

تصفیه فاضلاب: ارزیابی کوتاه از روش‌های موجود

چکیده

در چند دهه گذشته، افزایش جمعیت و شهرنشینی غیرپایدار منجر به بهره‌برداری گسترده از منابع آب و انرژی شده است. این امر باعث افزایش تقاضا برای آب شیرین شده که به نوبه خود به آلودگی آب به دلیل دفع نادرست فاضلاب از منابع مختلف مانند صنایع، کشاورزی و خانگی منجر شده است. فاضلاب صنایع اغلب حاوی فلزات سنگین سمی و آلاینده‌های نوظهور مضر (ECS) است که می‌توانند به موجودات زنده آسیب برسانند و قابل تجزیه بیولوژیکی نیستند. بنابراین، این یک مسئله جدی است که نیاز به رسیدگی دارد. برای مقابله با این مشکل، تصفیه فاضلاب به دو دلیل اصلی ضروری است: اولاً، برای بازیافت و استفاده مجدد از فاضلاب برای تأمین تقاضای آینده انسانی و کاهش کمبود آب، و ثانیاً، برای اطمینان از رعایت استانداردهای تخلیه فاضلاب برای پایداری محیط زیست در حالی که آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک را به حداقل می‌رساند. در این بررسی، چندین فناوری تصفیه فاضلاب شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به طور انتقادی مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین در مورد تکنیک‌های مختلف تصفیه فاضلاب موجود و محدودیت‌های آن‌ها بحث شده است. در نهایت، محدودیت‌های تکنیک‌های مختلف تصفیه فاضلاب موجود و روش‌های جدید در تصفیه فاضلاب بررسی شده است.

۱. مقدمه

افزایش جمعیت جهانی تهدید و رقابت قابل توجهی برای منابع جهانی ایجاد میکند. بهره‌برداری ناشی از مداخله انسانی از دو منبع اصلی یعنی انرژی و آب، خطرات نگرانکننده‌ای در ارتباط با گرمایش جهانی و آلودگی آب به وجود می‌آورد. آب یکی از نیازهای اساسی است که بدون آن انسان‌ها قادر به بقا نیستند و این منبع طبیعی به وفور در زمین وجود دارد. آب برای نوشیدن، مصارف صنعتی، کارهای خانگی و غیره استفاده می‌شود. افزایش شهرنشینی و صنعتی شدن غیرپایدار منجر به آلودگی آب، از جمله انتشار فاضلاب، مواد زائد سمی و مواد شیمیایی در منابع آبی می‌شود. به همین دلیل، بحران کمبود آب در آینده رخ می‌دهد و نیاز به استفاده مجدد از فاضلاب به طور فزاینده‌ای احساس می‌شود. استفاده مجدد از فاضلاب نیازمند تصفیه و به کارگیری سیستم‌های مناسب تصفیه فاضلاب است. بنابراین، تصفیه فاضلاب برای توسعه پایدار و در عین حال حفظ آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک ضروری است.

فاضلاب از صنایع شیمیایی و پتروشیمی مختلف حاوی ترکیبات شیمیایی مضر است و به عنوان ECS شناخته می‌شوند. اکثر این آلاینده‌ها برای موجودات زنده و محیط زیست مضر و حاوی مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز هستند که عملکرد کل اکوسیستم را مختل می‌کنند.

چندین دسته از ECS شامل تجزیه‌کننده‌های سورفکتانت، روان‌کننده‌ها، داروها، محصولات مراقبت شخصی، آفت‌کش‌های قطبی، حلال‌ها و سایر افزودنی‌های صنعتی مختلف هستند. این آلاینده‌ها نرخ حذف پایینی دارند زیرا نمی‌توانند به صورت بیولوژیکی تجزیه شوند و باید قبل از تخلیه به محیط زیست تصفیه شوند. جذب توسط کربن فعال یکی از روش‌های پیشرفته برای حذف ECها از فاضلاب است. خواص فیزیکی و بیوشیمیایی مختلف فاضلاب و تغییرات در این خواص اثرات مخربی بر محیط زیست می‌گذارند. این خواص شامل موارد زیر است:

- **دما:** فاضلاب از صنایع مختلف حاوی پساب‌های فرآوری شده با دمای بالا است. تخلیه آن در منابع آبی مختلف تهدیدی برای حیات آبریان است.
- **pH:** پساب‌های صنایع پتروشیمی و شیمیایی دارای سطح بالای pH هستند که برای حیات آبریان مناسب نیست زیرا در سطح بالای pH، موجودات دریایی نمی‌توانند زندگی کنند.
- **BOD و COD:** اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی فاضلاب افزایش می‌یابد که برای حیات آبریان نامناسب است زیرا منجر به کاهش اکسیژن محلول و در پی آن مرگ موجودات زنده می‌شود.
- **DO:** اکسیژن محلول در منابع آبی با افزایش فاضلاب کاهش می‌یابد. این کمبود اکسیژن در آب منجر به خفگی موجودات زنده و مرگ آن‌ها می‌شود. پس از تصفیه فاضلاب، مقدار DO افزایش می‌یابد و از سطح خطر عبور نمی‌کند.
- **جامدات محلول کل:** در فاضلاب، برخی مواد جامد یا آثار آن‌ها وجود دارد که حاوی مواد سمی هستند و تأثیر مرگباری برای آبریان دارند. تصفیه فاضلاب جامدات معلق را از فاضلاب کاهش می‌دهد و آن را برای تخلیه به محیط زیست مناسب می‌کند.
- **بو و رنگ:** فاضلاب دارای بوی ناخوشایند، ظاهر کثیف و رنگ تیره است. تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که بوی فاضلاب را از بین می‌برد، مانند روش جذب با استفاده از کربن فعال.
- **کدورت:** کدورت فاضلاب به دلیل وجود جامدات معلق، رس و سایر زباله‌های آلی و معدنی بسیار بالا است. تصفیه فاضلاب کدورت را تا حد قابل قبول کاهش می‌دهد.

این مقاله تکنیک‌های مختلف تصفیه فاضلاب (یعنی عمدتاً فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) را تحلیل می‌کند. عملکرد، مکانیزم و دامنه تکنیک‌های مختلف نیز بررسی شده است. علاوه بر این، چالش‌ها، مزایا و محدودیت‌های روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب و در نهایت، مزایای اخیر تکنیک‌های تصفیه فاضلاب و چالش‌های آن‌ها برای تجاری‌سازی مورد بحث قرار گرفته است.

۲. روش‌های موجود برای تصفیه فاضلاب

طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های تصفیه فاضلاب است وجود دارد. این تکنیک‌ها اغلب شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند که به طور موفقیت‌آمیزی آب را به چندین روش تصفیه می‌کنند. غلظت رنگ‌ها، ترکیب فاضلاب، هزینه فرآیند و هر گونه آلاینده اضافی در فاضلاب نقش مهمی در انتخاب یک تکنیک خاص دارند.

