

طراحی سیستم های تصفیه پساب مبتنی بر فیلتراسیون غشایی با استفاده از مواد متخلخل نانوساختار

سکینه خاتون نژاد^۱، مرضیه بدری پور^۲

^۱ گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

چکیده

رشد فعالیت های صنعتی و شهری، تولید پساب هایی با ترکیب پیچیده از مواد آلی، یون های فلزی، معلق ها و در برخی موارد هیدروکربن ها را افزایش داده و طراحی سامانه های تصفیه پایدار را به یکی از محورهای اصلی مهندسی محیط زیست و مهندسی شیمی تبدیل کرده است. فیلتراسیون غشایی، به ویژه نانوفیلتراسیون (NF)، اولترافیلتراسیون (UF) و زیست راکتورهای غشایی (MBR)، به دلیل امکان حذف انتخابی، کاهش حجم لجن و انطباق با استانداردهای بازیافت آب، در طراحی خطوط تصفیه پساب صنعتی و شهری مورد توجه قرار گرفته اند؛ با این حال، محدودیت هایی مانند گرفتگی غشا (fouling)، افت تدریجی شار، مصرف انرژی مرتبط با فشار عملیاتی و هزینه نگهداری، مانع توسعه مقیاس صنعتی یکنواخت این فناوری ها شده است. ادبیات بین المللی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ نشان می دهد که افزودن مواد متخلخل نانوساختار—از جمله اکسید گرافن (GO)، چارچوب های فلزی آلی (MOF)، ژئولیت و الیاف توخالی نانوساختار در ماتریس های پلیمری—می تواند مسیر انتقال آب، آب دوستی سطح، ظرفیت جذب آلاینده و در برخی موارد مقاومت در برابر فولینگ را تغییر دهد، هرچند پایداری پرکننده در محیط آبی، پراکندگی یکنواخت، نشت نانو ذرات و مقایسه بلندمدت روی پساب واقعی همچنان از خلأ های پژوهشی مهم به شمار می روند. هدف این پژوهش، ارائه چارچوب طراحی یکپارچه برای سامانه تصفیه پساب مبتنی بر فیلتراسیون غشایی حاوی لایه یا ماتریس نانوساختار متخلخل است که در آن نوع فرایند (UF تنگ، NF یا MBR)، انتخاب ماده پرکننده، پیش تصفیه و پارامترهای عملیاتی (فشار، شار متقاطع، غلظت خوراک) به صورت هم زمان در نظر گرفته شوند. روش تحقیق، ترکیبی از مرور نظام مند منابع معتبر فارسی و انگلیسی و تحلیل مقایسه ای داده های گزارش شده در مطالعات آزمایشگاهی و صنعتی منتخب است؛ از جمله عملکرد غشاهای تجاری NF و اسمز معکوس (RO) در پساب صنعتی عسلویه، غشاهای نانوساختار پلی اترسولفون برای پساب نفتی، و غشاهای نانوکامپوزیتی حاوی گرافن اکسید. نتایج ترکیب شده نشان می دهد که در شرایط گزارش شده برای NF تجاری در فشار حدود ۷ بار، درصد تصفیه کلی می تواند به حدود ۹۲ درصد برسد، در حالی که اصلاح نانوساختار می تواند شار عبوری و حذف COD را به طور هم زمان بهبود دهد؛ برای نمونه، افزودن حدود ۰/۵ درصد وزنی گرافن اکسید به غشای پلی اترسولفون، شار را از حدود ۹۶ به ۱۳۹ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت افزایش داده و حذف COD را تا حدود ۹۶/۱۲ درصد گزارش کرده است. غشاهای الیاف توخالی با اندازه حفره در مقیاس نانومتر نیز در جداسازی فاز نفتی از آب، پس زنی کامل در شرایط بهینه گزارش شده اند. نتیجه گیری کلی حاکی از آن است که طراحی سامانه باید بر پایه تطبیق اندازه منفذ/مکانیزم حذف با مشخصات پساب، قرار دادن NF یا UF تنگ یا اصلاح شده در نقش حذف آلاینده های میانی، و پایش فولینگ به عنوان متغیر طراحی اصلی استوار باشد؛ استفاده از مواد متخلخل نانوساختار بدون ارزیابی پایداری بلندمدت و اقتصاد چرخه عمر، به تنهایی تضمین کننده برتری عملیاتی نیست و نیازمند آزمون روی خوراک واقعی و تحلیل هزینه-فایده است.

واژه های کلیدی: تصفیه پساب، فیلتراسیون غشایی، نانوفیلتراسیون، مواد متخلخل نانوساختار، غشای نانوکامپوزیتی، گرفتگی غشا.

مقدمه

بحران کمی و کیفی منابع آب در دهه اخیر، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، باعث شده است که تصفیه و بازچرخانی پساب از یک گزینه فنی به یک ضرورت راهبردی در مدیریت محیط زیست، صنعت و برنامه ریزی شهری تبدیل شود. توسعه شتابان صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، نساجی، داروسازی، غذایی، فلزکاری، آبکاری و نیز افزایش بار آلودگی فاضلاب های شهری، ترکیب پساب ها را به گونه ای پیچیده ساخته است که فرایندهای متعارف نظیر ته نشینی، انعقاد-لخته سازی، تصفیه زیستی کلاسیک و فیلتراسیون های ساده، در بسیاری از موارد دیگر برای دستیابی هم زمان به استانداردهای تخلیه، بازیافت و استفاده مجدد از آب کافی نیستند. در چنین شرایطی، فناوری های غشایی به دلیل برخورداری از سازوکارهای جداسازی دقیق تر، نیاز کمتر به مواد شیمیایی در برخی آرایش ها، قابلیت مدولار سازی، سهولت مقیاس پذیری و امکان ترکیب با واحدهای پیش تصفیه و پس تصفیه، به یکی از مهم ترین محورهای پژوهش و توسعه در مهندسی محیط زیست و مهندسی شیمی بدل شده اند. روند مطالعات جدید نشان می دهد که اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و زیست راکتورهای غشایی نه تنها در حذف مواد معلق، کدورت، میکروارگانیسم ها و بخشی از مواد آلی محلول مؤثر بوده اند، بلکه در حذف آلاینده های نوظهور، فلزات سنگین، رنگ ها، روغن و امولسیون های پایدار نیز نقش روزافزونی یافته اند؛ با این حال، چالش هایی مانند گرفتگی غشا، افت شار، پلاریزاسیون غلظتی، هزینه انرژی، استهلاک و حساسیت عملکرد به کیفیت خوراک، همچنان موانع اصلی بهره برداری پایدار از این سامانه ها محسوب می شوند (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶؛ پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر فنی، فرایندهای غشایی بر مبنای اختلاف فشار، اندازه منفذ، خواص سطحی غشا، بار الکتریکی، برهم کنش های جذب سطحی و در برخی موارد نفوذ-انحلال عمل می کنند. اولترافیلتراسیون به طور سنتی برای حذف ذرات، کلوئیدها، ماکرومولکول ها و بخشی از میکروارگانیسم ها مناسب شناخته شده است، اما در برابر ترکیبات آلی کوچک، نمک ها، فلزات محلول و بسیاری از آلاینده های ریزمولکول محدودیت دارد. نانوفیلتراسیون، در قیاس با اولترافیلتراسیون، قادر است بخش قابل توجهی از مواد آلی کم وزن مولکولی، رنگ ها، سختی، چندظرفیتی ها و برخی فلزات را با انتخاب پذیری بالاتر حذف کند، اما افزایش فشار عملیاتی و حساسیت بیشتر به فولینگ و رسوب گذاری، هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری را نیز افزایش می دهد. در سال های اخیر، مفهوم «اولترافیلتراسیون تنگ» به عنوان یک ناحیه میانی بین UF و NF مورد توجه قرار گرفته است، زیرا می تواند با فشار کمتر از NF بخشی از محدودیت های UF متعارف را جبران کند و حذف بهتری برای مواد محلول کوچک تر فراهم سازد. این تحول مفهومی نشان می دهد که طراحی سامانه تصفیه دیگر نباید بر پایه دسته بندی های کاملاً مجزا و سنتی غشاها انجام شود، بلکه باید پیوستاری از عملکرد و سازگاری با نوع پساب، اهداف تصفیه و هزینه چرخه عمر را در نظر گیرد (پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵).

در کنار این تحول فرایندی، تغییر مهم تری نیز در سطح مواد و مهندسی غشا رخ داده است. پژوهش های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ به صورت فزاینده ای نشان داده اند که غشاهای پلیمری متداول، هرچند از نظر هزینه ساخت و سهولت شکل دهی مزیت دارند، اما در برابر فولینگ آلی، زیستی و معدنی، محدودیت های جدی از خود نشان می دهند. در نتیجه، استفاده از مواد متخلخل نانو ساختار در ساخت یا اصلاح غشاها، به عنوان راهبردی برای افزایش آب دوستی، بهبود شار عبوری، افزایش پس زنی آلاینده ها، ایجاد مسیرهای انتقال انتخابی، کاهش زبری نامطلوب سطح و ارتقای مقاومت مکانیکی و شیمیایی، به سرعت گسترش یافته است. این مواد شامل دامنه متنوعی از نانوذرات و ساختارها مانند اکسید گرافن، نانولوله های کربنی، زئولیت ها، اکسیدهای فلزی، چارچوب های فلزی-آلی (MOF ها)، چارچوب های آلی-کووالانسی، سیلیکاهای متخلخل، نانوکامپوزیت های هیبریدی و

بسترهای الیاف توخالی نانوساختار هستند. آنچه این گروه از مواد را برای کاربردهای غشایی جذاب ساخته، تنها کوچک بودن ابعادشان نیست؛ بلکه مهم‌تر از آن، وجود تخلخل قابل طراحی، سطح ویژه بالا، امکان عامل‌دارسازی، کنترل بار سطحی، و قابلیت ایجاد مسیرهای انتقال جرم با مقاومت کمتر و انتخاب‌پذیری بیشتر است. به بیان دیگر، فناوری نانو در این حوزه صرفاً نقش «افزودنی» ندارد، بلکه در حال بازتعریف منطق طراحی غشا از سطح ماده تا مقیاس سامانه است (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶؛ «مرور کوتاه غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون در تصفیه آب»، بدون تاریخ قابل مشاهده در نسخه بررسی‌شده).

با وجود این ظرفیت‌ها، مسئله اصلی آن است که بسیاری از گزارش‌های پژوهشی، به‌ویژه در حوزه غشاهای نانوکامپوزیتی و mixed-matrix، هنوز در سطح آزمایشگاهی باقی مانده‌اند و انتقال نتایج آن‌ها به شرایط واقعی بهره‌برداری صنعتی یا شهری با عدم قطعیت‌های قابل توجهی روبه‌رو است. برای مثال، در بسیاری از مطالعات، آزمون‌ها بر روی محلول‌های سنتزی، تک‌آلاینده یا سامانه‌های ساده‌شده انجام شده‌اند، در حالی که پساب واقعی دارای نوسان ترکیب، حضور هم‌زمان آلاینده‌های آلی و معدنی، مواد فعال سطحی، روغن‌ها، ترکیبات کلئیدی، میکروارگانیزم‌ها و مواد بازدارنده متعدد است. همچنین، در شمار زیادی از پژوهش‌ها عملکرد غشا در بازه‌های زمانی کوتاه ارزیابی شده و داده‌های بلندمدت درباره پایداری ساختاری، نشت احتمالی نانوذرات، قابلیت شست‌وشو، افت برگشت‌ناپذیر شار و هزینه چرخه عمر ارائه نشده است. از سوی دیگر، هرچند افزودن موادی مانند اکسید گرافن، ژئولیت یا MOF می‌تواند آب‌دوستی و ظرفیت جذب را افزایش دهد، اما بارگذاری بیش از حد این مواد ممکن است به تجمع ذرات، انسداد منافذ، افزایش مقاومت انتقالی، ضعف چسبندگی در ماتریس پلیمری یا شکنندگی غشا منجر شود. به همین دلیل، هر بهبود گزارش‌شده در شار یا پس‌زنی لزوماً به معنای برتری عملیاتی پایدار نیست و تنها در صورتی قابل دفاع است که در چارچوب یک طراحی سامانه‌ای، همراه با پیش‌تصفیه مناسب، کنترل هیدرودینامیکی، راهبرد شست‌وشو و ملاحظات اقتصادی-زیست‌محیطی ارزیابی شود (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶؛ خویردین و همکاران، ۲۰۲۵).

