Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 9, No. 1, PP. 4-18, Spring 2024
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.391754.1359

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال نهم، شماره ۱، صفحات ۴-۱۸، بهار ۱۴۰۳

Review Paper

A Review of Wastewater Containing Detergents: Characteristics and Treatment Methods

Elham Abdollahzadeh Sharghi[1*] and Ghazaleh Faridizad[2]

1- Associate Professor of Chemical Engineering, Environmental Group, Energy Department, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

2- Department of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: E.abdollahzadeh@merc.ir

Received: 05/04/2023
Revised: 20/06/2023
Accepted: 04/08/2023
© IWWA

Abstract

Detergent is one of the main environmental pollutants which can penetrate into wastewater treatment plants and negatively affect their performance. Detergents have a direct and indirect effect on human health and other living organisms. For this reason, their effects need to be managed and controlled. Wastewater containing detergents is a renewable resource that can be recycled and reused. The treatment of this type of wastewater is very challenging due to its complex composition, the large volume of discharge into the environment caused by the increase in the use of detergents with the increase in the global population. In this article, the types of synthetic surfactants and their effects on human health and the environment, the characteristics of wastewater containing detergents considering the source of production, the methods of wastewater treatment containing surfactants and the studies conducted in this regard are reviewed. In the following, the economic review of wastewater treatment containing detergents and the challenges and future perspectives of wastewater treatment processes containing surfactants are also stated.

Keywords: Detergents wastewater, Wastewater treatment, Surfactant, Wastewater recycling.

مقاله مروری

مروری بر فاضلاب حاوی مواد شوینده: خصوصیات و روش‌های تصفیه

الهام عبداله‌زاده شرقی[1*] و غزاله فریدی‌زاد[2]

۱- دانشیار مهندسی شیمی، گروه محیط‌زیست، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: E.abdollahzadeh@merc.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳
© انجمن آب و فاضلاب ایران

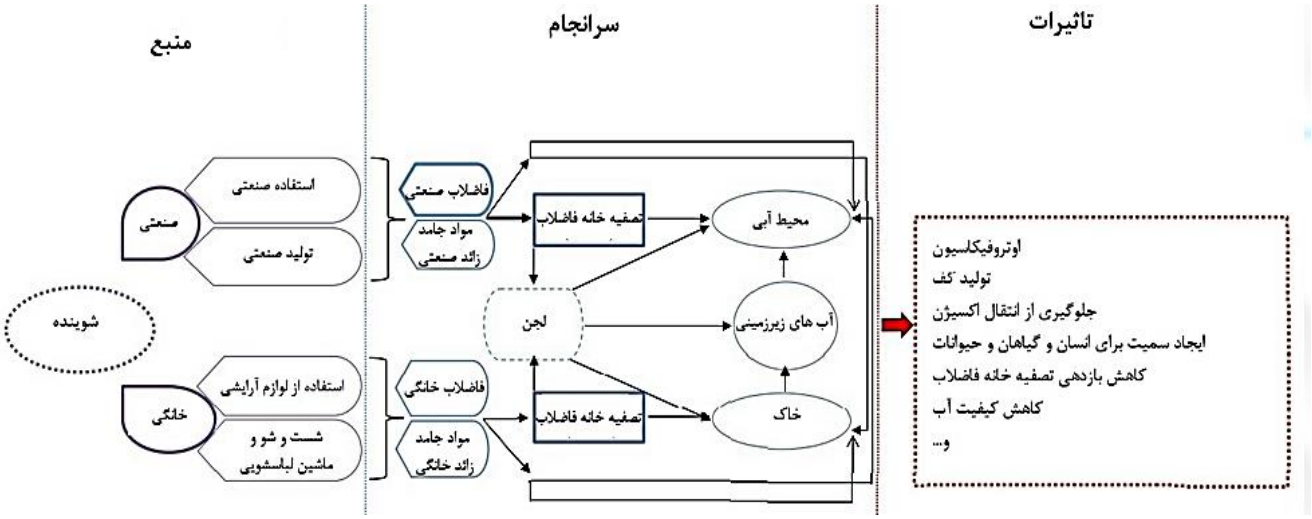
چکیده

مواد شوینده یکی از آلاینده‌های اصلی محیط‌زیست است که می‌تواند به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نفوذ کرده و بر عملکرد آن‌ها تأثیر منفی بگذارند. مواد شوینده بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده تاثیر مستقیم و غیر مستقیم دارد. به‌همین سبب اثرات آن‌ها نیاز به مدیریت و کنترل دارد. فاضلاب حاوی مواد شوینده یک منبع تجدیدپذیر است که می‌تواند بازیافت و مجدداً مورد استفاده قرار گیرد. تصفیه این نوع فاضلاب‌ها به‌دلیل ترکیبات پیچیده آن و حجم زیاد تخلیه به محیط‌زیست ناشی از افزایش استفاده از مواد شوینده با افزایش جمعیت جهانی بسیار چالش برانگیز است. در این مقاله انواع سورفکتانت‌های سنتزی و تاثیرات آن‌ها بر سلامت انسان و محیط‌زیست، مشخصات فاضلاب حاوی مواد شوینده با درنظرگرفتن منبع تولید، روش‌های تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت و مطالعات انجام‌شده در این خصوص بررسی شده است. در ادامه بررسی اقتصادی تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده و چالش‌ها و دیدگاه آینده فرآیندهای تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت بیان شده است.

کلمات کلیدی: فاضلاب شوینده، تصفیه فاضلاب، سورفکتانت، بازیافت پساب.

۱- مقدمه

توسعه اقتصادی یک کشور به شدت متکی به دسترسی آن به منابع آب است. با ورود به قرن بیست و یکم، عوامل متعددی از جمله صنعتی‌شدن شهرها، شهرنشینی و رشد سریع جمعیت تأثیر زیادی بر کیفیت آب در سراسر جهان داشته است. در این راستا، معضل آلودگی آب، به‌ویژه پساب‌های صنعتی، برای کشورهای درحال توسعه و توسعه‌یافته به‌یک نگرانی قابل‌توجه تبدیل شده است. در بین آلاینده‌های صنعتی مختلف، توجه قابل‌توجهی به مشکلات محیط‌زیستی ناشی از تولید و مصرف اجزای شوینده معطوف شده است. اصطلاح "شوینده" معمولاً به جایگزین‌های صابون مصنوعی اطلاق می‌شود، اما به‌طور کلی، هر جزء که به‌عنوان یک عامل تمیزکننده استفاده شود، به‌عنوان یک شوینده شناخته می‌شود. شوینده به‌دلیل ساختار و کاربردهای متنوعی که دارند در انواع مصارف صنعتی و خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۱ کاربرد و تاثیرات محیط‌زیستی شوینده‌ها آورده شده است (Mousavi and Khodadoost, 2019).



شکل ۱- منابع، توزیع و اثرات مواد شوینده در محیط‌زیست (Mousavi and Khodadoost, 2019)

سورفکتانت جزء اصلی در شوینده‌ها است. سورفکتانت‌ها مواد فعال‌کننده سطحی دوگانه‌دوست با سرآب‌دوست و دم آب‌گریز هستند که در غلظت کم، سبب کاهش کشش سطحی به مقدار چشمگیری می‌شوند. گروه آب‌گریز غالباً یک زنجیره هیدروکربنی نسبتاً طولانی و گروه آب‌دوست یک گروه یونی یا قطبی است. زنجیره هیدروکربنی می‌تواند خطی و یا شاخه‌دار باشد. طول زنجیره و شاخه‌دار یا مستقیم‌بودن آن جزء ویژگی‌های مواد فعال سطحی است. این مولکول‌ها را می‌توان به دو گروه سوورفکتانت‌های سنتزی و سورفکتانت‌های زیستی طبقه‌بندی کرد. سورفکتانت‌های سنتزی براساس ساختار مولکولی خود به ۴ گروه غیریونی، آنیونی، کاتیونی و آمفوتریک تقسیم می‌شوند، که همگی بر کاهش کشش سطحی و بین سطحی مؤثر هستند. سورفکتانت‌های سنتزی عمدتاً محصولات جانبی صنایع پتروشیمی است و به‌همین سبب در محیط‌زیست پایدار باقی می‌مانند و در صنایع بسیاری هم‌چون صنایع شوینده و تمیزکننده، چرم و پارچه و کاغذسازی، صنایع شیمیایی، صنایع غذایی، صنایع آرایشی و بهداشتی و دارویی استفاده می‌شوند. در این میان ۴ گروه مختلف سورفکتانت‌ها، سورفکتانت‌های آنیونی با ۶۰٪ تولید جهانی، از مهم‌ترین گروه‌های سورفکتانت به شمار می‌روند (فریدی‌زاد و همکاران، ۱۳۹۹).