فاضلاب از منابع مختلفی مانند صنایع، شهرها، بیمارستان‌ها و کشاورزی تولید می‌شود. فاضلابی که به طور کافی تصفیه نشده باشد، هنگام تخلیه به منابع آبی، باعث ایجاد اثرات مختلف بهداشتی و زیست‌محیطی می‌شود. تصفیه فاضلاب برای رسیدن به حد مجاز آلاینده‌هایی که می‌توانند به محیط زیست تخلیه شوند، ضروری است.

۱.۲. تکنیک‌های فیزیکی برای تصفیه فاضلاب

روش‌های فیزیکی مختلفی برای تصفیه فاضلاب وجود دارد که به شرح زیر است:

- جذب
- فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (AOP)
- جداسازی توسط غشا
- جداسازی توسط نانو فیلتر

۱.۱.۲. جذب:

روش جذب برای تصفیه فاضلاب به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود و یک فرآیند انتقال جرم است که شامل تجمع مولکول‌های مایع یا گاز بر روی سطح جامد است. جذب به دو نوع تقسیم می‌شود، جذب فیزیکی و جذب

شیمیایی. در نوع اول، نیروهای جاذبه ضعیف و از نوع واندروالسی هستند، نتایج فرآیند قابل برگشت است و در دمای پایین تر یا نزدیک به دمای بحرانی ماده جذب شده رخ می دهد. در حالت دوم، نیروهای جاذبه بین مولکول های جذب شده و سطح جامد به دلیل پیوند شیمیایی است. این فرآیند فقط روی یک لایه تک مولکولی رخ می دهد، در حالی که در جذب فیزیکی، بیش از یک لایه از مولکول ها بر روی سطح جامد وجود دارد. موادی که به صورت شیمیایی بر روی سطح جامد جذب شده اند به دلیل نیروهای قوی تر به راحتی حذف نمی شوند. جذب فیزیکی با کاهش انرژی آزاد و آنتروپی سیستم جذب همراه است و بنابراین این فرآیند گرمازا می باشد.

جذب تأثیر زیادی بر انتقال فلزات سنگین، سمیت و دسترسی بیولوژیکی در محیط های آبی دارد و یک واحد پرکاربرد برای تصفیه فاضلاب است زیرا کار با آن آسان، انعطاف پذیر، مقرون به صرفه و کارآمد برای مقادیر کم مواد مضر است. انتقال آلاینده از محلول آبی به سطح جامد، جذب بر روی سطح جامد و انتقال درون ذره جذب سه فرآیند اساسی در جذب بر روی جامد هستند. از طریق نیروی جاذبه الکترواستاتیک، آلاینده های باردار تمایل به جذب بر روی جامد های با بار مخالف دارند. به طور کلی، معیارهای مورد استفاده برای درک جذب فلزات توسط مواد مختلف شامل ایزوترم جذب فرویندلیش (K_F) و حداکثر ظرفیت جذب لانگمویر (q_{max}) هستند.

در این روش، انواع زیادی از جامد ها برای تصفیه فاضلاب بر اساس نیاز استفاده می شوند. دما، pH، زمان مخلوط کردن و غلظت اولیه تنها چند متغیر هستند که ممکن است تأثیری بر کارایی جذب داشته باشند. این جامد ها شامل اکسیدهای فلزی نانوسایز (NMOS)، کربن فعال، زیست توده، پسماندهای کشاورزی و سایر مواد هستند. کربن فعال یکی از جامد های متداول است، زیرا به راحتی به صورت شیمیایی تغییر می کند تا ظرفیت جذب را افزایش دهد و به طور گسترده به عنوان یک جامد برای فیلتراسیون آب استفاده می شود.

یکی از روش های اساسی تصفیه فاضلاب صنعتی برای حذف ترکیبات آلی محلول با بوی شدید از فاضلاب صنعتی، جذب آلاینده ها از جریان فاضلاب آبی به گرانول های کربن فعال (GAC) روی بسترهای ثابت است. مقدار محلول جذب شده در هر گرم جامد در تعادل (q_e) از معادله موازنه جرم به دست آمده است:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{w} \quad (1)$$

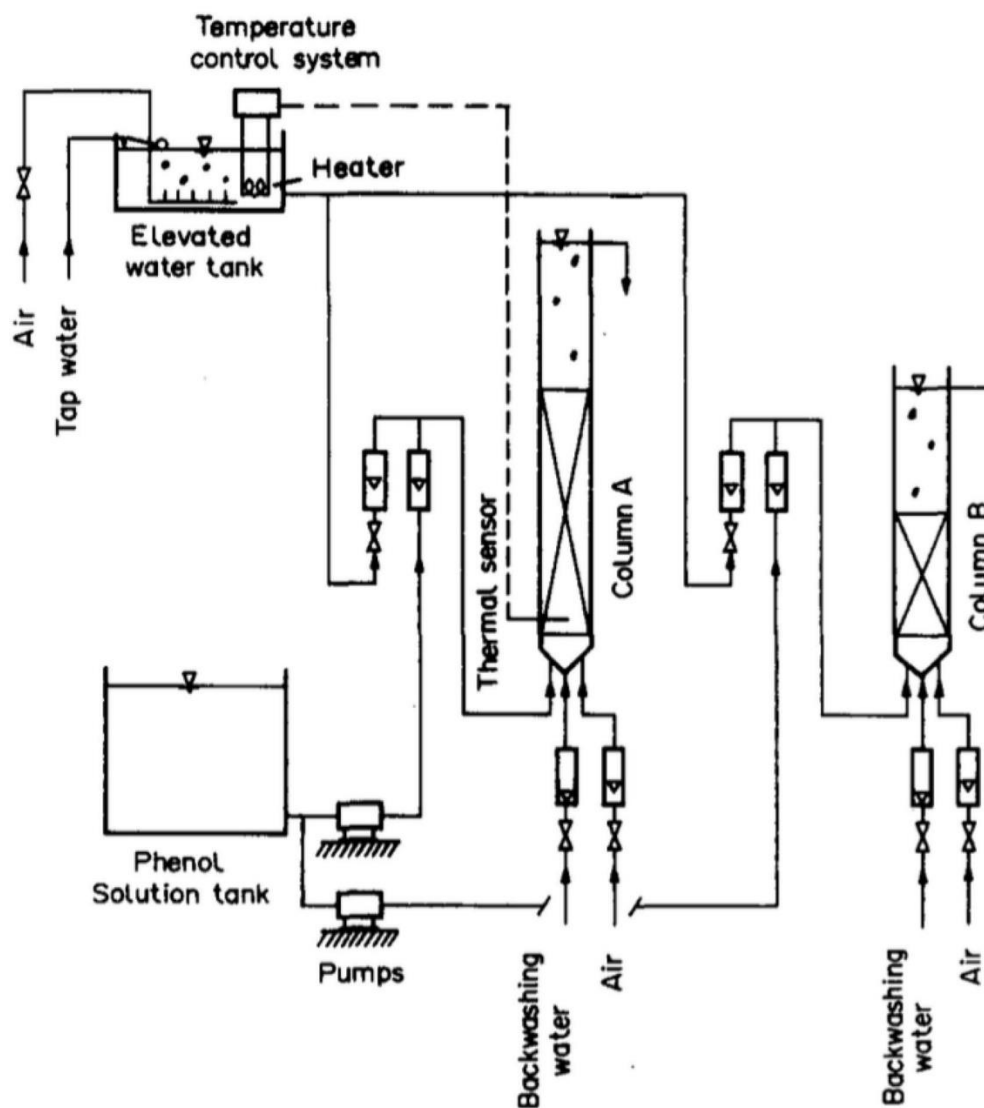
• (C_0) و (C_e) غلظت اولیه و تعادلی محلول آبی را نشان می دهند.

