



Journal of Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Review Paper

Porous Polymer Foams: Simultaneous Adsorption of Organic Pollutants and Heavy Metals from Industrial Wastewater

Hamidreza Azimi *, Amirhossein Javanparast

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

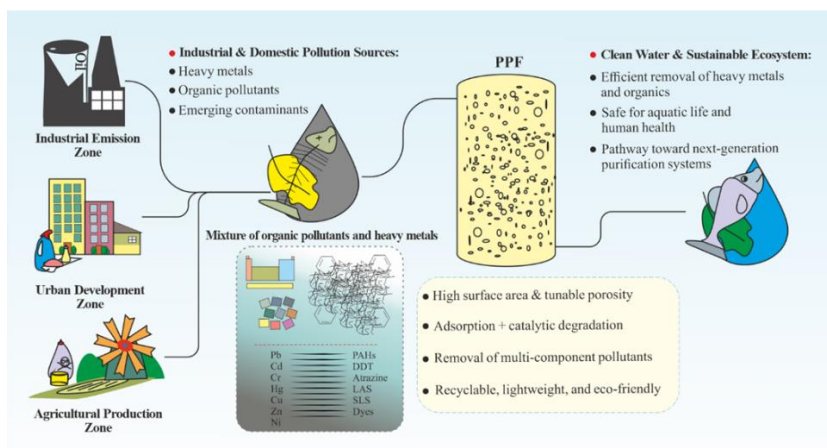
ARTICLE INFO

Received 2026-05-20
Revised 2026-06-21
Accepted 2026-06-27
Available online 2026-10-07
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Industrial wastewater treatment
Organic contaminants
Heavy metals removal
Porous polymer foams
Adsorption

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Industrial effluents generated by chemical, textile, metal-processing, and mining industries contain complex mixtures of diverse pollutants. These contaminants include persistent organic pollutants, recalcitrant organic compounds, and toxic heavy metals. These contaminants, either individually or through synergistic interactions, can adversely affect ecosystems and human health. Their coexistence can enhance wastewater treatment resistance and reduce the effectiveness of conventional processes, including activated sludge, coagulation–flocculation, and adsorption-based treatments. Therefore, developing efficient processes capable of simultaneously removing diverse contaminants remains a major challenge in environmental engineering.

Porous polymeric foams have recently attracted considerable attention as multifunctional adsorbent platforms. These materials are attractive due to their interconnected three-dimensional structures, low density, and high specific surface areas. Furthermore, their tunable surface chemistry and potential reusability can significantly enhance adsorption performance. These foams, particularly after surface modification or incorporation of active components, can enable simultaneous and selective removal of organic and inorganic contaminants. Moreover, recyclability and the incorporation of bio-based polymer matrices in some systems offer additional advantages in terms of environmental sustainability. In this review, polymeric foams are classified according to the origin of their polymer matrices (synthetic and bio-based foams) and their functional design strategies, including nanocomposite, smart, polymer–metal, and multilayer architectures. Furthermore, surface modification strategies, including functionalization, nanoparticle incorporation, and smart coating approaches, are discussed to enhance adsorption performance. These strategies aim to improve adsorption capacity, selectivity, and practical applicability in environmental remediation.

The primary adsorption mechanisms and the effects of operational parameters on foam performance are also evaluated. Recent studies indicate that modified foams, owing to their enhanced adsorption capacity and potential regeneration capability, may serve as complementary alternatives to conventional adsorbents under specific operating conditions. However, challenges related to production costs, scalability, and large-scale industrial implementation remain unresolved. Finally, the development of bio-based multifunctional foams for continuous-flow treatment systems is highlighted as an important direction for future research.

* Corresponding author: h.azimi@azaruniv.ac.ir – ORCID: 0000-0003-0452-7304



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله مروری

اسفنج‌های پلیمری متخلخل: جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی

حمیدرضا عظیمی^{*}، امیرحسین جوان‌پرست

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

پساب‌های صنعتی حاصل از صنایع شیمیایی، نساجی، فلزکاری و معدن، حاوی مخلوط‌های پیچیده‌ای از آلاینده‌های متنوع هستند. این آلاینده‌ها شامل آلاینده‌های آلی پایداری، ترکیبات آلی دیرتجزیه‌پذیر (Recalcitrant) و فلزات سنگین سمی هستند. این آلاینده‌ها، به‌تنهایی یا از طریق برهم‌کنش‌های هم‌افزا، می‌توانند اثرات زیان‌باری بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان داشته باشند. هم‌زیستی آن‌ها می‌تواند مقاومت پساب را در برابر تصفیه افزایش داده و کارایی فرایندهای متعارف، از جمله لجن فعال، انعقاد-لخته‌سازی و فرایندهای مبتنی بر جذب سطحی را کاهش دهد. بنابراین، توسعه فرایندهای کارآمدی که قادر به حذف هم‌زمان آلاینده‌های متنوع باشند، همچنان یک چالش عمده در مهندسی محیط‌زیست به شمار می‌رود.

اسفنج‌های پلیمری متخلخل اخیراً به‌عنوان سکوهاي جاذب چندمنظوره، توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. جذابیت این مواد ناشی از ساختارهای سه‌بعدی به‌هم‌پیوسته، چگالی کم و سطح ویژه بالای آن‌هاست. افزون بر این، شیمی سطح تنظیم‌پذیر و قابلیت استفاده مجدد بالقوه آن‌ها می‌تواند عملکرد جذب را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. این اسفنج‌ها، به‌ویژه پس از اصلاح سطح یا ادغام اجزای فعال، می‌توانند حذف هم‌زمان و گزینشی آلاینده‌های آلی و معدنی را ممکن سازند. همچنین، بازیافت‌پذیری و به‌کارگیری ماتریس‌های پلیمری زیست‌پایه در برخی از این سامانه‌ها، مزیت‌های افزوده‌ای از منظر پایداری محیط‌زیستی فراهم می‌کند. در این مقاله مروری، اسفنج‌های پلیمری بر اساس منشأ ماتریس پلیمری (اسفنج‌های سنتزی و زیست‌پایه) و راهبردهای طراحی عملکردی آن‌ها، شامل معماری‌های نانوکامپوزیتی، هوشمند، پلیمری-فلزی و چندلایه، طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، راهبردهای اصلاح سطح، از جمله عامل‌دارسازی، ادغام نانوذرات و رویکردهای پوشش‌دهی هوشمند، برای بهبود عملکرد جذب بررسی می‌شوند. هدف این راهبردها، بهبود ظرفیت جذب، گزینش‌پذیری و کاربردپذیری عملی در پاکسازی محیط‌زیست است.

سازوکارهای اصلی جذب و اثر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد اسفنج‌ها نیز ارزیابی شده‌اند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اسفنج‌های اصلاح‌شده، به‌واسطه ظرفیت جذب تقویت‌شده و قابلیت احیای بالقوه‌شان، می‌توانند در شرایط عملیاتی خاص، به‌عنوان جایگزین‌های مکمل جاذب‌های متعارف عمل کنند. با این حال، چالش‌های مرتبط با هزینه‌های تولید، مقیاس‌پذیری و پیاده‌سازی صنعتی در ابعاد بزرگ همچنان حل‌نشده باقی مانده‌اند. در نهایت، توسعه اسفنج‌های زیست‌پایه چندمنظوره برای سامانه‌های تصفیه جریان پیوسته، به‌عنوان مسیری مهم برای پژوهش‌های آینده برجسته می‌شود.

کلیدواژه‌ها

پساب صنعتی

آلاینده‌های آلی

فلزات سنگین

اسفنج پلیمری متخلخل

جذب

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۱۵

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

^{*} نویسنده مسئول: h.azimi@azaruniv.ac.ir – ORCID: 0000-0003-0452-7304

۱ مقدمه

ورود آلاینده‌های سمی ناشی از فرایندهای صنعتی و کاربری‌های خانگی به سامانه زیستی آبی، نه تنها سلامت جانداران را تهدید می‌کند، بلکه با بروز بیماری‌هایی چون سرطان، اختلالات کلیوی و مشکلات گوارشی در انسان ارتباط مستقیمی دارد [۱، ۲]. اگرچه فلزات سنگین به‌طور طبیعی در محیط حضور دارند، اما آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی، موجب افزایش قابل توجه غلظت، پایداری و تجمع زیستی آن‌ها شده است. این روند بیانگر آن است که شناسایی منشأ آلودگی، در کنار استفاده از نشانگرهای زیستی برای پایش اثرات زیستی، ضرورتی علمی و کاربردی دارد [۳، ۴]. با این حال، چالش آلودگی محدود به فلزات سنگین نیست. ترکیبات آلی پیچیده و آلاینده‌های نوظهور در پساب‌های صنعتی، دغدغه‌های اصلی در فرایندهای تصفیه شده‌اند. توسعه فناوری‌های نوین به افزایش ظرفیت جذب محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم درک عمیق از سینتیک، ترمودینامیک و سازوکارهای میان مولکولی در محیط‌های چندجزئی است [۵، ۶]. در پاسخ به این نیاز، فناوری‌هایی همچون چارچوب‌های فلزی-آلی (متخلخل Metal-Organic Frameworks) و نانوساختارهای کربنی مورد توجه قرار گرفته‌اند. MOFها به دلیل ساختار منظم، سطح ویژه بالا و قابلیت تنظیم شیمی سطح، توانایی بالایی در جذب و کاتالیز آلاینده‌ها دارند. با این حال، پایداری مکانیکی و شیمیایی پایین آن‌ها در محیط‌های واقعی، چالشی جدی در کاربرد صنعتی محسوب می‌شود. در مقابل، گرافن مغناطیسی و مشتقات آن با برهم‌کنش‌های هم‌افزا و کنترل الکترواستاتیک، بستر مناسبی برای حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزی فراهم کرده‌اند. بنابراین، ادغام ویژگی‌های ساختاری MOFها با پایداری و خاصیت مغناطیسی گرافن، راهکاری مؤثر برای توسعه جاذب‌های هیبریدی پیشرفته است [۷، ۸].

در کنار فناوری‌های پیشرفته، توجه به جاذب‌های زیست‌پایه و ارزان قیمت ضروری است، زیرا این مواد راه‌حلی پایدار برای تصفیه در مقیاس وسیع ارائه می‌دهند. ضایعات کشاورزی، صنعتی و حیوانی پس از اصلاح شیمیایی، ظرفیت حذف بالایی نشان می‌دهند و به دلیل هزینه‌ی پایین، قابلیت تجاری‌سازی بالاتری نسبت به نانوجاذب‌های پیچیده دارند. با این حال، ظرفیت جذب پایین‌تر و کاهش کارایی در محیط‌های چندجزئی، نیاز به بهینه‌سازی ساختاری و شیمی سطحی را نشان می‌دهد [۹]. این موضوع بیانگر آن است که بهره‌گیری از رویکردهای ترکیبی، می‌تواند کارایی و پایداری این جاذب‌ها را به‌طور قابل توجهی بهبود دهد.

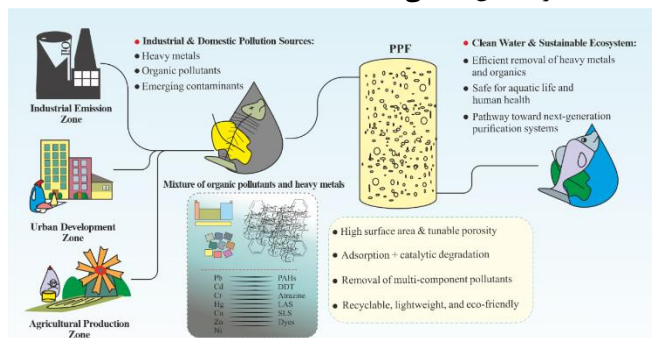
در همین راستا، تحقیقات اخیر به سمت جاذب‌های چندکاره با سطوح ترکیبی و واکنش‌پذیری متنوع سوق یافته‌اند. نمونه‌هایی مانند اسفنج زیست‌پلیمری گرافن (Alg-Fe₃O₄-rGO-4S) و کامپوزیت پلی‌یورتان-پلی‌آنیلین / Fe₃O₄ با ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا، توانایی جذب هم‌زمان فلزات سنگین، رنگ‌ها و ترکیبات آلی را نشان داده‌اند. تحلیل سازوکار عملکرد این مواد نشان می‌دهد که واکنش‌های سطحی و فرایندهای REDOX، علاوه بر افزایش ظرفیت جذب، پایداری و قابلیت بازچرخانی آن‌ها را نیز تقویت می‌کنند [۱۰، ۱۱]. در ادامه این روند، اسفنج‌های پلیمری متخلخل به دلیل وزن کم، سطح ویژه زیاد و ساختار قابل کنترل، از کاربردهای سنتی به حوزه‌های زیست‌محیطی توسعه یافته‌اند.

بررسی ارتباط میان ساختار و عملکرد این اسفنج‌ها نشان داده است که اصلاح سطحی و پوشش‌دهی هدفمند، می‌تواند کارایی حذف آلاینده‌ها، جداسازی نفت از آب و مقاومت مکانیکی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. این یافته‌ها بر اهمیت طراحی مواد چندمنظوره با عملکرد ترکیبی در تصفیه آب تأکید دارند [۱۲، ۱۳].

از دیدگاه تحلیلی، بهره‌گیری از نانومواد اصلاح‌شده با پوشش‌های محافظ، رویکردی نوین برای توسعه جاذب‌های ایمن و سازگار با محیط زیست به شمار می‌رود. این مواد ضمن افزایش کارایی فرایند تصفیه، خطرات سمیت نانوذرات را کاهش داده، امکان استفاده صنعتی پایدار را فراهم می‌کنند. بنابراین، نانومواد ترکیبی را می‌توان یکی از مؤثرترین راهکارها برای مدیریت منابع آبی و حذف آلاینده‌های پیچیده صنعتی دانست [۱۴، ۱۵].

جاذب‌های پیشرفته با ساختارهای هیبریدی، از جمله نانو-پلیمرها، سامانه‌های MOF-کربنی و اسفنج‌های پلیمری متخلخل، ظرفیت جذب بالا، پایداری شیمیایی و قابلیت بازیافت‌پذیری دارند و توان بالقوه‌ای در پاک‌سازی هم‌زمان آلاینده‌های آلی، فلزی و میکروبی دارند [۱۶، ۱۸]. در این میان، اسفنج‌های پلیمری متخلخل به عنوان یکی از کارآمدترین بسترها برای توسعه جاذب‌های نسل جدید مطرح می‌شوند. همچنین، استفاده از پلیمرهای مولکولی حک‌شده و نانومواد انتخاب‌پذیر مسیر جدیدی برای تصفیه هدفمند و هوشمند آلاینده‌ها ایجاد کرده است [۱۹، ۲۰]. این یافته‌ها چشم‌اندازی روشن برای طراحی سامانه‌های تصفیه نسل جدید در مقیاس صنعتی ترسیم می‌کنند.

با وجود پیشرفت‌های در توسعه جاذب‌های نوین، هنوز درک جامعی از ارتباط میان ساختار اسفنج‌های پلیمری متخلخل، ویژگی‌های سطحی و عملکرد جذب آن‌ها در محیط‌های چندجزئی وجود ندارد. بیشتر پژوهش‌های پیشین به بررسی جداگانه‌ی جذب فلزات سنگین یا آلاینده‌های آلی پرداخته‌اند، درحالی‌که تعامل هم‌زمان این آلاینده‌ها می‌تواند سازوکار جذب را به‌طور اساسی تغییر دهد. براین اساس، این مقاله به بررسی پیشرفت‌های اخیر اسفنج‌های پلیمری متخلخل پرداخته، با تمرکز بر توانمندی‌ها، محدودیت‌ها و چالش‌های آن‌ها در حذف ترکیبی آلاینده‌های آلی و معدنی، مسیرهای آینده‌ی تحقیق و توسعه را تبیین می‌کند. نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه‌ساز طراحی سامانه‌های پایدار، اقتصادی و کارآمد تصفیه آب در مقیاس صنعتی باشد.



شکل ۱ اسفنج‌های پلیمری متخلخل: طرحواره جذب آلاینده‌های آلی و فلزات

سنگین [۱، ۳، ۵، ۱۰]

Figure 1 Porous Polymer Foams: A Schematic Representation of the Adsorption of Organic Pollutants and Heavy Metals [1,3,5,10]

۲ ساختار و روش‌های تهیه اسفنج‌های پلیمری

۱-۲ تعریف و اهمیت ساختار اسفنج‌های پلیمری

اسفنج‌های پلیمری متخلخل به‌عنوان زیرگروهی از مواد متخلخل، ترکیبی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد پلیمرها و ساختارهای متخلخل را ارائه می‌دهند. به همین دلیل در طراحی مواد پیشرفته و عملکردی، جایگاه ویژه‌ای دارند [۲۱]. با وجود مزایای متعدد روش‌های متداول جذب آلاینده‌ها، اغلب با محدودیت‌هایی نظیر ظرفیت پایین جذب یا گزینش‌پذیری ناکافی مواجه هستند. در این زمینه، اسفنج‌های پلیمری متخلخل با سطح ویژه بالا و توانایی عملکرد چندمنظوره، بستر مناسبی برای توسعه جاذب‌های نوین با کارایی و گزینش‌پذیری بهبود یافته ارائه می‌دهند [۲۲]. ساختار سلولی اسفنج‌ها، حاصل طراحی دقیق فرایندهای اسفنج‌سازی و اصلاح پلیمر است که نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص عملکردی آن‌ها دارد. ایجاد سلول‌های یکنواخت و پراکندگی مناسب آن‌ها باعث افزایش پایداری و کارایی اسفنج در کاربردهای مختلف می‌شود. علاوه بر این، ترکیب فناوری اسفنج‌سازی با پرکننده‌های عملکردی و آمیخته‌های پلیمری، امکان تولید مواد سبک، بادوام و چندمنظوره را فراهم کرده‌است [۲۴، ۲۳].

گاز دی‌اکسیدکربن با درجه تجاری از شرکت رهام گاز تأمین شد و در تمامی آزمایش‌های جذب مورد استفاده قرار گرفت. گاز نیتروژن (N_2) با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد نیز از شرکت رهام گاز تهیه و در تمامی آزمایش‌های کف‌زایی استفاده شد. انتخاب گاز نیتروژن برای بررسی رفتار کف‌زایی به‌جای گازهای اسیدی یا گازهای دودکش (Flue Gas) به دلایل متعددی صورت گرفت. گازهای دودکش معمولاً حاوی ناخالصی‌هایی نظیر SO_2 و O_2 هستند که می‌توانند موجب تخریب حرارتی و اکسید شدن آلکانول‌آمین‌ها شده، بر نتایج آزمایش تأثیر بگذارند [۱۷، ۱۸]. استفاده از گاز نیتروژن امکان بررسی خصوصیات ذاتی کف‌زایی محلول‌های آمینی را بدون تداخل واکنش‌های شیمیایی و تخریب حلال فراهم می‌آورد و قابلیت تکرارپذیری و صحت داده‌ها را تضمین می‌کند [۱۹].

۲-۲ انواع تخلخل و نقش عملکردی

تخلخل یکی از مؤلفه‌های کلیدی ساختاری در اسفنج‌های پلیمری متخلخل است که به‌طور مستقیم بر عملکرد مواد در کاربردهای صنعتی و محیطی، به‌ویژه جذب آلاینده‌ها از پساب‌های صنعتی، تأثیر می‌گذارد. نوع و اندازه منافذ، نه‌تنها ظرفیت جذب اسفنج را تعیین می‌کنند، بلکه سرعت انتقال جرم، گزینش‌پذیری نسبت به آلاینده‌ها و پایداری مکانیکی در شرایط عملیاتی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲۵، ۲۸].

۱-۲-۲ میکروتخلخل‌ها

مطالعه انجام‌شده Chandan و همکاران [۲۹] نشان می‌دهد که اسفنج‌های میکروتخلخل پلی‌یورتان به‌دلیل سطح ویژه بالا و دسترسی سریع به منافذ، در جذب آلاینده‌های آلی (مانند رنگ‌های نساجی) کارآمد هستند. ترکیب این اسفنج‌ها با نانوذرات TiO_2 ، امکان تخریب کاتالیزوری نوری آلاینده‌ها را تحت تابش UV و نور خورشید فراهم می‌کند. این عملکرد هم‌زمان (جذب و کاتالیز)، بازده حذف را در شرایط آزمایشگاهی تا ۹۵٪ در مدت ۲۰ دقیقه افزایش می‌دهد.

۲-۲-۲ میان تخلخل‌ها

Abitaev و همکاران [۳۰] نشان دادند که مواد مزوتخلخل به‌دلیل سطح ویژه بالا و ساختار قابل کنترل، در ذخیره‌سازی، جداسازی و کاتالیز کاربرد دارند. استفاده از قالب‌های نانو ساختاری، به‌ویژه نانوذرات پلی‌استایرن (PS) حاصل از پلیمری‌شدن امولسیون، روشی برای دستیابی به ساختارهای مزوتخلخل با اندازه و مورفولوژی دقیق است. این روش، یکنواختی ساختار و تکرارپذیری سنتز را بهبود می‌بخشد که گامی در جهت رفع محدودیت‌های تولید صنعتی این مواد است.

۳-۲-۲ ماکروتخلخل‌ها

ماکروتخلخل ضمن افزایش سطح تماس در دسترس، انتقال جرم درون شبکه‌ای را تسهیل می‌کند. در همین راستا، اسفنج‌های پلی‌یورتان/پلی‌آنیلین (PU-PANI) با معماری ماکروتخلخل منظم، کارایی بالایی در حذف رنگ‌های آرو از محلول‌های آبی دارند؛ به‌طوری‌که این ساختار متخلخل با کوتاه‌کردن مسیرهای نفوذ، سینتیک جذب را به‌طور مؤثری تسریع می‌کند. پایداری عملکرد این اسفنج‌ها پس از چندین چرخه متوالی جذب-واحد [۳۱]، ناشی از برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و پیوند هیدروژنی پایدار میان گروه‌های عاملی پلی‌آنیلین و مولکول‌های رنگ، در کنار استحکام مکانیکی بستر پلیمری است؛ عواملی که مقیاس‌پذیری صنعتی این سامانه‌ها را توجیه می‌کنند.

توسعه مواد ماکروتخلخل جدید با قابلیت‌های چندمنظوره توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. یکی از این مواد، مکسن است که به‌دلیل دارا بودن گروه‌های آب‌دوست متعدد و بازده بالای تبدیل نوری گرمایی، گزینه‌ای مطلوب برای سامانه‌های تبخیر حرارتی آب محسوب می‌شود. باین‌حال، تمایل ذاتی مکسن‌ها به تجمع و کاهش سطح فعال، کارایی آن‌ها را در شرایط واقعی محدود می‌کند. به‌منظور غلبه بر این چالش، در این مطالعه که توسط Niu و همکاران [۳۲] انجام شده‌است، قالب‌های ملامین فرمالدهید به‌عنوان قالب‌های قربانی برای سنتز غشاهای مکسن اسفنجی سه‌بعدی با تخلخل بالا (FMXM) به کار می‌روند. ایجاد ماکروتخلخل در FMXM در مقایسه با غشاهای مکسن متراکم، انتقال آب، نفوذ بخار و به‌واسطه سطح چین‌خورده و کاهش بازتاب نوری، بازده نوری گرمایی را بهبود می‌بخشد. شکل (۲) ویژگی‌های اندازه و کارکرد تخلخل در اسفنج‌های پلیمری را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲ ساختار سلسله‌مراتبی

ساختارهای متخلخل سلسله‌مراتبی، با ترکیب منافذ در مقیاس‌های میکرو، مزو و ماکرو، بستری چندسطحی برای بهینه‌سازی هم‌زمان انتقال جرم، نفوذ مولکولی و پایداری مکانیکی فراهم می‌کنند [۳۳]. در میان مواد متخلخل، چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs) به‌دلیل ساختار منظم، پایداری حرارتی بالا و قابلیت تنظیم شیمی سطح، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. طراحی سلسله‌مراتبی در COF های یکپارچه (Monolithic COFs) نه‌تنها منجر به افزایش سطح ویژه و تسریع نفوذ مولکولی می‌شود، بلکه پایداری مکانیکی و شیمیایی را نیز تقویت می‌کند؛ زیرا توزیع متعادل اندازه منافذ، مانع از فروپاشی ساختار در شرایط عملیاتی سخت می‌شود. افزون بر این، ترکیب COF ها با سایر مواد (نظیر اکسیدهای فلزی یا پلیمرهای رسانا)

شیمیایی دارند. ویژگی کلیدی این مواد در آن است که انتقال جرم در ساختار آن‌ها عمدتاً به‌صورت همرفتی انجام می‌شود، درحالی‌که در سامانه‌های پلیمری سنتی، نفوذ از طریق منافذ ریز و غیرپیوسته، فرایندی کند و محدودکننده است. این تفاوت سازوکاری موجب افزایش چشمگیر بازده و کاهش مقاومت انتقال جرم در polyHIPE ها می‌شود [۳۶]. ساختار سه‌بعدی پایدار polyHIPE ها را به بستری مناسب برای تثبیت کاتالیزورهای ناهمگن، نانوذرات و آنزیم‌ها تبدیل کرده است؛ به‌گونه‌ای که نفوذپذیری بالا و سطح مؤثر زیاد، راندمان واکنش‌ها و قابلیت بازیابی کاتالیزورها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مهندسی هدفمند تخلخل در polyHIPE ها نه‌تنها کارایی جذب را ارتقا می‌دهد، بلکه بستر طراحی سامانه‌های چندمنظوره برای تصفیه، واکنش و جداسازی انتخابی را فراهم می‌سازد [۳۵، ۳۶].

