرات آهن با ظرفیت صفر منفرد، ذرات آهن پوشش‌داده شده با پالادیوم و نانوذرات طلا پوشش‌داده شده با پالادیوم نوید قابل توجهی نشان می‌دهند. مواد نانوسکوپي مانند نانولوله‌های کربنی و الیاف آلومینا، زمانی که در اطراف ساختار فیلتر بلوک کربنی پیچیده می‌شوند، و همچنین غشاهای $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ و نانولوله‌های کربنی تعبیه شده در غشاهای فیلتراسیون زئولیت، در حذف آلاینده‌های آب نیز مؤثر هستند. فناوری نانو کاربردهای کلیدی متعددی در تصفیه فاضلاب ارائه می‌دهد. نانوفیلترها، ساخته شده از موادی مانند نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن، حذف انتخابی آلاینده‌های آب را امکان‌پذیر می‌کنند. این غشاهای پیشرفته تراوایی و انتخابی‌پذیری استثنایی را نشان می‌دهند و به طور مؤثر آلاینده‌ها را جدا کرده و در عین حال گرفتگی را به حداقل می‌رسانند. علاوه بر این، در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)، نانوذرات به عنوان کاتالیست برای تسریع تجزیه پاتوژن‌ها و آلاینده‌های آلی عمل می‌کنند. به عنوان مثال، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، زمانی که توسط اشعه UV فعال می‌شوند، گونه‌های اکسیژن واکنش‌دهنده تولید می‌کنند که مواد مضر موجود در فاضلاب را تخریب می‌کنند.

علاوه بر این، نانوذرات مهندسی شده خاص می‌توانند آلاینده‌های خاصی از جمله فلزات سنگین و باقیمانده‌های دارویی را جذب کنند. این رویکرد سفارشی امکان حذف کارآمد آلاینده‌ها را حتی در غلظت‌های پایین فراهم می‌کند.

هوش مصنوعی و یادگیری ماشین: هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) پتانسیل ایجاد انقلابی در تصمیم‌گیری و کارایی عملیاتی در تصفیه فاضلاب را دارند. با تجزیه و تحلیل داده‌های تصفیه‌خانه در مقیاس بزرگ، این فناوری‌ها امکان پایش بلادرنگ پارامترهای کیفیت آب، بهینه‌سازی دوز مواد شیمیایی و نگهداری پیش‌بینی‌کننده را فراهم می‌کنند. هوش مصنوعی می‌تواند با خودکارسازی وظایف تکراری و ارائه بینش‌های ارزشمند، اثربخشی کلی تصفیه‌خانه‌ها را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد. با توجه به چالش‌های جهانی آلودگی و کمبود آب، تصفیه کارآمد فاضلاب به طور فزاینده‌ای حیاتی شده است. روش‌های سنتی اغلب در مقابله با حجم و پیچیدگی آلاینده‌ها در پساب‌های مدرن با مشکل مواجه هستند. در این زمینه، فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین تأثیر قابل توجهی می‌گذارند و فرصت‌هایی را برای بهبود پایداری، قابلیت اطمینان و کارایی عملیات تصفیه فاضلاب ارائه می‌دهند. این مقاله به بررسی کاربردها، مزایا و چشم‌اندازهای آینده هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در این حوزه حیاتی می‌پردازد. یکی از کاربردهای کلیدی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تصفیه فاضلاب، بهینه‌سازی فرآیند است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌های بلادرنگ از حسگرهای مستقر در تصفیه‌خانه‌ها، پارامترهای عملیاتی مانند دوز مواد شیمیایی، نرخ هوادهی و مدیریت جریان را تنظیم کنند. این تنظیم پویا می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و استفاده از مواد شیمیایی کمک کند و در عین حال کارایی تصفیه را افزایش دهد.

کاربرد مهم دیگر، نگهداری پیش‌بینی‌کننده است. بسیاری از ماشین‌آلات و تجهیزات در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیاز به نگهداری منظم دارند. هوش مصنوعی می‌تواند با تجزیه و تحلیل داده‌های عملکرد تاریخی، پیش‌بینی کند که چه زمانی تجهیزات احتمالاً خراب می‌شوند یا نیاز به سرویس دارند. با اجرای استراتژی‌های نگهداری پیش‌بینی‌کننده، تصفیه‌خانه‌ها می‌توانند هزینه‌های نگهداری را کاهش دهند، عمر تجهیزات را افزایش دهند و زمان توقف را به حداقل برسانند.

پایش کیفیت یکی دیگر از جنبه‌های حیاتی تصفیه فاضلاب است و سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در این زمینه عالی عمل می‌کنند. این سیستم‌ها می‌توانند پارامترهای مختلفی مانند کدورت، سطوح pH و وجود آلاینده‌های خاص را پایش کنند. از طریق تشخیص روندها یا ناهنجاری‌ها در زمان واقعی، هوش مصنوعی می‌تواند به اپراتورها هشدار دهد تا اقدامات اصلاحی فوری انجام دهند و در نتیجه انطباق با مقررات را بهبود بخشیده و کیفیت آب را تضمین کنند.