اهمیت این موضوع هنگامی روشن‌تر می‌شود که بدانیم در بسیاری از پساب‌های صنعتی، مسئله صرفاً دستیابی به درصد حذف بالا برای یک پارامتر منفرد نیست، بلکه طراحی باید به‌گونه‌ای انجام شود که چند هدف به‌صورت هم‌زمان محقق شود: کاهش COD و TOC، کنترل TDS و سختی، حذف فلزات یا رنگ‌ها، محدود کردن فولینگ، کاهش مصرف انرژی، و در صورت امکان، بازچرخانی آب با کیفیت مناسب برای مصرف مجدد در فرایند. برای نمونه، در مطالعه‌ای که درباره مقایسه عملکرد غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در تصفیه پساب صنعتی عسلویه منتشر شده، گزارش شد که در فشار ۷ بار و دبی ۷۲۰ لیتر بر ساعت، درصد تصفیه برای غشای NF حدود ۹۲ درصد و برای غشای RO حدود ۹۸/۵ درصد بوده است؛ با این حال، هم‌زمان آثار افزایش فشار بر شار و نیز بروز گرفتگی بیشتر، به‌ویژه در غشاهای متراکم‌تر، مورد توجه قرار گرفته است (لشگری، لشگری، کشاورز و عیسوندی، ۱۴۰۱). این یافته به‌خوبی نشان می‌دهد که انتخاب فناوری بهینه لزوماً تابع بیشینه‌سازی حذف نیست، بلکه باید به تعادل بین کارایی، مصرف انرژی، پایداری و هزینه بهره‌برداری توجه شود. در نمونه‌ای دیگر، غشاهای الیاف توخالی نانوساختار پلی‌اتر سولفون برای تصفیه پساب نفتی، جداسازی بسیار بالای فاز روغنی را در شرایط بهینه نشان داده‌اند، اما در فشارهای بالاتر، فشردگی ساختار و تشدید فولینگ، افت عملکرد را موجب شده است؛ بنابراین بهبود ساختار ماده، اگر با کنترل دقیق شرایط بهره‌برداری همراه نباشد، می‌تواند مزیت خود را از دست بدهد («تصفیه پساب‌های نفتی با استفاده از غشای نانوساختار الیاف توخالی پلی‌اتر سولفون»، بدون تاریخ قابل مشاهده).

از حیث شکاف دانشی، اگرچه ادبیات اخیر به‌وفور درباره نقش مواد نانوساختار در بهبود عملکرد غشا سخن گفته است، اما چند خلأ بنیادی همچنان پابرجاست. نخست آنکه مقایسه مستقیم میان مواد متخلخل مختلف—برای مثال اکسید گرافن، ژئولیت و

MOF—در یک پلیمر پایه یکسان و تحت شرایط خوراک و هیدرودینامیک یکسان، محدود است؛ از این رو، هنوز به روشنی نمی توان تعیین کرد که کدام ساختار برای چه نوع پسایی و تحت چه پنجره عملیاتی برتری دارد. دوم آنکه بخش عمده مطالعات بر تک معیارهای عملکردی مانند شار یا درصد حذف متمرکز بوده اند، در حالی که طراحی صنعتی نیازمند ارزیابی چندمعیاره شامل مقاومت مکانیکی، دوام شیمیایی، پایداری حرارتی، تمایل به فولینگ، قابلیت احیا و قیمت تمام شده است. سوم آنکه در بسیاری از پژوهش ها ارتباط بین خواص ریزساختاری ماده—نظیر اندازه و توزیع منفذ، سطح ویژه، نوع گروه های عاملی، بار سطحی و انرژی سطحی—با پاسخ سامانه در مقیاس فرایندی به صورت جامع مدل سازی نشده است. چهارم آنکه داده های کافی در مورد اثرات زیست محیطی بلندمدت نشت احتمالی نانوذرات، ریسک های بهداشتی و ارزیابی چرخه عمر غشاهای نانوساختار در دست نیست. پنجم آنکه هنوز اجماعی روشن درباره جایگاه بهینه UF تنگ، NF اصلاح شده، یا ترکیب MBR با غشاهای نانوکامپوزیتی برای پساب های پیچیده واقعی وجود ندارد، زیرا نتایج گزارش شده به نوع آلاینده، پیش تصفیه، جنس پلیمر پایه و شرایط عملیاتی وابستگی شدیدی دارند (پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵؛ خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

در این میان، اهمیت مواد متخلخل نانوساختار فقط به افزایش حذف محدود نمی شود، بلکه به امکان بازطراحی سازوکار جداسازی نیز مربوط است. برای مثال، در غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون، حذف تنها از طریق غربالگری اندازه ای صورت نمی گیرد، بلکه جذب سطحی، برهم کنش های الکترواستاتیک و در برخی موارد کمپلکس سازی نیز در فرایند مشارکت دارند. مرورهای جدید نشان داده اند که افزودن پرکننده هایی مانند آلومینا، زئولیت، MWCNT، GO و ساختارهای ZIF می تواند زاویه تماس را کاهش داده، شار آب را افزایش دهد و حذف فلزات یا ترکیبات آلی را به طور معنادار بهبود بخشد؛ برای نمونه، گزارش شده است که افزودن مقدار اندکی آلومینا به غشای PES حذف Cu(II) را از ۲۵ درصد به ۶۰ درصد افزایش داده، یا غشای PSF حاوی MWCNT عامل دار، حذف Cr(VI) را تا ۹۴/۲ درصد و Cd(II) را تا ۷۸/۲ درصد رسانده است، در حالی که غشای ساده عملکرد بسیار پایین تری داشته است. همچنین، غشاهای حاوی زئولیت ظرفیت جذب چشمگیری برای یون های فلزی نشان داده اند و ساختارهای مبتنی بر ZIF-۸ و MOF ها نیز در جذب و انتقال انتخابی آلاینده ها نتایج قابل توجهی ارائه کرده اند («مرور کوتاه غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون در تصفیه آب»، بدون تاریخ قابل مشاهده). با وجود این، همین بدنه شواهد هشدار می دهد که پراکندگی نامناسب پرکننده ها، تشکیل تجمعات نانویی و مسدود شدن منافذ می تواند عملکرد را معکوس کند؛ بنابراین، بحث اصلی دیگر صرفاً «افزودن نانوماده» نیست، بلکه «مهندسی رابطه ماده—ساختار—عملکرد» است.

از منظر طراحی سامانه، انتخاب غشا و ماده متخلخل باید تابع نوع پساب و هدف نهایی تصفیه باشد. برای پساب های نفتی و امولسیون، آب دوستی سطح، مقاومت در برابر چسبندگی روغن و پایداری در برابر فولینگ آلی اهمیت بیشتری دارد؛ از این رو غشاهای الیاف توخالی نانوساختار یا PES/GO-SiO_2 ۲۲_۲۲ می توانند جذاب باشند. برای پساب های حاوی فلزات سنگین، نقش زئولیت ها، MOF ها یا غشاهای جاذب به واسطه تبادل یونی و جذب سطحی پررنگ تر می شود. برای فاضلاب شهری یا ترکیبی، MBR های نسل جدید با غشاهای نانوکامپوزیتی و راهبردهای هوشمند کنترل فولینگ، امکان حذف همزمان آلاینده های آلی و زیستی را فراهم می سازند. مرور جامعی که در سال ۲۰۲۵ درباره زیست راکتورهای غشایی نسل آینده منتشر شده، نشان می دهد که تلفیق MBR با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، غشاهای نانوکامپوزیتی و مدل های یادگیری ماشین برای پیش بینی فولینگ، از جهت ارتقای کارایی و کاهش ریسک بهره برداری مسیر آینده این فناوری را شکل می دهد؛ اما این مرور نیز تصریح می کند که شکاف بین نتایج مقیاس آزمایشگاهی و پیاده سازی صنعتی هنوز زیاد است و بدون داده های واقعی بلندمدت نمی توان ادعای برتری قطعی مطرح کرد (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵).

بر همین اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که چگونه می توان یک سامانه تصفیه پساب مبتنی بر فیلتراسیون غشایی را به گونه ای طراحی کرد که از مزایای مواد متخلخل نانوساختار بهره مند شود، اما در عین حال محدودیت های عملیاتی، فولینگ، هزینه و پایداری نیز به صورت واقع بینانه در آن لحاظ شود. این مسئله فراتر از انتخاب یک غشا یا گزارش چند شاخص عملکردی است؛ بلکه به طراحی یک چارچوب تصمیم گیری مهندسی مربوط می شود که در آن نوع پساب، ماهیت آلاینده ها، محدوده فشار عملیاتی، نیاز به پیش تصفیه، ساختار غشا، جنس پرکننده، بارگذاری بهینه، آرایش مدول، شاخص های احیاءپذیری و هزینه چرخه عمر، به صورت یکپارچه دیده شوند. هدف پژوهش حاضر نیز در همین راستا تعریف می شود: نخست، تبیین مبانی علمی و فنی کاربرد فیلتراسیون غشایی در تصفیه پساب با تأکید بر نقش مواد متخلخل نانوساختار؛ دوم، تحلیل انتقادی ادبیات جدید به منظور شناسایی مزایا، محدودیت ها و شکاف های دانشی در استفاده از GO، زئولیت، MOF و غشاهای نانوساختار؛ سوم، ارائه منطق طراحی برای انتخاب بین UF، UF، تنگ، NF و سامانه های ترکیبی مانند MBR بر حسب نوع پساب؛ و چهارم، فراهم سازی بستری برای تحلیل داده محور عملکرد غشاها در بخش های بعدی مقاله، به ویژه در پیوند با شاخص هایی چون شار، درصد حذف COD، TDS، فلزات، پایداری عملکرد و شدت فولینگ. بدین ترتیب، پژوهش حاضر می کوشد به جای ارائه تصویری تبلیغی از نانومواد در فناوری غشایی، رویکردی تحلیلی، مقایسه ای و مبتنی بر شواهد عرضه کند و نشان دهد که ارزش واقعی مواد متخلخل نانوساختار زمانی آشکار می شود که در متن یک طراحی مهندسی جامع و قابل اجرا قرار گیرند، نه صرفاً در سطح بهبودهای موضعی آزمایشگاهی (لشگری و همکاران، ۱۴۰۱؛ خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

مبانی نظری

مبانی نظری طراحی سامانه های تصفیه پساب مبتنی بر فیلتراسیون غشایی با استفاده از مواد متخلخل نانوساختار، در نقطه تلاقی سه حوزه دانشی قرار دارد: نخست، نظریه های مربوط به انتقال جرم، هیدرودینامیک و جداسازی در فرایندهای غشایی؛ دوم، مفاهیم مهندسی مواد و علم سطح در طراحی غشاهای پلیمری، سرامیکی و نانوکامپوزیتی؛ و سوم، اصول مهندسی محیط زیست در شناخت ماهیت پساب، رفتار آلاینده ها و الزامات عملکردی سامانه های تصفیه. به همین دلیل، فهم درست این موضوع مستلزم آن است که غشا صرفاً به عنوان یک مانع فیزیکی دیده نشود، بلکه به مثابه یک بستر عملکردی چندمقیاسی در نظر گرفته شود که در آن ریزساختار ماده، شیمی سطح، تخلخل، زبری، بار الکتریکی، آرایش منافذ، و شرایط عملیاتی به صورت هم زمان بر شار عبوری، انتخاب پذیری، مقاومت هیدرولیکی و تمایل به فولینگ اثر می گذارند. این نگاه چندسطحی در ادبیات جدید به خوبی بازتاب یافته است؛ به ویژه در مرورهای منتشرشده در فاصله ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ که نشان می دهند گذار از غشاهای متعارف به غشاهای نانوکامپوزیتی و mixed-matrix، نه یک تغییر جزئی در ماده، بلکه تغییری در پارادایم طراحی سامانه های تصفیه آب و فاضلاب است (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

در سطح نخست، نظریه فیلتراسیون غشایی بر این اصل استوار است که عبور انتخابی گونه ها از میان یک غشا تابعی از نیروی محرکه، مقاومت های انتقال جرم و ویژگی های فیزیکوشیمیایی غشا و خوراک است. در غشاهای فشاری، اختلاف فشار عرضی، نیروی محرکه اصلی عبور حلال محسوب می شود و شار عبوری معمولاً به صورت تابعی از فشار مؤثر و مقاومت کل سامانه در نظر گرفته می شود؛ مقاومتی که نه تنها شامل مقاومت ذاتی غشا، بلکه شامل مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظتی، لایه کیک، فولینگ آلی، رسوب معدنی و گرفتگی داخلی منافذ نیز هست. در این چارچوب، غشاهای اولترافیلتراسیون عمدتاً بر اساس غربالگری اندازه ای عمل می کنند، اما با کوچک تر شدن اندازه منافذ و ورود به محدوده UF تنگ و NF، نقش برهم کنش های

الکترواستاتیک، آبپوشی یونی، جذب سطحی و حتی رفتار دنان در جداسازی برجسته تر می شود. به همین دلیل، انتخاب پذیری غشا صرفاً تابع اندازه منفذ نیست، بلکه تابعی از بار سطحی، قطبیت سطح، ماهیت گروه های عاملی و ساختار ریزمنفذی نیز هست. این موضوع به ویژه برای حذف رنگ ها، یون های چندظرفیتی، فلزات سنگین، مواد آلی کم وزن مولکولی و امولسیون های پایدار اهمیت دارد؛ زیرا در این موارد، سازوکارهای ترکیبی حذف بر عملکرد غالب می شوند (پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵).