• (V) حجم محلول را نشان می دهد.

• (w) جرم خشک گرانول های کربن فعال است.

روش کربن فعال زیستی (BAC) یکی از فرآیندهای تصفیه فاضلاب است که در دهه ۷۰ میلادی توسعه یافته است. در این فرآیند، جذب کربن فعال همراه با تجزیه زیستی آلاینده‌های آلی در بسترهای BAC اتفاق می‌افتد، جایی که رشد بیولوژیکی هوازی به میزان زیادی رخ می‌دهد. مکانیزم فرآیند BAC در شکل ۱ نشان داده شده است.

Mechanism of biological activated carbon process



شکل ۱. نمایش شماتیک فرآیند کربن فعال زیستی (جذب + تجزیه زیستی) برگرفته از Xiaojian و همکاران، با اجازه از (Elsevier)

مزایا:

- جذب یک فرآیند انعطاف‌پذیر و روشی بسیار موثر برای تصفیه فاضلاب با سینتیک سریع است.
- این فرآیند به تجهیزات ساده برای تصفیه نیاز دارد که هزینه اولیه سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد.
- این روش بسیار مفید است زیرا آلاینده‌های هدف مختلف را حذف می‌کند.
- تجدید جذب‌کننده می‌تواند نیاز به جذب‌کننده جدید را کاهش دهد که اقتصادی است.
- محصولات تجاری گسترده‌ای وجود دارد.

معایب:

- این روش غیرانتخابی است.
- در این روش، انواع مختلفی از جاذب‌ها بر اساس نوع فاضلاب مورد نیاز است.
- کارایی جذب با استفاده مکرر از جاذب‌ها کاهش می‌یابد، زیرا برخی از ذرات آلاینده بر روی سطح جاذب‌کننده گیر کرده‌اند.
- اگرچه تجدید جذب اقتصادی است، اما تجدید جذب‌کننده هزینه‌بر و ممکن است باعث از دست رفتن جاذب‌کننده شود.

۲.۱.۲. فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) :

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته یکی از روش‌های تصفیه فاضلاب هستند. در این روش، رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}\cdot$) تولید و برای اکسیداسیون استفاده می‌شود. رادیکال هیدروکسیل به عنوان عامل اکسید کننده بسیار واکنش‌پذیر در تصفیه فاضلاب عمل می‌کند و در رفتار خود غیرانتخابی است و به سرعت با گونه‌های مختلف واکنش می‌دهد. کارایی AOPs به تولید رادیکال‌های آزاد واکنش‌پذیر، به ویژه رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}\cdot$) بستگی دارد. AOPs در درجه اول برای نابودی آلاینده‌های آلی یا غیرآلی در فاضلاب استفاده می‌شوند.

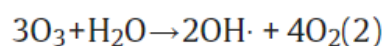
چندین روش می‌تواند برای حذف ترکیبات آروماتیک از فاضلاب استفاده شود که آلاینده‌های آنتروپوژنیک (انسان‌زاد)، سمی و آلاینده‌های زیستی مقاوم هستند و باعث بوی نامطبوع در آب می‌شوند. برخی از این ترکیبات آروماتیک شامل فنل، نیتروفنل و کلروفنل هستند. به طور کلی، این روش به عنوان پیش تصفیه برای تبدیل آلاینده‌ها به ترکیب‌های ساده با زنجیره‌های کوتاه استفاده می‌شود که می‌توانند به وسیله روش‌های معمولی دیگر تصفیه شوند. انواع مختلفی از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته شامل تشعشع، ازوناسیون، فوتولیز،

فوتوکاتالیز، واکنش‌های مبتنی بر فنتون و فناوری‌های اکسیداسیون الکتروشیمیایی وجود دارند. این فرآیندها بر اساس نوع فاضلاب استفاده می‌شوند؛ به عنوان مثال، برای تصفیه فاضلاب دارویی، می‌توان از ازوناسیون و فرآیند فنتون یا فوتوفنتون استفاده کرد.

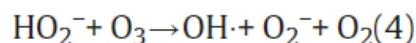
ازوناسیون / اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر ازون:

فرآیند ازوناسیون بر اساس تولید گونه‌های اکسنده است. ازون (O_3) یک اکسیدان قوی می‌باشد که ماده آلی را تجزیه می‌کند؛ به طور کلی، این روش برای ضدعفونی استفاده می‌شود. این فرآیند نیاز به مصرف انرژی بالا برای تولید اکسیژن از اکسیژن دارد و انتقال جرم به صورت موثر به فاضلاب را فراهم می‌کند.

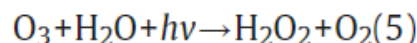
از طرف دیگر، اکسیداسیون مستقیم O_3 یک واکنش انتخابی است که O_3 تنها با ترکیبات آلی در اشکال یونیزه و تفکیک شده آن‌ها واکنش می‌دهد. اکسیداسیون با تولید $OH\cdot$ از O_3 در شرایط خاص آغاز می‌شود، و واکنش کلی مرتبط با تولید OH به صورت زیر است:



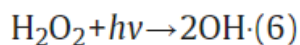
در حضور اکسنده‌های دیگر، بهره‌وری $OH\cdot$ به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد. چرخه تجزیه ازون نیز با افزودن هیدروژن پراکسید بهبود می‌یابد تا منجر به تشکیل $HO\cdot$ شود.



در O_3 /تشعشع فرابنفش (UV)، H_2O_2 به عنوان یک اکسنده اضافی ابتدا از طریق فوتولیز ازون تولید می‌شود (معادله ۵).



در نتیجه، $OH\cdot$ می‌تواند حداقل به سه روش تولید شود: ازوناسیون (معادله ۲)، O_3/H_2O_2 (معادلات ۳ و ۴) و فوتولیز H_2O_2 (معادله ۶).



