دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل

دانشگاه اصفهان

موضوع: میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب

تهیه دهنده: محمدمهدی فوزی

استاد مربوطه: دکتر علی دهنوی

تیرماه ۱۴۰۲

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

۱-مقدمه ۱

۲-وجود میکروآلاینده‌ها در محیط‌های آبی ۲

۲-۱-آب‌های سطحی ۲

۲-۲-آب‌های زیرزمینی ۲

۲-۳-آب‌های آشامیدنی ۳

۲-۴-فاضلاب ۳

۳-دسته‌بندی میکروآلاینده‌ها ۴

۳-۱-داروها و محصولات مراقبت شخصی ۵

۳-۲-آفت‌کش‌ها ۵

۳-۳-مواد شیمیایی صنعتی ۵

۳-۴-ترکیبات مختل کننده‌ی غدد درون ریز ۵

۳-۵-میکروپلاستیک‌ها ۵

۳-۶-فلزات سنگین ۶

۳-۷-نانو ذرات ۶

۴-ارائه‌ی مهم‌ترین دسته‌بندی‌ها از نظر آثار زیست‌محیطی و بهداشتی ۶

۵-محدوده‌ی غلظتی میکروآلاینده‌ها در فاضلاب‌های شهری مناطق مختلف جهان ۷

۶- حذف میکروآلاینده‌ها در فاضلاب ۱۱

۶-۱-حذف کلی میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌ی فاضلاب مرسوم ۱۲

۶-۲-روش‌های حذف میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۱۶

۶-۲-۱-جذب کربن فعال ۱۶

۶-۲-۲-ازن‌زنی ۱۶

۶-۲-۳-فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته ۱۸

۶-۲-۴-فیلتراسیون غشایی ۱۹

۶-۲-۵-رشد چسبیده ۲۰

۷-استانداردهای غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب ۲۳

۸-جمع‌بندی و پیشنهادات ۲۵
۹-منابع ۲۷

فهرست شکل‌ها

شکل (۱): میانگین غلظت ورودی و خروجی برخی از میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کشورهای مختلف ۱۰

شکل (۲): میانگین راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌های شناخته‌شده در تصفیه فاضلاب مرسوم ۱۳

فهرست جداول

جدول (۱): منابع میکروآلاینده‌ها در محیط‌های آبی..... ۴
جدول (۲): میزان دفع برخی از ترکیبات دارویی رایج توسط انسان در محیط‌های آبی ۴
جدول (۳): غلظت ورودی و خروجی برخی از میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کشورهای مختلف ۷
جدول (۴): میانگین راندمان حذف برخی از ترکیبات دارویی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب.....۱۲
جدول (۵): راندمان حذف میکروآلاینده‌ها به روش تصفیه‌ی مرسوم در کشورهای مختلف.....۱۳
جدول (۶): راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها با استفاده از روش کربن فعال.....۱۶
جدول (۷): میانگین راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها با روش ازن‌زنی ۱۷
جدول (۸): میانگین راندمان حذف میکروآلاینده‌ها با استفاده از روش AOP ۱۸
جدول (۹): میانگین راندمان حذف میکروآلاینده‌ها توسط روش فیلتراسیون غشایی ۲۰
جدول (۱۰): راندمان حذف میکروآلاینده‌ها توسط رشد چسبیده.....۲۲
جدول (۱۱): استاندارد غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب براساس اتحادیه‌ی اروپا ۲۳
جدول (۱۲): استاندارد غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب براساس آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده ۲۴
جدول (۱۳): استاندارد غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب براساس سازمان بهداشت جهانی.....۲۴
جدول (۱۴): راندمان حذف میکروآلاینده‌ها در سه فرآیند مختلف ۲۶

۱-مقدمه

میکروآلاینده‌ها[1]، گروهی از آلاینده‌های نوظهور هستند که اغلب در غلظت‌های کم (نانوگرم برلیتر تا میکروگرم برلیتر) در محیط‌زیست، وجود دارند[۱]. این ترکیبات، می‌توانند ناشی از منابع مختلفی از جمله داروها، محصولات مراقبت شخصی، آفت‌کش‌ها و مواد شیمیایی صنعتی باشند و از راه‌های مختلفی از جمله فاضلاب شهری و صنعتی، رواناب کشاورزی، رسوبات جوی و نشت‌های تصادفی، وارد محیط‌زیست شوند. این مواد حتی در غلظت‌های کم نیز، می‌توانند اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست و سلامت انسان داشته باشند [۲]. همانطور که ذکر شد، علی‌رغم غلظت کم آن‌ها در محیط‌زیست، روش‌های حذف و پایش آن‌ها دشوار می‌باشد. بنابراین، نگرانی روزافزونی در مورد وجود میکروآلاینده‌ها در محیط‌زیست و روش‌های موثر برای پایش و حذف آن‌ها، وجود دارد [۱].

حذف میکروآلاینده‌ها، یکی از نگرانی‌های اصلی عصر معاصر در حوضه‌ی محیط‌زیست است و چون وجود این ترکیبات در محیط‌زیست، یک حوزه‌ی تحقیقاتی نسبتا جدید است، بنابراین، خیلی اطلاعات بیشتری در مورد منابع، سرنوشت و اثرات این ترکیبات باید دانست. با این حال، مطالعات اخیر نشان داده‌است که میکروآلاینده‌ها همه‌جا در محیط‌زیست، می‌توانند وجود داشته باشند [۳]. از جمله در آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و حتی در مواد غذایی نیز یافت می‌شوند. به‌طور مثال، مطالعه‌ای در ایالات متحده انجام شد که نشان داد بیش از ۵۰ درصد نمونه‌های جمع‌آوری شده غذایی، حاوی حداقل یک میکروآلاینده است که رایج‌ترین ترکیبات شناسایی شده از آن‌ها، کافئین[2]، Deet[3] و تریکولوزان[4] است [۳]. هم‌چنین، مطالعه‌ای مشابه در اروپا انجام شد که در آن نشان داد که میکروآلاینده‌ها در ۹۶ درصد از نمونه‌های مورد تجزیه و تحلیل در رودخانه وجود دارند که بیشترین ترکیبات شناسایی شده را تثبیت‌کننده‌های UV، بنزوتروپازول[5]، عطرهای مشک و بیسفنول آ[6]، تشکیل می‌دهند که می‌توانند، موجب تاثیرات منفی بر سلامت بدن موجودات زنده شوند [۴].

میکروآلاینده‌ها در محیط‌زیست، می‌توانند روی سلامت موجودات زنده تاثیرات منفی بگذارند. به‌طور مثال، برخی از میکروآلاینده‌ها با ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی در باکتری‌ها، مرتبط هستند [۵]. برخی دیگر از میکروآلاینده‌ها نیز بر غدد درونی موجودات آبزی، تاثیرات مرگباری می‌گذارند [۶]. علاوه‌براین، تجمع میکروآلاینده‌ها در اکوسیستم‌های آبی، می‌تواند اثرات نامطلوبی بر زنجیره‌ی غذایی داشته باشد. زیرا؛ این ترکیبات می‌توانند توسط موجودات آبزی بلعیده شده و در زنجیره‌ی غذایی، بزرگ‌نمایی شوند [۷]. هم‌چنین، میکروآلاینده‌ها می‌توانند بر سلامتی انسان‌ها، تاثیرات منفی بگذارند و موجب سرطان، اختلال‌های عصبی و ناهنجاری‌های رشدی شوند. پس، حذف و تصفیه‌ی این مواد، بسیار مهم می‌باشد [۸].

برای پرداختن به موضوع حذف میکروآلاینده‌ها، فناوری‌های مختلف تصفیه از جمله؛ فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، فیلتراسیون غشایی و ممبران، توسعه یافته‌اند. علاوه‌براین، چارچوب‌های نظارتی برای محدود کردن انتشار میکروآلاینده‌ها در محیط‌زیست وضع شده‌اند [۹]. میکروآلاینده‌ها، می‌توانند از منابع مختلفی وارد محیط‌زیست شوند. برخی از منابع رایج میکروآلاینده‌ها عبارت‌اند از:

[1] micropollutants
[2] caffeine
[3] N,N-diethyl-meta-toluamide
[4] triclosan
[5] benzotriazole
[6] bisphenol A

- کشاورزی: استفاده از آفت‌کش‌ها و کودها در کشاورزی، می‌تواند منجر به ورود میکروآلاینده‌ها در محیط‌زیست شود. این مواد می‌توانند به آب‌های زیرزمینی و یا سطحی نفوذ کنند و یا توسط رواناب‌ها به آبراهه‌های مجاور منتقل شوند [۱۰].
- فعالیت‌های صنعتی: فعالیت‌های صنعتی مانند تولید، استخراج معدن، استخراج نفت و گاز، می‌توانند میکروآلاینده‌ها را از طریق انتشارات هوا، تخلیه‌ی فاضلاب و یا دفع پسماندهای جامد، وارد محیط‌زیست کنند [۱۰].
- لندفیل‌ها: لندفیل‌ها می‌توانند به‌عنوان یکی از منابع میکروآلاینده‌ها، درنظر گرفته شوند. زیرا؛ بسیاری از محصولات مصرفی حاوی مواد شیمیایی هستند که می‌توانند به خاک و آب‌های زیرزمینی، نفوذ کنند [۱۰].
- فاضلاب: میکروآلاینده‌ها، می‌توانند از طریق تخلیه‌ی فاضلاب خانگی، تاسیسات صنعتی و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، وارد محیط‌زیست شوند. بسیاری از داروها و محصولات مراقبت شخصی که جزوی از میکروآلاینده‌ها به‌حساب می‌آیند، از طریق فضولات انسانی دفع می‌شوند و به فاضلاب، راه پیدا می‌کنند [۱۰].

به‌طور کلی، منابع میکروآلاینده‌ها در محیط‌زیست، بسیار متنوع و متعدد می‌باشند. هم‌چنین، کاهش انتشار این مواد در محیط‌زیست، نیازمند یک رویکرد چندوجهی است که شامل بهبود فرآیندهای تصفیه‌ی فاضلاب، کاهش استفاده از محصولات حاوی میکروآلاینده و ترویج شیوه‌های کشاورزی و صنعتی پایدار می‌باشد.

۲-وجود میکروآلاینده‌ها در محیط‌های آبی

میکروآلاینده‌ها در محیط‌زیست، بسیار زیاد و متنوع می‌باشند و ناشی از مواد و کالاهای تولیدی زیادی هستند. در جدول (۱)، خلاصه‌ای از منابع دسته‌های اصلی میکروآلاینده‌ها در محیط‌های آبی، نشان داده شده‌است [۱۱]. به‌طور کلی، میکروآلاینده‌ها در محیط‌های آبی، به چهار دسته‌ی اساسی تقسیم می‌شود که به آن‌ها، اشاره خواهد شد[۱۱].

۲-۱-آب‌های سطحی

میکروآلاینده‌ها، معمولا در آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، نهرها، دریاچه‌ها و دریاها، به‌دلیل تخلیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی و شهری، رواناب کشاورزی، رسوب اتمسفر و رواناب طوفان یافت می‌شوند [۱۲]. انتشار پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به آب‌های سطحی، به‌عنوان عامل اصلی وجود میکروآلاینده‌ها در این آب‌ها در مقایسه با سایر منابع در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. علاوه بر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب که می‌توانند بخش قابل توجهی از میکروآلاینده‌ها را حذف کنند، این مواد می‌توانند از طریق راه‌های طبیعی مانند رقیق شدن آب، جذب به جامدات معلق، نورکافت مستقیم و غیرمستقیم و تجزیه‌ی هوازی، به‌شدت کاهش یابند [۱۲]. گومز[7] و همکاران طی مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۷، دریافتند که به دلیل رقیق شدن آب رودخانه‌ها توسط بارندگی، غلظت ترکیبات دارویی و محصولات مراقبت شخصی که یکی از دسته‌های اصلی میکروآلاینده‌ها می‌باشند، کاهش می‌یابد. پس، می‌توان نتیجه گرفت که غلظت داروها و محصولات مراقبت شخصی در آب‌های سطحی، کمتر از خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب می‌باشد [۱۴].

۲-۲-آب‌های زیرزمینی

در مقایسه با آب‌های سطحی، میکروآلاینده‌های کمتری در آب‌های زیرزمینی وجود دارند [۱۵]. از این‌رو، به‌حضور میکروآلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی، توجه و تاکید بسیار کمتری شده‌است. میکروآلاینده‌ها، می‌توانند از مسیرهای

[7] Gomez

مختلفی مانند تخلیه‌ی فاضلاب صنعتی و شهری، رواناب کشاورزی و لندفیل‌ها وارد آب‌های زیرزمینی شوند. به‌طور مثال، مطالعه‌ای که در ایالات متحده انجام شد نشان داد که آب‌های زیرزمینی در نزدیکی محل‌های دفن پسماند، حاوی طیف وسیعی از میکروآلاینده‌ها از جمله داروها، آفت‌کش‌ها و مواد شیمیایی صنعتی هستند [۱۶]. هم‌چنین، در مطالعه‌ی دیگری که در اروپا انجام شد، وجود میکروآلاینده‌هایی از جمله آفت‌کش‌ها، داروها و محصولات مراقبت شخصی در آب‌های زیرزمینی مناطق کشاورزی و شهری، گزارش داده شد[۱۷].