در ادامه این مینا، باید به تمایز مفهومی بین UF، UF، تنگ، NF و RO توجه کرد. اولترافیلتراسیون کلاسیک معمولاً برای حذف ذرات معلق، کلوئیدها، باکتری ها، ویروس ها و ماکرومولکول های آلی کاربرد دارد و به دلیل فشار عملیاتی کمتر و شار بالاتر، از نظر انرژی جذاب تر است؛ با این حال، برای حذف مؤثر ترکیبات محلول کوچک، داروها، رنگ های خاص، یون ها و سختی، اغلب ناکافی است. نانوفیلتراسیون در این نقطه مزیت پیدا می کند، زیرا توان جداسازی بیشتری برای ترکیبات آلی کوچک و یون های چندظرفیتی دارد و می تواند در بازچرخانی آب صنعتی نقش مؤثری ایفا کند، اما این مزیت با هزینه فشار بیشتر، احتمال فولینگ شدیدتر و نیاز بالاتر به کنترل کیفیت خوراک همراه است. مفهوم UF تنگ نیز به عنوان یک ناحیه عملکردی بین UF و NF، در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، زیرا امکان دستیابی به تعادل بهتری بین فشار، شار و حذف را فراهم می سازد. مطالعه مروری منتشر شده در *Separation and Purification Technology* در سال ۲۰۲۵ نشان می دهد که غشاهای UF تنگ می توانند در حذف کدورت تا ۹۹ درصد، در حذف رنگ فاضلاب نساجی تا حدود ۹۰ درصد و در برخی غشاهای سرامیکی حتی بیش از ۹۸ درصد عمل کنند و با MWCO حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰ دالتون، نقش واسطی میان UF و NF ایفا نمایند (پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵). اهمیت نظری این تحول آن است که طراحی غشا دیگر نباید بر مبنای مرزهای خشک طبقه بندی سنتی انجام شود، بلکه باید به صورت پیوسته و کارکردمحور با در نظر گرفتن ماهیت خوراک و هدف جداسازی سامان یابد.

در سطح دوم، مبانی نظری به ماهیت مواد غشایی و اصلاح آن ها بازمی گردد. غشاهای مورد استفاده در تصفیه پساب، عموماً از پلیمرهایی مانند پلی اترسولفون، پلی سولفون، پلی وینیلیدن فلوراید، پلی آمید، سلولز استات و سایر پلیمرهای مقاوم ساخته می شوند. این مواد از نظر قابلیت ساخت، شکل دهی، قیمت و تنوع آرایش مزیت دارند، اما اغلب با محدودیت هایی مانند آب گریزی نسبی، حساسیت به فولینگ، ناهمگنی تخلخل و افت عملکرد در حضور خوراک پیچیده مواجه اند. این محدودیت ها موجب شده است که مفهوم «اصلاح غشا» در کانون توجه قرار گیرد. اصلاح غشا می تواند از طریق تغییر شیمی سطح، ایجاد لایه های پوششی، افزودن نانوذرات، ساخت غشاهای چندلایه، ساختاردهی منافذ، یا تولید غشاهای mixed-matrix انجام شود. در این میان، مواد متخلخل نانوساختار به سبب سطح ویژه زیاد، امکان عامل دارسازی، ایجاد مسیرهای ترجیحی انتقال، تنظیم پذیری منفذ، و قابلیت ایجاد تعادل میان شار و پس زنی، جایگاه ویژه ای یافته اند (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

از نظر تئوریک، افزودن یک ماده متخلخل نانوساختار به ماتریس غشایی می تواند از چند مسیر بر عملکرد اثر بگذارد. نخست، با افزایش آب دوستی سطح و کاهش زاویه تماس، انرژی لازم برای ورود آب به منافذ کاهش یافته و در نتیجه شار عبوری افزایش می یابد. دوم، با ایجاد منافذ اضافی یا مسیرهای انتقال کوتاه تر و کم مقاومت تر، مقاومت مؤثر غشا در برابر عبور آب کاهش پیدا می کند. سوم، با افزودن گروه های عاملی فعال یا سطوح باردار، امکان جذب انتخابی، دفع الکترواستاتیکی یا کمپلکس سازی با آلاینده ها فراهم می شود. چهارم، با کاهش چسبندگی برخی foulant ها، آهنگ تشکیل لایه کیک و فولینگ برگشتناپذیر کاهش می یابد. پنجم، در مواردی مانند مواد فوتوکاتالیستی یا ضدباکتری، حتی می توان نقش های فعال تری برای غشا در مهار رشد زیستی یا تجزیه آلاینده ها در نظر گرفت. با این همه، این مزایا تنها در صورتی محقق می شوند که توزیع نانوذرات در

ماتریس یکنواخت باشد، سازگاری بین فاز پلیمری و فاز پرکننده برقرار شود، و مرزهای بین فازی به محل نشستن یا تمرکز تنش تبدیل نشوند؛ زیرا در غیر این صورت، همان افزودنی‌ای که قرار است عملکرد را بهبود دهد، می‌تواند با ایجاد حفره‌های نامطلوب، انسداد موضعی، شکنندگی یا نشستن ذرات، به منبع افت کارایی تبدیل شود (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶)؛ «مرور کوتاه غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون در تصفیه آب»، بدون تاریخ قابل مشاهده).

در این چارچوب، یکی از مهم‌ترین خانواده‌های مواد نانوساختار، اکسید گرافن (GO) است. GO به دلیل ساختار دوبعدی ورقه‌ای، حضور گروه‌های عاملی اکسیژنی، آب‌دوستی بالا و قابلیت پراکنش در محیط‌های مختلف، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده برای اصلاح غشاهای UF و NF مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای نظری استفاده از GO آن است که این ماده می‌تواند هم‌زمان آب‌دوستی سطح را افزایش دهد، زبری را کنترل کند، با برخی آلاینده‌های آلی و فلزی برهم‌کنش برقرار سازد، و از طریق تشکیل کانال‌های لایه‌ای، مسیرهای انتقال جرم را تنظیم کند. در یک مطالعه مرتبط که در مرورهای جدید ارجاع شده، غشای 22_2PES/GO-SiO_2 برای تصفیه پساب روغنی بررسی شده و نتایج آن مؤید بهبود عملکرد در قیاس با غشاهای ساده‌تر بوده است (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶). همچنین در یک مطالعه فارسی درباره افزودن نانوذره اکسید گرافن به غشای پلی‌اترسلوفون برای تصفیه پساب نفتی، گزارش شد که افزودن حدود ۰/۵ درصد وزنی GO، شار را از حدود ۹۶ به ۱۳۹ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت افزایش داده و حذف COD را به ۹۶/۱۲ درصد رسانده است، در حالی که بارگذاری بیشتر به دلیل افزایش ویسکوزیته دوپ و تغییر نامطلوب ساختار، افت عملکرد ایجاد کرده است («بررسی تأثیر افزودن نانوذره اکسید گرافن بر عملکرد غشای پلی‌اترسلوفون برای تصفیه پساب نفتی»، بدون تاریخ قابل مشاهده). این یافته‌ها از نظر نظری تأکید می‌کنند که رابطه بین مقدار پرکننده و عملکرد خطی نیست و نقطه بهینه بارگذاری، بخشی بنیادی از طراحی است.

خانواده دوم، ژئولیت‌ها هستند که به‌عنوان آلومینوسیلیکات‌های بلوری متخلخل، از دیرباز در جذب و تبادل یونی شناخته شده‌اند و در فناوری غشایی نیز به دلیل ساختار منفذی منظم، پایداری شیمیایی و حرارتی، و توانایی جذب یا تبادل یونی، جایگاه ویژه‌ای دارند. در نظریه غشاهای حاوی ژئولیت، این ماده نه تنها می‌تواند نقش پرکننده مکانیکی داشته باشد، بلکه به‌عنوان یک فاز عملکردی برای جذب فلزات سنگین و گونه‌های یونی نیز عمل می‌کند. در مرورهای جدید، غشاهای حاوی ژئولیت به‌عنوان نمونه‌هایی از غشاهای جاذب معرفی شده‌اند که توانسته‌اند ظرفیت‌های جذب بالایی برای یون‌هایی مانند Pb(II) و Ni(II) فراهم آورند؛ برای نمونه، ظرفیت جذب حداکثر ۶۸۲ میلی‌گرم بر گرم برای سرب و ۱۲۲ میلی‌گرم بر گرم برای نیکل برای یک غشای PSF حاوی ژئولیت گزارش شده است («مرور کوتاه غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون در تصفیه آب»، بدون تاریخ قابل مشاهده). با این حال، مبانی نظری هشدار می‌دهند که افزایش بیش از حد بارگذاری ژئولیت می‌تواند به کاهش پیوستگی ماتریس، افزایش زبری یا انسداد منافذ منتهی شود؛ بنابراین نسبت بهینه پلیمر-پرکننده و نیز اندازه و پراکنش بلورها در عملکرد نهایی تعیین‌کننده است.

خانواده سوم، چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFها) و ساختارهای مشابهی مانند ZIFها هستند. MOFها به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، تخلخل قابل تنظیم، و قابلیت طراحی شیمیایی، از جذاب‌ترین مواد نانوساختار برای توسعه غشاهای نسل جدید محسوب می‌شوند. منطق نظری به‌کارگیری MOF در غشا آن است که این مواد می‌توانند با ایجاد مسیرهای عبور انتخابی، افزایش حجم آزاد، و فراهم کردن مراکز برهم‌کنش با آلاینده‌ها، هم‌زمان بر نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری اثر بگذارند. افزون بر این، برخی MOFها یا ZIFها توانایی جذب یون‌های فلزی و ترکیبات آلی خاص را دارند و حتی در بعضی سامانه‌ها رفتار فوتوکاتالیستی یا ضدباکتری از خود نشان می‌دهند. در مرورهای جدید، غشاهای حاوی ZIF-8 و MOFها در حذف فلزات و رنگ‌ها نتایج قابل توجهی نشان داده‌اند؛ برای مثال، غشای PVDF/PAA/ZIF-8 ظرفیتی در حدود ۲۱۹/۰۹ میلی‌گرم بر گرم

برای $Ni(II)$ گزارش کرده و غشاهای مبتنی بر MOF نیز در حذف متیلن بلو و افزایش حجم مؤثر تصفیه، بهبود محسوسی نسبت به غشاهای معمولی داشته‌اند («مرور کوتاه غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون در تصفیه آب»، بدون تاریخ قابل مشاهده). با این وجود، از دیدگاه نظری، چالش اصلی MOF ها پایداری در محیط آبی، چسبندگی به پلیمر، هزینه ساخت و خطر ازهم گسیختگی ساختار در شرایط واقعی بهره‌برداری است؛ از این رو، مزیت ذاتی تخلخل بالا باید در برابر ریسک‌های پایداری و هزینه سنجیده شود (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

یکی دیگر از مفاهیم بنیادین در مبانی نظری این حوزه، فولینگ است؛ موضوعی که در عمل مهم‌ترین عامل محدودکننده موفقیت صنعتی سامانه‌های غشایی به‌شمار می‌رود. فولینگ به‌طور کلی به تجمع مواد بر سطح یا درون منافذ غشا اطلاق می‌شود و می‌تواند منشأ آلی، زیستی، معدنی یا کلئیدی داشته باشد. از منظر نظری، فولینگ نتیجه برهم‌کنش میان خواص خوراک، هیدرودینامیک جریان، انرژی سطحی غشا، زبری، بار سطحی، اندازه منفذ و شرایط بهره‌برداری است. غشاهای آب‌گریزتر معمولاً تمایل بیشتری به جذب ترکیبات آلی آب‌گریز دارند، در حالی که زبری زیاد سطح می‌تواند مکان‌های بیشتری برای لنگراندازی foulant فراهم آورد. در همین حال، فشار عملیاتی بالا اگرچه در کوتاه‌مدت شار را افزایش می‌دهد، اما می‌تواند با تراکم لایه کیک و افزایش نفوذ ذرات به منافذ، فولینگ برگشت‌ناپذیر را تشدید کند. بنابراین، بهبود عملکرد غشا بدون مدیریت فولینگ از منظر نظری ناقص است. مرورهای جدید MBR و غشاهای نانوکامپوزیتی به‌صراحت نشان داده‌اند که راهبردهای کاهش فولینگ شامل افزایش آب‌دوستی، اصلاح بار سطحی، استفاده از مواد ضدباکتری یا فوتوکاتالیستی، بهینه‌سازی شرایط هیدرودینامیکی، پیش‌تصفیه و مدل‌سازی پیش‌بینانه با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵). این نتیجه نشان می‌دهد که مواد نانوساختار تنها زمانی مفیدند که در چارچوب نظری مدیریت فولینگ و نه صرفاً ارتقای شار اولیه، به‌کار گرفته شوند.

جدول زیر جمع‌بندی مفهومی مبانی نظری نقش برخی مواد متخلخل نانوساختار در غشاهای تصفیه پساب را نشان می‌دهد.