۳.۱.۲. جداسازی توسط ممبران

در تصفیه فاضلاب، ممبران به عنوان یکی از فناوری‌های متداول برای جداسازی آلاینده‌ها از آب آلوده شناخته شده است. غشا یک مانع است که دو فاز را با نفوذ انتخابی از هم جدا می‌کند. نیروی محرک در جداسازی غشائی می‌تواند گرادیان فشار یا پتانسیل الکتریکی باشد. جداسازی مواد از طریق غشا به اندازه منافذ و مولکول‌ها بستگی دارد. به همین دلیل، انواع مختلفی از فرآیندهای غشائی برای تصفیه فاضلاب توسعه یافته‌اند. این فرآیندها بر اساس اندازه منافذ و مولکول، شامل میکروفیلتراسیون (MF)، اولترافیلتراسیون (UF)، نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز معکوس (RO) هستند. این تکنیک‌های جداسازی غشائی به طور معمول در صنعت استفاده می‌شوند. غشاهای مبتنی بر پلیمر به طور عمده برای فرآیندهای جداسازی استفاده می‌شوند. با این حال، پلیمرهایی مانند پلی سولفید و پلی اتر سولفون آگریز هستند و استفاده از این مواد پلیمری منجر به بسته شدن منافذ و گرفتگی ممبران شده و کارایی غشاها را کاهش می‌دهد. تغییر سطح پلیمر برای غشاهای پلیمری لازم است؛ این تغییر سطح شامل پیوند، ترکیب و ادغام نانومواد مانند Al_2O_3 ، TiO_2 ، نانولوله‌های کربنی، اکسید گرافن و ZnO است. این تغییر سطح از گرفتگی جلوگیری می‌کند و کارایی غشاها را افزایش می‌دهد.

مزایا:

- به دلیل اندازه کوچک، فضای کمی نیاز دارند.
- کار با ممبران ساده است و راندمان بالایی دارند.
- برای جداسازی پسماند جامد از فاضلاب، نیازی به مواد شیمیایی ندارند و آب پایداری تولید می‌کنند.
- تولید لجن کمتر فناوری ممبران را به یکی از روش‌های سودمند برای تصفیه فاضلاب تبدیل کرده است.
- غشاها کاربردهای متعددی مانند تصفیه آب آشامیدنی، تصفیه فاضلاب در صنایع مختلف و ... دارند.

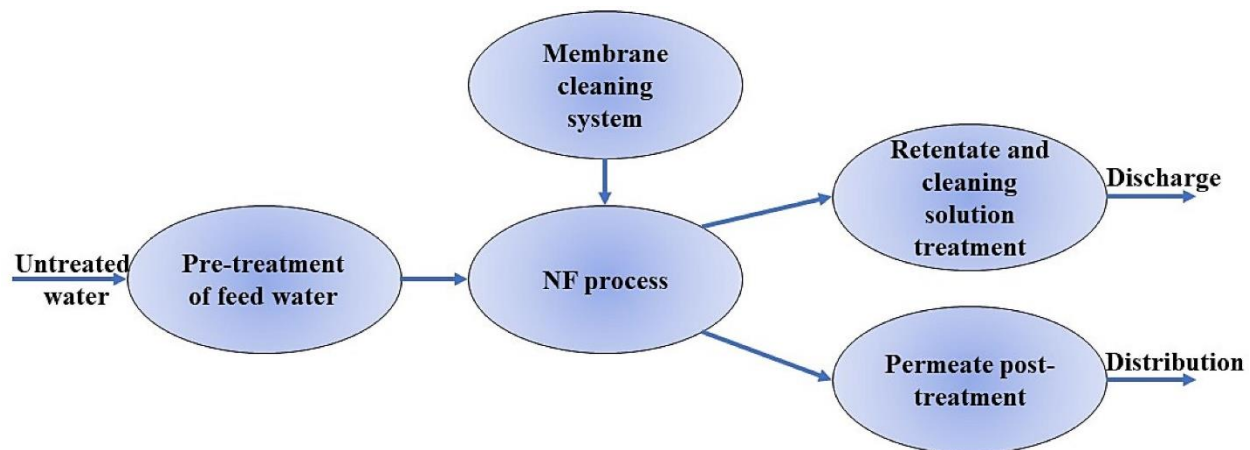
معایب:

- فناوری غشا مصرف انرژی بالایی دارد.
- هزینه‌های عملیاتی و نگهداری بالا، زیرا غشاها باید به طور دوره‌ای با محلول حاوی کلر، اسید یا باز تمیز شوند تا شار غشا حفظ شود.
- ذرات پسماند در غشاهای متخلخل گیر می‌کنند، باعث انسداد شده و در نتیجه منجر به گرفتگی غشا می‌شوند.

۴.۱.۲. تصفیه فاضلاب با استفاده از نانوفیلترها

استفاده از نانو فیلترها (NFs) در تصفیه فاضلاب یک روش مدرن است. نانو فیلترها می‌توانند بر پایه آب یا غیر آب باشند. این روش با کاهش مصرف انرژی نسبت به اسمز معکوس (RO) و بازدهی بالاتر نسبت به اولترافیلتراسیون (UF)، نه تنها برای تصفیه فاضلاب بلکه برای تصفیه آب نیز مناسب است. نانومواد دارای نسبت سطح به حجم بالا، واکنش‌پذیری زیاد، قابلیت جذب بالا و مکانیسم عملکرد ساده هستند. نقش حیاتی نانو فیلترها در حذف انتخابی یون‌ها و عناصر آلی از آب است.

در فرآیند تصفیه به کمک نانو فیلتر (NF)، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بخشی از جریان ورودی از طریق یک غشای نیمه‌تراوا عبور می‌کند. جریان ورودی به دو بخش فیلتر شده و فیلتر نشده تقسیم می‌شود. نانو فیلتر نشان داده است که در حذف مواد آلی به طور قابل توجهی مؤثر است، اما برای از بین بردن رشد میکروبی، ضدعفونی با کلر ضروری است. ویژگی‌های الکترواستاتیکی غشاهای نانو فیلتر نقش کلیدی در دفع آنیون‌ها دارند، به این معنا که پتانسیل زتا منفی بر روی سطح غشا متناسب با pH محلولی که در معرض آن قرار می‌گیرد تغییر می‌کند. ویژگی برجسته نانو فیلتر، کاهش یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} است که منجر به نرم شدن آب می‌شود. علاوه بر این، نانو فیلتر نیاز به تصفیه شیمیایی مجدد برای کاهش سختی ندارد. بنابراین، افزودن یون‌های Na^+ در طول فرآیند فیلتراسیون بر خلاف واحدهای تبادل یونی لازم نیست.