۲-۳ ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی مؤثر

ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی اسفنج‌های پلیمری متخلخل، از جمله چگالی، توزیع سلولی و پایداری سطحی، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد جذب و انتقال جرم دارند. مطالعات Chen و همکاران [۳۷] نشان می‌دهد که تغییر میزان عامل اسفنج‌زا و چگالی، اثر مستقیمی بر خواص مکانیکی و حرارتی اسفنج‌ها دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش چگالی، مقاومت فشاری و انسجام سلول‌های اسفنج را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که خواص شیمیایی پایه‌ای آن حفظ می‌شود. این تغییرات فیزیکی همچنین مسیرهای انتقال جرم را بهینه کرده، دسترسی به مکان‌های فعال سطحی را تسهیل می‌کند.

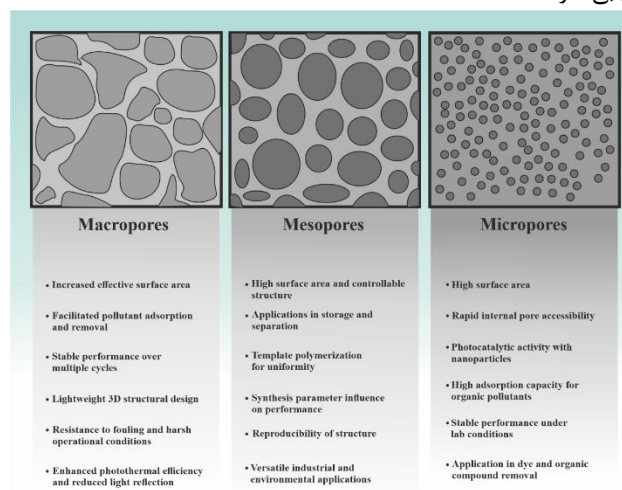
۲-۳-۱ تخلخل کل و ساختار منافذ

تخلخل و ساختار منافذ در تعیین عملکرد اسفنج‌های پلیمری متخلخل به‌عنوان جاذب‌های کارآمد نقش به‌سزایی دارند. این ویژگی‌ها نه‌تنها مسیرهای انتقال جرم و نفوذ سیال را کنترل می‌کنند، بلکه دسترسی به مکان‌های فعال و پایداری مکانیکی و شیمیایی جاذب را نیز بهبود می‌بخشند. طراحی مؤثر این مواد نیازمند ایجاد تعادلی میان تخلخل بالا و استحکام ساختاری است تا جذب مؤثر آلاینده‌ها با قابلیت استفاده مجدد همراه باشد. مطالعات Wang و همکاران [۳۸] روی اسفنج‌های PANI/PU نشان داده که شبکه منافذ باز و ساختار رسانای پلی‌آنیلین موجب ایجاد مسیرهای نفوذ مؤثر و واکنش‌های اکسایش-احیا (REDOX) سطحی می‌شود و حذف هم‌زمان چند آلاینده با بازدهی بالا را ممکن می‌سازد. همچنین، توسعه PolyHIPE های اصلاح‌شده با گروه‌های کاربوکسیل (CPPF) نشان داده است که اصلاح سطح با گروه‌های آب‌دوست، پایداری چرخه‌ای جاذب و ظرفیت جذب را بهبود می‌بخشد [۳۹]. این مثال برجسته نشان می‌دهد که هم‌افزایی میان ساختار متخلخل و ویژگی‌های شیمی سطح، عامل کلیدی در دستیابی به عملکرد پایدار و قابل‌اعتماد در شرایط واقعی است.

بررسی نسل جدید جاذب‌ها مانند پلیمرهای آلی متخلخل (POPs; Porous Organic Polymers) که توسط Gomez-Suarez و همکاران [۴۰] انجام شده است، نشان می‌دهد این مواد با سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی و حرارتی، قابلیت طراحی ساختار متخلخل و تراکم بالای مکان‌های فعال جذب، عملکرد چندمنظوره‌ای ارائه می‌دهند. POP ها نه‌تنها در فرایندهای

به‌صورت کامپوزیت، موجب تقویت برهم‌کنش‌های سطحی و ارتقای بازده جداسازی و جذب می‌شود. به‌طور مشابه، در اسفنج‌های پلیمری نیز طراحی سلسله‌مراتبی منافذ می‌تواند رفتار مکانیکی، نفوذ سیال و قابلیت جذب سطحی را بهبود دهد. این شباهت ساختاری میان COF های یکپارچه و اسفنج‌های پلیمری نشان می‌دهد که اصول مهندسی تخلخل چندمقیاسی، به‌طور گسترده در بهینه‌سازی مواد متخلخل قابل‌استفاده است. [۳۴].

عملکرد اسفنج‌های پلیمری در جذب آلاینده‌ها فقط تابع مقدار تخلخل نیست، بلکه به اندازه، توزیع، اتصال‌پذیری و چندمقیاسی بودن منافذ وابسته است؛ زیرا میکروتخلخل‌ها عمدتاً ظرفیت جذب را از طریق افزایش سطح ویژه تقویت می‌کنند، مزوتخلخل‌ها نفوذ آلاینده‌های آلی بزرگ‌تر را تسهیل می‌کنند و ماکروتخلخل‌ها انتقال جرم و نفوذپذیری را در شرایط عملیاتی بهبود می‌دهند [۲۹، ۳۲]. از این‌رو، ساختارهای سلسله‌مراتبی با ترکیب مزایای میکرو، مزو و ماکرو حفره‌ها، از نظر طراحی یکی از کارآمدترین راهبردها برای جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین محسوب می‌شوند [۳۳، ۳۴]. با این حال، برتری قطعی هر ساختار باید باتوجه به نوع آلاینده، شیمی سطح، pH، شرایط آزمایش و داده‌های تجربی مقایسه‌ای ارزیابی شود.



شکل ۲ تخلخل ماکرو، مزو و میکرو در اسفنج‌های پلیمری: بررسی ویژگی‌های ساختاری [۲۱، ۲۳، ۳۱]

Figure 2 Macro-, Meso-, and Microporosity in Polymer Foams: Structural Characteristics Study [21-23,31]

۲-۵ مهندسی تخلخل برای جذب انتخابی

مهندسی تخلخل در اسفنج‌های پلیمری به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهبردها برای بهینه‌سازی عملکرد مواد جاذب مطرح است. در این میان، اسفنج‌های فوق‌سبک با ساختار متخلخل منظم، به‌دلیل نسبت بالای تخلخل به چگالی، بستر مناسبی برای جذب انتخابی آلاینده‌های نفتی و جداسازی امولسیون‌های آب-روغن فراهم می‌کنند. بررسی‌های Zhang و همکاران [۳۵] نشان داده‌اند که پایداری مکانیکی و شیمیایی این اسفنج‌ها در محیط‌های خورنده و دمایی مختلف حفظ می‌شود که این ویژگی برای استفاده صنعتی در شرایط واقعی ضروری است. در مقایسه با رزین‌های پلیمری متداول، اسفنج‌هایی که از پلیمری‌شدن امولسیون‌های با فاز داخلی بالا (polyHIPEs; polymerized High Internal Phase Emulsions) حاصل می‌شوند، مزایای قابل‌توجهی در فرایندهای جداسازی و واکنش‌های

و طراحی ساختار منافذ چندمقیاسی توسعه یافته‌اند. جاذب کامپوزیتی MF@PCP (اسفنج ملامین پوشش‌یافته با پلی(فسفازان حلقوی-کو-اتیلن‌ایمین))؛ (Melamine-foam@Poly(Cyclophosphazene-co-ethyleneimine))، با دو نوع مکان جذب مجزا و ساختار متخلخل باز، توانست آلاینده‌هایی نظیر یون‌های فلزی، رنگ‌های آلی و ترکیبات دارویی را با سرعت و بازده بالا حذف کند [۴۵،۴۴]. تحلیل سینتیکی نشان داد که فرایند جذب عمدتاً توسط سازوکارهای شیمیایی کنترل می‌شود. علاوه بر این، پایداری عملکرد، قابلیت بازیافت و اثر هم‌افزایی در حضور آلاینده‌های متنوع نشان می‌دهد که عملکرد جذب در پساب‌های پیچیده حاصل برهم‌کنش هم‌زمان سطح ویژه، شیمی سطح، دسترسی حفرات و نوع مکان‌های جذب است.

۲-۳-۴ گروه‌های عاملی فعال

گروه‌های عاملی فعال، از جمله کربوکسیلیک (COOH)، آمینی (NH_2)، هیدروکسیل (OH) و سولفونیک (SO_3H)، نقش اساسی در بهبود ظرفیت جذب و گزینش‌پذیری جاذب‌های مبتنی بر گرافن متخلخل دارند [۴۶]. این گروه‌ها با فراهم‌سازی مکان‌های واکنشی متنوع، امکان شکل‌گیری پیوندهای کووالانسی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و کمپلکس‌های سطحی را ایجاد می‌کنند و بدین ترتیب عملکرد جذب آلاینده‌های متنوع در آب، از جمله یون‌های فلزی و آلاینده‌های آلی، بهبود می‌یابد. تحلیل عملکرد چندآلاینده‌ای نشان می‌دهد که کارایی نهایی جاذب‌ها حاصل برهم‌کنش هم‌افزاینده میان ویژگی‌های شیمیایی سطح و عوامل فیزیکی ساختار متخلخل است.

۲-۳-۵ ظرفیت تبادل یونی (IEC)

افزایش تقاضای آب به دلیل رشد اقتصادی و اجتماعی، محققان را به توسعه فناوری‌های اقتصادی و مؤثر برای تصفیه آب واداشته است. در این راستا، مواد تبادل یونی (IEX) به‌طور گسترده از مرحله آزمایشگاهی به کاربرد صنعتی منتقل شده و تأثیر تجاری قابل توجهی داشته‌اند [۴۷]. با این وجود، چالش‌های مرتبط با مواد IEX، توجه پژوهشگران را به راهکارهایی برای بهبود خواص آن‌ها جلب کرده‌است؛ یکی از محبوب‌ترین این رویکردها، استفاده از نانومواد به‌عنوان تقویت‌کننده در ماتریس مواد IEX است. طراحی ساختار فیزیکی جاذب، به‌ویژه در اسفنج‌های پلیمری متخلخل، نقش مهمی در بهره‌برداری از IEC دارد؛ ساختار سلولی باز و سطح ویژه بالا، دسترسی مؤثر به گروه‌های فعال تبادل یونی را تسهیل کرده، مسیرهای نفوذ جرم را کوتاه‌تر می‌کند، که افزایش نرخ جذب و پایداری عملکرد در چرخه‌های متعدد را به همراه دارد.

۲-۳-۶ پایداری حرارتی و شیمیایی

توسعه مواد پایدار و با عملکرد بالا برای پاسخ به نیاز صنایع به راهکارهای چندمنظوره و سازگار با محیط‌زیست، به یکی از چالش‌های اصلی مهندسی مواد تبدیل شده‌است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اسفنج‌های پلاستیکی سنتی، با زمان تجزیه طولانی و اثرات مخرب زیست‌محیطی، دیگر گزینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی پایدار نیستند. در پاسخ به این مسئله، Zhao و همکاران [۴۸] جوهر نوآورانه‌ای از نوع کامپوزیت آلی-غیرآلی برای چاپ مستقیم معرفی کرده‌اند که قابلیت تولید اسفنج‌های

مبتنی بر غشا کارآمدند، بلکه کاربرد موفقی در روش‌های شیمیایی، الکتریکی و نوری کاتالیزوری نیز دارند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که طراحی موفق جاذب‌های اسفنجی نیازمند یکپارچه‌سازی ویژگی‌های ساختاری، شیمی سطح و پایداری فیزیکی است تا ظرفیت جذب انتخابی و چندمنظوره بهینه شود.

۲-۳-۲ چگالی توده‌ای

چگالی توده‌ای اسفنج‌های پلیمری نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد جذب انتخابی روغن و آلاینده‌های آبی ایفا می‌کند. کاهش چگالی موجب ایجاد سلول‌های باز بزرگ‌تر و مسیرهای انتقال جرم گسترده‌تر می‌شود و در نتیجه ظرفیت جذب افزایش می‌یابد. این اثر در اسفنج‌های PLA/PTFE مشاهده شده است، جایی که چگالی پایین‌تر باعث افزایش ظرفیت جذب و حفظ پایداری عملکرد در چرخه‌های متعدد جذب و بازیابی شده است [۴۱]. اسفنج کامپوزیتی (PBAT; polybutylene adipate terephthalate) حاوی بنتونیت پیلا شده با آهن (IPB; Iron-pillared bentonite) نمونه دیگری از بهینه‌سازی ساختاری و سطحی است [۴۲]. در این سامانه، ایجاد ساختار متخلخل با شکر به‌عنوان عامل حفره‌زایی، جداسازی فاز محلول و اصلاح سطح با غوطه‌وری در محلول پلی‌آکریل‌امید/سیلیکا (PAM/SiO₂) موجب افزایش ظرفیت جذب سریع و پایدار رنگ متیلن‌بلو و یون Cu^{2+} شد. تحلیل سینتیک جذب نشان داد که جذب رنگ عمدتاً پایدار و چرخه‌ای است، درحالی‌که جذب Cu^{2+} محدودیت چرخه‌ای دارد. این تفاوت عملکرد نشان می‌دهد که طراحی هدفمند معماری منافذ و اصلاح شیمی سطح، پیش‌شرط بهینه‌سازی گزینش‌پذیری و پایداری چرخه‌ای جاذب‌هاست. علاوه بر این، فوق‌آبدوستی اسفنج‌ها جداسازی آب از روغن را ارتقا می‌دهد؛ پدیده‌ای که ناشی از هم‌افزایی چگالی توده‌ای، شیمی سطح و شبکه متخلخل در ایجاد عملکرد چندمنظوره است. بنابراین، یکپارچه‌سازی انتخاب پیش‌ماده‌ها، مهندسی منافذ و اصلاح سطحی، دستیابی هم‌زمان به جذب انتخابی، سینتیک نفوذ بالا و دوام چرخه‌ای را تضمین می‌کند.

۲-۳-۳ سطح ویژه (سطح فعال داخلی)

نتایج مطالعات Fujii [۴۳] نشان می‌دهد که ذرات پلیمری سنتزی، به دلیل قابلیت تنظیم اندازه، شکل، شیمی سطح و تعادل آبدوستی/آب‌گریزی، نقش مهمی در پایداری ساختار اسفنج‌ها و طراحی ساختارهای عملکردی ایفا می‌کنند. این ویژگی‌ها می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر سطح فعال، دسترسی به مکان‌های جذب و عملکرد نهایی اسفنج‌ها در فرایندهای جداسازی اثر بگذارند. در اسفنج‌های HIPE مبتنی بر پلی(۴-ترشیوبوتیل استایرن-کو-دی‌وینیل‌بنزن)، افزایش حجم فاز داخلی موجب افزایش تخلخل از ۸۴/۰۷٪ به ۹۲/۹۴٪ و افزایش سطح ویژه از ۳۳/۰۶ به ۱۰۲/۸۹ m^2/g شد که با ظرفیت جذب ۷۰/۲۱ g/g برای دی‌کلرومتان همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح ویژه و تخلخل می‌تواند با افزایش تعداد مکان‌های در دسترس و بهبود انتقال جرم، ظرفیت جذب اسفنج را افزایش دهد. با این حال، در جذب هم‌زمان فلزات و آلاینده‌های آلی، ظرفیت جذب لزوماً همبستگی خطی با سطح ویژه یا SBET ندارد و علاوه بر آن، به شیمی سطح، دسترسی به حفرات، نوع گروه‌های عاملی و مکان‌های جذب نیز وابسته است. به‌منظور ارتقای بیشتر کارایی جذب، رویکردهای ترکیبی شامل اصلاح سطح

باز یافت نشان می‌دهد که باز یافت فیزیکی، شیمیایی و زیست پایه، هر کدام با مزایا و محدودیت‌های خاص خود، می‌توانند اثرات محیطی را کاهش داده، راهکارهای اقتصادی و پایدار برای مدیریت ضایعات ارائه کنند. در راستای بهبود عملکرد جذب و قابلیت باز یافت، نانو ساختارهای زیست پایه الهام گرفته از مواد طبیعی، به ویژه آئروژل‌های نانوسلولزی، توانایی قابل توجهی در ارتقای کارایی جاذب‌ها نشان داده‌اند [۵۳]. طراحی مهندسی شده این ساختارها، با بهره‌گیری از معماری شش ضلعی و شبکه‌های پیوند کووالانسی، موجب تقویت پایداری مکانیکی و ساختاری می‌شود. علاوه بر این، انعطاف پذیری مکانیکی و استحکام ساختاری بالای آئروژل‌ها می‌تواند به بهبود پایداری عملکرد در چرخه‌های متوالی جذب و احیا کمک کند، که این ویژگی برای کاربردهای صنعتی و محیط زیستی اهمیت دارد [۵۳]. تحلیل تطبیقی PU و نانو ساختارهای زیست پایه نشان می‌دهد که ادغام ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی PU با ظرفیت جذب سریع و باز یافت آسان آئروژل‌ها می‌تواند عملکرد مناسبی در تصفیه آب و کاهش آلودگی پلاستیکی ارائه دهد. با وجود نتایج امیدوارکننده، قابلیت احیا و استفاده مجدد اسفنج‌های جاذب تابع نوع اسفنج، ترکیب پساب و روش احیاست. افزون بر این، فرایند احیا، به‌ویژه روش‌های شیمیایی و حرارتی، می‌تواند از طریق تغییر گروه‌های عاملی، خروج اجزای فعال یا تخریب بخشی از ساختار متخلخل، پایداری چرخه‌ای اسفنج را تحت تأثیر قرار دهد [۵۲، ۵۳].

۲-۳-۹ رفتار تورمی در محیط‌های یونی

رفتار تورمی اسفنج‌های پلیمری متخلخل، متأثر از یون‌های چند ظرفیتی (مانند Ca^{2+} و Mg^{2+}) است. این یون‌ها با ایجاد پیوندهای یونی عرضی، شبکه پلیمری را تقویت می‌کنند. این فرایند که «سپرسازی یونی» نامیده می‌شود، تحرک زنجیره‌ها و فضای آزاد شبکه را کاهش می‌دهد. اثر سپرسازی یونی در نمونه‌هایی با بار سطحی منفی تشدید شده و عامل اصلی افت کارایی جذب در محیط‌های با شدت یونی بالاست [۵۴]. مطالعات نشان می‌دهند که نوع کاتیون نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار و عملکرد شبکه‌های نانوسلولزی کربوکسیله دارد. ژل‌های تک‌ظرفیتی عمده‌ای از طریق تعاملات فیزیکی و پایدارسازی الکترواستاتیک شکل می‌گیرند، درحالی‌که ژل‌های دو ظرفیتی با اتصال یونی میان رشته‌ها پایدار می‌شوند. این تفاوت ساختاری مستقیماً بر خواص مکانیکی، درجه رشته‌سازی و کارایی جذب تأثیرگذار است. به عنوان نمونه، عملکرد سوپرجاذب‌ها در جذب یون‌های هدف نشان می‌دهد که NH_4^{+} بیشترین ظرفیت جذب و کندترین سینتیک را ارائه می‌دهد، که بیانگر تعامل سطحی پیچیده و اثر متقابل میان ساختار شبکه و گونه‌های یونی موجود است [۵۵].

۲-۳-۱۰ زمان تورم و تعادل تورمی

فرایند تورم اسفنج‌ها و هیدروژل‌های پلیمری متخلخل، که می‌تواند از پلیمرهای طبیعی، مصنوعی یا ترکیبی تشکیل شده باشد، نقش تعیین‌کننده‌ای در جذب و نفوذ آلاینده‌ها دارد. تحلیل ساختار شبکه‌ای این مواد نشان می‌دهد که نوع اتصال‌ها (کووالانسی یا فیزیکی) و چگالی آن‌ها مستقیماً بر زمان رسیدن به تعادل تورمی و به تبع آن عملکرد مکانیکی و واکنش پذیری سامانه اثر می‌گذارد [۵۶]. مطالعات Wang و همکاران [۵۷] روی ستون اسفنجی چندمنظوره

مقاوم و پایدار را دارد. این جوهر شامل ژلاتین، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز و نانوالیاف سیلیکایی بارگذاری شده با Co_3O_4 (CSNFs; Co₃O₄ loaded Silica NanoFibers) است و اسفنج حاصل، موسوم به (GC; Gelatin / CSNFs)، ساختاری متخلخل و شبکه چندمقیاسی دارد که موجب پایداری حرارتی بالا و استحکام مکانیکی چشمگیر می‌شود. نانوالیاف آن از طریق مرکز گریز قابل بازیابی هستند، که این امر رویکرد باز یافت حلقه بسته و کاهش اثرات زیست محیطی را تقویت می‌کند. تحلیل دقیق تر نشان می‌دهد که ابعاد نانویی CSNFs و محبوس سازی نانومقیاس پیوندهای هیدروژنی (H-bond nanoconfinement) باعث ایجاد تداخل فیزیکی در ماتریس اسفنج شده و پایداری ساختاری را بهبود می‌بخشد. با این حال، محدودیت‌هایی همچون مقیاس پذیری تولید و تأثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد اسفنج هنوز نیازمند بررسی‌های تجربی بیشتر است. همچنین، پلی‌یورتان‌های اصلاح شده نیز به عنوان نمونه‌ای از مواد پلیمری مقاوم با پایداری حرارتی و شیمیایی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴۹]. پلیمرهای دارای ساختار متقاطع و افزودنی‌های معدنی (یا بازدارنده‌های شعله)، علاوه بر مقاومت در محیط‌های خورنده، در کاربردهای صنعتی از هوافضا تا تصفیه پساب به کار می‌روند. هر دو سامانه، پایداری و ایمنی را از طریق اصلاح ساختاری و افزودنی‌ها ارتقا می‌دهند؛ با این تفاوت که تمرکز GC بر باز یافت و کاهش اثرات زیست محیطی، و تمرکز PU بر اصلاح شیمیایی و انطباق با اهداف توسعه پایدار است.

۲-۳-۷ خواص الکتریکی سطح

در سال‌های اخیر، فناوری‌های جذب الکتریکی (Electrosorption) و به‌ویژه ظرفیت زدایی خازنی (CDI; Capacitive Deionization) به عنوان راهکارهایی نوین و کم هزینه برای حذف یون‌های فلزی سنگین از پساب‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این سامانه‌ها، مواد پلیمری رسانا و کربنی متخلخل نقش کلیدی در بهبود عملکرد جذب انتخابی دارند، زیرا ساختار متخلخل و رسانایی سطحی بالای آن‌ها موجب افزایش چگالی بار الکتریکی و در نتیجه ارتقای کارایی جذب می‌شود [۵۰]. ترکیب اسفنج‌های پلیمری رسانا با پلیمرهایی نظیر پلی‌آنیلین (PANI) و پلی‌پیرول (PPy) امکان کنترل دقیق بار سطحی را فراهم کرده، به واسطه‌ی تنظیم پتانسیل الکتریکی، ظرفیت جذب الکترواستاتیکی برای یون‌های دو ظرفیتی نظیر Pb^{2+} و Cd^{2+} به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش تقاضا برای مواد پایدار و اقتصادی در حوزه‌های تصفیه محیط زیست و ذخیره انرژی، مواد پلیمری و کربنی متخلخل عملکردی (Functional Porous Polymers and Carbons) جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند [۵۱]. این مواد، با بهره‌گیری از طراحی پیش‌سنتزی و اصلاح پس‌سنتزی منافذ، قابلیت تنظیم دقیق شیمی سطح و اندازه منافذ را دارا هستند که مستقیماً بر ظرفیت جذب و پایداری ساختاری اثر می‌گذارد.

۲-۳-۸ قابلیت باز یافت و احیا

پلی‌یورتان (PU) به دلیل دوام بالا، مقاومت در برابر اسید و قلیا و کاربرد گسترده در صنایع مختلف، به یکی از منابع مهم آلودگی پلاستیکی تبدیل شده است [۵۲]. این واقعیت زیست محیطی، نیاز به توسعه روش‌های پایدار باز یافت اسفنج‌های PU را افزایش داده است. تحلیل مقایسه‌ای روش‌های

توسعه فناوری‌های پایدار ارائه می‌دهد [۶۰].

در فاز عملیاتی، رشد و شکل‌گیری حباب‌ها در پلی‌وینیل الکل (PVA) با استفاده از CO₂ فوق‌بحرانی (scCO₂) به‌عنوان عامل اسفنج‌زا تحت تأثیر عوامل ترمودینامیکی و نفوذ گاز قرار دارد. افزایش نرخ کاهش فشار موجب افزایش چگالی حباب‌ها می‌شود، درحالی‌که اندازه حباب‌ها به گرانروی پلیمر و نحوه انتشار گاز وابسته است. تحلیل‌های عددی و تجربی نشان داده‌اند که تغییرات عوامل ترمودینامیکی نسبت به خواص رئولوژیکی پلیمر اثر بیشتری بر رشد حباب‌ها دارند [۶۱]. طراحی فرایند اسفنج‌سازی باید بر کنترل دقیق فشار، دما و گرانروی تمرکز داشته باشد تا اندازه و توزیع حباب‌ها بهینه شده، عملکرد آن‌ها در کاربردهای صنعتی افزایش یابد [۶۲].

۲-۴-۲ اسفنج‌سازی شیمیایی با عوامل تجزیه‌پذیر

گرمادهی با امواج مایکروویو به‌دلیل توانایی ایجاد گرمایش سریع و یکنواخت، به‌طور فزاینده‌ای در پردازش مواد توجه صنایع را جلب کرده‌است. بااین‌حال، استفاده از مایکروویو در صنعت لاستیک عمدتاً محدود به ولکانش و دی‌ولکانش بوده، کاربرد آن در اسفنج‌سازی بسیار محدود است. در مطالعه‌ای که توسط Zauzi و همکاران [۶۳] انجام شد، رفتار اسفنج‌زایی لاستیک طبیعی (NRF) با استفاده از عامل پف‌زای آزدیکاربامید (ADC) در سه روش حرارت‌دهی - مایکروویو، روش سنتی و روش ترکیبی مایکروویو-همرفت - مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که گرمایش با مایکروویو می‌تواند اسفنج را در کمتر از شش دقیقه تولید کند، اما کیفیت ساختار اسفنج به روش ترکیبی بهینه‌تر است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مایکروویو می‌تواند به‌عنوان جایگزینی سریع و کارآمد برای روش‌های سنتی در تولید اسفنج‌های لاستیکی مطرح شود.