۲-۳-آب‌های آشامیدنی

میکروآلاینده‌ها می‌توانند در منابع آب آشامیدنی به‌دلیل فعالیت‌های مختلف انسانی مانند تخلیه‌ی فاضلاب تصفیه‌شده یا نشده، پساب‌های صنعتی و رواناب‌های کشاورزی وارد شوند [۱۵]. وجود میکروآلاینده‌ها در آب‌های آشامیدنی، به فصول و منابع آب بستگی دارد. به‌طوری که غلظت میکروآلاینده‌های نمونه‌های آب جمع‌آوری شده در فصل زمستان، بیشتر از فصل تابستان می‌باشد [۱۸]. برخی از مطالعات اخیر نشان داده‌اند که میکروآلاینده‌های موجود در آب‌های آشامیدنی که تصفیه شده‌اند، بسیار کم می‌باشند و به‌سختی قابل تشخیص هستند [۱۹], [۲۰]. علاوه‌براین، تصفیه‌ی آب آشامیدنی، نقش به‌سزایی در حذف میکروآلاینده‌های موجود در آن دارد [۱۱].

۲-۴-فاضلاب

میکروآلاینده‌ها به‌دلیل استفاده‌ی گسترده در فعالیت‌های مختلف انسانی، معمولا در فاضلاب یافت می‌شوند. این مواد، می‌توانند از طریق منابعی مانند پساب‌های خانگی و صنعتی، روناباب کشاورزی، وارد جریان فاضلاب شوند [۱۱]. تولید، استفاده و مصرف محصولات حاوی میکروآلاینده‌ها، میزان میکروآلاینده‌هایی را که به تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب میرسند، تعیین می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که غلظت داروها و محصولات مراقبت شخصی در فاضلاب، با مقدار تولید و الگوهای مصرف آن‌ها، رابطه دارد [۲۱]. از آنجایی که محصولات خوراکی حاوی میکروآلاینده‌ها مانند داروها، در بدن انسان متابولیزه شده و از طریق ادرار و مدفوع دفع می‌شوند، میزان دفع در تعیین ورود مواد دارویی که یکی از دسته‌های اصلی میکروآلاینده‌ها به‌حساب می‌آیند، نقش مهمی دارد [۲۱]. جدول (۲)، نرخ دفع را برای برخی از داروها نشان می‌دهد.

می‌توان متذکر شد که ترکیبات دارویی با نرخ دفع کم مانند ایبوپروفن [8]، کاربامازپین[9]، سولفامتوکسازول[10]، دیکلوفناک[11]و پریمیدیون[12] لزوما در مقادیر کم در فاضلاب خام وجود ندارند [۱۱]. این موضوع، احتمالا به این دلیل است که میزان دفعه کم این ترکیبات، با میزان مصرف بالا و گسترده‌ی آن‌ها، جبران می‌شود [۲۲]. هم‌چنین، استفاده از آفت‌کش‌ها به‌دلیل شیوع آفات در شرایط آب و هوایی مختلف، می‌تواند در یک فصل خاص بر غلظت میکروآلاینده‌ها تاثیر بگذارد. یکی دیگر از عوامل مهم نیز، بارندگی است. زیرا؛ بر الگوی جریان فاضلاب ورودی در هنگام استفاده از سیستم فاضلاب ترکیبی، می‌تواند تاثیر گذار باشد [۱۱]. هوردرن[13] و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۹، به این نتیجه رسیدند که غلظت داروها و محصولات مراقبت شخصی در فاضلاب در شرایط آب و هوایی خشک نسبت به زمانی که بارندگی زیاد است، دو برابر می‌شود. این یعنی اینکه آب باران می‌تواند غلظت ترکیبات موجود در فاضلاب را رقیق کند [۲۳].

[8] Ibuprofen
[9] Carbamazepine
[10] Sulfamethoxazole
[11] diclofenac
[12] Primidione
[13] Hordern

جدول (۱): منابع میکروآلاینده‌ها در محیط‌های آبی [۱۱]

دسته‌بندی میکروآلاینده‌ها	زیر کلاس‌های مهم	منابع اصلی
داروها	داروهای ضد انعقاد غیر استروئیدی[۱۴]، تنظیم کننده‌های چربی، داروهای ضد تشنج، آنتی‌بیوتیک‌ها و محرک‌ها	فاضلاب خانگی[۱۵](از دفع)، پساب‌های بیمارستانی[۱۶]، رواناب از آبزی‌پروری و تغذیه‌ی دام‌ها[۱۷]
محصولات مراقبت شخصی	عطرها، ضدعفونی کننده‌ها، فیلترهای UV و دافع حشرات	فاضلاب خانگی (از استحمام، شیو کردن، سمپاشی کردن، شناکردن و...)
استروئیدها	استروژن‌ها[۱۸]	فاضلاب خانگی (از دفع)، رواناب از آبزی‌پروری و تغذیه‌ی دام‌ها
سورفکتنت‌ها[۱۹]	سورفکتنت‌های غیر یونی	فاضلاب خانگی (از استحمام، ظرفشویی، لباسشویی و...)، فاضلاب صنعتی
مواد شیمیایی صنعتی	نرم کننده‌ها، بازدارنده‌های آتش	فاضلاب خانگی (از طریق شسته‌شدن مواد)
آفت‌کش‌ها	حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها	فاضلاب خانگی (از نظافت نامناسب)، رواناب از باغ‌ها، چمن‌ها، جاده‌ها و ...، رواناب‌های کشاورزی

جدول (۲): میزان دفع برخی از ترکیبات دارویی رایج توسط انسان در محیط‌های آبی [۱۱]

نوع دارو	نرخ دفع
Aspirin (acetylsalicylic acid), carbamazepine, gemfibrozil, ibuprofen	کمتر از ۵ درصد
Diclofenac, metroprolol, primidone, sulfamethoxazole	بین ۶ الی ۳۹ درصد
Bezafibrate, norfloxacin, trimethoprim	بین ۴۰ تا ۶۹ درصد
Amoxicillin, ciprofloxacin, tetracycline	بیشتر از ۷۰ درصد

۳-دسته‌بندی میکروآلاینده‌ها

میکروآلاینده‌ها را می‌توان براساس خواص شیمیایی و منابعشان، به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد. در این مقاله، چند نمونه از این دسته‌بندی، آورده شده‌است.

[14] Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs)
[15] Domestic wastewater
[16] Hospital effluents
[17] Run-off from concentrated animal feeding operation and aquaculture
[18] Estrogens
[19] Surfactants (هر ماده‌ای که بر کشش سطحی اثر بگذارد یک سورفکتنت می‌باشد اما، به‌عنوان عوامل خیس کننده و کف کننده نیز سورفکتنت می‌گویند)

۳-۱-داروها و محصولات مراقبت شخصی[20]

داروها، ترکیباتی هستند که برای اهداف درمانی و تقویتی استفاده می‌شوند. از جمله‌ی داروها، می‌توان به آنتی‌بیوتیک‌ها، مسکن‌ها و داروهای ضد افسردگی، اشاره کرد. این ترکیبات، می‌توانند از طریق فاضلاب، وارد محیط‌زیست شوند و اثرات نامطلوب و مضری بر سلامت آبزیان و انسان، داشته باشند [۶], [۲۴].

محصولات مراقبت شخصی شامل موادی هستند که معمولا در محصولات بهداشت شخصی و زیبایی مانند عطرها، اسپری‌ها، ادکلن‌ها، کرم‌های بهداشتی و مراقبتی، مواد نگهدارنده و فیلترهای UV یافت می‌شوند. این ترکیبات، می‌توانند از طریق تخلیه‌ی فاضلاب وارد محیط‌زیست شوند و در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، رویت شوند [۶], [۲۴].

۳-۲-آفت‌کش‌ها[21]

از آفت‌کش‌ها در کشاورزی، برای کنترل و از بین بردن آفات، استفاده می‌شود. این مواد می‌توانند از طریق رواناب‌ها و یا شست‌وشو، وارد آب‌های سطحی و زیرزمینی شوند. در یک مطالعه توسط آژانس محیط‌زیست اروپا، نشان داده شد که آفت‌کش‌ها، از رایج‌ترین میکروآلاینده‌های شناسایی شده در آب‌های اروپا، می‌باشند [۲۵].

۳-۳-مواد شیمیایی صنعتی[22]

این مواد شامل طیف وسیعی از ترکیبات مانند PCB[23] ها، دیوکسین‌ها[24]و بازدارنده‌های شعله می‌باشند که در فرآیندهای مختلف صنعتی، استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ای که توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست سوئد انجام شد، نشان داد که مواد شیمیایی صنعتی، یکی از میکروآلاینده‌های رایج در آب‌های سطحی سوئد، می‌باشند [۱۲].

۳-۴-ترکیبات مختل کننده‌ی غدد درون ریز[25]

این ترکیبات، شامل مواد شیمیایی هستند که می‌توانند با سیستم هورمونی بدن، تداخل داشته باشند و مشکلات تولیدمثل و رشد را در حیات وحش و انسان، به‌وجود آورند. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۲ توسط زولر[26] و همکاران انجام شد، یک نمای کلی از مکانیسم‌هایی که توسط EDC ها، می‌توانند سیگنال‌دهی هورمونی را مختل کنند، نمایش داده شد[۲۶], [۲۷]. استروئیدهای خوراکی و تزریقی، جزو این دسته به‌حساب می‌آیند.

۳-۵-میکروپلاستیک‌ها[27]

میکروپلاستیک‌ها، ذرات پلاستیکی کوچکی هستند که می‌توانند از منابع مختلفی مانند لوازم آرایشی، پوشاک و مواد بسته‌بندی، به‌وجود آیند. روچمن[28] و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۵ به این نتیجه رسیدند که میکروپلاستیک‌ها، در تمام آب‌های سطحی اقیانوسی که نمونه‌برداری کرده‌اند، وجود داشته‌اند [۷].

---

[20] Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs)
[21] Pesticides
[22] Industrial chemicals
[23] Printed circuit board
[24] Dioxins
[25] Endocrine Disrupting Compounds (EDCs)
[26] Zoeller
[27] Microplastics
[28] Rochman

۳-۶-فلزات سنگین[۲۹]

فلزات سنگین نیز، دسته‌ای از میکروآلاینده‌ها هستند که چگالی و وزن اتمی بالایی دارند. این ترکیبات، عناصر طبیعی هستند که در پوسته‌ی زمین یافت می‌شوند. هم‌چنین، می‌توانند توسط فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای صنعتی نیز، در محیط‌زیست، منتشر شوند. فلزات سنگینی که در محیط‌زیست بسیار نگران کننده هستند عبارت‌اند از: سرب، آرسنیک، جیوه، کادمیوم و کروم [۲۵], [۲۸]

فلزات سنگین در غلظت‌های بالا می‌توانند برای موجودات زنده از جمله انسان‌ها، سمی باشند. این مواد می‌توانند در طول زمان در بدن انباشته شوند و در طولانی مدت، منجر به آسیب‌های عصبی، اختلالات رشدی و سرطان شوند. هم‌چنین، می‌توانند منابع آب را آلوده کرده و آن‌ها را برای مصارف انسانی، ناامن کنند و موجب آسیب‌های محیط‌زیستی شوند [۲۵].

۳-۷-نانو ذرات[۳۰]

نانو ذرات، نوعی ذرات یک بعدی بسیار کوچک هستند که قطری بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، دارند و می‌توان آن‌ها را نوعی میکروآلاینده، در نظر گرفت [۲۹]. آن‌ها، می‌توانند منشا طبیعی و یا انسانی داشته و در همه‌ی ماتریس‌های زیست‌محیطی از جمله آب، خاک و هوا، یافته شوند.

یکی از نمونه‌های نانو ذراتی که می‌توان آن را به‌عنوان میکروآلاینده در نظر گرفت، نانو ذرات نقره می‌باشد. نانو ذرات نقره به‌دلیل خواص ضد میکروبی منحصر به‌فرد خود، به‌طور گسترده در انواع محصولات مصرفی مانند پوشاک، لوازم آرایشی و بسته‌بندی مواد غذایی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، نانو ذرات نقره نیز، می‌توانند اثرات منفی بر سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشند [۳۰].

مطالعات نشان داده‌است که نانو ذرات نقره، می‌توانند اثرات سمی بر موجودات آبزی داشته باشند و ممکن است در زنجیره‌ی غذایی، تجمع کنند و به‌طور بالقوه، منجر به آسیب‌های محیط‌زیستی شوند. علاوه‌براین، قرار گرفتن در معرض نانو ذرات نقره، منجر به اثرات نامطلوب سلامتی در انسان، مانند اثرات تنفسی و قلبی عروقی، می‌شود [۳۰], [۳۱].

۴-ارائه‌ی مهم‌ترین دسته‌بندی‌ها از نظر آثار زیست‌محیطی و بهداشتی

دشوار است گفته شود که کدام یک از میکروآلاینده‌ها در فاضلاب، از بقیه مهم‌تر است. چون، هرکدام از دسته‌بندی‌ها، اثرات منحصر به‌فرد خود را بر سلامتی انسان و محیط‌زیست، می‌گذارند. با این حال وجود داروها و محصولات مراقبت شخصی (PPCPs) در فاضلاب، به‌دلیل استفاده‌ی گسترده و هم‌چنین، ماندگاری بیش از حد آن‌ها، به یک نگرانی جدی در محیط‌زیست تبدیل شده‌است [۳۲].