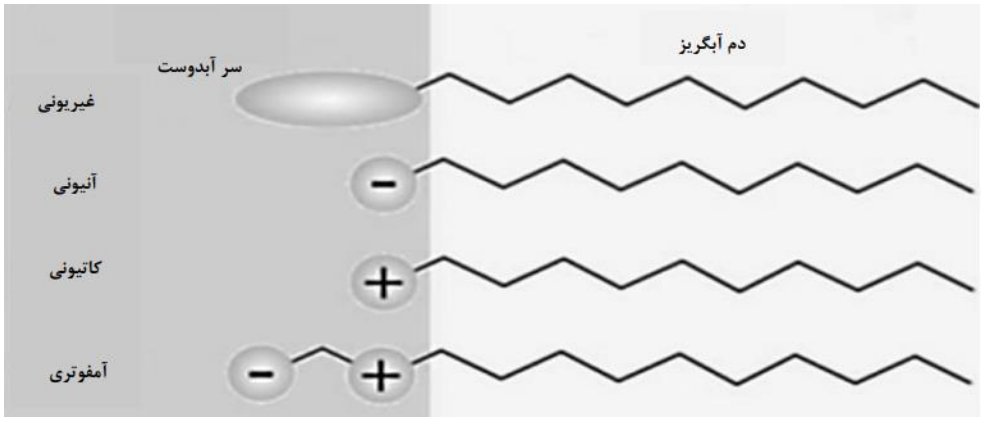
به‌طور کلی، وجود محصولات پاک کننده در محیط‌زیست همیشه یک نگرانی بوده‌است. از جمله اثرات مختلف مواد شوینده بر روی اکوسیستم‌های طبیعی، اوتروفیکاسیون (رشد بیش از حد جلبک‌ها) و کاهش انتقال اکسیژن و نور در آب، تحت‌تاثیر قراردادن کیفیت آب شیرین و تغییر pH و شوری اجسام پذیرنده است که بر روی جانوران و حیوانات تاثیر می‌گذارد. به‌علاوه تولید و مصرف بالای سورفکتانت‌ها و خواص آن نظیر تولید کف و جلوگیری از نفوذ اکسیژن و از بین بردن میکروارگانیسم‌ها، باعث می‌شود تا در صورت عدم مدیریت مناسب فاضلاب‌های حاوی این مواد، تغییرات بلند مدت و کوتاه مدتی توسط این مواد در اکوسیستم ایجاد شود. به‌همین سبب تصفیه فاضلاب‌های آلوده به شوینده اهمیت بسیاری پیدا کرده است (Pirsaheb et al., 2014). انواع روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی سورفکتانت به‌کار گرفته می‌شوند. روش‌های

فیزیکی و شیمیایی عمدتا شامل انعقاد و لخته‌سازی، اکسایش پیشرفته، انعقاد الکتریکی، فیلتراسیون و جذب سطحی و روش‌های زیستی شامل تصفیه هوازی و بی‌هوازی است که هرکدام از آن‌ها دارای مزایا و معایبی است.

با توجه به موارد ذکرشده، مطالعه جامعی بر فاضلاب صنایع شوینده بسیار ضروری است. در مطالعات بسیاری از محققان ویژگی‌های فاضلاب‌های حاوی مواد شوینده و اثرات محیط‌زیستی آن‌ها بررسی شده است اما هم‌چنان مطالعه جامع در رابطه با فاضلاب صنایع شوینده با کمبودهای اساسی مواجه است. به‌همین دلیل در این مطالعه یک بررسی جامع پیرامون دانش انباشته‌شده در خصوص ویژگی‌های فاضلاب حاوی مواد شوینده و آخرین سطح نوآوری‌ها در فرآیندهای تصفیه فاضلاب آن‌ها انجام شده است. برای رسیدن به این هدف در ابتدا سورفکتانت‌ها، مشخصات و تاثیرات محیط‌زیستی آن‌ها بررسی شده و سپس فرآیندهای مناسب تصفیه فاضلاب و مزایا و معایب آن‌ها معرفی می‌شد.

۲- ترکیب و طبقه‌بندی سوفکتانت‌ها

کلمه "سورفکتانت" را می‌توان مخفف کلمه عامل فعال سطحی[1] دانست. سورفکتانت‌ها معمولاً برای کاهش کشش سطحی بین جامد و مایع یا بین دو مایع استفاده می‌شوند. سورفکتانت یک مولکول هیدروکربنی با زنجیره بلند است که دارای انتهای آب‌دوست و آب‌گریز است. قسمت آب‌دوست اغلب به‌عنوان سر قطبی نامیده می‌شود و قسمت آب‌گریز، دم است. بخش آب‌گریز خطی است و دارای ۱۰ تا ۲۰ اتم کربن است. این قسمت می‌تواند آروماتیک، آلیفاتیک یا ترکیبی از هر دو باشد. طبقه‌بندی اولیه سورفکتانت‌ها براساس بار گروه آب‌دوست است و به‌عنوان کاتیونی، آنیونی، غیریونی و آمفوتریک طبقه‌بندی می‌شود. در شکل ۲ ساختار گروه‌های مختلف سورفکتانت نشان داده شده است.

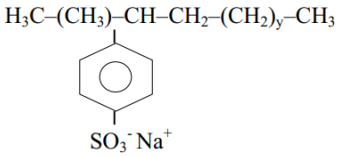
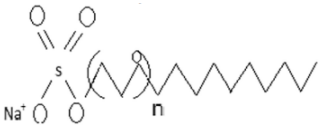
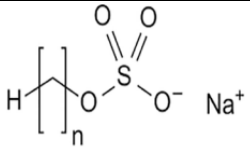
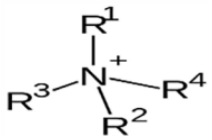
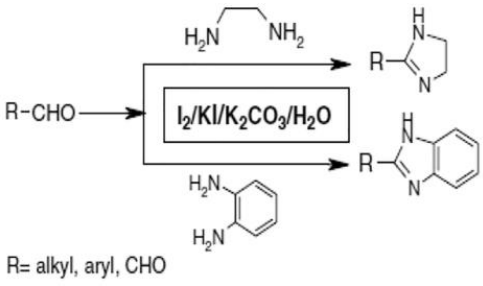
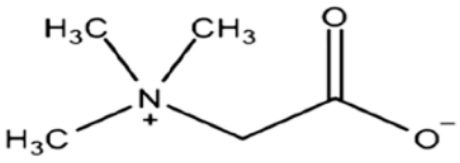
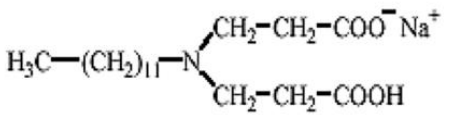


شکل ۲- ساختار گروه‌های مختلف سورفکتانت (فریدی‌زاد و عبداله‌زاده شرقی، ۱۳۹۹)

سورفکتانت‌های آنیونی که در بیشتر فرمول‌های شوینده استفاده می‌شوند، در حجم بیشتری نسبت به هر کلاس سورفکتانت دیگری استفاده می‌شوند. مهم‌ترین سورفکتانت‌های آنیونی مورد استفاده در شوینده‌ها و صابون‌ها، آلکیل بنزن سولفونات‌ها، آلکیل سولفات، آلکیل اتر سولفات، و آلکان سولفونات های ثانویه هستند. سورفکتانت‌های غیریونی به‌عنوان سورفکتانت‌هایی با اثر تحریک‌کنندگی کم شناخته شده‌اند که به‌طور گسترده در محصولات موضعی استفاده می‌شود. استفاده بیشتر از سورفکتانت‌های غیریونی در فرمولاسیون‌های شوینده تا حدی با شستشو در دمای پایین‌تر همراه است. مهم‌ترین سورفکتانت‌های غیریونی می‌توان به اتوکسیلات‌های الکلی، اتوکسیلات‌های آلکیل فنل، آلکانولامیدهای اسید چرب، اکسیدهای آلکیلامین و آلکیل پلی گلیکوزیدها اشاره نمود. سورفکتانت‌های کاتیونی در فرمولاسیون‌های شوینده معمولاً به‌عنوان نرم‌کننده پارچه در فرآیندهای شستشو استفاده می‌شوند. استفاده عمده از سورفکتانت‌های کاتیونی به تمایل آن‌ها به جذب در سطوحی مانند مواد معدنی، پلاستیک، فلزات و غشای سلولی بستگی دارد زیرا بیشتر سطوح دارای بار منفی هستند. در نهایت، سورفکتانت‌های آمفوتریک به‌عنوان گروهی از سورفکتانت‌ها با مزایایی هم‌چون خواص پوستی عالی و سوزش کم چشم مشخص می‌شوند. آن‌ها اغلب در محصولات آرایشی و شامپو استفاده می‌شوند. سورفکتانت‌های آمفوتریک دارای هر دو گروه آنیونی و کاتیونی در یک مولکول هستند. با وجود خواص شوینده عالی، این سورفکتانت‌ها به‌دلیل هزینه بالا به‌ندرت در شوینده های

لباسشویی استفاده می‌شوند. از مهم‌ترین نوع آمفوتریک‌ها می‌توان به آلکیل بتائین، آلکیلامیدوپروپیل بتائین، بتائین‌های مشتق شده از ایمیدازولین ها و آلکیلامفواستات‌ها اشاره نمود (Joseph et al., 2022). در جدول ۱ پرمصرف‌ترین انواع سورفکتانت‌ها و ساختار آن‌ها آورده شده‌است.

جدول ۱- پرمصرف‌ترین سورفکتانت‌های آنیونی، غیریونی، کاتیونی و آمفوتریک (Mousavi and Khodadoost, 2019)

نوع	ساختار	فرمول
سورفکتانت‌های آنیونی		
Alkyl benzene sulfonate		$C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$
Alcohol ethoxysulfates		$C_{12}H_{26}Na_2O_5S$
Sodium alkyl sulfate		$C_nH_{2n+1}OSO_2ONa$
Soap	—	RCOONa
سورفکتانت‌های کاتیونی		
Quaternary ammonium		—
سورفکتانت‌های غیریونی		
Ethoxylates alcohol		—
سورفکتانت‌های آمفوتریک		
Imidazolines		$C_3H_8N_2$
Betaines		$C_5H_{11}NO_2$
Alkyl imino dipropionate		—

۳- اثرات محیط‌زیستی سورفکتانت‌ها

بررسی اثرات نامطلوب مواد شوینده بر محیط‌زیست از نظر تصفیه فاضلابی که پس از مصارف صنعتی و خانگی به منابع آبی منتقل می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از اثرات اصلی آن کانی‌سازی جزئی سورفکتانت‌ها است که منجر به تشکیل کف شدید در رودخانه ها و نهرها می‌شود. وجود کف بیش از حد روی سطح آب، سرعت نفوذ اکسیژن از هوا به آب را کاهش می‌دهد، که به‌نوبه خود دسترسی اکسیژن محلول را برای موجودات آبزی کاهش می‌دهد. فسفات به‌عنوان یک از اجزای سازنده در مواد شوینده استفاده می‌شود و افزودن غلظت بیش از حد فسفات، باعث اتروفیکاسیون و رشد بیش از حد جلبک در آب می‌شود. علاوه‌بر این، اجزای شوینده‌ها پارامترهای فیزیکی و شیمیایی از جمله pH، دما، شوری و کدورت آب طبیعی را تغییر می‌دهند (Joseph et al., 2021).