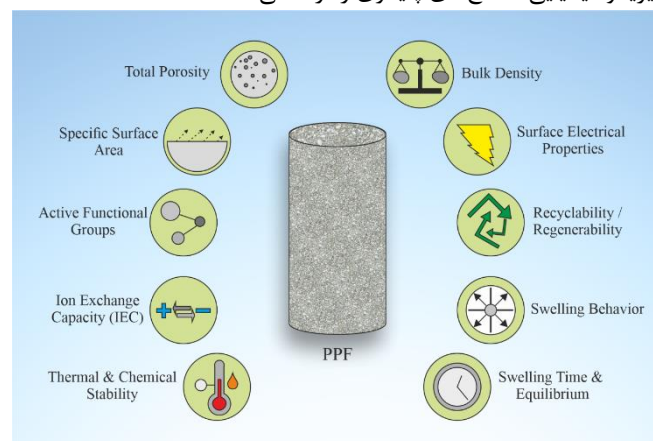
کنترل دقیق غلظت عامل اسفنج‌زا، نرخ گرمایش و ویژگی‌های ترموفیزیکی پلی‌لاکتیک‌اسید، به‌ویژه در فرایندهای اسفنج‌سازی با سیالات فوق‌بحرانی و در حضور پرکننده‌های بهینه، نقش مهمی در ایجاد مورفولوژی یکنواخت، افزایش پایداری ساختاری و بهبود خواص سطحی اسفنج دارد. این بهبودها کارایی جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی را افزایش داده، استفاده پایدار از این اسفنج‌ها را تسهیل می‌کند [۶۴]. اسفنج‌های زیست‌پایه مانند PLA به‌دلیل ویژگی‌های زیست‌سازگاری، وزن کم و امکان اصلاح خواص، به‌عنوان جایگزینی پایدار برای مواد سنتی شناخته می‌شوند. این اسفنج‌ها در حوزه‌های مختلفی کاربرد دارند، از جمله بسته‌بندی محصولات، عایق کاری حرارتی و تصفیه پساب صنعتی [۶۵].

۲-۴-۳ استفاده از قالب‌های سخت و نرم

۲-۴-۳-۱ قالب‌های سخت

استفاده از قالب‌های موقت مبتنی بر ذرات معدنی مانند کلرید سدیم یا سیلیس، روشی سبز برای تولید اسفنج‌های پلیمری با مورفولوژی یکنواخت است. این روش با حذف نیاز به عوامل اسفنج‌زای پیچیده، هزینه‌ها، مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. حذف قالب پس از پلیمری شدن، ساختاری متخلخل با سطح مؤثر بالا ایجاد می‌کند که کارایی جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را بهبود می‌بخشد [۶۶]. در سال‌های اخیر، توسعه ساختارهای متخلخل چندمقیاسی با کنترل دقیق اندازه و توزیع منافذ، امکان طراحی اسفنج‌هایی با ویژگی‌های عملکردی

کیتوسان/سیکلودکسترین/چارچوب فلز-آلی (آلومینیومی (CS/CD/MIL-68(Al))؛ کیتوسان/سیکلودکسترین/میل-68(Al)) ساختار متخلخل و استفاده از شبکه‌های سازمان‌یافته موجب افزایش نرخ نفوذ و جذب آلاینده‌های آب‌دوست و آب‌گریز می‌شود. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که ستون، علاوه بر ظرفیت جذب بالا، پایداری عملکردی مناسبی در چرخه‌های متعدد دارد و توانایی استفاده مجدد حداقل پنج بار بدون افت قابل توجه عملکرد را ارائه می‌کند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده تأثیر مستقیم اندازه منافذ، توزیع گروه‌های فعال سطحی و ساختار شبکه‌ای بر قابلیت بازیافت و دوام عملکرد ستون است. ارتباط بین ساختار شبکه، زمان تورم و ظرفیت جذب نشان می‌دهد که مواد با تعادل مناسب بین انعطاف‌پذیری شبکه و پایداری ساختاری، ظرفیت بیشتری برای حفظ عملکرد در محیط‌های پیچیده دارند؛ بااین‌حال، تأیید عملکرد آن‌ها در محیط‌های با قدرت یونی بالا نیازمند بررسی مستقیم پایداری تورمی، تغییرات اندازه منافذ و دسترسی به مکان‌های فعال است. طرحواره در شکل (۳) انواع ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اسفنج‌های پلیمری را ارائه می‌دهد.



شکل ۳ مرور ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اسفنج‌های پلیمری متخلخل [۳۹،

۴۵، ۵۲، ۵۷]

Figure 3 Overview of the Physicochemical Properties of Porous Polymer Foams [39,45,52,57]

۲-۴-۴ روش‌های تهیه اسفنج‌های پلیمری متخلخل

۲-۴-۴-۱ اسفنج‌سازی فیزیکی با گازهای خنثی

با افزایش توسعه اقتصادی و تشدید نگرانی‌های محیط‌زیستی، حرکت به سمت شیمی سبز بیش‌ازپیش ضرورت یافته است. در این راستا، فناوری اسفنج‌سازی فوق‌بحرانی با بهره‌گیری از گازهای CO₂ و N₂ فوق‌بحرانی، امکان تولید اسفنج‌های پلیمری پایدار را با حداقل تأثیرات زیست‌محیطی فراهم می‌کند [۵۸]. اگرچه این فناوری در برخی صنایع به‌کار گرفته شده‌است، اما کاربرد آن در مقیاس صنعتی هنوز با محدودیت‌های فنی و اقتصادی مواجه است و نیازمند توسعه و بهینه‌سازی بیشتر است [۵۹]. پردازش نوین پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) با استفاده از گازهای فشار بالا، امکان تولید ساختارهای متنوعی مانند اسفنج، آئروژل، داربست و ذرات را فراهم می‌آورد. این فرایندها نه‌تنها انرژی کمتری مصرف می‌کنند، بلکه امکان کنترل دقیق‌تر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ماده را نیز می‌دهند. این رویکرد سبز، علاوه بر افزایش کارایی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی، بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر و تصفیه آب دارد و توانایی بالایی برای

دقیق ساختار و خواص اسفنج‌های پلیمری، توسعه مواد چندمنظوره را برای کاربردهای صنعتی، زیست‌محیطی و دارویی ممکن می‌سازد.

۲-۴-۵ پلیمری‌شدن در محیط متخلخل

پلیمری‌شدن در قالب‌های ساختارمند، به‌ویژه قالب‌های آلومینای آندی‌شده (AAO)، روشی دقیق برای سنتز پلیمرهای متخلخل با کنترل معماری و تخلخل است. در این فرایند، مونومرها در منافذ نانومقیاس قالب جای‌گذاری شده و طی پلیمری‌شدن درجا، شبکه‌های پلیمری با نظم فضایی بالا و توزیع یکنواخت ایجاد می‌شوند. ساختار نانومتخلخل حاصل، به‌دلیل محدودیت فضایی، مسیر واکنش، سینتیک و رشد زنجیره‌های پلیمری را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از کopolymerهای بلوکی در این سامانه‌ها، امکان تنظیم اندازه، جهت‌گیری و پیوستگی حفرات را فراهم کرده و خودآرایی مولکولی درون منافذ را تقویت می‌کند. رویکردهای ترکیبی اخیر، موجب توسعه مواد با سطح ویژه بالا، نفوذپذیری قابل‌کنترل و پایداری حرارتی شده‌اند. این ویژگی‌ها پلیمرهای AAO را به گزینه‌ای مؤثر برای کاربردهای تصفیه آب، ذخیره‌سازی انرژی و سامانه‌های غشایی تبدیل کرده‌است. مطالعات سینتیکی، مدل‌سازی فرایند و تحلیل سازوکارهای رشد زنجیره، درک عمیق‌تری از رفتار پلیمری‌شدن در فضای محدود فراهم کرده‌اند. با وجود پیشرفت‌ها، چالش‌هایی مانند کنترل مورفولوژی در ابعاد زیر ۱۰ نانومتر، یکنواختی واکنش در مقیاس بزرگ و پایداری مکانیکی ساختارهای متخلخل همچنان مطرح است. بررسی این چالش‌ها می‌تواند طراحی مواد پلیمری هوشمند را تسهیل کرده و نقش پلیمری‌شدن در محیط‌های متخلخل را به‌عنوان راهبردی در مهندسی مواد تثبیت کند [۷۲].

۲-۴-۶ ساخت و تولید افزایشی اسفنج‌های متخلخل

در سال‌های اخیر، فناوری ساخت و تولید افزایشی (Additive Manufacturing) به‌عنوان رویکردی تحول‌آفرین، امکان مهندسی ساختارهای متخلخل با دقت هندسی بالا و قابلیت تنظیم تخلخل در مقیاس‌های میکرو و نانو را فراهم کرده‌است. ترکیب هم‌زمان فرایند اسفنج‌سازی و ساخت و تولید افزایشی، بستر جدیدی برای تولید اسفنج‌های چندمنظوره ایجاد کرده که می‌تواند جایگزینی کارآمد برای فناوری‌های سنتی نظیر اسفنج‌سازی تزریقی باشد [۷۳]. چاپ سه‌بعدی (3D-Printing) غشاهای صافی‌های پلیمری یا زیست‌پلیمری با طراحی دیجیتال حفره‌ها از طریق CAD و ساختارهای چندمقیاسی، می‌تواند زمینه‌ساز مهندسی جریان، کاهش بالقوه گرفتگی (Fouling) و ارتقای شار عبوری (Flux) باشد [۷۴]. این روش نه‌تنها امکان بهبود انتقال جرم درون غشا را فراهم می‌کند، بلکه قابلیت تولید ماژول‌های صافش با ساختارهای پیچیده و تنظیم‌پذیری عملکرد را نیز ایجاد می‌کند.

در یکی از مطالعات که توسط Fijol و همکاران [۷۵] انجام گرفت، صافی‌های زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر با استفاده از چاپ سه‌بعدی به روش مدل‌سازی ترسیب ذوبی (Fused Deposition Modeling (FDM)) ساخته شدند. این کامپوزیت‌ها از طریق کامپوزیت‌های پلی‌لاکتید (PLA) تقویت‌شده با نانوالیاف سلولز اکسیدشده (TCNF) و نانوالیاف کیتین (ChNF) ساخته شدند. این کامپوزیت‌ها از طریق فرایند چهاربخشی شامل اختلاط مذاب، جداسازی فاز (TIPS) و Thermally Induced Phase Separation، خشک‌کردن انجمادی و

پیشرفته را فراهم کرده است. روش‌های سنتز پایین‌به‌بالا (Bottom-up) و بالا‌به‌پایین (Top-down) به همراه مهندسی واسطه‌ها و فنونی مانند انحلال ذرات کوچک‌تر و رشد ذرات بزرگ‌تر برای بهینه‌سازی ساختار منفذی (Oswald Ripening) و اثر Kirkendall ایجاد حفرات داخلی از طریق تفاوت در نرخ نفوذ متقابل اتم‌ها، امکان ایجاد ساختارهای پیچیده‌ای؛ مانند پوسته-زرده‌ای، چندلایه و شاخه‌ای را فراهم کرده‌اند [۶۷]. این رویکردها با ایجاد ویژگی‌های میکرومحیطی متنوع، امکان کنترل اثرات هم‌افزایی منافذ، غنی‌سازی موضعی و تقویت میدان محلی را فراهم می‌کنند؛ این ویژگی‌ها عملکرد اسفنج‌ها را در کاتالیز، ذخیره انرژی، مهندسی بافت و صافش نوین بهبود می‌بخشند.

۲-۳-۴-۲ قالب‌های نرم

در قالب‌گیری نرم، فناوری‌های نوینی مانند امولسیون‌ها و سامانه‌های خودآرا برای خلق اسفنج‌های پلیمری متخلخل به کار می‌روند که با کنترل دقیق اندازه و توزیع منافذ، ساختارهایی سبک، پرکاربرد و دوستدار محیط‌زیست می‌سازند. این اسفنج‌ها، با داشتن سطح ویژه بالا و قابلیت دسترسی بهینه به منافذ، در جذب و حذف آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی بسیار مؤثرند. پیشرفت‌های اخیر در نانوامولسیون‌های پایدار، امکان تنظیم دقیق عوامل سنتز را فراهم کرده و ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی این اسفنج‌ها را بهبود بخشیده‌است. علاوه بر این، بازیافت‌پذیری و دوام بالا، استفاده از این مواد را در تصفیه‌های پیشرفته صنعتی و محیط‌زیستی تضمین می‌کند. با توجه به این مزایا، قالب‌گیری نرم به‌عنوان روشی پایدار و کارآمد در تولید جاذب‌های زیست‌پایه مطرح است که آینده‌ای روشن در حفاظت از محیط زیست دارد [۶۸، ۶۹].

۲-۴-۴ خشک‌کردن انجمادی

خشک‌کردن انجمادی به‌عنوان روشی پیشرفته و مؤثر برای تولید اسفنج‌های پلیمری متخلخل با چگالی کم شناخته می‌شود، که ساختار سه‌بعدی و ویژگی‌های عملکردی مواد را به‌خوبی حفظ می‌کند [۷۰]. این فرایند شامل مراحل انجماد سریع نمونه و سپس حذف حلال از طریق تصعید در شرایط خلأ است. قابلیت سازگاری با مواد حساس به حرارت و توانایی حفظ خواص فیزیکوشیمیایی، این روش را به گزینه‌ای ایده‌آل در صنایع دارویی، زیست‌داروسازی (Biopharmaceutics) و محیط‌زیستی تبدیل کرده‌است. با وجود این، تنش‌های ایجاد شده در طول فرایند ممکن است باعث ناپایداری‌های شیمیایی و فیزیکی شود، بنابراین انتخاب افزودنی‌های مناسب و بهینه‌سازی عوامل فرایندی، نقشی حیاتی در دستیابی به اسفنج‌ها و آئروژل‌های با کیفیت بالا دارد.

پارامترهای کلیدی مانند نوع پلیمر، سرعت و جهت‌گیری انجماد و ترکیب مواد افزودنی، تأثیر بسزایی بر مورفولوژی، تخلخل، خواص مکانیکی و ظرفیت جذب اسفنج‌های پلیمری دارند. به‌عنوان مثال، سنتز آئروژل‌های هیبریدی PVA / نانوالیاف سلولزی / ژلاتین با استفاده از خشک‌کردن انجمادی، شبکه‌ای سه‌بعدی، پایدار و با استحکام مکانیکی بالا ایجاد می‌کند. افزودن ژلاتین به‌عنوان عامل پیونددهنده باعث افزایش چشمگیر مدول کشسانی و مقاومت فشاری اسفنج‌ها شده، استحکام آن‌ها را تا چندین برابر افزایش می‌دهد [۷۱]. خشک‌کردن انجمادی روشی سبز است که با مهندسی

نقش مهمی در بهبود عملکرد انتخابی دارند. اسفنج‌های مسی اصلاح‌شده با ترکیبات تیولی پس از تیمار شیمیایی و فراصوت، ویژگی‌های فوق‌آب‌گریز و روغن‌دوست چشمگیری نشان داده‌اند [۷۸]. ترکیب اسفنج‌ها با نانوالیاف پلی‌استایرن الکتروریسی‌شده، به تولید سازه‌های سبک نظیر قایق و کیسه‌های رشته‌ای با کارایی بالا در جمع‌آوری آلودگی‌های نفتی منجر شده است. این هم‌افزایی میان مواد فلزی و پلیمری، رویکردی کارآمد در طراحی جاذب‌های چندمنظوره است.

در زمینه مواد زیست‌پایه، فرایند اسفنج‌سازی گازی به‌عنوان روشی سبز برای تولید میکروالیاف توخالی پلیمری معرفی شده است. الیاف پلی‌کاپرولاکتون (PCL) تولیدشده با این روش، ضمن حفظ ساختار و مورفولوژی، قابلیت ذخیره و آزادسازی تدریجی ترکیبات دارویی را دارند [۷۹]. این ساختارها قابلیت استفاده هم‌زمان در سامانه‌های دارورسانی و جذب آلاینده‌های زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند. همچنین، فیلم مرکب گرافن و پلی‌متیل متاکریلات (GF) تهیه‌شده از طریق الکتروریسی، به‌عنوان جاذب خورشیدی کارآمد در تبخیر بین‌سطحی معرفی شده است [۸۰]. ترکیب این فیلم با اسفنج پلی‌پورتان برای انتقال آب و اسفنج پلی‌استایرن به‌عنوان عایق حرارتی، سامانه‌ای سبک، پایدار و اقتصادی ایجاد می‌کند که توانایی حذف مؤثر آلاینده‌های فلزی و آلی را دارد. در جدول (۱)، ارتباط میان نوع معماری تخلخل، روش‌های ساخت، و عملکردهای کلیدی اسفنج‌های پلیمری در جذب و تصفیه آلاینده‌ها خلاصه شده است. این جدول به‌طور نظام‌مند نشان می‌دهد که چگونه طراحی چندمقیاسی تخلخل می‌تواند بر رفتار انتقال جرم، انتخاب‌پذیری و پایداری عملکردی این مواد تأثیر بگذارد.

اکستروژن تک‌پیچ به فیلدهای چاپی تبدیل شدند. ساختارهای استوانه‌ای و ساعت‌شنی حاصل، ضمن ارائه مقاومت مکانیکی بالاتر نسبت به PLA خالص، شار آب بیشتر و ظرفیت جذب قابل‌توجهی در حذف یون‌های مس و میکروپلاستیک‌ها از خود نشان دادند. پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه‌بعدی غشاها و صافی‌ها امکان تولید اجزایی مانند جاذب‌ها، حامل‌های زیست‌پایه و کاتالیزورها با ساختارهای دقیق، تخلخل کنترل‌شده و سطوح عملکردی بالا را فراهم کرده است. به‌ویژه، این فناوری در نمک‌زدایی، جداسازی آب از روغن و حذف آلاینده‌های فلزی و آلی عملکردی فراتر از روش‌های متداول نشان داده است [۷۶]. ترکیب مواد زیست‌پایه با فرایندهای ساخت و تولید افزایشی، بستری پایدار و قابل‌تنظیم برای توسعه صافی‌های هوشمند و مقرون‌به‌صرفه فراهم می‌کند که می‌تواند گامی مؤثر در جهت دستیابی به سامانه‌های تصفیه آب پایدار و چرخه‌ای باشد.

۲-۴ الکتروریسی فازی برای اسفنج‌های نانومتخلخل

تبخیر بین‌سطحی خورشیدی راهکاری برای مقابله با کم‌آبی است، اما اتلاف حرارتی رسانی، بازده آن را محدود می‌کند. ساختارهای نانومتخلخل چندلایه با تمرکز حرارتی، بهره‌وری انرژی را بهبود می‌بخشند. در این راستا، یک تبخیرکننده خودشناور با ساختار Janus از نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل (PAN) (تولیدشده به‌وسیله اسفنج‌سازی گازی و پوشش پلی‌پیرول) توسعه یافته است [۷۷]. در این سامانه، لایه زیرین آب‌دوست، جریان موینگی را تأمین کرده و لایه فوقانی آب‌گریز، با جذب نور خورشید، آن را به گرما تبدیل می‌کند. همچنین، حباب‌های ریز درون ساختار اسفنجی، هدایت حرارتی را کاهش و پایداری مکانیکی را افزایش می‌دهند. در حوزه جداسازی روغن و آب، اسفنج‌های فلزی با ترشوندگی کنترل‌شده

جدول ۱ همبستگی بین معماری تخلخل و کارایی عملکردی در اسفنج‌های پلیمری برای جذب و تصفیه آلاینده‌ها

Table 1 Correlation between Porous Architecture and Functional Performance of Polymeric Foams for Pollutant Adsorption and Purification

Porous Architecture Type	Structural-Functional Attribute	Representative Material System	Design and Fabrication Approach	Functional Effect	References
Microporous structure	Small interconnected pores enabling rapid organic pollutant uptake	Polyurethane foam loaded with TiO ₂ for textile dye purification	Nanoparticle incorporation for improved photocatalytic efficiency	Enhanced dye adsorption and photocatalytic degradation via high surface reactivity	[21, 22, 29]
Mesoporous framework	Meso-sized pores (2–50 nm) suitable for storage and catalytic processes	PS foam templated with ZnO	Controlled synthesis via nanostructured templates	Improved catalytic and sorption performance via optimized pore geometry	[23, 30, 32]
Macroporous network	Large pores (>50 nm) enhancing evaporation and water transport	FMXM composite with Ti ₃ C ₂ using melamine template	3D structuring via sacrificial templating	Facilitated liquid transport and evaporation through interconnected macropores	[32, 34, 36]
Hierarchical porous architecture	Multi-scale pores enabling rapid transfer and selective adsorption	Monolithic COFs and PolyHIPE-based materials	Hierarchical architecture integration with PolyHIPE	Selective adsorption and rapid mass transfer across pore scales	[34, 36, 39]

Functionalized porous network	High SSA, total porosity, and functional groups enhancing adsorption	MF@PCP and CPPF composites	Surface functionalization and active group grafting	Expanded adsorption via high SSA and active functional sites	[44-46]
Ion-Exchange and Electrical Surface Properties	Reflects ion-uptake efficiency and charge-selective transport behavior	PU combined with PANI / PPy	Incorporation of conductive polymers with functional nanoparticles	Enhances ion selectivity and charge-transfer efficiency	[47, 50, 51]
Thermal/Chemical Stability and Recyclability	Maintains cyclic performance and chemical integrity under corrosive exposure	PU and nanocellulose-based aerogels	Hybridization through nanoparticle integration and network tailoring	Ensures high structural stability and reusability under harsh environments	[48, 49, 52]
Swelling Behavior and Dynamics	Swelling kinetics governed by ionic concentration and crosslink density	CS/CD/MIL-68(Al) composites	Network engineering employing superabsorbent agents	Enables tunable swelling and regulated water uptake	[54, 55, 57]
Foaming Techniques (Physical, Chemical, and Template-Based)	Morphological and porosity control achieved via process parameter tuning	scCO ₂ , NRF + ADC, mineral particles or emulsion templating	Optimization of foaming parameters using environmentally friendly techniques	Facilitates precise morphology control and sustainable foam fabrication	[59, 63, 66]
Advanced Fabrication Technologies (Freeze-Drying, 3D Printing, Electrospinning)	Fabrication of nanostructured foams exhibiting tunable 3D architectures	PVA/gelatin aerogels, PLA filters, PAN-based foams	Integration of advanced multi-fabrication strategies	Yields high-performance foams with tailored porosity and multifunctionality	[70, 72, 77]

۳-۱ جذب آلاینده‌های آلی

فوم‌های پلیمری متخلخل، نظیر اسفنج‌های زیست‌پایه و کامپوزیتی، با ساختار سه‌بعدی متصل و سطح ویژه بالا، بستری مناسب برای حذف آلاینده‌های آلی از محیط‌های آبی هستند. ترکیب این اسفنج‌ها با افزودنی‌های معدنی یا الیاف غیربافته، موجب اصلاح مورفولوژی سلولی، افزایش استحکام مکانیکی و بهبود برهم‌کنش‌های سطحی می‌شود. تنظیم دقیق اندازه سلول، یکنواختی منافذ و ماهیت گروه‌های عاملی سطحی، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش ظرفیت جذب دارد. رفتار جذب این اسفنج‌ها اغلب با مدل‌های هم‌دما لانگمویر، فروندلیچ و سینتیک مرتبه دوم توصیف شده که نشان‌دهنده‌ی سازوکار جذب چندمرحله‌ای و وابسته به سطح است. اسفنج‌های پلی‌یورتان تقویت‌شده با الیاف نایلونی و ترکیبات ملایم-بنتونیت، در حذف ترکیبات آلی و یون‌های فلزی کارایی بالایی دارند [۸۳].

۳-۱-۱ جذب فیزیکی

اسفنج‌های پلیمری متخلخل، از جمله تانین- و لیگنین- فورانیک، به دلیل ظرفیت بالای جذب طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها، توجه ویژه‌ای در تحقیقات علمی و کاربردهای صنعتی جلب کرده‌اند [۸۴]. بررسی سازوکار جذب نشان می‌دهد که بخش فلاونوئیدی در تعامل با آلاینده‌ها نقش محوری دارد و ساختار شیمیایی جاذب‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که امکان بازیابی آسان و استفاده مجدد فراهم شود. روش‌های سنتی تصفیه آب، شامل

انتخاب روش تهیه اسفنج تنها مبتنی بر ظرفیت جذب نیست؛ هزینه تولید، پیچیدگی فرایند، مصرف انرژی و مقیاس‌پذیری نیز اهمیت دارند. مطابق جدول (۲)، روش‌های اسفنج‌سازی شیمیایی و فیزیکی به‌دلیل زمان کوتاه، هزینه کمتر و سازگاری با تولید انبوه، مناسب‌ترین گزینه‌ها برای مقیاس‌های بزرگ هستند. در مقابل، روش‌هایی نظیر خشک‌کردن انجمادی، چاپ سه‌بعدی و الکتروریسی، ضمن کنترل دقیق‌تر ساختار، به‌دلیل فرایندهای چندمرحله‌ای، هزینه تولید بالاتری دارند. لذا برای تصفیه صنعتی آب‌وفاضلاب، اسفنج‌سازی فیزیکی یا شیمیایی با اصلاح سطحی، موازنه بهینه عملکرد جذب، هزینه و مقیاس‌پذیری را ایجاد می‌کند.