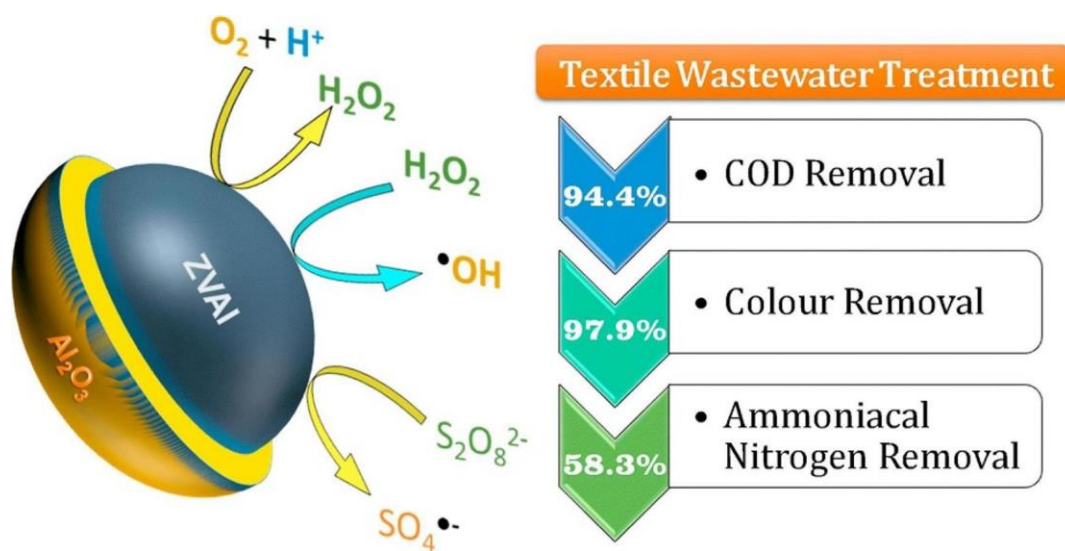
شکل ۲. مراحل اصلی در فرآیند نانوفیلتراسیون برگرفته از (Rathilal و Ezugbe)

با این حال، کاربردهای NF تنها به مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت محدود می‌شود به دلیل اندازه منافذ ممبران، یعنی کوچک شدن در حد نانو، گرفتگی ممبران یکی از موانع تجاری‌سازی آن است. حتی پس از حذف انواع زیرلایه‌های آلی و بازسازی ممبران، حذف مواد آلی طبیعی (NOM) با وزن مولکولی بالا هنوز چالشی دیگر

است. برعکس، تکنیک‌های RO و UF به دلیل سهولت و پوشش مؤثر در محدوده UF، یعنی از لحاظ تکنیکی و اقتصادی مطلوب‌تر هستند. در نهایت، اثرات مضر قرار گرفتن در معرض نانومواد باید طبق دستورالعمل‌های ایمنی مورد توجه قرار گیرد.

۲.۲. تکنیک‌های شیمیایی برای تصفیه فاضلاب

فرآیندهای اکسیداسیون شیمیایی زیادی برای کاربردهای مختلف کاتالیستی شناخته شده‌اند. با این حال، فرآیند اکسیداسیون پیشرفته به عنوان یک روش حیاتی برای مدیریت فاضلاب تلقی می‌شود. اکسیداسیون پیشرفته تمامی تکنیک‌هایی را که برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شوند و ایده‌های مشابهی برای تولید عوامل اکسید کننده مانند رادیکال‌های هیدروکسیل ($\cdot\text{OH}$) دارند، پوشش می‌دهند. فرآیندهای اکسیداسیون ممکن شامل اکسیداسیون الکتروشیمیایی، اکسیداسیون فتو الکتروشیمیایی، اکسیداسیون فنتون با کمک UV و اوزوناسیون باشند. کاتالیزورها و سطوح pH معمولاً عناصر کلیدی در فرآیند اکسیداسیون هستند. تکنیک‌های پیشرفته اکسیداسیون که برای تصفیه پساب‌های نساجی استفاده می‌شوند در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. تصفیه پساب نساجی با استفاده از یک فرآیند اکسیداسیون نوآورانه برگرفته از Khatri و همکاران، با اجازه از (Elsevier)

۱.۲.۲. تکنیک‌های الکتروشیمیایی برای تصفیه فاضلاب

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی (EAOPs) که فاضلاب را تصفیه و رنگ‌ها را حذف می‌کنند، به یک روش نویدبخش تبدیل شده‌اند. زیرا الکترون‌ها گونه‌های خالصی هستند و نیازی به فرآیند اضافی برای حذف لجن رنگی نیست، EAOPها برای محیط زیست مفید هستند. کارایی بالای حذف آلودگی، تجهیزات ساده و کاربری آسان از دیگر مزایای آن‌ها است. با این حال، کاربردهای EAOPها به‌طور قلیل توجهی تحت تأثیر هزینه‌های بالای انرژی و کاهش کارایی اکسیداسیون محدود شده است. محققان برای حل این مشکل، بر روی بهبود پایداری و فعالیت کاتالیزوری مواد الکتروود با ایجاد اکسیدهای فلزی مختلف روی الکترودها و آرایش (دوپینگ) متمرکز شده‌اند. در مقایسه با روش‌های سنتی، اکسیداسیون الکتروشیمیایی با تحویل جریان پالس به عنوان روشی با بهره‌وری انرژی بیشتر در نظر گرفته می‌شود. این روش از جریانی از پالس‌های مربعی با مدت زمان خاموشی (Toff) در هر چرخه پالس (T) و مدت زمان روشن بودن (Ton) استفاده می‌کند. در طول روشن و خاموش شدن، جریان به صورت متناوب با دامنه ثابت اعمال می‌شود. محققان متیل اورانژ (MO)، آلیزارین رد اس (ARS)، و ایندیگو کرمین (IC) را به ترتیب به عنوان نمونه‌هایی از رنگ‌های آزو، آنتراکینون، و ایندیگو انتخاب کردند. هر رنگ تحت اکسیداسیون الکتروشیمیایی با استفاده از پالس آند PbO_2/Ti قرار گرفت. نتایج Wang و همکاران نشان داد که تجزیه رنگ به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل عملیاتی بهینه شده، از جمله چگالی جریان و الکترولیز پالس قرار دارد. برای MO، ARS و IC، به ترتیب، روش اکسیداسیون الکتروشیمیایی می‌تواند نیاز به انرژی را تا ۴۷.۹٪، ۴۱.۰٪ و ۲۵.۵٪ کاهش دهد.

۲.۲.۲. اکسیداسیون فوتوالکتروشیمیایی برای تصفیه فاضلاب

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) که به عوامل اکسیدکننده فعال و قوی مانند رادیکال‌های هیدروکسیل ($\cdot OH$) متکی هستند، برای حذف مؤثر آلاینده‌ها و دستیابی به راندمان‌های بالای حذف جهت حفظ سطح آلودگی زیر حد مجاز، ضروری می‌باشند. فرآیندهای الکتروشیمیایی مبتنی بر $\cdot OH$ در بین AOPها در حال افزایش اهمیت هستند. در فرآیند فوتوالکتروکاتالیز، واکنش شیمیایی در آند نیمه‌هادی به منظور افزایش کارایی نور در پاسخ به جریان الکتریکی رخ می‌دهد. برای مثال، یک فوتوآند نیمه‌رسلنای در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد تا رنگ‌ها را از طریق فوتوالکتروشیمی، مانند متیل اورانژ، حذف کند. رادیکال‌های $\cdot OH$ در هنگام اکسیداسیون آب تولید می‌شوند و به اکسیداسیون MO کمک می‌کنند. این رادیکال‌ها به اندازه کافی واکنش‌پذیر هستند تا پیوندهای آزو را بشکنند، حلقه‌های آروماتیک را باز کنند و مولکول‌های کوچک ایجاد کنند. در حالی که با عمل در غلظت‌های کم و جریان‌های کم می‌توان به بازده بالا دست یافت، نرخ بالایی برای

حذف مؤثر رنگ‌ها در جریان‌های بالا و غلظت‌های اولیه کم قابل دستیابی است. غلظت رنگ‌ها می‌تواند از طریق فوتوالکتروکاتالیز کاهش یافته و تجزیه شود.