وجود مواد شوینده در آب می‌تواند به‌طور مستقیم بر حیوانات آبزی تأثیر بگذارد. تجمع مواد شوینده در آب ممکن است بینایی ماهی‌ها را مختل کند و بر عملکرد آبشش آن‌ها تاثیر بگذارد. به‌علاوه فاضلاب آغشته به مواد شوینده با ورود به خاک، سبب آلودگی خاک، کاهش زیست‌توده خاک و خشک شدن ریشه گیاهان می‌شود. به‌طور کلی، سورفکتانت‌ها متعلق به ترکیباتی که مستقیماً به انسان و موجودات زنده در آب آسیب برساند، نیستند. با این‌حال، آن‌ها می‌توانند مواد سمی نامحلول در آب ایجاد کنند که در نهایت برای انسان و موجودات آبزی مضر خواهند بود. علاوه‌بر این، آب آلوده به غلظت بالایی از سورفکتانت می‌تواند باعث تحریک چشم و پوست شود. مصرف چنین آبی باعث مشکلات سلامتی از جمله اسهال و آسیب به کلیه می‌شود (Joseph et al., 2022). علاوه‌بر این ورود فاضلاب صنایع شوینده به تصفیه‌خانه‌ها باعث بروز اختلال شدید در فرایندهای تصفیه، به ویژه فرایندهای زیستی تصفیه می‌شود. وجود کف (بیشتر به دلیل وجود سورفکتانت‌های کاتیونی و آلکیل سولفونات‌ها) در حوضچه‌های هوادهی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب میزان انتقال اکسیژن به فاضلاب را به‌شدت تقلیل می‌دهد به‌طوری که گاهی کاهش راندمان تصفیه در اثر کف شوینده‌ها به ۸۰٪ می‌رسد. در حوضچه‌های ته‌نشینی اولیه وجود ماده مؤثر شوینده مانع ته‌نشینی کامل مواد معلق می‌شود و چربی موجود در فاضلاب در اثر کف زیاد به سایر قسمت‌های تصفیه‌خانه راه می‌یابد. هم‌چنین غشاء میکروارگانیسم‌ها در اثر شوینده‌ها پاره شده و موجب از بین رفتن آنزیم‌های آن‌ها می‌شود (Mousavi and Khodadoost, 2019).

۴- مشخصات فاضلاب حاوی مواد شوینده

به‌طور متوسط روزانه ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ لیتر فاضلاب حاوی مواد شوینده توسط بخش‌های مختلف خانگی و صنعتی تولید می‌شود. ویژگی‌های فاضلاب حاوی مواد شوینده به نوع، غلظت و مقدار مواد شیمیایی مورداستفاده بستگی دارد. به‌طور میانگین غلظت اکسیژن موردنیاز شیمیایی (COD)[۲] در این نوع فاضلاب‌ها در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. به‌علاوه این فاضلاب‌ها حاوی غلظت بالایی از سورفکتانت‌ها، فسفات‌ها، مواد جامد معلق، مواد آلی، پاتوژن‌ها و مواد مغذی نیز هستند. فاضلاب حاوی مواد شوینده به‌دلیل وجود مواد قلیایی و سورفکتانت‌ها به‌طور کلی دارای pH بالایی است (Joseph et al., 2021). به‌علاوه این فاضلاب‌ها به‌دلیل نسبت پایین اکسیژن موردنیاز زیستی[۳] به COD (۰/۰-۲/۱) همواره در دسته فاضلاب‌های تجزیه‌ناپذیر قرار می‌گیرند (Mousavi and Khodadoost, 2019). در جدول ۲ مشخصات فاضلاب حاوی مواد شوینده تولیدی از بخش‌های خانگی، صنعتی و بیمارستانی نشان داده شده‌است.

۵- فرآیندهای تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، فرآیندهای تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده به سه روش اصلی زیستی، فیزیکوشیمیایی، و ترکیبی از روش‌های زیستی و فیزیکوشیمیایی تقسیم می‌شود که در ادامه هرکدام توضیح داده می‌شود.

۵-۱- فرآیندهای فیزیکو شیمیایی

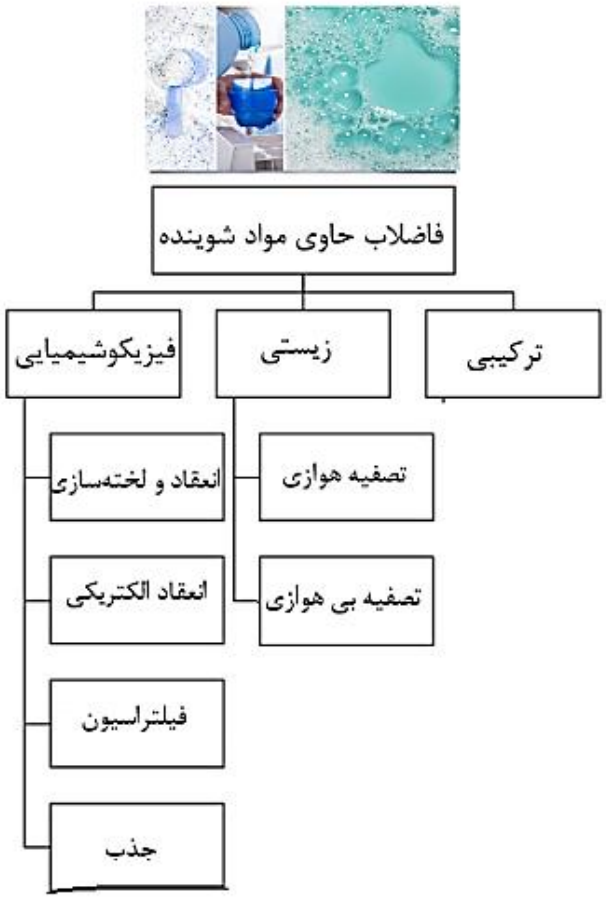
۵-۱-۱- فرآیند انعقاد و لخته‌سازی

استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی همواره برای تصفیه فاضلاب استفاده شده‌است. انعقاد غلبه بر فاکتورهای ایجادکننده پایداری (بار سطحی) است و مشخصات ناپایدار شدن به سیستم بستگی دارد. لخته‌سازی اتصال ذرات ناپایدار یا ذرات حاصل از انعقاد به هم و تشکیل لخته‌های بزرگتر است. لخته‌سازی سبب تسریع تشکیل فلاک می‌شود و مشخصات فلاک (ابعاد، قدرت و غیره) را با کنترل غلظت نهایی ذرات ناپایدار شده تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. انعقاد ذرات کلوئیدی به‌وسیله چهار مکانیزم؛ فشردگی لایه دوگانه (در مقادیر بسیار بالای غلظت منعقدساز)، جذب و

خنثی‌سازی بار (کمپلکس‌های تک‌هسته‌ای و چندهسته‌ای)، جذب و پل‌زدن بین ذرات (کمپلکس‌های چندهسته‌ای) و گیرافتادن در رسوب (با استفاده از منعقدساز اضافی یا فلوکه‌سازی جارویی) امکان‌پذیر است. اثر عوامل بالا باعث می‌شود که ذرات کلوئیدی مجاور که تا قبل از این به‌دلیل دافعه الکترواستاتیک و ساختار مولکول‌های آب اطرافشان جدا از هم مانده بودند، به‌هم نزدیک شوند و نیروهای واندروالس باعث به‌هم چسبیدن آن‌ها شوند.

جدول ۲- ویژگی فاضلاب حاوی مواد شوینده تولیدشده توسط بخش‌های خانگی، صنعتی و بیمارستانی (Joseph et al., 2021)

پارامتر	فاضلاب حاوی مواد شوینده از مصارف خانگی	فاضلاب حاوی مواد شوینده از مصارف صنعتی	فاضلاب حاوی مواد شوینده از مصارف بیمارستانی
pH	۱۰-۹/۳	۱۱-۹	۱۱/۶-۱۱/۴
هدایت الکتریکی (µS/cm)	۱۴۰۰-۱۹۰	۳۰۰۰-۶۴۰	۲۰۰۰-۸۰۸
کل جامدات محلول (mg/L)	۶۰۰۰-۴۰۰	۴۲۰	۸۰۰-۴۵۶
کل جامدات معلق (mg/L)	۹۸۷-۲۰۰	۷۰۰۰-۴	۷۱-۶۶
سختی کل (mg/L $CaCO_3$)	ــ	۴۴	۶۸-۵۳
قلیاییت کل (mg/L $CaCO_3$)	۲۰۰-۸۳	۱۲۸	۳۷۵-۳۰۲
کل جامدات آلی (mg/L)	۳۵-۸	۱۱۷۹۰-۱۷	۲۶-۲۵
فسفات (mg/L)	۲۷-۴	۳/۴۳	۱۶۷-۱۰/۸
BOD_5 (mg/L)	۱۲۰۰-۴۸	۹۸۱۰-۲۱۸	۵۰-۴۴
COD (mg/L)	۴۱۵۵-۳۷۵	۲۱۲۰۰۰-۸۰	۸۷۶-۴۷۷
کدورت (NTU)	۴۰۰-۱۴	۱۵۰-۴۰	۸۷/۹



شکل ۳- فرآیندهای مختلف تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده

بعد از ناپایدارسازی (انعقاد)، لخته‌سازی با افزودن لخته‌ساز مناسب درشت‌شدن فلاک‌ها را ارتقا می‌دهد (Bratby, 2016). منعقدکننده‌های معدنی مانند سولفات آلومینیوم یا نمک‌های آهن (سولفات آهن یا کلرید آهن) اولین موادی بودند که برای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرارگرفتند. با این‌حال این مواد برای استفاده گسترده دارای محدودیت‌هایی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به خورندگی کلرید آهن، رنج عملکرد محدود pH (۸/۵-۱۱) سولفات آهن و تولید محصولات جانبی خطرناک اشاره نمود. به‌همین سبب پیشنهاد شده‌است که برای بهبود کارایی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با منعقدکننده‌های معدنی، از ترکیب این فرآیند با فرآیند جذب استفاده شود. به‌طوری‌که در سایر مطالعات یافت شده‌است که استفاده از جاذب‌های کامپوزیتی مبتنی بر لیگاند در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی منجر به بهبود کارایی حذف یون‌های فلزی از فاضلاب حاوی مواد شوینده شده‌است. منعقدکننده‌های آلی طبیعی و سنتزی دسته‌ای دیگر از منعقدکننده‌های مورد استفاده هستند که با غلظت‌های کمتر، کارایی بالایی داشته و حجم کمتری از لجن تولید می‌کنند (Kumar et al., 2022).