۳ سازوکار جذب

جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی توسط اسفنج‌های پلیمری متخلخل، حاصل تعامل سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی است. ساختار سه‌بعدی، سطح ویژه بالا و گروه‌های عاملی فعال اسفنج، جذب مولکول‌های آلی و برهم‌کنش‌های الکترون‌دهنده-گیرنده را تسهیل می‌کند. توزیع و اندازه منافذ و ویژگی‌های سطحی بر کارایی جذب اثر مستقیم دارند؛ بهینه‌سازی فرایند حذف با کنترل pH، دما و زمان تماس امکان‌پذیر است. استفاده از اسفنج‌های اصلاح‌شده و بازیافتی، ظرفیت جذب و پایداری چرخه‌ای را افزایش داده و رویکردی پایدار و اقتصادی برای تصفیه پساب‌های صنعتی محسوب می‌شود [۸۱، ۸۲].

به صنعتی همچنان چالش برانگیز است؛ زیرا حفظ بازده جذب در شرایط واقعی و کنترل هزینه‌های تولید، نیازمند طراحی ساختارهایی با پایداری و قابلیت بازیافت بیشتر است.

در میان این سامانه‌ها، هیدروژل‌های پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به‌عنوان جاذب‌های دوستدار محیط‌زیست، توانسته‌اند در حذف رنگ‌های آلی، کارایی بالایی نشان دهند. مطالعات اخیر تأکید دارد که نوع عامل منفذساز معدنی مانند CaCO_3 یا Na_2SO_4 نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری شبکه و خواص مکانیکی هیدروژل دارد [۸۹]. این عوامل با تغییر تراکم و هندسه منافذ، رفتار جذب را از حالت فیزیکی صرف به جذب ترکیبی فیزیکی-شیمیایی تبدیل می‌کنند و در نتیجه انتخاب‌پذیری سامانه را بهبود می‌بخشند.

افزون بر این، اسفنج‌های زیست‌پایه پلی‌یورتان غنی‌شده با باقی‌مانده‌های کاتالیزورهای صنعتی، راهکاری نوین برای حذف آلاینده‌های آلی و به‌ویژه آفت‌کش‌ها ارائه کرده‌اند. افزایش غلظت کاتالیزور موجب تقویت نواحی فعال سطحی و بهبود تعامل جاذب-جذب‌شونده می‌شود [۹۰]. به‌طور کلی، هر یک از سامانه‌های جاذب - از ایروژل‌ها تا پلیمرهای پشتیبان و اسفنج‌های زیست‌پایه - رویکردی متفاوت اما مکمل برای ارتقای کارایی جذب ارائه می‌کنند. وجه مشترک آن‌ها در طراحی ساختارهای متخلخل با سطح ویژه بالا و شیمی سطح قابل کنترل است، درحالی‌که چالش اصلی در تبدیل این عملکرد به مقیاس صنعتی پایدار نهفته است.

رسوب‌دهی شیمیایی و غشاهای اغلب با محدودیت‌هایی نظیر تولید زباله شیمیایی و ظرفیت جذب محدود، مواجه هستند [۸۵]. در مقابل، پلیمرهای آلی متخلخل (POPs) با قابلیت تنظیم عملکرد حفره‌ها و ترکیب کاملاً آلی، راهکاری انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که طراحی مواد با قابلیت سفارشی‌سازی عملکرد جذب، نه‌تنها بهره‌وری فرایند را افزایش می‌دهد، بلکه امکان تطبیق با طیف متنوعی از آلاینده‌ها را نیز فراهم می‌آورد. تحقیقات اخیر در زمینه POP-T ها نشان می‌دهد که طراحی دقیق نسبت مونومرها و ساختار حفره‌ها به عملکرد برجسته این جاذب‌ها منجر می‌شود [۸۶]. انتخاب هوشمندانه ترکیب مونومر و توجه به ویژگی‌های ساختاری مانند تخلخل و آب‌گریزی، توانسته است برتری قابل توجهی نسبت به نمونه‌های مشابه ایجاد کند.

ایروژل‌ها با ساختار سه‌بعدی فوق‌متخلخل، چگالی کم و سطح ویژه بالا، در عایق‌کاری، کاتالیز، دارورسانی و تصفیه محیط‌زیست کاربرد گسترده‌ای دارند. ایروژل‌های بر پایه اکسیدگرافن، سلولز، کیتوسان و سیلیکا در حذف رنگ‌های آلی، یون‌های فلزی و ترکیبات آلی فرار کارآمد هستند [۸۷]. این کارایی عمدتاً به ترکیب ساختار متخلخل و شیمی سطحی قابل تنظیم آن‌ها نسبت داده می‌شود. بااین‌حال، هزینه بالای تولید و شکنندگی مکانیکی از موانع اصلی توسعه صنعتی این مواد به شمار می‌آید.

در کنار ایروژل‌ها، پلیمرهای پشتیبان متخلخل نیز به‌عنوان جاذب‌های نوین در تصفیه آب مطرح شده‌اند. پایداری شیمیایی، سطح ویژه زیاد و قابلیت اصلاح‌پذیری بالا، آن‌ها را به گزینه‌ای کارآمد در جذب آلاینده‌های آلی تبدیل کرده‌است [۸۸]. بااین‌وجود، انتقال این فناوری از مقیاس آزمایشگاهی

جدول ۲ ارزیابی صنعتی روش‌های مختلف تهیه اسفنج

Table 2 Industrial Assessment of Different Foam Preparation Methods

Preparation Method	Material System	Representative Performance Data	Relative Production Cost*	Scalability*	Industrial Assessment	Ref.
Physical foaming (scCO ₂)	PVA/scCO ₂	Bubble nucleation density increases with depressurization rate; morphology controlled by polymer viscosity and CO ₂ diffusion	++	++/+++	Environmentally friendly process with controllable pore structure; requires high-pressure equipment for industrial implementation	[61]
Chemical foaming (ADC, microwave-assisted)	Natural rubber/ADC foam	Uniform foam formation within < 6 min using microwave or combined microwave-convection heating	+	+++	Rapid and cost-effective process suitable for large-scale foam production; requires control of foaming agent decomposition products	[63]
Freeze-drying	PVA/CNF/Gelatin aerogel	Compressive modulus ≈ 1.65 MPa ($\approx 8\times$ higher than PVA/CNF and $\approx 91\times$ higher than pure CNF aerogel)	+++	++/+	Produces highly stable porous structures but involves energy-intensive and time-consuming processing	[71]

3D printing (FDM + TIPS + freeze-drying)	PLA/TCNF and PLA/ChNF filters	Cu ²⁺ adsorption capacity: 234 mg g ⁻¹ (TCNF) and 208 mg g ⁻¹ (ChNF); microplastic removal up to 54%	+++ / ++	++	Excellent structural designability and adsorption performance; multi-step fabrication increases production cost	[75]
Gas-foamed electrospun Janus structure	PAN foam@PPy evaporator	Hierarchical micro/macro-porous structure for thermal insulation and water transport in solar interfacial evaporation	+++ / ++	++ / +	Promising for solar desalination systems but relies on specialized electrospinning and coating steps	[77]
Chemical modification + electrospinning	Cu foam + PS fibers	Superhydrophobic surface with water contact angle ≈158° and sliding angle <5°	++	++	Highly efficient oil/water separation; requires surface functionalization and metallic foam substrates	[78]
Gas dissolution foaming of electrospun fibers	Hollow PCL microfibers	Drug loading up to 15 wt% with sustained release ≈1.5 days	++	++	Green gas-foaming route to create hollow porous fibers; potential template for adsorbent design	[79]
Electrospun graphene composite with foam support	GF/PMMA + PU sponge + PS foam	Solar absorption ≈92%; removal of >99.9% heavy metal ions and 99.8% organic dyes	++	++	High purification efficiency with reduced graphene usage; promising but requires further scale-up studies	[80]

شده‌اند. ظرفیت جذب این مواد برای یون‌های آرسنیک بالاتر است، درحالی‌که جذب یون‌های سرب به‌دلیل شعاع یونی بزرگ‌تر و چگالی بار کمتر، محدودتر است. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) Computational Fluid Dynamics نشان می‌دهد که ضخامت بهینه جاذب و موقعیت ماده، تأثیر قابل‌توجهی بر بازدهی فرایند جذب دارند و امکان تعیین پارامترهای عملیاتی بهینه برای سامانه‌های تصفیه پساب فراهم می‌شود. تحلیل داده‌های هم‌دمایی با مدل‌های Langmuir و Sips نیز نشان می‌دهد که تعامل بین سطح جاذب و یون‌ها قابل پیش‌بینی و تعمیم‌پذیر است. این رویکرد نوآورانه علاوه بر بهبود عملکرد آزمایشگاهی، قابلیت بالایی برای کاربرد صنعتی و طراحی بهینه سامانه‌های تصفیه آب دارد [۹۳].

۳-۲-۱ کمپلکس‌سازی

کمپلکس‌سازی یکی از سازوکارهای کلیدی و بسیار مؤثر در حذف انتخابی یون‌های فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی است. در این فرایند، یون‌های فلزی از طریق تشکیل پیوندهای کووالانسی یا داتیو-کووالانسی با گروه‌های عاملی فعال سطح جاذب مانند آمین (NH₂-)، تیول (SH-)، هیدروکسیل (OH-) و فسفات (PO₄³⁻-) به‌صورت پایدار تثبیت می‌شوند. ساختار سه‌بعدی و سطح ویژه بالای اسفنج‌های پلیمری متخلخل، بستری ایده‌آل برای استقرار این گروه‌های عاملی و افزایش ظرفیت کمپلکس‌سازی فراهم می‌کند. استفاده از پلیمرهای زیست‌پایه و نانوکامپوزیت‌های متخلخل

۳-۲-۲ جذب شیمیایی

در جذب شیمیایی اسفنج‌های پلیمری متخلخل، تعاملات قوی بین گروه‌های عاملی فعال سطحی و آلاینده‌ها نقش کلیدی دارد. برخلاف جذب فیزیکی که مبتنی بر نیروهای ضعیف است، این فرایند شامل پیوندهای کووالانسی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی پایدار است که انتخاب‌پذیری و ظرفیت جذب را افزایش می‌دهد. گروه‌های هیدروکسیل، آمین، کربوکسیل و تیول با فراهم‌سازی مکان‌های واکنش‌پذیر، حذف یون‌های فلزی و ترکیبات آلی را تسهیل می‌کنند [۹۱]. اصلاح سطح با زغال زیستی فعال‌شده (Activated Bio-Char) یا جاذب‌های زیست‌پایه، سطح ویژه و گروه‌های فعال را افزایش داده، جذب را از حالت فیزیکی به شیمیایی-هم‌افزا سوق می‌دهد [۹۲]. تحلیل مدل‌های سینتیکی و هم‌دمایی عملکرد جذب، پایداری و بازیافت جاذب‌ها را روشن می‌کند. ترکیب اسفنج پلیمری و زغال زیستی اصلاح‌شده، راهکاری کارآمد برای جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزی با چشم‌انداز صنعتی پایدار فراهم می‌آورد.

۳-۲-۳ جذب فلزات سنگین

فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، جیوه و آرسنیک به‌دلیل سمیت بالا و پایداری شیمیایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست محسوب می‌شوند. اسفنج‌ها و پلیمرهای متخلخل، به‌ویژه کوپلیمرهای گوگردی متخلخل، به‌عنوان جاذب‌های مؤثر برای این یون‌ها شناخته

زیست‌پایه، علاوه بر افزایش پایداری و زیست‌سازگاری، موجب کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌شود. عملکرد کمپلکس‌سازی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط محیطی مانند pH محلول، غلظت لیگندهای سطحی و حضور یون‌های رقابتی قرار دارد. بنابراین، بهینه‌سازی ساختار سطحی جاذب و تنظیم دقیق شرایط عملیاتی، کلید ارتقای بازده این فرایند در تصفیه پساب‌های صنعتی واقعی محسوب می‌شود [۹۴، ۹۵].

۳-۲ رسوب‌گذاری سطحی

رسوب‌گذاری سطحی روشی تکمیلی برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی است که عمدتاً در محیط‌های قلیایی رخ می‌دهد. در این فرایند، یون‌های فلزی به شکل هیدروکسید یا فسفات‌های نامحلول روی سطح اسفنج پلیمری تثبیت می‌شوند. برهم‌کنش این رسوبات با سطح اسفنج، موجب افزایش زبری و ظرفیت جذب می‌شود. کیفیت رسوب‌گذاری تابع pH، دما و حضور یون‌های مزاحم است. تلفیق جذب سطحی و رسوب شیمیایی، سازوکاری هیبریدی ایجاد می‌کند که کارایی حذف فلزات را ارتقا می‌دهد. همچنین، استفاده از زیست‌رسوب‌گذارهای میکروبی، تثبیت رسوبات هیدروکسیدی و عملکرد جاذب را در تصفیه پساب‌های پیچیده بهبود می‌بخشد [۹۶، ۹۷].

۳-۳ جذب ترکیبی آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین

حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی، یکی از چالش‌های مهم در فرایندهای پیشرفته تصفیه آب به‌شمار می‌رود. این دو دسته آلاینده دارای ویژگی‌های شیمیایی متفاوتی هستند که منجر به تفاوت در سازوکارهای جذب آن‌ها می‌شود. در جذب ترکیبی، رقابت برای مکان‌های فعال سطح جاذب می‌تواند کارایی کلی جذب را تحت تأثیر قرار دهد؛ با این حال، در برخی شرایط، اثرات هم‌افزایی نیز مشاهده می‌شود. در جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین، تعیین دقیق سهم جذب فیزیکی و شیمیایی پیچیده است، زیرا نفوذ در منافذ، برهم‌کنش‌های واندروالسی، پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ ، کمپلکس‌سازی، تبادل یونی و رسوب سطحی ممکن است به‌طور هم‌زمان رخ دهند [۹۸، ۱۰۲]. با این حال، ترکیب روش‌هایی مانند FTIR قبل و بعد از جذب، محاسبه انرژی فعال‌سازی (Ea)، تحلیل‌های سینتیکی و مدل‌سازی هم‌دمای رقابتی یا چندمکانی می‌تواند به شناسایی سازوکار غالب کمک کند. تغییر در باندهای مربوط به گروه‌های عاملی سطحی، افزایش Ea و برازش بهتر مدل‌های شبه‌مرتبه دوم یا هم‌دمای چندمکانی معمولاً بیانگر مشارکت بیشتر برهم‌کنش‌های شیمیایی است، در حالی که مقادیر پایین‌تر انرژی فعال‌سازی و وابستگی بیشتر به سطح ویژه و تخلخل، نقش جذب فیزیکی را برجسته می‌کند [۹۹، ۱۰۴]. با این وجود، در بسیاری از مطالعات، تفکیک کاملاً کمی سهم هر سازوکار، امکان‌پذیر نیست و تحلیل‌ها بیشتر به تعیین سازوکار غالب محدود می‌شوند [۹۸].

طراحی جاذب‌هایی با ساختار و سطح عملکردی مناسب، می‌تواند امکان حذف مؤثر هر دو نوع آلاینده را به‌طور هم‌زمان فراهم آورد. درک دقیق روابط بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی جاذب، نوع آلاینده‌ها و شرایط عملیاتی، نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد این فرایند دارد. از این رو، جذب ترکیبی به‌عنوان رویکردی کارآمد و ضروری در مدیریت پساب‌های

پیچیده صنعتی مورد توجه قرار گرفته است [۹۸].

اگرچه مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و شبه‌مرتبه دوم به‌طور گسترده برای تحلیل فرایندهای جذب، از جمله در جاذب‌های مبتنی بر اسفنج‌های پلیمری، به کار رفته‌اند [۹۱، ۸۳]، این مدل‌ها عمدتاً بر پایه سامانه‌های تک‌جزئی توسعه یافته‌اند. از این رو، کاربرد مستقیم آن‌ها در سامانه‌های جذب هم‌زمان باید با احتیاط تفسیر شود. در حضور هم‌زمان آلاینده‌های آلی و یون‌های فلزات سنگین، رقابت برای مکان‌های فعال و برهم‌کنش بین جذب‌شونده‌ها می‌تواند موجب انحراف از فرضیات مدل‌های کلاسیک شود [۱۰۲، ۹۸]. بنابراین، مدل‌های رقابتی یا چندجزئی، مانند لانگمویر توسعه‌یافته و مدل‌های چندسایتی (multi-site models)، می‌توانند توصیف مناسب‌تری از چنین سامانه‌هایی ارائه دهند [۹۸]. با این حال، کاربرد این مدل‌ها در مطالعات اسفنج‌های پلیمری هنوز محدود است و به دلیل تفاوت در ساختار اسفنج، گروه‌های عاملی، نوع آلاینده و شرایط عملیاتی، نمی‌توان مدلی عمومی را برای همه سامانه‌های جذب هم‌زمان ارائه کرد.

۳-۳-۱ هم‌افزایی اثرات جذب

جاذب‌های پلیمری بر پایه ترکیباتی مانند کیتوسان و پلی‌وینیل‌الکل، به دلیل قابلیت اصلاح ساختاری و حضور گروه‌های عاملی فعال، توانایی حذف مؤثر فلزات سنگین را در محلول‌های آبی دارند. ساختارهای اسفنجی این جاذب‌ها با فراهم کردن سطح ویژه و تخلخل مناسب، شرایط جذب سریع و پایدار را ایجاد می‌کنند. در برخی شرایط، حضور ترکیبات آلی می‌تواند موجب ایجاد مکان‌های فعال جدید بر سطح جاذب شده، ظرفیت و انتخاب‌پذیری آن را در حذف یون‌های فلزی به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۹۹].

پلی‌سولفیدهای حاصل از منابع زیستی، به‌ویژه روغن‌های گیاهی، با ساختار متخلخل و حضور گروه‌های سطحی فعال، توانایی بالایی در حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی دارند. اصلاح این مواد از طریق کنترل ساختار و ترکیب، موجب بهبود سازوکارهای تبادل یونی، کمپلکس‌سازی و جذب فیزیکی می‌شود. این اثرات هم‌افزا در جاذب‌های زیست‌پایه اصلاح‌شده، مانند پلی‌سولفیدهای متخلخل یا نانوسولوز، به شکل برجسته‌تری در ارتقای ظرفیت و انتخاب‌پذیری جذب مشاهده می‌شود [۱۰۰]. اصلاح سطح نانوسولوز با گروه‌های عاملی (کاربوکسیل و آمینو)، تعامل با آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. این اصلاحات ضمن بهبود ظرفیت و کارایی جذب آلاینده‌های آلی و فلزی، پایداری شیمیایی و مکانیکی اسفنج‌های پلیمری را تقویت می‌کند. همچنین، قابلیت بازیافت اسفنج‌ها در چرخه‌های متوالی، دوام و بهره‌وری آن‌ها را در تصفیه آب ارتقا می‌دهد [۱۰۱].

۳-۳-۲ رقابت جذب

فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی می‌توانند به‌طور هم‌زمان با گروه‌های عاملی مشابهی همچون کربوکسیل، آمین و هیدروکسیل بر سطح اسفنج‌های پلیمری متخلخل برهم‌کنش داشته باشند. این هم‌پوشانی در مکان‌های فعال سبب شکل‌گیری رقابت جذب میان آلاینده‌ها می‌شود، به‌ویژه زمانی که اختلاف غلظت میان گونه‌ها قابل توجه باشد. در این شرایط، ساختار متخلخل یکنواخت اسفنج‌ها صرفاً به‌عنوان بستری فیزیکی عمل نمی‌کند، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و جهت برهم‌کنش‌ها دارد. تحلیل داده‌های مربوط به اسفنج‌های سه‌بعدی اکسیدگرافن نشان می‌دهد که ترکیبات فنولی در

از نانوذرات مانند اکسیدگرافن نه تنها موجب افزایش تعداد مکان‌های فعال می‌شود، بلکه به دلیل قابلیت ایجاد برهم‌کنش‌های انتخابی با آلاینده‌ها، می‌تواند رقابت جذب میان گونه‌ها را کاهش دهد و بازده سامانه را ارتقا بخشد [۱۰۶]. تحلیل ساختارهای سه‌بعدی با تخلخل سلسله‌مراتبی و دیواره‌های بلوری نشان می‌دهد که این طراحی سبب ایجاد مسیرهای نفوذ باز و شبکه‌های متصل می‌شود که انتقال جرم را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد. این ویژگی امکان دسترسی بهتر آلاینده‌ها به سطوح فعال را فراهم کرده، باعث افزایش تماس بین فازهای مختلف می‌شود؛ بنابراین، جذب انواع آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین، ترکیبات آلی مقاوم و سایر مواد سمی، با سرعت و بازده بالاتری انجام می‌گیرد [۱۰۷]. علاوه بر این، چنین طراحی‌هایی به کاهش زمان تصفیه، بهبود کارایی فرایند و امکان بازیافت اسفنج‌ها منجر شده، رویکردی پایدار و اقتصادی برای مدیریت آلاینده‌ها ارائه می‌کنند.

افزودن نانوذرات به پلی‌یورتان نیز نه تنها باعث تقویت مکانیکی و پایداری ساختاری ماده می‌شود، بلکه عملکرد آن در شرایط صنعتی و محیطی مختلف را ارتقا می‌دهد. نانوذرات با ایجاد نقاط فعال روی سطح و تقویت پیوندهای داخلی ماتریس پلیمری، مقاومت اسفنج در برابر فشار، کشش و خستگی مکانیکی را افزایش داده، خواص عملکردی مانند جذب آلاینده‌ها، مقاومت حرارتی و ثبات شیمیایی را بهبود می‌بخشند. این اصلاحات زمینه را برای طراحی مواد پیشرفته با ویژگی‌های چندمنظوره شامل جذب، جداسازی و محافظت محیطی فراهم می‌کند و دامنه کاربردهای صنعتی و مهندسی پلی‌یورتان را به‌طور قابل توجهی گسترش می‌دهد [۱۰۸]. ترکیب چارچوب‌های آلی-فلزی (MOFs) با مواد زیست‌توده نیز رویکردی تحلیلی برای ایجاد ساختارهای متخلخل پایدار و مقاوم در برابر حرارت ارائه می‌دهد که ظرفیت جذب و نفوذپذیری را بهینه می‌کند. افزایش سطح تماس و دسترسی به نقاط فعال، امکان جذب مؤثر فلزات سنگین و ترکیبات آلی را فراهم کرده، عملکرد پایدار و طولانی‌مدت در فرایندهای صنعتی و محیطی را تضمین می‌کند. این رویکرد، ضمن ارتقای بهره‌وری تصفیه، مسیر توسعه مواد پایدار و دوستدار محیط‌زیست را هموار می‌سازد و چشم‌انداز نوینی برای مدیریت پایدار آلاینده‌ها ایجاد می‌کند [۱۰۹]. جدول (۳)، راهبردهای طراحی، محدودیت‌ها و ویژگی‌های عملکردی اسفنج‌های پلیمری در حذف آلاینده‌ها را به‌صورت خلاصه ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد چگونه مهندسی تخلخل و اصلاح سطحی می‌تواند کارایی جذب را بهبود بخشد.

۴ انواع اسفنج‌های پلیمری

در این بخش، اسفنج‌های پلیمری بر اساس منشأ ماتریس پلیمری، شامل اسفنج‌های سنتزی و زیست‌پایه، همچنین برخی راهبردهای طراحی عملکردی بررسی شده‌اند. اسفنج‌های سنتزی نظیر پلی‌یورتان و پلی‌وینیل‌الکل با تنظیم ساختار حفره‌ای و شیمی سطح برای حذف آلاینده‌ها بهینه‌سازی می‌شوند [۱۱۰-۱۱۲]. در مقابل، اسفنج‌های زیست‌پایه، مانند کیتوسان و سلولز، به‌واسطه‌ی گروه‌های عاملی فعال، سازوکارهای جذبی متنوعی را ارائه می‌دهند [۱۱۳-۱۱۶]. افزون بر منشأ پلیمری، راهبردهایی مانند تقویت با نانوذرات معدنی [۱۱۷]، طراحی اسفنج‌های هوشمند و چندعاملی [۱۲۰]، تشکیل کامپوزیت‌های MOF-

حضور گونه‌های رقیب، رفتار پیچیده‌ای در ناحیه جامد-مایع از خود بروز می‌دهند که نتیجه تعامل چندگانه‌ی نیروهای واندروالسی، پیوندهای $\pi-\pi$ و برهم‌کنش‌های هیدروژنی است. این نتایج بیانگر آن است که ساختار الکترونی و نظم فضایی منافذ اسفنج می‌تواند سازوکار جذب را از غالب فیزیکی به غالب شیمیایی تغییر دهد و بر گزینش‌پذیری جاذب اثر مستقیم بگذارد [۱۰۲].

ساختارهای پلیمری متخلخل به دلیل ماهیت اسفنجی و سه‌بعدی خود، الگوهای جذب رقابتی مشابهی را نشان می‌دهند که تحت تأثیر ساختار فیزیکی، نوع و توزیع گروه‌های عاملی، و تمایل نسبی آلاینده‌ها به سطح جاذب قرار دارند. با این حال، هنگامی که دو یا چند آلاینده به‌طور هم‌زمان در سامانه حضور دارند، پدیده‌ی تداخل سطحی و اشغال مکان‌های فعال می‌تواند موجب کاهش ظرفیت جذب و افت بازده سامانه شود. مطالعات Ji و همکاران [۱۰۳] بر روی اسفنج‌های سلولزی تقویت‌شده با لیگنین نشان می‌دهد که با وجود کارایی بالا در حذف ترکیبی آلاینده‌ها، عملکرد این مواد در محیط‌های رقابتی کاهش می‌یابد. تبیین این رفتار نشان می‌دهد که عدم توزیع هدفمند گروه‌های عاملی و ناهمگونی سطح، عامل اصلی افت بازدهی است. در نتیجه، طراحی ساختارهای تفکیک‌شده و مهندسی‌شده با توزیع کنترل‌شده‌ی گروه‌های عاملی، راهکاری مؤثر برای کاهش رقابت و افزایش کارایی جذب هم‌زمان است. برای مثال، اسفنج‌های لیگنین/سلولز با سطح فوق‌آب‌دوست و حضور گروه‌های واکنش‌پذیر، توانسته‌اند در حذف ترکیبات رنگی، یون‌های فلزی و حتی جداسازی روغن از پساب‌های صنعتی عملکرد برجسته‌ای از خود نشان دهند.