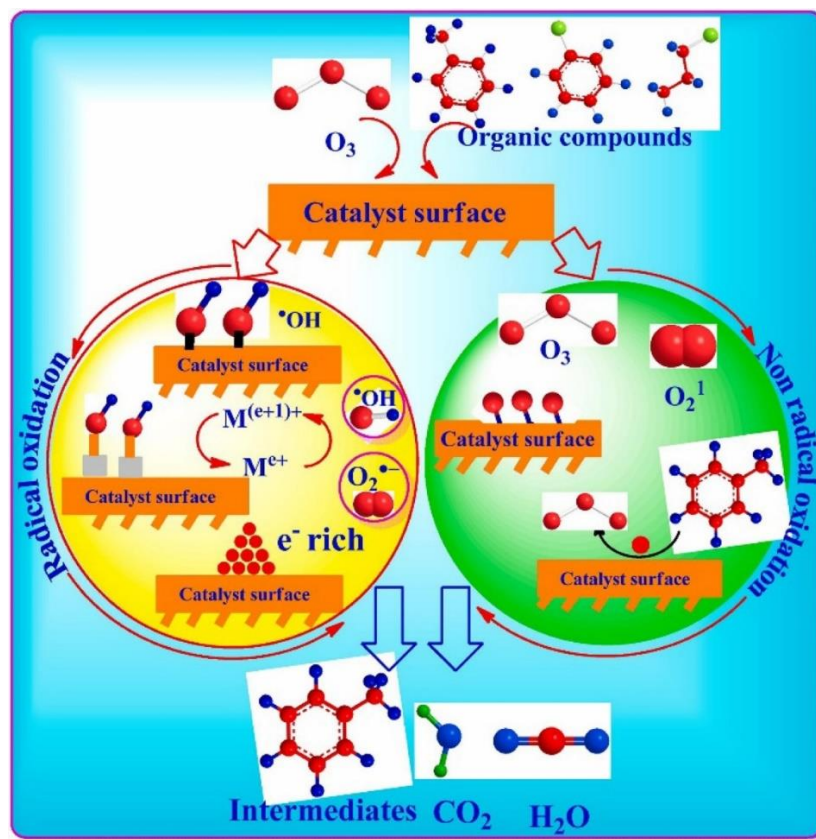
۳.۲.۲. اوزوناسیون

اوزون یک عامل اکسیدکننده قوی است که می‌تواند با مواد آلی و معدنی واکنش داده و انواع واکنش‌های شیمیایی را ایجاد کند. فرآیند اوزوناسیون تحت شرایط خاص pH می‌تواند به عنوان یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (AOP) دسته‌بندی شود Wang و Chen در مطالعه‌ای نتیجه گرفتند که تجزیه اوزون منجر به تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود. بر اساس سطح pH، دو واکنش اوزوناسیون در نظر گرفته می‌شود:

الف) در pH ۴، واکنش مستقیم بین اوزون مولکولی و مواد حل‌شده در آب رخ می‌دهد.

ب) واکنش غیرمستقیم بین مواد حل‌شده و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده توسط تجزیه اوزون در pH بالای ۱۰ رخ می‌دهد.

اوزوناسیون آلاینده‌ها از طریق کاتالیز در شکل ۴ نشان داده شده است. اوزون به تنهایی به دلیل توانایی آن در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در آب یک AOP است. علاوه بر این، برای افزایش راندمان حذف رنگ یا پسماندهای آلی، اوزون می‌تواند به همراه سایر تکنولوژی‌ها مانند H_2O_2 ، ماوراءبنفش (UV) و امواج فراصوت (US) استفاده شود.



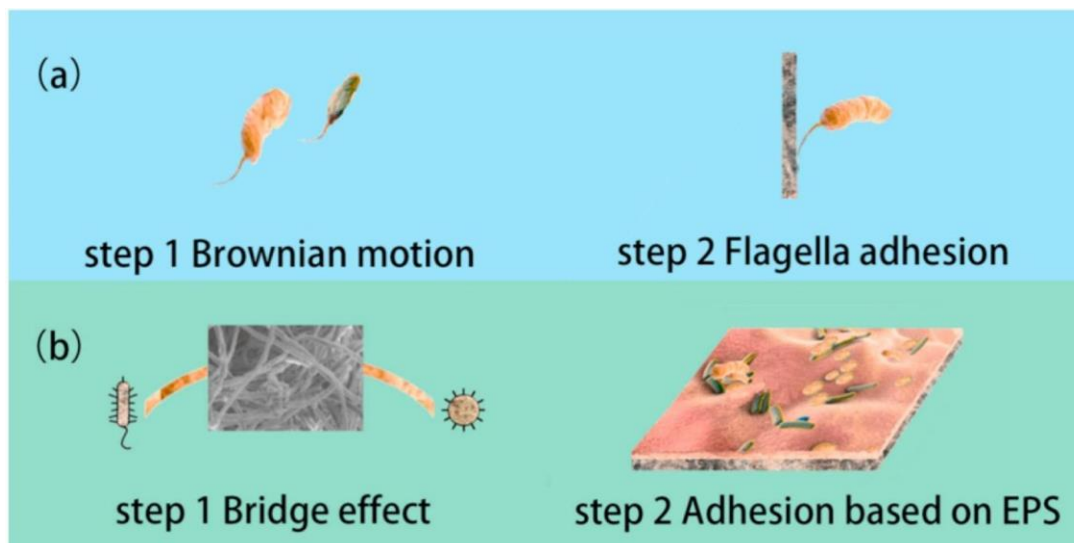
شکل ۴. شماتیک کاربرد فرآیند اوزوناسیون کاتالیزوری برای فاضلاب‌های معمولی برگرفته از E. Issaka و همکاران با اجازه از (Elsevier)

۳.۲. تکنیک‌های بیولوژیکی برای تصفیه فاضلاب

تکنیک‌های بیولوژیکی به عنوان روش‌های سازگار با محیط زیست و مؤثر برای تصفیه فاضلاب در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، کاربرد یک تکنیک بیولوژیکی خاص به نوع و ترکیب فاضلاب بستگی دارد. به عنوان مثال، وضعیت فعلی تخلیه فاضلاب خانگی و ضایعات سوزاندن اجساد همراه با فاضلاب دباغی و سایر فاضلاب‌های صنعتی، عامل اصلی آلودگی آب در رودخانه گنگ در هند است.