پارامترهای متنوعی هم‌چون نوع منعقدکننده، غلظت منعقدکننده، ویژگی‌های آب خام، نوع اختلاط، سرعت اختلاط، سرعت ته‌نشینی، دما و pH کارایی این فرآیند را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن متداول‌ترین منعقدکننده‌های فلزی در تصفیه این نوع فاضلاب‌ها هستند. مهم‌ترین پارامتری که بر عملکرد منعقدکننده‌های فلزی تاثیرگذارند، pH است. در مطلوب‌ترین pH، حلالیت محصولات هیدرولیزشده ناچیز است و بخش اصلی منعقدکننده به فلاک تبدیل می‌شود. اگر pH بالاتر از حد بهینه باشد، گونه‌های آلومینیومی با بار منفی و گونه‌های آلومینیوم محلول با بار مثبت در pH پایین‌تری تشکیل می‌شوند. برای مقدار pH کمتر از ۳ یا بالاتر از ۱۱، پتانسیل بی‌ثباتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

به‌عنوان یک قاعده، تزریق ماده منعقدکننده تابعی از محتوای جامدات معلق یا محتوای آب است. با این وجود، عملکرد این فرآیند در یک تزریق بهینه رخ می‌دهد و پس از مصرف بیش از حد ماده منعقدکننده، کاهش می‌یابد. ذرات کلوئیدی با بار معکوس ناشی از مصرف بیش از حد ماده منعقدکننده منجر به تثبیت مجدد کلوئیدها می‌شود، لذا، کارایی فرآیند انعقاد را کاهش می‌دهد (Ren et al., 2022). در تحقیق Aygun and Yilmaz (2010) فرایند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده کلرید آهن به‌عنوان منعقدساز و مواد معدنی مونتموریلونیت و بنتونیت به‌عنوان لخته‌ساز برای تصفیه فاضلاب حاوی شوینده استفاده شد. به‌دلیل نسبت پایین BOD_5/COD تصفیه شیمیایی به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شد. شرایط بهینه با میزان منعقدساز گرم در لیتر ۲ در pH = ۱۱ با راندمان حذف COD ۷۱٪ به‌دست آمد. استفاده از لخته‌ساز در ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث بهبود حذف COD و رسیدن آن به مقدار ۸۴٪ شد. هم‌چنین با افزودن پلی‌الکترولیت آنیونی راندمان حذف COD افزایش بیشتری یافت و به ۸۷٪ رسید

عبداله‌زاده شرقی و همکاران (۱۳۹۷) تاثیر نوع و غلظت منعقدساز $FeCl_3$، PAC، Alum و ترکیب منعقدسازها با غلظت برابر (PAC+$FeCl_3$، Alum+$FeCl_3$ و PAC+Alum+$FeCl_3$)، نوع و غلظت لخته‌ساز (پلی‌الکترولیت آنیونی مگافلاک و کاتیونی زتافلاک)، غلظت آهک و هم‌چنین pH اولیه فاضلاب را در حذف CODو کدورت فاضلاب واقعی یک کارخانه تولید مواد شوینده بررسی کردند. بیشترین درصد حذف COD با استفاده از منعقدسازهای $FeCl_3$ (۱/۴٪±۷۲/۶) و PAC (۲/۱٪±۵۴/۵) در غلظت ۳۰۰۰ mg/L، لخته‌ساز آنیونی در غلظت ۲۰ mg/L و آهک در غلظت ۴۰۰۰ mg/L و pH = ۱۲ حاصل شد. آن‌ها هم‌چنین تاثیر منعقدسازهای $FeCl_3$، PAC، Alum و یک منعقدکننده ترکیبی (در غلظت‌های ۱۰۰۰ mg/L و ۳۰۰۰ mg/L) و سه لخته‌ساز کاتیونی، آنیونی و خنثی را روی حذف COD و کدورت و همچنین بر pH نهایی و کل مواد جامد محلول (TDS) پنج فاضلاب صنعتی کارخانه تولید مواد شوینده با منابع تولید مختلف و مخلوط آن‌ها مورد بررسی قراردادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که برای فاضلاب ترکیبی، استفاده از $FeCl_3$ با غلظت mg/L ۳۰۰۰ همراه با لخته‌ساز آنیونی بالاترین راندمان حذف COD (۰/۰٪±۸۰/۸) و راندمان حذف کدورت بالا را نشان می‌دهد، اما منجر به افزایش زیاد TDS و کاهش شدید pH (≤۲) پساب می‌شود. درنهایت، $FeCl_3$ با غلظت mg/L ۱۰۰۰ همراه با لخته‌آنیونی به عنوان شرایط بهینه درنظر گرفته‌شد (Abdollahzade Sharghi and Davarpanah, 2022).

۵-۱-۲- فرآیند انعقاد الکتریکی

یک راکتور انعقاد الکتریکی ساده از یک آند و یک کاتد تشکیل شده است. هنگامی که یک پتانسیل از یک منبع انرژی خارجی به راکتور اعمال می‌شود، در صفحات فلزی متصل به قطب مثبت جریان برق، واکنش‌های آند و در صفحات متصل به قطب منفی واکنش‌های کاتد رخ می‌دهد. در انعقاد الکتریکی واکنش‌هایی که در الکترودها صورت می‌گیرد منجر به اکسیدشدن فلز و تشکیل

یون هیدروکسید و گاز هیدروژن می‌شود (معادله‌های (۱) تا (۴)) (Zaleschi et al., 2013).

در الکترود آند:

$$Fe\ (s) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + 2e^{-} \quad (۱)$$

$$2H_2O\ (l) \rightarrow O_2\ (g) + 4H^{+}(aq) + 4e^{-} \quad (۲)$$

در الکترود کاتد:

$$2H_2O(l) + 2e^{-} \rightarrow H_2(g) + 2OH^{-}(aq) \quad (۳)$$

$$8H^{+}(aq) + 8e^{-} \rightarrow 4\ H_2\ (g) \quad (۴)$$

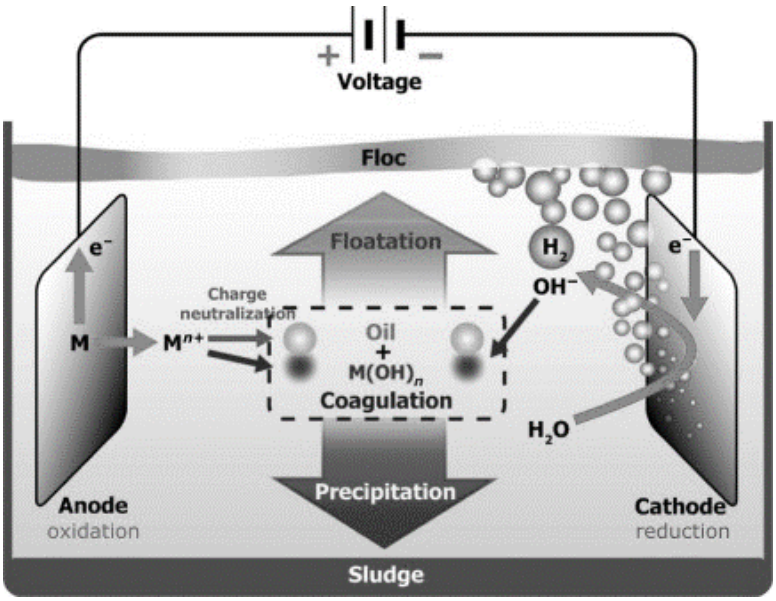
برای الکترود آهن، هیدروکسید آهن $Fe(OH)_2(s)$ و/یا $Fe(OH)_3(s)$ در جریان آبی به‌دلیل واکنش بین Fe^{2+} و Fe^{3+} با OH^- تشکیل می‌شود (معادله‌های (۵) و (۶)). این کمپلکس‌های فلزی با آلاینده‌های موجود در فاضلاب واکنش می‌دهند و باعث تشکیل لخته‌هایی می‌شوند که می‌توانند ذرات کلوئیدی را ناپایدار و متراکم کنند و/یا ترکیبات محلول را جذب کنند و رسوب دهند. اکسایش و کاهش برخی از آلاینده‌ها نیز ممکن است امکان‌پذیر باشد که منجر به رسوب آن به‌ترتیب در آند و کاتد می‌شود (Elabbas et al., 2016).

در محلول:

$$Fe^{2+}(aq) + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2(s) \quad (۵)$$

$$2Fe^{2+}(aq) + \frac{1}{2}O_2(g) + 5H_2O\ (l) \rightarrow 2Fe(OH)_3(s) + 4H^{+} \quad (۶)$$

شکل ۴ مکانیسم فرآیند انعقاد الکتریکی و جدول ۳ برخی از یافته‌های قابل‌توجه با استفاده از انعقاد الکتریکی برای تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده را ارائه می‌کند.