در ادامه این رویکرد، اصلاح ساختاری و بهینه‌سازی سطح اسفنج‌های جاذب به‌عنوان یکی از مسیرهای کلیدی برای ارتقای انتخاب‌پذیری و کارایی سامانه‌های جذب مطرح شده‌است. این اصلاحات می‌توانند از طریق پوشش‌دهی با نانوذرات، واکنش‌های شیمیایی هدفمند، یا تنظیم هندسه منافذ انجام شوند. یافته‌های پژوهش‌های اخیر روی آئروژل‌های سلولزی با طراحی سبز نشان می‌دهد که افزایش چگالی مکان‌های فعال و کاهش ناهمگونی سطحی می‌تواند نه تنها ظرفیت جذب را افزایش دهد، بلکه رقابت میان آلاینده‌ها را نیز به‌طور معنی‌داری کاهش دهد. نمونه‌ای از این مواد، آئروژل سلولزی اصلاح‌شده با پلیمرهای طبیعی است که عملکرد قابل توجهی در حذف هم‌زمان یون مس و ترکیبات آلی داشته، بدون نیاز به حلال‌ها یا عوامل سمی تولید می‌شود [۱۰۴].

مهندسی نانوتخلخل با افزایش سطح تماس مؤثر و دسترسی به مکان‌های فعال، می‌تواند رفتار رقابتی میان آلاینده‌ها را به نفع گونه‌های هدف تنظیم کند. با این حال، دستیابی به عملکرد بهینه تنها زمانی ممکن است که درک سازوکاری از فرایندهای جذب، ویژگی‌های بین‌سطحی و دینامیک انتقال جرم حاصل شود. چنین درکی، بنیان توسعه مواد پیشرفته با جذب انتخابی بالا را فراهم می‌آورد که می‌توانند در حذف هم‌زمان فلزات سنگین، ترکیبات آلی و آلاینده‌های نوظهور در تصفیه آب نقشی محوری ایفا کنند [۱۰۵].

۳-۳-۳ اصلاح اسفنج برای جذب چندگانه

بهینه‌سازی جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین در اسفنج‌های پلیمری متخلخل نیازمند مهندسی دقیق ساختار و سطح ماده است. استفاده

در جذب آلاینده‌ها از خود نشان می‌دهد: PU به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت ایجاد اسفنج‌های سلولی باز یا بسته، تماس سطحی بالاتر و توانایی جذب انتخابی بیشتر برای آلاینده‌های مختلف فراهم می‌آورد. PVA با گروه‌های هیدروکسیل فعال خود امکان اصلاح سطح و ترکیب با نانوذرات معدنی را دارد که به تنظیم آب‌دوستی یا آب‌گریزی سطح کمک می‌کند. PAAM به واسطه گروه‌های آمیدی، تمایل بیشتری به جذب یون‌های فلزی نشان می‌دهد، درحالی‌که PS به دلیل ماهیت آب‌گریز خود، جذب آلاینده‌های آلی غیرقطبی را تسهیل می‌کند و برای گونه‌های یونی نیازمند اصلاح سطح است. علاوه بر خواص شیمیایی، مهندسی دقیق ساختار حفره‌ای، شامل کنترل اندازه سلول‌ها، نسبت سلول‌های باز به بسته و میزان تخلخل، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش ظرفیت و کارایی جذب دارد [۱۱۱]. اصلاح شیمیایی سطح اسفنج‌های پلیمری، به‌ویژه پلی‌یورتان، با گروه‌های کربوکسیلات یا سولفونیک و اتصال لیگاند‌های نیتروژن‌دار، موجب افزایش بار سطحی و گزینش‌پذیری در جذب آلاینده‌ها می‌شود. ترکیب این اسفنج‌ها با نانومواد کربنی و فلزی، مانند اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی و نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، ساختارهای هیبریدی با ظرفیت جذب بالا و رفتار انتخابی قابل کنترل ایجاد می‌کند. چنین مواد مهندسی‌شده می‌توانند به‌طور هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را از پساب صنعتی حذف کرده و قابلیت احیا و استفاده مجدد قابل‌توجهی داشته باشند [۱۱۲].

Polymer [۱۲۳] و ایجاد ساختارهای چندلایه [۱۲۶] نیز برای ارتقای ظرفیت جذب، گزینش‌پذیری و قابلیت بازیافت مورد توجه قرار گرفته‌اند. این رویکردها با ترکیب کنترل مورفولوژی، اصلاح شیمی سطح و ایجاد عملکردهای پاسخگو، امکان حذف مؤثرتر آلاینده‌های فلزی و آلی را در شرایط پیچیده پساب فراهم می‌سازند.

۴-۱ اسفنج‌های سنتزی با ساختار قابل تنظیم

اسفنج‌سازی فیزیکی با امواج مایکروویو به‌عنوان روشی سریع، اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست، امکان تولید اسفنج‌های پلیمری متخلخل با ساختار قابل کنترل را فراهم می‌آورد. برخلاف روش‌های گرمایشی سنتی که به دلیل گرادیان دما زمان و انرژی زیادی مصرف می‌کنند، استفاده از امواج مایکروویو انتقال حرارت یکنواخت‌تر و زمان فرآوری کوتاه‌تری را فراهم کرده و قابلیت تولید اسفنج‌های همگن با تخلخل قابل پیش‌بینی را میسر می‌سازد. از منظر تحلیلی، این فناوری نه تنها بازده انرژی را افزایش می‌دهد بلکه به دلیل کنترل بهتر بر ساختار سلولی اسفنج، تأثیر مستقیمی بر رفتار جذب آلاینده‌ها دارد و می‌تواند انتخاب بهینه روش اسفنج‌سازی را بر اساس نیازهای کاربردی هدایت کند [۱۱۰].

در زمینه جذب آلاینده‌ها، پلیمرهای سنتزی مانند پلی‌یورتان (PU)، پلی‌وینیل الکل (PVA)، پلی‌آکریل‌آمید (PAAM) و پلی‌استایرن (PS) به عنوان جاذب‌های کارآمد شناخته می‌شوند. تحلیل سازوکاری نشان می‌دهد که هر پلیمر با توجه به ماهیت شیمیایی و ساختاری خود، عملکرد متفاوتی

جدول ۳ سازوکارهای جذب و چالش‌های عملکردی اسفنج‌های فعال (عملکردی)

Table 3 Adsorption Mechanisms and Performance Challenges of Functional Foams

Mechanism	Key Foam Feature	Challenge / Limitation	Strategy / Recommendation	References
Combined physical-chemical adsorption	3D interconnected porous structure with active functional groups	Limited mechanical stability and recyclability	Use of bio-based and polymeric foams for organic pollutant removal	[81, 82], [88], [90]
Chemisorptive uptake	Active functional groups (-OH, -NH ₂ , -COOH)	Capacity loss under competitive adsorption	Bioadsorbent and biochar surface functionalization	[91, 92]
Ligand-mediated complexation	Ligand-functional groups (-SH, -PO ₄ ³⁻)	pH sensitivity and ion interference	Engineering bio-based nanocomposites	[94, 95]
Cooperative adsorption	Chitosan-, PVA-, and nanocellulose-based foams	Complex adsorption pathways	Engineering modified bio-based foams	[99-101]
Site-competition adsorption	Common functional groups (-COOH, -NH ₂ , -OH)	Active site competition	Surface engineering with targeted functional group placement	[102-104]
Multi-functional adsorption	Hierarchical structures incorporating graphene oxide (GO) and metal-organic frameworks (MOFs)	High fabrication cost and process complexity	Green and scalable fabrication of multi-functional foams	[105-107], [109]

متخلخل این اسفنج‌ها سطح تماس ویژه را افزایش داده، موجب بهبود نفوذپذیری و قابلیت احیای مجدد آن‌ها می‌شود؛ عاملی که از منظر پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی حائز اهمیت است. این ویژگی‌ها سبب شده‌اند اسفنج‌های زیست‌پایه به‌عنوان سامانه‌هایی با عملکرد ترکیبی در جذب و احیای آلاینده‌ها مطرح شوند، نه صرفاً مواد جاذب منفعل [۱۱۳]. در مقایسه

۴-۲ اسفنج‌های زیست‌پایه و سازگار با محیط‌زیست

اسفنج‌های زیست‌پایه مبتنی بر پلیمرهای طبیعی، به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی فعال، نه تنها ظرفیت بالایی در جذب آلاینده‌های یونی دارند، بلکه با ایجاد برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و کووالانسی پایدار، سازوکار جذب را به‌صورت مؤثرتری کنترل می‌کنند. ساختار سه‌بعدی

مانند تبادل یونی، کمپلکس‌سازی سطحی و جذب الکترواستاتیکی، کارایی چشمگیری در حذف آلاینده‌های فلزی و آلی از محیط‌های آبی از خود نشان داده‌اند. به‌ویژه، بررسی‌های پارامتری نشان می‌دهد که عوامل آزمایشگاهی مانند pH، غلظت اولیه آلاینده، دوز جاذب و زمان تماس اثر تعیین‌کننده‌ای بر ظرفیت جذب دارند. بهینه‌سازی این پارامترها در طراحی فرایند، نه تنها موجب افزایش بازدهی جذب می‌شود بلکه پایداری و تکرارپذیری عملکرد اسفنج‌های نانوساختار را تضمین می‌کند [۱۱۸].

از میان نانوذرات مغناطیسی، اکسید آهن (Fe_3O_4) جایگاه ویژه‌ای در طراحی اسفنج‌های مغناطیسی دارد. این نانوذرات ضمن ایجاد خاصیت سوپراپارامغناطیس، امکان جداسازی فیزیکی سریع فلزات سنگین از محیط را بدون نیاز به فرایندهای صافش پیچیده فراهم می‌کنند. این ویژگی نه تنها بازدهی فرایند را افزایش می‌دهد، بلکه مصرف انرژی و تولید پسماند ثانویه را کاهش می‌دهد. افزون بر آن، قابلیت بازیافت چندباره بدون افت محسوس در ظرفیت جذب، مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی مهمی برای این نوع جاذب‌ها محسوب می‌شود. از دیدگاه مهندسی محیط‌زیست، چنین سامانه‌هایی نشانگر گذار از مواد جاذب متعارف به سکوها‌های هوشمند با عملکرد ترکیبی فیزیکی-شیمیایی هستند که می‌توانند در سامانه‌های پیشرفته تصفیه آب و فاضلاب صنعتی به کار گرفته شوند [۱۱۹].

با وجود مزایای اسفنج‌های مغناطیسی و نانوکامپوزیتی، رهایش نانوذرات از ماتریس پلیمری در چرخه‌های متوالی جذب - احیا نگرانی مهم زیست‌محیطی است. حفظ بازده جذب پس از چرخه‌های متعدد، مانند گزارش پایداری نانوکامپوزیت مغناطیسی لوفای آکافت‌شده/کبالت فریت ($\text{HLC/CoFe}_2\text{O}_4$)، متشکل از الیاف اسفنجی *Luffa cylindrica* هیدرولیزشده و نانوذرات (CoFe_2O_4) پس از ۸ چرخه، نشان‌دهنده پایداری عملکردی است، اما به‌تنهایی برای تأیید عدم رهایش نانوذرات کافی نیست [۱۱۷]. در منابع مرور شده، داده‌های کمی مستقیم درباره غلظت نانوذرات یا یون‌های آزادشده در پساب تصفیه‌شده محدود است؛ بنابراین، اندازه‌گیری مقدار آهن، کبالت یا سایر اجزای آزادشده با روش‌هایی مانند طیف‌سنجی نشر نوری یا جرمی پلاسمای جفت شده القایی ICP-OES/ICP-MS و ارزیابی ذرات ره‌اشده با روش‌هایی نظیر DLS یا TEM باید در مطالعات آینده به‌عنوان شاخص ضروری برای ارزیابی ایمنی و پایداری این جاذب‌ها در نظر گرفته شود [۱۱۸، ۱۱۹].

۴-۴ اسفنج‌های هوشمند و چندعاملی

اسفنج‌های پلیمری هوشمند با ساختار متخلخل چندعاملی و پاسخ‌دهی به محرک‌هایی مانند pH، دما و میدان مغناطیسی [۱۲۰]، به‌عنوان نسل جدید جاذب‌های پیشرفته در تصفیه پساب‌های صنعتی مطرح شده‌اند. این اسفنج‌ها، با الهام از هیدروژل‌های پاسخگو و شبکه‌های نانوساختاری، امکان حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی و یون‌های فلزات سنگین را فراهم می‌کنند. ادغام نانوساختارهایی مانند سیکلودکسترین و کیتوسان در ماتریس پلیمری، ضمن افزایش چگالی مکان‌های فعال، موجب ارتقای انتخاب‌پذیری، ظرفیت جذب و ایجاد خاصیت ضد میکروبی می‌شود. با این حال، چالش‌هایی چون مقیاس‌پذیری، فروشویی (Leaching) نانوذرات و توازن میان ظرفیت و گزینش‌پذیری، مانع تجاری‌سازی کامل این فناوری است. توسعه‌ی

با اسفنج‌های پلیمری سنتزی، اسفنج‌های زیست‌پایه به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، تجدیدپذیری و هزینه پایین‌تر تولید، گزینه‌ای کارتر برای فناوری‌های سبز محسوب می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که اصلاح ساختار این اسفنج‌ها از طریق پیوندهای درون‌مولکولی و بین‌مولکولی (مانند پیوندهای هیدروژنی و یونی) منجر به بهبود خواص مکانیکی و پایداری حرارتی می‌شود [۱۱۴]. این مواد ضمن حفظ چگالی پایین و ساختار متخلخل خود، قادرند بین پایداری فیزیکی و سازگاری زیستی تعادل برقرار کنند؛ ویژگی‌ای که اسفنج‌های پلیمری متداول فاقد آن هستند.

کیتوسان، مشتق طبیعی کیتین، به‌واسطه‌ی وجود گروه‌های آمینی اولیه، قابلیت تشکیل پیوندهای کووالانسی و یونی با یون‌های فلزی را دارد. این ویژگی، آن را به جاذبی انتخابی برای یون‌های فلزات سنگین مانند Pb^{2+} ، Cu^{2+} و Cr^{6+} تبدیل کرده‌است. با این حال، مطالعات جدید نشان می‌دهد که ترکیب کیتوسان با آلزینات در قالب کمپلکس‌های پلی‌الکترولیتی، نه تنها پایداری ساختاری را بهبود می‌دهد بلکه ظرفیت جذب را نیز افزایش می‌بخشد [۱۱۵]. این تعاملات پلی‌الکترولیتی موجب شکل‌گیری ماتریسی پایداتر و متخلخل‌تر می‌شود که انتقال جرم و کارایی جذب را ارتقا می‌دهد. آلزینات و سلولز، به‌عنوان پلی‌ساکاریدهای طبیعی استخراج‌شده از منابع تجدیدپذیر مانند جلبک‌های قهوه‌ای، علاوه بر زیست‌سازگاری، دارای قابلیت اصلاح‌پذیری بالایی در طراحی اسفنج‌های با تخلخل قابل تنظیم هستند. ترکیب این دو پلیمر در قالب نانوساختارهای متخلخل، امکان جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و معدنی را فراهم می‌کند [۱۱۶]. ساختارهای هیبریدی آلزینات/سلولز نه تنها ظرفیت جذب دوگانه نشان می‌دهند، بلکه پایداری مکانیکی مطلوب و قابلیت بازیافت را نیز به همراه دارند.

۴-۳ اسفنج‌های تقویت‌شده با نانوذرات معدنی

طراحی اسفنج‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات معدنی مغناطیسی به‌عنوان راهبردی مؤثر در تصفیه پساب‌های صنعتی و حذف یون‌های فلزی سنگین مطرح شده‌است. در این سامانه‌ها، تلفیق ساختارهای زیستی آب‌کافت‌شده با نانوذرات اکسیدهای مغناطیسی از طریق فرایند هم‌رسوبی شیمیایی، منجر به تشکیل جاذب‌هایی با سطح ویژه بالا، تخلخل کنترل‌شده و پایداری مکانیکی قابل توجه، می‌شود. این ویژگی‌ها با افزایش تعداد مکان‌های فعال جذب و کاهش احتمال تجمع نانوذرات، موجب ارتقای کارایی و دوام عملکردی جاذب می‌شوند. علاوه بر این، خاصیت مغناطیسی اسفنج‌های هیبریدی امکان جداسازی سریع و بازیافت آسان جاذب از محیط آبی را فراهم می‌سازد، که از نظر بهره‌وری صنعتی و کاهش هزینه‌های عملیاتی اهمیت دارد. این اسفنج‌ها با حفظ کارایی بالا در چرخه‌های مکرر استفاده و عملکرد مؤثر در پساب‌های واقعی، از مرحله‌ی آزمایشگاهی به سمت کاربرد صنعتی قابل اتکا حرکت کرده‌اند. چنین نتایجی بیانگر آن است که اسفنج‌های هیبریدی نه تنها نقش جاذب فیزیکی را ایفا نمی‌کنند، بلکه با ارائه‌ی رفتار شیمی-فیزیکی چندوجهی، سازوکارهای جذب را به‌صورت هدفمند و انتخابی برای یون‌هایی مانند Ni^{2+} کنترل می‌کنند [۱۱۷].

در حوزه‌ی توسعه‌ی نانوجاذب‌ها، نانوذرات معدنی و نانوکامپوزیت‌های چندجزئی به دلیل برخورداری از سطح فعال بالا و سازوکارهای چندگانه

جاذب‌های چندعاملی با پایداری ساختاری بالا، ظرفیت جذب زیاد و قابلیت استفاده‌ی مکرر، جایگاهی ویژه در سامانه‌های پیشرفته‌ی تصفیه‌ی پساب‌های صنعتی پیدا کنند.

۴-۶ طراحی ساختارهای چندلایه و ناحیه‌بندی‌شده برای جذب تفکیکی

فرایند اسفنج‌سازی کامپوزیت‌های پلی‌وینیل‌الکل-ژلاتین تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، با بهره‌گیری از روش اسفنج‌سازی دسته‌ای تحت فشار بالا و استفاده از دی‌اکسید کربن فوق‌بحرانی، امکان طراحی ساختارهای چندلایه با قابلیت جذب تفکیکی را فراهم می‌سازد. افزودن ژلاتین به‌عنوان عامل انعطاف‌دهنده و نانولوله‌های کربنی به‌عنوان عامل هسته‌زایی، قابلیت اسفنج‌سازی پلی‌وینیل‌الکل را به‌طور چشمگیری افزایش داده، موجب تشکیل ساختار سلولی پایدار و یکنواخت شد. تحلیل‌های حرارتی و ساختاری (از جمله DSC) نشان دادند که برهم‌کنش‌های مؤثر میان اجزای کامپوزیت، شرایط ترمودینامیکی مطلوبی برای ایجاد اسفنج‌های متخلخل با توزیع سلولی همگن فراهم می‌سازد [۱۲۶]. تغییر الگوی مورفولوژی از ساختار متراکم به سلول‌های باز و پیوسته، سطح تماس فاز جاذب با محلول را افزایش داده، عملکرد جذب را بهبود بخشید. این تغییر امکان طراحی اسفنج‌هایی با ناحیه‌بندی عملکردی را فراهم می‌کند، به‌گونه‌ای که لایه‌های قطبی برای جذب یون‌های فلزی و لایه‌های آب‌گریز یا آروماتیک برای جذب ترکیبات آلی بهینه‌سازی می‌شوند. چنین معماری چندلایه‌ای با کاهش رقابت آلاینده‌ها برای مکان‌های فعال و بهبود انتقال جرم، موجب افزایش سرعت و ظرفیت جذب می‌شود. کنترل دقیق اندازه و توزیع حفرات، علاوه بر بهینه‌سازی مسیرهای جریان، موجب پایداری و قابلیت بازیافت اسفنج در شرایط صنعتی می‌شود. در نتیجه، این اسفنج‌ها به‌عنوان جاذب‌های نسل جدید، کارایی چندمنظوره‌ای مشابه هیدروژل‌های هوشمند از خود نشان می‌دهند. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر و مقایسه عملکرد عملی اسفنج‌های پلیمری معرفی‌شده، ظرفیت جذب انواع اسفنج‌ها در برابر آلاینده‌های مختلف در شکل (۴) به صورت تفکیک‌شده گزارش شده‌است. این نمودار مقایسه‌ای، داده‌های کمی استخراج‌شده از مطالعات اخیر را برای چهار دسته‌ی اصلی آلاینده‌ها (رنگ‌ها، فلزات سنگین، ترکیبات فنولی و روغن‌ها) نمایش می‌دهد.

فناوری‌های پیشرفته در ساخت اسفنج‌های پلیمری متخلخل، از جمله روش‌های پلیمری‌شدن مرحله‌ای و چاپ سه‌بعدی، امکان طراحی دقیق جاذب‌هایی با کارایی چندگانه را فراهم کرده‌اند. این پیشرفت‌ها، مشابه نوآوری‌های هیدروژل‌های هوشمند، باعث ارتقای قابل‌توجه در حذف ترکیبی آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی شده‌اند [۱۲۷]. افزون بر این، توسعه فناوری‌هایی مانند پلیمری‌شدن مرحله‌ای، چاپ سه‌بعدی و اصلاح سطح هوشمند، امکان طراحی جاذب‌هایی با کارایی تنظیم‌پذیر را فراهم ساخته‌است. این نوآوری‌ها، همسو با پیشرفت‌های اخیر در مهندسی هیدروژل‌ها، نقش مؤثری در حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی دارند. جدول (۴) مروری جامع بر انواع اسفنج‌های پلیمری و زیست‌پایه، سازوکارهای طراحی و عملکرد آن‌ها در حذف آلاینده‌های آلی و فلزی ارائه می‌دهد.

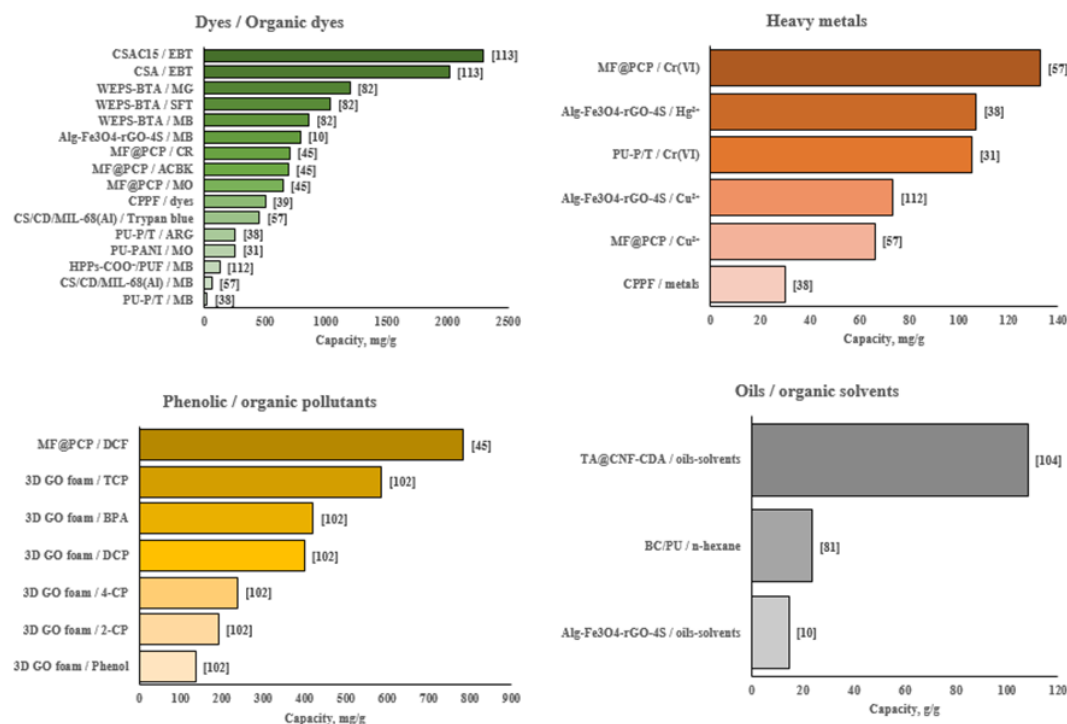
طراحی‌های زیست‌سازگار مبتنی بر پلیمرهای تجدیدپذیر و سامانه‌های مغناطیسی قابل‌بازیافت، به همراه ترکیب اسفنج‌ها با غشاها یا صافی‌های زیستی، راهکارهایی مؤثر برای رفع این محدودیت‌ها محسوب می‌شوند [۱۲۱].

اصلاح ساختار اسفنج‌ها با استفاده از سطح‌فعال‌ها، لیگندهای شلاته‌کننده و نانو ساختارهای افزوده‌شده از طریق پلیمری‌شدن درجا و خودآرایی کنترل‌شده، استحکام مکانیکی، پایداری عملیاتی و حساسیت به محرک‌ها را به‌طور چشمگیری بهبود می‌دهد. این سامانه‌های چندعاملی با تنظیم پویا در پاسخ به تغییرات محیطی، کارایی حذف آلاینده‌های آلی-معدنی را افزایش داده، امکان بازیافت‌پذیری بالا را فراهم می‌سازند. بدین‌ترتیب، اسفنج‌های هوشمند از جاذب‌های منفعل به سامانه‌های هیبریدی تطبیق‌پذیر با عملکرد چندمرحله‌ای در مقیاس صنعتی ارتقا یافته‌اند [۱۲۲].