جدول ۱. جمع‌بندی مبانی نظری اثر مواد متخلخل نانوساختار بر عملکرد غشا

ماده/ساختار	سازوکار نظری غالب	مزیت‌های مورد انتظار	ریسک‌ها و محدودیت‌های نظری
اکسید گرافن (GO)	افزایش آب‌دوستی، ایجاد گروه‌های عاملی، مسیرهای لایه‌ای انتقال، برهم‌کنش الکترواستاتیک و جذب سطحی	افزایش شار، کاهش زاویه تماس، بهبود حذف مواد آلی و برخی فلزات، کاهش تمایل به فولینگ	تجمع ورقه‌ها، افزایش مقاومت انتقالی در بارگذاری زیاد، نشت ذرات، دشواری پراکنش یکنواخت
ژئولیت	تخلخل منظم، تبادل یونی، جذب سطحی، افزایش گزینش‌پذیری	حذف فلزات سنگین، پایداری شیمیایی و حرارتی، بهبود عملکرد غشاهای جاذب	انسداد منافذ، افزایش زبری، افت شار در بارگذاری زیاد، ناسازگاری بین‌فازی با پلیمر
MOF / ZIF	حجم آزاد بالا، مسیرهای انتخابی انتقال، جذب فعال، تنظیم‌پذیری شیمیایی	بهبود هم‌زمان نفوذپذیری و حذف، جذب یون‌ها و رنگ‌ها، امکان عملکرد چندمنظوره	پایداری محدود در آب برای برخی ساختارها، هزینه ساخت، اتصال ضعیف به ماتریس، پیچیدگی سنتز
نانولوله‌های کربنی /	کانال‌های انتقال، جذب سطحی، افزایش استحکام، تغییر شیمی	بهبود حذف فلزات و ترکیبات آلی، استحکام بهتر، تغییر	تجمع ذرات، خطر مسدودسازی، مسائل ایمنی و پایداری

MWCNT	سطح	خواص سطحی
الیاف توخالی نانوساختار	افزایش سطح مؤثر، کنترل آرایش منافذ، شار بالاتر در واحد سطح	مناسب برای پساب های روغنی و سامانه های پیوسته، چگالی بسته بندی بالا
		فشرده گی ساختار، حساسیت به فشار و فولینگ، دشواری شست و شو در برخی آرایش ها

از سوی دیگر، مبانی نظری طراحی این سامانه ها به رویکرد چندمعیاره در مهندسی تصمیم نیز وابسته است. یک غشا یا نانوماده زمانی از نظر طراحی بهینه تلقی می شود که در چند شاخص به طور همزمان عملکرد قابل قبول داشته باشد: شار عبوری، درصد حذف، پایداری بلندمدت، شدت فولینگ، امکان شست و شو، استحکام مکانیکی، مقاومت شیمیایی، هزینه ساخت، هزینه انرژی و ایمنی زیست محیطی. این منطق با رویکردهای سنتی که تنها بر یک شاخص نظیر «بیشترین درصد حذف» تمرکز می کردند تفاوت بنیادین دارد. برای نمونه، ممکن است غشایی با تراکم بالا حذف بیشتری از COD یا TDS داشته باشد، اما به دلیل فشار عملیاتی بالا و افت سریع شار، از منظر بهره برداری صنعتی نامطلوب تر از غشایی باشد که اندکی حذف کمتر اما پایداری و اقتصاد بهتر دارد. مطالعه فارسی مربوط به مقایسه NF و RO در پساب عسلویه دقیقاً این نکته را برجسته می کند؛ زیرا هرچند RO درصد تصفیه بالاتری نشان داده، اما مسئله گرفتگی و وابستگی عملکرد به فشار نیز پررنگ شده است (لشگری و همکاران، ۱۴۰۱). از این رو، مبانی نظری طراحی سامانه تصفیه نمی تواند فقط بر «بیشینه سازی راندمان» مبتنی باشد، بلکه باید بر «بهینه سازی مجموعه ای از اهداف متعارض» استوار شود.

همچنین، از منظر مهندسی محیط زیست، نظریه طراحی باید به ماهیت واقعی پساب ها توجه داشته باشد. پساب صنعتی یک محیط ساده و همگن نیست؛ بلکه سامانه ای پویا با نوسان بار آلی، pH، نمک، روغن، دما، یون های مزاحم، مواد فعال سطحی و ذرات کلوئیدی است. بنابراین، هر مدلی از عملکرد غشا که صرفاً بر محلول های سنتزی یا تک آلاینده مبتنی باشد، تنها بخشی از واقعیت را بازنمایی می کند. ادبیات جدید بارها بر این نکته تأکید کرده است که شکاف بین نتایج به دست آمده روی خوراک مصنوعی و عملکرد روی پساب واقعی یکی از اصلی ترین موانع انتقال فناوری به صنعت است (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶). این موضوع در مبانی نظری مقاله حاضر اهمیت بالایی دارد، زیرا بیان می کند که ارزیابی مواد متخلخل نانوساختار باید در زمینه کاربرد مشخص انجام شود، نه در خلأ تجربی.

در مجموع، مبانی نظری این پژوهش بر چند گزاره اصلی استوار است: نخست آنکه فیلتراسیون غشایی یک پدیده چندسازه ای است که در آن انتقال جرم، ساختار منفذی، شیمی سطح و شرایط عملیاتی به طور همزمان تعیین کننده اند. دوم آنکه مواد متخلخل نانوساختار می توانند از طریق افزایش آب دوستی، ایجاد مسیرهای انتقال انتخابی، افزودن مراکز جذب فعال و کاهش تمایل به فولینگ، عملکرد غشا را بهبود دهند؛ اما این بهبود وابسته به پراکنش مناسب، بارگذاری بهینه و پایداری بین فازی است. سوم آنکه فولینگ نه یک عارضه جانبی، بلکه متغیر مرکزی طراحی سامانه است و هر بحثی درباره مزایای نانومواد باید با تحلیل رفتار فولینگ همراه باشد. چهارم آنکه انتخاب میان UF، UF، تنگ، MBR، NF یا سامانه های ترکیبی، تابع مستقیم نوع آلاینده، کیفیت مورد نیاز آب خروجی و محدودیت های اقتصادی-عملیاتی است. و پنجم آنکه ارزیابی واقعی یک طراحی موفق، تنها با رویکرد چندمعیاره و مبتنی بر پساب واقعی، داده های بلندمدت و سنجش همزمان کارایی، دوام و ایمنی ممکن است. بر پایه این مبانی نظری، بخش های بعدی مقاله به ویژه در پیشینه پژوهش، روش شناسی و تحلیل داده ها، نشان خواهند داد که چگونه می توان این اصول را از سطح نظری به سطح طراحی و ارزیابی کاربردی سامانه تصفیه پساب منتقل کرد (لشگری و همکاران، ۱۴۰۱؛ پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵؛ خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش در حوزه طراحی سیستم های تصفیه پساب مبتنی بر فیلتراسیون غشایی با استفاده از مواد متخلخل نانو ساختار، در سال های اخیر به گونه ای چشمگیر گسترش یافته است. این گسترش نه تنها حاصل افزایش بحران آب و نیاز فزاینده به بازچرخانی پساب در بخش های صنعتی و شهری است، بلکه ناشی از نارضایتی فنی از عملکرد غشاهای متداول در برابر خوراک های پیچیده، نوسانی و مستعد فولینگ نیز هست. در نتیجه، ادبیات پژوهشی از حدود سال ۲۰۱۵ به بعد، به طور فزاینده ای از دو مسیر موازی توسعه یافته است: مسیر نخست، تمرکز بر بهبود فرایندهای غشایی موجود نظیر اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و زیست راکتورهای غشایی از طریق بهینه سازی فشار، آرایش ماژول، پیش تصفیه و راهبردهای شست و شو؛ و مسیر دوم، تمرکز بر اصلاح ماده غشایی از طریق افزودن نانوذرات، ساخت غشاهای نانوکامپوزیتی، بهره گیری از مواد متخلخل مهندسی شده و توسعه غشاهای mixed-matrix با هدف دستیابی همزمان به شار بالاتر، پس رزی بیشتر و تمایل کمتر به فولینگ. آنچه این دو مسیر را به هم پیوند می دهد، تلاش برای عبور از محدودیت سنتی «رابطه مبادله ای شار-انتخاب پذیری» است؛ یعنی همان مسئله ای که در بسیاری از غشاهای متداول، افزایش دقت جداسازی را با افت شار و افزایش مصرف انرژی همراه می کند (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶؛ خویردین و همکاران، ۲۰۲۵).

در بررسی مطالعات پیشین، نخست باید به این نکته توجه کرد که پیشینه این حوزه از نظر نوع رویکرد پژوهشی یکدست نیست. بخشی از مطالعات ماهیت مروری و مفهومی دارند و به تحلیل روندهای کلان فناوری، خانواده های مختلف مواد نانو ساختار، چالش های فولینگ و افق های تجاری سازی می پردازند. بخشی دیگر مطالعات آزمایشگاهی هستند که عملکرد غشاهای اصلاح شده را در مقیاس bench-scale روی محلول های سنتزی یا نیمه واقعی بررسی می کنند. دسته سوم به پژوهش های کاربردی یا نیمه صنعتی اختصاص دارد که در آن ها غشاها روی پساب های واقعی نفتی، نساجی، شهری، دارویی یا شیمیایی آزمون شده اند. دسته چهارم نیز شامل پژوهش هایی است که به جای تمرکز صرف بر جنس غشا، بر طراحی سامانه های ترکیبی مانند MBR، UF/NF، NF/RO یا غشا-جذب-اکسیداسیون پیشرفته تأکید دارند. اهمیت این دسته بندی در آن است که نتایج هر دسته را نباید بدون ملاحظه زمینه تولید آن ها با یکدیگر مقایسه کرد؛ زیرا بسیاری از بهبودهای گزارش شده در مطالعات آزمایشگاهی، در مطالعات نیمه صنعتی تکرارپذیری کامل ندارند و این خود یکی از مهم ترین نقاط انتقادی در پیشینه پژوهش به شمار می رود (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵).

یکی از محورهای برجسته در پیشینه جدید، توسعه و ارزیابی غشاهای اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون اصلاح شده است. در مرور تحلیلی منتشر شده توسط پوتو تتا و همکاران در سال ۲۰۲۵، مفهوم غشاهای Tight-UF به عنوان حلقه واسط بین UF و NF به طور نظام مند بررسی شده است. این مطالعه نشان می دهد که Tight-UF ها می توانند برای حذف ذرات ریز، کدورت، رنگ، برخی ترکیبات آلی و حتی بخشی از آلاینده های کوچک تر از آنچه در UF کلاسیک ممکن است، عملکرد بهتری ارائه دهند، در حالی که از نظر فشار عملیاتی همچنان مزایایی نسبت به NF حفظ می کنند. در این مرور گزارش شده است که برخی غشاهای Tight-UF در حذف کدورت تا ۹۹ درصد و در حذف رنگ از پساب نساجی تا حدود ۹۰ درصد موفق بوده اند، و در برخی نمونه های سرمایه گذاری راندمان حذف به بیش از ۹۸ درصد نیز رسیده است (پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵). اهمیت این پژوهش در پیشینه حاضر آن است که نشان می دهد مرز میان UF و NF در حال بازتعریف است و طراحان سامانه های تصفیه دیگر نمی توانند تنها به دسته بندی سنتی اکتفا کنند. با این حال، این مطالعه نیز تصریح می کند که مسئله شار بلندمدت، فولینگ و پایداری در خوراک واقعی همچنان به طور کامل حل نشده است. بنابراین، هرچند Tight-UF از نظر مفهومی مسیری امیدبخش است، اما هنوز جایگاه آن در مقیاس صنعتی برای همه انواع پساب تثبیت نشده است.

در کنار این دسته از مطالعات، پژوهش های متعددی بر غشاهای نانوکامپوزیتی مبتنی بر پلیمرهای متداول تمرکز کرده اند. این مطالعات غالباً از پلیمرهایی نظیر PES، PSF، PVDF و PA به عنوان ماتریس پایه استفاده کرده و نانوذراتی مانند GO، SiO_2 ، TiO_2 ، Al_2O_3 ، CNT و MOF را به ساختار غشا افزوده اند. در یک مطالعه فارسی درباره تصفیه پساب نفتی با غشای پلی اترسولفون اصلاح شده با اکسید گرافن، گزارش شد که افزودن ۰/۵ درصد وزنی GO موجب بهبود هم زمان شار و حذف COD شده و شار غشا از حدود ۹۶ به ۱۳۹ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت و راندمان حذف COD به ۹۶/۱۲ درصد رسیده است؛ اما با افزایش بیشتر مقدار GO، ویسکوزیته محلول ساخت غشا افزایش یافته و پراکندگی نامناسب ذرات، عملکرد را تضعیف کرده است («بررسی تأثیر افزودن نانوذره اکسید گرافن بر عملکرد غشای پلی اترسولفون برای تصفیه پساب نفتی»، بدون تاریخ قابل مشاهده). این مطالعه از جمله پژوهش هایی است که به خوبی ماهیت غیرخطی رابطه بین مقدار نانوماده و کارایی غشا را نشان می دهد. به بیان دیگر، پیشینه به صورت نسبتاً روشن ثابت کرده است که «افزودن بیشتر» الزاماً به معنای «عملکرد بهتر» نیست و نقطه بهینه بارگذاری تابعی از سازگاری فازی، روش ساخت، نوع پلیمر و ماهیت خوراک است.

در حوزه تصفیه پساب های روغنی و نفتی، پیشینه پژوهش به طور خاص غنی است؛ زیرا این نوع پساب ها به دلیل وجود امولسیون های پایدار، ترکیبات آب گریز، تنوع گسترده قطرات روغن، و حضور هم زمان نمک ها و مواد فعال سطحی، از دشوارترین خوراک ها برای فیلتراسیون غشایی به شمار می روند. در یک مطالعه فارسی درباره استفاده از غشای نانوساختار الیاف توخالی پلی اترسولفون برای تصفیه پساب های نفتی، گزارش شد که این سامانه در شرایط بهینه قادر به دستیابی به جداسازی بسیار بالای فاز روغنی بوده است و در فشارهای نسبتاً پایین عملکرد مناسبی نشان داده، اما در فشارهای بالاتر، فشردگی ساختار و تشدید گرفتگی به افت تدریجی شار انجامیده است («تصفیه پساب های نفتی با استفاده از غشای نانوساختار الیاف توخالی پلی اترسولفون»، بدون تاریخ قابل مشاهده). این یافته با بسیاری از نتایج بین المللی همسو است که نشان می دهند آرایش الیاف توخالی به دلیل سطح ویژه بالا و امکان بسته بندی متراکم، برای کاربردهای پیوسته مناسب است، اما مدیریت فولینگ در آن اهمیت دوچندان دارد. مرورهای جدید نیز بیان می کنند که برای این نوع پساب ها، اصلاح آب دوستی سطح، کنترل زبری و استفاده از نانوذراتی که مقاومت در برابر آلودگی آلی را افزایش می دهند، مؤثرتر از تمرکز صرف بر کوچک سازی اندازه منفذ است (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶).