PPCP ها، ترکیباتی هستند که به مقدار زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند از طریق مسیرهای مختلف از جمله تخلیه‌ی فاضلاب، وارد محیط‌زیست شوند. آن‌ها شامل آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌ها، عطرها و... هستند که می‌توانند، اثرات مختل‌کننده بر غدد درون ریز موجودات آبزی داشته و هم‌چنین، باعث تجمع در زنجیره‌ی غذایی شوند و درنهایت، به‌طور بالقوه بر سلامتی انسان، تاثیر بگذارند. از این‌رو، جزو مهم‌ترین دسته‌های میکروآلاینده‌ها، حساب می‌شوند [۳۲]. علاوه براین، وجود آنتی‌بیوتیک‌ها در فاضلاب، می‌تواند منجر به ظهور باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک

[29] Heavy metals

[30] Nanoparticles

شود که موجب افزایش نگرانی سلامت عمومی، می‌شود [۳۳]. هم‌چنین، وجود PPCP ها در منابع آب آشامیدنی در جهان، مستند شده‌است که خطری بالقوه برای سلامت انسان، به‌همراه دارد [۳۴].

اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی PPCPها، بسیار پیچیده است و نیازمند به یک رویکرد چند رشته‌ای برای فهمیدن سرنوشت آن‌ها در محیط‌زیست و اثرات آن‌ها بر سلامت انسان، می‌باشد [۶]. همانطور که ذکر شد، کافئین نیز یکی از میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب است. در سال ۲۰۱۲، محققان به سرپرستی آقای سباستین[۳۱]، دانشیار دپارتمان شیمی در دانشگاه مونترال کبک[۳۲]، دریافتند که سطح کافئین، به‌شدت با سطح باکتری‌های کالیفرم[۳۳] مدفوع، مرتبط است [۳۵]. پس، می‌توان نتیجه گرفت که که کافئین، نشانگر خوبی برای آلودگی مدفوع انسان است. به‌علاوه، به‌دلیل فراگیر بودن مصرف کافئین نیز، می‌توان به این نتیجه رسید که در هرجا که فاضلاب انسانی وجود داشته‌باشد، تقریبا به‌طور قطع کافئین نیز، وجود خواهد شد [۳۵].

۵-محدوده‌ی غلظتی میکروآلاینده‌ها در فاضلاب‌های شهری مناطق مختلف جهان

غلظت میکروآلاینده‌ها در فاضلاب، به‌عوامل مهمی از جمله میزان تولید، فروش و استفاده از محصولی که حاوی میکروآلاینده می‌باشد، بستگی دارد. هم‌چنین، متابولیسم (نرخ دفع)، مصرف آب به‌ازای هر نفر، اندازه و نوع تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز، در میزان غلظت میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب، نقش به‌سزایی دارند [۱۱]. در جدول (۳)، غلظت میکروآلاینده‌های موجود در ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برخی از کشورها، از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، درج شده‌است [۱۱].

جدول (۳): غلظت ورودی و خروجی برخی از میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کشورهای مختلف [۱۱]

دسته‌بندی میکروآلاینده‌ها	ترکیبات انتخاب شده	تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کشور مورد نظر	غلظت ورودی به تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب برحسب میکروگرم برلیتر	غلظت خروجی از تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب برحسب میکروگرم برلیتر
داروها				
	Acetaminophen	کره، اسپانیا، بالکان‌غربی[۳۴]	۱/۵۷ – ۵۶/۹	۰/۰۳-غیرقابل تشخیص
	Diclofenac	یونان، کره، سوئد، سوئیس، بریتانیا، بالکان‌غربی	<۰/۰۰۱ – ۹۴/۲	<۰/۰۰۱ - ۰/۶۹
	Ibuprofen	چین، یونان، کرفه، سوئد، بریتانیا، آمریکا، بالکان‌غربی	<۰/۰۰۴ – ۶۰۳	۵۵-غیرقابل تشخیص
	Ketoprofen		<۰/۰۰۴ – ۵۶/۸	< ۰/۰۰۳ - ۳/۹۲

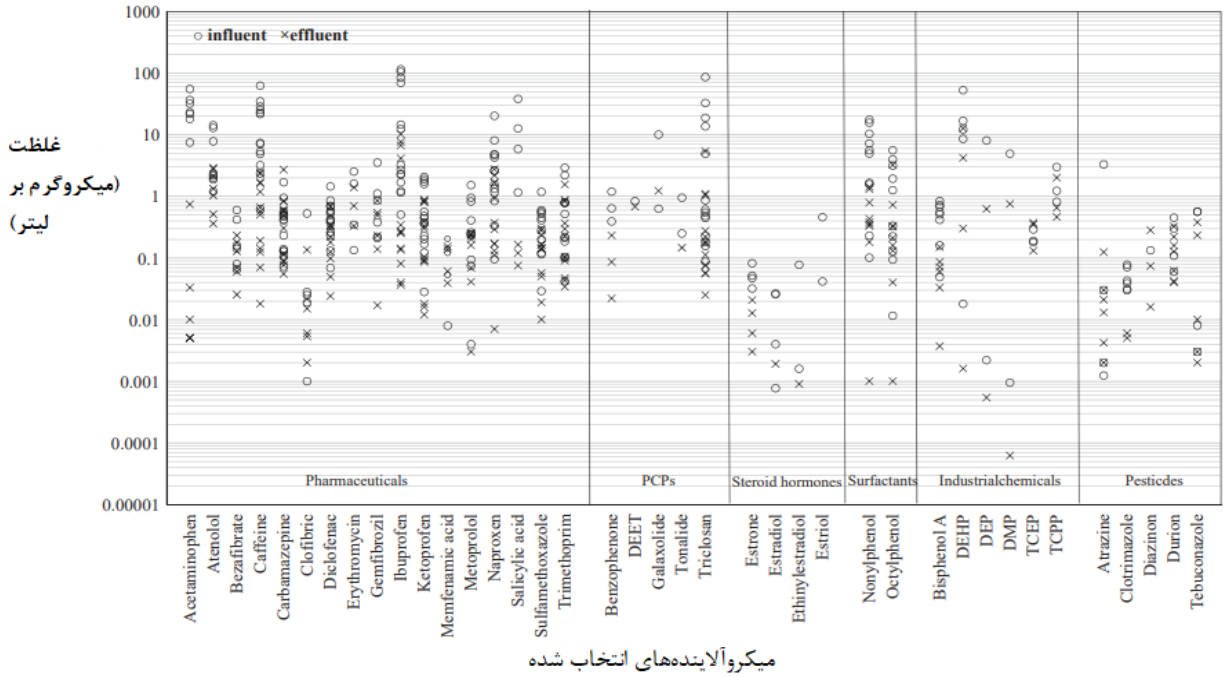
[31] Sebastien
[32] Montreal Quebec
[33] Colifrom
[34] بوسنی هرزگوین، کرواسی و صربستان

		چین، کره، اسپانیا، بریتانیا، بالکان‌غربی		
(ضد درد و التهاب)	Mefenamic acid	کره، اسپانیا، بریتانیا	<۰/۰۱۷ – ۱/۲۷	< ۰/۰۰۵ – ۰/۳۹
	Naproxen	یونان، کره، اسپانیا، سوئد، بریتانیا، بالکان‌غربی	<۰/۰۰۲ – ۵۲/۹	< ۰/۰۰۲ – ۵/۰۹
	Salicylic acid	یونان، اسپانیا، بریتانیا	۰/۵۸ – ۶۳/۷	۰/۵ – غیر قابل تشخیص
ضد تشنج	Carbamazepine	چین، یونان، کره، اسپانیا، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰/۰۴ – ۳/۷۸	< ۰/۰۰۵ – ۴/۶
تنظیم‌کننده‌ی چربی	Bezafibrate	اسپانیا، کره، بریتانیا، بالکان‌غربی	۰/۰۵ – ۱/۳۹	۰/۰۳ – ۰/۶۷
	Clofibric acid	چین، یونان، کره، اسپانیا، سوئد، بریتانیا، بالکان‌غربی	۰ - ۰/۷۴	۰/۳۳ – غیرقابل تشخیص
	Gemfibrozil	یونان، کره، اسپانیا، بالکان‌غربی	۰/۱ – ۱۷/۱	< ۰/۰۰۲۵ – ۵/۲۴
آنتی‌بیوتیک‌ها	Erythromycin	چین، اسپانیا، بریتانیا، بالکان‌غربی	۰/۱۴ – ۱۰	۰/۰۲ – ۲/۸۴
	Sulfamethoxazole	فرانسه، کره، اسپانیا، سوئد، سوئیس، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰/۰۰۳ – ۰/۹۸	< ۰/۰۰۳ – ۱/۱۵
	Trimethoprim	چین، کره، اسپانیا، بریتانیا	۰/۰۶ – ۶/۸۰	< ۰/۰۱ – ۳/۰۵
بتابلاکرها	Atenolol	کره، اسپانیا، سوئیس، بریتانیا، بالکان‌غربی	۰/۱ – ۳۳/۱	۰/۱۳ – ۷/۶
	Metoprolol	چین، کره، اسپانیا، سوئیس، بریتانیا	۰/۰۰۲ – ۱/۵۲	۰/۰۰۳ – ۰/۲۵
محرک اعصاب	Caffeine	چین، یونان، کره، اسپانیا، بریتانیا	۰/۲۲ – ۲۰۹	۴۳/۵۰ – غیرقابل تشخیص
PCP				
عطر	Galaxolide	اسپانیا، بالکان‌غربی	۰/۰۳ – ۲۵	< ۰/۰۶ – ۲/۷۷
	Tonalide	اسپانیا، بالکان‌غربی	۰/۰۵ – ۱/۹۳	< ۰/۰۵ – ۰/۳۲

ضدعفونی کننده‌ها	Triclosan	اسپانیا، بریتانیا، آمریکا، یونان، کره، فرانسه	۰/۰۳ – ۲۳/۹	۰/۰۱ – ۶/۸۸
حشره‌کش‌ها	DEET	چین	۳/۱۹ – ۲/۵۶	۰/۶۱ – ۱۵/۸
فیلترهای UV	Benzophenone-3	کره، اسپانیا	< ۰/۰۷۹ – ۰/۹	< ۰/۰۷۹ – ۰/۲۳
هورمون‌های استروئیدی				
	Estrone	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، کره، سوئد، آمریکا	۰/۰۱ – ۰/۱۷	< ۰/۰۰۱ – ۰/۰۸
	Estradio	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، کره، سوئد، آمریکا	۰/۰۰۲ – ۰/۰۵	< ۰/۰۰۱ – ۰/۰۰۷
	17α-Ethynylestradiol	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، سوئد، آمریکا	۰/۰۰۱ – ۰/۰۰۳	< ۰/۰۰۱ – ۰/۰۰۲
	Estriol	چین، کره	۰/۸ – ۰/۱۲۵	غیرقابل تشخیص
سورفکتنت‌ها				
	Nonylphenol	چین، فرانسه، آلمان، یونان، ایتالیا، اسپانیا، بالکان‌غربی	< ۰/۰۳ – ۱۰۱/۶	< ۰/۰۳ – ۷/۸
	Octylphenol	چین، فرانسه، آلمان، یونان، بریتانیا، اسپانیا، بالکان‌غربی	< ۰/۲ – ۸/۷	۰/۰۰۴ – ۱/۳
مواد شیمیایی صنعتی				
	Bisphenol A	چین، فرانسه، یونان، آمریکا، بالکان‌غربی	< ۰/۰۱۳ – ۲/۱۴	< ۰/۰۳ - ۱/۱
نرم‌کننده‌ها	DBP	اتریش، چین	۱۱/۸ – غیرقابل تشخیص	۴/۱۳ – غیرقابل تشخیص
	DEHP	اتریش، چین، آمریکا	۰/۰۰۳ – ۷۰	۰/۰۰۰۱ – ۵۴
	DMP	اتریش، چین	۶/۴۹ – غیرقابل تشخیص	۱/۵۲ – غیرقابل تشخیص
بازدارنده‌ی آتش	TCEP	آلمان	۰/۰۶ – ۰/۵	۰/۰۶ – ۲/۴۰
	TCPP	آلمان	۰/۱۸ – ۴	۰/۱ – ۲۱
آفت‌کش‌ها				
علف‌کش‌ها	Atrazine	فرانسه، اسپانیا، سوئیس، بالکان‌غربی	۰/۰۲ – ۲۸	۰/۰۰۴ – ۰/۷۳

	Diuron	فرانسه، اسپانیا، سوئیس	۱/۹۶ – ۰/۰۳	۲/۵۳ – ۰/۰۰۲
حشره‌کش‌ها	Diazinon	اسپانیا	< ۰/۶۸۴	۴/۱۶ – ۰/۰۰۰۷
قارچ‌کش‌ها	Clotrimazole	یونان	۰/۰۱۲ – ۰/۰۸	۰/۰۰۵ – غیرقابل تشخیص
	Tebuconazole	یونان، اسپانیا	۱/۸۹ – غیرقابل تشخیص	۰/۶۹ – ۰/۰۰۰۵

هم‌چنین، در شکل (۱)، میانگین ورودی و خروجی برخی از میکروآلاینده‌های انتخاب شده در تصفیه‌خانه‌ی برخی از کشورها، نمایش داده شده‌است. لازم به ذکر است داده‌های این شکل، از جدول (۳)، استخراج شده‌است.