شکل ۴- مکانیسم عملکرد سیستم انعقاد الکتریکی (Soni et al., 2020)

جدول ۳- مطالعات انجام‌شده با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی در تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده

جنس مورد استفاده	مشخصات فاضلاب حاوی مواد شوینده	شرایط عملیاتی	درصد حذف (٪)	منبع
الکترود ذرات متحرک[۵]	COD = 334 mg/L	جریان = ۳۵۴/۳ میلی آمپر زمان واکنش = ۵۵ دقیقه pH = ۵/۴	COD = ٪۹۸/۵	Jung et al. (2015)
آهن	COD = 398 mg/L کدورت = 186 NTU	ولتاژ عملیاتی = ۳۰ ولت pH = ۳ زمان تصفیه = ۶۰ دقیقه	COD = ٪۸۷/۱	Vickers (2017)
آلومینیوم	COD = 4155 mg/L سورفکتانت = 463 mg/L کدورت = 245 NTU	ولتاژ عملیاتی = ۳۰ ولت pH = ۶-۸ زمان تصفیه = ۹۰ دقیقه	COD = ٪۹۳/۲ سورفکتانت = ٪۹۳/۵ کدورت = ٪۹۵	Janpoor et al. (2011)

۵-۱-۳- فرآیند فیلتراسیون

در فرآیند فیلتراسیون غشایی، مواد آلاینده به‌وسیله اختلاف فشار یا اختلاف غلظت از غشا عبور کرده و به این‌ترتیب جداسازی ممکن می‌شود. فرآیندهای فیلتراسیون غشایی تحت‌فشار عمدتاً شامل میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس است (Zhang et al., 2020). سورفکتانت‌ها در شرایطی که نمی‌توانند به سطح مایع بیایند، در داخل مایع هسته‌هایی تشکیل می‌دهند که سر آن‌ها در تماس با آب و دم آن‌ها دور از آب باشد. این هسته‌های تشکیل‌شده مایسل نام دارد (فریدی‌زاد و عبداله‌زاده شرقی، ۱۳۹۹). در داخل یک محلول آبی، محدوده میسل‌های کروی تولید شده می‌تواند بین ۲-۲۰ نانومتر باشد، در نتیجه، در این حالت انتخاب غشاهای میکروفیلتراسیون گزینه مناسبی است. در شرایطی که محدوده مایسل‌های تولیدشده کمتر از محدوده فوق‌الذکر باشد، استفاده از غشاهای میکرواولترافیلتراسیون مفید نبوده و باید از غشاهای نانوفیلتراسیون استفاده نمود. در جدول ۴ مطالعات صورت‌گرفته در زمینه تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده با استفاده از فرآیند فیلتراسیون آورده شده است.

جدول ۴- تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده با استفاده از فرآیند فیلتراسیون

فیلتر مورد استفاده	شرایط عملیاتی	مشخصات فاضلاب	درصد حذف	منبع
نانوفیلتراسیون	دما=۴۰ درجه سانتیگراد pH = ۷ فشار = ۳/۵ بار	COD = ۱۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	COD = ٪۹۳	Tecchio et al. (2017)
میکروفیلتراسیون	۱ بار	TSS = ۲۴۰ میلی‌گرم بر لیتر COD = ۲۵۳۸ میلی‌گرم بر لیتر BOD = ۱۱۹۰ میلی‌گرم بر لیتر	TSS = ٪۹۸/۷ COD = ٪۹۰/۸ BOD = ٪۹۳/۹	Tecchio et al. (2017)
اولترافیلتراسیون	دما = ۴۵ درجه سانتیگراد pH = ۱۰/۹ فشار = ۲/۵ بار	COD = ۳۶۰ میلی‌گرم بر لیتر	COD = ٪۹۰	Ashfaq et al. (2017)

با وجود مزایای فوق‌الذکر، چالش اصلی این فرآیند مربوط به گرفتگی غشا است که منجر به کاهش فلاکس خروجی، کاهش نفوذ پذیری غشا، افزایش فشار انتقالی غشا و در نهایت کاهش طول عمر و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. گرفتگی غشا بزرگترین چالش در استفاده گسترده از فرآیند غشایی است که حاصل تعامل فیزیکی و شیمیایی بین غشا و اجزای مخلوط مایع است. گرفتگی به‌دلیل اتصال نامطلوب بین رسوب ذرات معلق، میکروارگانیسم‌ها و کلوئیدها در فرآیندغشایی روی سطح غشا و/یا درون منافذ غشا رخ می‌دهد. گرفتگی غشاء منجر به کاهش نفوذپذیری غشاء در طی فیلتراسیون و در نتیجه افزایش مقاومت آن در برابر جریان و افزایش هزینه‌های عملیاتی به‌دلیل استراتژی‌های کنترل گرفتگی از قبیل هوادهی و استفاده از مواد شیمیایی برای شست‌وشوی غشا می‌شود (Faridizad et al., 2022).

پیشرفت‌های اخیر به‌منظور افزایش راندمان تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده با استفاده از فرآیند غشایی، در زمینه ساخت غشا بوده‌است. به‌منظور حل مشکل نفوذپذیری و پایداری غشا در طول تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده، بسیاری از محققان استفاده از غشاهای سرامیکی را پیشنهاد کرده‌اند. غشاهای سرامیکی پایداری شیمیایی و حرارتی بالاتر، یکپارچگی ساختاری عالی و تمایل به گرفتگی کم‌تر دارند و می‌توانند به‌طور موثر برای تصفیه فاضلاب صنایع شوینده حاوی غلظت‌های نسبتاً بالای سورفکتانت استفاده شوند (Kim and Park, 2021).

۵-۱-۴- فرآیند جذب سطحی

در حالت کلی، جذب سطحی روش جمع‌آوری مواد قابل‌حلی است که در یک سطح مشترک مناسب، به‌صورت محلول قراردارند. این سطح مشترک می‌تواند بین مایع و یک گاز، یک جامد یا مایع دیگر باشد. معمول‌ترین ماده جاذب مورد استفاده، کربن فعال است. کربن فعال بدلیل قابلیت جذب فراوان و قابلیت احیا نمودن مجدد، ازنظر اقتصادی روش خوبی به‌شمار می‌رود و از مواد گوناگونی که محتوی چوب، لیگنیت، ذغال بیتومینوس و باقیمانده‌های نفتی باشند، ساخته می‌شود. معمولا طبقه‌بندی کربن فعال به دو صورت پودر و دانه است. کربن‌های گرانولی از مواد آلی ذغال بیتومینوس یا لیگنیت ساخته می‌شوند که برای تصفیه فاضلاب در حد وسیعی بکار برده می‌شوند. مواد آلی محلول و کلوئیدی مانند سورفکتانت‌های سخت را می‌توان از طریق کربن فعال پودر شده یا گرانوله حذف کرد. مواد مقاوم به تجزیه زیستی

که به سختی به‌وسیله روش‌های تصفیه زیستی معمول حذف می‌شوند، اغلب به‌وسیله فرایند جذب با کربن فعال طی چندین مرحله حذف می‌شوند (Merrettig-Bruns and Jelen, 2009). این روش به عنوان یک تکنیک کارآمد و مقرون به‌صرفه درنظر گرفته شده است که می‌تواند آلاینده‌ها را از فاضلاب حذف کند. با این‌حال، چندین پارامتر مانند pH، غلظت اولیه آلاینده، سرعت هم‌زدن، قدرت یونی، زمان تماس، مقدار جاذب، یون‌های هم‌جوار و دما بر کارایی و عملکرد جاذب‌ها تأثیر می‌گذارد.

۵-۲- فرآیند تصفیه زیستی

۵-۲-۱- فرآیند تصفیه زیستی هوازی

در فرآیند تصفیه زیستی به‌روش هوازی از فرآیندهای مختلفی مانند راکتورهای زیستی و یا فیلترهای چکنده استفاده می‌شود. Bering et al. (2018) طی چهار ماه تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده با استفاده از یک بیوراکتور بستر متحرک هوازی دو مرحله‌ای[۶] را بررسی کردند. نتایج این تحقیق حاکی از عملکرد بسیار مناسب سیستم بود به‌طوری که ۸۹-۹۴٪ COD، ۹۵-۹۸٪ BOD_5 و ۸۵-۹۶٪ سورفکتانت‌ها حذف شد. با این‌حال افزودنی‌هایی مانند نرم‌کننده‌ها، افزودنی‌های ضدباکتری، محصولات سفیدکننده، و رایحه در مواد شوینده می‌توانند کارایی میکروبی برای تصفیه زیستی را محدود کنند (Khandare and Govindwar, 2015).

Pirsaheb et al. (2014) با بررسی کارایی سیستم لجن فعال با هوادهی گسترده در حذف سورفکتانت‌های آنیونی فاضلاب شهری با میانگین غلظت اولیه آلکیل بنزن سولفونات ۳-۲۱ میلی‌گرم بر لیتر به این نتیجه رسیدند که راندمان حذف این مواد در فصول گرم و سرد به ترتیب برابر با ۹۴/۱٪ و ۹۴/۲٪ و راندمان حذف COD برابر با ۸۹/۱٪ و ۹۱/۱٪ بود. Katam et al. (2018) با مقایسه تجزیه هوازی تعدادی از سورفکتانت‌های رایج در کشورهای آسیایی به این نتیجه رسیدند که میزان زیست‌تخریب‌پذیری این مواد به‌طور گسترده‌ای بین شوینده‌های متفاوت تغییر می‌کند که به‌دلیل ترکیب شیمیایی متفاوت آن‌ها است. برخی شوینده‌های هندی و ژاپنی مقادیر بالای حذف آلکیل بنزن سولفونات را در طول تجزیه هوازی نشان دادند. در مقابل برخی شوینده‌های اندونزیایی، مقدار کمی تجزیه هوازی آلکیل بنزن سولفونات را در طول فرایند نشان دادند. زیست تخریب‌پذیری شوینده‌ها فرایندی پیچیده است و مقدار آن به‌حضور سایر عناصر در شوینده بستگی دارد.