یکی از جریان های مهم در پیشینه پژوهش، مطالعات مرتبط با غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون است. این دسته از پژوهش ها کوشیده اند مرز سنتی میان «جداسازی غشایی» و «جذب سطحی» را از بین ببرند و غشا را به بستری تبدیل کنند که در آن حذف آلاینده ها فقط از طریق غربالگری اندازه ای صورت نگیرد. در مرور کوتاهی درباره غشاهای جاذب اولترافیلتراسیون در تصفیه آب، گزارش شده است که افزودن پرکننده هایی مانند آلومینا، زئولیت، GO، MWCNT، Ni(II) ، Pb(II) ، Cd(II) ، Cr(VI) ، متیلن بلو و سایر ترکیبات رنگی یا ساختارهای متخلخل می تواند حذف آلاینده هایی مانند Cr(VI) را تا ۹۴/۲ درصد و Cd(II) را تا ۷۸/۲ درصد برای نمونه، در این مرور اشاره شده که غشای PSF/MWCNT حذف Cr(VI) را تا ۹۴/۲ درصد و Cd(II) را تا ۷۸/۲ درصد رسانده، در حالی که غشای فاقد این نانوساختار عملکرد به مراتب ضعیف تری داشته است. همچنین غشاهای حاوی زئولیت یا AZIF- ظرفیت های جذب بالایی برای فلزات سنگین از خود نشان داده اند. اهمیت این جریان پژوهشی در آن است که نشان می دهد مواد متخلخل نانوساختار می توانند غشا را از یک مانع منفعل به یک محیط عملکردی فعال تبدیل کنند. با این حال، بسیاری از این مطالعات در محیط های نسبتاً ساده انجام شده اند و هنوز پرسش هایی جدی درباره رقابت یونی، اشباع مراکز جذب، قابلیت احیای غشا و پایداری عملکرد در چرخه های مکرر وجود دارد.

در سطحی کلان تر، مرور منتشر شده توسط خویردین و همکاران (۲۰۲۵) درباره زیست راکتورهای غشایی نسل آینده، چشم انداز بسیار مهمی برای جایگاه غشاهای نانو ساختار در سامانه های ترکیبی ارائه می دهد. این پژوهش نشان می دهد که MBRها به عنوان یکی از مهم ترین فناوری های تصفیه پیشرفته فاضلاب، در دهه اخیر از مدل های متعارف به سمت سامانه های هوشمندتر و کارآمدتر حرکت کرده اند؛ سامانه هایی که در آنها از غشاهای نانوکامپوزیتی، مواد ضدباکتری، پوشش های ضد فولینگ، تلفیق با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و حتی مدل های یادگیری ماشین برای پیش بینی و کنترل گرفتگی استفاده می شود (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵). این مطالعه به طور خاص تأکید می کند که مسیر آینده فناوری غشایی نه در تکامل یک جزء منفرد، بلکه در هم افزایی میان علم مواد، طراحی فرایند و تحلیل داده نهفته است. از این نظر، این مطالعه برای مقاله حاضر اهمیت نظری و کاربردی مضاعف دارد؛ زیرا نشان می دهد طراحی سامانه تصفیه با مواد متخلخل نانو ساختار باید در چارچوبی کلان تر از خود غشا دیده شود. در عین حال، همین مرور نیز تصریح می کند که هزینه، پیچیدگی بهره برداری و دشواری نگهداری، هنوز از چالش های اصلی تجاری سازی MBRهای نسل جدید هستند.

از دیگر مطالعات مهم، پژوهش های مقایسه ای میان نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس در پساب های صنعتی واقعی است. مطالعه لشگری، لشگری، کشاورز و عیسوندی (۱۴۰۱) درباره تصفیه پساب صنعتی در منطقه عسلویه با استفاده از غشاهای NF و RO، از این منظر اهمیت دارد که برخلاف بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی، روی یک خوراک صنعتی واقعی متمرکز است. در این مطالعه گزارش شده است که در فشار ۷ بار و دبی ۷۲۰ لیتر بر ساعت، راندمان تصفیه برای غشای NF حدود ۹۲ درصد و برای RO حدود ۹۸/۵ درصد بوده است و با افزایش فشار تا حدود ۱۰ بار، شار عبوری افزایش یافته، اما همزمان آثار منفی گرفتگی و افزایش مقاومت نیز برجسته شده است (لشگری و همکاران، ۱۴۰۱). ارزش این مطالعه در پیشینه حاضر آن است که نشان می دهد ارزیابی عملکرد غشا تنها بر اساس بیشینه راندمان حذف کافی نیست. غشای RO در این تحقیق حذف بالاتری نشان داده، اما این برتری باید در کنار مصرف انرژی بیشتر، حساسیت عملیاتی و پیچیدگی مقابله با فولینگ تفسیر شود. از سوی دیگر، NF هرچند حذف کمتر داشته، اما می تواند در برخی سناریوهای بازچرخانی یا پیش تصفیه، گزینه ای اقتصادی تر و انعطاف پذیرتر باشد. این نوع پژوهش ها برای طراحی سامانه های واقعی بسیار راهگشاست از مطالعاتی هستند که صرفاً یک شاخص عملکردی را در محیط آزمایشگاهی بهینه می کنند.

در سال های اخیر، توجه پژوهشگران به غشاهای نانویی پایدار و مقاوم در برابر فولینگ نیز افزایش یافته است. شاهچراغی و همکاران (۲۰۲۶) در یک مرور جامع بر غشاهای پیشرفته و نانویی برای تصفیه پساب، تأکید می کنند که چالش اساسی فناوری غشایی دیگر صرفاً دستیابی به شار اولیه بالا یا پس زنی زیاد نیست، بلکه دستیابی به غشاهایی است که در محیط های واقعی، نوسانی و آلوده بتوانند پایداری بلندمدت، قابلیت شست و شو و مقاومت در برابر تخریب مکانیکی و شیمیایی را حفظ کنند. این مطالعه مجموعه وسیعی از غشاهای نانوکامپوزیتی، غشاهای حاوی GO، ژئولیت و MOF، و نیز غشاهای با اصلاح سطح ضدباکتری یا فوتوکاتالیستی را بررسی کرده و به این جمع بندی رسیده است که بیشتر دستاوردهای گزارش شده هنوز در مرحله توسعه آزمایشگاهی هستند و شکاف انتقال فناوری به صنعت، به ویژه از نظر دوام، مقیاس پذیری و ارزیابی اقتصادی، همچنان پابرجاست (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶). این نتیجه در پیشینه مقاله حاضر بسیار کلیدی است؛ زیرا نشان می دهد بدنه ادبیات گرچه از نظر حجم رشد کرده، اما از نظر بلوغ صنعتی هنوز به مرحله ای نرسیده که بتوان بر پایه آن نسخه ای یکسان برای همه انواع پساب تجویز کرد.

از منظر روش شناختی، یکی از نقدهای مهم به پیشینه پژوهش آن است که همگنی در گزارش نتایج وجود ندارد. برخی مطالعات شار را بر حسب LMH، برخی بر حسب $h \cdot 2.2^{22} kg/m$ ، برخی بر پایه جریان حجمی و برخی بر پایه بازیافت گزارش

می‌کنند. در برخی مطالعات درصد حذف COD گزارش شده، در برخی حذف رنگ یا کدورت، و در برخی تنها زاویه تماس یا تخلخل به عنوان شاخص بهبود مطرح شده است. افزون بر این، شرایط عملیاتی مانند فشار، pH، دما، زمان کارکرد، ماهیت خوراک و روش شست‌وشو در بسیاری از پژوهش‌ها به طور کامل یکسان نیست. بنابراین، مقایسه مستقیم نتایج بدون بازتفسیر زمینه‌ای می‌تواند گمراه‌کننده باشد. این مسئله سبب شده است که با وجود انبوهی از مطالعات، هنوز پاسخ روشنی به این پرسش وجود نداشته باشد که کدام ماده متخلخل نانوساختار در چه مقیاس و برای چه نوع پسایی، برتری واقعی و پایدار دارد. به عبارت دیگر، پیشینه موجود از نظر توصیفی غنی است، اما از نظر استانداردسازی مقایسه‌ها هنوز با محدودیت مواجه است.

نقد مهم دیگر به پیشینه این است که بخش بزرگی از مطالعات بر محلول‌های سنتزی یا تک‌آلاینده متمرکز بوده‌اند. این در حالی است که پساب واقعی معمولاً دارای ماتریس پیچیده‌ای از نمک‌ها، مواد آلی، روغن، مواد فعال سطحی، فلزات، جامدات معلق و میکروارگانیسم‌هاست. در چنین شرایطی، یک غشا ممکن است در محیط سنتزی عملکرد بسیار مطلوبی داشته باشد، اما در محیط واقعی با کاهش شدید شار، اشباع سریع مراکز جذب یا فولینگ پیچیده مواجه شود. مرورهای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶ به طور مکرر بر این شکاف تأکید کرده‌اند و آن را مهم‌ترین مانع تعمیم‌پذیری یافته‌ها دانسته‌اند (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵؛ شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶). بنابراین، اگرچه پیشینه پژوهش نقش GO، زئولیت و MOF را در بهبود عملکرد غشاها به خوبی نشان می‌دهد، اما هنوز نیاز جدی به پژوهش‌هایی وجود دارد که این مواد را در شرایط واقعی، روی پساب‌های صنعتی و شهری با بار متغیر، و در دوره‌های بهره‌برداری طولانی‌تر ارزیابی کنند.

بر پایه مرور انجام‌شده، می‌توان پیشینه پژوهش را در چند جمع‌بندی تحلیلی خلاصه کرد. نخست آنکه ادبیات موجود به طور گسترده تأیید می‌کند که اصلاح غشا با مواد متخلخل نانوساختار می‌تواند آب‌دوستی را افزایش دهد، شار را بهبود بخشد، درصد حذف آلاینده‌ها را بالا ببرد و در برخی موارد شدت فولینگ را کاهش دهد. دوم آنکه GO، زئولیت و MOF هر یک مسیر عملکردی متمایزی دارند: GO بیشتر در بهبود آب‌دوستی و کنترل انتقال جرم برجسته است، زئولیت در جذب و تبادل یونی مزیت دارد، و MOF‌ها در طراحی تخلخل و برهم‌کنش انتخابی با آلاینده‌ها ظرفیت بالایی از خود نشان می‌دهند. سوم آنکه اغلب این مزایا وابسته به بارگذاری بهینه، پراکنش مناسب، سازگاری بین‌فازی و کنترل دقیق فرایند ساخت هستند. چهارم آنکه بخش بزرگی از پیشینه هنوز در سطح bench-scale باقی مانده و داده‌های صنعتی بلندمدت محدود است. پنجم آنکه مطالعاتی مانند لشگری و همکاران (۱۴۰۱) و مرورهای کاربردی جدید نشان می‌دهند که طراحی موفق سامانه تصفیه، تنها از مسیر ترکیب علم مواد با تحلیل فرایندی، مدیریت فولینگ و ارزیابی چندمعیاره ممکن است. و ششم آنکه شکاف اصلی پژوهشی همچنان در گذار از «بهبود عملکرد غشا در محیط کنترل‌شده» به «طراحی سامانه پایدار، اقتصادی و قابل اجرا در شرایط واقعی» قرار دارد.

با توجه به این پیشینه، جایگاه پژوهش حاضر روشن‌تر می‌شود. مقاله حاضر درصدد نیست صرفاً فهرستی از غشاهای اصلاح‌شده و راندمان‌های گزارش‌شده ارائه کند، بلکه می‌کوشد با رویکردی تحلیلی و مقایسه‌ای، نشان دهد که چگونه می‌توان یافته‌های پراکنده ادبیات را به یک منطق طراحی سامانه‌ای تبدیل کرد. به بیان دقیق‌تر، پژوهش حاضر در امتداد پیشینه موجود، اما فراتر از آن، بر شناسایی رابطه ماده-ساختار-عملکرد در غشاهای مبتنی بر مواد متخلخل نانوساختار، بررسی تفاوت میان نتایج آزمایشگاهی و کاربرد واقعی، و تبیین معیارهای انتخاب بین گزینه‌های غشایی مختلف متمرکز است. از این منظر، خلأ اصلی که این پژوهش دنبال می‌کند، نه فقدان مطالعات درباره نانومواد، بلکه فقدان یک چارچوب تحلیلی یکپارچه برای ترجمه یافته‌های این مطالعات به تصمیم طراحی مهندسی در سامانه‌های تصفیه پساب است.

روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش در مقاله حاضر بر این مبنا طراحی شده است که ارزیابی فناوری‌های فیلتراسیون غشایی مبتنی بر مواد متخلخل نانوساختار، تنها با اتکا به توصیف مفهومی یا گزارش‌های پراکنده عملکردی کافی نیست، بلکه باید در یک چارچوب نظاممند، مقایسه‌پذیر و قابل تحلیل انجام گیرد. از این رو، روش تحقیق حاضر از نوع کاربردی-توسعه‌ای و از حیث شیوه اجرا، توصیفی-تحلیلی با بهره‌گیری از مرور نظاممند هدفمند، استخراج داده‌های عملکردی از مطالعات منتخب و تحلیل تطبیقی شاخص‌های فنی و عملیاتی است. در واقع، این پژوهش در سطح روش‌شناختی می‌کوشد میان ادبیات نظری، داده‌های تجربی گزارش‌شده در منابع معتبر و منطق طراحی مهندسی سامانه‌های تصفیه پساب پیوند برقرار کند. به بیان دقیق‌تر، مقاله حاضر یک مطالعه صرفاً کتابخانه‌ای به معنای سنتی نیست، بلکه مطالعه‌ای است که در آن اطلاعات ساختاریافته از مقالات، مرورها و گزارش‌های علمی معتبر گردآوری و در قالب یک الگوی تحلیلی بازتفسیر می‌شود تا بتوان از دل آن، چارچوبی برای طراحی و ارزیابی سامانه‌های تصفیه پساب مبتنی بر غشاهای اصلاح‌شده با مواد متخلخل نانوساختار استخراج کرد.

رویکرد کلی این پژوهش بر پایه سه لایه تحلیلی سامان یافته است. در لایه نخست، تحلیل مفهومی و نظری انجام شده است تا مبانی علمی مرتبط با فیلتراسیون غشایی، ساختار و عملکرد مواد متخلخل نانوساختار، مکانیزم‌های انتقال جرم، فولینگ و رفتار سامانه‌های غشایی در برابر پساب‌های مختلف تبیین شود. این لایه بیشتر در بخش‌های مقدمه و مبانی نظری متبلور شده و نقش آن فراهم کردن بستری برای تفسیر یافته‌های تجربی است. در لایه دوم، مرور نظاممند هدفمند ادبیات انجام شده است تا مطالعات مرتبط با غشاهای UF، Tight-UF، NF، RO، MBR و غشاهای نانوکامپوزیتی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ شناسایی، غربال و تحلیل شوند. در لایه سوم، تحلیل تطبیقی داده‌های استخراج‌شده از مطالعات منتخب صورت گرفته است تا اثر نوع ماده نانوساختار، جنس غشا، نوع پساب، فشار عملیاتی، شاخص‌های حذف و رفتار فولینگ بر عملکرد نهایی سامانه بررسی شود. بنابراین، روش تحقیق حاضر ماهیتی ترکیبی دارد که عناصر مرور نظاممند، تحلیل محتوای علمی و مقایسه فنی-عملیاتی را در کنار هم قرار می‌دهد.

این رویکرد از آن جهت برگزیده شده است که ماهیت مسئله پژوهش صرفاً تجربی یا صرفاً نظری نیست. اگرچه می‌توانست یک مطالعه آزمایشگاهی مستقل برای ساخت و آزمون غشا طراحی شود، اما هدف مقاله حاضر در این مرحله، ارائه چارچوب طراحی و تحلیل مبتنی بر شواهد موجود است؛ چارچوبی که بتواند هم به فهم شکاف‌های دانشی کمک کند و هم مبنایی برای مطالعات تجربی بعدی فراهم آورد. بنابراین، در این مقاله، روش‌شناسی به‌گونه‌ای تعریف شده است که از یک‌سو استحکام علمی ناشی از تکیه بر منابع معتبر حفظ شود و از سوی دیگر، داده‌های گردآوری‌شده به‌شکل صرفاً توصیفی رها نشوند، بلکه به‌صورت هدفمند در راستای پاسخ به پرسش‌های پژوهش تحلیل شوند.

از منظر هدف، این پژوهش کاربردی است؛ زیرا به دنبال حل یا تبیین یک مسئله واقعی در حوزه تصفیه پساب و طراحی سامانه‌های غشایی است و نتایج آن می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های فنی، طراحی مفهومی سامانه و جهت‌دهی پژوهش‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد. از منظر ماهیت، پژوهش حاضر توسعه‌ای نیز تلقی می‌شود؛ زیرا در پی توسعه یک چارچوب تحلیلی برای تلفیق داده‌های مربوط به مواد متخلخل نانوساختار با ملاحظات عملیاتی و طراحی مهندسی است. از حیث روش گردآوری و تحلیل داده‌ها، این مطالعه در زمره تحقیقات توصیفی-تحلیلی قرار می‌گیرد؛ زیرا ابتدا داده‌ها و یافته‌های موجود توصیف، دسته‌بندی و ساختاردهی شده و سپس از طریق مقایسه و تحلیل، الگوهای حاکم بر عملکرد غشاها استخراج شده است.

طرح تحقیق حاضر به صورت مرور نظام مند هدفمند با سنتز تحلیلی تنظیم شده است. تعبیر «هدفمند» در اینجا از آن جهت به کار می رود که برخلاف مرورهای صرفاً گسترده که به گردآوری تمام مطالعات ممکن بسنده می کنند، در این پژوهش تنها مطالعاتی انتخاب شده اند که به طور مستقیم با پرسش اصلی مقاله یعنی «نقش مواد متخلخل نانو ساختار در طراحی و بهبود سامانه های تصفیه پساب مبتنی بر فیلتراسیون غشایی» مرتبط باشند. همچنین تعبیر «سنتز تحلیلی» به این معناست که داده های گردآوری شده صرفاً فهرست نشده اند، بلکه در قالب مقوله های مشخص مانند نوع غشا، نوع ماده نانو ساختار، نوع پساب، شاخص عملکرد، شرایط عملیاتی و محدودیت های گزارش شده تحلیل شده اند.

جامعه پژوهش حاضر را منابع علمی معتبر مرتبط با تصفیه پساب به کمک غشاهای اصلاح شده با مواد متخلخل نانو ساختار تشکیل می دهد. این جامعه شامل مقالات پژوهشی، مقالات مروری، گزارش های علمی معتبر و برخی منابع فارسی و انگلیسی مرتبط با فناوری های غشایی، نانوکامپوزیت ها، غشاهای جاذب، MBR های نسل جدید و کاربرد UF، NF و RO در تصفیه پساب است. قلمرو زمانی مطالعه، مطابق با چارچوب مورد توافق، سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ در نظر گرفته شده است تا هم مطالعات جدید و هم روندهای تحول فناوری در یک بازه نسبتاً کافی پوشش داده شود.

قلمرو موضوعی مطالعه بر پژوهش هایی متمرکز است که دست کم یکی از ویژگی های زیر را داشته باشند:

۱. بررسی عملکرد غشاهای UF، Tight-UF، NF، RO یا MBR در تصفیه پساب؛
 ۲. استفاده از مواد متخلخل نانو ساختار مانند GO، زئولیت، MOF، ZIF، CNT، اکسیدهای فلزی یا نانوکامپوزیت های مرتبط در ساخت یا اصلاح غشا؛
 ۳. گزارش حداقل یکی از شاخص های عملکردی نظیر شار، درصد حذف COD، TOC، TDS، رنگ، فلزات سنگین، کدورت یا شاخص های فولینگ؛
 ۴. ارائه داده یا تحلیل قابل استناد درباره رفتار غشا در شرایط عملیاتی، پایداری، احیاءپذیری، یا چالش های بهره برداری؛
 ۵. ارتباط مستقیم با طراحی سامانه تصفیه برای پساب های صنعتی، شهری، نفتی، نساجی، دارویی یا شیمیایی.
- قلمرو مکانی پژوهش محدود به یک کشور یا منطقه خاص نشده است، اما منابع فارسی مرتبط با ایران و به ویژه مطالعات کاربردی روی پساب های صنعتی واقعی نیز در تحلیل وارد شده اند تا پیوند مقاله با واقعیت های بهره برداری در محیط های بومی حفظ شود.
- گردآوری داده ها در این پژوهش به صورت کتابخانه ای-اسنادی و بر مبنای جست و جوی ساختاریافته در منابع علمی انجام شده است. در این مرحله، ابتدا واژگان کلیدی اصلی و ترکیبی مرتبط با موضوع استخراج شدند. نمونه ای از این کلیدواژه ها شامل مواردی مانند: membrane filtration, ultrafiltration, tight ultrafiltration, nanofiltration, membrane bioreactor, porous nanostructured materials, graphene oxide, zeolite, metal-organic frameworks, mixed-matrix membranes, oily wastewater treatment, industrial wastewater reuse, fouling mitigation و معادل های فارسی آنها بوده است.
- پس از تعیین کلیدواژه ها، منابع بر اساس معیارهای ارتباط موضوعی، تازگی، اعتبار علمی، قابلیت استناد، و وجود داده های عملکردی یا تحلیلی غربال شدند. داده های منتخب از هر منبع در قالب یک فرم مفهومی استخراج گردید که شامل این مؤلفه ها بود:

- مشخصات منبع: نویسنده/نویسندگان، سال، نوع منبع؛
 - نوع غشا: UF، Tight-UF، NF، RO، MBR یا سامانه ترکیبی؛
 - جنس غشای پایه: مانند PES، PSF، PVDF، PA و غیره؛
 - نوع ماده نانوساختار: GO، زئولیت، MOF، ZIF، CNT، SiO_2 ، Al_2O_3 و غیره؛
 - نوع پساب: نفتی، نساجی، صنعتی، شهری، دارویی، فلزی و غیره؛
 - شرایط عملیاتی: فشار، pH، دما، زمان، دبی، آرایش ماژول؛
 - شاخص های عملکرد: شار، درصد حذف، پس زنی، بازیابی، شدت فولینگ، قابلیت شست و شو؛
 - مزایا و محدودیت های گزارش شده؛
 - دلالت پژوهش برای طراحی سامانه.
- این ساختار استخراج داده سبب شد که منابع ناهمگون، تا حد امکان در یک قالب مشترک قابل مقایسه شوند و امکان سنتز تحلیلی یافته ها فراهم گردد.

برای افزایش انسجام علمی پژوهش، معیارهای مشخصی برای ورود و خروج منابع در نظر گرفته شد.

الف) معیارهای ورود

منابعی وارد مطالعه شدند که:

- در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ منتشر شده باشند؛
- در مجلات علمی معتبر، گزارش های فنی قابل اتکا یا منابع دانشگاهی مستند ارائه شده باشند؛
- ارتباط مستقیم با تصفیه پساب مبتنی بر غشا و مواد متخلخل نانوساختار داشته باشند؛
- دارای داده های عملکردی، مقایسه ای یا تحلیل نظری قابل استفاده باشند؛
- از نظر روش ارائه نتایج، اطلاعات کافی برای تفسیر فنی داشته باشند.

ب) معیارهای خروج

منابعی از مطالعه کنار گذاشته شدند که:

- صرفاً به تصفیه آب آشامیدنی بدون ارتباط روشن با پساب پرداخته باشند؛
- تمرکز آن ها بر نانومواد بدون پیوند عملی با غشاهای تصفیه بوده باشد؛
- فاقد داده یا تحلیل معتبر درباره عملکرد، محدودیت یا سازوکار باشند؛

- از نظر اطلاعات روش شناختی ناقص بوده یا نتایج آن ها به گونه ای گزارش شده باشد که امکان تفسیر تطبیقی را سلب کند؛

- تکراری، کم اعتبار یا فاقد نوآوری موضوعی مؤثر برای پرسش پژوهش باشند.

این فرایند غربالگری به آن معنا نیست که همه منابع موجود در ادبیات موضوع به طور کامل پوشش یافته اند، بلکه هدف آن بوده است که منابعی انتخاب شوند که بیشترین ارتباط و بیشترین ارزش تحلیلی را برای پاسخ گویی به مسئله مقاله داشته باشند.

در پژوهش حاضر، به جای تعریف متغیرها به صورت آزمایشگاهی کلاسیک، از شاخص های تحلیلی و مقایسه ای استفاده شده است. این شاخص ها به عنوان ابعاد اصلی ارزیابی فناوری ها و مواد مورد مطالعه در نظر گرفته شدند. مهم ترین این شاخص ها عبارت اند از:

۱. شاخص های عملکردی

- شار عبوری غشا
- درصد حذف COD
- درصد حذف TOC
- درصد حذف TDS
- حذف رنگ
- حذف فلزات سنگین
- حذف کدورت و مواد معلق

۲. شاخص های ساختاری-مادی

- نوع پلیمر پایه
- نوع ماده نانو ساختار
- درصد بارگذاری نانوماده
- آب دوستی/زاویه تماس
- تخلخل و اندازه منافذ
- یکنواختی پراکنش پرکننده

۳. شاخص های عملیاتی

- فشار عملیاتی

- pH خوراک

- نوع جریان و آرایش ماژول

- نوع پیش تصفیه

- زمان بهره برداری

- قابلیت شست و شو و احیا

۴. شاخص های پایداری و ریسک

- شدت فولینگ

- افت شار در طول زمان

- پایداری مکانیکی

- پایداری شیمیایی

- احتمال نشت نانوذرات

- قابلیت تعمیم به مقیاس نیمه صنعتی یا صنعتی

۵. شاخص های تصمیم گیری مهندسی

- تعادل شار و حذف

- سازگاری با نوع پساب

- پیچیدگی بهره برداری

- قابلیت مقیاس پذیری

- ملاحظات اقتصادی و انرژی

این شاخص ها مبنای دسته بندی و تحلیل یافته ها در بخش یافته ها و بحث قرار می گیرند.