شکل (۱): میانگین غلظت ورودی و خروجی برخی از میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کشورهای مختلف [۱۱]

همانطور که از شکل (۱)، مشاهده می‌شود، اکثر میکروآلاینده‌ها در ورودی به تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، غلظتی بین ۰/۱ تا ۱۰ میکروگرم برلیتر دارند. درحالی‌که برخی از ترکیبات دارویی مانند استامینوفن، کافئین، ایبوبروفن، ناپروکسن و اسید سالسیلیک، غلظت‌های نسبتا بالایی در مقایسه با سایر میکروآلاینده‌ها دارند. به‌طورکلی، ترکیباتی با غلظت بیش از ۱۰ میکروگرم برلیتر در ورودی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در میکروآلاینده‌هایی نظیر ایبوپروفن، اتنالول، کافئین و نانی‌فنول، وجود داشته‌است. به‌عنوان مثال، ایبوپروفن، فراوان‌ترین میکروآلاینده‌ای بود که در ورودی چهار تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب در اسپانیا با غلظتی حدود ۳/۷۳ تا ۶۰۳ میکروگرم برلیتر وجود داشت [۳۶]. فروش داروهایی که به نسخه‌ی پزشک احتیاج ندارند، می‌تواند یکی از دلایل غلظت بالای این میکروآلاینده‌ها باشد.

۶- حذف میکروآلاینده‌ها در فاضلاب

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، برای کنترل طیف وسیعی از مواد مانند جامدات معلق، مواد آلی، مواد مغذی و پاتوژن‌ها، طراحی شده‌اند [۱۱]. درحالی‌که می‌توان این مواد را به‌طور موثر تا حد قابل قبولی حذف نمود، اما برای حذف میکروآلاینده‌ها، ناکافی هستند. از این‌رو، ارزیابی سرنوشت و حذف میکروآلاینده‌ها در طی تصفیه‌ی فاضلاب، برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه، امری لازم و ضروری است تا از انتشار این مواد مضر، جلوگیری شود. هم‌چنین، در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، شرایطی وجود دارد که ممکن است غلظت خروجی برخی از میکروآلاینده‌ها، از غلظت ورودی آن‌ها بیشتر باشد. این موضوع را می‌توان این‌گونه توضیح داد که متابولیسم‌های انسانی و یا محصولات تبدیلی در ورودی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، می‌توانند در طی تصفیه‌ی بیولوژیکی، به ترکیبات اصلی تبدیل شوند [۱۱].

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، به‌طور کلی از یک فرآیند تصفیه‌ی اولیه[۳۵]، تصفیه‌ی ثانویه[۳۶] و تصفیه‌ی ثالثیه[۳۷] که اختیاری است، استفاده می‌کنند. فرآیندهای تصفیه‌ی ثالثیه، معمولا برای پساب با کیفیت بالاتر برای مقاصد خاص (مانند استفاده‌ی مجدد از آب)، استفاده می‌شوند و هزینه‌ی بالایی دارند[۱۱]. بنابراین الزامات فرآیندهای تصفیه‌ی ثالثیه به‌طور کلی براساس اهداف بهداشت عمومی و محیطی است.

هدف فرآیندهای تصفیه‌ی اولیه، حذف جامدات معلقی است که وارد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌شوند و در حذف اکثر میکروآلاینده‌ها، بی‌اثر هستند [۳۷]. میکروآلاینده‌ها معمولا از طریق جذب روی لجن اولیه حذف می‌شوند. زیرا؛ توزیع یک ترکیب در لایه‌ی آلی (لیپوفیل[۳۸]) روشی برای جذب است [۳۸]. اما عطرها (گالاکسولید[۳۹] و تونالید[۴۰]) به‌دلیل ضرایب تقسیم آن‌ها بین فاز مایع و جامد، در طی تصفیه‌ی اولیه، به‌خوبی حذف می‌شوند و راندمان حذف آن‌ها، حدود ۴۰ درصد است [۳۷]. هم‌چنین فرآیند تصفیه‌ی اولیه (تانک ته‌نشینی)، می‌تواند برخی از EDC ها را به‌طور متوسط با راندمان حذف از ۱۳ درصد (نونیل فنول مونوتوکسیلات[۴۱]) تا ۴۳ درصد (بیسفنول آ)، حذف کند [۳۹]. با این‌حال، فرآیند تصفیه‌ی اولیه با استفاده از دانه‌گیر هوادهی، می‌تواند باعث افزایش قابل توجه ترکیبات فنولی مانند بسیفنول‌آ و نونیل‌فنول شوند. زیرا؛ ترکیباتی که ابتدا به دانه‌ها متصل شده‌اند، می‌توانند موجب برهم زدن هوا در تانک دانه‌گیر شوند [۴۰]. برای داروها و هورمون‌ها، راندمان حذف در فرآیند تصفیه‌ی اولیه، تنها تا سقف ۲۸ درصد (دیکلوفناک و استریول[۴۲])، است که نشان می‌دهد جذب ترکیبات مورد بررسی به ذرات لجن، نسبتا محدود است [۴۱]. هم‌چنین، کاهش قابل توجهی در خروجی برای ایبوپروفن، ناپروکسن، سولفامتوکسازول[۴۳] و استرون[۴۴]، گزارش نشده‌است [۳۷]. سالگادو[۴۵]و همکاران در سال ۲۰۱۲، گزارش دادند که در بین NSAIDها[۴۶]، دیکلوفناک دارای کم‌ترین تجزیه‌ی زیستی (٪۲۵>) و ابوپروفن و کتوپروفن دارای بیشترین تجزیه‌ی زیستی (٪۷۵>)، می‌باشند [۴۲]. آنتی‌بیوتیک‌ها، معمولا به‌آسانی تجزیه‌پذیر نیستند [۴۳]. به‌طورکلی، نتیجه‌گیری قطعی در مورد راندمان حذف هر ترکیب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دشوار است. زیرا؛ بسیاری از ترکیبات، دارای راندمان حذف بالایی در تصفیه‌خانه‌ی

[35] Primary Treatment
[36] Secondary Treatment
[37] Tertiary Treatment
[38] Lipophilic
[39] Galaxolide
[40] Tonalide
[41] Nonylphenol Monoethoxylate
[42] Estriol
[43] Sulfamethoxazole
[44] Estrone
[45] Salgado
[46] non-steroidal anti-inflammatory drugs

فاضلاب هستند. با این‌حال، یک طبقه‌بندی ساده در مورد این ترکیبات و راندمان حذف آن‌ها در جدول (۴)، درج شده‌است.

جدول (۴): میانگین راندمان حذف برخی از ترکیبات دارویی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب [۱۱]

ترکیبات	راندمان حذف (٪)
Atrazine, carbamazepine, diazinon, diclofenac, erythromycin, metoprolol, mefenamic acid, TCEP, TCPP	راندمان حذف ضعیف (٪۴۰ >)
Atenolol, bezafibrate, clofibric acid, durion, ketoprofen, nonylphenol, sulfamethoxzole, tebuconazole, trimethoprim	راندمان حذف متوسط (٪ ۴۰-۷۰)
Acetaminophen, benzophenone-3, bisphenol A, caffeine, clotrimazole, DBP, DEET, DEHP, DMP, estradiol, estriol, estrone, ethinylestradiol, galaxolide, gemfibrozil, ibuprofen, naproxen, nonylphenol, octylphenol, salicylic acid, tonalide, triclosan	راندمان حذف قوی (٪۷۰ <)

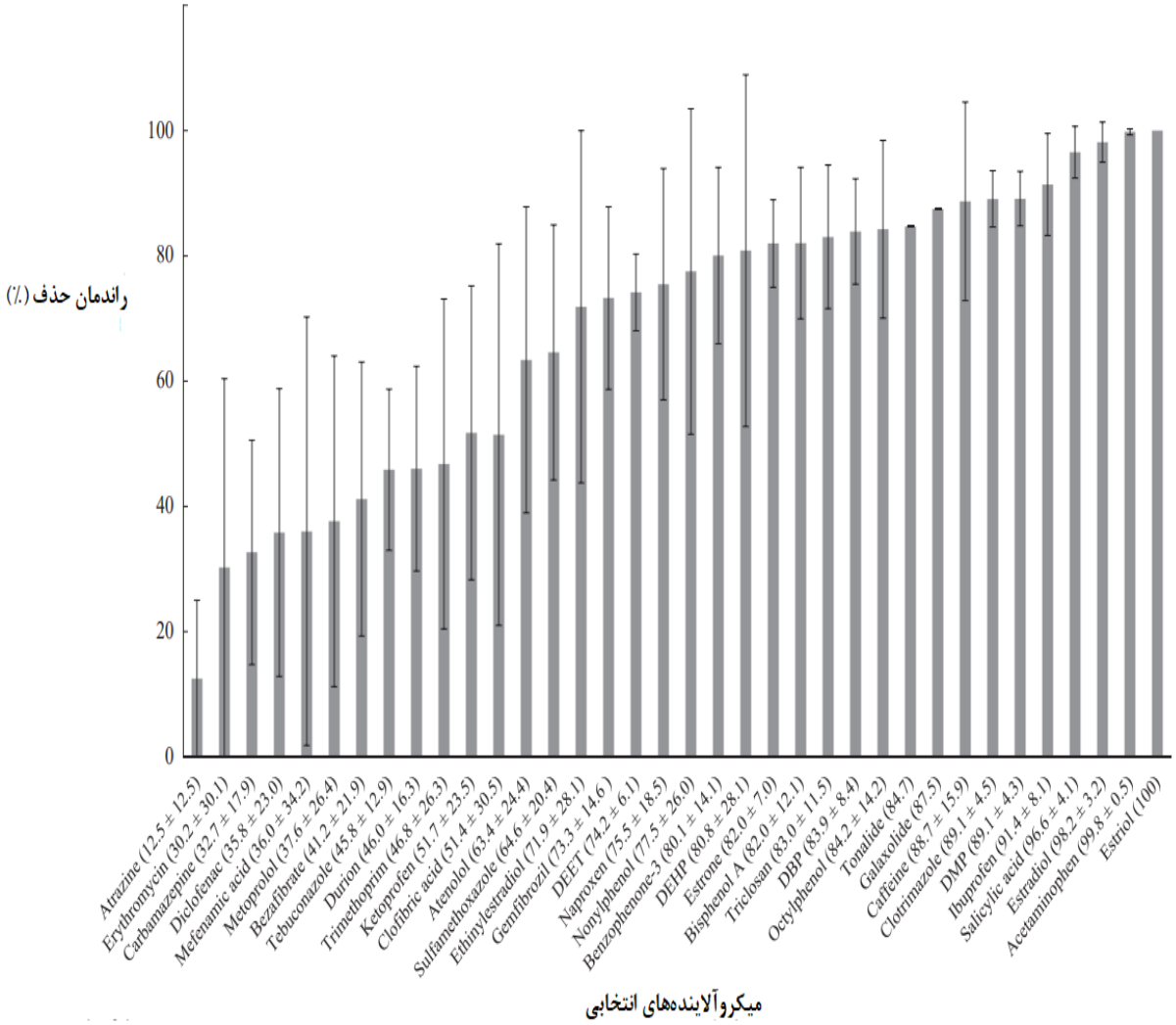
در تصفیه‌ی ثانویه، میکروآلاینده‌ها، تحت طیف وسیعی از فرآیندها از جمله پراکندگی، رقیق‌سازی، تقسیم، تجزیه‌ی زیستی و تقسیم غیرزیستی، قرار می‌گیرند. در طی تصفیه‌ی ثانویه، میکروآلاینده‌ها، از نظر بیولوژیکی به درجات مختلف تجزیه می‌شوند که منجر به کانی‌سازی یا تخریب ناقص (تولید محصولات جانبی) می‌شود [۱۱]. تجزیه‌ی زیستی میکروآلاینده‌ها، می‌تواند از طریق مکانسیم‌های مختلفی اتفاق بیفتد:

- رشد تک لایه‌ای از زیر مجموعه‌ی کوچکی از میکرواورگانیسم‌ها که الیگوتروف نام دارند. این میکرواورگانیسم‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کمتر دیده شده‌اند [۴۴].
- متابولیسم مشترک که در آن میکروآلاینده‌ها توسط آنزیم‌های تولیدشده برای تخریب آمونیاک مونواکسیژناز[۴۷] تجزیه می‌شوند و به‌عنوان منبع کربن و انرژی برای رشد میکروبی، استفاده نمی‌شوند [۱۱].
- رشد بستر مخلوط که در آن میکروآلاینده‌ها، به‌عنوان منبع کربن و انرژی، استفاده می‌شوند و تبدیل به مواد معدنی می‌شوند [۴۵].

۶-۱-حذف کلی میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌ی فاضلاب مرسوم

عبارت "حذف کلی"، به حذف کامل ترکیبات اصلی میکروآلاینده‌ها از فاز آبی، اشاره دارد [۱۱]. در شکل (۲)، میانگین راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها در تصفیه فاضلاب مرسوم در ۱۴ کشور مختلف نشان داده شده‌است که میزان حذف این ترکیبات، بین ۱۲/۵ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. لازم به‌ذکر است که داده‌های موجود، از جدول (۳)، برداشت شده‌است. همانطور که از شکل مشخص است، ترکیبات به نسبت متفاوتی حذف شده‌اند. به‌طور مثال، دیکلوفناک در یک تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب در کره، به میزان قابل توجه ۸۱/۴ درصد، حذف شد [۴۶]. در حالی‌که در تصفیه‌خانه‌ای در اسپانیا، فقط ۵ درصد از این ماده، حذف شد [۴۷].

[47] AMO



شکل (۲): میانگین راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌های شناخته‌شده در تصفیه فاضلاب مرسوم [۱۱]

به‌طور کلی، تفاوت حذف میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌های مختلف را می‌توان به تعدادی از عوامل مانند خواص میکروآلاینده و یا روش تصفیه‌ی مورد استفاده در آن محل، نسبت داد [۱۱]. در جدول (۵)، راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌ی مرسوم، در تصفیه‌خانه‌ی کشورهای مختلف از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، درج شده‌است.