Shukla و Tripathi به بررسی تصفیه آب رودخانه گنگ با استفاده از گیاهان سنبل آبی و برخی گونه‌های جلبک مانند کلرلا، میکروسیتیس آئروژینوزا، سینیدسموس کوادریکائودا و اوگلنا وریدیس پرداختند. این مطالعه نتیجه گرفت که استفاده از این گیاهان آبی باعث افزایش BOD در منابع آبی می‌شود. بنابراین، آب آلوده می‌تواند به راحتی و با هزینه‌ای کم تصفیه شود. در مطالعه‌ای دیگر، Chowdhury و همکاران، به تصفیه

فاضلاب کارخانه فرآوری ماهی پرداختند. فاضلاب‌های فرآوری ماهی به BOD و COD بسیار بالایی نیاز دارند (به ترتیب ۱۰۰-۳۰۰۰ و ۱۰۰۰-۱۸۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر). این تحقیق نتیجه گرفت که حدود ۸۰٪ COD می‌تواند از طریق فیلترهای بی‌هوازی و راکتورهای بستر سیال مانند AF و AFB حذف شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که یک راکتور بیولوژیکی چرخان چندمرحله‌ای (RBC) مناسب‌تر است زیرا می‌تواند بیش از ۹۵٪ COD را حذف کند. در یک مطالعه مستقل دیگر که توسط Suehara و همکاران انجام شد، فاضلاب تخلیه شده از کارخانه تولید بیودیزل (BD) به صورت بیولوژیکی تصفیه شد. پس از خروجی از کارخانه BD حاوی مقدار زیادی هگزان و pH بالا است. بنابراین، کشت میکروارگانیسم‌ها یک کار چالش‌برانگیز است. به همین دلیل، از یک مخمر کمپوست‌پذیر (رودوتورولا میسیلاژینوزا) برای کاهش pH به ۶.۸ استفاده شد. همچنین، انواع نمک‌های منبع نیتروژن و عصاره‌های مخمر به تصفیه‌خانه فاضلاب کارخانه BD اضافه شد. تحقیق در نهایت نتیجه گرفت که نسبت کربن به نیتروژن ۱۵.۵ برای تصفیه فاضلاب رقیق شده کارخانه BD بهینه است. همچنین نتیجه‌گیری شد که این تکنیک به دلیل سهولت کنترل عوامل به جز دما ساده است. Ji و همکاران تأثیر میدان مغناطیسی در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب را با تغییر اندازه میدان مغناطیسی در محدوده ۰ تا ۵۰۰.۰ میلی‌تسلا مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که میدان مغناطیسی باعث تسریع تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌ها شده و در نتیجه بازده تصفیه فاضلاب را افزایش داده است. یک تصویر شماتیک از رفتارهای مختلف چسبندگی بیوفیلم‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمای شماتیک از رفتارهای مختلف چسبندگی بیوفیلم: (الف) رفتار چسبندگی باکتریایی به تنهایی؛ (ب) رفتار چسبندگی مبتنی بر EPS برگرفته از Li و همکاران با اجازه از (Elsevier)

با این حال، زمان نگهداری، بازیافت یا دفع لجن، تغییرات در حجم لجن و ماند آن به همراه مکانیزم میکروبیولوژیکی پیچیده، چندين محدودیت برای تصفیه فاضلاب بیولوژیکی هستند که نیاز به توجه دارند.

۳. محدودیت‌های تکنیک‌های مختلف تصفیه فاضلاب

حتی در غلظت‌های بالا، فرآیندهای فیزیکی ساده و سریع مانند فیلتراسیون غشایی قابل استفاده هستند. تقریباً همه نوع آلاینده‌ها، از جمله رنگ‌ها، یون‌های معدنی، ذرات معلق و غیره، برای این فرآیندها مناسب هستند. با این حال، به دلیل گرفتگی سریع غشاهای بالا، این فرآیندها هزینه‌های زیادی برای تامین انرژی، نگهداری و عملیات دارند و برای کسب‌وکارهای کوچک عملی نیستند. انعقاد و لخته‌سازی فرآیندهای فیزیکوشیمیایی پایه‌ای هستند، اما مدیریت حجم ایجاد شده لجن (لخته‌های بزرگ) که هزینه این فرآیند را افزایش می‌دهد، می‌تواند دشوار باشد.

تکنیک‌های شیمیایی دارای روش‌های مختلف مرتبط با اکسندها هستند و فرآیندهایی ساده، سریع و مؤثر می‌باشند. علاوه بر تمامی این ویژگی‌ها، فرآیندهای شیمیایی معمولاً روش‌های مقیاس آزمایشگاهی هستند و از لحاظ اقتصادی برای کسب‌وکارهای کوچک به دلیل نیاز به انرژی زیاد، مقرون به صرفه نیستند.

از آنجا که تصفیه بیولوژیکی از نظر اقتصادی فرآیندی ساده و جذاب و توسط منابع آب عمومی پذیرفته شده است، با این حال، فرآیندی زمان‌بر، کند و نیازمند یک زیستگاه ایده‌آل برای رشد میکروب‌ها است.

جذب یک تکنولوژی ساده، مؤثر، اقتصادی و غیر مخرب برای تصفیه فاضلاب است. با بررسی چندین روش تصفیه فاضلاب، مشخص شد که جذب بسیاری از انواع آلاینده‌ها، مانند مواد معدنی، یون‌های فلزی، رنگ‌ها و سایر آلاینده‌ها را از آب و فاضلاب به طور مؤثر حذف می‌کند.

۴. پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های تصفیه فاضلاب

۱.۴. تصفیه فاضلاب با استفاده از MXenes

تحقیقات در زمینه تصفیه آب و حذف آلاینده‌ها با استفاده از کاربردهای فلزات واسطه دوبرعی (MXenes) انجام شده است. مکسین‌ها یک دسته از سرامیک‌ها هستند که از کاربید و نیتريد فلزات واسطه تشکیل شده و در دسته‌بندی کلی مواد دوبرعی قرار می‌گیرند. این مواد دارای ویژگی‌های جذابی از جمله پایداری شیمیایی

بالا، هدایت الکتریکی قابل توجه و آب‌دوستی هستند. نانومواد دوبعدی به دلیل داشتن سطح بزرگ، ابعاد جانبی گسترده و ضخامت نانومتری، برای تصفیه فاضلاب بسیار مناسب هستند. اخیراً در یک مطالعه، Tawalbeh و همکاران استفاده از مکسین در حذف آلاینده‌ها و تصفیه آب را مورد بررسی قرار دادند.