۵-۲-۲- فرآیند تصفیه زیستی بی‌هوازی

بیشتر سورفکتانت‌ها تحت شرایط هوازی، تجزیه می‌شوند اما برخی از آن‌ها هم برای تجزیه شدن نیاز به شرایط بی‌هوازی دارند. در صورت وجود مقادیر بالایی از این مواد، باید از شرایط بی‌هوازی برای تصفیه آن بهره‌گرفت. برخلاف فرایندهای هوازی تجزیه که مواد آلی توسط یک نوع میکروارگانیسم تثبیت می‌شوند، تجزیه بی‌هوازی همیشه به وجود و عملکرد هم‌زمان چندین نوع میکروارگانیسم نیاز دارد (Merrettig-Bruns and Jelen, 2009).

تجزیه زیستی سورفکتانت‌ها به مراحل زیر تقسیم می‌شود:

- تجزیه زیستی اولیه: توسط تغییر ساختاری (انتقال) سورفکتانت توسط میکروارگانیسم‌ها که با از بین بردن مواد ایجاد کننده بار سطحی، باعث از بین رفتن خاصیت فعال بودن سطحی آن‌ها می‌شود.
- تجزیه زیستی نهایی: با استفاده کامل سورفکتانت توسط میکروارگانیسم و تبدیل آن به فراورده پایانی غیرآلی مانند کربن‌دی‌اکسید، آب، نمک‌های معدنی، عناصر حاضر و سلول‌های میکروبی جدید رخ می‌دهد.

در مرحله اول هضم بی‌هوازی ترکیبات آلی پلیمری یا پیچیده توسط باکتری‌های تخمیرکننده مصرف می‌شوند. محصولات حاصل از هیدرولیز و اسیدی‌سازی به مواد با وزن مولکولی پایین‌تر مانند الکل‌ها و اسیدهای چرب کوتاه زنجیر تبدیل می‌شوند. در ادامه باکتری‌های استوژنز محصولات حاصل از تخمیر را به‌عنوان سوبسترا مصرف کرده و آن‌ها را به استات، کربن‌دی‌اکسید و هیدروژن مولکولی تبدیل می‌کنند. در انتهای زنجیره غذایی، باکتری‌های متان‌زا از استیک اسید، کربن‌دی‌اکسید و هیدروژن برای تولید مخلوط بیوگاز (بیوگاز و کربن‌دی‌اکسید) استفاده می‌کنند و کربنات می‌تواند به‌عنوان پذیرنده هیدروژن عمل کند. باکتری‌های متان‌زا به‌دلیل سرعت رشد کم به‌عنوان نقطه‌ضعف این فرایند شناخته می‌شوند. این باکتری‌ها در برابر pH اسیدی به شدت حساس هستند و محدوده pH مناسب برای آن‌ها ۷-۸ است. درصورت وجود مقادیر قابل‌توجهی از نیترات و سولفات، ممکن است فرایندهای دنیتریفیکاسیون و کاهش سولفات نیز رخ دهد. صابون‌ها شامل نمک‌های سدیم/ کلسیم/ منیزیم اسیدهای چرب طبیعی هستند و حتی در غلظت‌های بالا (تا ۱۰۰۰ mg/L) در شرایط بی‌هوازی به‌خوبی تجزیه می‌شوند. صابون‌هایی با C_{12}-C_{22} زنجیره آلکیل به‌عنوان انواع تخریب‌پذیر در شرایط بیهوازی طبقه‌بندی می‌شوند. برخی سورفکتانت‌ها مانند نوع آنیونی آن‌ها در شرایط هوازی به‌خوبی تجزیه می‌شوند. هیچ‌کدام از انواع سولفونات‌ها تحت‌شرایط بی‌هوازی به‌صورت کامل تجزیه

نمی‌شوند، ولی درصورت وجود محدود اکسیژن، این مواد تجزیه‌پذیری بالایی دارند. تجزیه زیستی سولفونات توسط میکروارگانیسم‌های هوازی و میکروائروفیلی آغاز می‌شود و متابولیت آن‌ها به‌صورت بیهوازی تجزیه می‌شود. در محیط‌های بی‌هوازی واقعی مانند هاضم‌های بی‌هوازی، سولفونات‌ها به‌میزان قابل‌توجهی تجزیه نمی‌شوند (Merrettig-Bruns and Jelen, 2009).

۵-۳- فرآیندهای ترکیبی

۵-۳-۱- ترکیب فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی

به‌سبب پیچیدگی فاضلاب‌های حاوی مواد شوینده، یک فرآیند به تنهایی نمی‌تواند کیفیت پساب فاضلاب تصفیه‌شده را به محدودیت‌های محیط‌زیستی برساند. Palmarin et al. (2020) طی پژوهشی عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی/الکتروفلوتاسیون را به‌طور متوالی در آزمایشگاه و در مقیاس بزرگ برای تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده بررسی کردند و دریافتند که کدورت را می‌توان ۹۸ درصد تحت بهترین شرایط عملیاتی حذف کرد. Noutsopoulos et al. (2018) ترکیب سه فرآیند انعقاد، فیلتراسیون و جذب با استفاده از کربن فعال را برای حذف سورفکتانت مطالعه کردند و دریافتند که این روش منجر به حذف ۸۵٪ COD شد که با استانداردهای نظارتی در یونان برای استفاده شهری، آبیاری مزارع کشاورزی و شستشوی توالت مطابقت داشت. تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت با ترکیب فرآیند انعقاد همراه با فرآیندهای دیگر مانند فلوتاسیون، فیلتراسیون غشایی، جذب و لخته‌سازی منجر به راندمان بالای حذف مواد آلی و سورفکتانت‌ها می‌شود. با این‌حال، فرآیند تصفیه شیمیایی اغلب منجر به تولید محصولات جانبی خطرناک می‌شود که هزینه‌های پس از تصفیه را افزایش می‌دهد (Costa et al., 2018).

۵-۳-۲- ترکیب روش‌های زیستی- فیزیکی-شیمیایی

متداول‌ترین نمونه از تصفیه فیزیکی-زیستی، بیوراکتور غشایی (MBR)[۷] است. MBR مزایای بسیاری دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به کیفیت بالای پساب خروجی، کنترل کامل بر شرایط عملیاتی و فضای مورد نیاز کم اشاره کرد (Faridizad et al., 2022). با این‌حال گرفتگی غشا اصلی‌ترین چالش استفاده از این سیستم‌ها در مقیاس گسترده است. گرفتگی غشا به سه زیرشاخه گرفتگی قابل‌حذف، غیرقابل حذف و برگشت‌ناپذیر تقسیم می‌شود. گرفتگی قابل‌حذف یا برگشت‌پذیر به‌دلیل اتصال مواد به سطح غشا و تشکیل لایه کیک ایجاد می‌شود. از این گرفتگی می‌توان با کاهش فلاکس یا افزایش سرعت جریان متقاطع جلوگیری کرد. هم‌چنین می‌تواند به‌وسیله شست و شوی فیزیکی حذف و یا توسط شست‌وشوی معکوس یا استراحت کاهش یابد. جذب مواد محلول و کلوئیدی که باعث مسدود شدن حفرات می‌شود، منجر به گرفتگی غیرقابل حذف شده، که با استفاده از مواد شیمیایی قابل برطرف‌شدن هستند. گرفتگی برگشت‌ناپذیر، ناشی از جذب مواد پروتئینی و هیومیک اسید است که نمی‌توانند با استراتژی‌های فیزیکی و یا شیمیایی حذف شوند و منجر به کاهش قابل‌توجهی در بهره‌وری غشا و در نتیجه نیاز به جایگزینی غشا می‌شود. (Meng et al., 2009).

۶- نوین‌ترین فرآیندهای مورد استفاده در تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت

روش‌های فوق الذکر همگی با مشکلات عمده‌ای مواجه هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به هزینه سرمایه‌گذاری بالا و تولید ضایعات ثانویه و عدم تجزیه کامل آلاینده‌ها اشاره نمود. به‌همین سبب در سراسر جهان تمایل زیادی به ابداع فناوری‌های جدید برای تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده به وجود آمده است. فرآیندهای اکسایش پیشرفته جایگزین‌های ارجح برای فن‌آوری‌های متداول تصفیه فاضلاب هستند. اصل اساسی این فرآیندها تولید رادیکال آزاد هیدروکسیل به‌عنوان یک اکسیدکننده قوی برای تجزیه ترکیبات آلی است، زیرا رادیکال آزاد هیدروکسیل یک اکسیدکننده شیمیایی غیر انتخابی است که باعث حذف کامل آلاینده‌های آلی می‌شود. رادیکال‌های هیدروکسیل الکتروفیل‌های واکنشی هستند که می‌توانند بلافاصله و به‌طور غیرانتخابی با تقریباً تمام ترکیبات آلی که غنی از الکترون هستند، واکنش نشان دهند. فوتوکاتالیز، اکسایش پلاسما و ازن‌زنی، متداول ترین تکنیک‌های مورد استفاده در این فرآیند هستند (Joseph et al., 2022). در جدول ۵ مزایا و معایب روش‌های مختلف فرآیند اکسایش پیشرفته ذکر شده‌است.

۷- بررسی اقتصادی تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده

فرآیندهای متداول تصفیه فاضلاب فاضلاب حاوی مواد شوینده شامل روش‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی است. با توجه به هزینه‌های عملیاتی بالای فرآیندهای فوق، بررسی روش مقرون به‌صرفه و کارآمد ضروری است (Kumar et al., 2022). در این بخش عواملی که برای صرفه‌جویی در فرآیندهای تصفیه باید درنظر گرفته شوند بررسی می‌شود.