جدول (۵): راندمان حذف میکروآلاینده‌ها به روش تصفیه‌ی مرسوم در کشورهای مختلف [۱۱]

دسته‌بندی میکروآلاینده‌ها	ترکیبات انتخاب شده	تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کشور مورد نظر	راندمان حذف (٪)
داروها			
	Acetaminophen	کره، اسپانیا، بالکان‌غربی	۹۸/۷ – ۱۰۰

(ضد درد و التهاب)	Diclofenac	یونان، کره، سوئد، سوئیس، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۸۱/۴
	Ibuprofen	چین، یونان، کرفه، سوئد، بریتانیا، آمریکا، بالکان‌غربی	۷۲ - ۱۰۰
	Ketoprofen	چین، کره، اسپانیا، بریتانیا، بالکان‌غربی	۱۰/۸ – ۱۰۰
	Mefenamic acid	کره، اسپانیا، بریتانیا	< ۰ – ۷۰/۲
	Naproxen	یونان، کره، اسپانیا، سوئد، بریتانیا، بالکان‌غربی	۴۳/۳ – ۹۸/۶
	Salicylic acid	یونان، اسپانیا، بریتانیا	۸۹/۶ – ۱۰۰
ضد تشنج	Carbamazepine	چین، یونان، کره، اسپانیا، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۶۲/۳
تنظیم‌کننده‌ی چربی	Bezafibrate	اسپانیا، کره، بریتانیا، بالکان‌غربی	۹/۱۰ – ۷۰/۵
	Clofibric acid	چین، یونان، کره، اسپانیا، سوئد، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۹۳/۶
	Gemfibrozil	یونان، کره، اسپانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۹۲/۳
آنتی‌بیوتیک‌ها	Erythromycin	چین، اسپانیا، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۸۲/۵
	Sulfamethoxazole	فرانسه، کره، اسپانیا، سوئد، سوئیس، بریتانیا، بالکان‌غربی	۴ - ۸۸/۹
	Trimethoprim	چین، کره، اسپانیا، بریتانیا	< ۰ – ۸۱/۶
بتابلاکرها	Atenolol	کره، اسپانیا، سوئیس، بریتانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۸۵/۱
	Metoprolol	چین، کره، اسپانیا، سوئیس، بریتانیا	۳ - ۵۶/۴
محرک اعصاب	Caffeine	چین، یونان، کره، اسپانیا، بریتانیا	۴۹/۹ – ۹۹/۶
PCP			
عطر	Galaxolide	اسپانیا، بالکان‌غربی	۸۷/۸
	Tonalide	اسپانیا، بالکان‌غربی	۸۴/۷

ضدعفونی کننده‌ها	Triclosan	اسپانیا، بریتانیا، آمریکا، یونان، کره، فرانسه	۷۱/۳ – ۹۹/۲
حشره‌کش‌ها	DEET	چین	۶۵/۶ – ۷۹/۵
فیلترهای UV	Benzophenone-3	کره، اسپانیا	۶۳/۸ – ۹۸/۲
هورمون‌های استروئیدی			
	Estrone	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، کره، سوئد، آمریکا	۷۴/۸ – ۹۰/۶
	Estradio	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، کره، سوئد، آمریکا	۹۲/۶ – ۱۰۰
	17α-Ethynylestradiol	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، سوئد، آمریکا	۴۳/۸ – ۱۰۰
	Estriol	چین، کره	۱۰۰
سورفکتنت‌ها			
	Nonylphenol	چین، فرانسه، آلمان، یونان، ایتالیا، اسپانیا، بالکان‌غربی	۲۱/۷ – ۹۹
	Octylphenol	چین، فرانسه، آلمان، یونان، بریتانیا، اسپانیا، بالکان‌غربی	< ۰ – ۹۶/۷
مواد شیمیایی صنعتی			
	Bisphenol A	چین، فرانسه، یونان، آمریکا، بالکان‌غربی	۶۲/۵ – ۹۹/۶
نرم‌کننده‌ها	DBP	اتریش، چین	۷۳/۶ – ۷۵/۵
	DEHP	اتریش، چین، آمریکا	۲۵ - ۹۷
	DMP	اتریش، چین	۸۴/۸ – ۹۳/۵
بازدارنده‌ی آتش	TCEP	آلمان	< ۰
	TCPP	آلمان	< ۰
آفت‌کش‌ها			
علف‌کش‌ها	Atrazine	فرانسه، اسپانیا، سوئیس، بالکان‌غربی	< ۰ – ۲۵
	Diuron	فرانسه، اسپانیا، سوئیس	۲۶/۷ – ۷۱/۹
حشره‌کش‌ها	Diazinon	اسپانیا	< ۰
قارچ‌کش‌ها	Clotrimazole	یونان	۸۴/۵ – ۹۳/۶
	Tebuconazole	یونان، اسپانیا	۰ - ۵۸/۷

مهم‌ترین میکروآلاینده‌های مورد بررسی در این تصفیه‌خانه‌ها، NSAIDها بودند. ایبوپروفن، ناپروکسن و کتوپروفن، به‌ترتیب، دارای راندمان حذف متوسط به بالا یعنی ۹۱/۴، ۷۵/۵ و ۵۱/۷ درصد بودند [۱۱]. به‌طور معمول، راندمان حذف ایبوپروفن نسبتا ثابت و بالای ۷۰ درصد بود. ولی دیکلوفناک، دارای راندمان حذف متغیر و نسبتا پایین (میانگین ۳۵/۸ درصد) بود [۱۱].

۶-۲-روش‌های حذف میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

در حال حاضر، هیچ روش خاصی برای تصفیه‌ی کامل میکروآلاینده‌های مختلف به‌دلیل وجود خواص مختلف آن‌ها، وجود ندارد. اما، روش‌هایی وجود دارد که می‌توان تا حد زیادی، این ترکیبات را حذف نمود [۱۱].

۶-۲-۱-جذب کربن فعال

جذب با استفاده از کربن‌های فعال (Acs[۴۸])، معمولاً برای کنترل طعم و بو در آب آشامیدنی استفاده می‌شود. این تکنیک همچنین پتانسیل زیادی برای تصفیه پساب ثانویه دارد و ثابت شده است که در حذف میکروآلاینده ها نسبت به فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، موثرتر است [۴۸]. هر دو کربن فعال پودری (PAC[۴۹]) و کربن فعال دانه‌ای (GAC[۵۰])، به‌طور گسترده در فرآیندهای جذب استفاده می‌شوند (جدول (۶)). کارایی آنها می‌تواند تحت تأثیر خواص هر دو ماده‌ی جاذب یعنی (اندازه مولکولی، معطر بودن در مقابل چرب بودن و حضور گروه های عاملی خاص و جاذب شامل مساحت سطح، اندازه منافذ و بافت، شیمی سطح و محتوای مواد معدنی) باشد [۴۹].

جدول (۶): راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها با استفاده از روش کربن فعال [۱۱]

جاذب	مقدار مصرف (میلی‌گرم برلیتر)	ترکیبات	راندمان حذف (٪)
کربن فعال پودری	۸، ۲۳، ۴۳	Diclofenac	۹۶، ۹۸، ۹۹
		Carbamazepine	۹۸، ۹۹، ۱۰۰
		Propranolol	۹۱<، ۹۴<، ۹۴<
		Sulfamethoxazole	۲، ۳۳، ۶۲
کربن فعال دانه‌ای	مقیاس کامل	Diclofenac	۹۸<
		Carbamazepine	۲۳
		Propranolol	۱۷
		Estrone	۶۴
		17β-Estradiol	۴۳<
		17α-Ethinylestradiol	۴۳<

۶-۲-۲-ازن‌زنی[۵۱]

ازن‌زنی، برای حذف برخی از میکروآلاینده‌ها به‌خصوص آنهایی که مستعد اکسیداسیون هستند، موثر است [۱۱]. با این‌حال، برخی از میکروآلاینده‌ها ممکن است با روش ازن‌زنی، به‌راحتی حذف نشوند و نگرانی در مورد محصولات

[48] Activated Carbons
[49] Powedered Activated Carbon
[50] Granular Activated Carbon
[51] Ozonation

جانبی که ممکن است بعد از انجام این فرآیند به‌وجود آید، وجود دارد [۵۰]. در جدول (۷)، میانگین راندمان حذف برخی از کلاس‌های اصلی میکروآلاینده‌ها با استفاده از این روش، درج شده‌است. هم‌چنین، در ادامه، برخی از جزئیات اضافی برای حذف میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب با استفاده از روش ازن‌زنی، آورده شده‌است.

- مکانیسم اکسیداسیون: ازن، به‌عنوان یک اکسیدکننده‌ی قوی عمل می‌کند و از طریق اکسیداسیون مستقیم و مکانیسم های غیرمستقیم، با میکروآلاینده‌ها واکنش می‌دهد. اکسیداسیون مستقیم شامل واکنش مولکول‌های ازن (O_3) با میکروآلاینده‌ها است که منجر به شکستن پیوندهای شیمیایی و تخریب ترکیبات می‌شود. مکانیسم‌های غیرمستقیم شامل تشکیل رادیکال‌های اکسیژن بسیار واکنش‌پذیر (OH)، در طی تجزیه‌ی ازن در آب است. این رادیکال‌ها، می‌توانند بیشتر با میکروآلاینده‌ها واکنش نشان دهند و منجر به تخریب آن‌ها شوند [۱۰].
- اثربخشی: ازن‌زنی، در حذف طیف وسیعی از میکروآلاینده‌ها موثر است. با این‌حال، راندمان حذف می‌تواند بسته به عواملی مانند میکروآلاینده‌ی خاص، غلظت آن، پارامترهای کیفیت آب، دوز ازن، زمان تماس و وجود مواد دیگر در فاضلاب، متفاوت باشد. به طور کلی، ازن‌زنی می‌تواند بازده‌ی حذف بالایی را برای بسیاری از میکروآلاینده‌ها، از ۵۰ تا بیش از ۹۰ درصد به دست آورد [۱۰].
- محصولات تبدیلی: در طول ازن‌زنی، میکروآلاینده‌ها، اغلب به محصولات میانی تبدیل می‌شوند و در نهایت به ترکیبات ساده‌تر و کم ضررتر، تبدیل می‌گردند. با این‌حال، در برخی موارد، ازن‌زنی می‌تواند منجر به تشکیل محصولات تبدیلی شود که ممکن است هنوز، درصدی از سمیت را داشته باشند یا نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد کنند. نظارت و ارزیابی تشکیل محصولات تبدیلی در طول ازن‌زنی، برای اطمینان از اثربخشی کلی فرآیند تصفیه، مهم است [۱۰].

جدول (۷): میانگین راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها با روش ازن‌زنی [۱۰]

میکروآلاینده	راندمان حذف (٪)
داروها	۶۰-۹۰
محصولات مراقبت شخصی	۵۰-۸۰
آفت‌کش‌ها	۵۰-۸۰
مواد شیمیایی صنعتی	۴۰-۷۰
EDCها	۶۰-۹۰
رنگ‌های ارگانیک	۵۰-۸۰

البته باید به این موضوع توجه داشت که راندمان حذف ذکر شده در جدول (۷)، مقادیر تقریبی است و بسته به عواملی مانند ویژگی‌های خاص برخی از میکروآلاینده‌ها، دوز ازن و زمان تماس، پارامترهای کیفیت فاضلاب و سایر شرایط عملیاتی می‌تواند متفاوت باشد. اثربخشی تصفیه‌ی ازن نیز، ممکن است برای میکروآلاینده‌های مختلف متفاوت باشد. انجام آزمایش‌ها و ارزیابی‌های خاص، برای تعیین راندمان حذف واقعی برای یک میکروآلاینده‌ی خاص در یک سناریوی تصفیه‌ی معین، مهم است و جدول بالا میانگینی از آزمایش‌های انجام شده با استفاده از روش ازن‌زنی می‌باشد [۱۰].

۶-۲-۳-فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOP[۵۲])

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای حذف برخی از میکروآلاینده‌ها، به‌ویژه آن‌هایی که به روش‌های دیگر تصفیه مقاوم هستند، موثر هستند. با این‌حال، اثربخشی AOP ها می‌تواند به عواملی مانند نوع AOP مورد استفاده، شرایط تصفیه و ترکیب فاضلاب، بستگی داشته باشد [۱۱]. در جدول (۸)، میانگین راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها با استفاده از روش اکسیداسیون پیشرفته، درج شده‌است. هم‌چنین، در ادامه، برخی از جزئیات اضافی برای حذف میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب با استفاده از روش اکسیداسیون پیشرفته، آورده شده‌است.