۲.۴. تصفیه فاضلاب با استفاده از زیست‌توده

در سال‌های اخیر، یک تکنیک زیست‌مهندسی نوین ظهور کرده است که در تولید بیوپچار، مدیریت پسماند و به عنوان یک مؤلفه کلیدی در دستگاه‌های تولید برق کاربرد دارد. تصفیه فاضلاب با استفاده از قابلیت جذب بیوپچار، که یک ماده جامد بسیار غنی از کربن است، امکان‌پذیر می‌باشد. بیوپچار به دلیل داشتن نسبت سطح ویژه به حجم بالا، می‌تواند برای کاربردهای محیط زیستی متعدد استفاده شود. مشخص شده است که زیست‌توده لیگنوسلولزی از منابع مختلف می‌تواند تحت شرایط ایده‌آل با پیرولیز به بیوپچار تبدیل شود و سپس برای تصفیه فاضلاب به کار رود. علاوه بر این، بیوپچار می‌تواند از طریق تکنیک‌های فعال‌سازی مکانیکی، بیولوژیکی و شیمیایی تغییر یابد تا برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد آن مانند حجم، ساختار منافذ و ویژگی‌های شیمیایی سطح را بهبود بخشد که می‌تواند به افزایش نرخ جذب ناخالصی‌ها کمک کند. استفاده از بیوپچار اصلاح‌شده به عنوان یک جاذب کارآمد برای تصفیه فاضلاب حاوی فلزات سنگین و رنگ‌ها پیشنهاد شده است. به دلیل قابلیت جذب قوی، بیوپچار به طور گسترده برای تصفیه بهینه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است. بیوپچار به عنوان یک ابزار کارآمد برای تصفیه انواع مختلف فاضلاب، از جمله فاضلاب شهری، صنعتی و کشاورزی، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد شناسایی شده توسط یک مطالعه اخیر، معرفی شده است.

۳.۴. تصفیه فاضلاب با استفاده از نانو فیلترها

استفاده از ممبران نانوفیلتراسیون (NF) در تصفیه فاضلاب ضروری است. این یک توسعه نسبتاً جدید در تکنولوژی ممبران می‌باشد و به دو شکل آبی و غیر آبی موجود است. از نظر خصوصیات، NF در میان UF و RO قرار دارد و از مکانیسم‌های جریان براساس اندازه منافذ و انتشار محلول استفاده می‌کند. غشاهای NF اغلب دارای بارهای سطحی منفی هستند که در عملکرد آن‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. NF در شیرین کردن آب دریا استفاده می‌شود و وظیفه اصلی آن حذف انتخابی یون‌ها و ترکیبات آلی است. فرآیندهای غشایی، که یک جایگزین برای تکنولوژی‌های جداسازی سنتی ارائه می‌دهند، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای تصفیه آب و فاضلاب هستند. نرخ بازیافت بالا (۸۳٪) برای سیستم‌های NF دارای مزایایی همچون کاهش هزینه‌های عملیاتی

و تاثیرات منفی کمتری بر محیط زیست هستند. با این حال، برای اطمینان از قابلیت اجرایی سیستم‌های NF، مشکلات فنی مانند گرفتگی، جریان کم، ناپایداری و دوام کم باید حل شوند.

مطالعات مهم دیگری شامل استفاده سبز از واکنش هیدروژن، اولترافیلتراسیون، اهمیت زیست‌محیطی، حلال آلی منابع آب شهری و فاضلاب، حفاظت از محیط زیست، تقطیر فاضلاب، بازدهی الکتروفتون در فاضلاب با مدل شبکه عصبی مصنوعی، فاضلاب آنیونی حاصل از تولید محصولات آرایشی، سیستم QS، الگوی جریان و آب رودخانه نیز بررسی شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

به دلیل افزایش صنعتی‌سازی و شهرنشینی غیر پایدار، ECها به سرعت در محیط زیست افزایش می‌یابند. این آلاینده‌ها به دلیل غیر قابل تجزیه و سمی بودن، مانند مواد شوینده و محصولات مراقبت شخصی، مضر هستند. آن‌ها می‌توانند عملکرد موجودات زنده را مختل کرده و آسیب‌های جدی ایجاد کنند. بنابراین، تصفیه فاضلاب برای حذف این آلاینده‌ها و حفاظت از محیط زیست ضروری است. افزایش جمعیت این مسئله را با ایجاد کمبود آب و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی تشدید می‌کند و تصفیه فاضلاب را برای تامین نیاز آبی جمعیت ضروری می‌سازد. این مقاله به طور دقیق فناوری‌های مختلف تصفیه فاضلاب شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را بررسی می‌کند. محدودیت‌های هر روش را مورد بحث قرار داده و روش‌های معاصر در تصفیه فاضلاب را تحلیل می‌کند. این روش‌ها غالبا و با توجه به نوع فاضلاب استفاده می‌شوند، زیرا فاضلاب با منشا متفاوت حاوی انواع مختلف آلاینده‌ها است. همچنین نتیجه‌گیری شده است که فیلتراسیون غشایی یک روش ساده و سریع برای حذف آلاینده‌ها است، اما به دلیل هزینه‌های بالا برای کسب‌وکارهای کوچک عملی نیست. انعقاد و لخته‌سازی نیاز به انرژی کمی دارد، اما تولید لجن هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. روش‌های شیمیایی سریع و موثر هستند، اما از نظر اقتصادی برای کسب‌وکارهای کوچک قابل اجرا نیستند. تصفیه بیولوژیکی جذاب به نظر می‌رسد اما کند است و نیاز به یک زیستگاه کامل برای میکروب‌ها دارد. جذب یک روش موثر، اقتصادی و غیر مخرب برای تصفیه فاضلاب است که قادر به حذف انواع آلاینده‌ها است. این روش با بررسی تعداد زیادی روش تصفیه فاضلاب ارائه شده و در تصفیه مواد معدنی، یون‌های فلزی، رنگ‌ها و سایر آلاینده‌ها موثر است. در نهایت، چندین تکنیک نوآورانه مانند تصفیه فاضلاب با استفاده از مکسین، زیست‌توده و نانو فیلترها بررسی شده‌اند. مکسین‌ها نانو مواد دوبعدی با ابعاد جانبی بزرگ و ضخامت نانومتری هستند. به دلیل سطح بالا، برای تصفیه فاضلاب بسیار مناسب هستند. تحقیقات بیشتری باید در مورد ترکیب روش‌های متداول با روش‌های پیشرفته انجام شود، به‌طوری که آلاینده‌های سمی در چندین مرحله حذف شوند. به عنوان مثال، ترکیب روش‌های

بیولوژیکی با جذب می‌تواند نمونه‌ای از این رویکرد باشد. تلفیق روش‌های متداول با تکنیک‌های پیشرفته برای حذف آلاینده‌ها از فاضلاب می‌تواند بسیار بهتر از یک تکنیک خاص عمل کند.

منبع:

[Wastewater treatment: A short assessment on available techniques - ScienceDirect](#)

ترجمه:

ملیکا خامنه