جدول ۵- مزایا و معایب روش‌های مختلف فرآیند اکسایش پیشرفته (Joseph et al., 2022)

روش	مزایا	معایب
TiO_2/UV	کاتالیزورها قابل بازیافت هستند عملکرد در تابش خورشیدی و در طول موج‌های بالاتر بهتر است	نیاز به کاتالیزور بهینه‌سازی غلظت کاتالیست نیاز به مطالعه عمیق دارد
Fenton's Reaction	توانایی تجزیه رنگ‌های محلول و نامحلول از پساب‌های صنعتی	تشکیل لجن آهن نیاز به حفظ pH در محدوده اسیدی هزینه‌های عملیاتی بالا
H_2O_2/O_3	تشکیل رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل بسیار واکنش‌پذیر و غیرانتخابی که می‌تواند پیوند دوگانه مزدوج را تجزیه کند ازن می‌تواند در حالت گازی و بدون تغییر در حجم زیاد فاضلاب استفاده شود تولید لجن بسیار کم است	تولید رادیکال‌های هیدروکسیل کمتر نسبت به سایر روش‌ها سرعت تجزیه کند است ازن می‌تواند محصولات جانبی مضر ایجاد کند هزینه بالا
O_3/UV	در مقایسه با ازن یا UV که به تنهایی استفاده می‌شود کارآمدتر است به‌عنوان ضدعفونی‌کننده استفاده می‌شود راندمان بهتر برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل نسبت به روش H_2O_2/UV	کدورت ممکن است مانع از ورود نور UV به محلول شود جذب اشعه ماوراء بنفش ممکن است با وجود ترکیبات مشابه نیترات تداخل داشته باشد به انرژی بیشتر و هزینه عملیاتی بالا نیاز دارد
H_2O_2/UV	راندمان بالا	کدورت مانع تابش نور UV به محلول می‌شود جذب نور با وجود ترکیبات شبیه نیترات مانع می‌شود

۷-۱- انرژی مصرفی

مصرف برق تصفیه‌خانه‌های فاضلاب فعلی بین ۲۰ تا ۴۵ کیلووات ساعت معادل جمعیت در سال متغیر است. به‌طور کلی هزینه برق مصرفی ۶۰ درصد هزینه سرمایه‌ای تصفیه‌خانه‌ها است (Faridizad et al., 2022). مصرف انرژی تا حد زیادی به نوع فناوری تصفیه مورد استفاده بستگی دارد. فرآیندهایی غشایی نانوفیلتراسیون و اسمزمعکوس مصرف انرژی بالایی دارند درحالی‌که فرآیندهایی مانند جذب سطحی با استفاده از کربن فعال گرانوله و بیوراکتورهای غشایی مصرف انرژی کمتری دارند (Nicolaidis and Vyrides, 2014).

۷-۲- هزینه‌های سرمایه‌گذاری

هزینه سرمایه‌ای تصفیه‌خانه فاضلاب حاوی مواد شوینده در ۱۵ سال گذشته به‌دلیل افزایش نرخ بازیافت فاضلاب افزایش یافته‌است. هزینه سرمایه‌گذاری یکی از اصلی‌ترین و بزرگترین هزینه‌های مرتبط با فرآیند تصفیه حاوی سورفکتانت است. هزینه سرمایه‌گذاری برای فرآیندهای جذب سطحی، نانوفیلتراسیون، نانوفیلتراسیون همراه با اسمز معکوس و سیستم MBR به‌ترتیب ۲۱، ۴۷، ۲۷ و ۹۵ درصد است. لذا هزینه سرمایه‌گذاری سیستم‌های MBR بیشتر از سایر فرآیندها است (Nicolaidis and Vyrides, 2014).

۷-۳- هزینه تعمیرات و نگهداری

هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری شامل هزینه‌های مواد (تهیه شیمیایی برای بهره‌برداری و نگهداری)، نیروی کار و برق برای تصفیه فاضلاب است. سازمان بهداشت جهانی[8] هزینه تعمیرات و نگهداری را سالانه ۸۰۷ میلیون دلار در سال ۲۰۰۷ گزارش کرد (WHO, 2003). بیشترین سهم در این هزینه‌ها مربوط به هزینه‌های نیروی کار بود، درحالی‌که هزینه‌های مواد و انرژی به‌ترتیب ۱۹۸ و ۱۹۹ میلیون دلار بود. هزینه‌های تکمیلی اضافی نیز ۱۰۸ میلیون دلار تخمین زده شد (WHO, 2003). فرآیند تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت مانند MBR و نانوفیلتراسیون همراه با اسمز معکوس به هزینه تعمیرات و نگهداری کمتر نیاز دارد، درحالی‌که فرآیند نانوفیلتراسیون و جذب سطحی به هزینه تعمیرات و نگهداری بیشتری نیاز دارد (Nicolaidis and Vyrides al., 2014).

۸- چالش‌ها و دیدگاه آینده

انعقاد شیمیایی یکی از روش‌های متداول تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت است. با این‌حال، هزینه بالای مواد شیمیایی، اثرات نامطلوب محیط‌زیستی و تولید حجم زیادی از لجن، از مهم‌ترین چالش‌های این فرآیند است. منعقدکننده‌های زیستی می‌توانند بخشی از این چالش‌ها را برطرف نموده و به‌عنوان جایگزینی برای لخته‌های شیمیایی عمل کنند. برای تولید لخته‌های مقرون به‌صرفه باید تحقیقات گسترده‌ای انجام شود (Nath et al., 2021). انعقاد الکتریکی یک جایگزین برای فرآیند انعقاد شیمیایی است و دارای چندین مزیت شامل؛ فرآیند آسان و مقرون به‌صرفه،

سازگار با محیط‌زیست، انعطاف‌پذیری و قابلیت حذف هم‌زمان انواع مختلف آلاینده‌ها است. با این حال، مصرف زیاد انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری بالا از جمله چالش‌های این فرآیند است. لذا انجام مطالعات تحقیقاتی بیشتر برای دستیابی به عملکرد بالا در این فرآیند از طریق مدل‌سازی آماری و دینامیک سیالات محاسباتی بسیار لازم و حیاتی است (Shahedi et al., 2020).

روش فیلتراسیون غشایی معمولاً برای تصفیه فاضلاب حاوی مواد شوینده استفاده می‌شود. چالش عمده در فیلتراسیون غشا، گرفتگی غشایی است، که زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات روی سطح و/یا درون منافذ غشا انباشته می‌شوند، که نیاز به شستشوی مکرر برای برقراری مجدد شار نفوذی دارد و انرژی بیشتری در فشارهای بالا مصرف می‌کند. فیلتراسیون غشایی قادر به حذف سورفکتانت‌ها از فاضلاب مطابق با محدودیت های موردنظر نیست. لذا برای حل مشکلات فوق، راه‌حل‌هایی مانند تکنیک‌های پیش‌تصفیه و اصلاحات سطح غشا می‌توانند مورد استفاده قرارگیرد (Kim and Park, 2021). روش جذب برای تصفیه این نوع فاضلاب به‌عنوان یک تکنیک کارآمد و مقرون به‌صرفه درنظر گرفته می‌شود. با این‌حال، هزینه بالای جاذب‌های تجاری و هزینه بازیابی بالا از معایب عمده این فناوری است. جاذب‌های ارزان قیمت باید از ضایعات کشاورزی تولید و در مقیاس آزمایشگاهی آزمایش شوند (Crini et al., 2019).

فرآیندهای ترکیبی زیستی و فیزیکی-شیمیایی می‌توانند برای تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت استفاده شوند. MBR یک روش ترکیبی است که قادر به تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت با حذف زیاد آلاینده‌ها است. با این‌حال، هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه انرژی بالایی دارد. هم‌چنین به‌دلیل گرفتگی غشا، هزینه عملیاتی بالایی برای شستشوی مکرر و تعویض غشا نیز دارد. مراحل پیش‌تصفیه اضافی مانند فلوتاسیون، فیلتراسیون غشایی، جذب سطحی، و/یا لخته‌سازی رایج‌ترین روش برای حذف انتخابی آلاینده‌های مضر برای واحد MBR و کاهش گرفتگی هستند (Faridizad et al., 2022). بنابراین برای توسعه فرآیندهای تصفیه فاضلاب حاوی سورفکتانت که مقرون به‌صرفه، محیط‌زیستی و قابل‌قبول برای جامعه هستند و می‌توانند محدودیت‌های مجاز برای استفاده مجدد از آب را برآورده کنند، به تحقیقات فشرده نیاز است.

۹- نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت و صنعتی‌شدن شهرها منجر به تولید مقدار زیادی فاضلاب حاوی موادشوینده شده‌است. در کنار تولید انبوه این محصولات، کنترل بهینه فاضلاب و پسماند حاصل از تولید حائز اهمیت است. افزایش مصرف شوینده‌ها به‌نوبه خود مشکلاتی را در زمینه محیط‌زیست و آلودگی منابع آبی به‌وجود آورده‌اند. مدیریت صحیح این نوع فاضلاب‌ها می‌تواند مفهومی از اقتصاد چرخشی ایجاد کند که در نتیجه، آب بازیافتی برای بسیاری از اهداف مفید مانند آبیاری، ساخت و ساز و مصارف شست و شو تولید می‌شود. نظر به تنوع مواد به‌کار گرفته شده در این صنعت، ویژگی‌های فاضلاب می‌تواند در شرایط مختلف متفاوت باشد و برای این منظور انو اع مختلفی از فرآیندهای فیزیکوشیمیایی، زیستی و ترکیبی همچون بیوراکتورهای غشایی، فرآیندهای اکسایش پیشرفته، فرآیندهای جذب و فیلتراسیون استفاده شده است. استفاده از تکنولوژی مناسب تصفیه می‌تواند وابستگی به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را کاهش داد. در مورد این موضوع، بدیهی است که تحقیقات بیشتری به‌ویژه در خصوص امکان ادغام یک یا چند تکنیک برای دستیابی به نتایج بهتر، موردنیاز است، تحقیقات در این زمینه باید بیشتر مسئله محور باشد و از محصولات طبیعی و محلی استفاده شود. به‌عبارت دیگر، تحقیقات محلی‌تر برای حل مسائل مورد نیاز است تا راه‌حل‌ها قابل دوام، اقتصادی، سازگار با محیط‌زیست و قابل‌قبول برای عموم باشد.