- تولید رادیکال هیدروکسیل AOP :(OH) ها، رادیکال‌های هیدروکسیل را از طریق مکانیسم‌های مختلف تولید می‌کنند. مانند واکنش‌های شیمیایی با ازن (O_3)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، یا تابش UV. رادیکال‌های هیدروکسیل بسیار واکنش‌پذیر هستند و می‌توانند به سرعت میکروآلاینده‌ها را اکسید کنند و ساختار شیمیایی آن‌ها را شکسته و کمتر مضر یا غیرسمی کنند [۱۰], [۱۱].
- انواع AOP ها: چندین AOP برای حذف میکروآلاینده‌ها استفاده می‌شود. از جمله O_3/H_2O_2 ، UV/H_2O_2، فوتوکاتالیز به عنوان مثال(TiO_2)، واکنش فنتون (Fe^{2+}/H_2O_2) و غیره. هر AOP بسته به میکروآلاینده‌های خاص و ماتریس آب، مزایا، محدودیت‌ها و شرایط عملیاتی بهینه‌ی خود را دارد [۱۰].
- کارایی و انتخاب پذیری: AOP ها، می‌توانند، بازده حذف بالایی را برای طیف وسیعی از میکروآلاینده‌ها به‌دست آورند. با این‌حال، راندمان حذف می‌تواند بسته به عواملی مانند میکروآلاینده‌ی خاص، غلظت آن، پارامترهای کیفیت فاضلاب، نوع و دوز AOP، زمان تماس و وجود مواد دیگر در فاضلاب، متفاوت باشد. AOPها می‌توانند بسیار انتخابی باشند و میکروآلاینده‌های خاص را هدف قرار دهند. در حالی که سایر ترکیبات را نسبتاً بی‌تأثیر می گذارند [۱۱].
- محصولات تبدیلی: مشابه ازن‌زنی، AOP ها نیز، می‌توانند در طی فرآیند اکسیداسیون، منجر به تشکیل محصولات تبدیلی شوند. این محصولات تبدیلی ممکن است خواص شیمیایی و سمیت متفاوتی در مقایسه با ترکیبات اصلی داشته باشند. نظارت و ارزیابی تشکیل محصولات تبدیل برای اطمینان از اثربخشی و ایمنی کلی فرآیند تصفیه، مهم است [۱۰].

جدول (۸): میانگین راندمان حذف میکروآلاینده‌ها با استفاده از روش AOP [۱۰]

میکروآلاینده	راندمان حذف (٪)
داروها	۶۰-۹۵
محصولات مراقبت شخصی	۵۰-۹۰
آفت‌کش‌ها	۵۰-۹۰
مواد شیمیایی صنعتی	۴۰-۸۰
EDC ها	۶۰-۹۵
رنگ‌های ارگانیک	۵۰-۸۰

[52] Advanced Oxidation Processes

- ترکیب با سایر فناوری‌های تصفیه: درحالی که ازن‌زنی، برای حذف میکروآلاینده‌ها موثر است، اغلب با سایر فناوری‌های تصفیه ترکیب می شود تا کارایی حذف کلی را افزایش دهد و هرگونه محدودیت بالقوه را برطرف کند. برای مثال، ازن‌زنی را می‌توان با جذب کربن فعال برای جذب بیشتر و حذف هر گونه میکروآلاینده‌ی باقی مانده یا محصولات تبدیلی، استفاده کرد. فرآیندهای تصفیه‌ی بیولوژیکی نیز، ممکن است برای تسهیل تخریب میکروآلاینده‌های خاصی که زیست تخریب پذیر هستند، ادغام شوند [۱۰].
- بهینه‌سازی فرآیند: کارایی ازن‌زنی برای حذف میکروآلاینده‌ها را می‌توان با در نظر گرفتن دقیق پارامترهای فرآیند مانند دوز ازن، زمان تماس، pH، دما و ویژگی های ماتریکس آب، بهینه کرد. مطالعات و برنامه‌های پایش در مقیاس آزمایشی نیز، می‌تواند به تعیین شرایط عملیاتی بهینه و اطمینان از حذف کارآمد میکروآلاینده، کمک کند [۱۰], [۱۱].

لازم به ذکر است که راندمان حذف ذکر شده در جدول (۸)، مقادیر تقریبی است و بسته به عواملی مانند ویژگی‌های خاص میکروآلاینده‌ها، نوع AOP مورد استفاده، زمان واکنش و غلظت میکروآلاینده‌ها، می‌تواند متفاوت باشد.

۶-۲-۴-فیلتراسیون غشایی[۵۳]

فیلتراسیون غشایی، یک روش تصفیه‌ی موثر برای حذف میکروآلاینده ها از آب و فاضلاب است. این روش، شامل استفاده از غشاهای نیمه نفوذپذیر است که به آب اجازه‌ی عبور می‌دهد و در عین حال، میکروآلاینده‌ها را بر اساس اندازه، وزن مولکولی و بار آن‌ها حفظ می‌کند [۱۰]. در ادامه، برخی از جزئیات اضافی در مورد فیلتراسیون غشایی برای حذف میکروآلاینده‌ها، آورده شده‌است:

- انواع فیلتراسیون غشایی: انواع مختلفی از فرآیندهای فیلتراسیون غشایی برای حذف میکروآلاینده‌ها استفاده می‌شود. از جمله میکروفیلتراسیون (MF[۵۴])، اولترافیلتراسیون (UF[۵۵])، نانو فیلتراسیون (NF[۵۶]) و اسمز معکوس (RO[۵۷]). هر نوع غشاء، دارای اندازه‌های منافذ و قابلیت‌های جداسازی متفاوتی است که محدوده‌ی میکروآلاینده‌هایی را که می‌توان به طور موثر حذف کرد، تعیین می‌کند [۱۱].
- مکانیسم حذف اندازه: فیلتراسیون غشایی، بر اصل حذف اندازه تکیه دارد. جایی که میکروآلاینده‌های بزرگتر از اندازه منافذ غشاء، نگه داشته شده و از آب حذف می‌شوند. درحالی که مولکول‌های کوچکتر و مواد محلول، از آن عبور می‌کنند. اندازه منافذ غشاهای مورد استفاده در میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس، از بزرگ‌تر به کوچک‌تر است که امکان حذف میکروآلاینده‌ها را فراهم می‌کند [۱۰], [۱۱].

- کارایی و انتخاب پذیری: فیلتراسیون غشایی، می‌تواند انواع میکروآلاینده‌ها را از جمله، داروها، محصولات مراقبت شخصی، آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی و ترکیبات مختل کننده‌ی غدد درون ریز را با راندمان بالا، حذف کند. درصد راندمان حذف به نوع میکروآلاینده، نوع غشاء، اندازه منافذ، شرایط عملیاتی و طرح‌های کیفیت فاضلاب، بستگی دارد. فیلتراسیون غشایی، یکی از گزینه‌های انتخابی است و می تواند میکروآلاینده‌ها را حذف کند [۱۰].

[53] Membrane Filtration
[54] Microfiltration
[55] Ultrafiltration
[56] Nanofiltration
[57] Reverse Osmosis

در جدول (۹)، میانگین راندمان حذف میکروآلاینده‌ها توسط روش فیلتراسیون غشایی، درج شده‌است.

جدول (۹): میانگین راندمان حذف میکروآلاینده‌ها توسط روش فیلتراسیون غشایی [۱۰]

میکروآلاینده	راندمان حذف (٪)
داروها	۸۰-۹۹
محصولات مراقبت شخصی	۷۰-۹۵
آفت‌کش‌ها	۷۰-۹۵
مواد شیمیایی صنعتی	۶۰-۹۰
EDCها	۸۰-۹۹
رنگ‌های ارگانیک	۷۵-۹۵

باید این موضوع را در نظر داشت که راندمان حذف ذکر شده در جدول (۹)، مقادیر تقریبی هستند و بسته به عواملی مانند ویژگی‌های خاص میکروآلاینده‌ها، نوع فیلتراسیون غشایی مورد استفاده (به عنوان مثال، میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس) و اندازه منافذ غشا، می‌تواند متفاوت باشد.

۶-۲-۵-رشد چسبیده[58]

رشد چسبیده، یک فرآیند تصفیه‌ی فاضلاب است که شامل استفاده از سیستم‌های تصفیه‌ی بیولوژیکی می‌باشد. در این روش، میکروارگانیسم‌ها به یک محیط یا ماده پشتیبانی متصل می‌شوند. این روش اغلب برای حذف میکروآلاینده‌ها در فاضلاب استفاده می شود [۱۰]. در ادامه، چند نکته‌ی کلیدی در مورد رشد معلق و هم‌چنین، انواع سیستم‌های رشد معلق برای حذف میکروآلاینده‌ها اشاره شده‌است.

- تشکیل بیوفیلم: در سیستم‌های رشد چسبیده، میکروارگانیسم‌ها یک بیوفیلم را روی یک ماده حمایتی جامد تشکیل می‌دهند. مواد نگهدارنده، سطحی را برای اتصال و رشد میکروارگانیسم ها فراهم می‌کنند و یک جامعه‌ی میکروبی متراکم، ایجاد می‌شود. مواد متداول پشتیبان شامل مواد پلاستیکی، سنگ، شن و یا سایر مواد هستند [۱۱].
- متابولیسم میکرواورگانیسم‌ها: میکرواورگانیسم‌های موجود در بیوفیلم، ترکیبات آلی قابل تجزیه از جمله میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب را متابولیزه و تجزیه می‌کنند. میکروآلاینده‌ها، بسته به ویژگی‌های آن‌ها و توانایی‌های متابولیکی جامعه‌ی میکروبی، می‌توانند توسط میکرواورگانیسم ها جذب یا تجزیه شوند [۱۱].
- مکانیسم‌های حذف میکروآلاینده: سیستم‌های رشد چسبیده، می‌توانند میکروآلاینده‌ها را از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله تجزیه‌ی زیستی، جذب و به دام افتادن فیزیکی، حذف کنند. میکرواورگانیسم‌های موجود در بیوفیلم، آنزیم‌هایی تولید می‌کنند که می‌توانند مولکول های آلی پیچیده را به اشکال ساده‌تر تجزیه کنند. علاوه‌براین، برخی از میکروآلاینده‌ها ممکن است روی سطح بیوفیلم جذب شوند، یا به طور فیزیکی در ماتریکس بیوفیلم به دام بیفتند [۱۱].

[58] Attached Growth

- مزایای فرآیند رشد چسبیده: سیستم‌های رشد چسبیده، چندین مزیت برای حذف میکروآلاینده‌ها ارائه می‌دهند. آنها سطح وسیعی را برای رشد میکروبی فراهم می‌کنند و غلظت زیست‌توده‌ی بالایی را ممکن می‌سازند و راندمان تصفیه را افزایش می‌دهند. بیوفیلم، از میکرواورگانیسم‌ها در برابر نیروهای برشی و مواد سمی محافظت می‌کند و انعطاف پذیری و عملکرد آنها را افزایش می‌دهد. سیستم‌های رشد چسبیده، نسبتا فشرده هستند و می‌توانند در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود، ادغام شوند. [۱۱]
- عوامل موثر بر حذف میکروآلاینده: راندمان حذف میکروآلاینده در سیستم‌های رشد چسبیده، می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های میکروآلاینده، ترکیب جامعه‌ی میکروبی، شرایط عملیاتی (مانند دما، pH، زمان ماند هیدرولیکی) و در دسترس بودن مواد مغذی باشد. بهینه‌سازی این عوامل برای به حداکثر رساندن حذف میکروآلاینده‌ها و اطمینان از عملکرد پایدار سیستم، مهم است [۱۱].

اما، چند نوع از سیستم‌های رشد چسبیده برای حذف میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌ی فاضلاب عبارت‌اند از:

- فیلتر BAC[۵۹] (کربن فعال بیولوژیکی): فیلترهای BAC، اصول جذب کربن فعال دانه‌ای (GAC) و فرآیندهای رشد چسبیده را ترکیب می‌کنند. این فیلترها، از بستری از محیط کربن فعال با سطح بالایی تشکیل شده‌اند. در این روش، میکرواورگانیسم‌ها ساکن می‌شوند و یک بیوفیلم روی سطح ذرات کربن فعال، تشکیل می‌دهند. میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب، بر روی محیط کربن جذب شده و سپس توسط میکرواورگانیسم‌های موجود در بیوفیلم، تجزیه می‌شوند. فیلترهای BAC در حذف طیف وسیعی از میکروآلاینده‌ها از جمله داروها، محصولات مراقبت شخصی و آلاینده‌های آلی، موثر هستند [۱۰], [۱۱].
- SBBGR[۶۰] (راکتور بیوفیلم و لجن گرانولی همزمان): SBBGR، یک سیستم رشد چسبیده‌ی ابتکاری است که یک راکتور بیوفیلم و یک راکتور لجن دانه‌ای را در یک واحد، ترکیب می‌کند. این سیستم از محیط‌های شناور مانند حامل‌های پلاستیکی که در آن میکرواورگانیسم‌ها یک بیوفیلم را تشکیل می‌دهند و ذرات لجن دانه‌ای متراکم که زیست‌توده‌ی اضافی را فراهم می‌کنند، تشکیل شده‌است. میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب از طریق فرآیندهای ترکیبی جذب بیوفیلم شده و تجزیه‌ی آن‌ها توسط میکرواورگانیسم‌های موجود در بیوفیلم و لجن دانه‌ای، انجام می‌شود. SBBGR، راندمان حذف میکروآلاینده‌ها را افزایش می‌دهد و می‌تواند، بارهای آلی بالا و ویژگی‌های فاضلاب نوسان را مدیریت کند [۱۰], [۱۱].
- ASFBBR[۶۱] (راکتور بیوفیلم ناپیوسته‌ی متوالی بی‌هوازی): ASFBBR، یک سیستم رشد چسبیده است که برای تصفیه‌ی فاضلاب حاوی میکروآلاینده‌ها، استفاده می‌شود و تحت شرایط بی‌هوازی، عمل می‌کند. این سیستم، شامل مراحل تصفیه یا محفظه‌های متعددی است که با مدیای پشتیبانی، پرشده‌اند. فاضلاب از طریق این مراحل در حالت بچ[۶۲] متوالی، جریان می‌یابد. میکرواورگانیسم‌های بی‌هوازی به مدیای پشتیبانی متصل می‌شوند و یک بیوفیلم، تشکیل می‌دهند. میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب، توسط میکرواورگانیسم‌های بی‌هوازی از طریق یک سری واکنش‌های بیوشیمیایی، تجزیه می‌شوند. ASFBBR، به‌ویژه برای حذف کلاس‌های خاصی از میکروآلاینده‌ها، مانند برخی از ترکیبات دارویی و برخی فلزات سنگین، تحت شرایط بی‌هوازی، موثر می‌باشد [۱۰], [۱۱].