۴-۵ اسفنج‌های ترکیبی پلیمری- فلزی (کامپوزیت‌های MOF-Polymer)

اسفنج‌های کامپوزیتی مبتنی بر چارچوب‌های آلی-فلزی (MOF-Polymer Composites) به‌عنوان نسل جدیدی از جاذب‌های پیشرفته برای حذف یون‌های فلزی از پساب‌های صنعتی مطرح شده‌اند. ادغام ساختارهای بلوری و متخلخل MOF با شبکه‌های پلیمری، منجر به ایجاد سامانه‌هایی با سطح ویژه‌ی بالا، تخلخل قابل‌تنظیم و تعداد فراوانی از مکان‌های فعال برای جذب انتخابی می‌شود. در مقایسه با MOF های خالص، این کامپوزیت‌ها به‌دلیل هم‌افزایی بین اجزای آلی و معدنی، ظرفیت جذب بالاتر، پایداری شیمیایی و قابلیت کاربرد در محیط‌های پیچیده آبی را ارائه می‌دهند [۱۲۳]. با وجود ویژگی‌های برجسته‌ی MOF ها نظیر ساختار سه‌بعدی منحصربه‌فرد و سطح ویژه‌ی بسیار بالا، شکنندگی ذاتی و محدودیت پایداری مکانیکی، چالش‌های اساسی در کاربرد صنعتی آن‌ها محسوب می‌شود. در این راستا، ترکیب MOF ها با پلیمرهای انعطاف‌پذیر مانند پلی‌پورتان، پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌اکریلونیتریل، رویکردی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی معرفی شده‌است. ماتریس پلیمری ضمن افزایش استحکام و چقرمگی، توزیع یکنواخت ذرات MOF را تسهیل و انتقال جرم را بهبود می‌بخشد، که در نهایت منجر به ارتقای بازده جذب در شرایط عملیاتی متنوع می‌شود [۱۲۴]. افزون بر این، توسعه‌ی دسته‌های مختلفی از نانوکامپوزیت‌های MOF در بستر پلیمرهای گرماسخت و گرمانرم، افق‌های تازه‌ای در حوزه‌هایی نظیر تصفیه آب، ذخیره‌سازی انرژی، جذب گاز و کاربردهای زیست‌پزشکی گشوده‌است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تمرکز آینده‌ی پژوهش‌ها بر طراحی ساختارهای چندکاره و رفع چالش‌های تولید در مقیاس صنعتی معطوف خواهد بود.

اسفنج‌های کامپوزیتی، به‌ویژه نمونه‌های مغناطیسی (MMOFs)، با تلفیق ویژگی‌های ساختاری MOF و خاصیت سوپراپارامغناطیس، عملکردی پایدار در شرایط صنعتی سخت، مانند نوسانات pH و دما، از خود نشان داده‌اند. خاصیت مغناطیسی این سامانه‌ها امکان جداسازی سریع از محیط و بازیافت چندباره‌ی جاذب را بدون افت محسوس در ظرفیت جذب فراهم می‌سازد، که از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی مزیت قابل‌توجهی به شمار می‌رود [۱۲۵]. این ویژگی‌ها سبب شده‌اند تا اسفنج‌های کامپوزیتی به‌عنوان



شکل ۴ مقایسه ظرفیت جذب/جذب‌پذیری اسفنج‌های متخلخل برای آلاینده‌های مختلف

Figure 4 Comparative Adsorption/Uptake Capacities of Porous Foam-Based Adsorbents Toward Different Pollutant Classes

جدول ۴ راهبردهای عملکردی و طراحی اسفنج‌های پلیمری برای حذف هدفمند آلاینده‌ها

Table 4 Functional Strategies and Design of Polymer-Based Foams for Targeted Contaminant Removal

Foam Functional Strategy	Functional Component	Design / Delivery Approach	Targeted Effect	References
Synthetic foams with tunable structures	PS, PAAM, PVA, PU	Controlled cell structuring, surface functionalization, and nanoparticle incorporation	Enhanced removal of organic and metal contaminants	[110-112]
Bio-based and environmentally friendly foams	Chitosan, alginate, cellulose	Fabrication of porous networks via polyelectrolyte complexation	Selective removal of metal ions and organic pollutants with recyclability	[113-116]
Mineral nanoparticle-reinforced foams	Magnetic nanoparticles	Hybrid foam design with stable substrate binding	Selective metal ion capture with high stability and facile separation	[117-119]
Smart and multifunctional foams	Polymer + nanostructures	Multifunctional, stimuli-responsive foam (pH, temperature, magnetic field)	Multi-functional removal of organic and metal pollutants, antimicrobial and recyclable	[121, 122]
MOF-polymer composite foams	MOF + PU/PVA/PAN	Integration of MOFs with polymer matrices with tunable surface area and porosity	Selective adsorption of pollutants with water/gas purification and energy storage potential	[123-125]
Layered and spatially functionalized foams	PVA/gelatin + carbon nanotubes	Layered polar/hydrophobic open-cell foam structures	Enhanced selective pollutant removal with increased adsorption rate and capacity	[126, 127]

ایجاد شبکه‌ای باز، امکان حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی پایدار و فلزات سنگین را از پساب‌های صنعتی فراهم کرده و افت فشار جریان را به حداقل می‌رسانند. کاربرد این اسفنج‌ها در صنایعی چون آبکاری، نساجی و پتروشیمی، رویکردی کارآمد برای ارتقای کیفیت پساب و کاهش اثرات زیست‌محیطی است [۱۲۸]. در میان انواع مختلف اسفنج‌های پلیمری،

۵ کاربردهای صنعتی و نیمه‌صنعتی

۵-۱ پیاده‌سازی در واکنشگاه‌های (Reactors) جذب پیوسته و بستر

ثابت

اسفنج‌های پلیمری متخلخل با ساختار سه‌بعدی، سطح ویژه بالا و استحکام مکانیکی، در طراحی سامانه‌های جذب بستر ثابت کاربرد دارند. این مواد با

اسفنج‌های پلی‌یورتان عامل‌دار که دارای گروه‌های عاملی کاتیونی، آنیونی یا دوگانه هستند، عملکرد قابل توجهی در حذف ترکیبات آلاینده نشان داده‌اند. این ساختارها با فراهم کردن نقاط فعال شیمیایی متنوع، قابلیت جذب هم‌زمان یون‌های فلزی سمی نظیر Pb^{2+} و Cr^{6+} و نیز ترکیبات آلی مقاوم را ایجاد می‌کنند. ویژگی‌های فیزیکی همچون ساختار متخلخل سه‌بعدی، قابلیت تنظیم تخلخل و مساحت سطح ویژه بالا، منجر به افزایش تماس مؤثر بین فاز جامد و مایع و در نتیجه بهبود انتقال جرم در فرایند جذب می‌شود [۱۲۹].

۵-۲ کاربرد در صنایع آبکاری، رنگرزی و پتروشیمی

اسفنج‌های پلیمری متخلخل و نانوکامپوزیتی، به‌عنوان نسل جدیدی از جاذب‌های پیشرفته، نقشی کلیدی در مدیریت پساب‌های صنعتی پیچیده به‌ویژه در صنایع آبکاری فلزات، رنگرزی و پتروشیمی ایفا می‌کنند. ماهیت چندمرحله‌ای و ترکیب شیمیایی متنوع پساب‌های این صنایع-شامل یون‌های فلزی سمی مانند Cu^{2+} ، Ni^{2+} و Zn^{2+} و همچنین ترکیبات آلی پایدار نظیر حلال‌های کلردار و روغن‌های صنعتی-کارایی روش‌های متداول فیزیکی و شیمیایی را محدود کرده‌است. در این میان، اسفنج‌های پلیمری با ساختار سه‌بعدی باز، تخلخل بالا و پایداری مکانیکی مطلوب، محیطی ایده‌آل برای انتقال جرم مؤثر و تماس گسترده بین آلاینده و جاذب فراهم می‌آورند. مطالعات صنعتی، به‌ویژه در حوزه آبکاری، عملکرد پایدار و قابلیت بازیافت این اسفنج‌ها را در مقیاس واقعی تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که این مواد می‌توانند جایگزین کم‌هزینه‌تری برای فرایندهای پیچیده‌تر مانند اکسایش پیشرفته باشند [۱۳۰].

در صنعت رنگرزی، هیدروژل‌های پلیمری اصلاح‌شده با نانوذرات معدنی و کربن فعال، کارایی قابل توجهی در حذف رنگ‌های کاتیونی از محیط‌های آبی از خود نشان داده‌اند. ترکیب پلی‌اکریل‌امید شاخه‌دار شده روی ژلاتین با کربن فعال حاصل از لופا و ساختارهای لایه‌هیدروکسید دوتایی منیزیم-آهن (Mg-Fe LDH)، منجر به افزایش چشمگیر سطح ویژه، تخلخل و پایداری حرارتی جاذب می‌شود. تحلیل رفتار سینتیکی این ترکیبات، تطابق خوبی با مدل شبه‌مرتبه دوم نشان می‌دهد و هم‌دمای لانگمویر بهترین توصیف را از فرایند تعادلی جذب ارائه می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که سازوکار جذب در این سامانه‌ها عمدتاً توسط برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و جذب سطحی یکنواخت هدایت می‌شود. افزون بر این، پایداری قابل قبول در چرخه‌های متوالی، استفاده از این جاذب‌ها را برای کاربردهای صنعتی پیوسته ممکن می‌سازد [۱۳۱]. در حوزه تصفیه ترکیبات رنگ‌زا و فلزات سنگین، اسفنج‌های زیست‌پایه مبتنی بر کیتوسان، به‌ویژه نمونه‌های اصلاح‌شده با گروه‌های آمین و کربوکسیل، عملکردی دوگانه در حذف رنگ‌های کاتیونی و آنیونی از خود نشان داده‌اند. ساختار متخلخل این اسفنج‌ها موجب افزایش سطح تماس و کارایی جذب شده و آن‌ها را به گزینه‌ای پایدار و زیست‌سازگار برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی در سامانه‌های نیمه‌صنعتی تبدیل کرده‌است [۱۳۲]. در صنعت پتروشیمی، استفاده از اسفنج‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات اکسیدی مانند TiO_2 و ZnO به‌دلیل مقاومت حرارتی و شیمیایی بالا، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌است [۱۳۳].

۵-۳ استفاده در سامانه‌های تصفیه پساب معادن و فلزات سنگین

پساب‌های حاصل از استخراج و فرآوری مواد معدنی، به‌ویژه آن‌هایی که حاوی فلزات سنگین سمی نظیر آرسنیک، جیوه، کادمیوم و منگنز هستند، از چالش‌برانگیزترین منابع آلودگی محیطی به شمار می‌روند. این فلزات در شرایط اسیدی پایداری بالایی دارند و حذف هم‌زمان آن‌ها با روش‌های سنتی مانند ته‌نشینی یا تبادل یونی با محدودیت‌های قابل توجهی مواجه است. در سال‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های پلیمری متخلخل (PNCs) به‌عنوان جاذب‌های نوین با ظرفیت جذب بالا، پایداری شیمیایی در محیط‌های خورنده و قابلیت بازیافت، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه زیاد، قابلیت اصلاح شیمیایی و وجود گروه‌های عاملی فعال، موجب افزایش برهم‌کنش الکترواستاتیکی و تشکیل پیوندهای سطحی پایدار میان یون‌های فلزی و ماتریس پلیمری می‌شود که این امر، بازده حذف را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد [۱۳۴].

به‌موازات رشد جمعیت و گسترش صنایع، استفاده از فناوری‌های نانو با رویکردی پایدار و زیست‌سازگار برای احیای محیط‌زیست اهمیت فزاینده‌ای یافته‌است. نانومواد قابل بازیافت با طراحی ایمن و خواص واکنش‌پذیر بالا، امکان توسعه راهکارهای سبز و مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه پساب و احیای زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند [۱۳۵]. از میان روش‌های مختلف، فرایند جذب همچنان کارترین رویکرد برای حذف آلاینده‌های معدنی و آنیونی مانند نیترات و سولفات محسوب می‌شود. بررسی اثر پارامترهای عملیاتی همچون pH، دما و غلظت اولیه آلاینده، راهگشای بهینه‌سازی سامانه‌های تصفیه و طراحی مواد جاذب نسل جدید با عملکرد پایدار و قابل تنظیم است [۱۳۶].

۵-۴ طراحی سامانه‌های چندمرحله‌ای با اسفنج‌های عملکردی متنوع

طراحی سامانه‌های چندمرحله‌ای مبتنی بر اسفنج‌های پلیمری متخلخل، افق جدیدی در بهبود کارایی فرایندهای تصفیه پساب‌های صنعتی گشوده‌است. در این سامانه‌ها، هر مرحله با اسفنج دارای ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی ویژه، به‌صورت انتخابی آلاینده‌ای خاص را جذب می‌کند. به‌عنوان نمونه، اسفنج‌های کربوکسیله یا آمیدی برای جذب یون‌های فلزی و اسفنج‌های آب‌گریز برای حذف ترکیبات آلی آروماتیک به‌کار می‌روند. این طراحی سلسله‌مراتبی، ضمن افزایش انتخاب‌پذیری و کاهش تداخل مولکولی، موجب ارتقای انتقال جرم، جلوگیری از انسداد منافذ و افزایش طول عمر مواد جاذب می‌شود. چنین چارچوبی، بر اساس اصول تشدید فرایند (Process Intensification)، امکان بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و سازگاری پویا با تغییر ترکیب پساب را فراهم می‌کند و در نهایت، منجر به طراحی سامانه‌هایی انعطاف‌پذیر، پایدار و با بهره‌وری انرژی بالا می‌شود [۱۳۷، ۱۳۸].

توسعه اسفنج‌های فتوکاتالیزوری با قابلیت تخریب نوری آلاینده‌های مقاوم و نیز سامانه‌های پلی‌یورتانی اصلاح‌شده با پلی‌ساکاریدها (دارای خواص ضدباکتری و جذب هم‌زمان رنگ‌زاها و فلزات سنگین نظیر مس)، مسیر ساخت جاذب‌های چندمنظوره، زیست‌سازگار و مقیاس‌پذیر را هموار کرده است [۱۳۹، ۱۴۰].

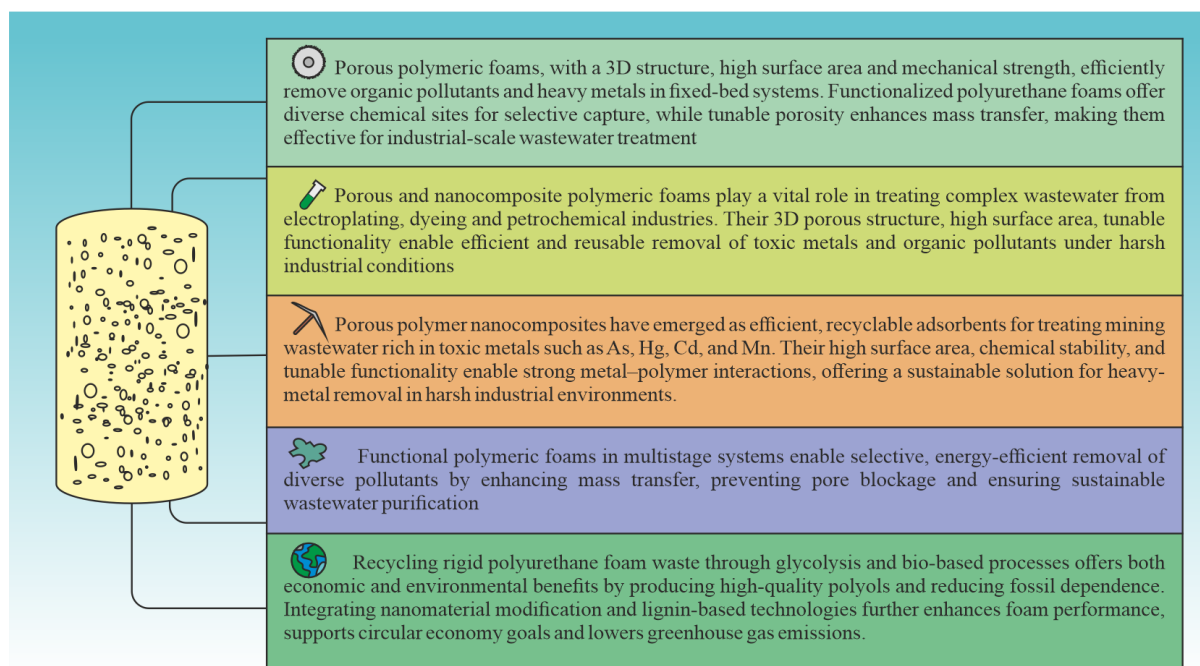
در تولید اسفنج پلی‌یورتان، کربن فعال و الیاف کربنی کاربرد دارند. تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد انتخاب حلال در بازده و پایداری فرایند نقش کلیدی دارد؛ به‌ویژه استفاده از اتانول که علاوه بر کاهش هزینه تولید، سود سالانه‌ای حدود ۱۵۱ میلیون دلار و ارزش خالص فعلی بیش از ۵۳۰ میلیون دلار طی سی سال ایجاد می‌کند. ارزیابی چرخه عمر (LCA؛ Life Cycle Assessment) نیز بیانگر کاهش قابل‌توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با محصولات فسیلی است.

اصلاح اسفنج‌های ضایعاتی از طریق ترکیب نانوذرات اکسید آهن و پلی‌دوپامین در واکنش تک‌مرحله‌ای، عملکرد زیست‌محیطی این مواد را به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده است [۱۴۳]. این اصلاح سطحی موجب تبدیل ویژگی اسفنج از آب‌گریز به فوق‌آب‌دوست شده، امکان جداسازی سریع و مؤثر روغن از آب را در شرایط سخت محیطی فراهم می‌کند. این نوآوری نه‌تنها ارزش افزوده‌ای برای ضایعات پلیمری ایجاد می‌نماید، بلکه مسیر گذار به اقتصاد چرخشی و کاهش اثرات زیست‌محیطی را تقویت می‌کند. شکل (۵)، نمای کلی از کاربردهای صنعتی و نیمه صنعتی اسفنج‌های پلیمری متخلخل را بیان می‌کند.

۵-۵ ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی کاربرد صنعتی اسفنج‌ها

افزایش حجم ضایعات اسفنج سخت پلی‌یورتان (PU) به یکی از چالش‌های عمده زیست‌محیطی در صنایع پلیمری تبدیل شده است. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که فرایند گلیکولیز با استفاده از گلیسرول خام، رویکردی کارآمد برای بازیافت این ضایعات و تولید پلی‌ال‌های زیستی با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مطلوب است [۱۴۱]. تحلیل‌های طیف‌سنجی FTIR، NMR و GC-MS صحت تجزیه باندهای کاربامات را تأیید کرده و عملکرد پایدار اسفنج‌های حاصل را حتی پس از چند چرخه بازیافت، نشان داده است. افزون بر این، ارزیابی فنی-اقتصادی این فرایند، قابلیت صنعتی و سودآوری بالقوه تولید پلی‌یورتان‌های زیست‌پایه را اثبات می‌کند و چشم‌اندازی روشن برای جایگزینی مواد فسیلی ارائه می‌دهد.

در راستای توسعه فرایندهای زیست‌پایه، Kulas و همکاران [۱۴۲] فناوری نوآورانه تصفیه آبی لیگنین با عوامل داغ (ALPHA؛ Aqueous Lignin Purification with Hot Agents) به‌عنوان روشی مؤثر برای تصفیه و جزءبندی لیگنین خام حاصل از زیست‌تصفیه‌خانه‌های اتانول سلولزی و صنایع کرافت بررسی کردند. این فناوری امکان تفکیک لیگنین به اجزای با وزن مولکولی پایین، متوسط و بالا را فراهم می‌کند که هرکدام



شکل ۵ مروری بر کاربردهای صنعتی و نیمه‌صنعتی اسفنج‌های پلیمری متخلخل در تصفیه پساب‌های پیچیده

[۱۲۸، ۱۳۰، ۱۳۴، ۱۴۱]

Figure 5 Overview of Industrial and Semi-Industrial Applications of Porous Polymeric Foams in Complex Wastewater Treatment [128,130,134,141]

برهم‌کنش‌های π - π نیروهای واندروالسی و اثرات آب‌گریز جذب می‌شوند. این ناهم‌خوانی مکانیزمی به کاهش کارایی جذب هم‌زمان می‌انجامد. لذا طراحی ساختارهای چندعاملی با سایت‌های فعال قابل‌تنظیم، راهکار این چالش است. چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) به‌عنوان جاذب‌های چندمنظوره، امکان حذف هم‌زمان آلاینده‌ها را در پساب‌های واقعی فراهم می‌کنند [۱۴۴].

۶ چالش‌های تحقیقاتی و مسیرهای آینده

۶-۱ چالش‌های موجود در طراحی اسفنج‌هایی با انتخاب‌پذیری بالا

چالش اصلی اسفنج‌های پلیمری، دستیابی به جذب انتخابی و هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین است. سازوکارهای جذب این دو گروه متفاوتند؛ گروه‌های عاملی (آمین، کربوکسیل و هیدروکسیل) با یون‌های فلزی کمپلکس تشکیل می‌دهند، درحالی‌که ترکیبات آروماتیک از طریق

ناحیه‌بندی‌شده، راهکاری نوین است. فناوری الکترورسی امکان کنترل دقیق ساختار، توزیع یکنواخت گروه‌های فعال و ادغام بهینه MOFs در فاز پلیمری را فراهم می‌کند، که منجر به ارتقای کارایی جذب و پایداری در کاربردهای واقعی می‌شود [۱۴۶]. به‌منظور ارزیابی عملکرد، در جدول (۵) مقایسه‌ای جامع و کمی از ظرفیت جذب اسفنج‌های متخلخل در حذف فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و سامانه‌های چندآلاینده ارائه شده است. این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که چگونه طراحی معماری‌های چندعاملی، با بهینه‌سازی ظرفیت و پایداری فیزیکی، کارایی این جاذب‌ها را در کاربردهای صنعتی ارتقا می‌دهد.

در سامانه‌های پیچیده، رقابت میان یون‌های فلزی و مولکول‌های آلی برای دسترسی به مکان‌های فعال، جذب را کاهش می‌دهد. این مسئله ضرورت توسعه نانواسفنج‌های هوشمند با توزیع عملکردی کنترل‌شده و نفوذپذیری تنظیم‌پذیر را برجسته می‌کند. در این راستا، نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی هیبریدی با گروه‌های عاملی متنوع، به‌دلیل ظرفیت جذب بالا، بازیابی آسان و پایداری فیزیکی، جاذب‌هایی کارآمد برای یون‌های فلزی سمی محسوب می‌شوند [۱۴۵].