۱۰- قدردانی

این طرح مطالعاتی با پشتیبانی مالی شرکت گروه صنعتی پاکشو (گرنت شماره ۲۷۵۹۱۹۹۰۱) و اعتبارات ویژه پژوهشی پژوهشگاه مواد و انرژی (گرنت شماره ۱۴۰۲۶۰۵۴) انجام شد.

۱۱- پی‌نوشت‌ها

1- Surface-active agent
2- Chemical Oxygen Demand (COD)
3- Biological Ixygen Demand (BOD)
4- Ammonium Nonylphenol Polyoxyethylene ether Sulfate (NPSA)
5- GAC (Moving Particle Electrode)
6- Two-stage aerobic Moving Med Bioreactor (MBBR)
7- Membrane bioreactor (MBR)
8- World Health Organization (WHO)

۱۲- مراجع

عبداله‌زاده شرقی، ا.، یادگاری، ف.، و داورپناه، ل.، (۱۳۹۷)

"مشخصه‌یابی و بررسی تصفیه‌پذیری فاضلاب صنایع شوینده با استفاده از روش‌های شیمیایی و زیستی"، *دومین کنگره سالیانه شیمی، مهندسی شیمی و نانوفناوری با رویکرد از پژوهش تا توسعه ملی*، دانشگاه تهران، تهران.

فریدی‌زاد، غ.، و عبداله‌زاده شرقی، ا. (۱۳۹۹) "مروری بر سورفکتانت‌های زیستی: مشخصه‌سازی و کاربردها"، *مهندسی شیمی ایران*، ۱۹(۱۰۹)، ۲۶-۶.

Abdollahzadeh Sharghi, E., and Davarpanah, L., (2022), "Optimization of chemical coagulation–flocculation process of detergent manufacturing plant wastewater treatment for full scale applications: a case study", Desalination and Water Treatment, 262(4), 38-53, https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28494.

Ashfaq, M., Wang, T., Qiblawey, H., Reesh, I.A., and Judd, S, (2017), "Recycling of hospital laundry wastewater using membrane technology", *Desalination and Water Treatment*, 60(5), 122-128, https://doi.org/10.5004/dwt.2017.0596.

Aygun, A., and Yilmaz, T., (2010), "Improvement of coagulation-flocculation process for treatment of detergent wastewaters using coagulant aids", *International Journal*, 1(2), 97-101, https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3630.9600.

Bering, S., Mazur, J., Tarnowski, K., Janus, M., Mozia, S., and Morawski, A.W., (2018), "The application of moving bed bio-reactor (MBBR) in commercial laundry wastewater treatment". *Science of the Total Environment*, 627(5), 1638-1643, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.029.

Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. IWA publishing.

Costa, A.F.S., Albuquerque, C.D.C., Salgueiro, A.A., and Sarubbo, L.A., (2018), "Color removal from industrial dyeing and laundry effluent by microbial consortium and coagulant agents", *Process Safety and Environmental Protection*, 118(8), 203-210, https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.001.

Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L.D., and Morin, N., (2019), "Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment", *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 195-213, https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8.

Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Perdicakis, M., Pontvianne, S., Pons, M.N., Lapicque, F., and Leclerc, J.P., (2016), "Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: influence of the quality of aluminium used for the electrode", *Journal of Hazardous Materials*, 319(1), 69-77, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.067.

Faridizad, G., Abdollahzadeh Sharghi, E., and Bonakdarpour, B., (2022), The use of membrane bioreactors in high rate activated sludge processes: How and why sludge retention time affects membrane fouling", *Journal of Water Process Engineering*, 47(6), 102-111, https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102807.

Janpoor, F., Torabian, A., and Khatibikamal, V., (2011), "Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86(8), 1113-1120, https://doi.org/10.1002/jctb.2625.

Joseph, C.G., Farm, Y.Y., Taufiq, Y.H., Pang, C.K., Nga, J.L., and Puma, G.L., (2021), "Ozonation treatment processes for the remediation of detergent wastewater: A comprehensive review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106-114, https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106099.

Joseph, C.G., Taufiq, Y H., Affandi, N.A., Nga, J.L.H., and Vijayan, V., (2022), "Photocatalytic treatment of detergent-contaminated wastewater: A short review on current progress", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39(3), 484-498, https://doi.org/10.1007/s11814-021-0964-4.

Jung, K.W., Hwang, M.J., Park, D.S., and Ahn, K.H., (2015), Performance evaluation and optimization of a fluidized three-dimensional electrode reactor combining pre-exposed granular activated carbon as a moving particle electrode for greywater treatment", *Separation and Purification Technology*, 156(7), 414-423, https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.030.

Katam, K., Maetani, K., Shimizu, T., Nakajima, J., and Bhattacharyya, D., (2018), "Study of aerobic biodegradation of surfactants and fluorescent whitening agents in detergents of a few selected Asian countries", *Journal of Water and Environment Technology*, 16(1), 18-29, https://doi.org/10.2965/jwet.17-007.

Khandare, R.V., and Govindwar, S.P., (2015), "Phytoremediation of textile dyes and effluents: Current scenario and future prospects", *Biotechnology Advances*, 33(8), 1697-1714, https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.09.003.

Kim, S., and Park, C., (2021), "Potential of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of anionic surfactants in laundry wastewater for greywater reuse", *Journal of Water Process Engineering, 44(7)*, 102-113, https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102373.

Kumar, S., Mostafazadeh, A.K., Kumar, L.R., Tyagi, R. D., Drogui, P., and Brien, E., (2022), "Advancements in laundry wastewater treatment for reuse: A review", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 57(11), 927-946, https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2132076.

Meng, F., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., and Yang, F., (2009), "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material", *Water Research*, 43(6), 1489-1512, https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044.

Merrettig, U., and Jelen, E. (2009), "Anaerobic biodegradation of detergent surfactants", *Materials*, 2(1), 181-206, https://doi.org/10.3390/ma2010181.

Mousavi, S.A., and Khodadoost, F., (2019), "Effects of detergents on natural ecosystems and wastewater treatment processes: a review", *Environmental Science and Pollution Research*, 26(8), 26439-26448, https://doi.org/10.1007/s11356-019-05802-x.

Nath, A., Mishra, A., and Pande, P.P., (2021), "A review

natural polymeric coagulants in wastewater treatment", *Materials Today: Proceedings*, 46(9), 6113-6117, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.551.

Nicolaidis, C., and Vyrides, I., (2014), "Closing the water cycle for industrial laundries: An operational performance and techno-economic evaluation of a full-scale membrane bioreactor system", *Resources, Conservation and Recycling*, 92(1), 128-135, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.001.

Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Mantziaras, I., and Koumaki, E., (2018), "Greywater characterization and loadings–physicochemical treatment to promote onsite reuse", *Journal of Environmental Management*, 216(2), 337-346, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094.

Palmarin, M.J., Young, S., and Chan, J., (2020), "Recovery of a hybrid and conventional membrane bioreactor following long-term starvation", *Journal of Water Process Engineering*, 34(8), 101-107, https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101027.

Pirsaheb, M., Khamutian, R., and Khodadadian, M., (2014), "A comparison between extended aeration sludge and conventional activated sludge treatment for removal of linear alkylbenzene sulfonates (Case study: Kermanshah and Paveh WWTP)", *Desalination and Water Treatment*, 52(27), 4673-4680, https://doi.org/10.1080/19443994.2013.809965.

Ren, B., Weitzel, K.A., Duan, X., Nadagouda, M.N., and Dionysiou, D.D., (2022), "A comprehensive review on algae removal and control by coagulation-based processes: mechanism, material, and application", *Separation and Purification Technology*, 293(6), 121-129, https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121106.

Shahedi, A., Darban, A., Taghipour, F., and Jamshidi, A., (2020), "A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes", *Current Opinion in Electrochemistry*, 22(5), 154-169, https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009.

Soni, R., Bhardwaj, S., and Shukla, D.P., (2020), *Chapter 14 - Various water-treatment technologies for inorganic contaminants: Current status and future aspects*, In: *Inorganic Pollutants in Water*, 273-295, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00014-7.

Tecchio, P., McAlister, C., Mathieux, F., and Ardente, F., (2017), "In search of standards to support circularity in product policies: A systematic approach", *Journal of Cleaner Production*, 168(1), 1533-1546, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.198.

Vickers, N.J., (2017), "Animal communication: When i'm calling you, Will you answer too?", *Current Biology*, 27(14), 713-715, https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064.

World Health Organization (WHO), (2003), *Aluminium in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality*, No. WHO/SDE/WSH/03.04/53, *World Health Organization*,

https://doi.org/10.1080/19443994.2013.809965.

Zaleschi, L., Sáez, C., Cañizares, P., Cretescu, I., and Rodrigo, M.A., (2013), "Electrochemical coagulation of treated wastewaters for reuse", *Desalination and Water Treatment*, 51(18), 3381-3388, https://doi.org/10.1080/19443994.2012.749192.

Zhang, H., He, Q., Luo, J., Wan, Y., and Darling, S.B., (2020), "Sharpening nanofiltration: strategies for enhanced membrane selectivity", *ACS Applied Materials Interfaces*, 12(36), 39948-39966, https://doi.org/10.1021/acsami.0c11136.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.