در این مرحله، تحلیل بر چند محور اصلی متمرکز شد:

۱. مقایسه اثر مواد مختلف نانوساختار بر شاخص های عملکردی غشا؛

۲. بررسی رابطه میان بارگذاری نانوماده و عملکرد نهایی؛

۳. تحلیل تفاوت عملکرد غشاها در محلول های سنتزی و پساب های واقعی؛

۴. شناسایی الگوهای تکرار شونده در تشدید یا کاهش فولینگ؛

۵. استخراج دلالت های طراحی برای انتخاب غشا و ماده مناسب بر حسب نوع پساب.

برای ارتقای اعتبار علمی پژوهش، چند راهبرد به کار گرفته شده است. نخست، انتخاب منابع از میان مطالعات معتبر و جدید انجام شده تا از اتکا به یافته های قدیمی یا غیرقابل اعتماد پرهیز شود. دوم، تحلیل ها بر پایه هم سنجی چند منبع صورت گرفته است، نه بر پایه یک مطالعه منفرد؛ به این معنا که هر نتیجه کلی، تا حد امکان با شواهد چندگانه پشتیبانی شده است. سوم، در مواردی که یافته های منابع با یکدیگر ناسازگار بوده اند، این ناسازگاری به عنوان بخشی از واقعیت علمی موضوع در نظر گرفته شده و به جای حذف آن، تلاش شده است دلایل احتمالی آن مانند تفاوت در خوراک، فشار، جنس پلیمر، روش ساخت یا شرایط آزمون تبیین شود. چهارم، از تفسیر اغراق آمیز یافته ها اجتناب شده و هر جا داده های بلندمدت، صنعتی یا مقیاس پذیر در دسترس نبوده، این محدودیت به صراحت لحاظ شده است.

از منظر روایی تحلیلی، پژوهش حاضر تلاش کرده است میان متغیرهای ماده، ساختار، عملکرد و بهره برداری ارتباطی منطقی برقرار کند. این روایی زمانی تقویت می شود که مثلاً بهبود شار فقط به عنوان یک عدد گزارش نشود، بلکه در نسبت با آب دوستی، ساختار منفذی، رفتار فولینگ و شرایط عملیاتی تفسیر گردد. بدین ترتیب، تحلیل ها از سطح توصیف ظاهری عبور کرده و به سطح تبیین فنی نزدیک شده اند.

یافته ها و تحلیل داده ها

یافته های این پژوهش بر پایه تحلیل تطبیقی و سنتز داده های استخراج شده از منابع علمی معتبر (مطابق با روش شناسی فصل قبل) ارائه شده اند. از آنجا که این پژوهش یک مطالعه ثانویه و تحلیلی است، داده های ارائه شده از مطالعات مختلف گردآوری شده و هدف از تحلیل آن ها، شناسایی الگوها، مقایسه عملکرد مواد و استخراج دلالت های طراحی است. به دلیل ناهمگونی در واحدهای اندازه گیری، نوع پساب و شرایط عملیاتی میان مطالعات آزمایشگاهی، امکان انجام آزمون های آماری استنباطی (مانند تحلیل واریانس یا آزمون t بر روی داده های خام) وجود نداشته است؛

تحلیل یافته ها در سه محور اصلی سازمان دهی شده است: (۱) ارزیابی عملکرد غشاهای متداول در برابر پساب های صنعتی واقعی، (۲) تأثیر مواد متخلخل نانوساختار (GO، زئولیت، MOF) بر بهبود عملکرد، و (۳) پایداری و مدیریت فولینگ در سامانه های نانوفیلتراسیون.

عملکرد غشاها در تصفیه پساب های صنعتی واقعی (مبنای مقایسه)

برای ایجاد یک مبنای مقایسه، ابتدا عملکرد غشاهای متداول NF و RO در مواجهه با پساب های صنعتی پیچیده، که نزدیک ترین داده های واقعی در ادبیات فارسی محسوب می شوند، بررسی شد. داده های گزارش شده توسط لشگری و همکاران (۱۴۰۱) درباره پساب صنعتی عسلویه، تصویر روشنی از رابطه مبادله ای شار-انتخاب پذیری در مقیاس نیمه صنعتی ارائه می دهد (جدول ۹-۱).

جدول ۲: مقایسه عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز معکوس (RO) در پساب صنعتی (لشگری و همکاران، ۱۴۰۱)

نوع غشا	فشار عملیاتی (بار)	دبی خوراک (لیتر بر ساعت)	شار (لیتر بر مترمربع بر ساعت)	درصد تصفیه (تقریبی)	ملاحظات عملکردی
NF پلی آمید تجاری	۷	۷۲۰	۶۵ – ۹۰	۹۲٪	پس زنی مناسب، شار بالا، مصرف انرژی کمتر
RO پلی آمید تجاری	۷	۷۲۰	۵۵ – ۷۵	۹۸.۵٪	پس زنی بسیار بالا، شار نسبتاً پایین تر، حساسیت بیشتر به فولینگ و نیاز به پیش تصفیه دقیق تر
NF (فشار بالا)	۱۰	۷۲۰	< ۱۰۰	۹۲٪	افزایش شار، اما افزایش محسوس میزان فولینگ و گرفتگی

(مأخذ: برگرفته از لشگری و همکاران، ۱۴۰۱)

یافته های فوق نشان می دهند که در پساب های صنعتی، غشاهای RO اگرچه از نظر پس زنی آلاینده (تصفیه ۹۸/۵ درصدی) بر NF (تصفیه ۹۲ درصدی) برتری دارند، اما این برتری در فشار عملیاتی مشابه (۷ بار) با شار پایین تر همراه بوده است. همچنین، مشاهده شد که افزایش فشار (مثلاً از ۷ به ۱۰ بار) به افزایش شار می انجامد، اما به دلیل افزایش اثر پلاریزاسیون غلظتی و فشردگی غشا، نرخ فولینگ و گرفتگی غشا تشدید می شود. این داده ها تأییدی بر چالش محوری در طراحی سیستم های تصفیه پساب هستند: یافتن تعادلی میان شار و پس زنی آلاینده بدون تسریع فولینگ. این چالش، زمینه را برای ورود مواد متخلخل نانوساختار برای بهبود خواص سطحی و درونی غشاها فراهم می کند.

تأثیر مواد متخلخل نانوساختار بر عملکرد غشاهای NF و UF

یکی از اصلی ترین یافته های این پژوهش، تأیید نقش محوری مواد متخلخل نانوساختار در تغییر ویژگی های عملکردی غشاهاست. تحلیل تطبیقی مطالعات نشان می دهد که اکسید گرافن (GO)، زئولیت و چارچوب های آلی فلزی (MOF/ZIF) هر یک از طریق مکانیزم های مجزا، به بهبود پارامترهای مختلفی در غشاها کمک می کنند (جدول ۳-۹).

جدول ۳: سنتز تحلیلی نقش و عملکرد مواد متخلخل نانوساختار در غشاهای UF/NF

ماده نانوساختار	هدف اصلی اصلاح	مکانیزم بهبود عملکرد	نمونه های شاخص عملکرد (سنتز از ادبیات)
اکسید گرافن (GO)	بهبود شار و مقاومت در برابر فولینگ	افزایش آب دوستی سطح (Hydrophilicity) و اصلاح ساختار حفره ها (Pore Structure)	افزایش شار: افزایش شار از ۹۶ به ۱۳۹ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت (افزایش ۴۵ درصدی در ۰/۵٪ وزنی GO)؛ حذف COD: دستیابی به ۹۶/۱۲٪ حذف COD در پساب نفتی (با غشای PES/GO)

زئولیت	افزایش ظرفیت جذب آلاینده ها	جذب سطحی (Adsorption) انتخابی و تبادل یونی (Ion Exchange)	ظرفیت جذب: جذب Pb(II) تا ۶۸۲ mg/g و Ni(II) تا ۱۲۲ mg/g (بسته به نوع زئولیت و اصلاحات سطح)؛ پایداری: بهبود پایداری حرارتی و شیمیایی غشا
چارچوب های آلی فلزی (MOF/ZIF)	افزایش قابلیت انتخاب پذیری و ظرفیت جذب	تخلخل بسیار بالا (Ultra-high Porosity) و قابل تنظیم، وجود مراکز فعال (Active Sites)	افزایش حجم مؤثر: افزایش حدود ۹ برابری حجم مؤثر تصفیه در غشای MIL-PVDF؛ حذف فلزات: جذب Ni(II) تا ۲۱۹ mg/g (با غشای -/PVDF/PAA/ZIF)؛ حذف رنگ: بیش از ۷۵٪ حذف متیلن بلو

۱. **GO (اکسید گرافن):** اصلی ترین مزیت افزودن GO، که در بیشتر مطالعات دیده شده، افزایش آب دوستی سطح غشاست که منجر به بهبود شار و مقاومت در برابر چسبیدن آلاینده های آلی و هیدروفوب می شود. داده ها نشان می دهند که این بهبود غیرخطی است و میزان بهینه بارگذاری (مثلاً ۰/۵٪ وزنی) وجود دارد که پس از آن عملکرد به دلیل افزایش ویسکوزیته و تجمع ذرات، کاهش می یابد.

۲. **MOF/ZIF & Zeolite:** این مواد به دلیل ساختار متخلخل و مساحت سطح بالای خود، عملکرد غشا را از یک سیستم صرفاً جداسازی فیزیکی به یک سیستم جداسازی/جذب فعال ارتقا می دهند. توانایی های جذب بالای آن ها (مانند جذب Pb(II) با زئولیت یا Ni(II) با ZIF) برای تصفیه انتخابی آلاینده هایی نظیر فلزات سنگین که در NF یا UF معمولی به طور کامل حذف نمی شوند، بسیار حیاتی است.

۳. **غشاهای جاذب (Adsorptive Membranes):** تحلیل داده ها در این زیرمجموعه نشان می دهد که غشاهای جاذب UF، مانند PSF/MWCNT، می توانند راندمان حذف آلاینده های بسیار خاص (مانند Cr(VI) تا ۹۴/۲٪) را به صورت چشمگیری افزایش دهند (مرور کوتاه غشاهای جاذب، بدون تاریخ قابل مشاهده). این داده ها تأکید می کنند که برای پساب های خاص (مانند پساب های معدنی یا فلزی)، استفاده از غشاهای نانوکامپوزیتی که قابلیت جذب شیمیایی دارند، مؤثرتر از تمرکز صرف بر غشاهای NF یا RO با قابلیت پس زنی یونی است.

تحلیل عملکرد در تصفیه پساب های پیچیده و مدیریت فولینگ

مدیریت فولینگ و عملکرد پایدار، محور اصلی تحلیل داده های عملیاتی است. داده ها نشان می دهند که غشاهای اصلاح شده نانوساختار، به ویژه در تصفیه پساب های پیچیده مانند پساب نفتی، عملکرد بهتری نسبت به غشاهای پلیمر خالص نشان می دهند.

الف) عملکرد در پساب های نفتی

در مطالعات مربوط به پساب های نفتی، بهبود قابل توجهی در عملکرد جداسازی گزارش شده است. برای مثال، غشاهای الیاف توخالی پلی اترسولفون (PES) نانوساختار توانسته اند به جداسازی ۱۰۰ درصدی فاز روغنی دست یابند و غشای ۱M با اندازه حفره ۱۵/۶ نانومتر، شار پایداری معادل ۱۲/۴ لیتر بر مترمربع بر ساعت (LMH) داشته است (مطالعات پساب نفتی، بدون تاریخ قابل مشاهده). نکته کلیدی در تحلیل این داده ها، تأکید بر فشار عملیاتی پایین (مانند ۱ بار) به عنوان شرط عملکرد بهینه است. در فشار بالاتر (مثلاً ۲ یا ۳ بار) نرخ فشردگی و گرفتگی به طور چشمگیری افزایش یافته و شار افت می کند. این

داده‌ها دلالت‌های طراحی مستقیمی دارند: طراحی سامانه باید مبتنی بر شار بهینه، و نه ماکزیمم شار، باشد تا عمر مفید غشا حفظ شود.

ب) تحلیل فولینگ با رویکرد مقایسه‌ای (نمودار آماری-تحلیلی)

یکی از نقش‌های اصلی مواد نانوساختار، کاهش میزان و شدت فولینگ است. برای مقایسه نسبی تأثیر این مواد، بر اساس سنتز تحلیلی داده‌های گزارش‌شده در ادبیات پژوهشی (از جمله شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶ و خویردین و همکاران، ۲۰۲۵) تدوین شده است. این نمودار، بهبود نسبی گزارش‌شده در دو شاخص کلیدی «افزایش شار پایداری» و «کاهش افت شار (فولینگ)» را در مقایسه با غشاهای پایه پلیمری متناظر نشان می‌دهد.

ج) نقش Tight-UF و MBR در پایداری بلندمدت

یافته‌های پژوهشی مانند پوتو تتا و همکاران (۲۰۲۵) و خویردین و همکاران (۲۰۲۵) بر اهمیت فناوری‌های مکمل برای پایداری بلندمدت تأکید دارند.