به‌منظور بهبود انتخاب‌پذیری در شرایط واقعی، ترکیب MOFs با نانوذرات عامل‌دار و شبکه‌های گرافنی در قالب معماری‌های چندعاملی و

جدول ۵ مقایسه جامع و کمی عملکرد جذب اسفنج‌های متخلخل در حذف فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و سامانه‌های چندآلاینده

Table 5 Comprehensive and Quantitative Comparison of the Adsorption Performance of Porous Foams in the Removal of Heavy Metals, Organic Pollutants, and Multi-Contaminant Systems

Foam adsorbent	Target pollutants	Adsorption capacity	Removal efficiency	Optimal pH	Contact / equilibrium time	Adsorption model / mechanism	Ref.
Alg-Fe3O4-rGO-4S graphene biopolymer foam	MB, Hg ²⁺ , Cu ²⁺ , oils	MB: 789.7±36 mg/g; Hg ²⁺ : 107 mg/g; Cu ²⁺ : 73.5 mg/g; oils: 11–18 g/g	MB ≈90%; Cu ²⁺ >99.99%; Hg ²⁺ 100%	-	oils uptake ≈30 s	Hydrophilic–hydrophobic bioinspired surface	[10]
PU-PANI foam	Methyl orange	255 mg/g	32.5% within first 5 min	5	equilibrium ≈30 h	Sips isotherm; Elovich and intraparticle diffusion models	[31]
PU-P/T composite foam	ARG, MB, Cr(VI), TP, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , COD	ARG 255.81 mg/g; MB 22.57 mg/g; Cr(VI) 105.32 mg/g; TP 10.04 mg/g; NH ₄ ⁺ 7.98 mg/g; NO ₃ ⁻ 23.03 mg/g; COD 236.31 mg/g	ARG 88%; MB 40%; Cr(VI) 90%; TP 58%; NH ₄ ⁺ 42%; NO ₃ ⁻ 30%; COD 63%	-	column operation up to 1800 min	Redox interaction between Cr(VI) and PANI	[38]
CPPF carboxylated polyHIPE foam	dyes, Cu ²⁺ , Cr ³⁺	dyes >500 mg/g; metals >30 mg/g	>97% after 5 cycles	≥5	-	Electrostatic adsorption by carboxyl groups	[39]
IPB-PBAT open-cell foam	MB, Cu ²⁺	-	MB photodegradation >95% after 5 cycles	-	-	Langmuir isotherm; pseudo-second-order kinetics	[42]
MF@PCP composite foam	Cu ²⁺ , Cr(VI), MO, ACBK, CR, DCF	Cu ²⁺ 66.05 mg/g; Cr(VI) 132.8 mg/g; MO 646 mg/g; ACBK 691 mg/g; CR 702 mg/g; DCF 784 mg/g	-	-	rapid adsorption	Pseudo-second-order kinetics; intraparticle diffusion	[45]
CS/CD/MIL-68(Al) MOF foam column	MB, trypan blue, sulfonamides	MB 60.61 mg/g; trypan blue 454.55 mg/g	sulfonamides ≈100%	4	-	Langmuir isotherm; pseudo-second-order kinetics	[57]
BC/PU composite foam	organic solvents	up to 23.6 g/g (n-hexane)	stable after 5 cycles	-	-	pseudo-second-order kinetics; Langmuir isotherm; EDA interaction	[81]
WEPS-BTA foam	MB, safranin T, malachite green	MB 859.9 mg/g; SFT 1036.7 mg/g; MG 1197.3 mg/g	high removal	2–12	rapid adsorption	Freundlich isotherm; pseudo-second-order kinetics	[82]
fabric-reinforced PU foam	Pb ²⁺	-	effective Pb ²⁺ removal	investigated	-	Langmuir and Freundlich models	[83]

catalyst-residue PU foam	trifluralin pesticide	-	70% removal (PURC50); up to 83% with higher dosage	5	15-1440 min	adsorption influenced by BET surface area	[90]
3D graphene oxide foam	phenol derivatives	phenol 135.6 mg/g; 2-CP 191.3 mg/g; 4-CP 237.7 mg/g; DCP 398.6 mg/g; BPA 420.9 mg/g; TCP 585.8 mg/g	-	-	-	π - π interaction, electrostatic interaction, hydrogen bonding	[102]
lignin-cellulose foam	dyes, heavy metals, oils	-	dyes >99.76%; metals >99.85%; oil separation >99.95%	-	-	functional-group rich biomass foam	[103]
TA@CNF-CDA aerogel foam	Cu ²⁺ , oils	Cu ²⁺ adsorption 45.6 mg/L; oils up to 108 g/g	-	5	-	spontaneous chemisorption	[104]
HPPs-COO-/PUF foam	methylene blue	125 mg/g	>90% after 5 cycles	10	-	Langmuir isotherm; pseudo-second-order kinetics	[112]
chitosan/alginate biofoam	Eriochrome black-T	2015 mg/g (CSA); 2297 mg/g (CSAC15)	stable after 5 cycles	stable in wide pH	-	Freundlich isotherm; pseudo-second-order kinetics	[113]
PACC PU-activated carbon composite	Pb ²⁺	-	high column adsorption efficiency	2-6	column system	Thomas and Yoon-Nelson models	[129]
polysaccharide-modified PU foam	MB, Cu ²⁺ , S. aureus	-	MB 95.15-97.58%; Cu ²⁺ 94.73-96.87%	investigated	MB 30 min; Cu ²⁺ 40 min	Langmuir model; pseudo-second-order kinetics	[140]
Fe(OH) ₃ @PDA@WPU foam	oil/water mixtures	-	separation efficiency >98.7%	-	-	superhydrophilic surface; water flux 57796 L h ⁻¹ m ⁻²	[143]
graphene-PU composite foam column	emulsified oil, surfactants	-	oil removal 77.2%; surfactant 52.4%; electroflotation oil >90%	-	continuous flow	porous graphene foam sorption column	[147]

۲-۶ کمبود داده‌های تجربی در شرایط واقعی و مقیاس صنعتی

تخلیه پساب‌های آلوده به روغن بدون تصفیه مؤثر، تهدیدی فزاینده برای پایداری سامانه‌های زیستی آبی و سلامت عمومی محسوب می‌شود. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری‌های تصفیه، شکاف میان کارایی آزمایشگاهی و عملکرد واقعی در مقیاس صنعتی همچنان قابل توجه است. در این راستا، دو سامانه‌ی مکمل شامل ستون جذب بر پایه اسفنج‌های پلی‌یورتان/گرافن و واکنشگاه شناورسازی الکتریکی جریان پیوسته با جریان متناوب (Continuous-flow AC electroflotation reactor) به عنوان راه‌حلی کارآمد و کم‌هزینه برای جداسازی امولسیون‌های روغنی تثبیت شده با سطح فعال‌های آبیونی پیشنهاد شده‌اند. ارزیابی‌های ساختاری و عملکردی نشان داده‌اند که اسفنج‌های اصلاح شده با گرافن ضمن حفظ پایداری مکانیکی، قادر به حذف حدود ۷۷٪ روغن و ۵۲٪ سطح فعال‌ها هستند. ترکیب هم‌افزایانه‌ی فرایند جذب و شناورسازی الکتریکی، مسیر امیدوارکننده‌ای برای طراحی سامانه‌های تصفیه چندمرحله‌ای در مقیاس صنعتی فراهم می‌سازد که می‌تواند نیازهای زیست‌محیطی و اقتصادی را به صورت هم‌زمان برآورده سازد [۱۴۷]. افزایش تولید فرآورده‌های دامی،

چالش‌های مدیریتی در پساب صنایع فرآوری جانبی ایجاد کرده است. ضایعات کشاورزی، به‌ویژه سیب، به عنوان جاذب‌های زیست‌پایه ارزان با سطح ویژه بالا، برای حذف یون‌های فلزی سنگین کارآمدند. اصلاح شیمیایی این جاذب‌ها ظرفیت جذب و گزینش‌پذیری را بهبود می‌دهد، اما داده‌های تجربی در مقیاس صنعتی محدود است. مطالعات میدانی و ارزیابی پایداری در محیط‌های چندآلاینده برای توسعه فناوری و تصفیه پایدار پساب ضروری است [۱۴۸].

در مقیاس صنعتی، افت کارایی اسفنج‌های پلیمری حاصل تعامل هم‌زمان چندین عامل عملیاتی است. حضور مواد آلی زمینه و محدودیت‌های انتقال جرم، عوامل اصلی کاهش عملکرد در پساب‌های واقعی هستند. ترکیبات آلی موجود در پساب، مانند روغن‌ها و سطح فعال‌ها، ممکن است از طریق رقابت برای مکان‌های جذب، پوشاندن سطح جاذب و ایجاد گرفتگی، دسترسی آلاینده‌های هدف به گروه‌های فعال را محدود کنند؛ پدیده‌ای که در مطالعات مربوط به سامانه‌های جریان پیوسته بر پایه اسفنج‌های پلی‌یورتان/گرافن و کامپوزیت‌های هوشمند برای پساب‌های چندآلاینده نیز گزارش شده است [۱۴۷، ۱۵۱].

ساختارهایی منجر شود که ضمن دارا بودن پایداری مکانیکی بالا، قابلیت تنظیم و بازسازی عملکردی را نیز دارند. این سامانه‌های هوشمند به دلیل رفتار دوگانه‌ی جذب، مسیر تازه‌ای برای توسعه مواد چندمنظوره با کارایی و پایداری زیست‌محیطی بالا ایجاد کرده‌اند [۱۴۹، ۱۵۰].

افزون‌براین، نوآوری در طراحی کامپوزیت‌های هوشمند چندعاملی گام مؤثری در افزایش بازدهی حذف آلاینده‌ها بوده است. مطالعه Paneysar و همکاران [۱۵۱] نشان داد این مواد قادر به حذف هم‌زمان بیش از ۹۰٪ آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی هستند و میزان اکسیژن موردنیاز شیمیایی (COD) را به‌طور معناداری کاهش می‌دهند. این سامانه‌ها پس از چهار چرخه متوالی و اجذب و احیا، راندمان جذب خود را حفظ کردند که نشان‌دهنده پایداری ساختاری و قابلیت استفاده مجدد آن‌ها در مقیاس کاربردی است. جدول (۶) چالش‌های کلیدی اسفنج‌های پلیمری در جذب انتخابی آلاینده‌ها و راهکارهای غلبه بر آن‌ها را خلاصه می‌کند.

علاوه بر این، در سامانه‌های سنتونی تجمع ذرات معلق یا کلوئیدی می‌تواند بخشی از مسیرهای جریان را مسدود کرده و با افزایش مقاومت هیدرولیکی، انتقال جرم را کاهش دهد؛ هرچند شدت این اثر به ویژگی‌های اسفنج، ترکیب پساب و طراحی بستر وابسته است. در نتیجه، افت فشار هیدرولیکی غالباً پیامد گرفتگی منافذ، تراکم بستر یا طراحی نامناسب سامانه محسوب می‌شود. همچنین، نوسانات pH به‌ویژه در جذب یون‌های فلزی اهمیت دارد، زیرا گونه‌بندی فلزات، بار سطحی جاذب و یونش گروه‌های عاملی را تغییر می‌دهد، درحالی‌که اثر دما به ماهیت ترمودینامیکی سامانه وابسته است [۱۴۸، ۱۴۵]. بنابراین، کنترل مواد آلی زمینه، پایش افت فشار و ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی pH و دما برای پیش‌بینی پایداری اسفنج‌ها در مقیاس صنعتی ضروری است.

۳-۶ توسعه روش‌های نوین سنتز اسفنج‌های هوشمند و پاسخگو
ترکیب پلیمرهای پاسخگو با اسفنج‌های متخلخل پدیدار شده توسط کمپلکس‌های پلی‌الکترولیت/سطح‌فعال (PS) می‌تواند به طراحی

جدول ۶ چالش‌های کلیدی پژوهشی و رویکردهای استراتژیک در طراحی اسفنج‌های پلیمری عملکردی برای حذف آلاینده‌ها

Table 6 Key Research Challenges and Strategic Approaches in Designing Functional Polymeric Foams for Pollutant Removal

Research Gap / Challenge	Strategy / Approach	Representative Foam System	References
Selective adsorption of organic and metal pollutants in multi-contaminant systems	Multi-functional, hierarchically structured foams with tailored active sites; integration of MOFs and functional nanoparticles	MOF-polymer composites; magnetic hybrid nanocomposites	[144-146]
Limited industrial-scale and real-condition data	Field-scale evaluation; hybrid adsorption-electrofloitation systems for wastewater treatment	Graphene-reinforced PU foams; bio-based adsorbents from agricultural waste	[147, 148]
Development of smart and stimuli-responsive foams	Multi-responsive polymeric foams (pH, temperature, light, magnetic/electric field) for tunable adsorption	PS/PEI/polyelectrolyte-complex foams; multi-functional composite foams	[149-151]

۸ چشم‌انداز و آینده

اسفنج‌های پلیمری متخلخل، توسعه سامانه‌های هوشمند و پایدار در تصفیه آب را ممکن می‌سازند. با این حال، از آنجاکه بیشتر ارزیابی‌های فعلی در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی و با آلاینده‌های تک‌جزئی انجام شده‌اند، تعمیم آن‌ها به پساب‌های واقعی صنعتی (صنایع آبکاری، نساجی یا پتروشیمی) با چالش‌هایی همراه است؛ چرا که حضور هم‌زمان فلزات سنگین، ترکیبات آلی، نمک‌ها و عوامل فعال سطحی، از طریق رقابت برای مکان‌های فعال یا پدیده گرفتگی، کارایی نهایی را کاهش می‌دهد. بنابراین، بررسی نظام‌مند این مواد در ماتریس‌های چندآلاینده و سامانه‌های جریان پیوسته برای درک واقع‌بینانه‌تر رفتارهای عملیاتی، یکی از مسیرهای کلیدی پژوهش‌های آتی است. طراحی اسفنج‌های هوشمند با قابلیت خودترمیمی (از طریق پیوندهای دینامیکی و برگشت‌پذیر یا ریزکپسول‌های حاوی عوامل ترمیم‌کننده)، بهبود طول عمر عملیاتی و بازاستفاده جاذب‌ها را ممکن می‌سازد. تلفیق این ویژگی‌ها با ابزارهای نوین نظیر چاپ سه‌بعدی، مدل‌سازی چندفیزیکی و

۷ نتیجه‌گیری

اسفنج‌های پلیمری متخلخل با ترکیب ساختارهای چندسطحی و ویژگی‌های سطحی قابل تنظیم، عملکردی فراتر از جاذب‌های مرسوم در تصفیه پساب‌های صنعتی ارائه می‌دهند. این مواد با ایجاد مسیرهای مؤثر انتقال جرم، افزایش سطح تماس فعال و امکان برهم‌کنش انتخابی با آلاینده‌ها، کارایی بالایی در حذف هم‌زمان ترکیبات آلی و فلزات سنگین دارند. پیشرفت در فناوری‌های ساخت و اصلاح سطح (از جمله نانوساختارها و طراحی تخلخل کنترل‌شده)، پایداری حرارتی، مقاومت مکانیکی و قابلیت بازیافت این مواد را ارتقا داده است. با این حال، کاربرد صنعتی این اسفنج‌ها مستلزم ارزیابی دقیق‌تر عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی پساب، از جمله حضور مواد آلی زمینه، ذرات معلق، نوسانات pH و دما، و شرایط جریان پیوسته است. این ویژگی‌ها موجب شده تا اسفنج‌های پلیمری متخلخل نه تنها از منظر عملکردی، بلکه از دیدگاه پایداری و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر نیز جایگاهی ممتاز در میان مواد جاذب مدرن پیدا کنند.

- Wastewater: Sources of Contamination, Toxicity, and Removal Approaches), Springer, Singapore, 1st ed., pp. 103–132, 2021.
- [6] Zhao Y., Yao W., Xing S., Guo H., Wang S., Sun M. and Bi J., Insights into the synergistic, neutral, and antagonistic adsorption effects in cobalt-containing wastewater treatment, *Chemical Engineering Science*, 298, 120318, 2024.
- [7] Yang C., Xue Z. and Wen J., Recent advances in MOF-based materials for remediation of heavy metals and organic pollutants: insights into performance, mechanisms, and future opportunities, *Sustainability*, 15(8), 6686, 2023.
- [8] Huang D., Wu J., Wang L., Liu X., Meng J., Tang X., Tang C. and Xu J., Novel insight into adsorption and co-adsorption of heavy metal ions and an organic pollutant by magnetic graphene nanomaterials in water, *Chemical Engineering Journal*, 358, 1399-1409, 2019.
- [9] Chakraborty R., Asthana A., Singh A.K., Jain B. and Susan A.B., Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: A review, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 342-379, 2022.
- [10] Yap P.L., Hassan K., Auyoo Y.L., Mansouri N., Farivar F., Tran D.N. and Losic D., All-in-one bioinspired multifunctional graphene biopolymer foam for simultaneous removal of multiple water pollutants, *Advanced Materials Interfaces*, 7(18), 2000664, 2020.
- [11] Wang N., Wei Y., Sun H., Wang N., Liu Y. and Li Y., Mechanistic insights into simultaneous adsorption of contaminants in dyeing wastewater using polyurethane-based hierarchical porous adsorbents, *Carbon Letters*, 1–7, 2025.
- [12] Yan X., Zhao G., Chen Z. and Zhang L., Recent progress in functional applications of polymer foams, *Journal of Materials Chemistry A*, 2025.
- [13] Sakhadeo N.N. and Patro T.U., Exploring the multifunctional applications of surface-coated polymeric foams: A review, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(16), 5366–5387, 2022.
- [14] Rafeeq H., Hussain A., Ambreen A., Waqas M., Bilal M. and Iqbal H.M., Functionalized nanoparticles and their environmental remediation potential: A review, *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 12(6), 1007–1031, 2022.
- [15] Saxena R., Saxena M. and Lochab A., Recent progress in nanomaterials for adsorptive removal of organic contaminants from wastewater, *ChemistrySelect*, 5(1), 335–353, 2020.
- [16] Alkhalidi H., Alharthi S., Alharthi S., AlGhamdi H.A., AlZahrani Y.M., Mahmoud S.A., Amin L.G., Al-Shaalan N.H., Boraie W.E., Attia M.S. and Al-Gahtany S.A., Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: A review, *RSC Advances*, 14(45), 33143–33190, 2024.
- [17] Mandal, S., Muralidharan, C. and Mandal, A. B., *Advanced Research in Nanosciences for Water Technology* (Chapter: Water Pollution Remediation Techniques with Special Focus on Adsorption), Springer International Publishing, Cham, 1st ed., pp. 39–68, 2019.
- [18] Karunakaran K., Usman M. and Sillanpää M., A review on superadsorbents with adsorption capacity $\geq 1000 \text{ mg g}^{-1}$ and perspectives on their upscaling for water/wastewater treatment, *Sustainability*, 14(24), 16927, 2022.
- [19] Raji, Z., Karim, A., Karam, A. and Khallofi, S., Adsorption of heavy metals: mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation—A review, *Waste*, Vol. 1, No. 3, pp. 775–805, 2023.
- [20] Nxumalo N.L. and Mahlambi P.N., Molecularly imprinted polymer-based adsorbents for the selective removal of pharmaceuticals from wastewater: Adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamics studies, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(41), 16525–16544, 2023.
- [21] Liu Q., Xiong J., Lin W., Liu J., Wan Y., Guo C.F., Wang Q.

یادگیری ماشین، پیش‌بینی رفتار جاذب‌ها در شرایط پیچیده عملیاتی را تسهیل کرده و کاربرد صنعتی آن‌ها را در راستای اقتصاد چرخشی تسریع می‌کند.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از داوران محترم بابت ارائه نظرات سازنده و تخصصی که منجر به ارتقای کیفیت مقاله گردید، ابراز می‌دارند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی، یا سازمانی در انجام این پژوهش و نگارش این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان

دکتر حمیدرضا عظیمی: استاد راهنما و پژوهشگر اصلی (مسئولیت طراحی کلی پژوهش، نظارت علمی، تحلیل نهایی و تأیید نسخه نهایی)، با سهم ۶۰ درصد و امیرحسین جوانپرست: پژوهشگر فرعی (مسئولیت جمع‌آوری داده‌ها، همکاری در تحلیل و نگارش متن اولیه)، سهم ۴۰ درصد در این پژوهش سهم داشته‌اند.

منابع مالی

از منابع مالی در انجام این پژوهش استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

نویسندگان تأیید می‌کنند که در فرآیند نگارش این مقاله، از ابزارهای هوش مصنوعی برای ویرایش زبانی استفاده شده است. تمامی خروجی‌های حاصل از این ابزارها توسط نویسندگان بررسی و صحت‌سنجی شده و مسئولیت نهایی محتوا بر عهده نویسندگان می‌باشد.

مراجع

- [1] Jan S., Mishra A.K., Bhat M.A., Bhat M.A. and Jan A.T., Pollutants in aquatic system: a frontier perspective of emerging threat and strategies to solve the crisis for safe drinking water, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(53), 113242-113279, 2023.
- [2] Garg S., Chowdhury Z.Z., Faisal A.N.M., Rumjit N.P., and Thomas P., *Impact of Industrial Wastewater on Environment and Human Health: Advanced Industrial Wastewater Treatment and Reclamation of Water*, Springer, Cham, 1st ed., 197–209, 2021.
- [3] Edo G.I., Samuel P.O., Oloni G.O., Ezekiel G.O., Ikpekor V.O., Obasohan P., Ongulu J., Otunuya C.F., Opiti A.R., Ajakaye R.S. and Essaghah A.E., Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals, *Chemistry and Ecology*, 40(3), 322-349, 2024.
- [4] Ali, M. M., Hossain, D., Khan, M. S., Begum, M. and Osman, M. H., *Heavy Metals – Their Environmental Impacts and Mitigation* (Chapter: Environmental Pollution with Heavy Metals: A Public Health Concern), IntechOpen, London, 1st ed., pp. 1–25, 2021.
- [5] Chaturvedi, M., Mishra, A., Sharma, K., Sharma, G., Saxena, G. and Singh, A. K., *Emerging Treatment Technologies for Waste Management* (Chapter: Emerging Contaminants in

- [38] Wang N., Guo Y., Song Y., Yan W., Gong X., Li Y., Mu R.H., Liu Y. and Zhang L., PANI grafted onto waste porous polyurethane for co adsorption of multiple pollutants in industrial wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104195, 2023.
- [39] Liu Q., Gao Z., Zhang R., Li J., Chen S., Yang Q., Gu Y., Yang W., Yan B. and Liang Y., Durable carboxylated porous polymer foam as a high-performance adsorbent for dye and heavy metal ion removal, *ACS Applied Engineering Materials*, 1(8), 2228–2235, 2023.
- [40] Gomez Suarez M., Chen Y. and Zhang J., Porous organic polymers as a promising platform for efficient capture of heavy metal pollutants in wastewater, *Polymer Chemistry*, 14(35), 4000–4032, 2023.
- [41] Wei X., Meng R., Bai Y.A., Liu W., Zhou H., Wang X. and Xu B., Hydrophobic and oleophilic open cell foams from in situ microfibrillation blends of poly (lactic acid) and polytetrafluoroethylene: selective oil adsorption behaviors, *International Journal of Biological Macromolecules*, 227, 273–284, 2023.
- [42] Qiu L., Phule A.D., Zhong W., Wen S. and Zhang Z., Degradable superhydrophilic iron-pillared bentonite doped with polybutylene adipate/terephthalate open-cell foam: Its application in dye degradation, removal of heavy metal ions, and oil–water separation, *Macromolecular Materials and Engineering*, 306(12), 2100481, 2021.
- [43] Fujii S., Foams/bubbles stabilized with polymer particles, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 72, 101808, 2024.
- [44] Zhao Y., Shen L., Yuan Y., Xiao L., Cai J., Lu Z. and Hou L., Preparation of porous poly(4-tert-butylstyrene) based monoliths with high efficiency for oil-water separation via high internal phase emulsion template, *Journal of Applied Polymer Science*, 140(18), e53801, 2023.
- [45] Lu X., Wu P., Chi C., Shi W., Liu F., Yang Y., Liu H. and Fu J., A recyclable elastic foam composite with spatially separated adsorption sites for simultaneous capture of multiple contaminants in complex wastewater, *Separation and Purification Technology*, 354, 129551, 2025.
- [46] Yap P.L., Nine M.J., Hassan K., Tung T.T., Tran D.N. and Losic D., Graphene-based sorbents for multipollutants removal in water: A review of recent progress, *Advanced Functional Materials*, 31(9), 2007356, 2021.
- [47] Yadav, M. D., “Advanced nanocomposite ion exchange materials for water purification”, In: B. A. Bhanvase, S. H. Sonawane, V. B. Pawade and A. B. Pandit (Eds.), *Handbook of Nanomaterials for Wastewater Treatment: Fundamentals and Scale up Issues*, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 513–534, 2021.
- [48] Zhao K., Zhou K., Chang X., Liu S., Hu W. and Hou Y., Harnessing nanoconfinement enhanced hydrogen bonding and multi scale structures for high performance sustainable foam materials, *Composites Part B: Engineering*, 297, 112318, 2025.
- [49] Zhang J., Yeoh G.H. and Kabir I.I., Polyurethane materials for fire retardancy: Synthesis, structure, properties, and applications, *Fire*, 8(2), 64, 2025.
- [50] Chen R., Sheehan T., Ng J.L., Brucks M. and Su X., Capacitive deionization and electrosorption for heavy metal removal, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(2), 258–282, 2020.
- [51] Zheng B., Lin X., Zhang X., Wu D. and Matyjaszewski K., Emerging functional porous polymeric and carbonaceous materials for environmental treatment and energy storage, *Advanced Functional Materials*, 30(41), 1907006, 2020.
- [52] Zarezadeh E., Tangestani M. and Jafari A.J., A systematic review of methodologies and solutions for recycling polyurethane foams to safeguard the environment, *Heliyon*, 10(23), 2024.
- and Liu Z., Porous polymers: Structure, fabrication and application, *Materials Horizons*, 2025.
- [22] Song Y., Phipps J., Zhu C. and Ma S., Porous materials for water purification, *Angewandte Chemie*, 135(11), e202216724, 2023.
- [23] Wu G., Xie P., Yang H., Dang K., Xu Y., Sain M., Turng L.S. and Yang W., A review of thermoplastic polymer foams for functional applications, *Journal of Materials Science*, 56(20), 11579–11604, 2021.
- [24] Jahani, D., Azimi, H., & Nazari, A. (2019). An experimental study on the micro- and nanocellular foaming of polystyrene/poly(methyl methacrylate) blend composites. *Journal of Polymer Engineering*, 39(10), 926–933.
- [25] Adamczak M., Kamińska G. and Bohdziewicz J., Application of waste polymers as basic material for ultrafiltration membranes preparation, *Water*, 12(1), 179, 2020.
- [26] Soloveva O., Solovev S., Khaibullina A. and Yafizov R., Method of the wastewater treatment in transport using a porous material, *Transportation Research Procedia*, 54, 712–718, 2021.
- [27] Davarpanah A., Shirmohammadi R. and Mirshekari B., Experimental evaluation of polymer-enhanced foam transportation on the foam stabilization in the porous media, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(12), 8107–8116, 2019.
- [28] Lee H., Gupta A. and Mekonnen T.H., Fabrication of triblock elastomer foams for oil absorption applications: effects of crosslinking, composition, and rheology factors, *ACS Applied Polymer Materials*, 5(7), 5016–5027, 2023.
- [29] Chandan M.R., Goyal S., Rizwan M., Imran M. and Shaik A.H., Removal of textile dye from synthetic wastewater using microporous polymer nanocomposite, *Bulletin of Materials Science*, 44(4), 272, 2021.
- [30] Abitaev K., Qawasmi Y., Atanasova P., Dargel C., Bill J., Hellweg T. and Sottmann T., Adjustable polystyrene nanoparticle templates for the production of mesoporous foams and ZnO inverse opals, *Colloid and Polymer Science*, 299(2), 243–258, 2021.
- [31] Mendieta Rodríguez L.S., González Rodríguez L.M., Alcaraz Espinoza J.J., Chávez Guajardo A.E. and Medina Llamas J.C., Synthesis and characterization of a polyurethane–polyaniline macroporous foam material for methyl orange removal in aqueous media, *Materials Today Communications*, 26, 102155, 2021.
- [32] Niu C., Yang L., Sun H., Zhu Z., Liang W., Li J. and Li A., Three-dimensional macroporous foamy MXene membrane with high efficiency on interfacial evaporation and wastewater purification, *Chemical Engineering Journal*, 476, 146522, 2023.
- [33] Wu L., Li Y., Fu Z. and Su B.L., Hierarchically structured porous materials: Synthesis strategies and applications in energy storage, *National Science Review*, 7(11), 1667–1701, 2020.
- [34] Huang L., Yang J., Zhao Y., Miyata H., Han M., Shuai Q. and Yamauchi Y., Monolithic covalent organic frameworks with hierarchical architecture: Attractive platform for contaminant remediation, *Chemistry of Materials*, 35(7), 2661–2682, 2023.
- [35] Zhang Q., Li K., Li J. and Li Y., Fabrication of hierarchically porous superhydrophobic polystyrene foam for self-cleaning, oil absorbent, highly efficient oil–water separation, *Chemical Engineering Journal*, 483, 149338, 2024.
- [36] Taylor-Pashow K.M. and Pribyl J.G., PolyHIPEs for separations and chemical transformations: A review, *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 37(1), 1–26, 2019.
- [37] Chen, X., Yu, W., Ma, L., Zhou, S. and Liu, X., Mechanical properties and thermal characteristics of different-density phenolic foams, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, No. 2, pp. 393–401, 2021.