[59] Biologically Active Carbon
[60] Simoltaneous biofilm and granular sludge reactor
[61] Anaerobic sequencing batch biofilm reactor
[62] Batch

- MBBR[۶۳] (راکتور بیوفیلم بستر متحرک): MBBR، یک سیستم چسبیده است که از مدیاهای پلاستیکی غوطه‌ور در فاضلاب، استفاده می‌کند. مدیاهای حامل، سطح وسیعی را برای اتصال میکرواورگانیسم‌ها و تشکیل بیوفیلم، فراهم می‌کنند. فاضلاب از طریق راکتور جریان می‌یابد و امکان تماس بین میکروآلاینده‌ها و بیوفیلم را فراهم می‌کند. جایی که عمل تجزیه توسط میکرواورگانسیم‌ها، رخ می‌دهد. سیستم‌های MBBR همه کاره هستند و می‌توانند به‌طور موثر، طیف وسیعی از میکروآلاینده‌ها از جمله داروها، آفت‌کش‌ها و آلاینده‌های آلی را حذف کنند [۱۰], [۱۱].

در جدول (۱۰)، راندمان حذف برخی از میکروآلاینده‌ها با استفاده از روش رشد چسبیده، درج شده‌است.

جدول (۱۰): راندمان حذف میکروآلاینده‌ها توسط رشد چسبیده [۱۱]

سیستم	مدیا و شرایط تجربی	نوع میکروآلاینده	راندمان حذف (٪)
BAC filter	نوع مدیا: کربن فعال دانه‌ای ارتفاع: ۸۰ سانتی‌متر قطر: ۲۲/۵ سانتی‌متر زمان تماس بستر خالی: ۱۸ دقیقه	Diclofenac	∽۹۱
		Carbamazepine	∽۹۵
		Sulfamethoxazole	∽۹۰
		Gemfibrozil	∽۹۰
SBBGR	نوع مدیا: جسم پلاستیکی چرخ‌شکل	Estrone	۶۲/۲
		Estradiol	۶۸
		Bisphenol A	۹۱/۸
ASFBBR	نوع مدیا: K1 حجم: ۱/۴ لیتر زمان ماند: ۴/۳ روز، ۱روز، ۰/۳ روز	Ethinylestradiol	۹۶ (۴/۳ روز)
		Ethinylestradiol	۸۱ (۱ روز)
		Ethinylestradiol	۷۴ (۰/۳ روز)
MBBR	نوع مدیا: K1 حجم: ۵ لیتر زمان ماند: ۲۴ ساعت	Diclofenac	۸۰<
		Ibuprofen	∽۱۰۰
		Naproxen	∽۱۰۰
		Ketoprofen	∽۱۰۰
		Memfenamic acid	۸۰<
		Clofibric acid	۶۰<

از جدول (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از رشد چسبیده برای حذف میکروآلاینده‌ها بسیار موثر است. اما، نوع سیستم مورد استفاده و نوع میکروآلاینده در راندمان حذف، نقش مهمی دارند.

[63] Moving bed biofilm reactor

۷-استانداردهای غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب

استانداردهای محدودیت غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، می‌تواند به عوامل مختلفی بستگی داشته‌باشد. در ادامه، به برخی از این عوامل که می‌توانند روی این استانداردها تاثیر بگذارند، اشاره شده‌است.

- نهادهای نظارتی: نهادهای نظارتی مختلف در سطح ملی، منطقه‌ای یا محلی، ممکن است که استانداردهایی را برای غلظت خروجی میکروآلاینده‌ها در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، ایجاد کنند. این نهادها، می‌توانند شامل سازمان‌های دولتی، سازمان‌های حفاظت از محیط‌زیست و سازمان‌های بهداشت عمومی باشند. به‌عنوان مثال، می‌توان به اتحادیه‌ی اروپا (EU)[۶۴]، آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده (EPA)[۶۵] و سازمان بهداشت جهانی (WHO)[۶۶]، اشاره کرد [۱۰].
- اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی: استانداردها، اغلب براساس اثرات بالقوه‌ی زیست‌محیطی و بهداشتی میکروآلاینده‌ها هستند. تحقیقات علمی، مطالعات و ارزیابی ریسک، نقش مهمی در تعیین غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب دارند. اثرات بالقوه بر اکوسیستم‌ها، زندگی آبزیان و سلامت انسان‌ها، در هنگام تنظیم این استانداردها، درنظر گرفته می‌شوند [۱۰].
- میکروآلاینده‌های خاص: میکروآلاینده‌های خاص، ممکن است درجه‌ی متفاوتی از سمیت و یا ماندگاری در محیط‌زیست، داشته باشند. بنابراین، ممکن است استانداردهایی برای میکروآلاینده‌های خاص، براساس تاثیرات نامطلوب شناخته شده و مشکوک، تعیین گردد. به‌طور مثال، برخی از فلزات سنگین مانند جیوه و کادمیوم را می‌توان از این مورد دانست [۱۰].
- استفاده از آب و استفاده‌ی مجدد: در صورتی که پساب بخواهد برای مصارفی مانند کشاورزی استفاده شود، محدودیت‌های سخت‌تری برای تضمین حفاظت از سلامت عمومی و جلوگیری از آلودگی محصولات غذایی، اعمال می‌شود. [۱۰]
- امکان‌سنجی تکنولوژی: استانداردهای محدودیت‌های میکروآلاینده، باید امکان‌سنجی فناوری دستیابی به کاهش یا حذف میکروآلاینده‌های مورد نظر را در طول فرآیند تصفیه‌ی فاضلاب، درنظر بگیرند. در دسترس‌بودن فناوری‌های تصفیه و هزینه‌های مرتبط، ملاحظات قابل توجهی در تعیین این استانداردها هستند [۱۰].

توجه به این نکته مهم است که استانداردهای محدودیت‌های میکروآلاینده‌ها، می‌تواند به‌طور قابل توجهی بین کشورها، مناطق مختلف و حتی در بخش‌های مختلف صنعت، متفاوت باشد. برای تعیین استانداردها و محدودیت‌های خاص قابل اعمال برای یک تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب خاص، همیشه باید از مقررات و دستورالعمل‌های محلی استفاده شود. در جدول (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)، حداکثر غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر اساس استانداردهای EU، EPA و WHO، درج شده‌است.

جدول (۱۱): استاندارد غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب براساس اتحادیه‌ی اروپا [۱۰]

میکروآلاینده	حداکثر غلظت قابل قبول در خروجی تصفیه‌خانه (میکروگرم برلیتر)

[64] European Union
[65] United States environmetal
[66] World health organization

Benzene	۱۰
Cadmium	۱
Copper	۲۰
Mercury	۱
Bisphenol A	۵
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	۲

جدول (۱۲): استاندارد غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب براساس آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده [۱۰]

میکروآلاینده	حداکثر غلظت قابل قبول در خروجی تصفیه‌خانه (میکروگرم برلیتر)
Benzene	۵
Cadmium	۲
Copper	۲۰
Mercury	۰/۱
Bisphenol A	۲
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	۰/۵

جدول (۱۳): استاندارد غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب براساس سازمان بهداشت جهانی [۱۰]

میکروآلاینده	حداکثر غلظت قابل قبول در خروجی تصفیه‌خانه (میکروگرم برلیتر)
Benzene	۱۰
Cadmium	۵
Copper	۲۰
Mercury	۱۰
Bisphenol A	۵
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	۱

از سه جدول بالا، می‌توان نتیجه گرفت که استانداردهای غلظت میکروآلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، می‌تواند براساس سازمان‌های مختلف، متفاوت باشد که این به مواردی که در بالا اشاره شد، بستگی دارد.

۸-جمع‌بندی و پیشنهادات

انواع فاضلاب‌هایی که می‌توانند میکروآلاینده‌ها را از طریق خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب به سیستم‌های آبی منتقل کنند، عبارت‌اند از: فاضلاب خانگی، فاضلاب‌های صنعتی، فاضلاب‌های بیمارستانی، کودها و رواناب‌های کشاورزی. تمرکز زیادی برای بررسی میکروآلاینده‌ها در فاضلاب خانگی انجام شده‌است. درحالی که، بررسی کمتری بر روی انواع فاضلاب‌های دیگر که ممکن است حاوی میکروالاینده‌های قابل توجهی باشند، شده‌است. به‌عنوان مثال، بیمارستان‌ها دارای منبع قابل توجهی از داروهای مختلف از جمله ترکیبات تولید شده از فعالیت‌های آزمایشگاهی و هم‌چنین، دفع داروها توسط بیماران هستند [۵۱]. پس حذف این ترکیبات، بسیار ضروری است.

از آنجایی که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، قادر نیستند که به‌طور کامل میکروآلاینده‌ها را حذف کنند، ایجاد استراتژی‌هایی برای به حداقل رساندن این ترکیبات به‌منظور کمتر شدن اثرات نامطلوب آن‌ها، یکی از چالش‌های اصلی مهندسین محیط‌زیست می‌باشد[۱۱]. پس، انتخاب نوع فرآیند تصفیه در راندمان حذف میکروآلاینده‌ها، بسیار موثر است.

از آنجایی که سیستم تصفیه‌ی فاضلاب مرسوم در حذف بسیاری از میکروآلاینده‌ها ناکار آمد است، لذا، چندین گزینه برای بهبود راندمان حذف میکروآلاینده‌ها، وجود دارد. از جمله، کنترل منبع (استفاده‌ی کمتر از محصولات حاوی میکروآلاینده) یا ارزیابی مجدد و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه‌ی فعلی نیز، از گزینه‌های مورد استفاده می‌باشد که هرکدام به نوع میکروآلاینده‌ی خاص و راندمان حذف تصفیه‌خانه، بستگی دارد [۱۱].

راندمان حذف میکروآلاینده‌های بسیار پایدار، غیرقابل تجزیه و قطبی، بسیار کم است و مستقل از پارامترهای عملیاتی در طول فرآیند تصفیه‌ی بیولوژیکی می‌باشد. در نتیجه باید از فرآیندهای تصفیه‌ی ثالثیه مانند فیلتراسیون غشایی پس از ازن‌زنی یا فرآیندهای تصفیه‌ی ترکیبی، استفاده شود [۱۱]. جدول (۱۴)، راندمان حذف میکروآلاینده‌ها را در سه تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، یعنی تصفیه‌خانه‌ی مرسوم[۶۷]، کم‌هزینه[۶۸] و پیشرفته[۶۹]، مقایسه می‌کند. فرآیندهای تصفیه‌ی کم‌هزینه، مانند بسترهای فیلتر چکنده، لاگون‌ها و وتلندها[۷۰]، معمولا برای تصفیه‌ی فاضلاب غیرمتمرکز و جوامع کوچک، کاربرد دارند. همانطور که در جدول (۱۴) مشاهده می‌شود، فرآیندهای تصفیه‌ی کم هزینه، راندمان حذف متناقضی را نشان می‌دهند. کاماچو-مونوز[۷۱]و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۲ به این نتیجه رسیدند که اکثر ترکیبات دارویی مورد مطالعه، راندمان حذف بهتری در فرآیندهای تصفیه‌ی مرسوم نسبت به تصفیه‌ی کم‌هزینه داشته‌اند [۵۲]. با این وجود، تفاوت قابل توجهی بین میانگین راندمان حذف تصفیه‌ی کم‌هزینه (۵۵ درصد) و تصفیه‌ی مرسوم (۶۴ درصد)، وجود ندارد و روش تصفیه‌ی پیشرفته برای حذف میکروآلاینده‌ها، بسیار موثرتر است [۱۱]. به‌طور مثال RO، به‌عنوان یک تصفیه‌ی ثالثیه، می‌تواند حتی تا سقف ۱۰۰ درصد از برخی EDC ها را حذف کند [۵۳]. پس در صورت نیاز و درنظرگرفتن شرایط اقتصادی، استفاده از فرآیندهای تصفیه‌ی پیشرفته برای اطمینان از حذف میکروآلاینده‌ها، پیشنهاد می‌شود که در حال حاضر در کشورهای پیشرفته‌ی اروپایی و غربی، از این روش‌ها برای حذف میکروآلاینده‌ها استفاده می‌کنند.

از آنجایی که در ایران فروش داروها و آنتی‌بیوتیک‌های بدون نسخه بسیار رواج دارد، لذا، هرچه سریع‌تر باید برای ارزیابی میکروآلاینده‌های موجود در فاضلاب، چاره‌ای اندیشید. هم‌چنین، چون کشور ایران تحریم می‌باشد، لذا، استفاده

[67] Conventional
[68] Low cost
[69] Advancend
[70] Wetland
[71] Camacho-Monuz

از فرآیندهای پیشرفته و تصفیه‌ی ثالثیه، اقتصادی نمی‌باشد. در چنین شرایطی، می‌توان از لاگون‌ها و یا وتلندها، استفاده نمود. البته، همان‌طور که ذکر شد، لاگون‌ها و وتلندها نسبت به تصفیه‌ی پیشرفته، راندمان حذف ضعیف‌تری دارند و برای جوامع کوچک‌تر، مناسب می‌باشند. ولی از لحاظ اقتصادی، به‌صرفه‌تر هستند.