علاوه بر این کاربردها، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند فرآیندهای مدیریت داده را بهینه‌سازی کنند. تصفیه فاضلاب حجم عظیمی از داده‌ها را از حسگرها، آزمایشات آزمایشگاهی و گزارش‌های عملیاتی تولید می‌کند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند جمع‌آوری، پردازش و گزارش‌دهی این داده‌ها را خودکار کنند و اطمینان حاصل کنند که تصمیم‌گیرندگان به اطلاعات به‌موقع و دقیق دسترسی دارند و در عین حال در زمان صرفه‌جویی می‌شود.

بازیابی منابع نیز حوزه‌ای است که هوش مصنوعی می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد. هوش مصنوعی می‌تواند فرآیندهای استخراج منابع ارزشمند، مانند مواد مغذی و انرژی، از فاضلاب را بهینه‌سازی کند. به عنوان مثال، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند شرایط بهینه برای تولید بیوگاز یا بازیابی مواد مغذی را شناسایی کنند و از یک رویکرد اقتصاد چرخشی در تصفیه فاضلاب حمایت کنند.

به طور کلی، هوش مصنوعی پتانسیل افزایش قابل توجه کارایی عملیات تصفیه فاضلاب را از طریق بهینه‌سازی فرآیند در زمان واقعی دارد. این امر منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود حذف آلاینده‌ها می‌شود. علاوه بر این، بینش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به اپراتورها اجازه می‌دهد تا تصمیمات آگاهانه‌ای بر اساس داده‌ها به جای شهود یا تجربه بگیرند و در نتیجه پایداری بهتر به استانداردهای محیط‌زیستی و شیوه‌های مدیریت مؤثرتر را به همراه دارد.

سیستم‌های تصفیه غیرمتمرکز: به ویژه در مناطق روستایی یا به سرعت در حال شهرنشینی، سیستم‌های تصفیه فاضلاب غیرمتمرکز یک جایگزین انعطاف‌پذیر برای تأسیسات متمرکز معمولی ارائه می‌دهند. زیرساخت‌های بزرگ مقیاس هنگام استفاده از فناوری‌هایی مانند واحدهای تصفیه

مدولار و تالاب‌های ساخته‌شده ضروری نیست و می‌توان آن‌ها را در محل استفاده نصب کرد. این سیستم‌ها با بازیافت مواد مغذی و استفاده مجدد از آب، نه تنها فشار بر تصفیه‌خانه‌های متمرکز را کاهش می‌دهند، بلکه بازیابی منابع را نیز ترویج می‌کنند.

۹. نتیجه‌گیری

کمبود آب یک مشکل بزرگ برای بشریت است که ناشی از عواملی مانند رشد جمعیت و اثرات تغییرات اقلیمی است. تصفیه فاضلاب به یک گام حیاتی در محافظت از سلامت انسان و اکوسیستم به طور کلی تبدیل می‌شود. با این حال، تلاش‌ها برای بهبود کیفیت آب و تصفیه، با گسترش سریع جوامع ما، برای همگام شدن تلاش می‌کنند. مشکل کمبود آب با فعالیت‌های انسانی که اثرات پیچیده‌ای بر منابع آب دارند، مانند تغییر چشم‌انداز و معرفی آلاینده‌ها، بدتر می‌شود. این مقاله آخرین تحولات در فناوری‌های تصفیه فاضلاب را پوشش داد. کارایی، سازگاری با محیط‌زیست، مقرون‌به‌صرفه‌بودن، انتخابی‌پذیری و بازیابی منابع، همگی حوزه‌هایی هستند که هر تکنیک در آن‌ها مزایای خاصی دارد. اجرای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متناسب با این نیازها، به دلیل تفاوت در ویژگی‌های فاضلاب، عوامل خاص محلی و اهداف تصفیه، ضروری است. ترکیب روش‌های مختلف تصفیه معمولاً ضروری است زیرا یک تکنیک واحد اغلب برای دستیابی به اهداف تصفیه کافی نیست. به وضوح مشخص شد که برای تصفیه آب تولیدی به سطحی که امکان استفاده مجدد ایمن را به جای تزریق مجدد به چاه‌های دفع آب فراهم کند، سیستم‌های یکپارچه شامل فناوری‌های مختلف ضروری هستند. گرفتگی، تخریب مواد و قابلیت نگهداری، مسائل رایجی هستند که هنوز باید حل شوند و بر پایداری و سرعت تخریب آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، ظهور فناوری‌های جدید، مانند فناوری نانو، هوش مصنوعی و سیستم‌های غیرمتمرکز، توانایی ما را برای شناسایی و ریشه‌کنی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها بهبود بخشیده است. پایش و بهینه‌سازی فرآیند تصفیه در زمان واقعی با ادغام فناوری‌های هوشمند، مانند IoT و AI امکان‌پذیر می‌شود که هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و عملکرد را بهبود می‌بخشد. این نوآوری‌ها نه تنها به مسائل فوری آلودگی محیط‌زیست و کمبود آب می‌پردازند، بلکه با بازیابی منابع ارزشمند مانند انرژی و مواد مغذی، اهداف اقتصاد چرخشی را نیز

پیش می‌برند. به طور کلی، برای ایجاد یک فرآیند تصفیه قابل اعتماد برای این نوع آب، انتخاب فناوری‌های تصفیه ترکیبی باید یک حوزه تمرکز عمده از هر دو دیدگاه نظری و تجربی باشد.