- **Tight-UF:** این غشاها (با MWCO بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ دالتون) توانسته‌اند با حفظ شار نسبتاً بالا، درصد حذف بالایی را برای کدورت (تا ۹۹٪) و رنگ (تا ۹۸٪ در نمونه‌های سرامیکی) ارائه دهند. این غشاها به‌عنوان یک پیش‌تصفیه قوی برای NF/RO یا به‌عنوان یک سیستم تصفیه نهایی، می‌توانند بار آلاینده‌ی ورودی به غشاهای نانوفیلتراسیون را به‌شدت کاهش داده و در نتیجه، نرخ فولینگ را کنترل کنند.

- **MBRهای نسل آینده:** این سامانه‌ها با تلفیق زیست‌راکتور و غشاهای نانوکامپوزیتی، رویکردی سیستمی برای مدیریت فولینگ ارائه می‌کنند. مطالعات (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵) نشان داده‌اند که استفاده از غشاهای اصلاح‌شده با نانوذرات (به‌ویژه برای ویژگی‌های ضد میکروبی یا کاتالیزوری) در MBR می‌تواند نرخ رشد لایه بیوفولینگ را کاهش دهد و نیاز به شست‌وشوهای شیمیایی مکرر را کم کند.

شکاف‌ها و محدودیت‌های داده‌های عملکردی

تحلیل داده‌ها، علی‌رغم نتایج امیدبخش، دو محدودیت عمده در ادبیات پژوهش را آشکار ساخت که بر دلالت‌های طراحی تأثیر می‌گذارد:

۱. **غلبه مطالعات آزمایشگاهی و خوراک سنتزی:** بخش بزرگی از داده‌های مربوط به GO، زئولیت و MOF بر روی محلول‌های تک‌آلاینده یا خوراک‌های سنتزی با غلظت ثابت به‌دست آمده‌اند. این داده‌ها نتوانسته‌اند به‌طور کافی پیچیدگی‌های پساب واقعی (مانند اثر هم‌زمان یون‌ها، مواد آلی، کلونیدها و تغییرات pH) را منعکس کنند. داده‌هایی که از پساب واقعی (مانند مطالعات نفتی یا عسلویه) به‌دست آمده‌اند، معمولاً شار پایین‌تر و نرخ فولینگ بیشتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی گزارش می‌کنند.

۲. **فقدان داده‌های بلندمدت و اقتصادی:** داده‌های مربوط به پایداری مکانیکی، نشأت نانوذرات در چرخه‌های شست‌وشو و بازیابی، هزینه تمام‌شده غشا (LCC) و مصرف انرژی عملیاتی (OPEC) در غشاهای نانوکامپوزیتی بسیار محدود است. این فقدان داده، مهم‌ترین عامل در شکاف انتقال از آزمایشگاه به صنعت محسوب می‌شود (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶). بدون این داده‌های اقتصادی و پایداری بلندمدت، طراحی بهینه سامانه در مقیاس صنعتی با ریسک بالا همراه خواهد بود.

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحلیل تطبیقی مطالعات معتبر (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶) تأییدکننده این نکته اساسی است که فناوری فیلتراسیون غشایی، به ویژه در ترکیب با مواد متخلخل نانوساختار، راهکاری کلیدی برای مقابله با بحران آب و پیچیدگی های روزافزون پساب های صنعتی است. هدف این پژوهش، فراتر از معرفی مواد جدید، ارائه چارچوبی تحلیلی برای طراحی سامانه های تصفیه پساب با استفاده از غشاهای اصلاح شده بود. یافته ها، چالش بنیادین در طراحی غشا یعنی تعادل میان شار، درصد حذف و فولینگ را به عنوان نقطه آغازین تأیید می کنند. در این راستا، مقایسه غشاهای اسمز معکوس (RO) و نانوفیلتراسیون (NF) در تصفیه پساب صنعتی عسلویه (لشگری و همکاران، ۱۴۰۱) نشان داد که در حالی که RO با ۹۸/۵ درصد، حذف بالاتری دارد، این برتری با شار کمتر و حساسیت بیشتر به گرفتگی همراه است. در مقابل، غشاهای NF با ۹۲ درصد تصفیه و شار بالاتر، پتانسیل بیشتری برای عملیاتی شدن با اصلاحات سطحی و درونی دارند تا خلأ عملکردی میان خود و RO را کاهش دهند. در واقع، مواد نانوساختار دقیقاً برای همین منظور طراحی شده اند: بهبود عملکرد NF/UF تا حد نزدیک شدن به عملکرد RO، بدون تحمیل هزینه های عملیاتی و انرژی بالای RO.

در این زمینه، یافته ها نقش محوری سه دسته از مواد را نشان دادند. اکسید گرافن (GO) با افزایش چشمگیر آب دوستی، توانایی فوق العاده ای در بهبود شار و کنترل فولینگ برگشت پذیر به نمایش می گذارد؛ این اثر در مطالعات پساب نفتی مشاهده شد، جایی که بارگذاری بهینه GO (۰/۵٪ وزنی) منجر به افزایش شار از ۹۶ به ۱۳۹ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت و حذف COD تا ۹۶/۱۲ درصد گردید. این نتیجه با ادبیات گسترده در زمینه بهبود هیدروفیل بودن و کاهش جذب آلاینده های آلی توسط غشاهای GO-PES همسو است (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶). با این حال، افزایش بیش از حد GO به دلیل تجمع و کاهش یکنواختی منافذ، تأثیر منفی بر عملکرد می گذارد که نشان دهنده لزوم کنترل دقیق در فرایند ساخت است.

از سوی دیگر، زئولیت ها و چارچوب های آلی فلزی (MOF/ZIF) جداسازی را از فیلتراسیون صرف به جذب فعال تغییر می دهند. ظرفیت جذب بالای زئولیت برای فلزات سنگین (مانند Pb(II) تا ۶۸۲ میلی گرم بر گرم) و MOF/ZIF برای نیکل (II) تا ۲۱۹ میلی گرم بر گرم، مزیت کلیدی آن ها در تصفیه انتخابی پساب هایی است که حاوی فلزات سنگین یا آلاینده های میکروسکوپی هستند (بررسی اجمالی غشاهای جاذب، PMC ۹۱۴۴۷۸۰). این مواد، که بیشتر در سطح نانوفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون جاذب (Tight-UF) کاربرد دارند، در حذف انتخابی آلاینده هایی که صرفاً با مکانیزم های دفع اندازه/بار الکتریکی جدا نمی شوند، تعیین کننده اند. تلفیق این مواد در غشاهای نانوکامپوزیتی، نه تنها به پایداری مکانیکی کمک می کند، بلکه با افزایش حجم مؤثر تصفیه (مثلاً افزایش ۹ برابری در غشای MIL-PVDF)، کارایی کلی سامانه را بالا می برد.

با این حال، مقایسه داده های ناهمگون موجود در ادبیات، محدودیت های جدی در مسیر انتقال فناوری از آزمایشگاه به صنعت را آشکار می سازد. بخش عمده ای از موفقیت های گزارش شده در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از محلول های سنتزی با ترکیب کنترل شده به دست آمده است. این امر با نتایج عملیاتی در پساب های واقعی در تضاد است؛ برای مثال، در تصفیه پساب نفتی مشاهده شد که هرچند شار بالایی حاصل می شود، اما عملکرد بهینه شده به فشار عملیاتی پایین (۱ بار) وابسته است و افزایش فشار به فشردگی و گرفتگی شدید می انجامد. این حساسیت به شرایط عملیاتی (مانند فشار و نوع پساب) شاهدهی است بر این مدعا که داده های عملکردی کوتاه مدت یا آزمایشگاهی نمی توانند به تنهایی مبنای طراحی سیستم های صنعتی قرار گیرند. این یافته با نتیجه گیری مطالعات مروری اخیر مبنی بر وجود شکاف های جدی در داده های پایداری، مقیاس پذیری و اقتصاد چرخه عمر (LCA) هماهنگ است (شاهچراغی و همکاران، ۲۰۲۶؛ خویردین و همکاران، ۲۰۲۵).

در نهایت، نتیجه‌گیری کلان این پژوهش این است که طراحی سیستم‌های تصفیه پساب مبتنی بر مواد متخلخل نانوساختار باید از یک رویکرد تک‌بعدی به سمت یک رویکرد سیستمی و یکپارچه تغییر جهت دهد. این رویکرد مستلزم به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند Tight-UF با قابلیت حذف ۹۹ درصدی کدورت به‌عنوان پیش‌تصفیه، و سپس استفاده از NF یا MBR با غشاهای نانوکامپوزیتی (GO برای شار و MOF/ZIF برای حذف انتخابی) است (پوتو تتا و همکاران، ۲۰۲۵). چنین طراحی سیستمی، نه تنها عملکرد را افزایش می‌دهد، بلکه از طریق کنترل فعال فولینگ در MBRهای نسل آینده (خویردین و همکاران، ۲۰۲۵)، پایداری عملیاتی را تضمین می‌کند.

محدودیت اصلی این پژوهش به‌عنوان یک مطالعه تحلیلی ثانویه، عدم دسترسی به داده‌های یکسان تحت پروتکل‌های آزمون واحد است، که مانع از اعمال آزمون‌های آماری قوی و تعمیم‌دهنده گردید. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی تمرکز خود را بر حوزه‌های زیر معطوف سازند تا شکاف انتقال فناوری از آزمایشگاه به صنعت پر شود:

۱. **استانداردسازی پروتکل‌های آزمون** برای گزارش‌دهی داده‌های بلندمدت (بیش از ۱۰۰۰ ساعت) درباره فولینگ برگشت‌ناپذیر، نرخ بازیابی و مصرف انرژی عملیاتی (OPEC).

۲. **تحقیقات زیست‌محیطی دقیق** در زمینه نشت و پایداری نانوذرات (MOF/ZIF، GO) در چرخه‌های شست‌وشو و تأثیر آن‌ها بر خروجی پساب تصفیه‌شده.

۳. **مدل‌سازی‌های فنی-اقتصادی (Techno-Economic Modeling)** جامع برای مقایسه هزینه تمام‌شده چرخه عمر سامانه‌های نانوکامپوزیتی با روش‌های تصفیه متداول در مقیاس صنعتی.

در یک جمع‌بندی نهایی، مواد متخلخل نانوساختار، اجزای ضروری در معماری جدید تصفیه پساب هستند، اما موفقیت پایدار آن‌ها وابسته به گذر از مطالعات اثبات مفهومی (Proof-of-Concept) و ورود به فاز داده‌محور، استانداردسازی شده و اقتصادی است که در آن، عملکرد غشا در شرایط سخت عملیاتی سنجیده شود تا در نهایت بتوان به طراحی سامانه‌هایی با پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی دست یافت.

منابع

- تصفیه پساب‌های نفتی با استفاده از غشای نانوساختار الیاف توخالی پلی‌اتر سولفون. (بی‌تا). بازیابی شده از نشریه مطالعات نانو ساختارها
- لشگری، م.، لشگری، ن.، کشاورز، ا.، و عیسوندی، م. (۱۴۰۱). بررسی و مقایسه عملکرد غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در تصفیه پساب صنعتی عسلویه. *مجله آب و فاضلاب*، ۳۳(۱)، ۱-۱۲.
- مطالعه تجربی تصفیه پساب نفتی با استفاده از غشاء نانوساختار پلی‌اتر سولفون. (بی‌تا). نشریه *فرآیند نو*.
- بررسی تأثیر افزودن نانوذره اکسید گرافن بر عملکرد غشای پلی‌اتر سولفون برای تصفیه پساب نفتی. (بی‌تا). نشریه *فرآیند نو*.

- Khoiruddin, K., Boopathi, S., Kawi, S., & et al. (2025). Towards Next-Generation Membrane Bioreactors: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Current Pollution Reports*, 11, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s40726-025-00345-x>

- Li, J., & et al. (2017). Building additional passageways in polyamide membranes with hydrostable metal organic frameworks to recycle and remove organic solutes from various solvents. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(44), 38877–38886. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b07373.s001>
- Mohammad, A. W., & et al. (2019). Synthesis of polyethersulfone (PES)/GO-SiO₂ mixed matrix membranes for oily wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 81(7), 1354–1364. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.347>
- Nasrollahi, N., & et al. (2020). Performance improvement of polyethersulfone ultrafiltration membrane containing variform inorganic nano-additives. *Polymer*, 188, 122160. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122160>
- Putu Teta, P., Prihartini Ariyanti, D., Febrianto Adi Nugroho, A., Gracia Logito, M., & Khoiruddin, K. (2025). Tight ultrafiltration membranes: Advancing separation technologies for water and wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 367, 132892. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132892>
- Recent Progress of Adsorptive Ultrafiltration Membranes in Water Treatment—A Mini Review. (2022). *Membranes (Basel)*, 12(6), 563. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9144780/>
- Shahcheraghi, M., Shafiee, M., Moazamfayee, R., & Namjoofar, G. (2026). Advancements and applications of nanomembranes for sustainable wastewater treatment: A technical perspective. *Applied Research in Water and Wastewater*. <https://doi.org/10.22126/arww.2026.11681.1353>
- Vatanpour, V., & et al. (2020). Synthesis of clay-based ultrafiltration membranes supported on natural zeolite for removal of heavy metals from wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100794. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100794>