جدول (۱۴): راندمان حذف میکروآلاینده‌ها در سه فرآیند مختلف [۴], [۱۱], [۲۱]

ترکیبات	راندمان حذف در تصفیه‌خانه‌ی کم‌هزینه (٪)	راندمان حذف در تصفیه‌خانه‌ی مرسوم (٪)	راندمان حذف در تصفیه‌خانه‌ی پیشرفته (٪)
Ibuprofen	۱۷-<۹۹	۷۲-۱۰۰	<۹۹
Diclofenac	۰-۹۶	<۰-۸۱	۸۹-۱۰۰
Ketoprofen	۰-۹۹	۱۱-۱۰۰	۶۹-۹۵
Carbamazepine	۰-۶۶	<۰-۶۲	۶۰-۱۰۰
Estrone	۶۸-۹۵	۷۵-۹۱	۸۴-۹۹
Nonylphenol	<۵۰	۲۲-۹۹	۸۲-۸۹
Bisphenol A	۶۲-۷۹	۶۰-<۹۹	۹۰-۹۹

۹-منابع

[1] M. Scheurer, A. Michel, H.-J. Brauch, W. Ruck, and F. Sacher, “Occurrence and fate of the antidiabetic drug metformin and its metabolite guanylurea in the environment and during drinking water treatment.,” *Water Res*, vol. 46, no. 15, pp. 4790–802, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.watres.2012.06.019.

[2] D. Goffin *et al.*, “Rett syndrome mutation MeCP2 T158A disrupts DNA binding, protein stability and ERP responses.,” *Nat Neurosci*, vol. 15, no. 2, pp. 274–83, Nov. 2011, doi: 10.1038/nn.2997.

[3] G. S. Schultz, J. M. Davidson, R. S. Kirsner, P. Bornstein, and I. M. Herman, “Dynamic reciprocity in the wound microenvironment.,” *Wound Repair Regen*, vol. 19, no. 2, pp. 134–48, 2011, doi: 10.1111/j.1524-475X.2011.00673.x.

[4] R. Loos, B. M. Gawlik, G. Locoro, E. Rimaviciute, S. Contini, and G. Bidoglio, “EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters.,” *Environ Pollut*, vol. 157, no. 2, pp. 561–8, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.envpol.2008.09.020.

[5] A. Pruden, R. Pei, H. Storteboom, and K. H. Carlson, “Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in northern Colorado.,” *Environ Sci Technol*, vol. 40, no. 23, pp. 7445–50, Dec. 2006, doi: 10.1021/es060413l.

[6] X. Yu, F. Yu, Z. Li, and J. Zhan, “Occurrence, distribution, and ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in the surface water of the middle and lower reaches of the Yellow River (Henan section).,” *J Hazard Mater*, vol. 443, no. Pt B, p. 130369, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130369.

[7] C. M. Rochman *et al.*, “Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption,” *Sci Rep*, vol. 5, Sep. 2015, doi: 10.1038/srep14340.

[8] J. P. Giesy and K. Kannan, “Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife.,” *Environ Sci Technol*, vol. 35, no. 7, pp. 1339–42, Apr. 2001, doi: 10.1021/es001834k.

[9] “Environments and Contaminants - Drinking Water Contaminants | US EPA.” https://www.epa.gov/americaschildrenenvironment/environments-and-contaminants-drinking-water-contaminants (accessed Apr. 26, 2023).

[10] “CHAT GPT”.

[11] Y. Luo *et al.*, “A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment.,” *Sci Total Environ*, vol. 473–474, pp. 619–41, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.065.

[12] A. Pal, K. Y.-H. Gin, A. Y.-C. Lin, and M. Reinhard, “Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: review of recent occurrences, sources, fate and effects.,” *Sci Total Environ*, vol. 408, no. 24, pp. 6062–9, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.09.026.

[13] B. Kasprzyk-Hordern, R. M. Dinsdale, and A. J. Guwy, “The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters.,” *Water Res*, vol. 43, no. 2, pp. 363–80, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.watres.2008.10.047.

[14] M. J. Gómez, S. Herrera, D. Solé, E. García-Calvo, and A. R. Fernández-Alba, “Spatio-temporal evaluation of organic contaminants and their transformation products along a river basin affected by urban, agricultural and industrial pollution,” *Science of The Total Environment*, vol. 420, pp. 134–145, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2012.01.029.

[15] A. Jelic *et al.*, “Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment.,” *Water Res*, vol. 45, no. 3, pp. 1165–76, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.watres.2010.11.010.

[16] O. F. S. Khasawneh and P. Palaniandy, “Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 150, pp. 532–556, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.PSEP.2021.04.045.

[17] J. Wilkinson, P. S. Hooda, J. Barker, S. Barton, and J. Swinden, “Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water: An overarching review of the field,” *Environmental Pollution*, vol. 231, pp. 954–970, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2017.08.032.

[18] P. E. Stackelberg, E. T. Furlong, M. T. Meyer, S. D. Zaugg, A. K. Henderson, and D. B. Reissman, “Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant,” *Science of The Total Environment*, vol. 329, no. 1–3, pp. 99–113, Aug. 2004, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2004.03.015.

[19] S. Kleywegt *et al.*, “Pharmaceuticals, hormones and bisphenol A in untreated source and finished drinking water in Ontario, Canada — Occurrence and treatment efficiency,” *Science of The Total Environment*, vol. 409, no. 8, pp. 1481–1488, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2011.01.010.

[20] C. Wang *et al.*, “Investigation of pharmaceuticals in Missouri natural and drinking water using high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry,” *Water Res*, vol. 45, no. 4, pp. 1818–1828, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.WATRES.2010.11.043.

[21] K. Choi *et al.*, “Seasonal variations of several pharmaceutical residues in surface water and sewage treatment plants of Han River, Korea,” *Science of The Total Environment*, vol. 405, no. 1–3, pp. 120–128, Nov. 2008, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2008.06.038.

[22] D. W. Kolpin, M. Skopec, M. T. Meyer, E. T. Furlong, and S. D. Zaugg, “Urban contribution of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants to streams during differing flow conditions,” *Science of The Total Environment*, vol. 328, no. 1–3, pp. 119–130, Jul. 2004, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2004.01.015.

[23] B. Kasprzyk-Hordern, R. M. Dinsdale, and A. J. Guwy, “The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment

and its impact on the quality of receiving waters," *Water Res*, vol. 43, no. 2, pp. 363–380, Feb. 2009, doi: 10.1016/J.WATRES.2008.10.047.

[24] T. A. Ternes, "Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers," *Water Res*, vol. 32, no. 11, pp. 3245–3260, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0043-1354(98)00099-2.

[25] R. U. Halden, "Plastics and health risks.," *Annu Rev Public Health*, vol. 31, pp. 179–94, 2010, doi: 10.1146/annurev.publhealth.012809.103714.

[26] E. N. Zare *et al.*, "Remediation of pharmaceuticals from contaminated water by molecularly imprinted polymers: a review.," *Environ Chem Lett*, vol. 20, no. 4, pp. 2629–2664, 2022, doi: 10.1007/s10311-022-01439-4.

[27] R. T. Zoeller *et al.*, "Endocrine-disrupting chemicals and public health protection: a statement of principles from The Endocrine Society.," *Endocrinology*, vol. 153, no. 9, pp. 4097–110, Sep. 2012, doi: 10.1210/en.2012-1422.

[28] "Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions | UNEP - UN Environment Programme." https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions (accessed Apr. 26, 2023).

[29] F. Gottschalk, T. Sonderer, R. W. Scholz, and B. Nowack, "Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO(2), ZnO, Ag, CNT, Fullerenes) for different regions.," *Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 24, pp. 9216–22, Dec. 2009, doi: 10.1021/es9015553.

[30] A. Ivask *et al.*, "Size-dependent toxicity of silver nanoparticles to bacteria, yeast, algae, crustaceans and mammalian cells in vitro.," *PLoS One*, vol. 9, no. 7, p. e102108, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0102108.

[31] "Handbook on the Toxicology of Metals."

[32] B. Tiwari, B. Sellamuthu, Y. Ouarda, P. Drogui, R. D. Tyagi, and G. Buelna, "Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach.," *Bioresour Technol*, vol. 224, pp. 1–12, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.042.

[33] D. G. J. Larsson, "Antibiotics in the environment.," *Ups J Med Sci*, vol. 119, no. 2, pp. 108–12, May 2014, doi: 10.3109/03009734.2014.896438.

[34] C. Whalley, "Chemicals in European waters Knowledge developments," doi: 10.2800/265080.

[35] C. Potera, "Caffeine in wastewater is a tracer for human fecal contamination.," *Environ Health Perspect*, vol. 120, no. 3, pp. A108-9, Mar. 2012, doi: 10.1289/ehp.120-a108a.

[36] V. G. Samaras, A. S. Stasinakis, D. Mamais, N. S. Thomaidis, and T. D. Lekkas, "Fate of selected pharmaceuticals and synthetic endocrine disrupting compounds during wastewater treatment and sludge anaerobic digestion," *J Hazard Mater*, vol. 244–245, pp. 259–267, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2012.11.039.

[37] M. Carballa *et al.*, “Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant,” *Water Res*, vol. 38, no. 12, pp. 2918–2926, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.watres.2004.03.029.

[38] T. A. Ternes, A. Joss, and H. Siegrist, “Peer Reviewed: Scrutinizing Pharmaceuticals and Personal Care Products in Wastewater Treatment,” *Environ Sci Technol*, vol. 38, no. 20, pp. 392A-399A, Oct. 2004, doi: 10.1021/es040639t.

[39] N. K. Stamatis and I. K. Konstantinou, “Occurrence and removal of emerging pharmaceutical, personal care compounds and caffeine tracer in municipal sewage treatment plant in Western Greece,” *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, vol. 48, no. 9, pp. 800–813, Sep. 2013, doi: 10.1080/03601234.2013.781359.

[40] Y. Nie, Z. Qiang, H. Zhang, and W. Ben, “Fate and seasonal variation of endocrine-disrupting chemicals in a sewage treatment plant with A/A/O process,” *Sep Purif Technol*, vol. 84, pp. 9–15, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.seppur.2011.01.030.

[41] S. K. Behera, H. W. Kim, J.-E. Oh, and H.-S. Park, “Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants of the largest industrial city of Korea,” *Science of The Total Environment*, vol. 409, no. 20, pp. 4351–4360, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.015.

[42] R. Salgado, R. Marques, J. P. Noronha, G. Carvalho, A. Oehmen, and M. A. M. Reis, “Assessing the removal of pharmaceuticals and personal care products in a full-scale activated sludge plant,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 19, no. 5, pp. 1818–1827, Jun. 2012, doi: 10.1007/s11356-011-0693-z.

[43] P. Verlicchi, A. Galletti, and L. Masotti, “Management of hospital wastewaters: the case of the effluent of a large hospital situated in a small town,” *Water Science and Technology*, vol. 61, no. 10, pp. 2507–2519, May 2010, doi: 10.2166/wst.2010.138.

[44] J. A. Dougherty, P. W. Swarzenski, R. S. Dinicola, and M. Reinhard, “Occurrence of Herbicides and Pharmaceutical and Personal Care Products in Surface Water and Groundwater around Liberty Bay, Puget Sound, Washington,” *J Environ Qual*, vol. 39, no. 4, pp. 1173–1180, Jul. 2010, doi: 10.2134/jeq2009.0189.

[45] J. S. Vader *et al.*, “Degradation of ethinyl estradiol by nitrifying activated sludge,” *Chemosphere*, vol. 41, no. 8, pp. 1239–1243, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0045-6535(99)00556-1.

[46] S. K. Behera, H. W. Kim, J.-E. Oh, and H.-S. Park, “Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants of the largest industrial city of Korea,” *Science of The Total Environment*, vol. 409, no. 20, pp. 4351–4360, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.015.

[47] R. Rosal *et al.*, “Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation,” *Water Res*, vol. 44, no. 2, pp. 578–588, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.watres.2009.07.004.

[48] K.-J. Choi, S.-G. Kim, and S.-H. Kim, “Removal of antibiotics by coagulation and granular activated carbon filtration,” *J Hazard Mater*, vol. 151, no. 1, pp. 38–43, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.059.

[49] L. Kovalova *et al.*, “Elimination of Micropollutants during Post-Treatment of Hospital Wastewater with Powdered Activated Carbon, Ozone, and UV,” *Environ Sci Technol*, vol. 47, no. 14, pp. 7899–7908, Jul. 2013, doi: 10.1021/es400708w.

[50] J. Margot *et al.*, “Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon?,” *Science of The Total Environment*, vol. 461–462, pp. 480–498, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.034.

[51] P. Verlicchi, A. Galletti, M. Petrovic, and D. Barceló, “Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 389, no. 3–4, pp. 416–428, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.005.

[52] D. Camacho-Muñoz, J. Martín, J. L. Santos, I. Aparicio, and E. Alonso, “Effectiveness of Conventional and Low-Cost Wastewater Treatments in the Removal of Pharmaceutically Active Compounds,” *Water Air Soil Pollut*, vol. 223, no. 5, pp. 2611–2621, Jun. 2012, doi: 10.1007/s11270-011-1053-9.

[53] D. Balabanič, D. Hermosilla, N. Merayo, A. K. Klemenčič, and Á. Blanco, “Comparison of different wastewater treatments for removal of selected endocrine-disruptors from paper mill wastewaters,” *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 47, no. 10, pp. 1350–1363, Aug. 2012, doi: 10.1080/10934529.2012.672301.

ممنون از شما که برای مطالعه‌ی این مقاله، وقت گذاشتید.