- separation: A review, *Journal of Materials Chemistry A*, 10(43), 22853–22895, 2022.
- [70] Abla K.K. and Mehanna M.M., Freeze drying as a tool for preparing porous materials: from proof of concept to recent pharmaceutical applications, *AAPS PharmSciTech*, 26(5), 159, 2025.
- [71] Zhou T., Cheng X., Pan Y., Li C. and Gong L., Mechanical performance and thermal stability of poly (vinyl alcohol)–cellulose aerogels by freeze drying, *Cellulose*, 26(3), 1747–1755, 2019.
- [72] Mijangos C. and Martin J., Polymerization within nanoporous anodized alumina oxide templates (AAO): A critical survey, *Polymers*, 15(3), 525, 2023.
- [73] Nofar M., Utz J., Geis N., Altstädt V. and Ruckdäschel H., Foam 3D printing of thermoplastics: A symbiosis of additive manufacturing and foaming technology, *Advanced Science*, 9(11), 2105701, 2022.
- [74] Issac M.N. and Kandasubramanian B., Review of manufacturing three dimensional printed membranes for water treatment, *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29), 36091–36108, 2020.
- [75] Fijoł N., Aguilar Sánchez A., Ruiz Caldas M.X., Redlinger Pohn J., Mautner A. and Mathew A.P., 3D printed polylactic acid (PLA) filters reinforced with polysaccharide nanofibers for metal ions capture and microplastics separation from water, *Chemical Engineering Journal*, 457, 141153, 2023.
- [76] Roy Barman S., Gavit P., Chowdhury S., Chatterjee K. and Nain A., 3D printed materials for wastewater treatment, *JACS Au*, 3(11), 2930–2947, 2023.
- [77] Liang T., Wang C., Li B., Chen J., Ye Z., Yan C., Wang H. and Myung N.V., Ultralight electrospun fiber foam with tunable lamellar macropores for efficient interfacial evaporation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107522, 2022.
- [78] Zhang Y.P., Yang J.H., Li L.L., Cui C.X., Li Y., Liu S.Q., Zhou X.M. and Qu L.B., Facile fabrication of superhydrophobic copper foam and electrospinning polystyrene fiber for combinational oil–water separation, *Polymers*, 11(1), 97, 2019.
- [79] Barroso Solares S., Cuadra Rodriguez D., Rodriguez Mendez M.L., Rodriguez Perez M.A. and Pinto J., A new generation of hollow polymeric microfibers produced by gas dissolution foaming, *Journal of Materials Chemistry B*, 8(38), 8820–8829, 2020.
- [80] Li D., Zhang X., Zhang S., Wang D., Wang Z., Liu Y., Yu X., Zhao Q. and Xing B., A flexible and salt rejecting electrospun film based solar evaporator for economic, stable and efficient solar desalination and wastewater treatment, *Chemosphere*, 267, 128916, 2021.
- [81] Wang Z., Hu L., Zhao M., Dai L., Hrynsphan D., Tatsiana S. and Chen J., Bamboo charcoal fused with polyurethane foam for efficiently removing organic solvents from wastewater: Experimental and simulation, *Biochar*, 4(1), 28, 2022.
- [82] Li W., Xie Z., Xue S., Ye H., Liu M., Shi W. and Liu Y., Studies on the adsorption of dyes, methylene blue, safranin T, and malachite green onto polystyrene foam, *Separation and Purification Technology*, 276, 119435, 2021.
- [83] Li T.T., Li S., Zhang X., Shiu B.C., Peng H.K., Ren H.T., Miao C.H., Lou C.W. and Lin J.H., Study on fabric/polyurethane high strength porous composite foam: Pb²⁺ adsorption properties and mechanical properties, *Polymer Composites*, 42(12), 6322–6331, 2021.
- [84] Sepperer T., Neubauer J., Eckardt J., Schnabel T., Petutschnigg A. and Tondi G., Pollutant absorption as a possible end of life solution for polyphenolic polymers, *Polymers*, 11(5), 911, 2019.
- [85] Sun Q., Aguila B., Song Y. and Ma S., Tailored porous organic polymers for task specific water purification, *Accounts of Chemical Research*, 53(4), 812–821, 2020.
- [53] Mo L., Pang H., Lu Y., Li Z., Kang H., Wang M., Zhang S. and Li J., Wood inspired nanocellulose aerogel adsorbents with excellent selective pollutants capture, superfast adsorption, and easy regeneration, *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125612, 2021.
- [54] Wurm F., Rietzler B., Pham T. and Bechtold T., Multivalent ions as reactive crosslinkers for biopolymers—A review, *Molecules*, 25(8), 1840, 2020.
- [55] Barajas Ledesma R.M., Hossain L., Wong V.N., Patti A.F. and Garnier G., Effect of the counter ion on nanocellulose hydrogels and their superabsorbent structure and properties, *Journal of Colloid and Interface Science*, 599, 140–148, 2021.
- [56] Bashir S., Hina M., Iqbal J., Rajpar A.H., Mujtaba M.A., Alghamdi N.A., Wageh S., Ramesh K. and Ramesh S., Fundamental concepts of hydrogels: Synthesis, properties, and their applications, *Polymers*, 12(11), 2702, 2020.
- [57] Wang J., Zhang Y., Liu F., Liu Y., Wang L. and Gao G., Preparation of a multifunctional and multipurpose chitosan/cyclodextrin/MIL 68(Al) foam column and examining its adsorption properties for anionic and cationic dyes and sulfonamides, *ACS Omega*, 8(35), 32017–32026, 2023.
- [58] Azimi H., Numerical study of bubble nucleation and growth of N₂ in low density polyethylene, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(8), 2911–2928, 2024.
- [59] Zhou Y., Tian Y. and Peng X., Applications and challenges of supercritical foaming technology, *Polymers*, 15(2), 402, 2023.
- [60] Milovanovic S., Lukic I., Horvat G., Novak Z., Frerich S., Petermann M. and García González C.A., Green processing of neat poly (lactic acid) using carbon dioxide under elevated pressure for preparation of advanced materials: A review (2012–2022), *Polymers*, 15(4), 860, 2023.
- [61] Azimi H., Jahani D., Aghamohammadi S. and Nofar M., Experimental and numerical investigation of bubble nucleation and growth in supercritical CO₂ blown poly (vinyl alcohol), *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39(8), 2252–2262, 2022.
- [62] Azimi H., Jahani D. and Nofar M., Experimental and numerical analyses of n pentane solubility and diffusivity in polystyrene/poly (methyl methacrylate) blends, *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65(9), 4596–4604, 2020.
- [63] Zauzi N.A., Ariff Z.M. and Khimi S.R., Foamability of natural rubber via microwave assisted foaming with azodicarbonamide (ADC) as blowing agent, *Materials Today: Proceedings*, 17, 1001–1007, 2019.
- [64] Villamil Jiménez J.A., Le Moigne N., Bénézet J.C., Sauceau M., Sescousse R. and Fages J., Foaming of PLA composites by supercritical fluid assisted processes: A review, *Molecules*, 25(15), 3408, 2020.
- [65] Reichert C.L., Bugnicourt E., Coltelli M.B., Cinelli P., Lazzeri A., Canesi I., Braca F., Martínez B.M., Alonso R., Agostinis L. and Verstichel S., Biobased packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability, *Polymers*, 12(7), 1558, 2020.
- [66] Jiang, Q., Lee, K. and Bismarck, A., “Foam templating: A greener route to porous polymers”, In: H. N. Cheng and R. A. Gross (Eds.), *Sustainability & Green Polymer Chemistry*, Volume 1: *Green Products and Processes*, ACS Symposium Series, Vol. 1372, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 99–118, 2020.
- [67] Wang A., Ma Y. and Zhao D., Pore engineering of porous materials: Effects and applications, *ACS Nano*, 18(34), 22829–22854, 2024.
- [68] Thompson B.R., Horozov T.S., Stoyanov S.D. and Paunov V.N., Hierarchically structured composites and porous materials from soft templates: Fabrication and applications, *Journal of Materials Chemistry A*, 7(14), 8030–8049, 2019.
- [69] Wu J., Zhu X., Yang F., Wang R. and Ge T., Shaping techniques of adsorbents and their applications in gas

- Treatment, in: Barhoum, A. (Ed.), *Handbook of Nanocelluloses: Classification, Properties, Fabrication, and Emerging Applications*, Springer International Publishing, Cham, pp. 1–48, 2022.
- [102] Wang W., Gong Q., Chen Z., Wang W.D., Huang Q., Song S., Chen J. and Wang X., Adsorption and competition investigation of phenolic compounds on the solid liquid interface of three-dimensional foam like graphene oxide, *Chemical Engineering Journal*, 378, 122085, 2019.
- [103] Tan Z., Yang B., Liu W., Yang D., Qiu X. and Zheng D., Multifunctional lignin reinforced cellulose foam for the simultaneous removal of oils, dyes, and metal ions from water, *Carbohydrate Polymers*, 348, 122890, 2025.
- [104] Ji Y., Wen Y., Wang Z., Zhang S. and Guo M., Eco friendly fabrication of a cost effective cellulose nanofiber based aerogel for multifunctional applications in Cu(II) and organic pollutants removal, *Journal of Cleaner Production*, 255, 120276, 2020.
- [105] Liu X., Wang S. and Wang X., Challenges of porous nanomaterials in highly efficient elimination of pollutants from aqueous solution, *Chinese Chemical Letters*, 110679, 2024.
- [106] Zubair, M., Syamaladevi, R. and Ullah, A., Challenges and prospects: graphene oxide-based materials for water remediation including metal ions and organic pollutants, *Environmental Science: Nano*, Vol. 11, No. 9, pp. 3693–3720, 2024.
- [107] Karak S., Dey K., Torris A., Halder A., Bera S., Kanheerampockil F. and Banerjee R., Inducing disorder in order: hierarchically porous covalent organic framework nanostructures for rapid removal of persistent organic pollutants, *Journal of the American Chemical Society*, 141(18), 7572–7581, 2019.
- [108] Wang J., Dai D., Xie H., Li D., Xiong G. and Zhang C., Biological effects, applications and design strategies of medical polyurethanes modified by nanomaterials, *International Journal of Nanomedicine*, 17, 6791, 2022.
- [109] Li R., Wang X., Lin C., Zhang X. and Yuan Z., The synergistic effect of MOF and biomass achieving dual breakthroughs in material structure and performance, *Journal of Materials Chemistry A*, 13(10), 6866–6894, 2025.
- [110] Zhong W., Hu D., Chen Y. and Zhao L., Microwave assisted physical foaming of polymers: A review, *Polymer Reviews*, 64(4), 1136–1175, 2024.
- [111] Ghosh, A., Orasugh, J. T., Ray, S. S. and Chattopadhyay, D., Foaming Technology, in: Gupta, R. K. (Ed.), *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams (Volume 1)*, ACS Symposium Series, Vol. 1439, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 63–89, 2023.
- [112] Wei X., Chen D., Wang L., Ma Y. and Yang W., Carboxylate functionalized hollow polymer particles modified polyurethane foam for facile and selective removal of cationic dye, *Applied Surface Science*, 579, 152153, 2022.
- [113] Mokhtari A., Sabzi M. and Azimi H., 3D porous bioadsorbents based on chitosan/alginate/cellulose nanofibers as efficient and recyclable adsorbents of anionic dye, *Carbohydrate Polymers*, 265, 118075, 2021.
- [114] Liao J., Luan P., Zhang Y., Chen L., Huang L., Mo L., Li J. and Xiong Q., A lightweight, biodegradable, and recyclable cellulose-based bio foam with good mechanical strength and water stability, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107788, 2022.
- [115] Yadav D. and Dutta J., A systematic review on recent development of chitosan/alginate-based polyelectrolyte complexes for wastewater treatment, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(3), 3381–3406, 2024.
- [116] Mittal M., Tripathi S. and Shin D.K., Biopolymeric nanocomposites for wastewater remediation: An overview on
- [86] Li N., Huo L., Shen W., Qiang C., Wu M., Sun G., Li Q., Shi M. and Ma J., Porous organic polymers for superefficient removal of pollutants from water: Design, synthesis and adsorption performance, *Journal of Cleaner Production*, 396, 136558, 2023.
- [87] Franco P., Cardea S., Tabernero A. and De Marco I., Porous aerogels and adsorption of pollutants from water and air: A review, *Molecules*, 26(15), 4440, 2021.
- [88] Urbano B.F., Bustamante S., Palacio D.A., Vera M. and Rivas B.L., Polymer supports for the removal and degradation of hazardous organic pollutants: An overview, *Polymer International*, 69(4), 333–345, 2020.
- [89] Xiang L., Yu X., Xiang A., Lu X., Zhang M. and Zhou H., Pore structure evolution and adsorption behaviors of porous poly(vinyl alcohol) hydrogel prepared using Na₂SO₄ and CaCO₃ as porogens, *Polymer Engineering & Science*, 64(8), 3488–3504, 2024.
- [90] Almeida M.L., Ayres E., Libânio M., de Souza Gamarano D., Ribeiro C.C. and Oréfice R.L., Bio based polyurethane foams with enriched surfaces of petroleum catalyst residues as adsorbents of organic pollutants in aqueous solutions, *Journal of Polymers and the Environment*, 28(9), 2511–2522, 2020.
- [91] Abiodun O.A., Oluwaseun O., Oladayo O.K., Abayomi O., George A.A., Opatola E., Orah R.F., Isukuru E.J., Ede I.C., Oluwayomi O.T. and Okolie J.A., Remediation of heavy metals using biomass-based adsorbents: Adsorption kinetics and isotherm models, *Clean Technologies*, 5(3), 934–960, 2023.
- [92] Jatoti A.S., Nguyen H.M., Ahmed J. and Jeyapaul A., Bio sorbents derived from agricultural biomass for the removal of emerging pollutants and its adsorption mechanisms, *Journal of the Iranian Chemical Society*, 20(10), 2457–2470, 2023.
- [93] Amna R. and Alhassan S.M., Exploring porous sulfur copolymers for efficient removal of heavy metal ions from wastewater: A computational study, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 138, 365–379, 2024.
- [94] Fei Y. and Hu Y.H., Design, synthesis, and performance of adsorbents for heavy metal removal from wastewater: A review, *Journal of Materials Chemistry A*, 10(3), 1047–1085, 2022.
- [95] Modak A., Bhanja P., Selvaraj M. and Bhaumik A., Functionalized porous organic materials as efficient media for the adsorptive removal of Hg(II) ions, *Environmental Science: Nano*, 7(10), 2887–2923, 2020.
- [96] Ko Y.G., Hybrid method integrating adsorption and chemical precipitation of heavy metal ions on polymeric fiber surfaces for highly efficient water purification, *Chemosphere*, 363, 142909, 2024.
- [97] Huang, J., Huang, Z. L., Zhou, J. X., Li, C. Z., Yang, Z. H., Ruan, M., Li, H., Zhang, X., Wu, Z. J., Qin, X. L. and Hu, J. H., Enhancement of heavy metals removal by microbial flocculant produced by *Paenibacillus polymyxa* combined with an insufficient hydroxide precipitation, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 374, pp. 880–894, 2019.
- [98] Ajiboye T.O., Oyewo O.A. and Onwudiwe D.C., Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review, *Chemosphere*, 262, 128379, 2021.
- [99] Trikkaliotis D.G., Ainali N.M., Tolkou A.K., Mitropoulos A.C., Lambropoulou D.A., Bikiaris D.N. and Kyzas G.Z., Removal of heavy metal ions from wastewaters by using chitosan/poly (vinyl alcohol) adsorbents: A review, *Macromol*, 2(3), 403–425, 2022.
- [100] Lyu S., Abidin Z.Z., Yaw T.C. and Resul M.F., Synthesis of surface modified porous polysulfides from soybean oil by inverse vulcanization and its sorption behavior for Pb(II), Cu(II), and Cr(III), *Environmental Science and Pollution Research*, 31(20), 29264–29279, 2024.
- [101] Singh, A., Vijayan, J. G. and Moodley, K. G., Surface Functionalizations of Nanocellulose for Wastewater

- Research, 258, 119428, 2024.
- [132] Ikram, M., Bari, M. A., and Haider, J., *Photocatalytic Dye Degradation Using Green Polymer-Based Nanostructures: Principles and Applications in Wastewater Treatment*, IOP Publishing, Bristol, 1st ed., 2023.
- [133] Kuhn R., Bryant I.M., Jensch R. and Böllmann J., Applications of environmental nanotechnologies in remediation, wastewater treatment, drinking water treatment, and agriculture, *Applied Nano*, 3(1), 54–90, 2022.
- [134] Mohammadnezhad G. and Keikavousi Behbahan A., Polymer matrix nanocomposites for heavy metal adsorption: A review, *Journal of the Iranian Chemical Society*, 17(6), 1259–1281, 2020.
- [135] Rando G., Sfameni S., Galletta M., Drommi D., Cappello S. and Plutino M.R., Functional nanohybrids and nanocomposites development for the removal of environmental pollutants and bioremediation, *Molecules*, 27(15), 4856, 2022.
- [136] Gusain D. and Bux F., *Batch Adsorption Process of Metals and Anions for Remediation of Contaminated Water*, CRC Press, 2021.
- [137] Wu J., Xu F., Li S., Ma P., Zhang X., Liu Q., Fu R. and Wu D., Porous polymers as multifunctional material platforms toward task specific applications, *Advanced Materials*, 31(4), 1802922, 2019.
- [138] Afolabi M., Onukogu O.A., Igunma T.O., Adeleke A.K. and Nwokediegwu Z.Q., A conceptual framework for process intensification in multi stage chemical effluent treatment units, *Iconic Research And Engineering Journals*, 5(6), 400–425, 2021.
- [139] Warren Z., Guaraldo T.T., Martins A.S., Wenk J. and Mattia D., Photocatalytic foams for water treatment: A systematic review and meta-analysis, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109238, 2023.
- [140] Zhang M., Zhang G., Lu X., Abuduwaili A., Di T., Liao X. and Sun D., Synthesis of novel high-performance adsorbent based on modified polyurethane/polysaccharides for wastewater treatment, *Journal of Polymers and the Environment*, 32(6), 2818–2834, 2024.
- [141] Chang C., Jiang Y., Lin Y., Fu K., Xu C. and Zhao S., Glycolysis of waste polyurethane foam for preparing recycled polymer materials: Optimization and techno economic evaluation, *Chemical Engineering Journal*, 507, 160583, 2025.
- [142] Kulas D.G., Thies M.C. and Shonnard D.R., Techno economic analysis and life cycle assessment of waste lignin fractionation and valorization using the ALPHA process, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(15), 5388–5395, 2021.
- [143] Ao C., Jiang L., Wang Q., Xue X., Gai J., Zhang W. and Lu C., One pot superhydrophilic surface modification of waste polyurethane foams for high efficiency oil/water separation, *Journal of Environmental Management*, 315, 115140, 2022.
- [144] Liu Y., Yang J., Wu J., Jiang Z., Zhang X. and Meng F., The application of multifunctional metal–organic frameworks for the detection, adsorption, and degradation of contaminants in an aquatic environment, *Molecules*, 30(6), 1336, 2025.
- [145] Zeng X., Zhang G., Zhu J. and Wu Z., Adsorption of heavy metal ions in water by surface functionalized magnetic composites: A review, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 8(5), 907–925, 2022.
- [146] Ahmadijokani F., Molavi H., Bahi A., Fernández R., Alaei P., Wu S., Wuttke S., Ko F. and Arjmand M., Metal organic frameworks and electrospinning: A happy marriage for wastewater treatment, *Advanced Functional Materials*, 32(51), 2207723, 2022.
- [147] Mari T., Zimmermann M.V., Fenner B.R., Monticeli F.M., Ornaghi Júnior H.L., Baldasso C. and Zattera A.J., Use of a sorption column with polyurethane/graphene core combined with an electroflotation reactor for oily wastewater treatment, recent progress and challenges, *Polymers*, 16(2), 294, 2024.
- [117] Alizadeh M., Peighambaroust S.J., Foroutan R., Azimi H. and Ramavandi B., Surface magnetization of hydrolyzed *Luffa cylindrica* biowaste with cobalt ferrite nanoparticles for facile Ni^{2+} removal from wastewater, *Environmental Research*, 212, 113242, 2022.
- [118] Ethaib S., Al Qutaifia S., Al Ansari N. and Zubaidi S.L., Function of nanomaterials in removing heavy metals for water and wastewater remediation: A review, *Environments*, 9(10), 123, 2022.
- [119] Sharma D., Singh S., Singh J. and Singh H., Magnetic nanomaterials for wastewater remediation, In: M. A. E.-F. Barakat and R. Kumar (Eds.), *Nanomaterials for Environmental Applications*, CRC Press, Boca Raton, 1st ed., pp. 139–159, 2022.
- [120] Azimi H. and Javanparast A., Biofunctional polymeric foams for mechanically and biochemically active tissue scaffolds, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, online first, 2025. <https://doi.org/10.1177/08927057251384969>
- [121] Alhajri F., Mahmoud S.A., Haque M.A., Madani M., Al Saleem N.K., Almutairi R., Alghamdi N. and Mohamady Ghobashy M., Advanced polymeric hydrogels for contaminant removal and microbial inactivation: Sustainable water remediation strategies and applications, *Separation & Purification Reviews*, 1–26, 2025.
- [122] Guo X., Liu H., Nail A., Meng D., Zhu L., Li C. and Li H., Design and application of stimuli responsive nanocomposite hydrogels: A review, *Macromolecular Rapid Communications*, 2401095, 2025.
- [123] Zadehahmadi F., Eden N.T., Mahdavi H., Konstas K., Mardel J.I., Shaibani M., Banerjee P.C. and Hill M.R., Removal of metals from water using MOF based composite adsorbents, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(5), 1305–1330, 2023.
- [124] Kausar A., Inscriptions of metal organic frame work (MOF) reinforcements in polymeric nanocomposites—State of the art and multifaceted impressions, *Polymer Plastics Technology and Materials*, 64(7), 934–972, 2025.
- [125] Dutta M., Bora J. and Chetia B., Overview on recent advances of magnetic metal–organic framework (MMOF) composites in removal of heavy metals from aqueous system, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 13867–13908, 2023.
- [126] Azimi H. and Peighambaroust S.J., Characterization and morphological study of biodegradable PVA gelatin/CNT composite foams prepared via high pressure batch foaming method, *Journal of Porous Materials*, 30(3), 751–766, 2023.
- [127] Yuan Y., Xiao S., Yan B., Shen S., Dou R. and Xu X., Bibliometric based analysis of hydrogels in the field of water treatment, *Sustainability*, 16(18), 8194, 2024.
- [128] Rajandran P., Masngut N., Manas N.H., Azelee N.I., Fuzi S.F. and Bunyamin M.A., Fixed bed adsorption for industrial wastewater purification: An in-depth review, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(5), 3943–3964, 2025.
- [129] Fernandez R.M., Estrada R.J., Tomon T.R., Dingcong Jr R.G., Amparado Jr R.F., Capangpangan R.Y., Malaluan R.M., Dumancas G.G., Lubguban A.A., Alguno A.C. and Bacosa H.P., Experimental design and breakthrough curve modeling of fixed bed columns utilizing a novel 3D coconut-based polyurethane activated carbon composite adsorbent for lead sequestration, *Sustainability*, 15(19), 14344, 2023.
- [130] Rajoria S., Vashishtha M. and Sangal V.K., Treatment of electroplating industry wastewater: a review on the various techniques, *Environmental Science and Pollution Research*, 29(48), 72196–72246, 2022.
- [131] Peighambaroust S.J., Zardkhaneh S.I., Foroughi M., Foroutan R., Azimi H. and Ramavandi B., Effectiveness of polyacrylamide g gelatin/ACL/Mg–Fe LDH composite hydrogel as an eliminator of crystal violet dye, *Environmental*

- Polymers*, 17(8), 1127, 2025.
- [148] Gomravi Y., Karimi A. and Azimi H., Adsorption of heavy metal ions via apple waste low-cost adsorbent: Characterization and performance, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(9), 1843–1858, 2021.
- [149] Abousalman Rezvani Z., Roghani Mamaqani H., Riazi H. and Abousalman Rezvani O., Water treatment using stimuli responsive polymers, *Polymer Chemistry*, 13(42), 5940–5964, 2022.
- [150] Ritacco H.A., Polyelectrolyte/surfactant mixtures: A pathway to smart foams, *ACS Omega*, 7(41), 36117–36136, 2022.
- [151] Paneysar J.S., Jain S., Ahmed N., Barton S., Ambre P. and Coutinho E., Novel smart composite materials for industrial wastewater treatment and reuse, *SN Applied Sciences*, 2(6), 1084, 2020.